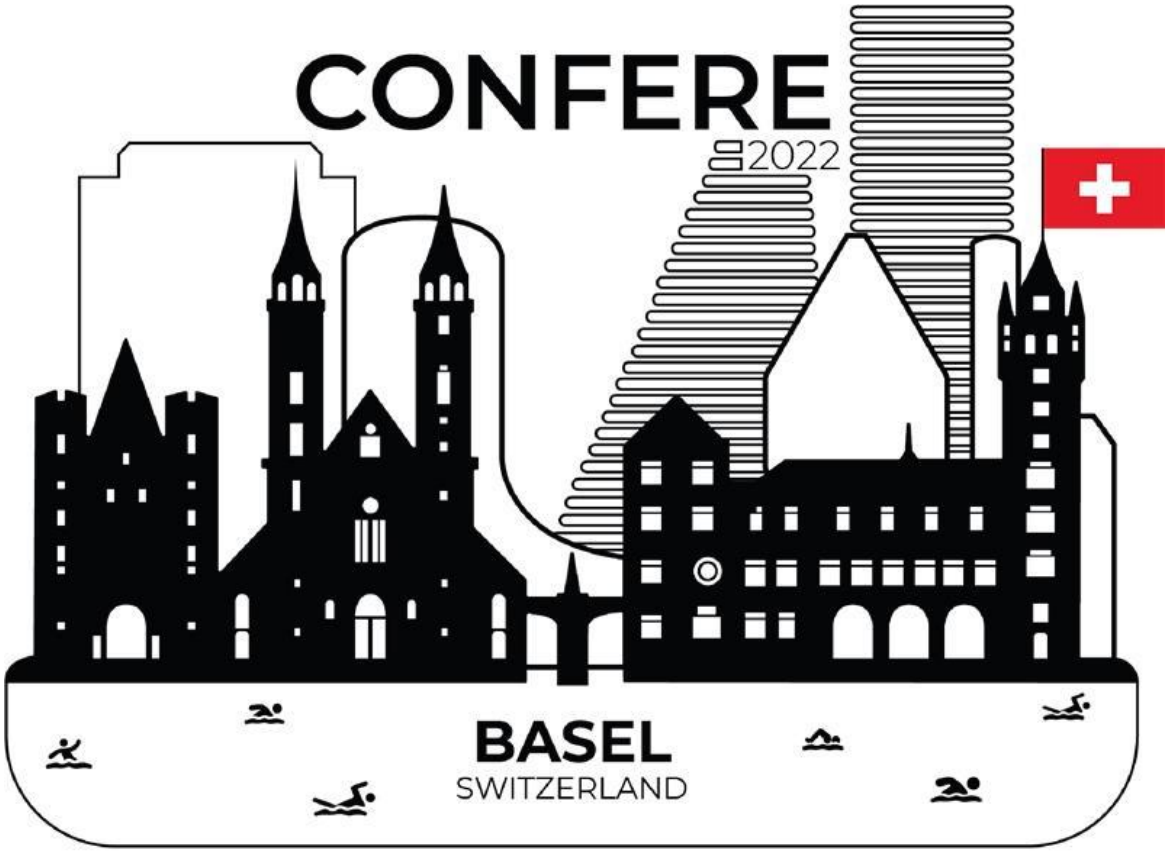
Actes
CONFERE 2022

29ème colloque des sciences de la conception et de l'innovation

7 et 8 juillet 2022



Arts et Métiers Sciences et Technologies

Laboratoire Conception Produits Innovation

AM VALOR
Arts et Métiers - Sciences et Technologies

Table des matières

AGNES et al. : LES HANDICAPS AU TRAVERS DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR

ANTUNES et al. : CONCEPTION D'UNE EXPERIENCE DE SOIN PERSONNALISEE AVEC UNE CREME MINIMALISTE

ARTHUS et al. : LA TRAJECTOIRE DE L' HABITAT EN FRANCE

BERTRAND et al. : SANTÉ ET HANDICAP: COMMENT IMPLIQUER L'UTILISATEUR FINAL DANS LA CONCEPTION DE MATÉRIEL MÉDICAL ?

BISSON et al. : EVALUATION D'UN ENVIRONNEMENT VIRTUEL POUR L'APPRENTISSAGE HUMAIN DANS LE CADRE D'UNE FORMATION PROFESSIONNELLE POUR L'INDUSTRIE TEXTILE

BLOC'H et al. : AUGMENTATION DE L'ÉCHELLE D'UN PROCÉDÉ INNOVANT DE CULTURE DE MICROALGUES VISANT À CAPTER LE CO2 DÉGAGÉ PAR UN MÉTHANISEUR

CAMARA et al. : KNOWLEDGE BASED ENGINEERING: SYSTEMATIC REVIEW AND OPPORTUNITIES

CATEL et al. : L'INFLUENCE DES RESSENTIS DES PARTICIPANTS PENDANT LES WORKSHOPS SUR LA MODIFICATION DURABLE DES FAÇONS DE TRAVAILLER DES EQUIPES

CAUDAL et al. : HOW TO IMPROVE THE CONTROL PROCESS OF DIGITAL MOCK-UPS FOR AN INDUSTRIAL DEPLOYMENT OF BIM OPERATION MAINTENANCE MANAGEMENT ?

COLLAS et al. : LE « NUDGE » POUR INFLUENCER LES DEPLACEMENTS DANS UN POINT DE VENTE

DAUVERGNE et al. : PROJECT SELECTION BY APPLYING THE AHP AND AHP WITH PIVOT METHODS

de CASANOVE et al. : A PROPOSAL OF C-K & TRIZ SYMBIOSIS AS A LEVER FOR PRODUCT INNOVATION

de ROCHEGONDE et al. : THE IDEA'TEAM, A CREATIVE TEAM&METHOD TO QUICKLY INNOVATE IN A COMPLEX AND TECHNICAL INDUSTRY

ECKERT et al. : THE CREATION OF AN IN-VITRO MODEL – AN INTERDISCIPLINARY CHALLENGE

FAVETO et al. : LEAN APPROACH TO FOSTER ADDITIVE MANUFACTURING IN SUSTAINABLE DESIGN: A METHODOLOGICAL PROPOSAL

FRON et al : MÉTHODE D'AMÉLIORATION DE L'INTEGRATION EXPÉRIENCE UTILISATEUR DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION : APPLICATION À L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

GIDEL et al. : MÉTHODE HYBRIDE DE MANAGEMENT DE PROJET : EST-IL POSSIBLE DE COMBINER LA RIGUEUR ET L'AGILITÉ DANS LES GRANDS PROJETS INDUSTRIELS ?

GLOTIN et al. : DREAM: DESIGN RULES EXTRACTOR FOR ADDITIVE MANUFACTURABILITY, PROCESSING OF NATURAL LANGUAGE AND FREE-HAND SKETCHES

GUILLE et al. : METHODE DE VISUALISATION DE DONNEES 3D ET DE LOCALISATION POUR LA CONCEPTION D'UNE INTERFACE DE COMMANDE D'UN DRONE AQUATIQUE DE SURFACE (USV)

ICARDO et al. : FORMALISATION D'UN MODELE METHODOLOGIQUE STRUCTURANT POUR LA CREATION DE VALEUR BASEE SUR L'APPROCHE DESIGN THINKING

JAGER et al. : VIRTFAC, VERS UN JUMEAU NUMERIQUE D'USINE

KHANDAR et al. : INVESTIGATION OF THE VIABILITY OF COLD SPRAY COATING OF A SUBLAYER-BASED CFRP COMPOSITE

KOEGLER et al. : HOW TO IMPROVE THE PACKAGING OF VACUUM CLEANER ACCESSORIES TO ENHANCE CONSUMER COMPREHENSION: AN EYE-TRACKING STUDY

KRIER et al : OPTIMISATION DE LA COORDINATION SANITAIRE ET SOCIALE D'UN TERRITOIRE : PROPOSITION METHODOLOGIQUE - APPLICATION AU PROJET TSN SANTE LANDES

LA ROZE et al : BONNE PRATIQUE POUR CONCEVOIR UNE COQUE D'UN DRONE AQUATIQUE DE SURFACE (USV)

LAMEH et al. : DIGITALISATION FOR A TERRITORIAL CIRCULAR ECONOMY: TOWARDS AN INTEGRATED PLATFORM

LASSERRE et al : HOW TO CHALLANGE AN EXISTING TECHNOLOGY WITH DIFFERENT INPUTS

LETAILLEUR et al. : L'OPTIMISATION PAR ESSAIS ET ERREURS DE L'APPRENTISSAGE PROFOND PAR RENFORCEMENT DANS LES JEUX VIDEOS

MASSOT et al . : ECO-DESIGN MATURITY MODEL: PROPOSAL TO FOSTER ECO-DESIGN INTEGRATION IN DRUG DEVELOPMENT

MIRAFZAL et al. : EXTENDED SUMMARY: A STATE-OF-THE-ART ON HOW KNOWLEDGE MANAGEMENT IMPROVES CONSULTANTS' PERFORMANCE

NAVARI et al : DRIVING INNOVATION AT EACH LEVEL: A METHODOLOGY FOR LARGE FIRMS.

POMMERET et al. : ETUDE ET RECHERCHE D'UN SERVICE D'AMENAGEMENT DE JARDIN ACCESSIBLE A TOUS

RIASCOS et al. : CONCEPT OF DIGITAL TWIN FOR MEDICAL DEVICES

RICHARD et al. : L'INNOVATION TRANSVERSALE

RIVIERE et al. : UN MODELE DE CONCEPTION CENTREE UTILISATEUR D'UN SERIOUS GAME POUR LA PREVENTION DES TMS

SAYETTAT et al. : EFFETS OF MARINE POYSACCHARIDES FROM TUNISIAN AND BRITTANY SEASHORE BIODIVERSITY ON DERMAL FIBROBLAST PROLIFERATION AND MATRIX METALLOPROTEINASES SECRETION

TAVERNIER et al. : CONCEPTION D'UN SYSTEME DE DRAGAGE AUTONOME

TREFEU et al. : CASSAGE DE MOTS DE PASSE : LES PHRASES DE PASSE COMME ALTERNATIVE

VAUZALAEI et al. : THE ROLE OF PROJECT MANAGERS EXPERIENCE IN SUCCESS OF INNOVATIVE COMPLEX PROJECT

ZAIM-MOUNAJED et al. : IMPROVEMENT OF COLD SPRAY NOZZLE FOR AN OPTIMISED DEPOSITION EFFECIENCY

ZHANG et al. : INVESTIGATION OF THE VIABILITY OF COLD SPRAY COATING OF A SUBLAYER-BASED CFRP COMPOSITE

LES HANDICAPS AU TRAVERS DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR

Lucas AGNES

CESI École d'ingénieur - Rouen

Résumé : Cet article a pour objectif d'analyser et de comprendre la situation des personnes en situation de handicap sur le territoire français, les enjeux de l'accessibilité pour tous dans le domaine du numérique, tout en étudiant les solutions qui leur permettraient d'être mieux intégré sur les plateformes web en ayant une meilleure expérience utilisateur lorsqu'ils naviguent sur des sites internet, ou des applications.

Mots clés : Accessibilité ; Handicaps ; Expérience Utilisateur ; Interface Web.

1 INTRODUCTION

Dans une ère où l'importance du numérique ne fait qu'accroître, il est important que tout ce qui constitue le domaine digital soit accessible pour tous. En 2021 sur le territoire français, parmi les 65,2 millions d'habitants présents, 85% d'entre eux sont des internautes, soit environ 53,5 millions de résidents selon l'étude de Mediametrie [1], spécialisé dans la mesure d'audience et des usages numériques. Il est désormais plus que compliqué de vivre sans numérique au sein du pays, c'est d'ailleurs pour cette raison qu'aujourd'hui, 92% des foyers français possèdent une connexion internet [2]. De plus, depuis la pandémie mondiale du virus Covid-19, de la propagation de tous ses variants à travers tout le territoire, la mise en place de télétravail à grande échelle était nécessaire afin de permettre aux entreprises et aux institutions de continuer leurs activités professionnelles et économiques. En 2020, 25% des salariés français travaillaient en distanciel. [3] Ces événements regrettables ont tout de même permis de développer encore plus la présence du numérique au sein de la population résidant en France.

Parallèlement à cette augmentation de l'utilisation du numérique et d'internet, on compte en France actuellement 2 750 000 personnes qui souffrent d'au moins une limitation fonctionnelle. Parmi eux, 420 000 ont une reconnaissance administrative de handicap, 420 000 déclarent également un handicap ressenti, et 730 000 qui cumulent les trois formes de handicap selon l'INSEE [4]. Cette étude nous apprend également que 4,3 millions de personnes qui ont entre 20 et 59 ans ont des limitations fonctionnelles, une reconnaissance administrative de handicap ou un handicap ressenti et vivent donc à domicile. Cela représente donc un adulte sur sept. La France compte également 428 000 enfants handicapés dont 361 000 enfants scolarisés en milieu ordinaire [5].

Face à l'explosion du numérique et à l'impossibilité de se passer d'une connexion internet de nos jours, il parait évident que toutes ces personnes auraient pour la plupart besoin d'interfaces web personnalisées et adaptées à leurs handicaps afin de pouvoir utiliser ces outils numériques essentiels beaucoup plus facilement. De nos jours, l'accessibilité des services digitaux par les personnes en situation de handicaps est loin d'être placée au centre des attentions et des innovations.

C'est donc pour cette raison que nous allons nous intéresser à l'expérience utilisateur pour les personnes en situation de handicap. A travers cette étude, nous allons répondre à la problématique suivante : comment sont pris en compte les handicaps d'une certaine partie de la population, et quelles sont les solutions pour mieux les intégrer. Après avoir réalisé un état de l'art des interfaces et adaptations numériques existantes auprès des personnes incapables d'avoir une interaction et une expérience normale avec le numérique, nous allons proposer des nouvelles solutions et des pistes à explorer pour faciliter la vie de ces personnes, ou en déterminer la faisabilité et l'utilité réelle.

2 ÉTAT DE L'ART

Il est important d'analyser les mises en place que l'on peut trouver ou non, les handicaps concernés et par conséquent effectuer un état de l'art des interfaces et adaptations numériques existantes. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux personnes souffrant de handicap cognitif. Afin de comprendre cette notion, l'Association pour l'insertion sociale et professionnelle des personnes handicapées (LADAPT) nous explique que le handicap cognitif correspond à une situation de handicap découlant de dysfonctionnements des activités cognitives d'une personne (qu'elles soient intellectuelles mais aussi émotionnelles). Les activités cognitives proviennent de l'activité mentale et regroupent les capacités d'action, d'apprentissage et d'adaptation. On parle donc de mémoire, de langage, d'attention, de réalisation d'un geste, de raisonnement, mais aussi de résolution de problème. Le handicap cognitif peut donc se résumer aux conséquences fonctionnelles sur la vie sociale des perturbations des activités mentales. [6] Les personnes souffrants de handicaps cognitifs rencontrent des difficultés au niveau de la mémoire et l'apprentissage, la résolution des problèmes, l'organisation et la planification des activités de la vie quotidienne, l'attention et la concentration, la compréhension des mathématiques et aussi tout ce qui concerne l'adaptation comportementale [7].

Mais ce qui va réellement nous intéresser dans les difficultés éprouvées par les personnes souffrants de handicaps cognitifs, ce sont dans un premier temps les problèmes de compréhension et l'exploration visuelle comme par exemple le fait de ne pas réussir à reconnaître un visage familier, ou des lettres, mal identifier des objets (Comme par exemple de voir des vers alors que ce sont des spaghettis) [8], ou encore de chercher des objets visibles sans les trouver, mais aussi dans un second temps les difficultés autour de la lecture, du langage et de la compréhension verbale et explicative, la compréhension de l'humour au second degré. Quand une personne souffre d'handicaps cognitifs, il aura également tendance à répondre à côté du sujet, d'avoir des problèmes pour mener une conversation sans en perdant le but ou encore pour suivre une conversation entre plusieurs personnes. Tous ces problèmes peuvent affecter leur expérience sur le web [9].

Plusieurs études se sont donc penchées sur l'expériences utilisateur sur le web des personnes souffrant de handicaps cognitifs. Certains chercheurs ont conclu que les directives actuelles relatives au Web ne répondent pas aux besoins des utilisateurs souffrant d'un handicap cognitif et ont demandé que des recherches supplémentaires soient menées sur la manière dont ces handicaps affectent l'expérience utilisateur sur le web de ces personnes. Hans Christian Andersen et Herbert Rowland ont travaillé avec des acteurs du domaine des troubles de l'apprentissage [10], comme par exemple des éducateurs, des étudiants et des parents, afin d'élaborer une liste de spécifications techniques permettant d'évaluer la charge cognitive de sites internet. Il existe de nombreux ensembles de recommandations pour la conception de sites Web accessibles qui tiennent compte de l'expérience des utilisateurs dyslexiques.

Des travaux ont également été réalisé par Gartland et al [9]. Ils se concentrent pour la plupart d'entre eux sur l'éducation et le développement des aptitudes du quotidien mais aussi sur les origines neurologiques du handicap. Les supports pédagogiques s'intéressent particulièrement aux efforts effectués par les jeunes pour décoder un texte, tandis que ceux concernant les tâches et le savoir du quotidien se concentrent sur l'objectif de la personne en situation de handicap de tenter et de réussir à s'adapter à une société non dyslexique. [11]
Cependant, aucune des approches réfléchies connues [12] pour améliorer leur vie et leur quotidien ne se préoccupe réellement de la manière dont ces personnes interagissent avec les ordinateurs et ne proposent de conclusions fondées sur la recherche pour améliorer l'accessibilité des sites internet aux utilisateurs atteint de dyslexie, et c'est un réel problème. Toutefois, une piste de solution existe. Dans le domaines de l'éducation, certaines recherches ont démontré qu'en fonction du support informatique les performances des étudiants dyslexiques pouvaient être fortement affectés. De meilleurs résultats étaient obtenus lorsqu'un élève atteint de dyslexie avait comme ressources des fichiers audios, des images, et des diagrammes. Alors que lorsqu'il avait à sa disposition uniquement des documents textuels, les résultats étaient en nette baisse. C'est donc grâce à cette étude que des tendances ont commencé à émerger en suggérant que tous les utilisateurs peuvent bénéficier de sites Web adaptés à la dyslexie.

3 MÉTHODOLOGIE

Afin de comprendre comment faciliter au quotidien l'accès au domaine du numérique aux personnes en situation de handicap, nous avons mis en place une méthodologie de recherche en nous appuyant sur la méthodologie SWOT [13]. A l'aide de mots-clés définis, de protocole de recherche et de paramètres, les maladies sont toutes analysées afin de trouver des solutions correspondant à chaque handicap. Pour obtenir une solution technique en termes d'expérience utilisateur pour personne en situation de handicap et implémenter cette solution dans l'interface d'une plateforme, il faut comprendre le handicap, et déterminer sur quel sens va-t-il agir lors de la navigation sur un site internet ou un application mobile, et de quelle manière.

Pour mener cette analyse, et déterminer des résultats qui permettraient aux personnes en situation de handicap, nous allons dans la mesure du possible éviter de nous appuyer sur des articles datant de plus d'une quinzaine d'année pour être le plus à jour possible au niveau des avancées et recherches scientifiques.

Il est important de s'appuyer également sur le travail des entreprises qui se spécialisent dans l'accessibilité au service du domaine numérique, mais également des lois en vigueur visant à rendre possible une navigation internet adaptée aux personnes en situation de handicap.

Les solutions techniques aux handicaps ne sont pas globales et il faut faire du cas par cas pour comprendre chaque handicap répandu et proposer une modification de l'interface utilisateur pour leur proposer une meilleure expérience utilisateur, plus adaptée à leurs besoins.

4 RÉSULTATS ET ANALYSE

En France, une startup du nom de FACIL'iti a vu le jour en 2010 avec pour principal objectif de proposer un ensemble de solution adaptant l'affichage d'un site internet, en fonction des besoins moteurs, visuels et cognitifs de l'utilisateur, dans une volonté de rendre l'accès au web et au monde digital égal à tous. Le concept est donc de faire en sorte que n'importe quel internaute souffrant d'un handicap puisse bénéficier d'une meilleure accessibilité aux sites en activant, selon ses besoins, un ou plusieurs paramètres. Après cinq ans de recherche et de développement primordiaux afin de créer la solution, mais aussi cinq années nécessaires pour s'entretenir et dialoguer avec les associations handicap référentes en France, l'équipe technique de FACIL'iti a validé les besoins auprès des usagers atteints de handicaps cognitifs au travers de tests utilisateurs [14] [15].
FACIL'iti, rend donc l'affichage des pages web plus accessible aux personnes sujettes aux difficultés de navigation ou en recherche de confort. Cela permet aux entreprises d'ouvrir leurs structures, leurs services et/ou leurs produits à une cible d'internautes plus large, tout en militant pour une accessibilité au web pour tous. De nombreuses fonctionnalités pour accompagner plusieurs formes de besoins visuels, moteurs, cognitifs et/ou temporaires sont proposés. A l'échelle mondiale, l'entreprise Equalweb [16] est aussi spécialisée dans le domaine, rendant accessible pour la plupart des formes de handicap les sites de leur clients, comme par exemple tous les sites et pages web du gouvernement de la république française. Chaque handicap est traité différemment pour rendre plus accessible la plateforme et son expérience utilisateur.

Pour lutter contre les difficultés liées à l'achromatopsie [17] qui est une forme de daltonisme provoquant une déficience totale au niveau du discernement des couleurs, il est nécessaire d'adapter l'interlignage du contenu textuel du site pour garantir le confort de lecture de cette catégorie d'utilisateur tout en modifiant la colorimétrie de la page afin de garantir un contraste suffisant entre les fonds et les textes. Ces solutions peuvent également servir à rendre plus agréable la navigation pour des personnes souffrant de cataracte, une zone trouble dans le cristallin de l'œil qui entraîne une diminution de la vision. Ce handicap se développe lentement et a pour symptômes des couleurs délavées, une vision floue ou double, des halos autour de la lumière, des difficultés avec les lumières vives et des difficultés à voir la nuit. Cette maladie peut entraîner des difficultés à conduire, à lire ou à reconnaître les visages. Ces solutions sont applicables pour toutes les autres formes de daltonisme.

L'arthrose est une maladie souvent liée au vieillissement qui provoque des raideurs et des blocages empêchant des mouvements souples et fluides [18]. Pour rendre accessible une plateforme aux personnes atteintes de cette pathologie, il est important pour une expérience utilisateur plus efficace que les zones cliquables du site soient définies de taille plus grandes et de manière plus espacées. Plusieurs maladies peuvent entraîner des gestes imprécis à cause d'un état de stress, d'une prise de médicaments, d'une fracture, ou encore d'un accident de la vie Toutes ces choses qui provoquent un manque de précision des mouvements qui est également ajusté avec des zones cliquables plus larges.

Il est également important de prendre en considération les patients souffrant de la maladie de Parkinson. Selon le ministère des Solidarités et de la santé [19], la maladie de Parkinson est une affection chronique neurodégénérative qui se caractérise par la disparition progressive de certains neurones dans le cerveau humain. La première conséquence de cette disparition neuronale est la baisse de production de dopamine localisée sur une zone essentielle au contrôle des mouvements. C'est donc pour cette raison que la maladie de Parkinson est une maladie qui touche les fonctions motrices. Les symptômes de la maladie de Parkinson sont caractéristiques, même s'ils peuvent être variables d'un patient à l'autre. On observe une difficulté à initier un mouvement (akinésie), mais également un ralentissement des gestes, une écriture de plus en plus petite et difficile, une rigidité des membres, bras ou jambe (hypertonie) ou encore des tremblements caractéristiques qui apparaissent au repos, lorsque les muscles sont relâchés, de façon plutôt asymétrique. Il faut savoir que la maladie de Parkinson est la deuxième maladie neurodégénérative la plus répandue en France après la maladie d'Alzheimer, mais aussi la deuxième cause de handicap moteur chez l'adulte après les accidents vasculaires cérébraux.
Pour faire face aux conséquences de ce handicap répandu lors de l'expérience utilisateur, il est important de modifier les zones cliquables en les agrandissant et en les espaçant pour réduire les potentielles erreurs de clics.

Ensuite, l'épilepsie est une maladie neurologique caractérisée par la répétition de crises épileptiques. On compte plus de 600 000 individus souffrant d'épilepsie en France, dont pratiquement la moitié sont âgées de moins de 20 ans, et à l'échelle internationale, le nombre de personnes souffrant de crises épileptiques serait de 50 à 100 cas pour 100 000 habitants en fonction des pays, soit au total plus de 60 millions de malades à travers le monde [20]. Dans notre cas, nous allons parler de l'épilepsie photosensible qui est une forme d'épilepsie spéciale, provoquée par des stimuli lumineux caractéristiques pour les utilisateurs sensibles à la lumière et à la répétition de signaux lumineux comme par exemple les stroboscopes. Afin d'éviter de provoquer ces crises, il faut donc adapter l'interface utilisateur en évitant et supprimant les contenus animés pour les personnes souffrant de crises d'épilepsie photosensible récurrentes.
Certains utilisateurs sont atteints de la maladie de Wilson, une affection génétique assez rare qui est très souvent liée à une accumulation du cuivre au sein de l'organisme (dans le foie, le cerveau, le système nerveux et même la cornée de l'œil) [21]. Cette accumulation va générer des troubles des tremblements aux bras, à la tête, et dans les jambes qui peuvent grandement gêner la navigation sur les pages web. Même si peu de personnes sont atteintes de cette maladie (3 personnes sur 100 000 en France), il ne faut pas les négliger pour autant, en leur facilitant l'accès au web avec une interface qui modifie les zones cliquables mais également la couleur des fonds (plus foncée) et la couleur des textes (plus claire) en assurant un contraste suffisant.

Une autre maladie peu connue du grand public et qui n'est pas la première à venir à l'esprit lorsque l'on pense à la difficulté d'accès à un parcours utilisateur correct d'une page web est la sclérose en plaques. D'après le Ministère français des solidarités et de la santé, la sclérose en plaques est une maladie neurologique et évolutive dite auto-immune du système nerveux central [22]. Cela signifie donc que le système de défense immunitaire normalement impliqué dans la protection et la lutte virale et bactériologique attaque la gaine protectrice des fibres nerveuses que l'on appelle myéline et qui joue un rôle primordial dans la transmission de l'influx nerveux du cerveau à tous les différents membres du corps. Les symptômes de cette maladie sont variés et souvent invisibles mais peuvent entrainer de nombreuses complications pour un utilisateur comme des troubles divers de la vue, des engourdissements, mais aussi des décharges électriques, et des troubles moteurs.

La sclérose en plaques touche aujourd'hui plus de 100 000 personnes en France, mais il est important de s'y intéresser car le profil des individus atteints correspond à des personnes qui sont très souvent amenés à utiliser internet et visiter des pages web. Cette maladie est classée dans la catégorie des maladie du jeune adulte car elle est diagnostiquée dans une grande majorité des cas entre 25 et 35 ans. [23] De plus, parmi les personnes ayant contracté la maladie, plus de trois quarts sont des femmes. Pour faciliter l'accès et la navigation à ces personnes atteintes de la sclérose en plaques, il faut tout simplement redimensionner les périmètres cliquables des boutons, ils doivent être plus large, plus long et plus espacés entre eux, pour pouvoir ainsi diminuer le nombre de potentielles erreurs de clics dues aux symptômes. Une modification des couleurs est également recommandée pour qu'elles soient convenablement distinguables par l'utilisateur.

Enfin, Il existe une partie de la population qui n'est pas considérée officiellement en situation de handicap mais qui vit également au quotidien des problèmes réels : Les malvoyants. Pour rappel, la malvoyance englobe toutes les personnes qui ont une acuité visuelle qui est, après correction, comprise entre 4/10 et 1/20. Cependant, une personne peut également être considérée comme malvoyante si son champ visuel est compris entre 10 et 20 degrés. Selon une enquête HID de l'INSEE [24], on comptait plus de 1 200 000 malvoyants en France en 2008, nombre qui serait en légère hausse depuis. Dans le monde, on compte à l'heure actuelle plus de 36 millions de malvoyants, et d'après une étude réalisée par le journal britannique The Lancet Global Health [25], ce chiffre devrait se voir multiplier par trois avant 2050. La malvoyance doit donc être également prise en compte lors de la conception d'un site internet comme un handicap classique. Les solutions pour leur rendre la navigation plus agréable sont loin d'être complexes : il faut tout simplement ajuster l'affichage de la page web en agrandissant la taille des textes tout en modifiant les couleurs présentes afin d'assurer la présence d'un contraste suffisant entre les fonds et les textes. Le tableau 1 synthétise les solutions à mettre en place pour chaque maladie.

Tableau 1 : Solutions à mettre en place en regard avec la pathalogie

Maladie ou Handicap	Solution
Dyslexie	Surlignage des mots importants
Achromatopsie	Interlignage des textes Contraste de couleur entre les fonds et les textes.
Cataracte	Interlignage des textes Contraste de couleur entre les fonds et les textes.
Arthrose	Zones cliquables plus grandes et espacées
Maladie de Parkinson	Zones cliquables plus grandes et espacées
Épilepsie photosensible	Supprimer le contenu animé
Maladie de Wilson	Zones cliquables plus grandes et espacées Contraste de couleur entre les fonds et les textes.
Sclérose en plaques	Zones cliquables plus grandes et espacées Contraste de couleur entre les fonds et les textes.
Malvoyance	Contraste de couleur entre les fonds et les textes. Police d'écriture plus grande.

5 DISCUSSIONS

Les études et analyses vues précédemment montrent que les personnes en situation de handicap ne bénéficient pas d'un accès à un parcours et à une expérience utilisateur adapté lorsqu'il naviguent sur des pages web mais qu'il existe cependant de nombreuses solutions permettant de faciliter leur quotidien sur internet. Ces solutions ne sont pas complexes à mettre en place. Le véritable problème pour les personnes en situation de handicap qui ne profitent pas d'un accès à une bonne expérience utilisateur est que toutes les bonnes pratiques qui ont été énoncés durant cet état de l'art des interfaces et adaptations numériques existantes sont rarement mises en place.

La solution la plus évidente serait donc d'imposer la mise en place d'interfaces adaptées sur n'importe quel site internet pour que toutes les personnes en situation de handicap bénéficient d'un accès à un parcours et à une expérience utilisateur adaptés. Imposer des réglementations à propos des sites web n'est pas nouveau. La réglementation la plus connue actuellement est très probablement le règlement général sur la protection des données UE 2016/679 également connu sous le nom de RGPD que le Parlement européen a adopté le 14 avril 2016. Cette loi fournit à toute organisation ou personne ayant un site internet récoltant les données de ses utilisateurs un cadre réglementaire décrivant quand et comment les entreprises en ligne doivent sécuriser les données de leurs utilisateurs pour tous les citoyens européens. Les organisations disposant d'un site Web doivent divulguer des informations sur la manière dont elles collectent et utilisent les données clients des citoyens européens. Avec cette directive en place, la collecte même de la plus petite information numérique nécessite le consentement de l'utilisateur. Le non-respect peut entraîner une amende de 20 millions d'euros ou 4% du chiffre d'affaires annuel de l'entreprise concernée, en fonction du montant le plus élevé.

En France, il existe déjà plusieurs réglementations autour des sites internet comme par exemple la loi pour la confiance dans l'économie numérique qui a été adopté le 13 mai 2004 connue pour imposer aux hébergeurs la mise en place de mentions légales contenant au minimum l'identification des responsables du site, les informations sur l'activité du professionnel derrière le site, l'utilisation des cookies mais aussi l'utilisation des données personnelles. L'article 3 de cette loi [26] stipule que « L'Etat, les collectivités territoriales, les établissements publics et les personnes privées chargées d'une mission de service public veillent à ce que l'accès et l'usage des nouvelles technologies de l'information permettent à leurs agents et personnels handicapés d'exercer leurs missions. » Cet article impose aux sites internet du domaine public d'avoir une interface adaptée aux personnes en situation de handicap, en respectant le Référentiel général d'amélioration de l'accessibilité (RGAA) [27].

Afin de rendre plus simple la mise en place de l'accessibilité numérique, la Direction interministérielle du numérique édite depuis 2009 le référentiel général d'amélioration de l'accessibilité rédigé pour mettre en place l'article 47 de la loi handicap de 2005 et son décret d'application actualisé en 2019. La DINUM mettait fréquemment en ligne de nouvelles versions et mises à jour afin non seulement de s'adapter aux transformations du web mais également aux nouvelles normes et réglementations.

En 2019, l'ultime version du RGAA (version n°4) qui se divise en deux parties a été publiée. La première partie liste les obligations à respecter en s'adressant aux juristes, aux référents accessibilité numérique, aux managers et à la totalité les professionnels du web et de l'accessibilité, tandis que la deuxième comporte une liste de critères pour vérifier si un page web est conforme et si elle est bien adaptée aux auditeurs RGAA. Une dernière version dite 4.1 du RGAA a vu le jour en février 2021 afin de garder une certaine cohérence avec les normes européennes et internationales de référence en termes d'accessibilité numérique.

Malheureusement, les sites web du domaine public ne respectent totalement les normes et certains sont seulement en conformité partielle avec le référentiel général d'amélioration de l'accessibilité [28]. Par exemple, le site internet du service public de la diffusion du droit (Légifrance) à un taux de conformité à la RGAA évalué à 77,6%. Le site officiel du gouvernement est lui aussi partiellement conforme. Encore pire, le site officiel du ministère de l'Intérieur est non conforme au référentiel général d'amélioration de l'accessibilité.

La solution à ce problème est claire : rendre obligatoire l'accessibilité aux sites internet pour tous.

Et pour atteindre cet objectif, il faut modifier l'article 4 de loi pour la confiance dans l'économie numérique afin d'imposer le respect des normes du référentiel général d'amélioration de l'accessibilité RGAA à l'ensemble des sites internet répondant du domaine législatif français. Les 2 750 000 français en situation d'handicap doivent avoir un accès adapté aux sites web qu'ils consultent au même titre que des citoyens lambdas et des schémas pluriannuels et plans annuels d'amélioration de l'accessibilité doivent être mise en place pour effectuer cette mise à niveau au plus vite. L'interface doit être adapté afin qu'ils puissent bénéficier d'une expérience utilisateur qui leur correspond, au nom de l'égalité, une des valeurs forte de la France, qui est même mentionnée dans sa devise.

Cependant, les efforts de doivent pas s'arrêter là. Des normes européennes doivent également être votées et mises en place par le Parlement européen toujours dans un soucis de rendre accessible le domaine du web aux personnes en situation de handicap dans toute l'Europe et à travers le Monde.

6 CONCLUSION

Les plateformes numériques sont très utilisées en France par une grande majorité de la population, et deviennent même un outil primordial depuis la mise en place du télétravail, cependant elles ne sont pas adaptées aux personnes en situation de handicap, que ce soient des handicaps cognitifs, moteurs ou encore visuels.

Il existe de nombreuses techniques pour faciliter l'accessibilité à chaque handicap. Elles sont loin d'être complexes à mettre en œuvre et demandent seulement du temps supplémentaire au niveau de la conception. Ces solutions sont toutes listées et indiquées dans le référentiel général d'amélioration de l'accessibilité (RGAA). Internet doit être accessible à tous et cette avancée sera uniquement rendu possible à travers des obligations juridiques imposées aux entreprises et aux propriétaires de sites internet. Il faut donc agir pour permettre à une partie trop souvent rejetée contre son gré par la population d'avoir les mêmes chances que les autres, c'est pourquoi nous proposons des solutions à mettre en œuvre pour les plateformes numériques.

REFERENCES

[1] Mediametrie, *L'Année Internet 2021*, Communiqué de Presse, p01, 2022.

[2] Mediametrie, *L'Année Internet 2021*, Communiqué de Presse, p01, 2022.

[3] INRS, *Télétravail : quelques chiffres*, p01, 2021

[4] CNSA, *Chiffres clés de l'aide à l'autonomie en 2021*, Édition n°12, p07, 2021.

[5] CNSA, *Chiffres clés de l'aide à l'autonomie en 2021*, Édition n°12, p08, 2021.

[6] l'Association pour l'insertion sociale et professionnelle des personnes handicapées, *Handicap Cognitif*, Communiqué de Presse, p01, 2011.

[7] Cerema, *Handicaps mentaux, cognitifs et psychiques*, Fiche n°01, p02, 2013.

[8] l'Association pour l'insertion sociale et professionnelle des personnes handicapées, *Handicap Cognitif*, Communiqué de Presse, p03, 2011.

[9] Gartland, S., Flynn, P., Carneiro, M. A., Holloway, G., Fialho, J. S., Cullen, J., & Cullen, C. *The State of Web Accessibility for People with Cognitive Disabilities: A Rapid Evidence Assessment*. Behav Sci (Basel), p04, 2022

[10] Andersen, A., Rowland, C., *Improving the outcomes of students with cognitive and learning disabilities: phase I development for a Web accessibility tool*. 9ème conférence internationale ACM SIGACCESS sur les ordinateurs et l'accessibilité, Tempe, Arizona, USA, p221–222, 2007

[11] Dixon, M. *Comparative Study of Disabled vs. Non -disabled Evaluators in User - Testing: Dyslexia and First Year Students Learning Computer Programming*. In Stephanidis, C.ed. Springer Berlin Heidelberg, Pp. 647-656, 2007

[12] Uzarek, A.. *Evaluation des effets de la mise en place d'un aménagement scolaire auprès d'une population d'adolescents dyslexiques ou mauvais lecteurs*. 2015

[13] GURL, E. *SWOT analysis: A theoretical review*. 2017

[14] J. Mussat, *FACIL'iti, la startup qui souhaite rendre internet accessible à tous*, Article, Journal Maddyness, p01, 2018

[15] Elsa Bembaron, *Facil'iti, la start-up qui rend les sites accessibles aux internautes handicapés*, p01, 2018

[16] EqualWeb, *A propos d'Equal Web*, Présentation, p01, 2017

[17] François, J., erriest, G. & De Rouck, A. *L'achromatopsie congenitale*. Doc Ophthalmol 9, 338–424, 1955.

[18] Lagorce, T., Buxeraud, J., & Guillot, X. *Comprendre l'arthrose. Actualités pharmaceutiques*, 55(555), 18-22. - 2016

[19] Ministère de la Santé et de la prévention, ministère des Solidarités, de l'autonomie et des personnes handicapés, *La maladie de Parkinson*, p01, 2021

[20] ISERM *Épilepsie, un ensemble de maladies complexe, encore mal compris*, p1, 2018

[21] Trocello, J. M., Chappuis, P., Chaine, P., Rémy, P., Debray, D., Duclos-Vallée, J. C., & Woimant, F. *Maladie de wilson. La presse médicale*, 38(7-8), 1089-1098. 2009

[22] Ministère de la Santé et de la prévention, ministère des Solidarités, de l'autonomie et des personnes handicapés, *La Sclérose en plaque*, p01, 2021

[23] Ministère de la Santé et de la prévention, ministère des Solidarités, de l'autonomie et des personnes handicapés, *La Sclérose en plaque*, p01, 2021

[24] Observatoire régional de la santé des Pays de la Loire, INSEE, *Enquête HID sur la malvoyance en France*, 2005

[25] Prof Rupert R A Bourne , Seth R Flaxman, Tasanee Braithwaite, Maria V Cicinelli, Aditi Das, Jost B Jonas, et al. *Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis*, Volume 5, 2017

[26] Service publique de diffusion du droit, *Loi n° 2004-575 du 21 juin 2004 pour la confiance dans l'économie numérique*, Mise à jour du 07 juin 2022

[27] Secrétariat d'État chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques, *Référentiel général d'amélioration de l'accessibilité RGAA 4.1*, 2020.

[28] Julie Moynat, *Non, il n'y a pas 40% de sites ou démarches publiques accessibles aux personnes handicapées*, Article sur La lutine du WEB, p01, 2022

Contact principal : Lucas AGNES

Coordonnées : lucas.agnes@viacesi.fr

CONCEPTION D'UNE EXPERIENCE DE SOIN PERSONNALISEE AVEC UNE CREME MINIMALISTE

Cécilia ANTUNES[1], Romane CHUNG-TO[1], Estelle BONNET[1], Margot BRICHET[1], Aurélie ROC[1], Yanaëlle AGASTIN[1], Anne-Marie PENSE LHERITIER[1]

[1]Ecole de Biologie Industrielle, EBInnov, 49 avenue des Genottes, 95895 Cergy-Pontoise, France

Mots clés : conception, minimalisme, personnalisée, packaging, innovant

1 INTRODUCTION

Le minimalisme est un mouvement social en plein essor que l'on peut définir comme une volonté de réduire sa consommation matérielle [1].

La tendance minimaliste domine le marché de la dermo-cosmétique. Elle se manifeste à travers des produits contenant peu d'ingrédients et à l'emballage réduit, qui répondent aux inquiétudes des consommateurs concernant la sécurité des ingrédients, mais aussi l'impact environnemental et social des produits achetés. Une autre conséquence de cette tendance est la réduction du nombre de produits utilisés dans la routine de soin et donc le développement de produits multifonctions. On a ainsi assisté en 2020 à un recul des ventes de sérums au profit de crèmes « universelles » [2].

Notre problématique concerne la conception de ce type de produit tout en restant attractif pour le consommateur.

Cette publication présentera les différentes méthodes de conception comme le Quality by Design (QbD) mises en place afin de concevoir un produit proche d'un benchmark, avec un packaging innovant et répondant aux besoins consommateurs.

2 ETAT DE L'ART ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Le Quality by Design est une méthode de développement de produit basée sur la définition préalable des attributs critiques de qualité du produit, puis sur la mise en place d'un plan d'expériences permettant d'établir les paramètres des ingrédients et des procédés nécessaires à l'atteinte de ces attributs critiques [3]. Elle s'oppose à l'approche historique du Quality by Testing, qui consiste à assurer la qualité en testant le produit final pour vérifier s'il correspond aux spécifications réglementaires [4]. Le QbD est une méthode issue de la réglementation pharmaceutique, et à ce jour, peu d'études ont été menées sur son application au développement cosmétique [5].

Dans un environnement aussi concurrentiel que le marché de la cosmétique, les entreprises doivent innover pour rester compétitives. Face à ce besoin, la recherche en conception s'est particulièrement développée depuis les années 1980, et plusieurs modèles organisationnels du développement d'un nouveau produit ont été théorisés [6] [7] [8]. Nous nous intéresserons particulièrement au modèle proposé par Aoussat et al. car il se concentre sur les premières phases du procédé d'innovation, c'est-

à-dire celles qui adviennent avant le prototypage. Ce modèle défini 4 phases de conception présentée sur la figure 1.

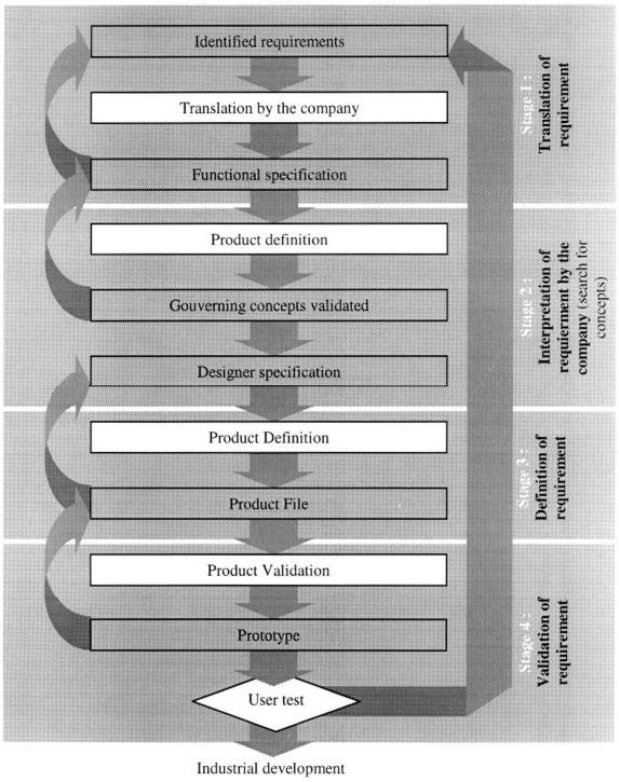


Figure 1 : Les 4 étapes de conception selon Aoussat et al. [4]

La première phase permet de traduire les besoins et se fait à travers une analyse du marché, de l'existant et de la demande des consommateurs afin d'identifier les besoins. La 2ème phase est une phase d'interprétation des besoins. Cela se fait à travers des sessions de créativité, de brainstorming, accompagné par des spécialistes. La 3ème phase est la définition du produit, de sa forme, ses matériaux. Pour finir la 4ème phase est la validation du produit. Un prototype va être réalisé et présenté aux consommateurs afin de juger la difficulté et l'intérêt de son utilisation. Cette dernière phase peut être abordée par le QbD.

L'objectif de cette étude est de concevoir un nouveau produit en appliquant les 2 méthodes présentées ci-dessus : le Quality by Design et les 4 phases de conception définit par Aoussat et al.[6]

3 METHODES

3.1 Quality by Design et conception produit

Afin de définir les cibles de notre produit dans le Quality by Design, un benchmark a été identifié. Notre benchmark est la crème Naturally good de Nivea, elle est composée d'éléments techniques permettant la réalisation et la stabilité de la formule tel que des gélifiants, épaississants ou huiles.

En amont de notre étude, une première étude a été réalisé par une autre équipe d'étudiants ingénieurs. Cette équipe a réalisé un plan de criblage afin de sélectionner 3 ingrédients : l'épaississant, l'émulsionnant et l'émollient. Ainsi la gomme de xanthane et le cetyl alcohol ont été comparés pour choisir le meilleur épaississant. Pour l'émulsionnant ce sont le cetyl phosphate et le sodium stearoyl glutamate (SSG) qui ont été comparés. Pour finir le caprilic/capric triglycérides et l'huile de coco ont été étudiés pour choisir le meilleur émollient.

Les conclusions de cette étude ont montré que la combinaison permettant d'obtenir la crème la plus proche du benchmark était l'association cetyl alcohol, sodium stearoyl glutamate et l'huile de coco.

Notre équipe a ensuite développé une crème minimaliste comprenant 9 ingrédients avec une galénique d'émulsion huile/eau (H/E). L'objectif de cette étude est d'optimiser la formule afin d'obtenir une émulsion stable, fluide, non filante, non blanchissante, avec des gouttelettes fines et rapprochées et une viscosité proche de 703 Pa.s. La concentration d'épaississant agira sur la viscosité et fluidité de l'émulsion, les émulsionnants influeront sur la stabilité et la taille des gouttelettes, les émollients exerceront quant à eux une influence sur le ressenti final lors de l'application.

Pour optimiser la formule, un plan d'optimisation à 12 essais a été mis en place avec l'aide d'un expert dans le domaine afin de déterminer les concentrations optimales des ingrédients sélectionnés par l'équipe de criblage. Les résultats ont ensuite été analysés sur Design Expert. La formule complète de la crème est indiquée dans le **Tableau *1***.

Tableau 1 : Formule de la crème minimaliste

Phase	Ingrédient	Fonction	Quantité
A1	Aqua	Solvant	QSP 100%
	Propylene glycol	Stabilisateur d'émulsion Agent antimicrobien	5%
A2	Glycerin	Humectant	5%
B	Cocos nuciferas oil	Emollient	20 – 30%
	Cetyl alcohol	Epaississant	2 – 5%
	Sodium stearoyl glutamate	Emulsifiant	0,4 – 2%
C	Potassium sorbate	Conservateur	1%
	Sodium hyaluronate	Actif (hydratant) Humectant	0,1%
D	Hydrochloric acid	Régulateur de pH	QSP (5,5 < pH < 6,5)

Le plan d'expérience choisi est un plan optimal et suit le modèle quadratique de Scheffe. Ce plan permet de réaliser 12 essais correspondant aux 10 points minimums requis pour estimer toutes les interactions et 2 points au centre pour la répétabilité. Ces essais sont indiqués dans le **Tableau *2***. Les bornes de concentrations ont été définies par l'équipe de criblage suite à leur plan de criblage réalisé sur Design Expert avec un plan complet 2^2 couplé à un plan incomplet 2^{3-1}.

Tableau 2 : Description des 12 essais réalisés

N° essai	Cetyl alcohol	Sodium stearoyl glutamate	Huile de coco
1	2%	2%	26,7%
2	3%	2%	20%
3	2%	0,93%	30%
4	5%	0,93%	23,33%
5	5%	0,4%	30%
6	4%	0,4%	20%
7	2%	0,4%	25%
8	3,5%	1,2%	25%
9	2%	1,2%	20%
10	5%	2%	20%
11	3,5%	1,2%	25%
12	5%	2%	30%

6 réponses ont été étudiées : la viscosité, la taille des gouttelettes, le fluide, le filant, le blanchissant et l'étalement. Les mesures réalisées et les appareils utilisés sont indiqués dans la Figure 1.

Viscosité	**Taille des gouttelettes**	**Stabilité**	**Analyse sensorielle**
•Rhéomètre Anton Paar MCR301 (géométrie cône-plan)	•Turbiscan •Microscope (x10)	•Microscope (x10) •Centrifugeuse (5 min - 5000 rpm)	•Fluide •Filant •Blanchissant •Etalement

Figure 1: Mesures réalisées et appareils utilisés

3.2 Conception d'une expérience de soin personnalisée

Pour concevoir un produit innovant autour de la crème minimaliste, une approche similaire à celle d'Aoussat et al. a été adoptée. Nous avons suivi les étapes suivantes : expression du besoin grâce à des outils de créativité (Figure 2), validation du besoin, veille concurrentielle, détermination du cahier des charges fonctionnel, modélisation 3D grâce au logiciel CATIA V5 et impression d'une maquette d'aspect par fabrication additive grâce à l'accompagnement de l'équipe LCIP de l'ENSAM.

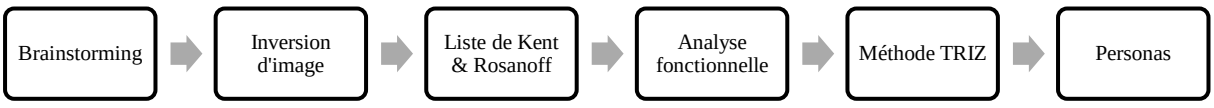
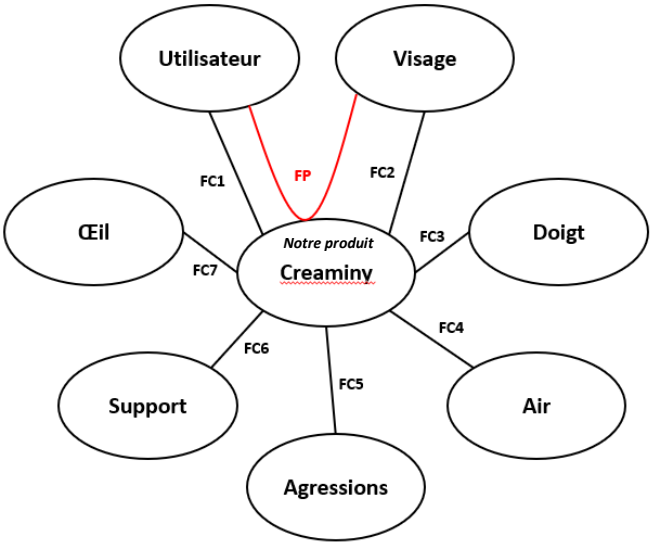


Figure 2: Méthodes et outils de conception d'une expérience de soin personnalisée

Connaissant les besoins des consommateurs, nous avons imaginé notre packaging grâce à des sessions de créativité. Le diagramme Pieuvre a permis de représenter les interactions entre notre produit et son environnement et de mettre en évidence la fonction principale et les fonctions contraintes de notre produit lors de son utilisation (Figure 3). Ainsi la fonction principale de notre produit est de « permettre à l'utilisateur d'appliquer une crème personnalisée sur son visage ». Une des fonctions contrainte est que notre produit doit être résistant aux chocs. Les dimensions et les matériaux du packaging ont été sélectionnés par la suite afin de répondre à ses contraintes ainsi qu'aux besoins du consommateur mais aussi pour s'inscrire dans une démarche environnementale.



Fonction	Désignation
FP	Permettre à l'utilisateur d'appliquer une crème personnalisée sur son visage
FC1	Être adapté à tout type de peau
FC2	Délivrer une dose permettant de couvrir l'ensemble du visage
FC3	Mélangeable au doigt
FC4	Résistant à l'humidité
FC5	Résistant aux chocs
FC6	Doit tenir debout et ne pas être encombrant
FC7	Doit être esthétique

Figure 3: Analyse fonctionnelle du produit lors de son utilisation

4 RESULTATS

4.1 Quality by Design

L'objectif du QbD est de maitriser les facteurs de préparation des produits pour garantir des réponses adaptées aux cibles et proche du benchmark. Les réponses les plus pertinentes au vu des résultats sont les réponses : taille des gouttelettes, étalement et blanchissant.

Pour la taille des gouttelettes il est observé que 2 facteurs ont une influence, le cetyl alcohol et le SSG (Figure 4). Plus le cetyl alcohol est présent plus la taille des gouttelettes diminue. A l'inverse, plus le SSG est présent, plus la taille des gouttelettes augmente. Il y a également un impact de l'interaction de ces 2 facteurs ; pour une concentration élevée de cetyl alcohol la variation en SSG a une grande influence alors que pour une faible concentration de cetyl alcohol les variations de SSG ont peu d'influence. Pour une faible concentration de SSG, le cetyl alcohol a beaucoup d'influence alors que pour une forte concentration de SSG il a peu d'influence. Il faut donc une concentration élevée de cetyl alcohol couplée à une concentration faible de SSG pour obtenir de petites gouttelettes.

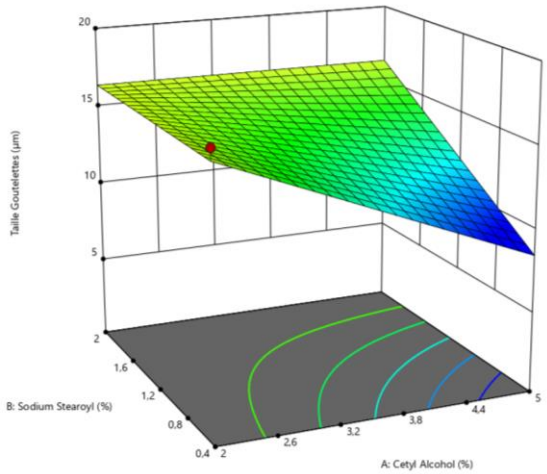


Figure 4 : Représentation 3D des effets du SSG et du cetyl alcohol sur la taille des gouttelettes

Les facteurs étalement et blanchissant sont liés. En effet, une crème très blanchissante est caractérisée par un étalement faible. Pour avoir un effet blanchissant minimal, il faut la concentration la plus faible possible de cetyl alcohol (Figure 5). Le SSG n'a pas d'influence sur l'effet blanchissant.

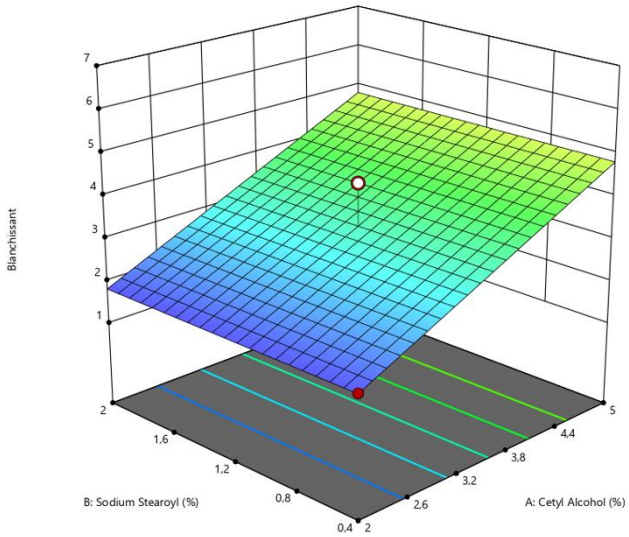


Figure 5 : Représentation 3D des effets du cetyl alcohol et du SSG sur l'aspect blanchissant

Concernant le facteur étalement les 3 facteurs ont une influence. Comme le montre le graphique des perturbations (Figure 6), plus il y a de cetyl alcohol et d'huile de coco, plus l'étalement est faible. Le SSG a quant à lui un effet courbe mais il agit comme les deux autres facteurs. Il faut donc utiliser ces trois ingrédients à leur concentration minimale afin d'avoir un étalement maximal.

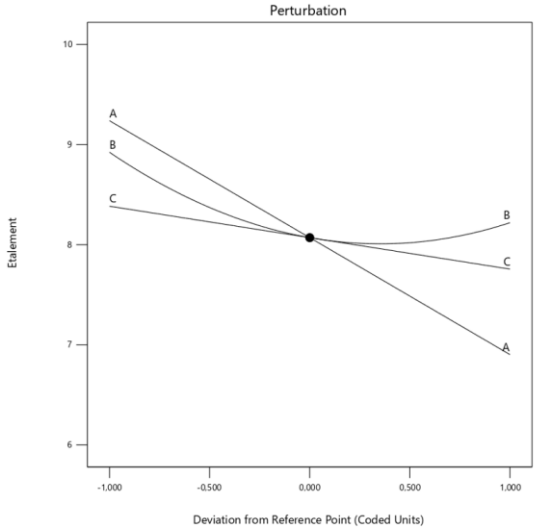


Figure 6 : Graphique de perturbation de l'étalement. A = cetyl alcohol, B = SSG, C = huile de coco

4.2 Conception d'une expérience de soin personnalisée

Une analyse du marché a montré que de nombreux dispositifs d'application de crème existent déjà sur le marché. L'équipe s'est donc orientée vers le développement d'un produit personnalisable. Cette idée nous est venue suite à un brainstorming lors duquel il a été remarqué que chaque consommateur a de nombreux produits de soin mais ne les utilisent pas forcément chacun tous les jours.

En réfléchissant au concept de crème minimaliste, nous sommes arrivées au constat que c'est un produit extrêmement simple étant donné sa définition. Nous avons décidé d'exploiter cette simplicité en l'envisageant comme une base modulable par d'autres actifs, et en proposant ainsi plusieurs crèmes en une seule. C'est là que l'idée d'une crème personnalisable s'est imposée. Notre première idée était de reprendre le principe d'une palette de maquillage contenant la crème et plusieurs actifs à mélanger. (Figure 7).

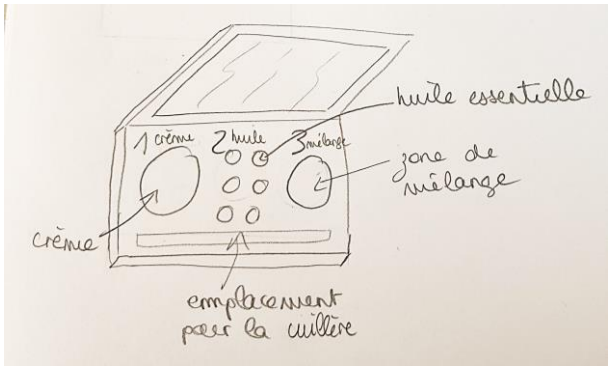


Figure 7 : Schéma de la palette d'actifs imaginée

Cependant ce packaging ne semblait pas pratique pour le consommateur et complexe à créer dans l'esprit du minimalisme. Nous nous sommes donc orientées vers une disposition plus simple avec des actifs aimantables autour du pot de crème central. (Figure 8).

Figure 8 : Dessin du packaging de la crème avec ses actifs aimantés autour

Pour cette nouvelle idée, nous avons été freinées par le système d'attaches par aimant. En effet, les aimant sont difficilement recyclables et les actifs peuvent se détacher lors du transport ce qui est contradictoire avec nos objectifs de packaging simple d'utilisation et respectueux de l'environnement.

Bien que les aimants ne correspondent pas à notre souhait, la forme quant à elle correspond parfaitement. Ainsi à la place d'aimants nous avons imaginé un système de rails où chaque actif vient s'emboiter autour du pot de crème comme présenté sur la Figure 9.

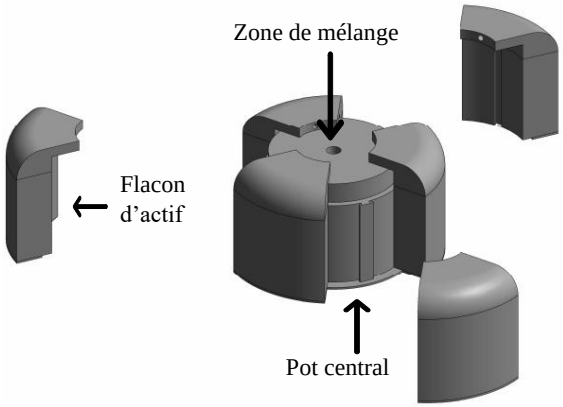


Figure 9 : Représentation 3D du packaging de la crème. Pot central et ses flacons d'actifs

Chaque actif est ainsi accroché par un système de rail autour d'un pot central. Ce pot central est un pot airless qui permet de libérer la bonne quantité de crème lorsque l'on appuie dessus. Ce système airless a été choisi car il permet de garantir la sécurité microbiologique de la crème en empêchant toute bactérie de rentrer. En effet la pompe airless est composée d'un piston qui remonte lorsque l'utilisateur appuie sur la pompe. Avec la pandémie que nous subissons, il nous a semblé important de trouver un système antibactérien.

De plus, ce pot dispose d'un double fond, il est ainsi rechargeable, les consommateurs peuvent donc garder leur pot et seulement racheter une recharge ce qui limite le nombre de déchets. Pour remplir le pot, il suffit d'ouvrir le pot, de redescendre le piston et de remplir avec la recharge de crème.

Pour utiliser un actif, il suffit d'appuyer sur la pompe de l'actif en question et cela appuiera en une même pression sur la pompe de l'actif et du pot central. Ainsi, la bonne dose de crème et d'actif sera libéré en seul mouvement. Il ne reste plus qu'à mélanger au doigt pendant cinq secondes et la crème est prête à être appliquée.

Le pot central et les flacons d'actifs sont en poly propylène (PP). Ce matériau a été choisi car il est opaque ce qui permettra de protéger la crème et ses actifs qui peuvent être sensible à la lumière. De plus il est compatible avec l'ensemble des matières premières [9]. Il est également très facile de le colorer ce qui est important pour notre packaging car chaque actif est identifiable par sa couleur. Le PP est le 2ème plastique le plus utilisé en Europe. Ainsi, la production de notre pot et des flacons est simplifiée car ce plastique sera facile à trouver et pourra être utiliser dans la majorité des usines de productions. Le PP est également un polymère très résistant à l'abrasion ce qui est très important car notre produit est réutilisable, notre packaging doit donc rester intact plus longtemps que les pots classiques. Pour finir le PP est recyclable donc lorsque les usagers voudront jeter le pot ou les flacons ceux-ci pourront être recyclés.

La technique d'injection est utilisée afin de fabriquer les pièces. L'injection consiste en un traitement mécanique [10]. La pâte est chauffée puis introduite dans le moule, le contact avec les parois du moule vont refroidir la matière qui va se solidifier. L'avantage de cette technique est qu'elle permet de changer facilement de forme en changeant de moule et permet de faire tout types de formes. Notre pot et nos flacons ayant des formes très particulières avec les rails sur le pot central et les flacons en arc de cercle (Figure 10) cette méthode est donc parfaitement adaptée.

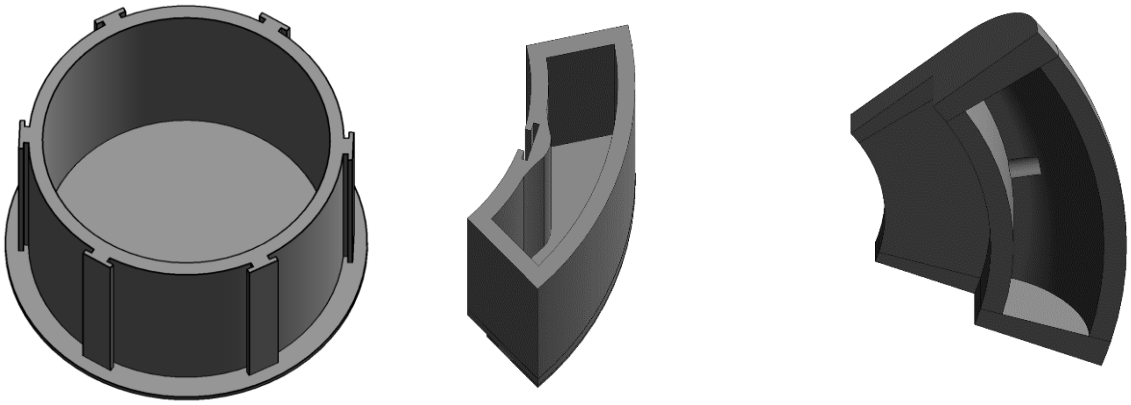


Figure 10 : Représentation 3D du pot central et du flacon d'actif

Les couleurs du pot et des actifs seront obtenues par flammage [11], c'est une technique de traitement de surface du PP qui permet la création de radicaux libres et la fixation des molécules. Ainsi l'encre va adhérer au PP. Comme dit précédemment le pot et les flacons ont des formes compliquées, non planes et cylindrique c'est pourquoi la tampographie [11] a été choisies comme méthode de décor pour les écritures. Cette méthode permet d'imprimer sur tous types de surface, elle est également rapide et peu couteuse. Comme son nom l'indique cette méthode consiste à utiliser un tampon pour venir marquer l'objet.

Comme dit précédemment l'équipe a choisi de développer un packaging permettant de personnaliser sa crème chaque jour en fonction des besoins de sa peau. En effet, la crème minimaliste avec ses 9 ingrédients représente une base parfaite à laquelle il est possible de venir ajouter des actifs pour lui donner de nouvelles propriétés. Ainsi, nous proposons 8 combinaisons d'actifs :

- Pour lutter contre les boutons : union entre l'acide salicylique, un actif agissant contre les imperfections et le niacinamide agissant comme un actif unifiant.
- Pour diminuer la brillance de la peau : union de l'acide azélaique et de l'actif lactique qui sont respectivement un actif matifiant et actif peeling doux.
- Pour diminuer les rides : Union entre le rétinol un actif anti-rides et l'acide hyaluronique afin d'hydrater la peau.
- Pour diminuer les rougeurs de la peau : actif composé uniquement de niacinamide qui agit comme actif unifiant.

- Pour lutter contre un teint terne : combinaison entre un actif apportant de l'éclat : la vitamine C et un actif peeling doux : l'acide lactique.
- Pour diminuer les tâches pigmentaires : union entre un actif anti-pigmentaire l'alpha arbutine et un actif apportant de l'éclat à la peau la vitamine C.
- Pour lutter contre les peaux sèches et déshydratée : utilisation de céramides et squalanes qui sont des actifs nourrissants.
- Pour lutter contre les points noirs et les pores dilatés : union entre l'acide glycolique qui est un actif exfoliant et l'acide lactique un actif peeling doux.

En fonction de sa peau le consommateur pourra donc choisir l'association d'actifs qui lui correspond le plus. Ainsi autour de son pot de crème il pourra attacher jusqu'à 6 actifs.
L'avantage de cette crème personnalisable et de son pot airless est que plusieurs personnes d'une même famille peuvent partager le même pot. Chacun pourra acheter l'actif correspondant à ses besoins et utiliser le même pot central.

Chaque actif aura sa propre couleur afin de permettre au consommateur de repérer en un coup d'œil le flacon dont il a besoin (Figure 11), de plus sur l'étiquette du flacon le consommateur pourra retrouver une explication de la composition de l'actif et son action. Sous le pot central le consommateur retrouvera la formule de la crème ainsi que les étapes d'utilisation du produit (Figure 11).

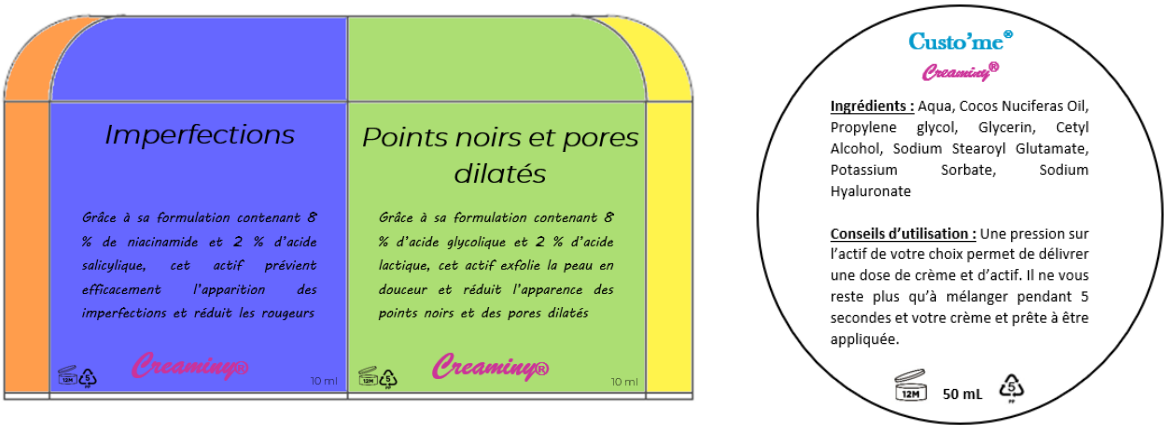


Figure 11: Etiquettes des flacons et du pot central

6 CONCLUSION

L'objectif de cette publication était de présenter les résultats obtenus suite à la mise en place de méthodes de conception dont le Quality by Design. Ces méthodes ont permis le développement d'une formule stable et proche du benchmark. De plus, un packaging permettant de proposer une expérience de soin personnalisée a pu être développé au stade de concept et de prototype 3D afin d'offrir une nouvelle expérience de soin aux consommateurs.

Cette étude aura permis de travailler avec des experts de chaque domaine et de voir l'intérêt d'avoir une équipe pluridisciplinaire où chacun apporte son expertise afin de développer le meilleur produit possible.

Par la suite, il serait intéressant de faire des tests consommateurs afin d'avoir leur avis sur le fonctionnement du produit et les éventuelles améliorations possibles. De nouveaux actifs pourront également être développés en fonction des besoins soulevés par les consommateurs.

7 REFERENCES

[1] A.Pangarkar, P.Shukla, C.R.Taylor, *Minimalism in consumption : A typology and brand engagement strategies*, Journal of Business Research, Vol 127, p.167-178, 2021

[2] C.Dhouailly, *Pour les produits de soin , le minimalisme passe crème*, Le Monde, 2 avril 2021

[3] G. Deboutte, *Quality by Design ? La nouvelle philosophie,* L'Usine Nouvelle, 1 juillet 2010

[4] N.Charoo et al., *Quality by design approach for formulation development : A case study for dispersible tablets*, International Journal of Pharmaceutics, Vol 423, p.167-178, 2012

[5] D.Peres et al., *Quality by design (QbD), Process Analytical Technology (PAT), and design of experiment applied to the development of multifunctional sunscreens*, Drug Development and Industrial Pharmacy, Vol 43, p.246-256, 2017

[6] A.Aoussat, H,Christofol, M.Le Coq, *The new product design – A transverse approach*, Journal of Engineering Design, Vol 11, N°4, p399-417, 2010

[7] S.J.Kline, N.Rosenberg, *An Overview of Innovation,* The Positive Sum Strategy : Harnessing Technology for Economuc Growth, p275-305, 1986

[8] J.L. Santolaya, A.M. Biedermann, A. Serrano, *Development of Product Design Projects Applying Specifications and Factors Matrix (SFM) as a Support Tool in Higher Education*, World Journal of Engineering and Technology, Vol 4, N°2, 2016

[9] Z. Bayasi, J.Zeng, *Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete*, Materials Journal, Vol 90, 1993

[10] H.Ben Daly, *Caractérisation de la morphologie des pièces obtenues en moulage par injection et en injection soufflage par la technique de spectroscopie infrarouge*, Thèse Génie Mécanique, Montréal : Ecole polytechnique de Montréal, p.24-38, 1998

[11] M.Reyne, *Décoration et impression des surfaces en plastiques*, Techniques de l'ingénieur Plastiques et composites, 1998

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'ensemble des professionnels qui nous ont accompagnés tout au long de ce projet avec leurs conseils et leur expertise.

Nous remercions messieurs P. PAGES et M. LAVARDE pour leur aide dans la création et l'interprétation des plans d'expérience.

Nous remercions messieurs F. MANTELET, N. MARANZANA, C. GAZO pour leur accompagnement lors des séances de créativité et leur participation dans la création de notre produit et concept. Nous remercions également F. SEGONDS, J.R. CAMARA, P. VEDEL pour leur aide dans la modélisation et la réalisation de notre prototype.

Nous remercions monsieur P. BONNEYRAT pour ses conseils dans le choix des matériaux et la conception de notre packaging.

Contact principal : Sylvia IMBART

Coordonnées : s.imbart@hubebi.com

CONFERE'22
JUILLET 2022, BALE, SUISSE

La trajectoire de l'habitat en France

Antoine Artus[1], Améziane Aoussat[2], Mickaël Gouraud[3]
[1] *Auteur, Laboratoire CPI, ENSAM Paris*
[2] *Tuteur du Laboratoire CPI ENSAM Paris*
[3] *Tuteur de l'entreprise MACORETZ SCOP*

Mots clés (5 maxi) : habitat, environnement, standardisation, identité, adaptabilité

1 INTRODUCTION

Tendance ou trajectoire ? On pourrait parler de tendance (habitat connecté[1], modulable, écologique[2]) concernant le marché du logement, cependant le milieu de la construction est lui contrôlé par les politiques publiques et leur surcouche normative [3] (PLU, DTU, loi de régulation énergétique RE2020, etc…). Par ailleurs ces régulations se superposent, s'additionnent, se cumulent, et ralentissent le plus souvent l'aboutissement du projet de construction.

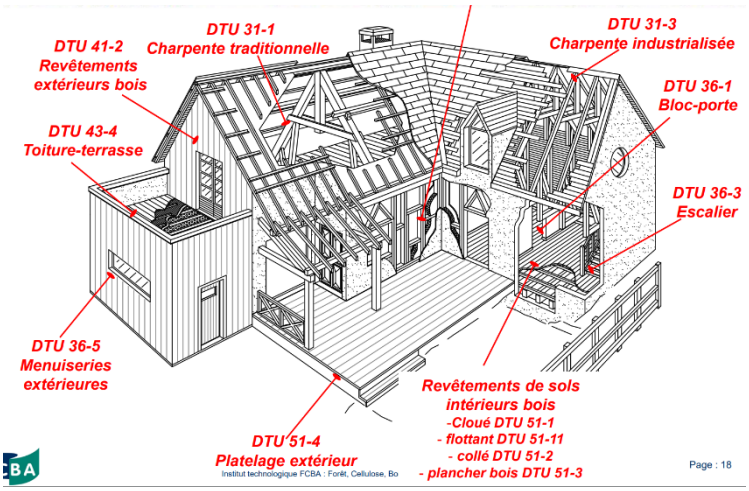


Figure 1 : principaux Documents Techniques Unifiés (DTU) auxquels se référer pour la construction d'une maison
Source : FCBA

On parlera donc de trajectoire, celle initiée par le gouvernement ; par exemple autour de la sobriété foncière définie par la loi *Climat et Résilience*, du 22 août 2021, qui va amener l'État, les territoires et l'ensemble des acteurs du cadre de vie à répondre à un impératif contradictoire : construire plus et mieux tout en consommant moins de foncier. Cette injonction interroge nécessairement la place de l'habitat individuel dans la production de logements et le rôle de la loi dans le contrôle et l'encadrement, laissant peu de liberté ou d'initiative en termes d'innovation. Le 14 octobre 2021, Emmanuelle Wargon, alors ministre du Logement, l'a annoncé : *« La France doit en finir avec le rêve de la maison individuelle, non-sens écologique, économique et social ! »* [4].

Peut-on continuer indéfiniment à consommer des logements individuels ? Ce mode d'habitat reste largement plébiscité par les Français et représentant 55% du total de logements en France, l'habitat individuel dans sa diversité typologique concentre aujourd'hui un certain nombre de critiques (son tort principal : il participe à l'étalement urbain et l'artificialisation toujours croissante des terres). En parallèle, la pandémie de Covid-19 a mis en lumière les limites de l'attractivité des grandes métropoles et le désir des Français de se rapprocher de la nature. Dans ce contexte, en plus de leur rôle historique de refuge et de lieu de soins, les espaces domestiques sont aussi des écoles, des gymnases, des restaurants, des cinémas, des bureaux et des espaces de travail… [5]

2 OBJECTIFS, ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

2.1 OBJECTIFS

Ce travail de recherche s'inscrit dans un mouvement de prise de conscience et d'actions innovatrices pour l'entreprise du bâtiment MACORETZ SCOP située à Saint-Père-en-Retz dans la Loire-Atlantique, terrain d'action de mon travail. L'objectif de ma recherche consiste à déterminer les innovations porteuses de sens pour l'entreprise Macoretz au vu de leur expérimentations, développement, et mise en place dans un temps courts (objectif de résultat sous 5 ans). Ces innovations porteront sur le cœur d'activité de l'entreprise : la fabrication tout corps d'états de maison individuelle pur, groupé, ainsi que sur les axes de la rénovation et de l'extension, en matériaux traditionnelles (briques, ciments, ferraille) mais aussi en ossature bois (construction hors-site de panneaux bois isolé, assemblé en quelques jours sur le terrain).

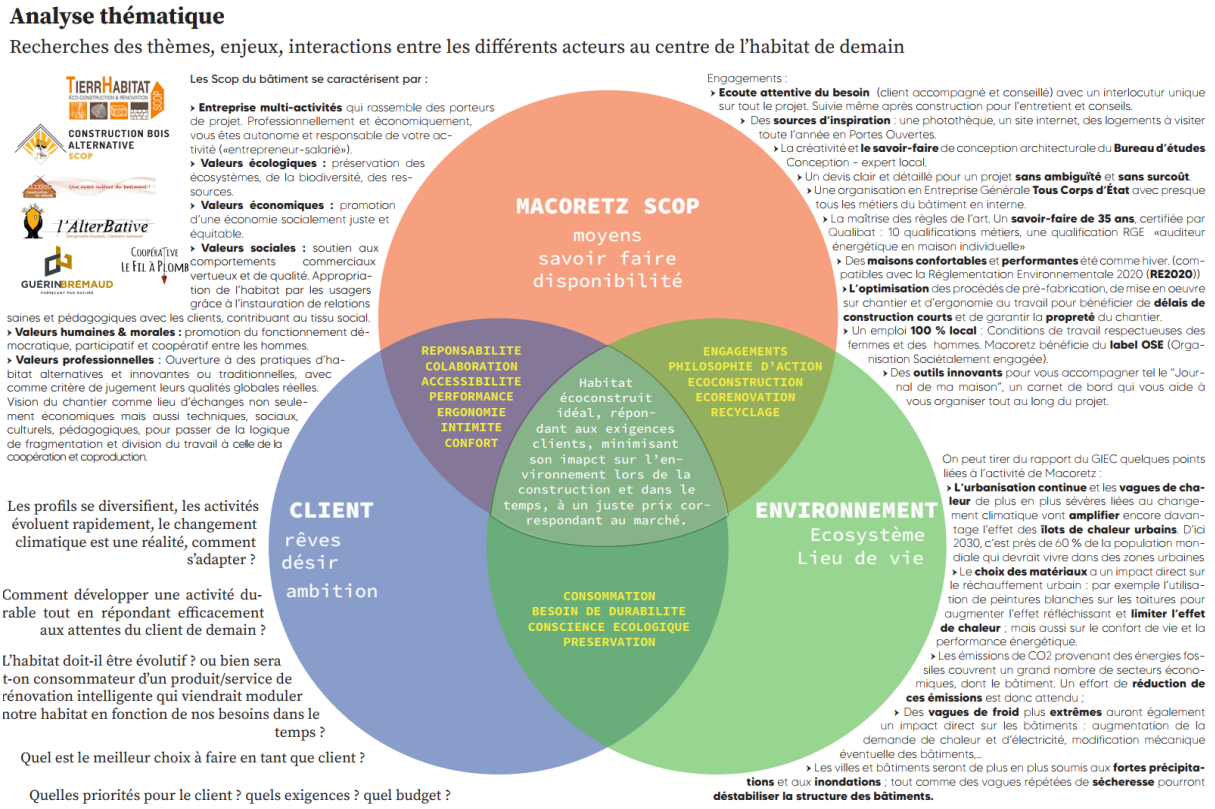


Figure 2 : Analyse thématique permettant de cerner les enjeux propres à une coopérative du bâtiment

2.2 ETAT DE L'ART

2.2.1 DEFINITION

Avant de présenter l'état de l'art, il nous paraît essentiel d'identifier avec précision l'objet de notre étude. Selon l'Insee, le logement individuel est défini comme étant un logement dans une maison individuelle. Ensuite, il opère une distinction entre : – l'individuel pur – l'individuel groupé (maison individuelle résultant d'une opération de construction comportant plusieurs logements individuels). Le terme « collectif » est défini par l'exclusion des deux concepts précédents. Il s'agit de logements faisant partie d'un bâtiment de deux logements ou plus.

Figure 3 : Etude territoriale sur le périmètre d'action de Macoretz
Source : Loire Atlantique

2.2.2 MOTIVATIONS

L'habitat individuel, qui reste constamment plébiscité par les Français depuis 1945[6], relève très largement d'un choix positif (*il crée la satisfaction, la joie, la paix, la confiance en nous. Il apporte dans notre vie ce que l'on appelle « synchronicité ». Nous avons le sentiment d'être au bon endroit, au bon moment*) combinant qualité de vie, proximité avec la nature, coût, accessibilité au lieu de travail et aux services, confort et surface. De plus, l'habitat est intimement lié aux trajectoires de vie, fortement standardisé jusqu'au XXIe siècle, où l'on observait un découpage de l'existence en trois étapes : de l'éducation & la formation ; du travail ; et enfin du repos à travers la retraite. Mais au fur et à mesure qu'elles ont avancé en âge, ces mêmes générations ont vu leurs parcours de vie se transformer, devenir moins continus, plus réversibles à des moments très différents de leurs trajectoires, provoqués par des événements professionnels et familiaux (volontaires ou non), entrainant de véritables bifurcations. Les générations du baby-boom participeront ainsi pleinement à l'émergence d'un nouveau « code biographique ». Caractérisé par une « désinstitutionalisation des parcours de vie ». [7]

Aujourd'hui, les préférences en matière d'habitat sont confortées régulièrement par des sondages d'opinion [8].

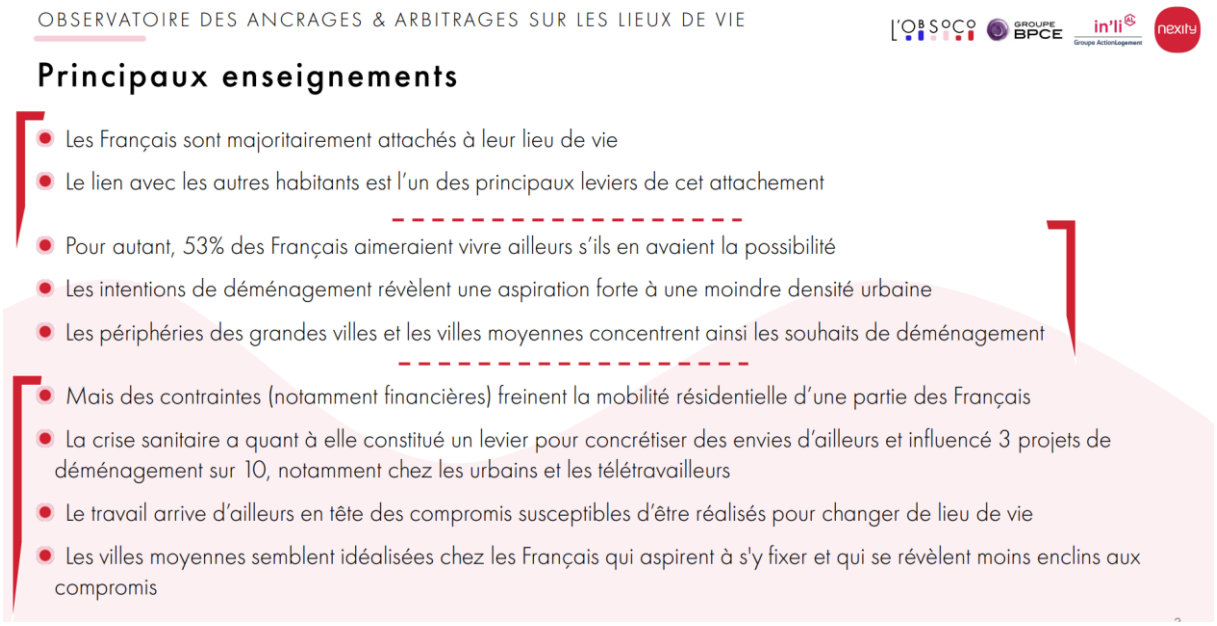


Figure 4 : Sondage OsbSoCo 2022

Certains désirs ont d'ailleurs été renforcés par la crise sanitaire. En effet, les Français souhaitent disposer d'espaces de vie plus importants, d'espaces extérieurs et d'une proximité avec la nature. L'habitat urbain est l'une des mesures les plus importantes du bien-être socio-économique d'un pays. Face à l'évolution du mode de vie urbain et à la pression des pandémies, les villes asiatiques, en particulier, ont connu de brusques transformations motivées par le désir de se moderniser, qui ont modifié le paysage et les modes de vie locaux. L'urbanisation a fini par faire muter les habitants et les traditions locales. La crise sanitaire a entraîné d'autres changements et a exigé une nouvelle réflexion sur la façon de construire l'environnement urbain.

2.2.3 CONSTRUCTION

On assiste aujourd'hui à une standardisation de la construction [9], notamment la construction bois. Cette dernière est à la fois favorisée et remit en cause par la conception assistée par ordinateur (CAO). En effet, l'informatique permet une duplication facile d'un même élément sur une trame régulière ou non, mais permet également depuis peu, la singularisation de tous les éléments porteurs. La construction peu alors être optimisé, standardisé, maitrisé, mais aussi sur-mesure, adapté, flexible. Dans ce système, la standardisation est associée au caractère abordable, tandis que la personnalisation est associée à la diversité, à la qualité et aux dépenses. Comme l'explique Masa Noguchi, *"les constructeurs de maisons d'aujourd'hui sont confrontés à un écart de production entre le besoin de standardisation des produits, qui permet de réduire les coûts de construction, et le besoin de personnalisation des produits, qui répond aux diverses demandes des consommateurs contemporains"*. En d'autres termes, les constructeurs tentent de produire des logements en série afin de créer une stabilité et de minimiser les risques, mais ne rencontre pas toujours leur marché. Dans le même temps, de plus en plus de consommateurs de tous types veulent avoir une voix plus importante dans la conception de leur maison. L'optimisation/automatisation de ce processus permettra d'obtenir un espace plus habitable dans lequel ni les différences de personnalité et les choix architecturaux et ni les ressources précieuses ne sont sacrifiées [10].

Figure 5 : Extrait de la veille concurrentielle

Le domaine de l'architecture est donc porteur d'enjeux, et peu également lever des contradictions et apporter des solutions lorsqu'il est réfléchi autour du potentiel de changement de l'habitat, décrit en termes de flexibilité et d'adaptabilité. Ces deux mots sont parfois confondus ou utilisés comme synonymes dans la littérature. Habituellement, les chercheurs et les architectes utilisent le terme "flexible" pour les changements physiques et "adaptable" pour les changements non-physiques. Steven Groák (1944-1998) a proposé une distinction entre ces deux termes ; il a défini "*l'adaptabilité comme la capacité de réaliser différentes utilisations sociales* et *la flexibilité comme la capacité de réaliser différentes dispositions physiques*". L'utilisation d'un espace de différentes manières sans apporter de changements physiques fait référence à l'adaptabilité, et selon la définition de Groák, la flexibilité est obtenue en modifiant la forme physique du bâtiment ; en joignant, divisant, étendant et fusionnant les espaces. Ce mécanisme permettrait au bâtiment de gagner en durabilité et en attractivité en permettant à ses occupants de le modifier selon leurs usages et désirs. [11]

2.2.4 CONCLUSION ET PROBLEMATIQUE

L'entreprise Macoretz a pour ambition de s'engager vers une transformation économique, écologique et sociétale vers une meilleure responsabilité sociale, engageant tous ses employés dans un mouvement RSE[12]. Les trajectoires d'innovations identifiées doivent s'intégrer dans cette nouvelle dynamique d'entreprise. En outre plusieurs thèmes sont identifiés comme levier de solution d'avenir durable : la mobilité du bâtie, l'économie de matière par le recyclage du bâtiment, l'analyse de la diversification des modes économiques alternatif à l'achat traditionnel d'un logement, l'habitat collectif, social et solidaire comme l'idéal d'un logement responsable, qui veille à la santé de ses habitants tout en luttant contre le réchauffement climatique. Un choix a dû être fait sur l'ensemble de ces thèmes afin de mener à bien une étude plus précise favorisant le développement durable du bâtiment. On se demandera alors : Comment mieux rendre comptes des préférences du consommateur dans sa consommation de logement/service lié à l'habitat ? au plus proche du marché, on cherchera à intégrer les nouveaux usages dans une offre de logement innovante.

3 MODELE, METHODE ET HYPOTHESES

La partie précédente tente de donner un aperçu de la vaste étendue des thèmes gravitant autour de la notion de logement. On peut difficilement prioritiser certaines trajectoires par rapport à d'autre sur la base des connaissances accumulées. C'est ce qui fait la force de la méthode d'innovation, de réflexion ou de gestion de projet, le design thinking, une pratique de la recherche action suivant un modèle que l'on qualifie le plus souvent de « double diamant ». On fait donc comme première hypothèse de ne rien omettre du sujet, que tous les signaux faibles ont été identifiés.

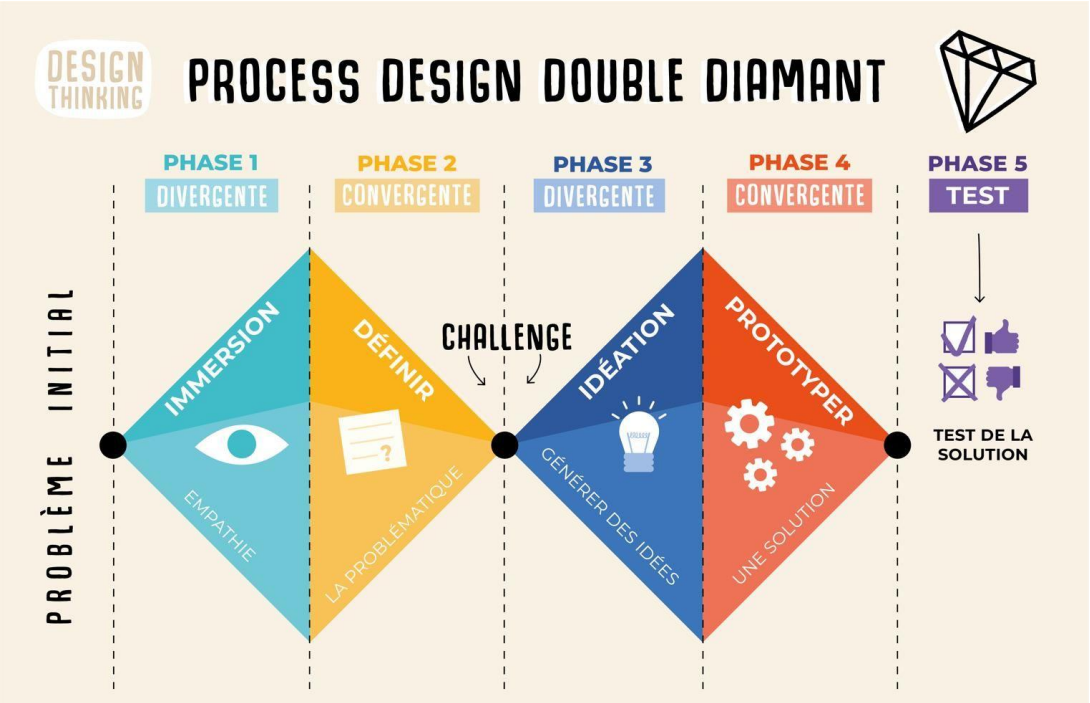


Figure 6 : Illustration de la méthode dite du double diamant (design thinking)
Source : EMYDigital

En suivant cette méthode j'ai adopté deux postures, la première : l'esprit divergent, consistant en une accumulation de connaissance sur tous les champs jugés important gravitant autour de la notion de logement. Comme une pelotte de laine à démêler, ce sujet nécessite d'adopter plusieurs angles d'approche afin de déceler un maximum de signaux faibles. La seconde : l'esprit convergent, c'est un travail d'analyse, de trie et de synthèse, qui permet de déduire des recherches les principaux axes d'innovations. A ce stade du projet, une phase de discussion avec les membres de l'entreprises, et surtout du comité de direction, permet de faire un choix collectif, une étape clé dans la méthode d'open-innovation, reposant sur l'intelligence collective d'un groupe conscient des enjeux pour prendre la meilleure décision.[13]

4 EXPERIMENTATION

A l'issue d'une présentation de mes recherches au comité de direction de l'entreprise composé de 21 sociétaires dont le PDG, il a été choisi d'explorer la trajectoire liée à améliorer la compréhension des besoins, des usages et de la demande client. Cette trajectoire questionnera de nouvelle méthodologie et outils comme la « user experience » (UX) ou des outils de sondages, traitement des data, analyse statistique et séance de réflexion collective, en incluant des potentiels clients dans le processus d'élaboration de nouvelles offres, concepts qui seraient reçut comme des innovations par le publique grâce au travail de réflexion autour de l'usage.

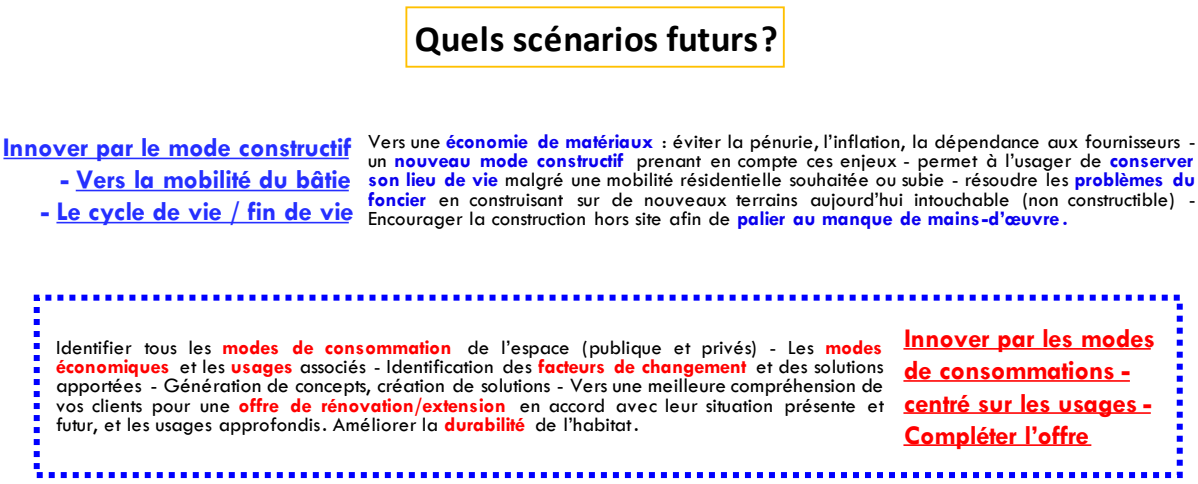


Figure 7 : Trajectoire choisit (encadré en bleu) parmi les 3 trajectoires

La diffusion d'un sondage en Loire Atlantique permettra de créer un modèle de client et donc d'affiner les persona de l'entreprise, de questionner le publique sur les raisons de leurs mobilités résidentielles et leurs choix de logement idéal. Cela permettra de hiérarchiser les fonctions d'un logement, permettant de donner une orientation sur la trajectoire des séances de créativité visant en l'invention de nouvelles offres au plus prêt des besoins et usages, en anticipant les éventuelles raisons liées à la mobilité résidentielle et en tentant d'augmenter au maximum la durabilité de l'habitat. En effet pour répondre aux défis environnementaux auxquels notre société fait face, la sobriété tendra à dominer sur l'ébriété, et afin de limiter l'artificialisation des sols en Loire Atlantique, un des départements où cette dernière reste en forte croissance depuis plusieurs années, il est primordial d'encourager la durabilité du logement. Cela signifie faire en sorte que notre logement corresponde à notre idéal, et cela sur toute notre existence. Ce dernier doit donc être résilient au changement et faciliter la vie à l'usage, entre autres.

5 RESULTATS ET DISCUSSION

Si l'année dernière, le sujet de recherche gravitait autour d'un logement éphémère, résilient, flexible et adaptable, cette année nous nous concentrerons sur la durabilité. Cependant les questions de résilience, de flexibilité, d'adaptabilité… restent toujours au cœur de ce travail. Nous développerons en séance de créativité des concepts autour des solutions d'aménagements flexibles au sein de l'habitat, dans l'ameublement, mais aussi dans la fonction même d'une pièce ; sur la notion de double usage, de fonctionnalités, d'intégration. D'autres réflexions alimenteront l'offre de rénovation et extension en proposant un service dédié à la compréhension du besoin client sur chaque projet. Ces services questionneront la notion d'économie de l'usage, d'économie circulaire, et d'interactions entre le client et les concepteurs. Le résultat final pourra être évalué selon l'évaluation de la satisfaction client dans la prise en compte de leurs exigences. On notera que l'hypothèse établie en employant la méthode de Design Thinking peut être validé dans la mesure où le projet à permis d'identifier 3 directions distincts d'innovation, d'en fixer une, même avec l'ajout de nouvelles connaissances, cela

prouve donc la pertinence des trajectoires identifiées. On pourrait reprocher à cette méthode le temps et l'énergie quelle demande de déployer. En effet sa réussite dépend essentiellement du temps et de la qualité de la recherche associé.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Enfin, ce travail de recherche permet de poser des bases concernant les processus de veilles, et les méthodes de recherches et innovation pour l'entreprise Macoretz, n'ayant pas encore internalisé ce poste. Ainsi mon travail doit non seulement être compris, mais reproduit et actualisé de manière régulière afin de conserver la pertinence et la dynamique de cette méthode. J'ai donc développé un modèle de recherche, définissant un ordre de priorité dans la recherche selon le domaine à explorer, répondant à des questions, et en identifiant la nouveauté par rapport à l'itération précédente. En effet ce processus itératif permet de rester l'esprit ouvert et claire sur l'innovation dans le milieu du logement, et il fait ressortir la nouveauté comme signaux faibles d'innovation à venir ; une manière rapide et efficace afin de rester pertinent pour la génération de l'offre future.

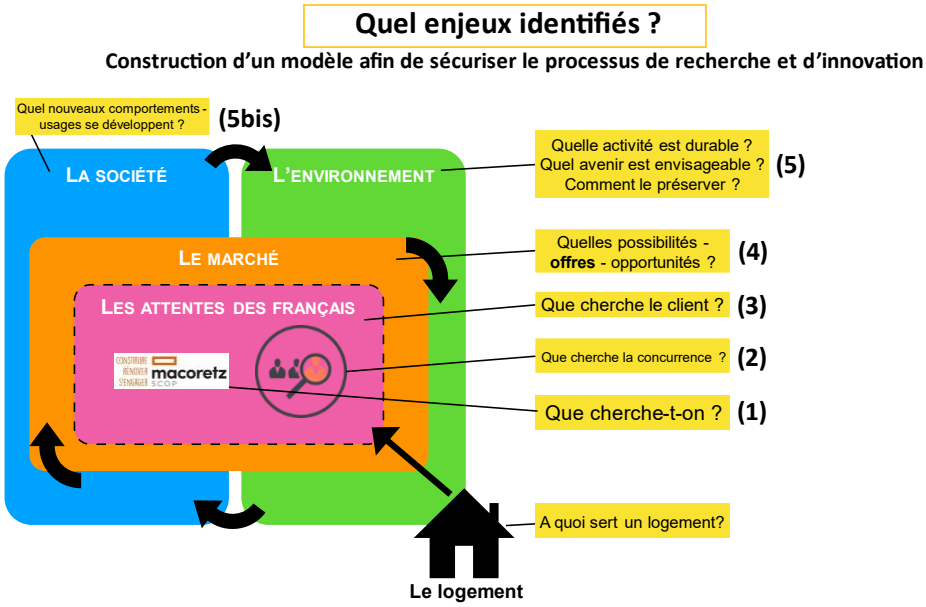


Figure 8 : Mon modèle de recherche – approche dialectique, visuelle, organisé – à l'instant T

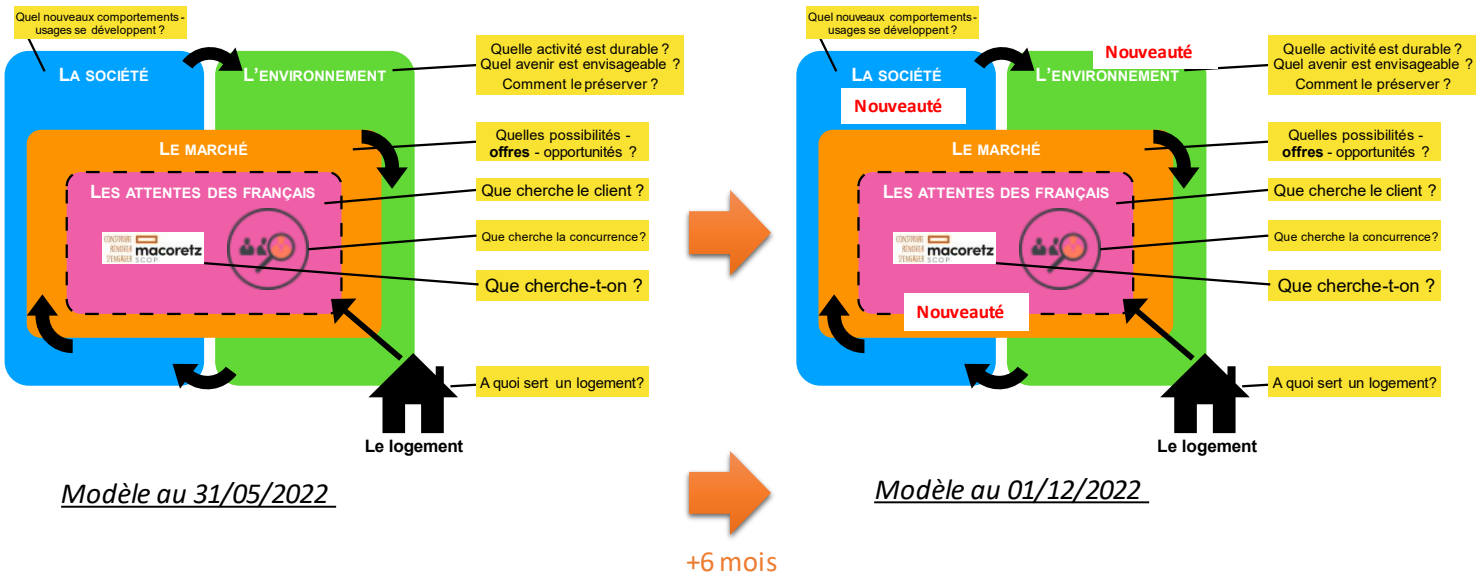


*Figure 8 : Mon modèle de recherche – approche dialectique, visuelle, organisé, **itérative** – à l'instant T+6 mois*

REFERENCES

[1] anne-laure sallanon, « Habitat connect - Institut Technologique FCBA », *https://www.fcba.fr/*. https://www.fcba.fr/success-story/habitat-connect/

[2] « L'architecture écologique : Où en sommes-nous ? », *Batiadvisor*, 13 novembre 2019. https://batiadvisor.fr/architecture-ecologique/

[3] « rapport_vision_renouvelee_habitat_individuel_122021.pdf ». Disponible sur: https://www.polehabitat-ffb.com/media/rapport_vision_renouvelee_habitat_individuel_122021.pdf

[4] « En finir avec le rêve de l'habitat individuel ? », *Chroniques d'architecture*, 26 octobre 2021. https://chroniques-architecture.com/en-finir-avec-le-reve-de-lhabitat-individuel/

[5] « Comment le Covid a bouleversé l'immobilier ». Disponible sur: https://www.happyculture.com/download/108178

[6] « prix-immobilier-presentation.pdf » Disponible sur: https://www.cgedd.fr/prix-immobilier-presentation.pdf

[7] A. Sabrina, R. Gallou, et L. Nowik, « Vers de nouvelles dynamiques de mobilité résidentielle ? L'enquête Amare (Ancrage et Mobilité résidentielle A la REtraite) Vers de nouvelles dynamiques de mobilité résidentielle ? L'enquête Amare (Ancrage et Mobilité résidentielle A la REtraite) », juill. 2019.

[8] « Les nouvelles attentes des Français en matière d'Habitat », *IFOP*. https://www.ifop.com/publication/les-nouvelles-attentes-des-francais-en-matiere-dhabitat/

[9] « Livre Blanc-L'habitat de demain: nouveaux enjeux, nouvelles réponses » Disponible sur: https://www.citeden.com/wp-content/uploads/2017/01/13165_Livre_Blanc_210x297_16p.pdf

[10] T. Vozárová et V. Šimkovič, « Psychological traits as an influence on architectural creation », p. 6.

[11] H. Estaji, « A Review of Flexibility and Adaptability in Housing Design », *Int. J. Contemp. Archit. " New ARCH"*, vol. 4, p. 37-49, août 2017, doi: 10.14621/tna.20170204.

[12] « Inscrire son activité dans l'économie locale et circulaire (RSE) », *Batijournal*, 18 octobre 2021. https://batijournal.com/inscrire-son-activite-dans-leconomie-locale-et-circulaire-rse/106448

[13] O. Gréselle-Zaïbet, « Mobiliser l'intelligence collective des équipes au travail : un levier d'innovation agile pour transformer durablement les organisations: », *Innovations*, vol. N° 58, n° 1, p. 219-241, févr. 2019, doi: 10.3917/inno.058.0219.

Contact principal : Artus Antoine

Coordonnées : antoine.artus@gadz.org - 0786884471

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2022, BÂLE, SUISSE

SANTÉ ET HANDICAP: COMMENT IMPLIQUER L'UTILISATEUR FINAL DANS LA CONCEPTION DE MATÉRIEL MÉDICAL?

BERTRAND Charly[1,2], DUCHAMP Robert[2], SAVATIER Guy[2], VABRE Aline[3], DAVID Morgane[4],MARANZANA Nicolas [1]

[1] Arts et Métiers Institute of Technology, LCPI, HESAM Université, F-75013 Paris, France
[2] Rollinnove - 5 Rue Parrot, 75012 Paris, France
[3] Hôpital Rothschild AP-HP - 5 Rue Santerre, 75012 Paris, France
[4] EHPAD Adef Résidences, la Maison du Parc - 81 bis rue de l'Amiral Mouchez, 75013 Paris, France

Résumé : faire de la conception pour des personnes âgées ou en situation de handicap est assez challengeante, surtout lorsque l'on veut impliquer l'utilisateur dans le processus de création. La méthode de conception centrée utilisateur [1] permet de capter au mieux les besoins et les attentes de ces utilisateurs qui n'ont parfois pas de solutions et doivent s'en sortir par leurs propres moyens. Cependant, le travail avec ces utilisateurs peut s'avérer complexe, surtout lors des rencontres puisqu'il n'est pas forcément simple pour certaines de ces personnes d'exprimer facilement leurs besoins, attentes ou idées. Le but de cet article est de déterminer des techniques et des solutions pour permettre les échanges entre concepteurs et utilisateurs. Le travail est réalisé au sein de la société Rollinnove, entreprise développant un kit à placer sur des fauteuils roulants permettant de faciliter les déplacements chez les personnes âgées ou en situation de handicap et n'ayant pas assez de forces pour se déplacer dans des fauteuils classiques.

Mots clés: santé, handicap, conception centré utilisateur, méthodes, design

1 INTRODUCTION

L'innovation est aujourd'hui considérée comme le meilleur facteur de croissance économique dans le milieu entrepreneurial [2]. En effet, cela permet de renforcer le côté compétitif entre les différentes organisations en répondant aux attentes des utilisateurs. Le but est de leur proposer de nouveaux systèmes, usages ou encore de nouvelles fonctions, pour répondre au mieux aux besoins des usagers, qu'il y ait des solutions existantes ou non. Plusieurs méthodes permettent de stimuler cette innovation telle que la théorie C-K [3], la méthode TRIZ [4] ou encore la méthode du Design Thinking, Fig.1 [5].

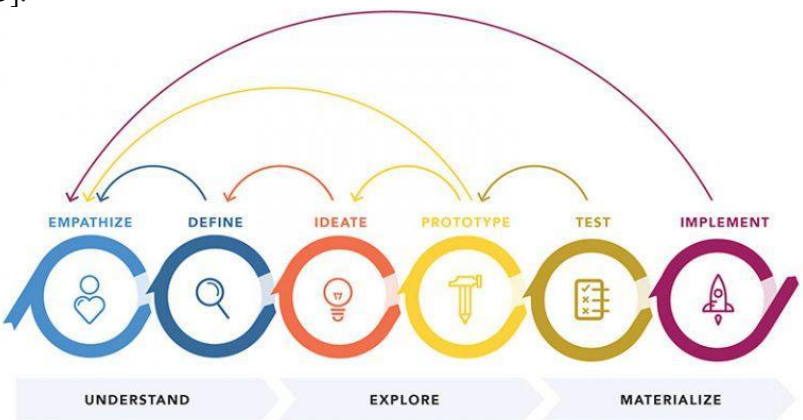


Figure 1. Le processus du Design Thinking [5]

Ces différents processus ont tous leur spécificité et sont utilisés à différentes échelles et pour différents domaines. La méthode qui va nous intéresser dans notre étude est celle du Design Thinking. En effet, c'est une méthode très adaptée au domaine médical, cœur des activités de Rollinove, qui cherche à faciliter les déplacements en fauteuils roulant pour les personnes ne possédant pas assez de force ou ayant une amplitude musculaire faible. Le projet d'un kit permettant de simplifier ces déplacements est à l'étude depuis quelques mois et un prototype a déjà été réalisé. Cependant, ce dernier ne fonctionne que sur le plan technique et n'a pas ou peu été réfléchi du point de vue de l'usage. Voilà pourquoi il est important d'utiliser une méthode mettant l'utilisateur au cœur du projet, pour adapter le kit à l'usage. Car en effet, cet environnement médical met l'utilisateur au cœur des réflexions de conception car il est difficile de se mettre à la place de ces personnes. Il faut donc forcément les questionner directement et il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes permettant de travailler avec ces usagers. Ceci est d'autant plus vrai que la littérature du domaine du handicap faire ressortir que les offres existantes sont bien trop souvent inadaptées aux besoins et à l'usage, onéreuses, peu fiables et stigmatisantes pour les personnes puisqu'elles renvoient l'image du handicap à la personne et à la société [6]

Il y a donc un vrai travail de conception à faire dans ce domaine, surtout du point de vue de l'humain et de ses besoins en utilisant des méthodes adaptées. C'est pourquoi il est important de savoir :

Comment impliquer les utilisateurs finaux (personnes âgées ou en situation de handicap) dans la conception de matériel médical ?

Dans un premier temps, il est nécessaire de regarder les méthodes existantes, permettant de travailler avec les utilisateurs, et ainsi voir si celles-ci sont adaptées à notre étude. Dans un second temps, nous allons voir comment et pourquoi adapter les méthodes existantes à notre problématique et enfin expérimenter ces nouveaux outils dans le cadre des activités de Rollinnove.

2 ÉTAT DE L'ART

Pour répondre à la problématique de cette revue, il est important, dans un premier temps, de regarder ce qui existe dans la littérature scientifique. En effet, inclure l'utilisateur dans une ou des phases de conception n'est pas quelque chose de très récent et des expérimentations ont déjà été réalisées par le passé. Il est important d'étudier, dans un premier temps, la base de la conception centrée utilisateur, pour ensuite préciser cette recherche vers une démarche plus inclusive, pertinente dans le cadre d'un travail avec des personnes en situation de handicap. Enfin, certains parallèles avec d'autres secteurs et outils peuvent être faits, pour pousser la réflexion de recherche.

2.1. Les méthodes de conceptions incluant l'utilisateur final

2.1.1. La Conception Centrée Utilisateur

Les méthodes existantes permettant le travail avec les utilisateurs sont utiles et fonctionnent pour une grande majorité des cas et sont basées sur des entretiens, focus groupe ou encore des séances de créativité co-construites avec les utilisateurs cibles. Cependant, certains types de personnes, notamment âgées ou en situation de handicap, rendent la manœuvre plus complexe car ils n'arrivent pas à exprimer suffisamment bien leurs besoins, attentes ou idées.

Il existe déjà des méthodes et normes [1] autour du travail avec les utilisateurs comme la Conception Centrée Utilisateur (Fig. 2) où les besoins, attentes et caractéristiques des utilisateurs finaux sont pris

en compte tout au long du processus de conception. Cela fonctionne en prenant en compte plusieurs points [7] :
- La prise en compte en amont des utilisateurs, de leurs tâches et de leur environnement
- La participation active des utilisateurs, garantissant la fidélité des besoins et des exigences liées à leurs tâches
- La répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie
- L'itération des solutions de conception, jusqu'à satisfaction des besoins et des exigences exprimés par les utilisateurs
- L'intervention d'une équipe de conception multidisciplinaire, visant une expérience utilisateur optimale

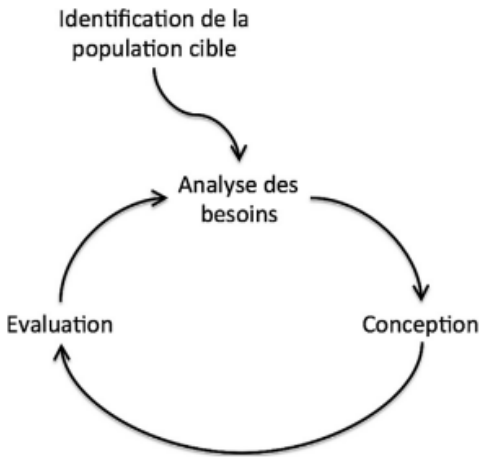


Figure 2. Approche de la conception centré utilisateur [1]

2.1.2. Le Design Inclusif

D'autres méthodes se basent sur ces démarches comme celle du Design Social [8] ou encore la méthode du Design Inclusif [9]. Cette dernière est très intéressante dans notre cas puisqu'elle prend le handicap de la personne au centre de la réflexion, ainsi que la personne en elle-même. Des catégories sont créées entre les différents sens affectés par les handicaps [11] de chacun comme représenté (Fig 3), permettant aux concepteurs de se baser sur cela pour travailler la conception. En effet, en plus des rencontres et outils utilisés avec les usagers, cette méthode propose de se mettre à la place des personnes en situations de handicaps étudiées en, par exemple, se bandant les yeux pour simuler une malvoyance ou encore en se mettant un bras dans le dos pour simuler une activité avec une amputation.

Cette méthode du Design Inclusif [11] est la plus poussée en matière d'intégration de l'utilisateur dans le domaine du handicap. Cependant, elle ne permet pas, en se mettant à la place de l'utilisateur, de capter les signaux faibles tels que les habitudes ou les ressentis propres à une personne en situation de handicap depuis plusieurs années. Ainsi, on se rend compte que ces méthodes sont utiles seulement lors d'occasions précises et qu'il est difficile de les adapter lorsque la pathologie n'est pas précise ou que l'utilisateur n'est pas enclin ou en mesure de partager ses besoins.

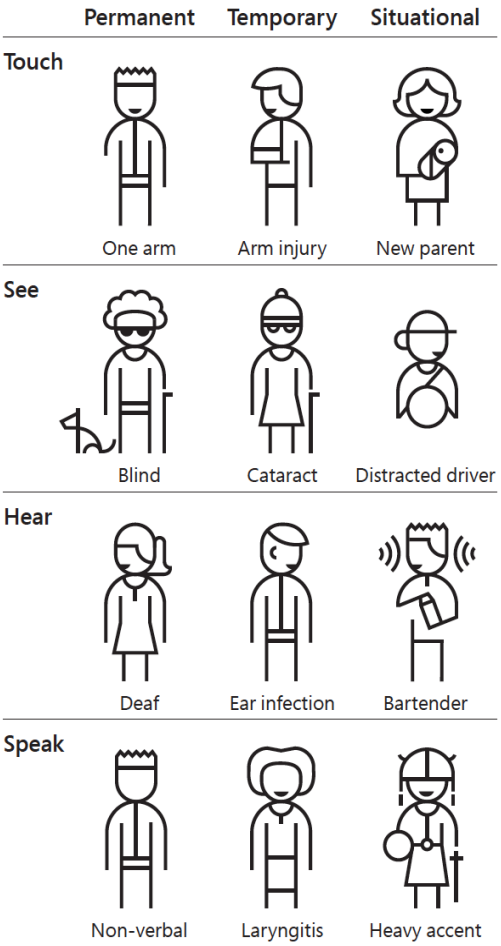


Figure 3. Modèle utilisé pour le Design Inclusif [11]

2.2. Problématiques rencontrées

Il y a, en plus de cela, certaines contraintes liées à la conception centrée utilisateur qui sont exprimés dans la littérature [10]:

- La question du choix et de la représentativité de l'utilisateur (limité par son expérience, ses connaissances, ses attentes, son engagement, etc.). Les utilisateurs « courants » peuvent parfois être peu innovants car ils se réfèrent à ce qui existe déjà ou ce qu'ils connaissent. Ils manquent souvent de connaissances techniques, etc.
- Le degré d'intégration de l'utilisateur au sein de l'équipe de conception et l'organisation que cela nécessite.
- Le rapport avantages/coûts engendrés qui n'est pas toujours justifié.

Ainsi, quand les utilisateurs ont, en plus, des problèmes de communications ou d'expressions orales, il est très difficile de travailler en co-création. Cependant, si l'utilisateur ne participe pas à des séances de créativité ou à des focus groups, il est quand même nécessaire et important qu'il teste les produits pour en faire ressortir les points positifs et négatifs. Mais cela n'est pas toujours le cas quand l'utilisateur final n'est pas considéré comme légitime à donner son avis sur le produit. C'est bien entendu le cas avec les personnes très âgées, apathiques, avec certaines maladies comme Alzheimer par exemple. On va ainsi plutôt venir faire tester les produits ou dispositifs médicaux à des experts, comme des ergothérapeutes ou des psychomotriciens, pour avoir leurs retours. Cependant, ces derniers ne pourront que donner des informations purement pratiques, de l'ordre de l'efficacité ou du confort ressenti, mais en aucun cas des informations liées à l'envie d'utilisation ou des habitudes prises avec d'autres produits, par exemple.

2.3. Parallèle avec le domaine de la petite enfance

Il est difficile de trouver des écrits pertinents dans la littérature sur cette problématique dans le domaine du handicap, mais il se trouve que des problématiques similaires existent dans d'autres domaines d'étude comme la petite enfance par exemple. En effet, dans la création d'outils pédagogiques pour les enfants de 3 à 6 ans : "Lorsque l'on créé des outils pédagogiques pour les enfants (3-6 ans), nous ne les intégrons pas dans le processus de conception (même pas de tests utilisateurs) car ils ne sont pas considérés comme ayant des réflexions pertinentes pour le développement de l'outil, alors que ce sont eux les utilisateurs finaux." [11]. Ces utilisateurs ne sont donc pas acteurs du développement, ce qui peut créer des refus d'utilisation ou des systèmes non adaptés aux personnes sur le plan de l'usage, des fonctions ou encore de l'esthétique.

On retrouve donc bien les mêmes problématiques que celles du handicap sauf que des solutions existent dans le domaine de l'enfance et que l'on ne voit pas dans le champ qui nous intéresse : les grilles d'observations, Fig. 4. Ces grilles permettent de régler les problèmes de communication qu'il peut y avoir entre les utilisateurs et les concepteurs puisque les retours ne passent plus par des échanges oraux. Elles sont basées sur des points de communications non verbales [12] et n'impliquent donc que l'observation des personnes dans leur milieu, en utilisant les produits que l'on souhaite faire tester. Les données de ces grilles sont ensuite analysées pour permettre de faire ressortir des points positifs ou négatifs en fonction du temps qu'a passé l'enfant sur telle ou telle partie du produit, en analysant le regard et ainsi voir les éléments perçus en premier par l'utilisateur, etc. Ces critères sont choisis en fonction de ce que l'on souhaite observer chez l'enfant.

Cependant, vu que la communication est compliquée, il faut aussi suivre des règles de conception dans ce genre de cas, comme par exemple essayer de réaliser le produit ou dispositif le plus affordant [13] possible. Cette notion présente le fait qu'un objet soit compris facilement et apporte une forte réflexion autour du droit à l'erreur pour que la personne qui va utiliser le produit ne soit pas rebuté par celui-ci dès la première utilisation.

Ainsi, et pour conclure cet état de l'art, il existe diverses méthodes, utiles pour des situations plus ou moins précises et qui peuvent servir pour travailler avec des utilisateurs dont il est compliqué de communiquer avec et ainsi créer des produits qui soient acceptés par les utilisateurs finaux, et non rejeté par manque de travail avec eux.

	souvent	quelquefois	rarement	jamais
Comportement personnel				
aisance corporelle				
agile				
adroit				
sportif				
maladroit dans ses gestes				
difficulté à bouger, à se déplacer				
se cogne				
casse son matériel				
difficulté à parler, à articuler				
difficulté à faire des actes précis (écriture, découpage...)				
difficulté à faire un travail propre				
difficultés de latéralisation				
agitation				
calme				
serein				
ne reste pas en place				
tremble				
se déplace sans arrêt				
saute sur place				
se met en danger				
parle beaucoup				
crie				
inhibition				
parle peu				
mutique				
repli sur soi				

Figure 4. Exemple de grille d'observation comportementale

3 MÉTHODE

Pour éviter toutes réponses négatives de la part de l'utilisateur, il est nécessaire de mettre en place une démarche plus inclusive pour intégrer les usagers cibles aussi bien dans la conception que dans les phases de tests. Au vu de l'état de l'art, des travaux peuvent et doivent être menés pour définir la meilleure façon de travailler avec les utilisateurs finaux. Pour ce faire, il faut rencontrer ces usagers et déterminer leur niveau de cognition via des tests pour savoir comment ces derniers expriment leurs idées et besoins. Une fois cela définit, il est nécessaire de déterminer le ou les outils les plus adaptés pour récupérer les informations importantes pour développer les produits voulus. Suite à cela, il faudra tester les outils développés dans le cadre des tests utilisateurs réalisés au sein des activités de Rollinnove et voir la pertinence des informations et la façon dont celles-ci peuvent être utilisées dans le développement d'un produit.

4 EXPÉRIMENTATION

Le travail expérimental est réalisé dans le cadre de l'entreprise Rollinnove. Le produit proposé par cette société est un kit (Fig. 5) à venir placer sur un fauteuil roulant classique pour y apporter un "volant" positionné à l'avant du fauteuil pour faciliter la prise en main. Ce volant est relié à une petite roue arrière grâce à une chaîne. Le pignon du volant étant plus petit que celui de la roue arrière, cela demande moins de force de mettre le fauteuil en mouvement.

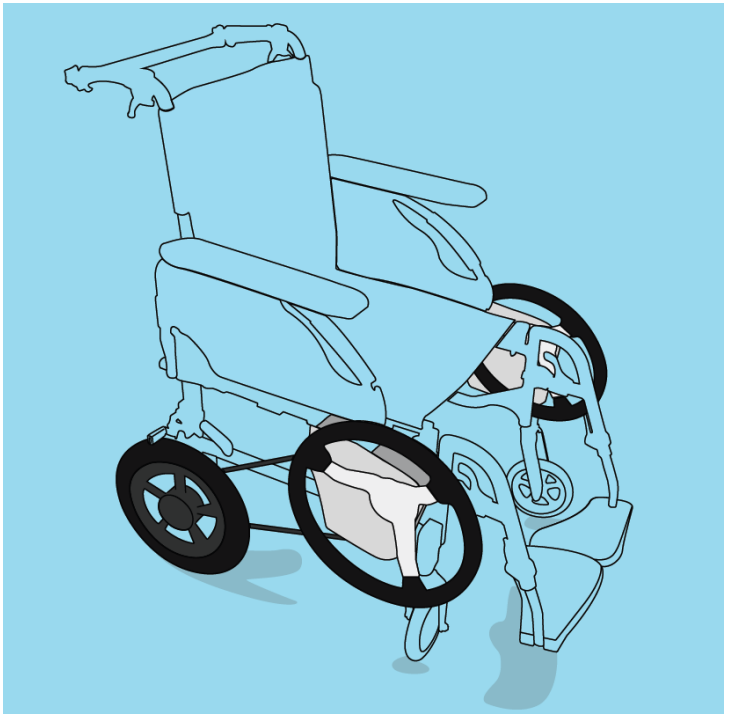


Figure 5. Illustration du kit Rollinnove

Ce kit est déjà bien développé techniquement, mais pas en termes d'usage, pourtant essentiel dans le domaine médical. En effet, ce dernier est développé plutôt dans un cadre médico-social puisque son contexte d'utilisation serait les EHPAD, les hôpitaux ou encore les résidences sénior.

Ainsi, dans le cadre de mes recherches, je suis allé faire tester ce kit à des personnes en EHPAD avec l'ergothérapeute du site Mme Morgane DAVID. Sur les quatre personnes à qui j'ai fait tester le kit, deux d'entre elles n'arrivaient pas à communiquer facilement. En effet, ces dernières ne s'expriment pas du tout, testant le fauteuil en silence. Même lorsque l'on posait des questions, nous n'avons pas obtenu de réponses claires, ne facilitant pas la récupération d'informations pour améliorer le kit. Ainsi, des questions comme "De 1 à 5, comment noteriez-vous la facilité d'utilisation ?" ne donnait pas de réponse alors qu'une question telle que "Préférez-vous votre fauteuil ou celui que nous vous avons amené ?" donnait des réponses, mais malheureusement pas argumentées. Un simple "Pourquoi ?" suite à cette question ne permettait pas aux personnes d'exprimer ce qu'elles préféraient.

Figure 6. Photo lors d'un test réalisé à l'EHPAD

Cette phase a été très importante pour connaître l'approche sur laquelle se baser pour la suite, en matière d'outils à utiliser ou à créer pour communiquer avec les usagers.

5 RÉSULTATS

Ainsi, grâce à ces rencontres, nous avons pu voir les points pertinents sur lesquels baser la création ou adaptation de nos futurs outils et deux choses très importantes sont ressorties :

- Les questions ouvertes n'amènent pas de réponse car elles sont trop complexes et pas assez orientées pour que la personne puisse répondre facilement.
- L'observation est une source d'information très importante, permettant de voir si la personne apprécie ou non la matière, le temps que celle-ci met à prendre en main le kit, etc.

Ce sont ces deux points qu'il sera intéressant de développer, un basé sur des questionnaires à réponse multiples pour orienter la réponse voulue et l'autre sur des grilles d'observation travaillées pour faire ressortir des besoins.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour conclure, les premières expérimentations montrent qu'il faut orienter le développement sous deux points ; l'observation et la verbalisation. Le fait de travailler via ces deux spectres différents permettra de croiser les informations récupérées et d'ainsi avoir un aspect global des différentes problématiques présentés à l'usager.

Pour la suite de ces recherches, je vais créer des questionnaires et grilles d'observations pour tester différents points d'un nouveau prototype de kit que j'ai réalisé et ainsi récupéré des informations pour l'améliorer du point de vue de l'usage. Après avoir testé ces outils, je verrais ce qu'il y a à améliorer pour les rendre le plus universelle possible en travaillant avec des ergothérapeutes pour que ces derniers puissent servir dans d'autres projets que celui de Rollinnove.

7 RÉFÉRENCES

[1] ISO-9241-210. Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems. 2010.

[2] OECD, Manuel d'Oslo (3rd edition). The Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, 2005.

[3] Hatchuel A. and Weil B. - La théorie C-K, un fondement formel aux théories de l'innovation, 2016.

[4] Altshuller G., And Suddenly the Inventor Appeared: Triz, the Theory of Inventive Problem Solving, 1996.

[5] Norman D. The design of everyday things, Revised and Expanded Edition, 1988.

[6] Fardeau, M., and al., Sur une analyse comparative et prospective du système français de prise en charge des personnes handicapées. Rapport au Ministre de l'Emploi et de la Solidarité et au Secrétaire d'Etat à la Santé, à l'Action sociale et aux Handicapés, 2000.

[7] Brangier, E. and J. Barcenilla, Concevoir un produit facile à utiliser: adapter les technologies à l'homme. d'Organisation ed., 2003.

[8] Papanek V., Design for the Real World: Human Ecology and Social Change, Second Edition, 1971.

[9] Waller S., Bradley M., Hosking I. and Clarkson J., Making the case for inclusive design (Vol. 46) Part B, 2015.

[10] Magnusson, P.R., Customer-Oriented Product Development: experiments involving users in service innovation. Stockholm School of Economics: Stockholm, 2003.

[11] Duchesne-Chadouteau L., Educational Engineer at Leo Lagrange, Interview, Paris, 2022.

[12] Corazze J., Les communications non-verbales, Edition PUF, 1980.

[13] Luyat M. and Regia-Corte T., Les affordances : de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept, in L'Année psychologique (Vol. 109), 2009.

EVALUATION D'UN ENVIRONNEMENT VIRTUEL POUR L'APPRENTISSAGE HUMAIN DANS LE CADRE D'UNE FORMATION PROFESSIONNELLE POUR L'INDUSTRIE TEXTILE

Isaline BISSON[1,2], Morad MAHDJOUB[1], Mohsen ZARE[1], Frédéric GOUTAUDIER[2], Franck RAVIER[2], Jean-Claude SAGOT[1]
[1] ERCOS Group (pole), ELLIADD Laboratory EA4661, UTBM - University of Bourgogne Franche-Comte, France
[2] Stäubli, 74230 Faverges, France

Résumé : Cette proposition de communication s'inscrit dans le cadre de l'évaluation d'un environnement virtuel pour l'apprentissage humain (EVAH) pour la formation professionnelle à des tâches de montage. Cet EVAH utilise les technologies immersives et notamment la réalité virtuelle pour compléter la partie compagnonnage de la formation classique. C'est-à-dire que l'apprenant suivra plusieurs exercices en environnement virtuel (EV) durant sa formation et cette EVAH simulera une partie de l'assemblage, lui offrant une plus grande exposition au travail et aux problèmes rencontrés qui sont peu fréquents pendant la formation classique. Dans cet article, nous présenterons le contenu de l'EVAH et son fonctionnement puis l'évaluation de l'expérience utilisateur et de son intérêt pédagogique. Enfin nous proposerons des perspectives méthodologiques (concernant la conception de ce type d'EVAH) et opérationnelles (pistes d'amélioration).

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE étudiant la conception collaborative et centrée-utilisateur de formations professionnelles immersives faisant intervenir l'entreprise Stäubli et le laboratoire ELLIADD.

Mots clés : Evaluation, Formation professionnelle, Réalité virtuelle, Conception centrée-utilisateur, EVAH

1 INTRODUCTION

L'entreprise Stäubli est un fournisseur mondial de solutions mécatroniques, présent sur trois secteurs distincts : les systèmes de connexion, la robotique et le textile. Forte de son expérience, son souhait est de continuer d'innover au niveau de ses processus de production en tentant d'y intégrer certaines des nouvelles technologies de l'industrie 4.0. En parallèle, Stäubli axe particulièrement ses efforts sur la formation de ses opérateurs aux tâches de montage de ses systèmes industriels avec un souci permanent de la préservation de la santé de ses opérateurs mais aussi la sécurité (les accidents).
Les objectifs pour l'entreprise Stäubli sont donc de former ses opérateurs plus rapidement, de manière efficace et tout en préservant leur santé et d'intégrer de nouveaux opérateurs plus facilement et sans impacter l'activité de production. Pour répondre à cet objectif, l'entreprise Stäubli a choisi de profiter des technologies immersives telles que la réalité virtuelle (RV) et la réalité augmentée (RA) et de développer ses propres applications de formation professionnelle immersive.
Dans ce contexte, Stäubli a décidé de reconcevoir l'activité de formation au montage d'une ratière, qui est une partie des machines à tisser. Ici, l'opérateur est accompagné d'un formateur qui connaît le poste mobilisant ainsi deux ressources humaines. La formation est généralement réalisée par la pratique avec le formateur qui est un monteur expert et qui montre les « bons gestes » en s'appuyant sur les fiches de poste. L'apprentissage se fait par une approche des bonnes pratiques. Une formation complètement nouvelle, mettant en œuvre un EVAH, a donc été conçue et mise en œuvre sur une durée de 5 mois pour la formation de 6 apprenants. L'objectif de cet article est de présenter un premier retour sur l'utilisation

de cet EVAH au niveau de son expérience utilisateur et de son intérêt pédagogique. Pour cela, nous présenterons dans une première partie, un état de l'art sur la réalité virtuelle pour la formation professionnelle et l'évaluation des EVAH. Dans une deuxième partie nous présenterons nos résultats suite à l'utilisation de l'EVAH.

2. ETAT DE L'ART

2.1 Réalité virtuelle et formation professionnelle

La RV est un « domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs » [1]. Elle a pour objectif « de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel » [1]. Depuis quelques années, on rencontre même des environnements réels filmés par caméra 360°. La RA quant à elle correspond aux systèmes interactifs qui permettent de présenter en temps réel à l'utilisateur des entités virtuelles et des éléments de l'environnement réel [2], [3]. La RA a pour objectif de compléter la réalité plutôt que de la remplacer comme la RV. Elle se situe entre l'espace du tout virtuel et l'espace du tout physique sur le continuum Réalité-Virtualité formalisé par Milgram et al. [4]. Ce continuum permet aussi d'introduire la réalité mixte (RM) qui est une combinaison d'objets du monde réel et d'objets virtuels (cf. Figure 1).

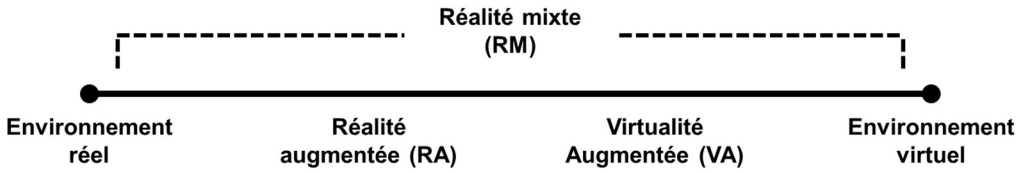


Figure 1 Continuum de réalité virtuel proposé par Milgram et Kishino (Milgram et al, 1995)

L'ensemble de ces technologies connaissent depuis plusieurs années une forte expansion. En effet, l'entreprise américaine de conseil Gartner a positionné les technologies immersives à la 6ème place de son classement des 10 technologies stratégiques pour 2019 [5]. Toujours selon Gartner, d'ici 2022, 70% des entreprises expérimenteront des technologies immersives avec des usages destinés aux consommateurs et aux entreprises elles-mêmes et 25% les auront déployées en production. En 2015, Gartner prévoyait que la RV atteindrait son plateau de productivité (état de la technologie rodé qui permet son application concrète) dans les 5 à 10 années. En 2018, Gartner prévoyait l'atteinte du même plateau pour la RA et la RM sur la même durée. Aujourd'hui, l'ensemble de ces technologies immersives est situé dans une phase qui reflète la croissance et la diversité de leurs applications mais aussi un développement progressif et solide du marché. Pour illustrer cette croissance, Greenlight Insights estime que les ventes de casques de RV pour la formation devraient atteindre 2,2 milliards de dollars en 2022 [6]. Enfin, ces technologies sont aujourd'hui utilisées dans de nombreux domaines allant des applications grand public, industrielles, médicales ou encore militaires par exemple.

Dans le domaine de la formation et de l'ergonomie, il est accepté depuis de nombreuses années que les technologies immersives ont un réel intérêt [7], [8]. Appliquées à la formation, elles permettent de réaliser des tâches sans danger, de réaliser des scénarios impossibles à reproduire dans la réalité (accidents), de simuler des scénarios et des conditions rares (incidents techniques, etc.), de se placer dans des situations de stress, d'être indépendant du temps et autres nécessités (disponibilités des installations par exemple) et d'utiliser le même équipement pour d'autres formations [7]. Pour l'apprenant, les avantages sont nombreux : contrôler la complexité des situations, reproduire les situations à l'identique, décomposer les apprentissages, modifier la structure temporelle et la topologie spatiale, montrer des phénomènes invisibles à l'œil nu et fournir des informations qui ne sont pas disponibles dans le monde réel. Ces attentes pour l'apprenant sont par exemple de pouvoir expérimenter et évoluer à son rythme, s'auto-évaluer et apprendre à partir de ses erreurs. Les attentes pour le formateur/enseignant sont de : faire vivre des expériences crédibles, enregistrer l'activité des apprenants (traces, performances), pouvoir revoir/discuter/comprendre/rejouer l'activité et concevoir de lui-même son application d'enseignement (créer des activités virtuelles, choisir des scénarios ou encore scénariser

les sessions d'apprentissage). Les applications potentielles sont nombreuses comme l'acquisition de gestes métier ou de gestes techniques, la formation à des systèmes et engins complexes, la formation à des procédures de sécurité ou des activités professionnelles par mise en situation etc. On peut citer de nombreux exemples dont celui de DHL qui a développé une formation immersive à la santé et à la sécurité au travail ("Tag Website," 2019). Ce module de formation permet de jouer des scénarios très réalistes simulant des situations de danger dans un environnement 360°. Les résultats ont montré une baisse du taux d'absence résultant de blessures. Magna's Automotive Part utilise des casques samsung gear VR pour former les opérateurs à leurs nouveaux postes de travail [9]. Pacific Gas and Electric utilise de la RV 3D pour former ses employés au montage de valves [9]. Tyson's food a constaté une chute de 20% des blessures et maladies professionnelles par l'utilisation de modules en RV de formation à la sécurité et à la sensibilisation aux risques. Wallmart forme ses employés dans ces 4700 magasins aux Etats-Unis à l'aide de RV. Cela représente plus d'un million d'employés à former à l'aide de 17000 casques. Cela permet notamment à Wallmart d'être sûr que tous les magasins aient les mêmes conditions de formation [9].
Si l'on se place du point de vue des apprenants, les gains apportés par les technologies immersives sont renseignés dans la littérature. Ainsi, Pérez-López et Contero [10] ont montré que l'utilisation d'un système de RA permet une augmentation de rétention de connaissances par rapport à une modalité d'enseignement classique. Cela a été testé sur une population d'élèves en école élémentaire sur l'apprentissage du système digestif et de la digestion humaine. Sur une autre étude, [11] montrent que la RA permet aux étudiants possédant de faibles capacités spatiales d'améliorer significativement leur performance dans la réalisation d'une tâche de dessin d'un solide géométrique (par rapport à une condition traditionnelle de dessin sur papier) sans que le niveau de charge cognitive augmente de manière significative. Plus globalement ; nous pouvons aussi citer deux revues systématiques de la littérature faisant état respectivement de 68 et 89 articles [12], [13] qui listent par exemple les avantages de la RA concernant les résultats d'apprentissage : l'amélioration des résultats d'apprentissage, la motivation pour l'apprentissage, la facilité de compréhension, une attitude positive et la satisfaction, une diminution de la charge mentale et la confiance en soi. Toujours selon Akçayır et Akçayır [13], concernant les contributions pédagogiques, les avantages principaux de la RA sont d'améliorer le plaisir et le niveau d'engagement des apprenants. La RA rend des enseignements considérés comme « ennuyeux » plus divertissants. Elle permet aussi à l'enseignant de donner des responsabilités aux apprenants. De notre expérience, les apports cités ici pour la RA peuvent être retrouvés, dans une certaine mesure, pour les autres technologies immersives.
Enfin du point de vue de la formation dans un contexte de prévention aux maladies professionnelles et à la sécurité, les technologies immersives sont un réel atout par rapport aux modalités classiques de formation (cours, formation sur site, posters, brochures…) qui ne sont pas suffisantes pour changer les comportements des opérateurs [14]–[16].

2.2 Evaluation des EVAH

Dans un contexte général d'évaluation d'une application immersive, Tcha-tokey en 2018 [17] a construit et validé un questionnaire d'expérience utilisateur à partir de certains composants clé. Elle propose d'évaluer les items : présence, engagement, immersion, flow, compétences ; émotion, utilisabilité, adoption de la technologie, jugement et conséquence de l'expérience. Elle a construit son questionnaire à partir de questionnaires existants comme le Presence Questionnaire (PQ), l'Immersive Tendancy Questionnaire (ITQ), le Flow4D16, le System Usability Scale (SUS), le Computer Self-efficacy Scale (CSE), l'Achievement Emotions Questionnaire (AEQ), le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), l'Attrakdiff 2 et le Unified Technology and Use of Technology (UTAUT).

Shin et al en 2013 [18], propose d'évaluer huit composants qui caractérisent l'UX dans un EVAH : le flow, la présence, l'immersion, la confirmation, l'intention d'utiliser, l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue et la satisfaction.

Horeau en 2007 [20] et Ganier en 2013 [21], ont vérifié comment se déroule l'apprentissage d'une procédure en EV pour des opérations de maintenance de chars. Les données recueillies sont des mesures objectives du comportement (temps de réalisation de la tâche, nombre et durée de consultation des instructions, nombre d'actions incorrectes) et des mesures subjectives de la charge mentale (Nasa-TLX). L'expérience s'est déroulée sur deux séances au terme d'un délai d'une semaine entre les deux séances.

D'autres travaux de Horeau en 2013 [22], évaluent l'utilité d'un EV pour l'apprentissage d'une procédure. Ils ont réalisé deux expériences, la première consistait à réaliser deux sessions avec une semaine de délai entre les deux sessions pour vérifier le stockage en mémoire à long terme de la procédure et la deuxième expérience consistait à comparer deux types de formation (traditionnelle et en EV) pour étudier le transfert de cette procédure à une situation réelle. Plusieurs données ont été recueillies pour ces expériences. Dans la première il s'agit du temps total de réalisation de la procédure, le nombre de consultations des instructions et le nombre d'erreurs. Pour la deuxième expérience, les données recueillies portent sur le succès de réalisation de la tâche dans un temps imparti, la durée totale de réalisation de la procédure, la durée de consultation du document technique, le nombre d'appels à l'aide auprès d'un technicien et le nombre d'interventions spontanées du technicien.

Cormier en 2013 [23] a conçu un simulateur pour former des apprenants à l'implantologie dentaire à l'aide d'un dispositif haptique. L'objectif était de montrer l'intérêt d'une formation en réalité virtuelle par rapport à une formation traditionnelle et de démontrer que les apprentissages réalisés dans l'EV peuvent être réutilisés en situation réelle. Pour cela, il a comparé les performances d'un groupe recevant une formation traditionnelle à celle d'un groupe formé en réalité virtuelle. Pour comparer les performances des deux groupes, il a réalisé des mesures, à l'aide d'un scanner, de la position de l'implant lors de sa pose.

Bracq en 2019 [24], étudie l'acceptabilité et l'utilisabilité d'un simulateur de compétences procédurales en réalité virtuelle à l'aide du modèle UTAUT (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology model). Ce simulateur a été conçu pour former des infirmières de bloc. L'objectif était de prédire son utilisation future grâce à la motivation et à l'intention comportementale, d'anticiper les obstacles à son adoption, et in fine d'optimiser sa conception.

Taupiac en 2019 [19] évalue un outil de formation immersif avec un entretien libre de 5 à 10 minutes sur l'expérience. Ensuite il évalue la pertinence de conception de l'outil immersif avec un questionnaire utilisateur et IPQ (Igroup Presence Questionnaire). Il évalue également la pertinence pédagogique avec un questionnaire sur l'expérience d'apprentissage et observes plusieurs traces : le nombre d'erreurs commises, le nombre de répétition nécessaires afin d'atteindre un sans-faute et le temps d'utilisation. Il compare les résultats avec un groupe de contrôle qui n'utilise pas l'outil de formation immersif.

Nous pouvons observer qu'il est possible d'évaluer un EVAH de manière objective et subjective. L'analyse objective consiste à observer les traces laissées par l'apprenant dans l'EVAH, c'est-à-dire des inscription temporisée et informée d'un évènement observé [25]. Les traces vont permettre de décrire les activités des apprenants, observer si les objectifs ont été atteints et les difficultés qu'il a rencontrées. Ils peuvent être sous forme de vidéos, audios ou données informatiques directement enregistrés par l'EVAH. L'analyse subjective va être réalisée par le biais de questionnaires et d'entretien qualitatif. Plusieurs questionnaires sont déjà existants et validés en fonction des items à évaluer. Les évaluations, objectives ou subjectives, peuvent être conduites (i) par comparaison entre experts et novices, (ii) en pré ou post formation, (iii) pour comparer formation traditionnelle et réalité virtuelle et (iv) étudier le transfert d'apprentissage du virtuel au réel.

Deux composantes sont observées pour l'évaluation d'un EVAH ; (i) la pertinence pédagogique et (ii) l'expérience utilisateur. La pertinence pédagogique va permettre d'observer l'impact de l'EVAH sur l'apprentissage et l'expérience utilisateur, qui d'après D.Norman couvre tous les aspects de l'expérience d'une personne avec un système, va permettre d'observer l'interaction entre l'utilisateur, le système et le contexte. Suite à cet état de l'art de la manière d'évaluer un EVAH pour la formation, la partie suivante propose de présenter la formation immersive mise en œuvre au sein de l'entreprise Stäubli.

3. PRESENTATION DE L'EVAH POUR LA FORMATION RATIERE

3.1 Contexte

La formation étudiée consiste à apprendre la fabrication d'une partie des métiers à tisser qui s'appelle la ratière (cf. Figure 2). Sa fonction est d'entraîner les cadres pour former la foule (ouverture) et permettre l'entrelacement des fils tel que défini par le tissage (tissage de trame). Les lames de ratière sont reliées aux châssis par un système de transmission et le schéma est dicté à la machine par un coffret électrique.

Figure 2 Ratière

La formation est réalisée en compagnonnage : un monteur expert va former un novice à fabriquer la ratière. La formation va durer environ trois semaines en fonction de la montée en compétence de l'apprenant. Pendant les premiers jours, le monteur expert va montrer à l'apprenant comment réaliser le montage. Ensuite et jusqu'à la fin de la formation, c'est l'apprenant qui va réaliser le montage en étant guidé par le formateur. Au fil du temps, le formateur interviendra de moins en moins jusqu'à ce que l'apprenant soit autonome. Le temps de montage d'une machine est de plusieurs heures mais au début de la formation il faut environ compter une journée pour que l'apprenant termine de monter une machine. La validation de la formation est réalisée de manière informelle. Cela correspond au moment où le formateur juge que la formation est terminée et donc quand l'apprenant est apte à travailler seul.

Il y a plusieurs problématiques liées à la formation. La première est la demande cyclique pour le secteur textile : il y a des périodes de basse activité où il y a peu de monteurs puis des hausses d'activité qui nécessitent du personnel qualifié pour monter les machines rapidement. Il y a alors une forte demande d'embauche et donc de formation. Le montage de ces machines étant réalisé par la même personne pendant plusieurs heures, cela nécessite l'apprentissage d'un nombre de compétences importants. La formation réalisée en compagnonnage pendant plusieurs semaines prive la production de ressources comme un poste de travail et un monteur expert. Le compagnonnage n'étant pas réalisé par la même personne, la formation et l'évaluation de celle-ci restent très subjectives ce qui fait que d'un formé à un autre, il risque d'y avoir des différences sur le contenu ou la manière de réaliser la formation.

Figure 3 Poste d'assemblage ratière

3.2 Présentation de l'EVAH

L'EVAH a été conçue à partir d'un processus de conception centrée sur les utilisateurs [26]. Après une première analyse du besoin des commanditaires de cette formation, nous avons décidé de ne passer qu'une partie du montage en RV pour éviter des exercices trop longs en réalité virtuelle. Ainsi, nous avons acté qu'en parallèle de la formation virtuelle, il y aurait toujours le compagnonnage avec un monteur expert. Afin de choisir les tâches les plus adéquates à passer en immersif, une analyse du travail et de la formation a donc été conduite via des entretiens et des observations du poste. Deux opérations ont donc été retenues : le montage du couple conique et la synchronisation.

L'exercice 1 consiste à réaliser le réglage d'un engrenage conique de la machine. Une mesure entre deux pièces est prise à la suite du montage. Si cette mesure est hors tolérance alors une cale d'épaisseur doit être ajoutée ou retirée pour ajuster le jeu entre deux pièces. En général, le réglage est bon et ne nécessite pas de démontage donc lors d'une formation, un apprenant ne va réaliser que très peu de fois le

démontage de la machine pour ajuster le réglage (en moyenne trois fois pour une quinzaine de machines montées). C'est pourquoi nous avons proposé de réaliser cet exercice en réalité virtuelle pour que les apprenants puissent réaliser autant de fois que nécessaire le réglage jusqu'à le maîtriser. Nous souhaitons également réaliser plusieurs scénarios avec différents jeux entre les deux pièces car en fonction du jeu il ne faut pas apporter la même correction. Le deuxième exercice consiste à synchroniser les lames avec un arbre à cames. L'objectif est de faire répéter la procédure car une majorité des apprenants n'arrivent pas à comprendre le fonctionnement de la synchronisation et donc à retenir les opérations associées.

Dans cet EVAH, l'apprenant va pouvoir retrouver un environnement de travail fidèle à son poste avec ses outils et une ratière en cours de montage. Il va devoir réaliser environ 150 interactions lors des deux exercices. L'EVAH offre également un mode intégrant des questions (exemple de questions : Pourquoi doit-on utiliser le pignon outillage ?). Ainsi, deux modes sont possibles pour réaliser les exercices :

- Un mode découverte : chaque opération qu'il doit réaliser, l'apprenant aura une assistance qui pourra lui indiquer l'outil à utiliser et son utilité. Sur un tableau, il est également indiqué quelle action il doit réaliser. Ce mode va permettre de guider l'apprenant dans les tâches qu'il a à faire mais aussi de découvrir « ses libertés » dans l'EVAH.
- Un mode entrainement : une fois que les opérations et l'EVAH sont pris en main, l'apprenant n'a plus de système de guidage dans les opérations et il doit réaliser seul les opérations. Il a la possibilité de demander une aide s'il est bloqué.

Ce que voit l'apprenant est retransmis sur un ordinateur pour que l'animateur puisse observer. A la fin de l'exercice, l'animateur aura accès au temps pris par l'apprenant, au nombre de réponses fausses si les questions étaient activées, s'il a mis ses EPIs et réglé en hauteur son poste de travail virtuel.

L'application fonctionne sur un ordinateur couplé avec un casque HTC Vive Pro. L'utilisateur utilise deux manettes pour interagir avec l'EV. L'interaction principale est de pouvoir attraper un outil avec sa main virtuelle et de le positionner au bon endroit pour que l'opération associée à l'outil puisse se jouer en automatique.

Figure 4 EVAH à gauche et utilisateur à droite

L'objectif de l'EVAH, en plus d'aider les apprenants dans leur apprentissage, est de permettre à l'entreprise de : rééquilibrer le temps de mobilisation du poste de travail et du formateur , formaliser le savoir à transmettre et son évaluation, sensibiliser à l'utilisation des outils mis à disposition, aux bons gestes et postures et à la qualité et évaluer l'apprenant et suivre sa progression.

3.3 Déroulement théorique de la formation avec EVAH

La formation se déroule théoriquement sur 3 semaines avec une alternance de sessions de formation sur le poste avec le compagnon et de sessions avec l'EVAH. Ainsi la première semaine, l'apprenant passe tout son temps sur le poste réel pour leur laisser le temps de se familiariser avec leur environnement de travail, leurs outils et la ratière. La deuxième et la troisième semaine, il alterne compagnonnage et sessions en virtuelle sur le modèle : une session de deux heures tous les deux jours ce qui fait six sessions en tout. Pendant les sessions, il pourra réaliser une ou plusieurs fois les exercices. La deuxième semaine de formation (c'est-à-dire quand il va commencer les sessions de formation en réalité virtuelle)

l'apprenant sera en mode découverte. La troisième semaine il réalisera les exercices en mode entrainement.
Après avoir présenté l'EVAH, la partie suivante présente son évaluation.

4. EVALUATION DE L'EVAH

Une évaluation de cet EVAH a été réalisée sur les aspects d'expérience utilisateur et de pertinence pédagogique. Pour cela, nous avons mené une étude avec de nouveaux entrants et leurs formateurs. Nous avons utilisé l'EVAH pendant leur formation selon le déroulement théorique présenté précédemment. Pour cette étude, nous présentons les participants, le matériel utilisé et le protocole expérimental. Nous terminons avec la présentation des données recueillies et les résultats.

4.1. Population

Six sessions de formation ont été étudiées. Cela représente six apprenants et cinq formateurs. Les apprenants ont entre 20 et 39 ans. Ils possèdent tous au moins un diplôme en mécanique ou électrotechnique (BEP ou baccalauréat professionnel). Ils ont également tous déjà eu une expérience professionnelle (alternance ou entreprise). Leur ancienneté dans l'entreprise varie entre une semaine et dix mois. Pour ceux qui étaient là depuis plus d'une semaine, ils étaient attribués à d'autres postes avant d'arriver au poste de montage ratière. Un seul des apprenants a une expérience avec les outils de réalité virtuelle.

4.2. Matériel

Les séances de formation se déroulaient dans une salle mise à disposition par le service informatique de l'entreprise avec le matériel pour faire fonctionner l'EVAH. Un guide d'entretien a été conçu pour évaluer l'EVAH à la fin de la formation par les apprenants selon deux thèmes : l'expérience utilisateur et le ressentis d'apprentissage avec pour chacun des sous-catégories (cf. Table 2 en annexe).

4.3. Données recueillies

Pour cette étude, nous avons recueilli plusieurs traces lors des exercices de l'apprenant. Il s'agit des exercices réalisés (exercice 1 et/ou 2, avec ou sans questions, en mode découverte ou entrainement) et le temps pris pour les réaliser. Nous avons également recueilli les réponses à l'entretien.

4.4. Procédure

Cette étude s'est déroulée en six séances pour les six apprenants suivant le déroulement théorique de la formation (cf. 3.3). Dans un premier temps nous leur avons demandé de réaliser les deux exercices sans les questions pour qu'ils puissent découvrir l'EVAH. Ensuite ils avaient la possibilité de choisir les exercices à réaliser et l'activation des questions en fonction de ce qu'ils souhaitaient travailler. A la fin des six séances, les apprenants et leurs formateurs ont répondu aux questions du guide d'entretien.

4.5. Résultats

4.5.1 Participation

Lors de cette évaluation nous avons observé combien de fois l'apprenant à réaliser les opérations sur le poste en compagnonnage et en réalité virtuelle (cf. table 1).

Catégories	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Moyenne
Nombre de machines entièrement montées pendant la formation réelle	8	9	12	15	12	13	12
Démontage du palier en compagnonnage	2	2	5	7	1	2	3
Démontage du palier dans l'EVAH	8	8	8	8	7	7	8
Somme démontage palier réalisé	10	10	13	15	8	9	11
Synchronisation réalisée en compagnonnage	8	9	12	15	12	13	12
Synchronisation dans l'EVAH	6	6	7	6	6	5	6
Somme synchronisation réalisée	14	15	19	21	18	18	18

Table 1 - Réalisation des opérations de montage en réel et en immersif (Ai = Apprenant numéro i)

Nous pouvons observer que grâce à l'EVAH, certains apprenants ont pu s'entrainer davantage au démontage du palier. En effet, en moyenne, ils ont démonté trois paliers en situation compagnonnage. Il faut d'ailleurs noter que 4 apprenants sur 6 ont démonté au plus deux fois le palier. En situation réelle, ils ont en moyenne démonté 8 fois le palier. S'ils n'avaient pas pu effectuer les exercices via l'EVAH, certains auraient réalisé le démontage du palier que très peu de fois sur leur poste (plus de deux fois moins). Concernant la synchronisation, l'opération est réalisée systématiquement lors du montage d'une machine en compagnonnage. Lors des sessions immersives, les apprenants n'ont pas effectué plus de synchronisation qu'en réel mais cela leur a offert davantage de temps pour s'y former seul.

4.5.2 Questionnaire utilisateur

Dans le but d'évaluer la pertinence de notre EVAH, nous avons analysé les réponses des entretiens aux différents items du guide de l'entretien (Table 2 en annexe).

Immersion de l'utilisateur

D'après le retour des utilisateurs, ils ont pu se concentrer sur la tâche plutôt que de réfléchir aux manettes. Les interactions sont devenues très rapidement naturelles comme un prolongement d'eux même. L'environnement est fidèle à leur poste de travail ce qui leur a permis de se prendre au jeu en oubliant qu'ils se trouvaient physiquement dans la salle de formation. Ils ont pu s'immerger dans l'environnement à tel point que, par exemple, tous ont eu envie de s'appuyer sur l'établi virtuel.

Expérience utilisateur

Utilisabilité

Selon les utilisateurs, l'EVAH a été facile à utiliser et la prise en main est très rapide. Les interactions demandées sont claires et compréhensibles. Concernant l'apprentissage, ils ont trouvé que le mode découverte ne les a pas aidés à apprendre. Le système de guidage montre comment réaliser les étapes donc ils ne les ont pas forcément retenues. Selon eux, l'EVAH est plus adapté sans le guidage, en mode entrainement. Ils pensent tout de même que le guidage est nécessaire pour prendre en main l'EVAH et comprendre sur quoi l'utilisateur peut agir ou non. Il va également permettre de guider l'apprenant dans des tâches qu'il ne connait pas (démontage du palier) s'il ne l'a pas encore effectué pendant sa formation.

Emotion

Les utilisateurs sont satisfaits de leur expérience dans l'EVAH. Les plaintes reçues concernent des problèmes techniques qui ont nécessité un redémarrage et qui les ont fait sortir de l'apprentissage. Une autre plainte évoquée par la majorité des utilisateurs concerne la marge de manœuvre dans la manière de travailler. Lors de la semaine N°2, ce n'est pas forcément gênant car le mode découverte les guide dans les étapes à réaliser étant donné qu'ils sont encore en apprentissage. Cependant en semaine N°3, les apprenants ont pris des habitudes de travail avec leur formateur en situation réelle et ces dernières peuvent, sur certains points, ne pas correspondre aux étapes préconisées par l'EVAH. Plusieurs personnes ont été frustrées de se retrouver bloquées à une étape en ne sachant pas pourquoi. En effet, ils suivent le mode opératoire qui leur semble correcte vis-à-vis de ce qu'ils ont vu en situation réelle alors que l'EVAH attend une autre opération. Cela a pu, par la suite, les désorienter dans le mode opératoire.

Intention d'utiliser

Selon les utilisateurs, en fin de formation, ils ne pensent pas avoir besoin d'utiliser à nouveau l'EVAH car ils se sentent à l'aise sur leur poste mais ils le recommandent aux personnes arrivant sur le poste.

Confirmation

Une seule personne avait vécu une expérience de réalité virtuelle. Les autres ne connaissant pas la technologie, ils n'avaient pas d'attente concernant l'EVAH. Certains craignaient que l'EVAH ne fonctionne pas correctement. Finalement, l'expérience a été meilleure que celle qu'ils avaient imaginé. Une personne espérait approfondir la compréhension de la synchronisation mais ça n'a pas été le cas. En effet, elle attendait de pouvoir obtenir des informations complémentaires justifiant la manière de réaliser cette opération de montage.

Cyber-malaise

La majorité des utilisateurs ont ressenti une fatigue visuelle. Cette fatigue disparaît rapidement après les exercices et apparaît souvent en début de formation ou après une utilisation trop longue du casque, par exemple quand l'exercice dure plus de trente minutes. Un utilisateur a également ressenti une douleur dans la nuque du fait de n'avoir pas réglé en hauteur son poste de travail dans l'EVAH.

Expérience
L'un des points positifs, selon eux, est le fait de pouvoir répéter une même procédure car cela n'est pas faisable à l'atelier. En effet, Ils doivent attendre de terminer une ratière avant de commencer une nouvelle fois la même procédure. Ils vont également pouvoir davantage se concentrer sur la tâche sans se soucier du temps ou de ce qu'il se passe autour d'eux. Ils apprécient également de réaliser la formation en dehors de l'atelier pour éviter le regard des autres personnes. Le fait de ne pas risquer de dégrader la machine est également évoqué par les apprenants. De plus, l'EVAH leur a permis de voir une autre manière d'opérer, plus générale et de devoir respecter la procédure de montage surtout concernant des points importants comme les contrôles. Ils ont également apprécié le fait d'être confrontés à des scénarios représentant des situations rares à l'atelier et donc de mieux les reconnaitre ou moins les appréhender en situation réelle. Ça leur permet également de se poser les questions sur l'action corrective qu'ils doivent réaliser pour faire le réglage. Concernant les points négatifs, plusieurs ont trouvé qu'il y avait trop d'exercices dans l'EVAH à réaliser pendant la formation et qu'il était nécessaire d'intégrer plus de marge de manœuvre dans certaines étapes.

Pertinence d'apprentissage de l'utilisateur
Flow
Les utilisateurs ont trouvé que la difficulté était adaptée à leurs compétences, c'est-à-dire commencer avec le guidage pour découvrir l'EVAH puis passer en mode entrainement. Cependant ils ont trouvé que trois séances en mode découverte était trop. Ils ont préféré le mode entrainement pour apprendre. Comme évoqué, certains étaient tout de même désorientés à la suite des questions, ils ne savaient plus ce qu'ils étaient en train de faire. Cela les forçait à utiliser l'aide pour reprendre le mode opératoire dans le bon ordre. Selon eux, ils maitrisent leurs actions.

Utilité
Les utilisateurs ont trouvé l'EVAH utile car il permet de répéter les opérations du réglage du couple conique et de la synchronisation si un apprenant rencontre des difficultés à les maîtriser. Les différents scénarios permettent de rencontrer des cas rares qu'ils ne voient pas toujours pendant la formation et la répétition leur permet de réaliser plusieurs fois l'opération. L'EVAH permet d'apprendre le déroulement des actions et de sensibiliser à l'utilisation de certains outils, réaliser les contrôles et voir d'autres manières de travailler. Pour eux, ça peut également plaire aux publics qui aiment jouer aux jeux vidéo.

Confiance en soi
Les utilisateurs se sont sentis plus compétents et plus confiants suite à la réalisation des exercices. Cela est encore plus souligné par un des apprenants qui avait des difficultés à comprendre la synchronisation.

Ressenti d'apprentissage
Concernant leur ressenti d'apprentissage, il leur est difficile d'identifier si certaines étapes sont plus facile à apprendre grâce à la réalité virtuelle car en parallèle des exercices ils continuaient le compagnonnage. Mais l'exercice les a aidés dans la compréhension des étapes.

Engagement
Les utilisateurs se sont sentis impliqués dans l'EVAH.

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'objectif de notre étude était de valider la bonne expérience utilisateur et la pertinence pédagogique de l'EVAH. Dans cette étude nous avons analysé les réponses des apprenants lors d'un entretien à la fin de leur formation. Les résultats montrent que l'EVAH est facile à prendre en main et agréable à utiliser par l'utilisateur. Ils ont également trouvé l'EVAH utile pour s'entrainer aux réglages de la machine. Cependant, il a souvent été reproché à l'EVAH d'être trop « restrictif » dans la manière de travailler. Nous avons pu observer que la manière de travailler préconisée par l'EVAH n'est pas entièrement fidèle

à ce qu'ils apprennent en compagnonnage. En effet, en fonction des formateurs, il peut exister une différence dans l'ordre des opérations de montage par exemple. Ceci s'explique par le fait que nous avons analysé la manière de travailler d'un seul opérateur et que nous n'avons pas pris en compte les manières de travailler des autres opérateurs. En effet, le temps de développement du projet était court et nous n'avons pas eu le temps d'approfondir l'analyse de l'activité de montage des ratières. Ici, l'EVAH remplit tout de même son rôle de rappel du mode opératoire théorique à suivre. Effectivement, pour certains contrôles, il est essentiel que l'opérateur respecte les consignes de la gamme de montage même si à d'autres moments il peut être libre de réaliser certaines étapes dans l'ordre qu'il souhaite.
Cela pose la question de l'intégration des marges de manœuvre dans la définition du mode opératoire en immersif. Cependant, leur montrer une autre manière de travailler leur a permis de prendre conscience des libertés qu'ils peuvent avoir dans le travail. Malgré le temps de formation supplémentaire à l'opération de synchronisation, plusieurs apprenants nous ont fait part de leur difficulté à retenir les opérations de la synchronisation car ils ne comprennent pas pourquoi il faut la réaliser. Le manque d'un ingénieur pédagogique dans le groupe projet ne nous a pas permis de chercher d'autres manières de former l'apprenant. Nous sommes restés fidèles à la manière de former en compagnonnage. Notre EVAH a encore des manques à ce niveau. De futurs ajouts à l'EVAH pourront potentiellement apporter des réponses à ces problème. Des niveaux supplémentaires pourraient être ajoutés afin de challenger davantage l'apprenant. En effet, pour certains apprenants, les compétences étaient rapidement assimilées et proposer des éléments complémentaires serait un point positif. Dans notre étude, l'EVAH a uniquement été évaluée par un entretien avec les apprenants. Si elle constitue une première approche, elle pourrait être complétée avec des analyses de la montée en compétence des apprenants sur leur poste en les comparant à un groupe témoin c'est-à-dire qui sont formés sans l'EVAH. Cependant, l'évaluation de la montée en compétence n'est pas évidente à cause des contraintes de l'atelier de production (peu de personne à former, ne réalise pas tous le même nombre de couple conique sur la machine, pas la même expérience de départ, ne veulent pas tous réaliser les mêmes exercice). Enfin l'EVAH étant adoptée par les utilisateurs, il serait intéressant d'observer l'implantation de la solution du point de vue des futurs animateurs c'est-à-dire des agents de maitrise en production.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions les personnes qui ont participé à la conception de l'EVAH et les apprenants pour leur contribution à son évaluation. Ce travail a reçu le soutien financier de l'ANRT (CIFRE n°2019/1977) et du projet EquipEX+ CONTINUUM (ANR-21-ESRE-0030).

7. REFERENCES

[1] P. Fuchs, G. Moreau, A. Berthoz, et J.-L. Vercher, *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 1: L'homme et l'environnement virutel*, 3e éd. Paris: Transvalor - Presses des mines, 2006.

[2] T. P. Caudell et D. W. Mizell, « Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes », in *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, janv. 1992, vol. ii, p. 659-669 vol.2. doi: 10.1109/HICSS.1992.183317.

[3] R. T. Azuma, « A survey of augmented reality », *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no 4, p. 355-385, 1997.

[4] P. Milgram et F. Kishino, « A taxonomy of mixed reality visual displays », *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. 77, no 12, p. 1321-1329, 1994.

[5] Gartner, « Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 ». 2018. [En ligne]. Disponible sur: https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019

[6] K. Schoolov, *Virtual reality training by companies like Microsoft is saving lives, millions of dollars, and ensuring the future of mixed reality*. 2019. Consulté le: 2 octobre 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://www.cnbc.com/2019/01/11/vr-training-by-microsoft-and-pixo-vr–saving-money-and-saving-lives.html

[7] B. Arnaldi, P. Guitton, G. Moreau, et P. Fuchs, *Réalité virtuelle et réalité augmentée: mythes et réalités*. 2018.

[8] J.-M. Burkhardt, « Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques », *Le travail humain*, vol. Vol. 66, no 1, Art. no 1, 2003.

[9] CNBC, *Why Microsoft Uses Virtual Reality Headsets To Train Workers*. 2019. Consulté le: 3 octobre 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?time_continue=37&v=Rnk_akgSjqg
[10] D. Pérez-López et M. Contero, « Delivering educational multimedia contents through an augmented reality application: A case study on its impact on knowledge acquisition and retention », *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, vol. 12, nº 4, p. 10, 2013.
[11] H.-C. K. Lin, M.-C. Chen, et C.-K. Chang, « Assessing the effectiveness of learning solid geometry by using an augmented reality-assisted learning system », *Interactive Learning Environments*, vol. 23, nº 6, Art. nº 6, nov. 2015, doi: 10.1080/10494820.2013.817435.
[12] M. E. C. Santos, A. Chen, T. Taketomi, G. Yamamoto, J. Miyazaki, et H. Kato, « Augmented Reality Learning Experiences: Survey of Prototype Design and Evaluation », *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 7, nº 1, Art. nº 1, janv. 2014, doi: 10.1109/TLT.2013.37.
[13] M. Akçayır et G. Akçayır, « Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature », *Educational Research Review*, vol. 20, p. 1-11, févr. 2017, doi: 10.1016/j.edurev.2016.11.002.
[14] D. A. M. Hogan, B. A. Greiner, et L. O'Sullivan, « The effect of manual handling training on achieving training transfer, employee's behaviour change and subsequent reduction of work-related musculoskeletal disorders: a systematic review », *Ergonomics*, vol. 57, nº 1, p. 93-107, janv. 2014, doi: 10.1080/00140139.2013.862307.
[15] I. Rivilis *et al.*, « Effectiveness of participatory ergonomic interventions on health outcomes: A systematic review », *Applied Ergonomics*, p. 17, 2008.
[16] W. Yu *et al.*, « Effectiveness of participatory training for prevention of musculoskeletal disorders: a randomized controlled trial », *Int Arch Occup Environ Health*, vol. 86, nº 4, p. 431-440, mai 2013, doi: 10.1007/s00420-012-0775-3.
[17] K. Tcha-Tokey, « Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. », Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech, Angers, 2018.
[18] D.-H. Shin, F. Biocca, et H. Choo, « Exploring the user experience of three-dimensional virtual learning environments », *Behaviour & Information Technology*, vol. 32, nº 2, p. 203-214, févr. 2013, doi: 10.1080/0144929X.2011.606334.
[19] J.-D. Taupiac, N. Rodriguez, O. Strauss, et M. Rabier, « Training soldiers to calibration procedures in Virtual Reality, the FELIN IR sight use case », p. 10.
[20] C. Hoareau, F. Ganier, et F. Devillers, « Évaluation de l'apprentissage de procédures avec GVT, environnement virtuel d'apprentissage d'opérations de maintenance », p. 8.
[21] F. Ganier, C. Hoareau, et F. Devillers, « Évaluation des performances et de la charge de travail induits par l'apprentissage de procédures de maintenance en environnement virtuel », *Le travail humain*, vol. 76, nº 4, p. 335, 2013, doi: 10.3917/th.764.0335.
[22] C. Hoareau, F. Ganier, R. Querrec, C. Buche, et F. L. Corre, « Evaluation de l'utilité d'un Environnement Virtuel pour l'apprentissage humain », 2013, doi: 10.13140/RG.2.1.3664.8721.
[23] J. Cormier, « Mobiliser une analyse de l'activité comme aide à la conception et à l'évaluation d'un Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain: un exemple en implantologie dentaire », p. 223.
[24] M.-S. Bracq *et al.*, « Learning procedural skills with a virtual reality simulator: An acceptability study », *Nurse Education Today*, vol. 79, p. 153-160, août 2019, doi: 10.1016/j.nedt.2019.05.026.
[25] C. Baudouin, M. Beney, P. Chevaillier, et A. Le Pallec, « Recueil de traces pour le suivi de l'activité d'apprenants en travaux pratiques dans un environnement de réalité virtuelle », *stice*, vol. 14, nº 1, p. 389-418, 2007, doi: 10.3406/stice.2007.967.
[26] I. Bisson *et al.*, « CADRE CONCEPTUEL APPLIQUE A LA CONCEPTION DE FORMATION PROFESSIONNELLE IMMERSIVE », p. 17.

8. ANNEXE

Sujet	Catégories	Item mesuré	Source
	Présence	PR1 : Êtes-vous parvenu à vous concentrer sur les tâches plutôt que sur les manettes ?	*Tcha-Tokey, 2018*
		PR2 : Est-ce que l'environnement vous semblait réel ?	

	Immersion	IM1 : Etiez-vous conscient de ce qui pouvait se passer autour de vous ?	*Shin & al, 2013*
		IM2 : Etiez-vous détaché de l'environnement extérieur ?	*Shin & al, 2013*
		IM3 : Est-ce que vous vous êtes senti sur votre poste de travail plutôt que dans un apprentissage virtuel ?	*Shin & al, 2013*
UX application	Utilisabilité	UTS1 : Trouvez-vous qu'apprendre avec l'application est facile ?	*Shin & al, 2013*
		UTS2 : Trouvez-vous que les intéractions à travers l'application sont claires et compréhensibles ?	*Shin & al, 2013*
		UTS3 : Est-ce que globalement, l'apprentissage de l'applications est facile pour vous ?	*Shin & al, 2013*
	Emotion	EM1 : Êtes-vous satisfait de l'expérience avec l'application ?	*Shin & al, 2013*
		EM2 : Avez-vous eu des problèmes/plaintes avec l'application ?	*Shin & al, 2013*
		EM3 : Globalement, êtes-vous satisfait de l'application ?	*Shin & al, 2013*
	Intention d'utiliser	IN1 : Pensez-vous utiliser l'application dans le futur ?	*Shin & al, 2013*
		IN2 : Est-ce que vous recommandez aux autres d'utiliser l'application ?	*Shin & al, 2013*
		IN3 : Est-ce que vous avez l'intention d'utiliser l'application à l'avenir ?	*Shin & al, 2013*
	Confirmation	CO1 : Est-ce que votre expérience à utiliser l'application était meilleure que ce que vous aviez imaginé ?	*Shin & al, 2013*
		CO2 : Est-ce que globalement la majorité de vos attentes concernant l'application était confirmée ?	*Shin & al, 2013*
	Cyber-malaise	CY1 : Est-ce que vous avez ressenti l'un de ces symptômes durant l'interaction avec l'environnement virtuel ? Fatigue, fatigue visuelle, maux de tête, augmentation de la salivation, nausées, lourdeur dans la tête, étourdissement, vertiges.	*Tcha-Tokey, 2018*
	Expérience	EX1 : À votre avis, quels ont été les points positifs de votre expérience ?	*Tcha-Tokey, 2018*
		EX2 : À votre avis, quels ont été les points négatifs de votre expérience ?	*Tcha-Tokey, 2018*
		EX3 : Avez-vous des suggestions pour améliorer cet environnement de réalité virtuelle ?	*Tcha-Tokey, 2018*
Retours sur l'apprentissage	Flow	FL1 : Est-ce que à chaque étape vous saviez ce que vous deviez faire ?	*Tcha-Tokey, 2018*
		FL2 : Est-ce que vous sentiez que vous contrôliez parfaitement vos actions ?	*Tcha-Tokey, 2018*
	Utilité	UT1 : Est-ce que selon vous, vous pensez que l'application est utile ?	*Shin & al, 2013*
		UT2 : Est-ce que vous trouvé que l'application est un bon support d'aide au compagnonnage ?	
	Confiance en soi	CS1 : Est-ce que vous vous sentez suffisamment à l'aise pour effectuer le réglage du couple conique et la synchronisation sur votre poste grâce aux exercices virtuelles ?	
		CS2 : Est-ce que vous avez besoin de rejouer l'apprentissage virtuel avant d'être autonome sur votre poste pour réaliser le réglage du couple conique et la synchronisation ?	
		Est-ce que vous ressentez que vous êtes plus compétent après l'expérience ?	
	Ressenti apprentissage	RE1 : Est-ce que certaines étapes du montage n'étaient pas claires avant la formation immersive et ne le sont plus ?	
		RE2 : Est-ce que certaines étapes du montage n'étaient pas claires avant la formation immersive et le sont moins ?	
	Engagement	EN1 : Est-ce que vous vous êtes senti impliqué dans l'expérience ?	

Table 2 - Guide d'entretien

Augmentation de l'échelle d'un procédé innovant de culture de microalgues visant à capter le CO_2 dégagé par un méthaniseur

Bloc'h Alexia*[1], Mei Mathis*[1], Lictevout Pauline*[1], Raud Laëtitia*[1], Berger Karine[2], Duong Frederic[2], Silva Vargas Karen[1]

1Ecole de Biologie Industrielle, EBInnov, 49 avenue des Genottes, 95895 Cergy-Pontoise, France 2 NENUPHAR SAS, 12 Rue du chardonnay, Pézilla-La-Rivière, France *Auteurs à parts égales

Résumé

Les microalgues, micro-organismes photosynthétiques, représentent une ressource renouvelable abondante, prometteuse pour l'industrie agroalimentaire, cosmétique, et pharmaceutique. La culture de microorganismes s'est depuis toujours confrontée aux verrous technologiques et économiques. Dans ce sens, Nénuphar SAS tente de répondre à ce défi avec une nouvelle technologie permettant la croissance de microalgues par l'utilisation de puits de lumière flottants– un dispositif breveté– qui captent et diffusent l'énergie solaire à l'ensemble des bassins cylindriques de culture. Cette étude a pour but d'évaluer le potentiel de captation de CO_2 de cette technologie dans un volume de culture 100 fois supérieur par rapport à l'échelle pilote, correspondant à 78.54 m^3. Le dit gaz est rejeté par une unité de méthanisation traitant des boues produites par une station d'épuration. Pour cela, l'étude de différents paramètres tels que les dimensions optimales des bassins, le milieu de culture et la puissance de mélange, a été menée. L'étude a montré que le procédé a besoin d'augmenter les dimensions des bassins, notamment le diamètre à 10 m, le nombre de puits de lumière à 1384, ce qui entraîne la captation de 7.27 ton an^{-1} de CO_2 et une puissance de mélange à 2200W.

Mots clés : Microalgues, captation de CO_2, environnement, production, innovation.

1 INTRODUCTION

Une microalgue est un organisme photosynthétique représentant une alternative au pétrole et une source de protéines alimentaires abondante, ce qui entraine l'attention des diverses industries notamment l'agroalimentaire, la cosmétique ou la pharmaceutique [1]. En 2020, la production mondiale de microalgue est estimée à une dizaine de milliers de tonnes par an. Les domaines d'applications sont nombreux ; celui de la nutrition humaine connaît notamment un réel essor [2]. Actuellement, il existe deux grands types de photobioréacteurs, les systèmes ouverts (nommés raceway) et les systèmes fermés qui sont tubulaires ou sous forme de panneaux. Le système ouvert est fait de bassins de faible profondeur (30-40cm) et prennent une surface au sol importante afin d'avoir un volume de culture industriel. Ce système est économique car la lumière du soleil est utilisée ; seuls des nutriments doivent être ajoutés. Concernant l'agitation de la culture, ce sont des roues à aube peu énergivores qui sont utilisées. C'est actuellement le seul système utilisé pour des produits à basse valeur ajoutées tel que la spiruline. Une entreprise californienne Earthrise possède 22 hectares de système raceway pour produire de la spiruline [3]. Les systèmes fermés sont des systèmes très contrôlés avec ajout de CO_2, souvent de qualité industrielle, afin de fournir la source de carbone nécessaire pour la photosynthèse. Un compresseur d'air ou une pompe doivent être utilisés pour agiter le milieu de culture ce qui engendre une forte consommation énergétique. Ce type de système nécessite un investissement dans le matériel CAPEX, OPEX avec les nutriments et surtout le CO_2. Ces systèmes sont uniquement utilisés pour des produits à haute valeur ajoutée tels que des pigments ou actifs pour la cosmétique ou la nutrition. L'entreprise française Microphyte possède 200m^3 de culture et produit des actifs cosmétiques et nutraceutiques grâce à son procédé de culture dans des de tubes en verre.

À ce jour, de nombreuses recherches ont été menées sur les aspects techniques ou moléculaires de la croissance des microalgues [4][5][6][7]. Les facteurs affectant la croissance et le développement des microalgues sont présentés dans le tableau 1. Chaque souche possède des conditions optimales faisant varier ces facteurs. Des stress effectués lors de la croissance influencent notamment la production plus ou moins élevée de molécules d'intérêts présentes dans les cellules algales [5].

Tableau 1. Paramètres affectant la croissance et le développement de microalgues [4]

Procédé	**Matière**
Concentration en biomasse Homogénéité du mélange Fréquence de récolte	Température pH Nutriments du milieu Lumière (type et intensité) Débit de CO_2 Type de souche

Les études de Huabing XU [6] et Chayakorn Pumas [7] ont permis d'optimiser les caractéristiques de la lumière idéale à la croissance de la souche comme la longueur d'onde et l'intensité lumineuse. Il en résulte qu'une lumière entre 460 et 470 nm (correspondant au bleu) présenterait un taux de croissance plus élevé (0,4) qu'une lumière naturelle (0,38). En intégrant cette information à l'application industrielle, la lumière naturelle est ainsi utilisée dans ce procédé.

Certains chercheurs ont proposé que les changements de pH dans la solution dans laquelle les microalgues se développent sont liées à la concentration de CO_2 milieu. Le CO_2 se dissout dans la solution pour devenir de l'acide carbonique, rendant la solution acide et abaissant les niveaux de pH, par conséquent, des concentrations élevées de CO_2 peuvent rendre la solution trop acide pour que les microalgues puissent se développer, ainsi les recherches ont tenté de maintenir des niveaux de pH constants par des méthodes telles que l'ajout périodique de sels d'ammonium ou l'utilisation de concentrations plus élevées de tampon, puis la modification progressive du pH [8] [9].

La culture de microalgues peut valoriser le procédé de méthanisation via la captation de CO_2 issue de la fermentation des déchets organiques d'élevage, des boues de station d'épuration des eaux usées, des co-produits de l'industrie agro-alimentaire, etc. A la suite de la méthanisation sont produits du digestat et du biogaz constitué de 50 à 70% de méthane et 20 à 50% de dioxyde de carbone [10]. Le CH_4 est utilisé pour la production d'énergie et le CO_2 pourrait être valorisé en tant que matière première pour la croissance de microalgues, au lieu d'être relâché dans l'atmosphère, augmentant les gaz à effet de serre [11].

Comprendre les complexités et les flexibilités des facteurs de croissance et les harmoniser peut aider à optimiser la croissance pour maximiser la production de biomasse, et par conséquent, la captation de CO_2. Pour répondre à cette problématique scientifique, l'industrie ne cesse d'innover en créant et optimisant des bioréacteurs capables d'assurer la production de cette ressource renouvelable. C'est notamment le cas de l'entreprise française Nénuphar, spécialisée dans ce domaine. Elle a mis au point une technologie brevetée qui permet d'optimiser la culture de la souche *Scenedesmus*, ainsi que la rentabilité des exploitations en répondant au mieux aux enjeux relatifs au développement durable. En effet, la technologie Nénuphar permet une captation de 2 kg CO_2 par kg de biomasse.

Nénuphar souhaite utiliser le CO_2 émis (600 tonnes/an) par la méthanisation de boues produites par une station d'épuration située à Perpignan pour nourrir les microalgues par photosynthèse. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de captation de CO_2 de cette technologie dans un volume de culture 100 fois supérieur par rapport à l'échelle pilote, correspondant à 78.54 m^3, appliquée à la croissance de la souche *Scenedesmus*.

2 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE NENUPHAR

2.1. Souche et composition du milieu de culture

Le procédé Nénuphar est focalisé sur la culture de *Scenedesmus*, de la famille *Scenedesmaceae*, une souche trouvée dans les milieux d'eaux douces. Elle peut former des colonies de plusieurs dizaines de cellules avec un volume cellulaire correspondant de 110 μm^3 [12]. Cette souche est riche en lipides, protéines et glucides, présentant un grand potentiel pour la production de biocarburant et pour l'alimentation animale & humaine [13]. D'après l'étude de Dauta et al [13] la composition biochimique de *Scenedesmus* varie en fonction des conditions environnementales telles que la température, le pH, la lumière, le gaz injecté, etc . Il est donc nécessaire de contrôler la température du milieu pour que cette dernière soit optimale car il s'agirait du facteur ayant le plus d'influence. La souche est injectée à une concentration de 0,2g/L dans le milieu de culture BG11 [14], préparé en amont, apportant les nutriments nécessaires à la croissance des microorganismes tels que l'azote, le phosphore et la potasse (voir tableau 2).

Tableau 2. Composition du milieu de culture BG11

	Nom du composé	**Concentration (g/m^3)**
Nutriments	$NaNO_3$	1500
	$K2HPO_3$	40
	KH_2PO_4	200
	EDTA	1
	Citrate d'ammonium ferrique	1
	Acide citrique	6
	Na_2CO_3	20
Métaux	$CoN_2O_6 + 6H_2O$	80
	$Na_2Mo_4 + 2H_2O$	50
	$CuSO_4$	80
	$ZnSO_4$	20
	$MnSo_4 + H_2O$	1,8
	H_3BO_3	2,85

2.2. Captation de la lumière

La technologie de Nénuphar est basée sur la captation et la diffusion d'une source lumineuse naturelle (énergie solaire) via des puits transparents flottants dans un bassin de culture cylindrique ouvert à l'atmosphère, permettant la photosynthèse, et par conséquent, favorisant la croissance et la multiplication rapide de la culture. Ce bioréacteur se présente sous la forme d'une cuve cylindrique d'1 m de hauteur et 1 m de diamètre, correspondant à un volume de culture d'environ 0,79 m^3 à échelle pilote (voir figure 1, a). Nénuphar a choisi de créer un procédé utilisant des matériaux économiques tout en prenant peu de surface au sol tels que plexiglass et polystyrène, amenant le coût d'un puit à une vingtaine d'euros. Le défi de ce système est d'optimiser l'accès de la lumière à l'ensemble du contenu du bassin. Le système (illustré dans la figure 1, b) est un puit de lumière constitué d'un dôme en plexiglass - formé de deux parois séparées par une couche de gaz - captant la lumière, d'un flotteur en polystyrène, d'une manche semi transparente qui diffuse la lumière en profondeur (90 cm) et d'un lest pour avoir une structure bien droite en mouvement [15] [16] [17] [18].

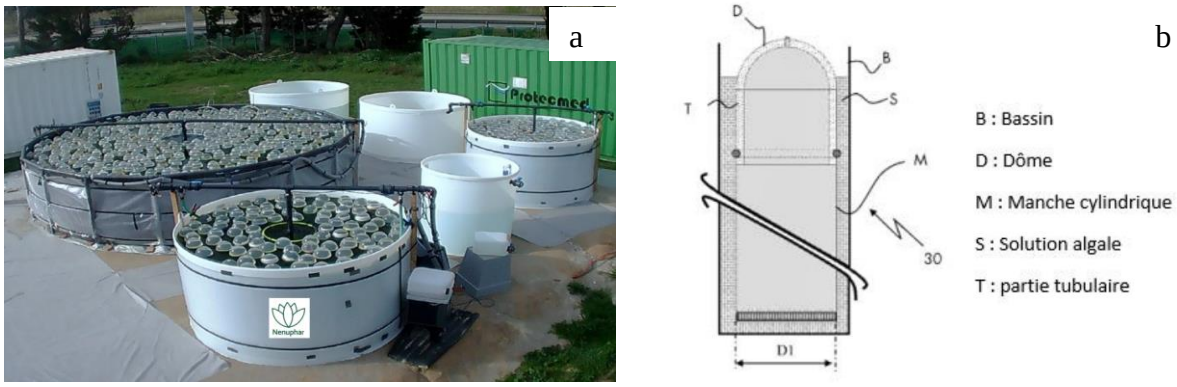


Figure 1. Technologie Nénuphar présents à l'IRTA, Espagne (a). Dispositif de capture, transport et diffusion de la lumière : Puit Nénuphar (b).

2.3. Homogénéité de mélange

La mise en place d'un système de pompage (60 - 120 W) par recirculation en bas de cuve génère une circulation vortex centripète assurant la répartition de la lumière et l'homogénéité de la concentration dans tout le volume, sans décantation ni formation de biofilm (voir figure 2). Le mouvement du liquide est circulaire dans le sens de l'effet Coriolis afin d'avoir l'aide ce phénomène physique naturellement présent sur Terre. Pour augmenter la puissance de cet effet et avoir un système homogène, la pompe est placée au fond et au centre du bassin. Celle-ci a pour objectif de pomper l'eau et la rejeter dans le bassin grâce à deux tuyaux en surface. En soutirant et rejetant l'eau de cette manière, la pompe agit comme un vortex et, grâce à la force centripète, l'eau maintient un mouvement circulaire. Dans le cas d'un tel réacteur, aucun mobile classique d'agitation n'est utilisé et l'objectif est de favoriser l'apparition d'un vortex afin d'avoir une suspension de microalgues homogène, il n'y a donc pas besoin de chicanes. Ce système est agité grâce à 2 forces naturelles (Centripète, Coriolis) et la puissance d'une pompe permettant la mise en circulation du milieu mais aussi des puits de lumière. L'objectif est d'avoir une somme de ces forces suffisante pour permettre la rotation de l'ensemble du système. La force centripète et l'effet Coriolis sont naturels, ces paramètres ne peuvent pas être changés lors d'un changement d'échelle. En revanche, une pompe peut avoir une action plus ou moins forte en fonction de sa puissance.

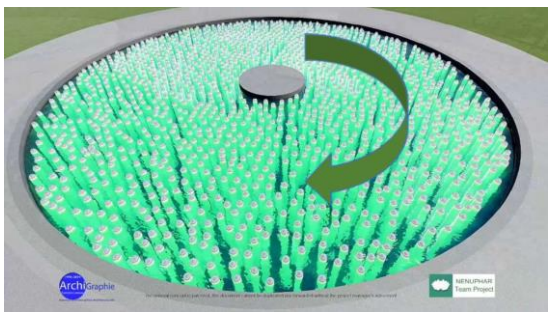


Figure 2. Circulation des dispositifs au sein du bassin de culture Nénuphar.

2.4. Rôle critique du CO_2 dans le procédé

Les conditions de croissance optimales de la souche (photosynthèse à pH neutre) sont régulées à partir du débit d'alimentation de CO_2 fourni au milieu par un diffuseur fines bulles. À date, la consommation de CO_2 n'est pas connue par Nénuphar, cette information serait de grand intérêt car elle permettra d'étudier la captation de CO_2 comme approche durable.

2.5. Récolte de microalgues

A l'échelle pilote (1 et 2,5 m de diamètre), Nénuphar SAS a étudié trois méthodes : la flottation, la décantation et l'ultrafiltration. La flottation est une opération de séparation solide/liquide qui utilise la

capacité de certaines substances en milieu aqueux à fixer des bulles d'air, obtenant ainsi une densité réduite. Le jour, les microalgues produisent de l'oxygène par photosynthèse. Elles fixent ce gaz et remontent en surface en formant une crème de quelques millimètres d'épaisseur qui peut être récoltée grâce à un récipient tel qu'un bécher. La crème est récoltée, pesée puis passée au dessiccateur afin d'en retirer l'eau. D'autre part, la décantation est un procédé de séparation solide/liquide ou liquide/liquide qui utilise la gravité et la différence de densité des 2 phases. La nuit, en absence de lumière, les microalgues ne produisent pas d'oxygène. Les pompes sont coupées, les microalgues se rapprochent et forment des flocs d'une certaine masse. Grâce à la gravité, les microalgues se concentrent au fond de la cuve. Le milieu est retiré afin de récupérer les microalgues et pourra être réutilisé. Finalement, la filtration est un procédé de séparation solide/liquide qui utilise un filtre avec des pores d'une certaine taille afin de retenir les particules solides contenues dans une phase liquide (ou gazeuse). D'après les études de J. Ma et al. [19], la taille de la *Scenedesmus* varie de 5 à 30 micromètres, cette souche peut donc être récoltée par filtration lorsque la bonne taille de pores est utilisée.

3 METHODOLOGIE D'EXTRAPOLATION

L'intérêt de cette méthodologie est d'évaluer les conditions de culture dans un volume de bassins 100 fois supérieur au volume initial (échelle pilote). Les paramètres étudiés ont été : le dimensionnement du bioréacteur, la quantité de nutriments, les conditions hydrodynamiques et le potentiel de captation de CO_2.

3.1. Dimensionnement du bioréacteur

Le dimensionnement du bioréacteur a été réalisé à partir des volumes cylindriques correspondants aux volumes final et initial, respectivement V_f et V_i, (voir équation 1). Afin d'assurer une quantité suffisante de lumière dans la culture et un bon volume de culture, la hauteur du bassin a été maintenue constante ($h = 1\ m$). Ainsi, le diamètre total du nouveau milieu de culture a été calculé (D_f) à partir du diamètre initial ($D_i = 1\ m$).

$$\frac{V_f}{V_i} = \frac{D_f^2 h}{D_i^2 h} = \frac{D_f^2}{D_i^2} \quad [1]$$

Concernant les dispositifs des capteurs de lumière, nommés nénuphars, le dimensionnement a été réalisé pour un remplissage optimal de 40% de la surface total du bassin (équation 2) ainsi qu'une hauteur de $h_p = 0.9\ m$, ces paramètres de dimensionnement ont été fixés par Nénuphar d'un point de vue optique et physique. Deux diamètres des puits (D_p) ont été évalués, 0.17 m et 0.34 m, respectivement. La surface transversale (dôme) en m^2 et le volume en m^3 de chaque dispositif a été calculé à partir de l'équation 3 et 4, respectivement. Finalement, le nombre optimal de dispositifs (n_f) et le volume net du nouveau milieu de culture (V_c^f) ont été estimés en utilisant les équations 5 et 6, respectivement.

$$S_{40\%}^f[m^2] = 0.1\ \pi\ D_f^2 \quad [2]$$

$$S_p[m^2] = \pi\ \frac{D_p^2}{4} \quad [3]$$

$$V_p[m^3] = S_p\ h_p + \left(\frac{1}{12}\pi D_p^3\right) \quad [4]$$

$$n_f = \frac{S_{40\%}^f}{S_p} \quad [5]$$

$$V_c^f[m^3] = \frac{\pi}{4}\ D_f^2 - n_f\ V_p \quad [6]$$

3.2. *Quantité des nutriments*

En fonction du volume net du milieu de culture initial ($\boldsymbol{V_c^i}$) et final ($\boldsymbol{V_c^f}$) , la masse finale de chaque nutriment ($\boldsymbol{m_n^f}$) peut être déterminée à partir de l'équation 7, où $\boldsymbol{m_n^i}$ est la masse de chaque nutriment du milieu initial en g. À partir des équations 2 à 6, l'équation 7 peut être exprimée à partir du diamètre final du bassin et la concentration du milieu initial (voir équation 8). La concentration de chaque nutriment ($\boldsymbol{C_n^i}$) est donnée en g/m^3 dans la recette du milieu BG11 (voir tableau 2). L'équation est valable pour une hauteur de puits de $\boldsymbol{h_p}$ = 0.9 m. Il est important de maintenir la concentration totale de l'ensemble des nutriments et métaux à 2 g/L.

$$\frac{\boldsymbol{m_n^f}}{\boldsymbol{m_n^i}} = \frac{\boldsymbol{V_c^f}}{\boldsymbol{V_c^i}} \quad [7]$$

$$\boldsymbol{m_n^f\,[g] = 0.16\,\pi\,C_n^i D_f^2} \quad [8]$$

3.3. Conditions hydrodynamiques

L'homogénéité des conditions hydrodynamiques est représentée par des grandeurs caractéristiques telles que la vitesse de mélange du bioréacteur ($\boldsymbol{v}$), la hauteur du bassin ($\boldsymbol{h}$) , la viscosité du milieu de culture (μ), la masse volumique du milieu de culture (ρ) et le diamètre du bassin (D). Les variations de viscosité et masse volumique ont été négligées. La hauteur du bassin a été maintenue constante ($\boldsymbol{h = 1\,m}$). La variation de la vitesse de mélange du bioréacteur (puits et milieu) - représentée par la puissance consommée par la pompe (P) en [W] - a été évaluée expérimentalement en fonction du volume total du bassin (V), les valeurs de D = 1, 2.3 et 5.5m ont été testés. Un modèle linéaire empirique (voir l'équation 9) a été proposé pour le calcul de la puissance optimale de mélange du nouveau bioréacteur en utilisant des dispositifs de capture de lumière de 0.17 m de diamètre.

$$\boldsymbol{P\,[W] = a\,V + b} \quad [9]$$

3.4. Potentiel de captation de CO_2

Pour évaluer le potentiel de captation de CO_2 du milieu de culture de microalgues, une captation de 2 kg de CO_2/ kg de souche a été utilisé comme référence [17]. Les perturbations du transfert de la lumière ont été négligées. Ainsi, la captation de CO_2 a été estimée à partir de l'équation 10.

$$\boldsymbol{Captation\ CO_2 = \frac{masse\ de\ CO_2\ [kg]}{masse\ de\ \ la\ souche\ [kg]}} \quad [10]$$

La masse de la souche a été calculée à partir du volume de culture $\boldsymbol{V_c^f}$, estimé à partir de l'équation 6 avec des dispositifs de 0.17 m de diamètre. La productivité optimale de la souche du procédé Nénuphar SAS est de 0.25 g L^{-1} jour^{-1} en moyenne, avec une concentration initiale de 0,2g L^{-1} et une concentration

finale de 0,5 g L^{-1}. Ainsi la mase de culture en kg est estimée pour un total de 300 jours en utilisant l'équation 11.

$$\textbf{Masse de la souche } [kg] = 75\ V_c^f, \qquad o\grave{u} \quad V_c^f \textbf{ en } m^3 \tag{11}$$

4 DISCUSSION DES RESULTATS

4.1. Analyse de la culture et la captation de la lumière

L'extrapolation du volume des bassins à 78,54 m^2 détaillé dans la section 3.1 permet l'obtention d'un bioréacteur de 10 m de diamètre et une hauteur de 1 m. Les résultats du nombre de puits de lumières (nénuphars) optimal ainsi que le volume net de culture correspondant à un diamètre du dispositif 0.17m et 0.34 m, sont détaillés dans le tableau 3.

Tableau 3. Dimensionnement de dispositifs de captation de lumière

D_p [m]	S_p (m^2)	V_p (m^3)	n_f	V_p^{total} (m^3)	V_c^f (m^3)
0.17	0,023	0.022	1384	30.05	48.49
0.34	0,091	0.092	346	31,83	46.71

D_p , S_p , V_p = Diamètre, surface et volume de chaque dispositif (Nénuphars), n_f = nombre de dispositifs
V_p^{total}= $n_f * V_p$, volume total des dispositifs , V_c^f = volume total de culture

Tableau 4. Composition du milieu de culture de volume. V_c^f = 48,49m^3

	Composant	C_n^i (g/m^3)	m_n^f (Kg)
Nutriments	$NaNO_3$	1500	72,73
	K_2HPO_3	40	1,94
	KH_2PO_4	200	9,70
	EDTA	1	0,05
	Citrate d'ammonium ferrique	1	0,05
	Acide citrique	6	0,29
	Na_2CO_3	20	0,97
Métaux	$CoN_2O_6 + 6H_2O$	80	3,88
	$Na_2Mo_4 + 2H_2O$	50	2,42
	$CuSO_4$	80	3,88
	$ZnSO_4$	20	0,97
	$MnSo_4 + H2O$	1,8	0,09
	H_3BO_3	2,85	0,14

C_n^i = concentration de chaque nutriment, m_n^f = masse de chaque nutriment pour un volume de culture de V_c^f = 48.49 m^3 et un diamètre de culture de D_f= 10 m

Avec le doublement du diamètre des nénuphars, le nombre de puits à produire serait divisé par 4 – de 1384 à 346 dispositifs - ce qui réduirait le coût d'installation. L'augmentation du volume total des nénuphars de 1.78 m^3 dû à la modification de la géométrie de dômes (demi-sphère) pourrait modifier le mécanisme de captation de la lumière et par conséquent la productivité optimale de la souche. Les études menées par E. Olivo montrent l'influence de la profondeur de l'eau sur l'irradiation des microalgues [20]. Plus la lumière doit traverser de l'eau, moins celle-ci est disponible car l'eau atténue la lumière. Ainsi, en élargissant le dôme et par extension la manche, le volume d'eau à traverser par la lumière serait plus important et la lumière serait moins diffusée dans la culture ce qui engendrerait une baisse de la productivité. Pour ces raisons, il est préférable de conserver la taille des nénuphars et d'en augmenter le nombre. L'augmentation de la taille des nénuphars est une solution envisageable si des études optiques sont réalisées pour confirmer la productivité du procédé.

Concernant la quantité de nutriments pour passer aux bassins de 10 m de diamètre, la masse de chaque composant du milieu a été déterminée pour un volume net de culture de 48,49m^3 (voir Tableau 4). Passer à des volumes plus importants nécessite de mettre en place un équipement pour faciliter cette préparation du milieu. En effet, bien que les quantités soient plus élevées, il faut assurer la qualité du mélange. Si l'on conserve le même volume de pré-dilution, il y aura saturation de ce dernier. Donc il faut, soit diluer dans un plus grand volume en adaptant le matériel pour que le transfert du volume reste aisé, soit effectuer une dilution progressive en injectant petit à petit le milieu pré-dilué. De plus, il serait intéressant d'envisager une injection des nutriments à plusieurs endroits dans le bassin. Cela faciliterait la dispersion et l'homogénéisation de ces derniers.

4.2. Analyse des *conditions hydrodynamiques et la capture de CO_2*

La figure 3 représente la variation de la puissance de la pompe en fonction du volume du bassin. Comme on peut le constater, il existe un comportement linéaire entre les deux variables. Le modèle empirique proposé (voir l'équation 11), reposant sur un système linéaire, s'est d'abord relevé satisfaisant (R^2 = 0.99) pour illustrer le comportement hydrodynamique du milieu. Les valeurs des coefficients a et b obtenus sont 26.61 et 25.445. Pour une cuve de 5,5 m de diamètre, la puissance de la pompe devrait être de 660 W que nous allons arrondir à 700 W. Actuellement, Nénuphar utilise des pompes centrifuges de 270 W pour ses bassins de 5,5 m de diamètre. Ils ont constaté que l'agitation n'était pas suffisante pour maintenir la vitesse de mélange du bioréacteur et par conséquent la productivité de la souche, ce qui coïncide avec les résultats obtenus dans cette étude. Ainsi, pour un volume de bassin de 78.54 m^3 (diamètre du bassin de 10 m) et à partir du modèle mathématique proposé, une pompe centrifuge de 2200 W de puissance pourrait être installée. Cette puissance, en plus de l'effet vortex créé par la force centripète, couplée à la force de Coriolis permettrait une bonne circulation des puits de lumière, une suspension homogène des microalgues ainsi qu'une bonne homogénéisation des nutriments et du CO_2 apporté.

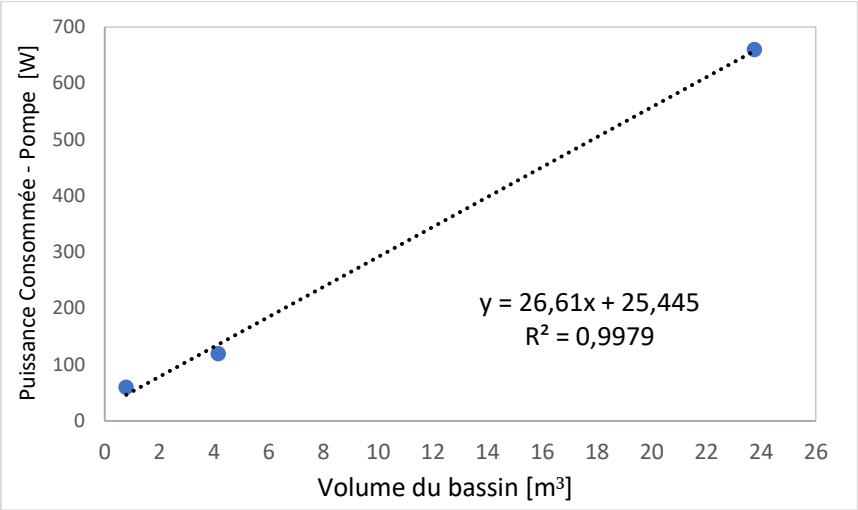


Figure 3. Variation expérimentale de la puissance de la pompe en fonction du volume du bassin

Concernant le potentiel du procédé dans le cadre de la capture du CO_2, les résultats indiquent qu'un bassin avec un volume net de culture de 48.49 m^3 permet la production de microalgues de 12.2 kg $Jour^{-1}$ et par conséquent une captation de CO_2 de 24.2 kg $Jour^{-1}$, soit un total de 7.27 Ton An^{-1}(1 Année = 300 jours).

Tableau 5. Productivité du bioréacteur et potentiel de captation de CO_2 correspondant

V_c^f (m^3)	Masse de la souche [kg J^{-1}]	Captation de CO_2 [kg $Jour^{-1}$]
48.49	12.12	24.2

Productivité optimale de la souche de 0.25 g L^{-1} $jour^{-1}$, 1 An = 300 jours.

5 CONCLUSION

Le procédé Nénuphar, focalisé sur la culture de microalgues - *Scenedesmus* - a été étudié. La technologie de Nénuphar est basée sur la captation et la diffusion d'une source lumineuse naturelle (énergie solaire) via des puits transparents flottants – nommés nénuphars - dans un bassin de culture cylindrique ouverts à l'atmosphère, permettant la photosynthèse, et par conséquent, favorisant la croissance et la multiplication rapide de la culture. La mise en place d'un système de recirculation en bas de cuve génère une circulation vortex centripète assurant la répartition de la lumière et l'homogénéité de la concentration dans tout le volume, sans décantation ni formation de biofilm, et donc, une haute productivité 0.25 g L^{-1} $jour^{-1}$. Sachant que les conditions de croissance optimales de la souche (photosynthèse à pH neutre) sont régulées à partir du débit d'alimentation de CO_2 fourni au milieu par un diffuseur fines bulles ; la captation de CO_2 issue du procédé de méthanisation pourrait être envisagée. Dans ce sens, l'approche d'extrapolation de ce procédé a été détaillée dans cette étude. L'intérêt de ce travail a été d'évaluer les conditions de culture dans un volume de bassins 100 fois supérieur au volume initial (échelle pilote), correspondant à un volume de 78.54 m^3. Le dimensionnement du bioréacteur, la quantité de nutriments, les conditions hydrodynamiques et le potentiel de captation de CO_2 ont été modélisés. Concernant le bioréacteur, la profondeur des bassins ne peut pas être modifiée afin de garantir la diffusion homogène de la lumière, et par conséquent, un diamètre de 10 m a été obtenu. L'étude a démontré qu'il faut augmenter le nombre de dispositifs (puits) à 1384, sans changer leurs dimensions (Diamètre = 0.17 m et Hauteur = 0.9 m). La concentration globale des nutriments et métaux ont été maintenues à 2 g/L afin de ne pas avoir une sédimentation des sels, une pré-dilution de ces nutriments doit être effectuée dans un plus grand volume ou progressivement dans le bassin de culture. Pour obtenir une plus grande homogénéité, l'injection des nutriments pourrait se faire à plusieurs endroits du bassin. Pour le mélange, l'augmentation du volume engendre une plus grande contrainte

hydrodynamique. Les forces de Coriolis et Centripète étant invariantes, une pompe avec 2200 W de puissance doit être installée afin de garder la vitesse de mélange constante dans un volume du bassin de 78.54 m^3. Un modèle empirique a été proposé pour la modélisation de la puissance de la pompe en fonction du volume du bassin, une pompe de 2200 W est nécessaire pour un bassin de 10 m de diamètre. Concernant la capture de CO_2, les résultats indiquent qu'un bassin avec un volume net de culture de 48.49 m^3 permet une haute production de microalgues de 12.2 kg $Jour^{-1}$ et par conséquent une captation de CO_2 de 24.2 kg $Jour^{-1}$, soit un total de 7.27 Ton An^{-1} (1 An = 300 jours).

6 REFERENCES

[1] A. Sasson, « L'exploitation industrielle des microalgues », *Biofutur*, vol. 1998, nº 179, p. 64-65, juin 1998, doi: 10.1016/S0294-3506(98)80146-4.

[2] H. Bonnefond, C. Combe, J.-P. Cadoret, A. Sciandra, et O. Bernard, « Potentiel des microalgues », vol. hal-02421830f, p. 21, 2020.

[3] J. Pruvost, J.-F. Cornet, F. Le Borgne, et J. Jenck, « Production industrielle de microalgues et de cyanobactéries », *Chim. Verte*, janv. 2017, doi: 10.51257/a-v1-chv4030.

[4] V. Okoro, U. Azimov, J. Munoz, H. H. Hernandez, et A. N. Phan, « Microalgae cultivation and harvesting: Growth performance and use of flocculants - A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, p. 109364, nov. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109364.

[5] A. Decamp, « Etude des conditions d'accumulation et de production de polysaccharides solubles (ou exopolysaccharides - EPS) chez des microalgues marines cultivées en photobioréacteur », thesis, Nantes, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://www.theses.fr/2020NANT4035

[6] A. Difusa, J. Talukdar, M. Kalita, K. Mohanty, et V. Goud, « Effect of light intensity and pH condition on the growth, biomass and lipid content of microalgae Scenedesmus species », *Biofuels*, vol. 6, p. 1-8, mai 2015, doi: 10.1080/17597269.2015.1045274.

[7] K. Sirikulrat, J. Pekkoh, et C. Pumas, « Illumination system for growth and net energy ratio enhancement of Arthrospira (Spirulina) platensis outdoor cultivation in deep raceway pond », *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 14, p. 100661, juin 2021, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100661.

[8] H. R. Molitor, E. J. Moore, et J. L. Schnoor, « Maximum CO2 Utilization by Nutritious Microalgae », *ACS Sustain. Chem. Eng.*, avr. 2019, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b00656.

[9] D. Pleissner, A. V. Lindner, et R. R. Ambati, « Techniques to Control Microbial Contaminants in Nonsterile Microalgae Cultivation », *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 192, nº 4, p. 1376-1385, déc. 2020, doi: 10.1007/s12010-020-03414-7.

[10] R. ESCUDIE et R. CRESSON, « Méthanisation de la biomasse : Processus biologique de digestion anaérobie de la matière organique | Techniques de l'Ingénieur », oct. 2017.

[11] J. Tronyo *et al.*, « Tableaux de l'économie française », *Insee Stat. Publique*, 2020.

[12] Dag. O. Hessen et E. Van Donk, « Morphological changes in Scenedesmus induced by substances released from Daphnia », 1993.

[13] M. Tahiri, A. Benider, M. Belkoura, et A. Dauta, « Caractérisation biochimique de l'algue verte Scenedesmus abundans : influence des conditions de culture », *Ann. Limnol. - Int. J. Limnol.*, vol. 36, nº 1, p. 3-12, mars 2000, doi: 10.1051/limn/2000004.

[14] C. El Hifnawy, *Identifier des microalgues pour le traitement des eaux usées et la production de biocarburant*. 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.10385.07525/1.

[15] F. Duong, « Puits de lumière indépendants et dynamiques », FR 1801155

[16] F. Duong, « Puits de lumière indépendants et dynamiques », FR 1902221

[17] F. Duong, « Puits de lumière indépendants et dynamiques », FR 1902222

[18] F. Duong, « Puits de lumière indépendants et dynamiques », FR 2001969

[19] J. Ma, F. Lin, S. Wang, et L. Xu, « Toxicity of 21 Herbicides to the Green Alga Scenedesmus quadricauda », *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 71, nº 3, p. 0594-0601, sept. 2003, doi: 10.1007/s00128-003-8521-x.

[20] E. Olivo, « Conception et étude d'un photobioréacteur pour la production en continu de microalgues en écloseries aquacoles », p. 263, 2007.

Contact principal: Dr. Karen SILVA VARGAS
Coordonnées : k.silva@hubebi.com

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2022

KNOWLEDGE BASED ENGINEERING: SYSTEMATIC REVIEW AND OPPORTUNITIES

Jean René Camara[13], Philippe Véron[2], Esma Yahia[2], Antoine Mallet[3], Benjamin Deguilhem[3], Frédéric Segonds[1].

1 Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI – Arts et Métiers Institute of Technology – HESAM University,151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

2 Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques Et Numériques – Arts et Métiers Institute of Technology – Campus d'Aix-en-Provence, 2 cours des Arts et Métiers, 13617 Aix en Provence, France.

3 Entreprise Capgemini – AEROPARK 3 chemin de Laporte 31300 Toulouse, France.

Abstract: This article is a systematic review of Knowledge Based Engineering. An article extraction is made from the SCOPUS scientific database. A processing and an analysis of the articles is carried out in order to determine which are the most important criteria of choice with regard to our corpus. The number of articles in the initial extraction is 1037. The choice of criteria such as the number of article citations, the quartile=Q1, as well as the number of citations per document are fundamental parameters. A particular description and analysis will be made of the graphs, diagrams and processes. Finally, a justified selection of 37 articles will allow us to carry out a precise analysis of the different methodologies for implementing Knowledge Based Engineering.

Keyword: KBE, Knowledge Based Engineering, Knowledge Based System, Knowledge Management

1 INTRODUCTION

Knowledge management is essential for the competitiveness of companies operating in the international market [1]. The knowledge management and capitalisation of knowledge are essential advantage for preserving the company's intellectual heritage.
According Hawisa et al [2], "Manufacturing companies must have a good knowledge of their products and processes to be competitive. This is increasingly important as products become more complex".
In this competitive environment, manufacturing industries must produce faster and at lower cost.
Knowledge Based Engineering in particular is part of this approach to capitalise on the knowledge and know-how of technical experts within the company. KBE focuses on the management of engineering knowledge. KBE systems are able to exploit process and product engineering knowledge with the goal of reducing time and costs of product development [3]. As a result, this approach reduces the time spent on repetitive tasks and increases the time for creativity.
This systemic review article describes and analyses this topic. The paper is composed of different sections. First of all, we will begin to precisely define, retrace the KBE roots and fundamentals.
Then we will select interesting articles from our research compliant to the methodology based on [4]. We will then carry out a precise bibliometric analysis within our corpus.
This analysis will allow us to extract trends and assessment of KBE. We will finish by a conclusion and perspectives.

2 ROOTS, BENEFITS AND DRAWBACKS OF KBE

This section gives a definition and presents the roots of KBE.

2.1 Definition

There are several definitions of KBE in the literature, but we have chosen this definition below:
According to La Rocca [3] , "Knowledge based engineering is a technology based on the use of dedicated software tools called KBE systems, which are able to capture and systematically reuse product and process engineering knowledge, with the final goal of reducing time and costs of product development by means of the following:

- Automation of repetitive and non-creative design tasks.
- Support of multidisciplinary design optimization in all the phases of the design process.

2.2 Roots of Knowledge Based Engineering

"KBE is not a novel and revolutionary product from the world of computer science but has strong roots in the field of artificial intelligence, particularly in the knowledge based systems (KBSs) technology of the 1970s" [3]. Knowledge based systems (or expert systems) are computer applications that use stored knowledge for solving problems in a specific domain [5] [6]. A KBS reasons like a human, this mechanism allows to solve a given problem through an inference mechanism,

The timeline in figure 1 below presents the main stages of AI by year with the highlights

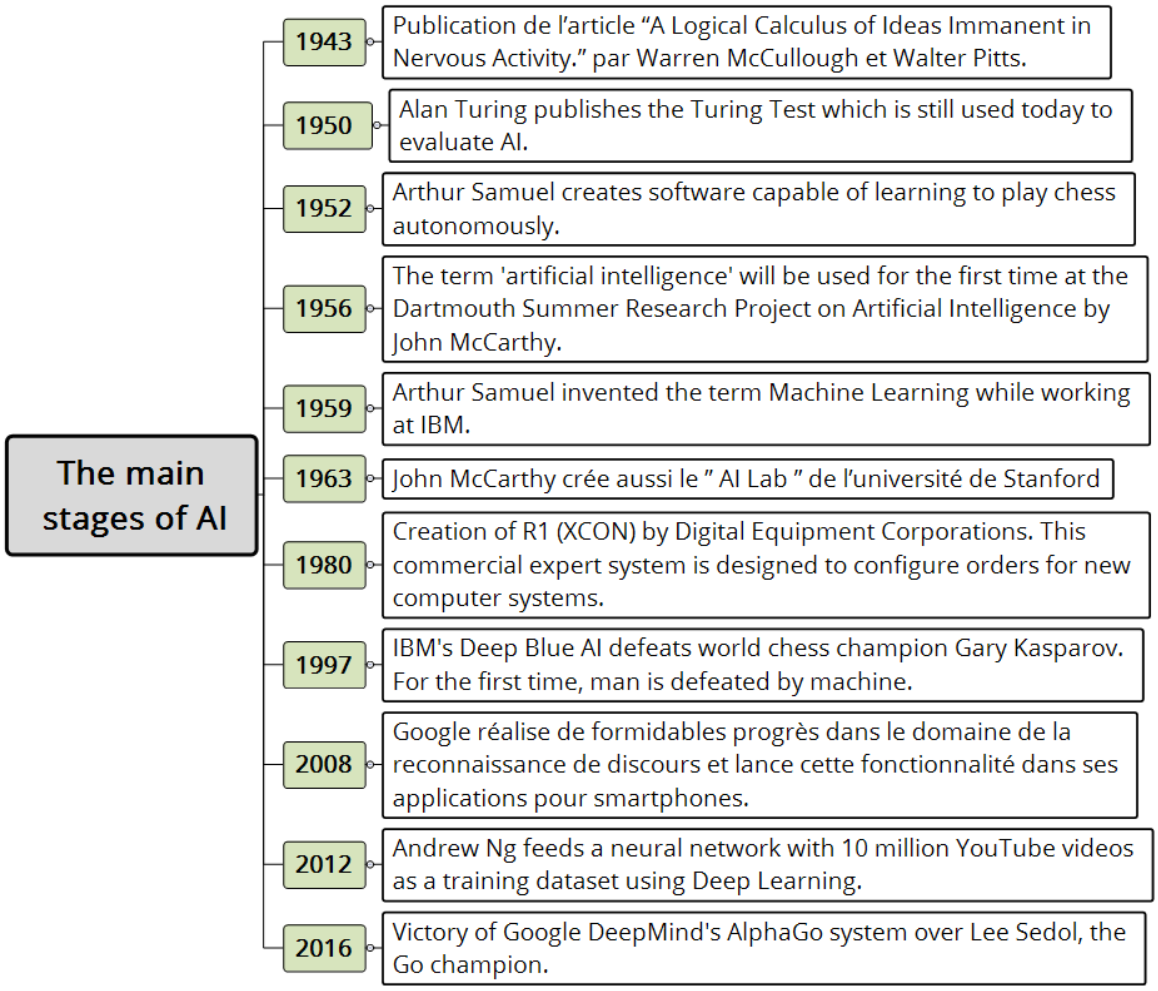


Figure 1. The main stages of AI

2.3 KBE Fundamentals

The main part of system is the product model where product and process knowledge is stored (Figure 1. The KBE system). External tabulated data from external databases feed the device, the input in the KBE system generally corresponds to the customer's specifications, which in turn gives several kinds of output when being processed. The system software is object-oriented and can so perform demand-driven calculations [7].

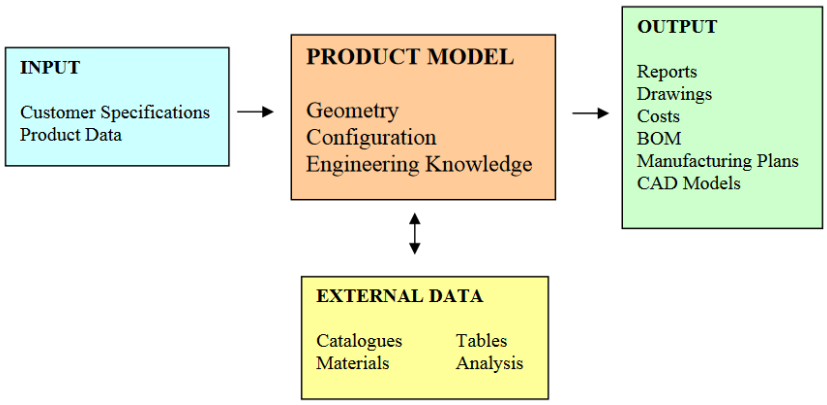


Figure 2. The KBE system

2.4 Benefits and drawbacks of KBE

The analysis of the scientific literature made it possible to know the possibilities and opportunities offered by the KBE methods. There are many according Reddy [8] the benefits and drawbacks are:

- Benefits:
    - Reduced lead time:
        - Suitable to develop the products with a high degree of similarity between versions
        - More knowledge can be re-used if higher the similarity, Design process can be performed automatically if all needed inputs are given in KBE system
        - Design configurations (geometry, material etc.) can be controlled by predefined rules.
        - Cuts production cost
        - Cost and time can be reduced by 90%
    - Product optimization:
        - As the routine and mundane design work for product development is automated, the concentration on innovation is promising.
        - Achieved extra time can enhance the firm business.
    - Extra time for innovation:
        - As the routine and mundane design work for product development is automated, the concentration on innovation is promising.
        - Achieved extra time can enhance the firm business
- Drawbacks:
        - Building and implementing KBE system takes a great deal of time, hardware, specialized skill and cost.
        - KBE is becoming a black box as it produces some output with some input, but nobody knows what happens in between. This situation leads to the problem to transfer the knowledge to a new engineer in the department.
        - Localized implementation of KBE could not register its impact on complete product development process

3 RESEARCH APPROACH

This section describes our research methodology and article review process.

3.1 Definition and description of the query

This work is based on a systematic literature review in the field of Knowledge Based Engineering, based on the procedures described by [2]. The SCOPUS database was chosen because it is one of the largest and most comprehensive databases in the scientific literature [2].
We used the following search string in the SCOPUS query the June 22, 2022.

Scopus query:

(TITLE ("Knowledge Based Engineering") **OR** TITLE(kbe) **OR** TITLE (kbs) **OR** TITLE ("knowledge based system")) **AND** (KEY("Knowledge Based Engineering") **OR** KEY(kbe) **OR** KEY (kbs) **OR** KEY ("knowledge based system")) **AND** PUBYEAR > 1990 **AND** PUBYEAR < 2023 **AND** (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI")).

Description of the Scopus query:

The Q1 query represents the query relating to the TITLE of the articles: **Q1 = 3578**
The Q2 query represents the query relating to the KEY (Keyword) of the articles: **Q2 = 75646**
The intersection between Q1 and Q2 makes it possible to reduce the selection criteria: **Q1∩Q2** = 2414
Application of a filter on the period: 1990 < pubyear < 2023 = 1963
Application of a filter on the subject: 1990 < subjarea < 2023 = 1037

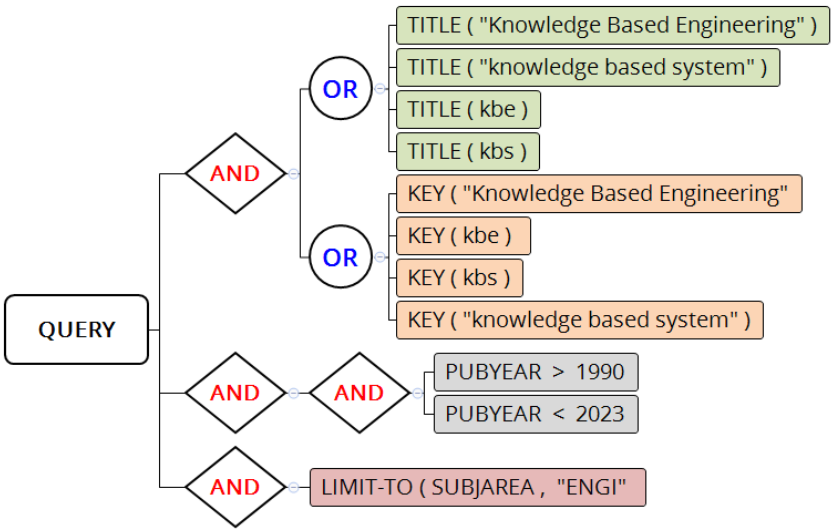


Figure 3. Description of SCOPUS Query

The diagram below represents our query above via the Venn diagram. This diagram is a widely used style of diagram that shows the logical relationship between sets. In our case study, it allows us to analyse the composition of our query within the SCOPUS scientific database.

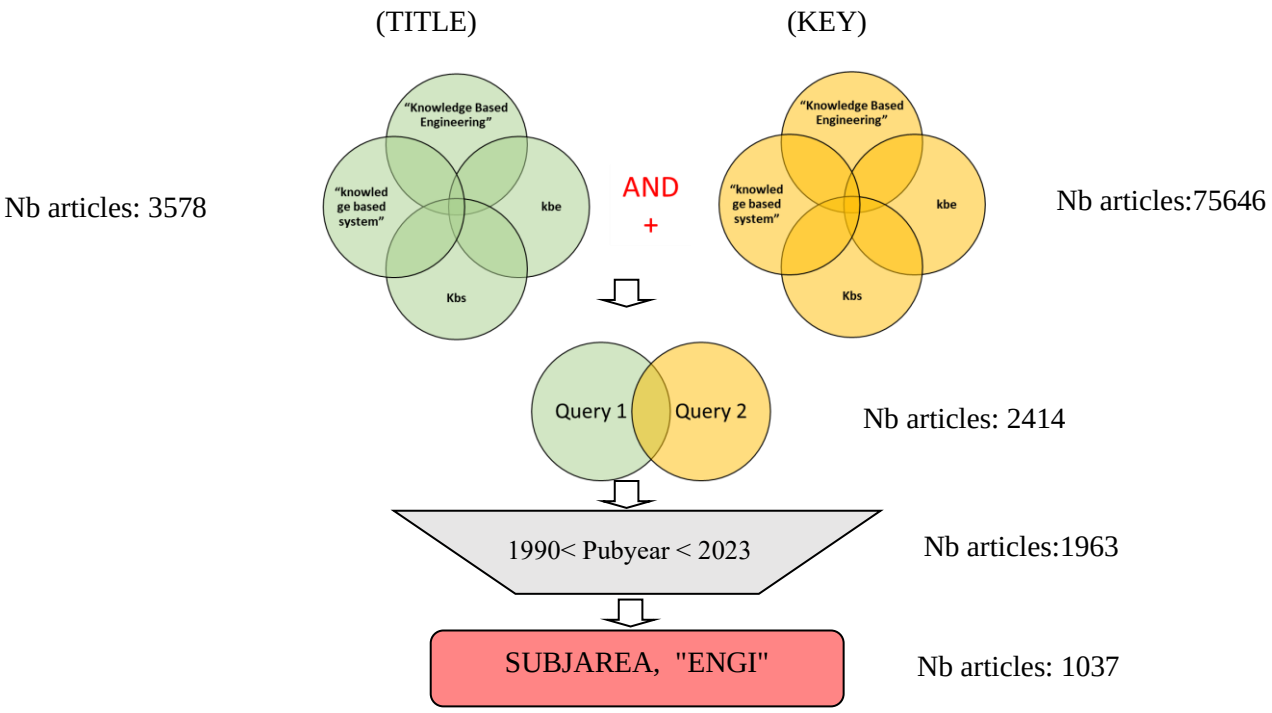


Figure 4. Représentation SCOPUS Query par le diagramme de Venn

3.2 Description of the analysis process

The following part describes the whole process of studying articles. Each step describes the method and criteria used (See figure 5 below). This analysis is based on the PROKNOW-C methodology.

Description of stage 1: Database selection
This step consists in identifying the database of scientific publications. We have chosen the SCOPUS database.

Description of stage 2: Keyword set definition:
This step consists in identifying the criteria of the article such as: Title; Keyword; Year Subject.

Description of stage 3: Scopus extraction
Export of the Scopus database

Description of stage 4: Selection_1
Import SJR KPI criteria into the database file.
Selection criteria: Nb. of article citations > 50; Quartile = Q1; Citation / Document > 10; Selection of at least 2/3 criteria: Nb of article citation; Quartile; Citation / Document.

Description of stage 5: Selection_2
Removal of articles not related to our topic.

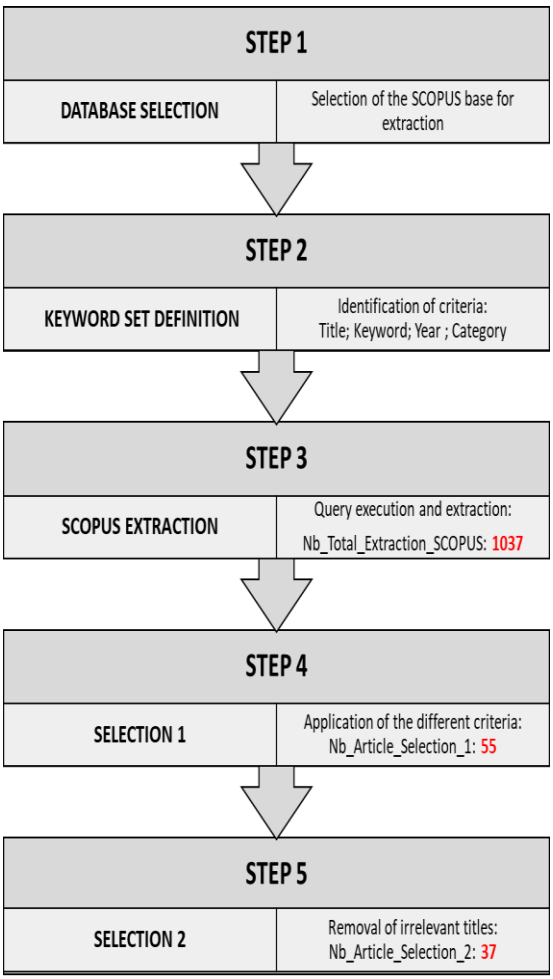


Figure 5. Article analysis process

4 DATA ANALYSIS OF EXTRACTED ARTICLE

This section provides an overview of the articles. It presents a quantitative and qualitative analysis of our articles.

4.1 Quantitative analysis of extracted article

Figure 5 shows the evolution of the number of scientific publications on KBE and KBS between 1991 and 2022. We can see that the maximum number of 60 publications is reached in 1994.
This curve demonstrates and justifies the interest in the KBE and KBS discipline.

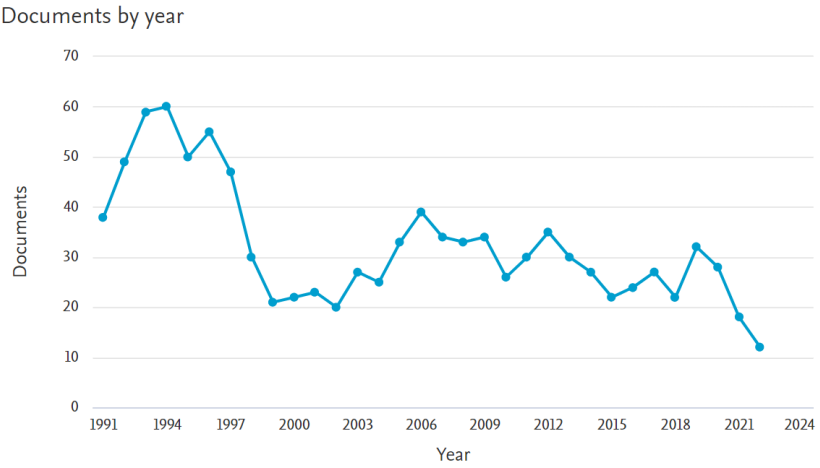


Figure 6 : Documents_by_year_ Nb_Total_Extraction_SCOPUS: 1037

Figure 7 and figure 8 show the Top 10 number of scientific publications by country or territory distributed around the world between 1991 and 2022. We note that the 5 most prolific countries are the USA, UK, China, Germany and France. Let's represent these numbers on a map in the following section.

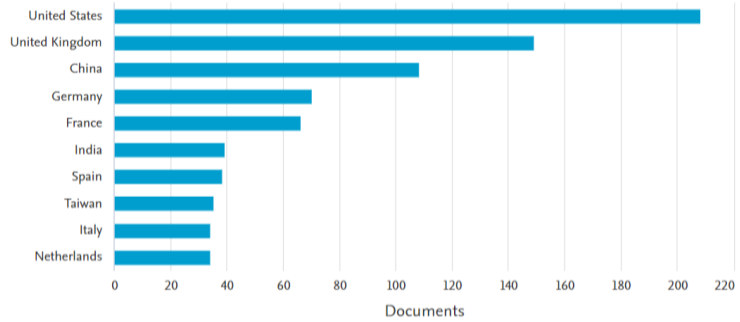


Figure 7: Top 10 countries that publish the most in the world [1991-2022]

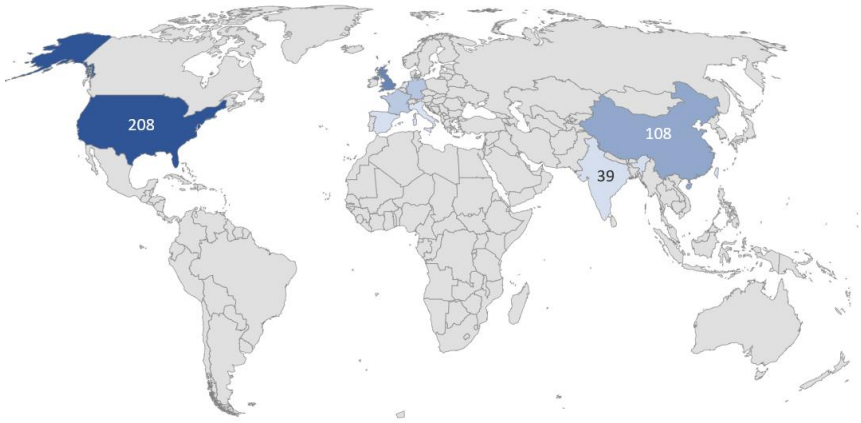


Figure 8: Distribution of publications in the world map [1991-2022]

The top 5 most active authors on our corpus are: Kumar, Colombo, Van Tooren, Chapman, La Rocca. This allows us to identify the most influential authors in the discipline KBE and KBS.

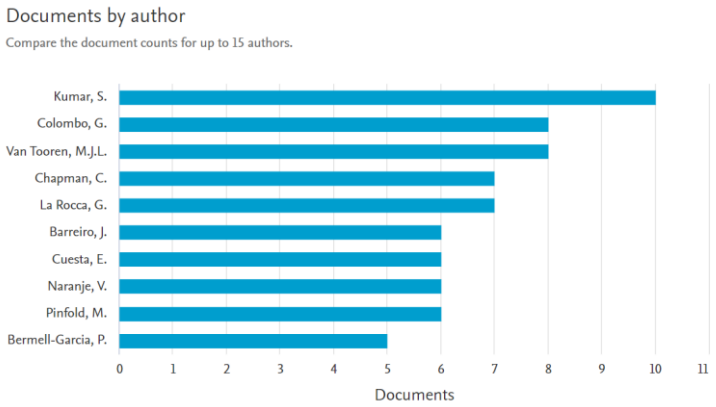


Figure 9: Top 10 Publication by author [1991-2022]

Figure 10 shows a word cloud of the keywords for all 37 articles. We can clearly see that the main topics are: Knowledge; Based; System; Design; Expert; KBS; Ontology. These topics confirm that the keywords correspond to our study

Figure 10: Word cloud on the keywords of Nb_article_selection_2

4.2 Qualitative analysis of extracted article

Figure 11 below describes the whole process of analysing the reading of all the scientific articles.
It is divided into 3 steps: Abstract analysis; Introduction analysis; Classification & Clustering.
The Abstract analysis stage provides a quick summary of the article. The Introduction analysis step allows to understand the structure and content of the article.
Finally, the Classification & Clustering step identifies the industrial sector of the article (Automotive; Railway; Aeronautics, Others) and the KBE methodologies identified. All this information will make it possible to identify all the methods and tools of KBE and KBS.

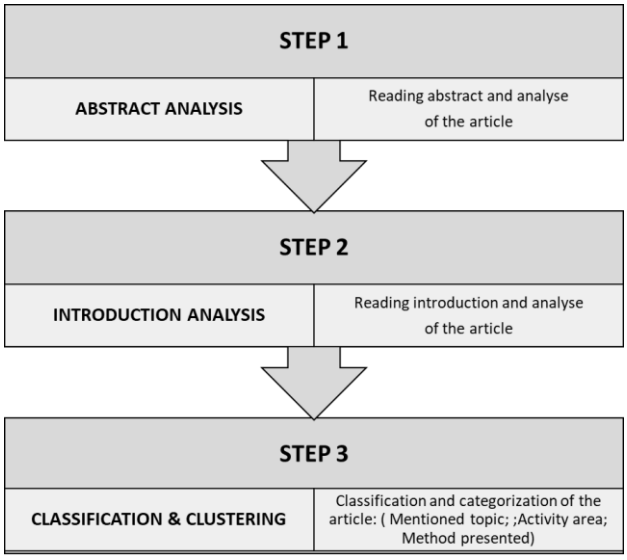


Figure 11. Flow diagram for study selection

4.3 Summary of KBE methods identified in the articles.

During our reading we identified few methodologies for KBE development within the articles.
We can separate KBE methods and tools into two main categories: general knowledge-based systems and Knowledge modelling methodologies with design process specificities.

The general knowledge-based systems and methodologies are:

CommonKADS: (Common Knowledge Acquisition and Design Support) It proposes to model all the knowledge of an organisation on three levels: Organisational level, Knowledge level, Symbols level).
SPEDE: (Structured Process Elicitation Demonstrations Environment) provides an effective means to capture, validate and communicate vital knowledge to provide business benefit.

MIKE: (Model-based and Incremental Knowledge Engineering) allows the integration of semantic and formal specification techniques and knowledge prototyping into a coherent framework.
PROTÉGÉ: Protégé is an ontology creation software and knowledge management system. The Protégé meta-tool was initiated in 1987 by Mark Musen and developed by Stanford University.

The knowledge modelling methodologies with design process specificities:

MOKA:(Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications) It focuses on two levels of representation - an informal and a formal model. This methodology is considered a standard in scope of gathering and recording the knowledge for the needs of a KBE system.
DEKLARE is a methodology to analyse a product in order to model and represent its design space and, ultimately, to build a computer support system for this product.
KADM: (Knowledge Aided Design Methodology). Using this approach, formalization of knowledge concerns a process of building a generative (automatically built) model in a specific CAD system.
KOMPRESSA: (Knowledge Oriented Methodology for the Planning and Rapid Engineering of Small-Scale Applications) It covers the entire life cycle of the KBE's development and emphasises user participation based on experience.
KNOMAD: (Knowledge capture Normalisation Organisation Modeling Analysis and Delivery). On the basis of the MOKA methodology, is developed for the use of multidisciplinary knowledge in design and production.
DEE: (Design and Engineering Engine) is a comprehensive and multidisciplinary approach to design optimisation. It is composed of three modules: the design process optimisation module, the multi-model generator (MMG) module, and the detailed analysis module.
CBR (Case Based Reasoning) This method involves solving problems using previously found solutions to similar problems. It consists of four steps: Recovery of the previous similar solution; Reuse of the previous similar solution; Update of the recovered solution; Storage of the newly updated solution.

According Verhagen et al [9] a number of KBE methodologies are available to support the development of KBE applications and systems. By far the most well-known of these is the Methodology and software tools Oriented to Knowledge-Based Engineering Applications, or MOKA methodology.
This methodology proposes the implementation of a KBE in 6 steps:

- Identify
- Justify
- Capture
- Formalize
- Package
- Activate

The aim of MOKA is to provide:

- a 20-25% reduction in the costs and time associated with KBE application development.
- an efficient methodology to capture and formalise product and process knowledge.
- an IT tool that supports the capture, representation, and maintenance of knowledge

The MOKA methodology is based on an informal model and a formal model. The informal model uses ICARE forms where the acronym stands for Illustrations, Constraints, Activities, Rules and Entities. These forms are used to decompose and store pieces of knowledge. The formal model uses MML (Moka Modeling Language, an adaptation of UML) to classify and structure the elements of the informal ICARE model. It is an ontological approach which makes it possible to translate the informal model into a formal model.
Our analysis of articles also allows us to take stock of the industrial sectors in which its methodologies are applied. The study of 37 scientific articles identifies 10 industrial sectors where KBE methodologies are applied. These sectors are:

- Automotive [10] ; [11]; [12]
- Railway [13] ;
- Aeronautic [14] ; [15]
- Construction / BIM [16]
- Powder metallurgy [17]
- Robotic [18]

- Metrology [19]
- Injection moulding [20]
- Quality control [21]
- Semiconductor [22]

CONCLUSION AND PERSPECTIVE

Our analysis dealt with the KBE and its different methodologies. We have mentioned the roots and their definitions. Thanks to a specific query within the SCOPUS scientific database, we retrieved the relevant articles for our study. As such, a workflow has been set up to select articles based on scientific criteria. We have identified within our corpus many KBE methodologies.
We were also able to see the benefits and drawbacks of KBE methodologies.

After more than forty years of existence, the concepts of KBE remain complicated to define, especially as a complete set of technologies such as CAD, AI and others.
Our analysis presents KBE as a "work method" for automating engineering design in scenarios.

Future work on KBEs should address and focus on identified gaps in the literature.
These two important drawbacks are to reduce the implementation time of KBE systems, to make KBE software mechanisms easier and understandable in order to avoid the black box effect.
We have also identified that the scientific papers of the KBE methodologies are not sufficiently detailed and precise. The information and steps described in the articles do not allow the reproduction of the complete experience.

It is essential today to propose new methods of capitalization thanks to the help of AI tools.
These new AI tool opportunities will facilitate knowledge capture and representation throughout the design lifecycle process.

Indeed, machine learning algorithms will be able to extract knowledge from heterogeneous data sources. Even if this data does not come from the same common database.

REFERENCES

[1] F. Furini, M. Rossoni, G. Colombo, Knowledge Based Engineering and Ontology Engineering Approaches for Product Development: Methods and Tools for Design Automation in Industrial Engineering, in: Vol. 11 Syst. Des. Complex., American Society of Mechanical Engineers, Phoenix, Arizona, USA, 2016: p. V011T15A032. https://doi.org/10.1115/IMECE2016-67292.

[2] O.B.H. Hawisa, J. Tannock, Knowledge management for manufacturing: The product and process database, (2004). https://doi.org/10.1108/17410380410555826.

[3] G.L. Rocca, Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design, Adv. Eng. Inform. 26 (2012) 159–179. https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.02.002.

[4] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, S. Linkman, Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review, Inf. Softw. Technol. 51 (2009) 7–15. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009.

[5] M. Negnevitsky, Artificial intelligence: a guide to intelligent systems, 2nd ed, Addison-Wesley, Harlow, England ; New York, 2005.

[6] R.S. Engelmore, E. Feigenbaum, Expert systems and artificial intelligence, Expert Syst. 100 (1993).

[7] M. Sandberg, Knowledge Based Engineering - In Product Development, (n.d.) 16.

[8] E.J. Reddy, C.N.V. Sridhar, V.P. Rangadu, Knowledge Based Engineering: Notion, Approaches and Future Trends, Am. J. Intell. Syst. (2015) 17.

[9] W.J.C. Verhagen, P. Bermell-Garcia, R.E.C. van Dijk, R. Curran, A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges, Adv. Eng. Inform. 26 (2012) 5–15. https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.06.004.

[10] C.B. Chapman, M. Pinfold, The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure, Adv. Eng. Softw. 32 (2001) 903–912. https://doi.org/10.1016/S0965-9978(01)00041-2.

[11] J.A. Penoyer, G. Burnett, D.J. Fawcett, S.-Y. Liou, Knowledge based product life cycle systems: principles of integration of KBE and C3P, Comput.-Aided Des. 32 (2000) 311–320. https://doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00014-2.
[12] M. Pinfold, C. Chapman, The application of KBE techniques to the FE model creation of an automotive body structure, Comput. Ind. 44 (2001) 1–10. https://doi.org/10.1016/S0166-3615(00)00079-8.
[13] A. Fay, A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control, Eng. Appl. Artif. Intell. 13 (2000) 719–729. https://doi.org/10.1016/S0952-1976(00)00027-0.
[14] R. Curran, W.J.C. Verhagen, M.J.L. van Tooren, Ton.H. van der Laan, A multidisciplinary implementation methodology for knowledge based engineering: KNOMAD, Expert Syst. Appl. 37 (2010) 7336–7350. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.027.
[15] I.O. Sanya, E.M. Shehab, An ontology framework for developing platform-independent knowledge-based engineering systems in the aerospace industry, Int. J. Prod. Res. 52 (2014) 6192–6215. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.919422.
[16] M. Egemen, A. Mohamed, SCBMD: A knowledge-based system software for strategically correct bid/no bid and mark-up size decisions, Autom. Constr. 17 (2008) 864–872. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.02.013.
[17] L.N. Smith, A knowledge based system for optimum and concurrent design, and manufacture by powder metallurgy technology, Int. J. Prod. Res. 37 (1999) 125–137. https://doi.org/10.1080/002075499191968.
[18] H. Wang, H. Li, X. Wen, G. Luo, Unified modeling for digital twin of a knowledge-based system design, Robot. Comput.-Integr. Manuf. 68 (2021) 102074. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102074.
[19] S. Martínez-Pellitero, J. Barreiro, E. Cuesta, A.I. Fernández-Abia, KBE rules oriented to resources management in coordinates inspection by contact, J. Manuf. Syst. 37 (2015) 149–163. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.07.005.
[20] M.R. Khosravani, S. Nasiri, T. Reinicke, Intelligent knowledge-based system to improve injection molding process, J. Ind. Inf. Integr. 25 (2022) 100275. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100275.
[21] V. Deslandres, H. Pierreval, SYSMIQ: a knowledge-based system for assisting quality control, Int. J. Prod. Res. 33 (1995) 1201–1212. https://doi.org/10.1080/00207549508930204.
[22] K. Rajendran, Application of an expert knowledge-based system to the semiconductor thin film device coating process, Comput. Ind. 20 (1992) 271–274. https://doi.org/10.1016/0166-3615(92)90076-Y.

[1] A. Fay, « A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 13, nº 6, p. 719-729, déc. 2000, doi: 10.1016/S0952-1976(00)00027-0.
[2] L. N. Smith, « A knowledge based system for optimum and concurrent design, and manufacture by powder metallurgy technology », *International Journal of Production Research*, vol. 37, nº 1, p. 125-137, janv. 1999, doi: 10.1080/002075499191968.
[3] S. Wang, Y. Cao, R. Y. Yang, et H. Li, « A knowledge-based system for automatic measurement of steel reinforcement », *Automation in Construction*, vol. 11, nº 5, p. 607-616, août 2002, doi: 10.1016/S0926-5805(01)00070-X.
[4] S. M. Sapuan, « A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design », *Materials & Design*, vol. 22, nº 8, p. 687-695, déc. 2001, doi: 10.1016/S0261-3069(00)00108-4.
[5] B. Malakooti et A. Kumar, « A knowledge-based system for solving multi-objective assembly line balancing problems », *International Journal of Production Research*, vol. 34, nº 9, p. 2533-2552, sept. 1996, doi: 10.1080/00207549608905043.
[6] Bryan Ngoi Kok Ann et Chua Chee Kai, « A knowledge-based system for strip layout design », *Computers in Industry*, vol. 25, nº 1, p. 31-44, nov. 1994, doi: 10.1016/0166-3615(94)90030-2.
[7] N. R. Abburi et U. S. Dixit, « A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 22, nº 4, p. 363-372, août 2006, doi: 10.1016/j.rcim.2005.08.002.
[8] L. L. Zhang, Q. Xu, et P. Helo, « A methodology integrating Petri nets and knowledge-based systems to support process family planning », *International Journal of Production Research*, vol. 50, nº 12, p. 3192-3210, juin 2012, doi: 10.1080/00207543.2011.555787.
[9] C. F. Cheung, W. B. Lee, W. M. Wang, K. F. Chu, et S. To, « A multi-perspective knowledge-based system for customer service management », *Expert Systems with Applications*, vol. 24, nº 4, p. 457-470, mai 2003, doi: 10.1016/S0957-4174(02)00193-8.

[10] R. Curran, W. J. C. Verhagen, M. J. L. van Tooren, et Ton. H. van der Laan, « A multidisciplinary implementation methodology for knowledge based engineering: KNOMAD », *Expert Systems with Applications*, vol. 37, nº 11, p. 7336-7350, nov. 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2010.04.027.
[11] Y. B. Moon, C. K. Divers, et H.-J. Kim, « AEWS: an integrated knowledge-based system with neural networks for reliability prediction », *Computers in Industry*, vol. 35, nº 2, p. 101-108, mars 1998, doi: 10.1016/S0166-3615(97)00076-6.
[12] J. P. T. Mo et C. Menzel, « An integrated process model driven knowledge based system for remote customer support », *Computers in Industry*, vol. 37, nº 3, p. 171-183, nov. 1998, doi: 10.1016/S0166-3615(98)00097-9.
[13]E. Shehab et H. Abdalla, « An Intelligent Knowledge-Based System for Product Cost Modelling »:, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 19, nº 1, p. 49-65, janv. 2002, doi: 10.1007/PL00003967.
[14] S. K. Padhy et S. N. Dwivedi, « An object-oriented knowledge-based system for manufacturability of printed wiring boards », *Computers in Industry*, vol. 18, nº 1, p. 77-89, 1992, doi: 10.1016/0166-3615(92)90099-9.
[15] I. O. Sanya et E. M. Shehab, « An ontology framework for developing platform-independent knowledge-based engineering systems in the aerospace industry », *International Journal of Production Research*, vol. 52, nº 20, p. 6192-6215, oct. 2014, doi: 10.1080/00207543.2014.919422.
[16] K. Rajendran, « Application of an expert knowledge-based system to the semiconductor thin film device coating process », *Computers in Industry*, vol. 20, nº 3, p. 271-274, oct. 1992, doi: 10.1016/0166-3615(92)90076-Y.
[17] T. Biagetti, « Automatic diagnostics and prognostics of energy conversion processes via knowledge-based systems », *Energy*, vol. 29, nº 12-15, p. 2553-2572, déc. 2004, doi: 10.1016/j.energy.2004.03.031.
[18] Z. A. Vale, M. F. Fernandes, C. Rosado, A. Marques, C. Ramos, et L. Faria, « Better KBS for real-time applications in power system control centers: the experience of SPARSE project », *Computers in Industry*, vol. 37, nº 2, p. 97-111, sept. 1998, doi: 10.1016/S0166-3615(98)00086-4.
[19] H.-C. Huang, « Designing a knowledge-based system for strategic planning: A balanced scorecard perspective », *Expert Systems with Applications*, vol. 36, nº 1, p. 209-218, janv. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.09.046.
[20] O. Kuhn, T. Dusch, P. Ghodous, et P. Collet, « Framework for the support of knowledge-based engineering template update », *Computers in Industry*, vol. 63, nº 5, p. 423-432, juin 2012, doi: 10.1016/j.compind.2012.01.008.
[21] J. Pokojski, K. Szustakiewicz, Ł. Woźnicki, K. Oleksiński, et J. Pruszyński, « Industrial application of knowledge-based engineering in commercial CAD / CAE systems », *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 25, p. 100255, janv. 2022, doi: 10.1016/j.jii.2021.100255.
[22] M. R. Khosravani, S. Nasiri, et T. Reinicke, « Intelligent knowledge-based system to improve injection molding process », *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 25, p. 100275, janv. 2022, doi: 10.1016/j.jii.2021.100275.
[23] S. Martínez-Pellitero, J. Barreiro, E. Cuesta, et A. I. Fernández-Abia, « KBE rules oriented to resources management in coordinates inspection by contact », *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 37, p. 149-163, oct. 2015, doi: 10.1016/j.jmsy.2015.07.005.
[24] J. A. Penoyer, G. Burnett, D. J. Fawcett, et S.-Y. Liou, « Knowledge based product life cycle systems: principles of integration of KBE and C3P », *Computer-Aided Design*, vol. 32, nº 5-6, p. 311-320, mai 2000, doi: 10.1016/S0010-4485(00)00014-2.
[25] G. La Rocca et M. J. L. van Tooren, « Knowledge-Based Engineering Approach to Support Aircraft Multidisciplinary Design and Optimization », *Journal of Aircraft*, vol. 46, nº 6, p. 1875-1885, nov. 2009, doi: 10.2514/1.39028.
[26] V. Rajsiri, J.-P. Lorré, F. Bénaben, et H. Pingaud, « Knowledge-based system for collaborative process specification », *Computers in Industry*, vol. 61, nº 2, p. 161-175, févr. 2010, doi: 10.1016/j.compind.2009.10.012.
[27] H.-C. Hsu, S. Chang, C.-C. Chen, et I.-C. Wu, « Knowledge-based system for resolving design clashes in building information models », *Automation in Construction*, vol. 110, p. 103001, févr. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2019.103001.
[28] K. L. Choy, H. K. H. Chow, K. H. Tan, C.-K. Chan, E. C. M. Mok, et Q. Wang, « Leveraging the supply chain flexibility of third party logistics – Hybrid knowledge-based system approach », *Expert Systems with Applications*, vol. 35, nº 4, p. 1998-2016, nov. 2008, doi: 10.1016/j.eswa.2007.08.084.
[29]

M. Egemen et A. Mohamed, « SCBMD: A knowledge-based system software for strategically correct bid/no bid and mark-up size decisions », *Automation in Construction*, vol. 17, nº 7, p. 864-872, oct. 2008, doi: 10.1016/j.autcon.2008.02.013.
[30] M. G. Martinsons, « Strategic management roads for knowledge-based systems success », *Computers in Industry*, vol. 26, nº 2, p. 193-195, mai 1995, doi: 10.1016/0166-3615(95)00004-N.
[31] S. Dutta, « Strategies for implementing knowledge-based systems », *IEEE Trans. Eng. Manage.*, vol. 44, nº 1, p. 79-90, févr. 1997, doi: 10.1109/17.552810.
[32] V. Deslandres et H. Pierreval, « SYSMIQ: a knowledge-based system for assisting quality control », *International Journal of Production Research*, vol. 33, nº 5, p. 1201-1212, mai 1995, doi: 10.1080/00207549508930204.
[33] C. B. Chapman et M. Pinfold, « The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure », *Advances in Engineering Software*, vol. 32, nº 12, p. 903-912, déc. 2001, doi: 10.1016/S0965-9978(01)00041-2.
[34] M. Pinfold et C. Chapman, « The application of KBE techniques to the FE model creation of an automotive body structure », *Computers in Industry*, vol. 44, nº 1, p. 1-10, janv. 2001, doi: 10.1016/S0166-3615(00)00079-8.
[35] J. H. Gennari *et al.*, « The evolution of Protégé: an environment for knowledge-based systems development », *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 58, nº 1, p. 89-123, janv. 2003, doi: 10.1016/S1071-5819(02)00127-1.
[36] H. Wang, H. Li, X. Wen, et G. Luo, « Unified modeling for digital twin of a knowledge-based system design », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 68, p. 102074, avr. 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102074.
[37] G. van Heijst, A. Th. Schreiber, et B. J. Wielinga, « Using explicit ontologies in KBS development », *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 46, nº 2-3, p. 183-292, févr. 1997, doi: 10.1006/ijhc.1996.0090.

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2021, BALE, SUISSE.

L'INFLUENCE DES RESSENTIS DES PARTICIPANTS PENDANT LES WORKSHOPS SUR LA MODIFICATION DURABLE DES FAÇONS DE TRAVAILLER DES EQUIPES

Catel Marine[1], Mantelet Fabrice[2], Segonds Frédéric[3], Aoussat Améziane[4], Caillens Pamela[5]
[1234] Laboratoire de Conception Produits et Innovation, 151 boulevard de l'hôpital à Paris
[5] Cartier International, 33 Rue Boissy d'Anglas, 75008 Paris

Résumé : Les Labs d'innovation interne aux entreprises ont la double mission d'accompagner l'émergence de projets innovants et d'améliorer les façons de travailler des collaborateurs. Pour réussir ce double objectif, les labs utilisent différentes méthodologies centrées sur l'humain, la créativité, l'intelligence collective et le prototypage rapide. Différentes études ont analysés l'impact des workshops collaboratifs sur les projets en démontrant l'apparition d'un plus grand nombre d'idées originales et la réduction du time to market. Cependant, il n'existe pas d'étude sur l'impact des workshops sur la modification des façons de travailler des participants. Cette recherche a pour but d'étudier l'impact des workshops sur les collaborateurs et plus particulièrement sur leurs façons de travailler dans les mois et années qui suivent. Nous démontrons que les workshops modifient durablement les façons de travailler des participants. Parmi les principaux changements, on remarque une augmentation de la créativité, de la collaboration et de l'engagement des équipes. Certains ressentis éprouvés par les participants pendant le workshop favorisent l'apparition de ces transformations. Nous pouvons prolonger cette étude en expérimentant des workshops conçus spécifiquement pour favoriser les ressentis identifiés comme vecteurs d'augmentation de la créativité et de la motivation.

Mots clés: Labs d'innovation, Design Thinking, Workshops Collaboratifs, Design Emotionnel, Expérience collaborateur

1 INTRODUCTION

L'accélération et la permanence du changement invitent les entreprises à augmenter leurs capacités d'adaptation et d'innovation. Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes d'innovation visant à réduire le Time To Market et à augmenter la valeur client (Gonen, 2019). Pour ces raisons, de plus en plus d'entreprise décident de créer des Labs d'innovation en interne afin de soutenir les capacités d'innovation et d'adaptation de l'entreprise (Osorio et al. 2019). Ces Labs accompagnent des projets menés par différents départements et permettent la diffusion de nouvelles façons de travailler. Les projets d'innovation permettent de créer une nouvelle expérience pour les clients. Pour y arriver de façon agile, collaborative et innovante, les équipes, accompagnés par les labs, modifient les façons de travailler. Les changements dans les façons de travailler contribuent à modifier leurs expériences employées. Il existe des synergies entre l'expérience des employés et des clients d'une même marque (Schneider, 1985). L'état de l'art s'attachera à questionner l'impact des méthodologies collaboratives utilisées par les labs tel que le Design Thinking (Hanington, 2003, Gonen, 2019) sur la modification de l'expérience des collaborateurs. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que l'analogie entre l'innovation client et l'innovation employée (Bonnardel, 2000, Hatchuel, 2003) peut nous aider à construire des Labs d'innovation permettant d'améliorer l'expérience des collaborateurs et d'ancrer durablement des pratiques agiles, collaboratives et innovantes au sein de l'entreprise.

Dans le prolongement de l'état de l'art, il s'agira de discuter de la méthodologie ayant permis de réaliser un questionnaire à destination d'anciens participants à des workshops organisés par deux labs d'innovation dans des entreprises de luxe. L'analyse des réponses des 172 répondants nous permet de comprendre les expériences vécues par les participants pendant et à la suite des workshops afin d'identifier les leviers permettant d'optimiser l'appropriation de modes de travail agiles, productifs et épanouissants au sein de l'organisation.

Les trois principales questions auxquelles la partie dédiée aux résultats s'attachera à répondre sont :

- Est-ce que les workshops collaboratifs modifient les façons de travailler des équipes dans les mois et années qui suivent ?
- Quelles sont les ressentis éprouvés par les participants dans les workshops crées et facilités par les Labs d'innovation ?
- Quels sont les ressentis pendant les workshops qui favorisent certaines transformations sur le long terme ?

La perspective de cette recherche est de proposer une méthodologie générique permettant d'optimiser les dispositifs mis en place par les Labs d'innovation afin de favoriser la transformation des façons de travailler des équipes pour soutenir l'adaptabilité et l'attractivité de l'entreprise.

2 ETAT DE L'ART

2.1. Les Labs d'innovation interne

Depuis quelques années, les entreprises accordent une grande importance à développer la compétence d'adaptation afin d'être capable de préserver leur ADN et leur valeur ajoutée dans des contextes qui évoluent rapidement. Pour soutenir la capacité d'adaptation de l'entreprise, de plus en plus de Labs d'innovation voient le jour au sein des entreprises (Osorio et al. 2019). Ces labs portent plusieurs noms tels que Laboratoires DIY, Lab d'innovation ou créative Lab. Nous pouvons définir ces Labs comme des espaces protégés au sein de l'entreprise permettant d'expérimenter des façons différentes de penser et de faire des projets. Ces Laboratoires ont à la fois pour mission de produire des idées et processus de travail nouveaux mais aussi de soutenir leurs implémentations dans l'entreprise (Amabile 1988; Moirano, 2019). Les labs ont pour point commun de stimuler la créativité (Magadley et Birdi 2009, Moultie et al 2007, Osorio et al. 2019) et d'accompagner l'appropriation de nouvelles façons de travailler au travers de projet réels portés par d'autres équipes en interne (Leveque 2020, Lo 2017). Les personnes travaillant au sein de ces labs adoptes différentes postures

d'explorateur, de connecteur ou de facilitateur (Ben Mahmoud-Jouini 2016). Dans tous les cas, la notion de sérénité psychologique est clé pour favoriser la créativité (Edmonson, 2018), c'est pourquoi ces lieux sont des espaces d'autorisation et de bienveillance qui invitent les collaborateurs à sortir de leurs zones de confort.

De nombreuses entreprises internationales sont dotées de Lab d'innovation interne. Ces Labs accélèrent des projets en utilisant différents approches et méthodologies, cette diversité d'approche en fait leur force pour répondre de façon pertinente à chaque sujet (Magadley and Birdi, 2009). Parmi les approches les plus utilisées, nous retrouvons Creative Problem Solving (Parnes, 1962), Design Thinking (Gonen, 2019, Pande & Bharathi, 2020) et CK (Hatchuel, 2003). L'équipe au sein des Labs accompagne les équipes de l'entreprise novices en méthodologies d'innovation en les aidant à comprendre les forces et limites de chaque outil et à développer une posture réflexive sur leur façon de travailler (Siedel, 2013).

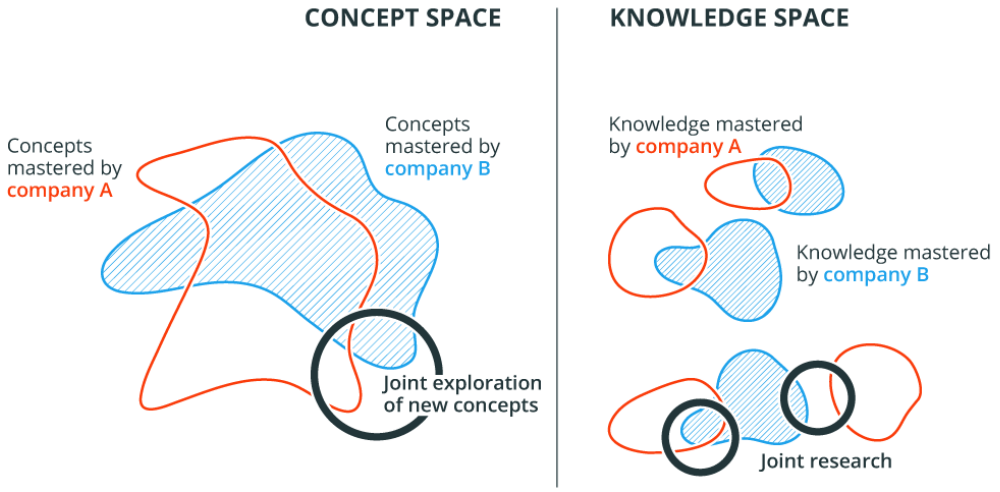


Figure 1 : CK Theory (Hatchuel,2016)

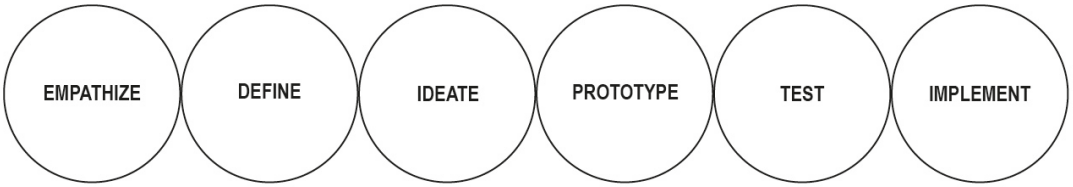


Figure 2 : Design Thinking process in 6 steps

2.2 Le Workshop Collaboratif

Un des points communs de toutes ces méthodologies est d'utiliser des moments d'intelligence collective pour favoriser l'engagement, l'alignement, la créativité et enrichir le projet. La pluridisciplinarité est un élément clé car les différents métiers viennent enrichir le projet à toutes les étapes. Nous allons nous intéresser particulièrement à là ces moments en synchrone où toutes les parties prenantes se retrouvent dans un même espace physique ou digital. Les workshops pluridisciplinaires favorisent l'intelligence collective (Greselle-Zaibet, 2019), la créativité (Parjanen & Hyypiä, 2019) et la performance d'équipe (Moirano, 2019).

De nombreux chercheurs ont étudiés la créativité pour comprendre ce qui l'inhibe ou la favorise (Zhou & Shalley, 2008, Edmonson, 2018). Certains outils tels que le Brainstorming (Osborn, XX), le storyboard (Wong, 2021) ou l'improvisation (Felsman 2020) stimulent la créativité

et sont utilisé régulièrement par les Labs durant les workshops. En plus de favoriser la créativité, certains dispositifs tels que les performances artistiques augmentent la confiance en soi (Ennis & Tonkins, 2015). D'autres études nous montrent les synergies entre bien-être et créativité (Holm, 2015). Ce qui nous amène à penser que les Labs d'innovation interne ont un potentiel impact bénéfique sur les collaborateurs au-delà de l'augmentation de la créativité en améliorant l'expérience des collaborateurs.

Cet état de l'art nous permet de voir la richesse des méthodologies utilisées par les Labs d'innovation interne pour accélérer des projets d'innovation tout en faisant évoluer les façons de travailler. Les workshops collaboratifs sont des moments à fort potentiel transformant dans la mesure où il s'agit d'une expérience en synchrone pendant laquelle les participants sortent de leur zone de confort pour expérimenter d'autres façons de conduire un projet. La guidance des experts en innovation au sein des labs est particulièrement importante pour la réussite de cette démarche. Cependant, il n'existe pas d'étude sur le lien entre les workshops et leurs impacts sur les collaborateurs sur du long terme.

3 OBJECTIF ET METHODOLOGIE PROPOSEE

3.1. Objectif de la recherche

Cette recherche a pour but d'étudier l'impact des Labs d'innovation interne sur les collaborateurs afin d'optimiser les dispositifs d'accompagnements mis en place par les Labs d'innovation dans le but d'améliorer l'expérience collaborateur et la capacité d'adaptation de l'entreprise. Nous allons dans cet article nous attacher à comprendre les modifications des façons de travailler des participants suite à la participation à un workshop. Nous allons nous intéresser tout particulièrement aux liens entre les ressentis éprouvés pendant le workshop et la modification des façons de travailler des équipes. En d'autres termes, il s'agit d'étudier quels ressentis pendant le workshop favorisent la modification durable des façons de travailler.

3.2. Workshops étudiés

Cette recherche étudie l'impact de 29 workshops organisés par deux Labs d'innovation au sein du secteur du luxe entre mars 2017 et février 2021. La durée de ces workshops était entre 4 heures et 7 jours. Ces workshops avaient pour but d'accélérer des projets de différents départements au sein des entreprises, il pouvait s'agit d'innovation produit, service ou de réorganisation. Pour chacun de ces projets d'accompagnement, les équipes des Labs ont conçu un workshop sur-mesure en utilisant les méthodologies vues précédemment dans l'état de l'art.

3.3. Questionnaire

Afin de comprendre l'impact sur les façons de travailler de la participation à un workshop, nous avons réalisé un questionnaire à destination des anciens participants. Pour construire les différents items de la transformation, nous avons utilisé la pyramide de valeurs utilisée pour représenter les différentes dimensions de l'expérience client (Almquist, 2016). Nous avons organisé un focus groupe avec un panel de 12 anciens participants pour collecter des informations qualitatives et enrichir notre première version du questionnaire. Un test en situation réelle du questionnaire a ensuite été organisé avec 10 autres anciens participants pour valider la compréhension et l'ergonomie du questionnaire.

Le questionnaire est structuré en 5 parties et composé de 20 questions. Il y a 5 questions ouvertes et 15 à choix multiples. La première partie concerne les informations génériques sur le répondant. La seconde partie est dédié à l'état d'esprit avant le workshop, la troisième concernant les ressentis pendant le workshop. La quatrième s'attarde sur les impacts dans les mois et années qui ont suivi. Enfin, la cinquième partie concerne les enjeux actuels du répondant dans son travail. Dans le cadre de cette étude, nous allons nous intéresser particulièrement aux ressentis et à l'impact après le workshop. Nous avons réalisé ce questionnaire en anglais et en français.

3.4. Panel de répondant

Ce questionnaire a été envoyé par mail à un panel de 832 anciens participants entre août et septembre 2021. Nous avons collecté 172 réponses, soit un taux de réponse de 20,67%. Le temps de réponse moyen au questionnaire en ligne était de 25 minutes. Le panel de répondant est composé de 100 femmes et de 72 hommes. Ces collaborateurs, tous d'anciens participants à au moins un workshop. Les répondants sont basés à l'international et dans des fonctions très variées tels que le vente, la logistique, le design, le marketing ou la finance.

3.5. Analyse des résultats

Afin de mener l'analyse des résultats, nous avons rassemblé tous les résultats dans un tableau Excel. Dans un premier temps nous avons analysé les résultats question par question en faisant des moyennes. Puis nous avons utilisé la statistique inférentielle pour identifier les liens de corrélations entre certaines réponses, dans le cadre de cet article, nous avons étudier les liens entre ressentis et transformations. Nous n'avons retenu comme significatif les P-Value inférieures à 5%. Le tableau ci-dessous détaille un exemple de calcul du lien de corrélation entre la stimulation de la curiosité et la créativité qui est significatif avec une P-Value inférieure à 0.0001.

Row variable	*Values displayed in bold are significant at the level alpha=0,05*	Observed frequencies	Theoretical frequencies	Mean(Boots trap)	Standard error	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)	Lower bound Simple percentile interval (95%)	Upper bound Simple percentile interval (95%)
Non	Non	66,000	52,698	53,590	6,814	40,140	67,040	40,950	65,525
Non	Oui	**37,000**	**50,302**	**49,850**	**6,137**	**37,736**	**61,964**	**36,950**	**60,575**
Test of independence between the rows and the columns									
(Wilks' G^2):	Non	**22**	**35,3023256**	**34,98**	**5,10294033**	**24,9071328**	**45,0528672**	**25,475**	**45,05**
Oui	Oui	**47**	**34**	**34**	**6**	**21**	**46**	**23**	**46**

Wilks' G^2 (Observed value)	17,451
Wilks' G^2 (Critical value)	3,841
DF	1
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Figure 3. Calcul de la P-Value pour le lien entre Stimulation de la curiosité et augmentation de la créativité sur du long terme

4 RESULTATS

Dans un premier temps, nous allons mettre en avant les modifications des façons de travailler de l'équipe suite à la participation à un workshop. Dans un second temps, nous analyserons les ressentis des participants pendant les workshops. Dans un troisième temps, nous observerons le lien de corrélation entre les ressentis pendant le workshop et les transformations.

4.1. L'impact des workshops sur les façons de travailler

Les workshops organisés par les Labs modifient les façons de travailler des participants. En effet, 83,7% des répondants déclarent avoir modifié au moins une dimension de leur façon de travailler au moment de leur réponse au questionnaire, soit entre les 6 mois et les 4 ans après le workshop.

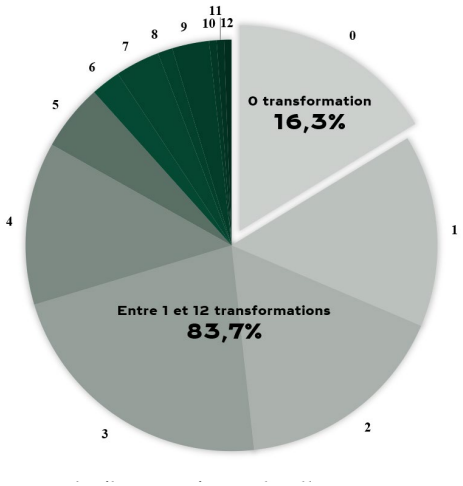


Figure 4. Nombre de transformations observées entre 6 mois et 4 ans après la participation à un workshop

Les workshops permettent d'améliorer la collaboration, d'augmenter le nombre de nouvelles idées, et ils augmentent la motivation et la productivité de l'équipe. Les workshops sont une expérience transformante pour les individus et leurs équipes en ayant un impact observable dans les mois et années qui suivent.

Figure 5. L'impact des workshops entre 6 mois et 4 ans après la participation (172 répondants)

4.2. Les ressentis des participants pendant les workshops

Les principaux ressentis des participants durant les 29 workshops étudiés sont le plaisir d'être avec les autres, l'efficacité collective, la liberté de s'exprimer et d'expérimenter de nouvelles pratiques et la stimulation de la créativité. En ce sens, les workshops permettent de renforcer le lien au collectif et de sortir le collaborateur de sa zone de confort en lui proposant un temps de liberté et de stimulation. Nous pouvons également observer que les workshops étudiés n'ont pas permis au participants de ressentir un sentiment de confiance en soi différent du sentiment qu'ils éprouvent au quotient.

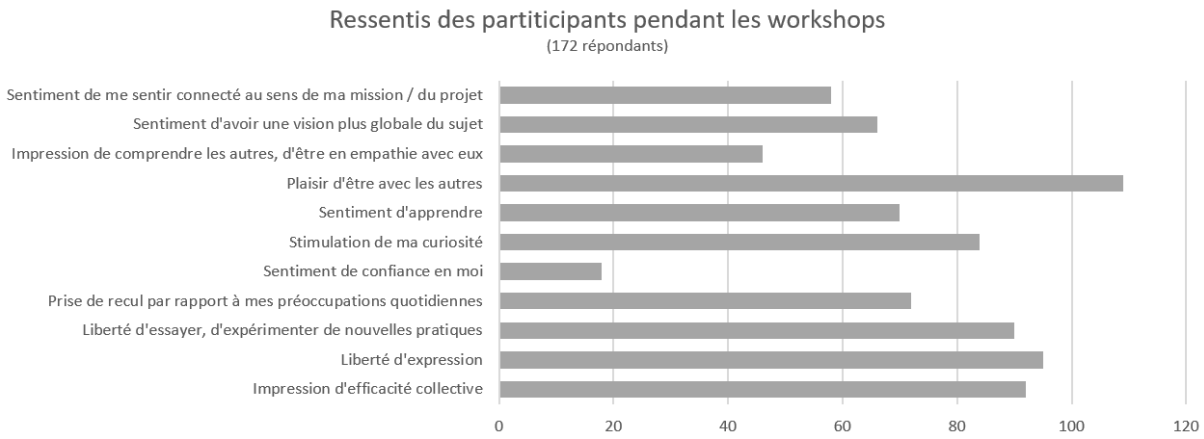


Figure 6. Les ressentis des participants pendant les workshops

4.3. Le lien entre les ressentis et la modification des façons de travailler

Nous allons maintenant analyser les résultats de l'analyse de corrélations entre les ressentis des participants pendant le workshop et les modifications des façons de travailler observées entre 6 mois et 4 ans après la participation. L'analyse des corrélations a permis d'identifier 4 ressentis sur les 11 proposés en lien avec l'apparition d'une transformation des façon de travailler.

	Collaboration	Créativité	Motivation
Liberté d'expression	0,212	0,271	0,170
Liberté d'essayer, d'expérimenter de nouvelles pratiques	0,012	0,008	0,016
Prise de recul par rapport à mes préoccupations quotidiennes	0,083	0,122	0,015
Sentiment d'apprendre	0,428	0,161	0,121
Plaisir d'être avec les autres	0,026	0,025	0,275
Impression de comprendre les autres, d'être en empathie avec eux	0,226	0,385	0,249
Stimulation de ma curiosité	0,088	< 0,0001	0,017
Sentiment d'avoir une vision plus globale du sujet	0,110	0,078	0,003
Sentiment de me sentir connecté au sens de ma mission et du projet	0,246	0,865	0,004
Sentiment de confiance en moi	0,316	0,022	0,002
Impression d'efficacité collective	0,122	0,214	0,003

Figure 7. P.Value entre les Ressentis des participants pendant le workshop et les transformations long terme

Nous nous sommes attachés à étudier le lien entre les ressentis et les trois principales transformations observées ; l'augmentation de la collaboration, de la créativité et de la motivation. L'étude des P-Values nous permet de conclure qu'aucun des ressenti étudié est en lien avec l'amélioration de la collaboration. Le sentiment d'une stimulation de la curiosité pendant les workshops favorise l'augmentation de la créativité. Enfin, 4 ressentis des participants pendant les workshops ont un impact sur la motivation et l'engagement des collaborateurs dans leur travail entre 6 mois et 4 ans après le workshop. Le sentiment d'avoir une vision plus globale du sujet, le sentiment d'être connecté au sens du projet, le sentiment de confiance en soi et l'impression d'une efficacité collective favorisent l'augmentation de la motivation et de l'engagement des participant dans leur travail.

Nous avons démontré dans cette recherche que les workshops modifient les façons de travailler des participants dans les mois et années qui suivent leur participation. L'augmentation de la motivation, de la créativité et de la collaboration sont les principales transformations observées.

Un ressenti favorise l'augmentation de la créativité sur du long terme :

- Sentiment d'une stimulation de sa curiosité

Enfin, quatre ressentis des participants pendant les workshops favorisent l'augmentation de la motivation et de l'engagement :

- Sentiment d'avoir une vision plus globale du sujet
- Sentiment d'être connecté au sens du projet
- Sentiment de confiance en soi
- L'impression d'une efficacité collective

5 PERSPECTIVES

Nous pouvons donc nous demander dans quelle mesure un Lab pourrait créer des expériences transformantes visant à optimiser la modification sur le long terme des façons de travailler d'une équipe en créant des expériences collaboratives spécifiques. En ce sens, nous souhaitons mettre en avant deux pistes afin de prolonger cette recherche. La première vise à approfondir la compréhension des liens entre les workshops et les modifications des façons de travailler des participants. La seconde a pour objectif de concevoir et d'expérimenter des outils et dispositifs qui permettent d'augmenter le changement des façons de travailler des participants.

Pour nourrir notre compréhension des éléments favorisant l'impact des workshops, nous pouvons étudier les liens entre les attentes initiales et la transformation long terme, mais aussi les liens entre les actions mises en place à la suite des workshops et les transformations long terme. Nous pouvons également observer si certaines caractéristiques des workshops semblent favoriser les transformations (nombre de personnes, durée, lieu, sujets, exercices…).

Dans le but de créer des outils pour évaluer les changements suite à la participation à un workshop, le graphique radar, qui est un outil largement utilisé dans les workshops pour évaluer la pertinence d'idée, pourrait permettre de matérialiser les ressentis d'un workshop. Nous pouvons imaginer construire un questionnaire en reprenant les questions concernant les ressentis et d'évaluer l'expérience des participants à la suite des workshops. Notre objectif serait alors d'augmenter le nombre de participants ressentant ces émotions et donc d'augmenter l'aire du pentagone.

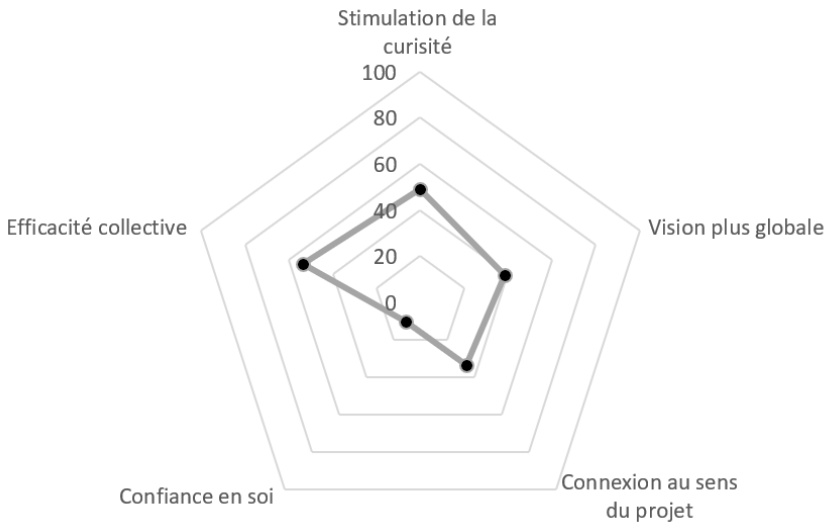


Figure 8. Graphique radar concernant les ressentis qui influencent les transformations

Nous pouvons également créer des workshop sur-mesure afin de favoriser l'apparition de certains ressentis. Pour cela, certains outils et exercices utilisés en innvovation client semblent pertinent à adapter. En ce sens, voici une première proposition d'outils permettant de favoriser les 5 ressentis identifiés précédemment comme leviers pour activer les transformations long terme de la créativité et de l'engagement.

Outils utilisés pendant le workshop	Ressentis attendus
Performances Artistiques (Ennis & Tonkins, 2015)	Stimulation de la curiosité
9 écrans – TRIZ (Chambon, 2011)	Vision plus globale
Les cinq pourquoi (Serrat, 2009)	Connexion au sens du projet
Improvisation (Felsman 2020)	Confiance en soi
Brainstorming (Osborn, 1957)	Efficacité collective

Figure 9. Proposition d'outils pour favoriser certains ressentis chez les participants

Ces deux axes de prolongement seront complémentaires et nous permettons de formaliser une méthodologie pour optimiser l'impact des labs d'innovation au sein d'une organisation et ainsi contribuer significativement à une amélioration de la collaboration, la créativité et l'engagement des collaborateurs au sein d'une entreprise afin de soutenir sa capacité d'adaptation et d'attractivité.

6 REFERENCES

AMABILE, T. M., The social psychology of creativity: A componential conceptualization. Journal of personality and social psychology, 45(2), 357, 1983.

BERKHARD, R. H.., *Organization Development : strategies and models.* Reading, MA: Addison-Wesley 1969.

BONNARDEL, N., *Towards understanding and supporting creativity in design: analogies in a constrained cosnitive environment.* Knowledge-based Systems 13, 2000.

BUCHANAN, R., *Worlds in the Making: Design, Management, and the Reform of Organizational Culture.* Markets, She Ji, 2015.

CHAMBON, T., CHOULIER, D, & All. *Instrumentation de l'utilisation d'un outil methodologique: application aux "9 ecrans" de la methode triz..* AIP Primeca 2010, Apr 2009, La Plagne, France. p.1-12.

EDMONDSON, A. C., LEI, Z., *Psychological Safety: The History, Renaissance, and Future of an Interpersonal Construct.* Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior, 2014.

ENNIS, G., & TONKIN, J. *15 Youth arts and mental health: exploring connections in the Top End*. *6*, 1–7, 2015.

FELSMAN, P., Gunawardena, S., & Seifert, C. M. *Improv experience promotes divergent thinking, uncertainty tolerance, and affective well-being,* Thinking Skills and Creativity, 35(January), 2020

FINDELI, A., *La recherche en design, questions épistémologiques et méthodologiques.* La critique en design, contribution a une anthologie éd. Jacqueline Chambon, Nîmes, 2003.

GONEN, E., *Tim Brown, Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation.* Markets, Globalization & Development Review, Vol. 4 Number 2, 2019.

HANINGTON, B., *Methods in the Making: A Perspective on the State of Human Research in Design.* Design Issues: Volume 19, Number 4, 2003

HATCHUEL, A., WEIL, B. *A new approach of innovative design: An introduction to c-k theory.* International conference on engineering design, Stockholm, 2003.
JAMES, E., *Managing the Environmental Change Process: Barriers and Opportunities.* Journal of Organizational Change Management, Vol. 7, 1994
OSBORN, A.F., *Applied imagination:principles and procedures of creatives problem-solving (third rev. ed.)* New York : Charles Scribner Sons.
LEE, K. Critique of Design Thinking in Organizations: Strongholds and Shortcomings of the Making Paradigm. She Ji, 7(4), 497–515, 2021.
LEVEQUE, J., Mahmoud-Jouini, S. Ben, & Fabbri, J. *Espace et événement collaboratifs d'innovation, deux dispositifs complémentaires pour l'ambidextrie*. Synergies entre Innovation Lab et Innovation Challenge. Finance Contrôle Stratégie, NS-9, 2020
LO, A. Un FabLab d'entreprise pour favoriser l'ambidextrie des salariés: Étude de cas chez renault. Revue Francaise de Gestion. p. 81-99, 2017
MAGADLEY, W., & Birdi, K. Innovation labs: An examination into the use of physical spaces to enhance organizational creativity. *Creativity and Innovation Management*, *18*(4), 315–325. 2009
MOIRANO, R. , Sáncheza M. A., & Štěpánek L. *Creative interdisciplinary collaboration: A systematic literature review. Thinking skills and creativity.* 2019
OSORIO, F., DUPONT, L., and *all Design and management of innovation laboratories : Toward a performance assessment tool.* Journal of Creativity and Innovation Management, 28(1), 82–100. 2019
RASULZADA, F., DACKERT, I., *Organizational Creativity and Innovation in Relation to Psychological Well-Being and Organizational Factors.* Creativity Research Journal, Volume 21, 2009.
SCHEIDER, B., BOWEN, D. E., *Employee and Customer Perceptions of Service in Banks: Replication and Extension.* Journal of applied Psychology, Vol.70, 1985.
SERRAT, O., *The five Whys Technique*, Knowledge Solutions. p.30 2009
SIEDEL V. P. & FIXSON S. K. *Adopting design thinking in novice multidisciplinary teams : The application and limits of design methods and reflexive practices*. Product innovation management, 2013
TAORMINA, R., *Organizational socialization: the missing link between employee needs and organizational culture.* Journal of managerial psychology, 2009.
WONG C. C., KUMPULAINEN, K., & KAJAMAA, A. (Collaborative creativity among education professionals in a co-design workshop: A multidimensional analysis. Thinking Skills and Creativity, N. 42,2021.

Contact principal : CATEL Marine

Coordonnées
Marine.catel@cartier.com
+33 6 31 00 66 47

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2022, BÂLE, SUISSE.

HOW TO IMPROVE THE CONTROL PROCESS OF DIGITAL MOCK-UPS FOR AN INDUSTRIAL DEPLOYMENT OF BIM OPERATION MAINTENANCE MANAGEMENT?

CAUDAL Hugo[1,2], HULIN Anton[2], JEAN Camille[1], VIGNOLES Henri[2], SEGONDS Frédéric[1]
[1] Laboratoire de Conception de Produit et Innovation LCPI – Arts et Métiers Institute of Technology – HESAM University, 151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
[2] SNCF Gares & Connexions, 16 avenue d'Ivry, 75013 Paris, France.

Abstract: SNCF Gares & Connexions started a project in 2018 to create the digital mock-ups in a BIM OMM approach, of the 122 largest French stations until 2025. The transition from a test phase on 10 stations to an industrialization phase of 25 stations to be modeled per year thus prompted an interest in how the company could improve its process of controlling the 3D digital mockups to ensure their optimal use in the long run as digital twins. The article deals with the subject of BIM OMM and PLM in order to analyze the process currently used by SNCF G&C and to determine the improvements to be implemented. A standardization of the control process has been determined as well as an improvement of the verification tools to increase the speed and the efficiency of these model controls. In conclusion, the company as well as its service providers will carry out these controls in a better guided and clear way while perpetuating the improvement of the tools by a continuous improvement of the industrialized process.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Product Life Cycle Management (PLM), Digital Mock-up, Control process, Operation Maintenance Management (OMM), Digital twins.

1 INTRODUCTION

In the field of building and more particularly for tertiary constructions, 75% of costs over their lifecycle are devoted to operation and technical maintenance (Guesné, 2018). This distribution therefore pushes builders to imagine tools or methods that allow them to achieve great savings by facilitating the management, operation and maintenance of their works. It is in this context that the BIM (Building Information Modeling) method was born. This method allows the management of construction based on a 3D digital mock-up containing reliable and structured data, thus facilitating collaboration between the various actors of construction projects (BuildingSMART, 2021).

In this same context, SNCF Gares & Connexions has launched a nationwide project (France) to digitize and model their 122 largest existing stations in order to implement a BIM Operation Maintenance Management (BIM OMM) approach (SNCF Gares & Connexions, 2017). With work based on the entire lifecycle of the building, the BIM OMM, through better technical knowledge of the building and better sharing of information with all stakeholders, allows for better control of building operating costs. The various stations are thus to be accompanied by a digital twin (Deng & Kamat, 2021) to facilitate the management of their assets as well as future projects that may be associated. To achieve this, SNCF Gares & Connexions uses service providers to carry out a point cloud digitization phase, followed by modeling (Figures 1, 2) based on the latter. This allows to reconstruct the station

and its equipment, which will be used during its operation, after having integrated the mock-ups into a dedicated computer tool.

Figure 1. Point cloud from the digitization of the Lorient station with laser scanner

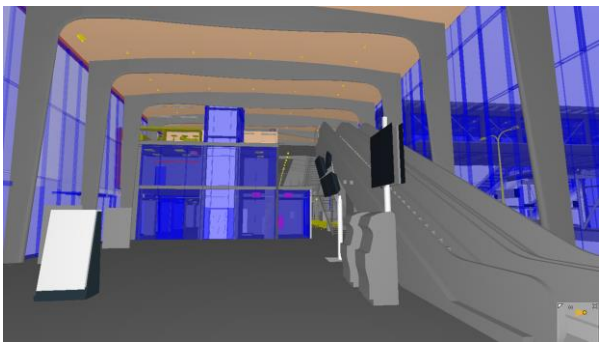


Figure 2. Modeling of the Lorient station using the cleaned point cloud

As seen previously, the BIM method facilitates the lifecycle management of a building asset by working around a 3D digital mock-up. It is the work support allowing to improve the collaboration between the various stakeholders working on the project. Historically, this type of method has also been developed in the field of industry through the PLM (Product Lifecyle Management) method (Marin, 2009). It allows the management of technical information and allows the exchange and sharing of information (internally or externally) throughout the product lifecycle. The automobile and aerospace industries were the two main historical users of PLM.

As the 3D digital mock-up is at the heart of PLM (for industrial products) and BIM (for buildings), the quality of the latter will condition the success of projects carried out using these methods. A complementarity can thus be observed between the PLM and BIM methods due to the similarities they present via the digital mock-up serving as a support for collaboration and sharing of operating methods and tools (Malagnino et al., 2018).

The research question studied in this research article will thus concern the way in which the control processes of the digital mock-ups can be improved before their exploitation by SNCF Gares & Connexions. Indeed, the complete success of this BIM project will rely essentially on the fact of being able to obtain the most complete and precise digital twin possible (Deng & Kamat, 2021) and thus allowing to bring the greatest value to the company. The objective will be to study the tools and methods currently used by SNCF Gares & Connexions in order to move into a production phase of digital BIM models of the 122 largest French stations (Figure 3). This study will then be followed by an analysis of the tools and methods used in the field of PLM in order to realize an analogy aiming at standardizing and improving the control of the digital mock-ups of the stations.

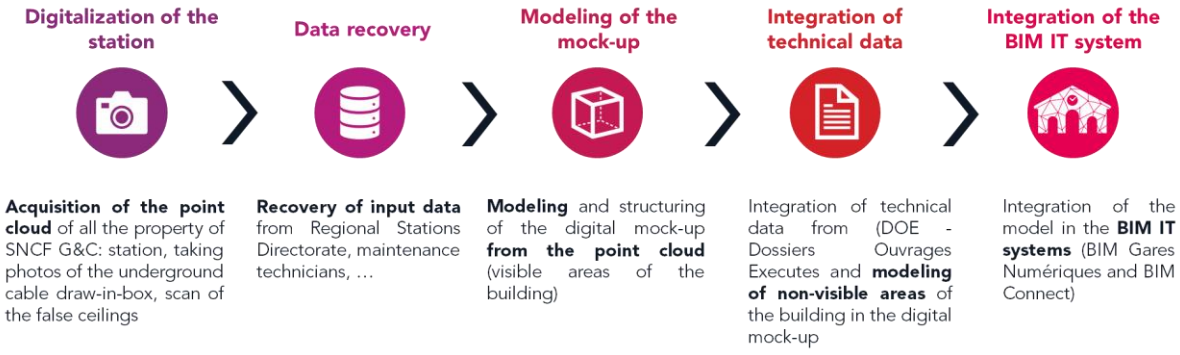


Figure 3. Creation process of 3D digital mock-ups of French stations of SNCF Gares & Connexions

2 STATE OF THE ART

2.1. Product Lifecycle Management (PLM)

The PLM method is an approach that was historically developed in the aeronautical or automotive industry, as it requires the management and optimization of processes to ensure the evolution of the product throughout its lifecycle (Marin, 2009). Previously, the design of products was carried out around a digital CAD model to facilitate changes and communication within the same division in a company. The problem that was encountered by these companies before the implementation of PLM, was to ensure collaboration between the various actors outside the project. Indeed, the increasing amount of information as well as the number of multidisciplinary actors related to a project has made product development more and more complex and difficult. It has thus been necessary to develop tools and methods to share and spread all the information necessary for the management of the product's life cycle to all the actors (internal or external to the project company) to allow them to work with perfect collaboration and the same level of up-to-date information. These different external actors are in particular suppliers, customers, design partners and internal actors are the different poles of the company (communication, design office, purchase, ...).

The PLM approach and the associated tools (Segonds et al., 2010) thus facilitate this information sharing and ensure the notion of interoperability and collaboration between the various multidisciplinary actors of a project (Moones, 2017). This strategy thus aims to improve collaborative innovation and those, over the entire product life cycle (Figure 4). An example that can be used is the design of an aircraft by Airbus historically as well as the newly implemented software/platform, 3DExperience by Dassault Systems©. The project is structured around a CAD digital model of the project and the PLM environment set up around it allows to easily share information via the Cloud and those, by adapting the available data to the actor concerned (purchasing department, design, maintenance, ...). This multi-actor collaborative work environment facilitates the application of company processes while coordinating them to improve the efficiency and speed of product launches.

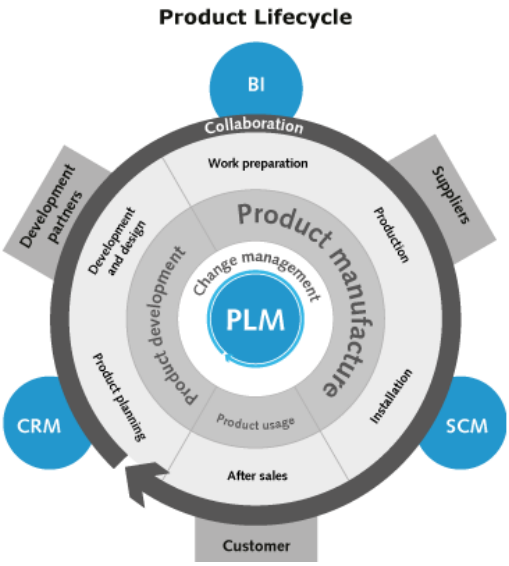


Figure 4. Product Lifecycle collaboration with a PLM approach – ORBIS, 2022

This PLM method and its tools are based on a digital CAD model of the product, the central element of the project, with the aim of interconnecting all of the project's actors and thus promoting collaborative work and the sharing of up-to-date information adapted to each profile concerned. PLM is thus essentially linked to an industrial context of product design over its entire life cycle. Currently, a new trend is more and more being developed and in a similar way to this method: the BIM. Building Information Modeling is a working method that focuses on facilitating multidisciplinary collaborative work around a digital mock-up, this time related to the building. A contextualization of BIM and the

BIM OMM (Operation Maintenance Management) method is also carried out in this research work. It allows then to highlight the similarities and analogies (Bouguessa et al., 2013) that can be determined between PLM and BIM in order to respond to the SNCF Gares & Connexions' research question, which is based on the industrialization of their station modeling project.

2.2. Building Information Modeling (BIM)

Such as the PLM, the BIM is a collaborative work process organized around a 3D digital mock-up of a building and which therefore gathers all the information related to its architecture and composition (equipments for example) (Guesne, 2018). The BIM is used in particular in the design phases of a new building, structure or building in order to be able to collaborate around this digital mock-up and thus facilitate its construction but also during its entire life cycle for renovation work for example. BIM is thus characterized as a process of structuring, creation, exchange and visualization of building data.

BIM digital mock-ups such as the French stations created by SNCF Gares & Connexions are created using building design software such as Revit Autodesk© in the same way as a product would be manufactured with CAD software as explained above. These digital station models are composed of an architectural model (including the geometry of the station) as well as a technical model including the different equipments present in the station (boilers, lamps, etc.). These models are then exported in a universal file format: the IFC (Industry Foundation Classes). IFC is a standardized object-oriented file format for the building industry and thus to share information (Autodesk, 2018). This format can be compared to the STEP (STandard for Exchange of Product model data file) format for CAD products and thus can be used more easily due to its non-proprietary format. This type of digital mock-up is structured by class, allowing the mock-up to be broken down by object type (IfcDoor for a door, IfcBeam for a beam or IfcRoof for the roof, for example). This makes it possible to facilitate the management of this type of digital mockup for its use (Mignard, 2012).

These 3D digital mock-ups of stations created in this way can be described as "static". Indeed, at the beginning of the modeling they include technical and architectural mock-ups, but do not include information about the equipments or other objects that may be present in the station. It is this aspect that is currently the focus of SNCF Gares & Connexions' project. Indeed, the objective until 2025 is to model and transform into BIM models the 122 largest French stations in order to be able to use them in a BIM OMM (Operation Maintenance Management) approach that transforms static models into models that include information about technical equipments in particular, with the aim of transforming them into digital twins of stations, which can then be used by the company, and which will then be detailed. In the remainder of this research paper, the difference between a digital twin and a 3D Digital station Mock-Up (DMU) will be taken into consideration. Indeed, the digital model can be perceived as a "picture" of the physical station at a given moment, whereas the Digital Twin (DT) of the station represents the station at any moment with an update of the informations and parameters concerning it via IS (Information System) tools and processes (updated equipments for example).

2.3. BIM Operation Maintenance Management (BIM OMM)

As previously explained, in its project planned until 2025, SNCF Gares & Connexions wishes to develop a BIM OMM (Operation Maintenance Management) method with its 122 largest French train stations (representing 60% of the total surface of stations in France) (SNCF Gares & Connexions, 2019). This method consists of using the "static" digital mock-ups of the stations and adding information to them, particularly concerning technical equipment. This is done by adding information to differentiate between equipment, even if it is physically identical (unique code per equipment via a Computerised Maintenance Management System (CMMS) software package) or by linking manufacturer's documents relating to the equipment, for example. Once these additions have been made to the "static" mock-ups, it will represent the real station as well as the objects present in it. We can thus speak of a digital twin of the station.

The main objective of SNCF Gares & Connexion is to give access to the digital twins of its largest stations (Figures 5 & 6) through BIM mock-ups in order to facilitate the management,

operation and maintenance of these stations. Indeed, the models will then be implemented in a software co-developed by SNCF G&C (named BIM Connect) and whose role will be to give access to these digital models to the various actors acting within the stations such as maintenance personnel. The aim is to be able to access directly and in real time the intervention orders and the equipment present in the stations, in a totally digital way and therefore no longer requiring a systematic visit in real time to the station to check the equipment to be changed and its geographical position.

This large-scale project will enable us to maximize the value of its assets while facilitating their management, operation and maintenance, which represent a major cost in the overall life cycle of a station. These mock-ups also make it possible to facilitate renovation or improvement work on stations, as well as to facilitate their management during the station's operating phase. The collaboration around these digital twins, as well as the sharing and maintenance of knowledge of the company's technical assets, will help to enhance the national heritage and develop France's digital transformation strategy.

Figure 5. Train Station of Lorient - France

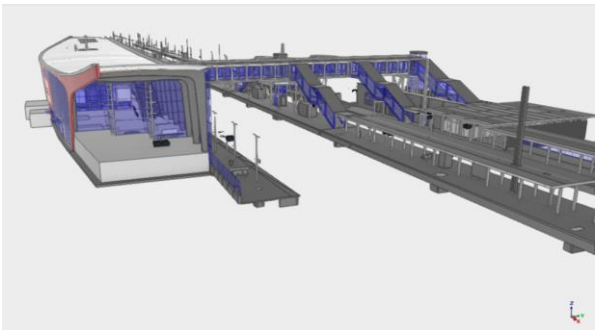


Figure 6. Digital twin BIM OMM of the Lorient Train Station – SNCF G&C

2.4. State of the art synthesis

The previous sections have allowed us to better understand the context in which a building evolves during the management of its life cycle in a BIM OMM approach as well as the parallel that can be made based on what is achieved in industry with PLM. The case of SNCF G&C, because of its particularity regarding the method used to create the 3D digital mock-ups of its stations and then to transform them into digital twins, implies additional constraints. Indeed, this approach is part of a retro-BIM, which means modeling the digital mock-up from an existing building and not the opposite in the case of BIM construction for example. This method thus requires to ensure that the model is perfectly complete in order to be used in the best conditions. As this type of process for checking the completeness of the digital mock-up is very specific, there is currently no standardized method that can be used directly by SNCF Gares & Connexions. The research question will therefore focus on this aspect.

3 RESEARCH QUESTION AND OBJECTIVES

In order to create these 122 digital station mock-ups in a BIM OMM approach, SNCF Gares & Connexions calls on service providers (Figure 3) who will carry out the various stages of station modeling. The first step consists of digitizing the station using a point cloud obtained with 3D laser scanners positioned successively at different locations by the service providers. This point cloud will then allow us to carry out the second step, which is the modeling of the station based on it. This modeling step is crucial in the SNCF Gares & Connexions project because it will then determine the quality and completeness of the digital mock-up and therefore its use in a BIM OMM approach (digital twin of the station).

The research question concerned in this article is the following: **« How to improve the control process of digital mock-ups for an industrial deployment of BIM Operation Maintenance Management? »**.

The SNCF station modeling project team considers that a digital mock-up (that will evolve in a digital twin at the end of the process) of a station is perfectly modeled if it respects these conditions (non-exhaustive list of criteria in the specifications):

- The digital mock-up is geometrically faithful to the real station (with the precision requested in the specifications).

- All the equipment visible on the point cloud has been modeled (equipment that is the object of the BIM OMM approach).

- All the equipment that are not visible on the point cloud and for which the information has been provided by the project owner, have been modeled (the equipment that is the object of the BIM OMM approach). This information is generally provided via the "Dossiers d'Ouvrage Exécutés" (DOE) which are contractual documents established following the execution of the work and given to the project owner at the time of the delivery of the site.

- The information relating to site management is correctly entered in the digital model (Building code, floor, premises, use).

- The information relating to goods and equipment is correctly entered in the digital mock-up such as the unique codes for each piece of equipment or building for example.

The validity of these criteria will thus condition the optimal use of digital mock-ups in the SNCF Gares & Connexions BIM OMM approach. Indeed, an asset or piece of equipment that is not present in the model or that is incorrectly filled in could not be used effectively for a maintenance request, for example. This shows the importance of carrying out a quality control on the whole model so that it can be put into its use phase (in the BIM Connect hypervisor) by being complete and correctly filled in.

This explained the question that is raised in this research article. Indeed, SNCF Gares & Connexion started the project at the end of 2018 with 10 pilot stations (Brittany, FRANCE) with the aim of structuring their processes for creating 3D digital mock-ups for a BIM OMM approach. After this phase, the company established a provisional schedule of 25 digital station mock-ups to be started in production per year until 2025, thus moving them from a test phase to a production phase. As seen previously, it is during this second phase that the company realized the weaknesses in their control process of the 3D digital mock-ups before their final use. This process did not allow them to manage a large quantity of models to be checked in parallel and did not allow them to obtain the quality and completeness necessary for their optimal use in the final BIM Connect hypervisor.

The research hypotheses that will be used to address this research subject are the following and will guide the expected results:

- **H1:** The current process is not optimized (and not clearly defined) and some key steps can be identified and improved (time and quality savings)
- **H2:** The current tools and methods are "artisanal" and can be industrialized to improve the process.
- **H3:** The optimization of the control processes will increase the analysis capacity and the quality of the digital mock-ups of retro-BIM stations.

4 METHODOLOGY

To answer the research question defined above, the approach that will be used will be divided into 6 steps (Figure 7). These steps will allow us to respond to the subject of this research and also to suggest ways of improving or continuing the subject afterward.

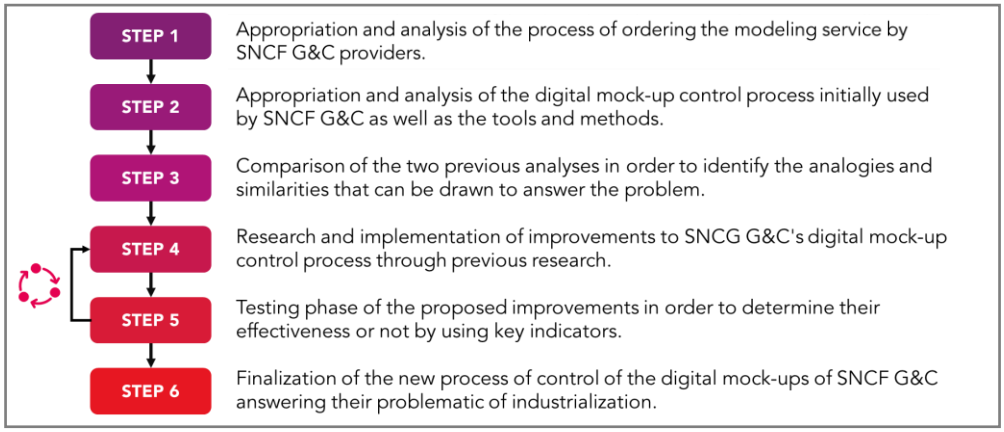


Figure 7. Methodology used proposed to answer the question of the research article

As PLM is currently a method applied in an industrial context with processes, tools and methods adapted to this type of domain and as it is also a collaboration tool in the same way as BIM is in the building industry, it seems relevant to carry out this comparison in order to get elements that will allow us to answer the question of this research article.

5 RESULTS

5.1. Initial digital mock-up control process of SNCF Gares & Connexions

The first step in answering the research question consists in detailing the bases present within SNCF Gares & Connexions concerning the process currently in place to control the 3D digital mock-ups of the stations. The purpose of this process is to develop the BIM OMM approach using the digital stations. This first step will allow us to understand the basis of this research in order to facilitate the determination of aspects that can be improved or completely modified. This first analysis concerns several aspects such as the structuring of the model, its information, the tools put in place to control the mock-up or the methods used to carry out these controls (software, documents, etc.).

The first research consisted in determining the structuring of the mock-ups realized and controlled by the company and which is essentially conditioned by the format used (IFC) and the information that one wants to integrate (related to the specifications). To do this, a graphical representation could be made to cut a digital mock-up of a station (Figure 8) and better understand how they are controlled thereafter. It can be seen that this model includes an essentially architectural part with the geometry of the station and the building in general, as well as a technical part which includes all the goods or equipment present in the station and which will be used in the BIM OMM approach and is therefore very important.

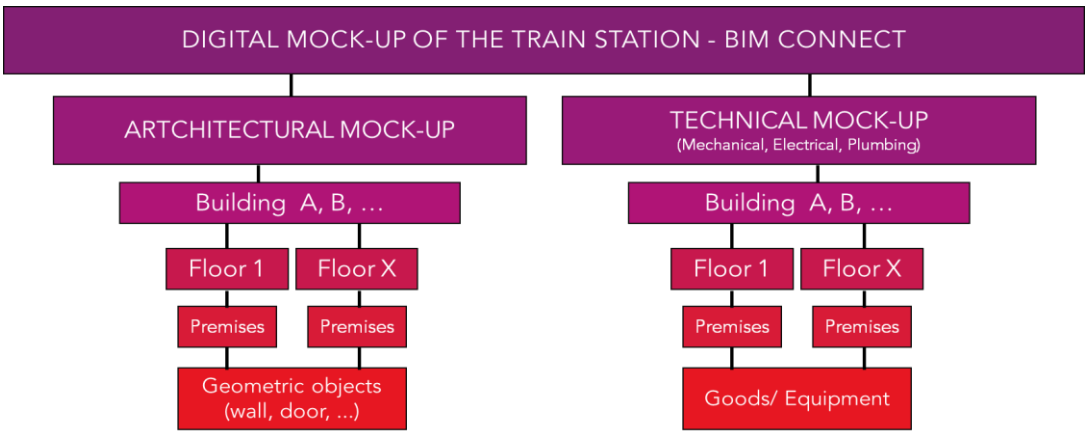


Figure 8. Structuring of a digital station mock-up

After having carried out this analysis of the structuring of a digital station mock-up, it was then possible to move on to the second research consisting in determining all the tools currently used by SNCF Gares & Connexions to carry out this control. We were thus able to determine first of all several documents used in particular in order to order the modelling prescription to the service providers but also documents allowing to list the points to be controlled by the person in charge of this work. The first important document is the modeling specifications. This one allows to define the level of precision required on the mock-up but also the structuring of the information within the digital model. This information will be essential for the successful use of the mock-up in a BIM OMM approach, such as information relating to buildings, floors, premises and equipment. It is also this information that will be precisely controlled during the global control phase of the mock-up. The specifications also include information about the modeling criteria of the station, such as the weight of the modeled objects. The 10 parts included in this specification are the following:

1/ Purpose of the document
2/ Related documents
3/ Input data
4/ Modeling scope and definition level
5/ Adding BIM OMM metadata
6/ Modeling Charter
7/ Deliverables
8/ Unfolding of the services
9/ Rendering
10/ Intellectual Property

The second important document that was initially used by SNCF Gares & Connexions is a control checklist (Figure 9). This lists all the points to be checked on the mock-up, with the aim of validating or not the points, and then returning the document to the service providers who will be able to make the requested modifications. The different main parts that will be checked are the presence of all the requested deliverables, the control of the IFC digital mock-up with notably the useful information in the BIM OMM approach, the organization of the Revit mock-up as well as the presence of all the assets or equipment. This last step allows to check if all the objects present or not on the point cloud have been well modeled.

OMM digital mock-up analysis grid
Project : XXX Station

DMU Version : Version VX, Date JJ/MM/AAA
Analysis date : JJ/MM/AAA
Provider : Name of the provider

Item to be controlled	Details	type of control	Check	Comments	Impact	control means	Control description
Deliverables							
Revit Mock-up		Presence yes/no			Very high	File Explorer	
IFC Mock-up		Presence yes/no			High		
Shared parameter files		Presence yes/no			Low		
2D Plans PDF		Presence yes/no			medium		
DWG IMMOSIS		Presence yes/no			medium		
Families RFA		Presence yes/no Supply of families in case of creation of new families by the modeler			Low		
Files		File name coding (template and links)			Low		
		Weight (200 Mo maxi file RVT)			High		
		Weight (250 Mo maxi file IFC)					

Figure 9. Example of the control checklist - verification of deliverables received and their weight

The last aspect allowing the control of digital station mock-ups and initially used by SNCF Gares & Connexions concerns software dedicated to this task. The first is Atis Cloud (Figure 10), which enables the storage of point clouds of stations before modeling. It also allows a "visual" check to be carried out to verify that the digital mock-up modeled is correctly based on the point cloud. This software also allows to check if all visible objects have been modeled. This allows a first quality control of the model and feedback to the service provider in order to modify the model if necessary or to add the goods/equipment that could have been forgotten. The cloud of points as well as the digital models are superimposed in order to carry out this first control.

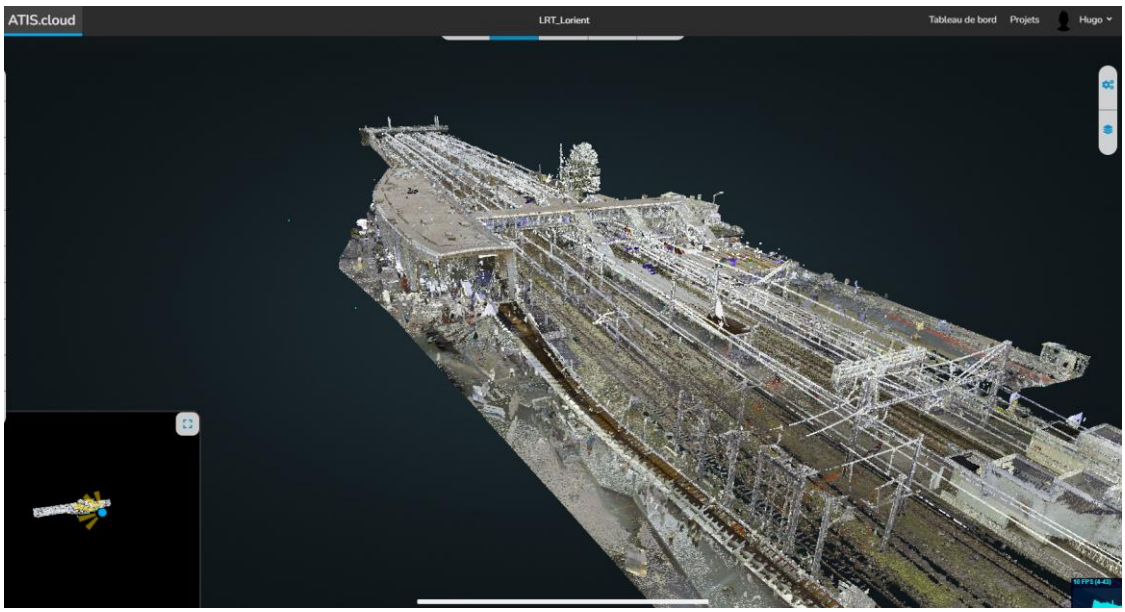


Figure 10. Point cloud of Lorient station on Atis Cloud - Allows the first "visual" control of the digital mock-up

The second essential tool that is used during a majority of the verification phase of the digital station models is the Solibri Office© software (Figure 11). It is one of the most versatile and powerful tools for checking digital mock-ups (TKM, 2022). It allows to perform extractions directly from the IFC file and also to apply rules to control the presence of certain information in the model. It can control the geometric conflicts that could also be present and cut the model according to selected conditions. This tool allows you to control all the information present and necessary for the BIM OMM approach, for example, you can check whether each building or floor has been assigned their real estate information (BGC Bâtiment code, for example). Finally, it is possible to use communication reports in Solibri Office© to report any errors detected and thus be able to request modifications by the service provider to ensure the quality of the service.

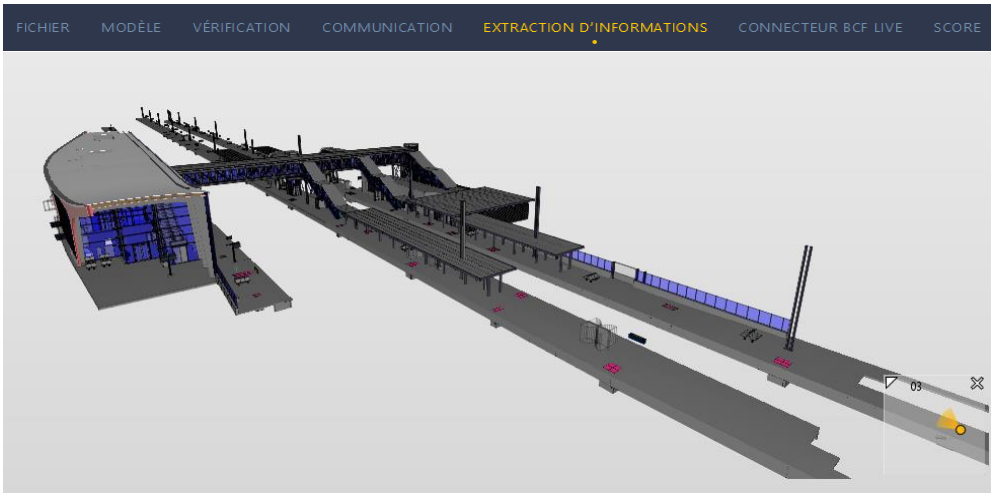


Figure 11. Downloading of the Lorient digital mock-up in Solibri Office© and the available tools

5.2. The processes, tools and methods used in a PLM context and identification of improvements for the control process

Following the analysis of the initial process, the tools and the methods used by SNCF Gares & Connexions to control the 3D digital mock-up of stations, several identifications for improvement were determined.

First of all, we have seen previously that the PLM collaborative method is mainly targeted for industrial fields. This aspect allowed us to understand very quickly that it was necessary to start by structuring the current process by putting it in a schematic and linear way in order to be able to use it later. This process was thus created (Figure 12) by determining the tasks initially used by SNCF Gares & Connexions and allowed us to better understand the current sequencing in order to be able to determine more quickly the first improvements to be made.

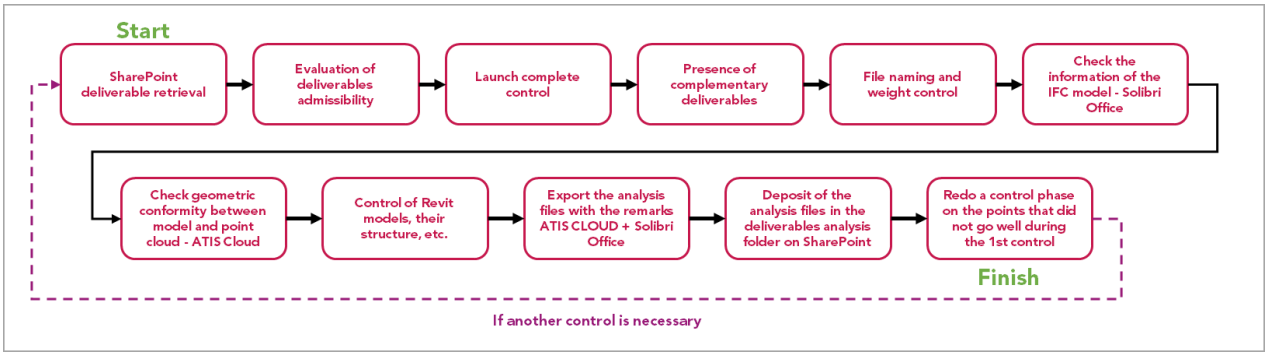


Figure 12. Initial global control process for digital mock-ups – SNCF Gares & Connexions

The second improvement that could be determined concerns the specifications used for the station modeling prescription. Indeed, as seen in the previous section, this specification allows to define for the service providers the different requirements of SNCF Gares & Connexions regarding the modeling details and the information to be linked to the mock-up. These specifications are divided into two parts: the modeling charter part and the prescription part linked to the station and the perimeter to be modeled. During this research, the writing of these specifications was quickly judged to be very repetitive and without any real added value. Moreover, the merging of the two parts in the specifications made it very quickly difficult to understand and particularly the important information for the provider. An automation was thus carried out with the aim of being able to generate the specifications directly by choosing the criteria of the station to be modeled: Case 1: complete mock-up to be carried out, Case 2: Already existing mock-up to be enriched, DOE present or not, etc. This increases the speed of document writing and reduces errors due to the automation achieved through macros and the Microsoft Visual Basic software.

Finally, the last improvement idea that could be determined to improve the control process of the digital station mock-ups, concerns this time the control of the information present in these mock-ups and which are essential for the BIM OMM approach. Indeed, this task was the most important to be able to manage assets and equipment in the BIM Connect hypervisor. It is then necessary to improve this task to improve the quality and efficiency of the control of the mock-ups. First of all, the structure of a digital station mock-up has been used and coupled with a search for the information needed at each level to obtain the desired quality (Figure 13). This allows a better understanding of the different information that is necessary to check carefully if they are filled in and if the values are correct.

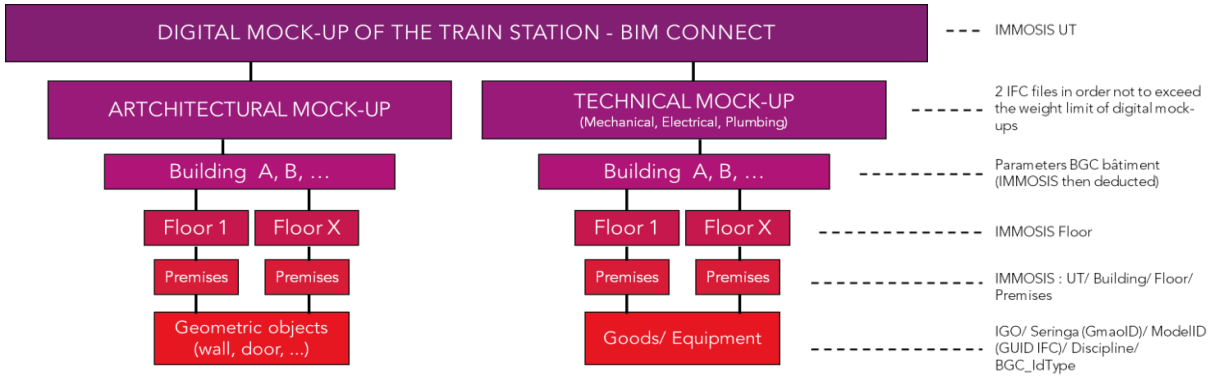


Figure 13. Structuring of a digital station mock-up and the necessary informations for the BIM Connect hypervisor

This complete structuring will thus make it possible to improve the current use of the Solibri Office© software in order to better control the information of the assets, equipment and architectures. A coupling can then be made between the extraction of information from the digital mock-up on the software and the extraction of information to be put in the mock-up. A comparison of these two spreadsheets will allow us to verify that the information is filled in (via Solibri Office©) but also that this information is correct (using the data dictionary). This will ensure the completeness and quality of the digital mock-ups and the objects present in them in order to optimize the BIM OMM approach of SNCF Gares & Connexions.

5.3. Continuation and implementation of process improvements

As we have seen previously, different ideas for improvement have been proposed in order to improve and optimize the process initially used by SNCF G&C to control their digital station mock-up. These ideas allowed the development of methods and tools to be implemented for the different actors working around this project. Indeed, the redesign of the specifications and its automation will allow for example to facilitate the understanding by the providers but will also allow the company to save time on this task and allowed a gain of quality and efficiency.

The standardization of the process and tools will also simplify and accelerate the control of the digital mock-ups, whether by the service provider directly with a self-control or by SNCF G&C by following a detailed and fixed procedure. This standardization is therefore perfectly suited to the transition from a test phase to an industrialization phase of the digital mock-up creation process.

Finally, once these improvements have been determined, it remains to verify their total effectiveness and to ensure that they last over time. In order to do this, steps 5 and 6 consist of setting up a governance system to continuously improve these ideas in order to determine the evolution they may or may not take. This work will thus be carried out in continuity of this research article by using key indicators on the next mock-up controls in order to determine the choices to be made to optimize and facilitate this control process permanently. This work was very long due to the quantity of stations to control and the time of their creation, it is not possible to draw conclusions directly. Key indicators such as the time taken per control, the number of errors detected in a control (weighted on the size of the station) could allow this continuous improvement phase to be carried out.

6 CONCLUSION

To conclude this research article, we were able to answer the question determined for SNCF Gares & Connexions which was the following: *"How to improve the control process of digital mock-ups for an industrial deployment of BIM Operation Maintenance Management?"* and those, using the various hypotheses which had also been formulated and which will be recalled:

- **H1:** The current process is not optimized (and not clearly defined) and some key steps can be identified and improved (time and quality savings).
- **H2**: The current tools and methods are "artisanal" and can be industrialized to improve the process.
- **H3:** The optimization of the control processes will increase the analysis capacity and the quality of the digital mock-ups of retro-BIM stations.

Indeed, as developed in the previous section, we noticed that the process, the tools and the methods used to control the 3D digital mock-ups were initially very specific to the station being processed and the control steps were carried out in an unstructured way. This type of procedure was therefore not viable in a new phase of larger-scale production of digital mock-ups and also required a higher quality requirement to ensure the optimal application of the BIM OMM approach.

The analysis of the PLM, in a framework of industrial advantage, has thus allowed to transpose the tools and methods towards a BIM approach. This has allowed us to structure and standardize, first of all, the control process of the digital station mock-ups, the key information to be verified as well as the tools for the different actors of the project. These improvements have allowed to transform this part of the global process of the SNCF G&C project in order to be able to carry out these controls in a more efficient and faster way, thus implying a lesser number of errors, favoring the BIM OMM approach.

The continuity of this research work will thus be able to target the verification of the tools, methods and new processes set up in order to verify their good integration and their good effectiveness. The next study could thus turn to a work of continuous improvement of the process of control of the digital mock-ups thus standardized with an aim of being able to ensure a progression in real time (Step 5 and Step 6). A study with key indicators used during the next control phases will allow SNCF Gares & Connexions to carry out this research continuity to enable them to perfectly continue this project.

7 REFERENCES

[1] AUTODESK, Guide du standard IFC pour Revit, 2018.

[2] BOUGUESSA, A., FORGUES, D., DORE, S. (2013) 'La complémentarité entre le Building Information Modeling (BIM) et le Product LifeCycle Management (PLM) en passant par le Lean Construction (LC)', pp. 1–10.

[3] DAUBA, H. Optimisation de processus de prescription et d'analyse de livrables dans un contexte de déploiement d'une méthode innovante chez SNCF Gares & Connexions, 2022.

[4] DENG, M., KAMAT, V. (2021) 'From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry'. doi: 10.36680/j.itcon.2021.005.

[5] GUESNE, M. (2018) 'Mise en place d'un processus BIM-PLM (Building Information Modeling & Product Lifecycle Management) dans une démarche de gestion de patrimoine immobilier : réflexion et premières préconisations HAL Id : dumas-01841383.

[6] KUBLER, S., BUDA, A., ROBERT, J., FRÄMLING, K., LE TRAON, Y. (2017) 'Building Lifecycle Management System for Enhanced Closed Loop Collaboration', IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (pp. 423-432). Springer, Cham.

[7] MALAGNINO, A., MANGIALARDI, G., ZAVARISE, G., CORALLO, A. (2018) 'Management to Building Lifecycle Management' HAL Id: hal-01764217.

[8] MARIN, P. (2009) 'L'usage des Systèmes d'information contribue-t-il à l'innovation collaborative ?'.

[9] MIGNARD, C. (2012) 'Modélisation, Echange et Visualisation d'Objets 3D du Bâtiment et d'Objets Urbains Géoréférencées; Application aux IFC pour la Gestion Technique de Patrimoine Immobilier et Urbain'.

[10] MOONES, E. (2017) 'Proposition d'une approche méthodologique d'interopérabilité multi-niveaux dans un environnement de PLM collaboratif'.

[11] SEGONDS, F., IRAQI-HOUSSAINI, M., ROUCOULES, L., VERON, P., AOUSSAT, A. (2010). The use of early design tools in engineering processes: a comparative case study. International Journal of Design and Innovation Research, 5(3), 61-76. doi: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00781995.

[12] SNCF Gares & Connexions. Livre Blanc BIM Edition 2019.

[13] TKM, Comparatif des outils d'autocontrôle et de contrôle de maquettes numériques, PLAN BIM 2022.

Contact principal : CAUDAL Hugo

Coordonnées : hugo.caudal@ensam.eu

LE « NUDGE » POUR INFLUENCER LES DEPLACEMENTS DANS UN POINT DE VENTE

Héloïse COLLAS[1], Benjamin FAZILLEAU[1], GARRI Célia[1], Axel RAMILLON[1], Laurence TAUPIN[1]

1Ecole de Biologie Industrielle, EBInnov, 49 avenue des Genottes, 95895 Cergy-Pontoise, France

Mots clés : Nudge, Déplacement, Point de vente, Signalisation, Incitation, Perception

1 INTRODUCTION

Enoncé en 2008 par Thaler et Sunstein, le concept du « Nudge », ou « coup de pouce », consiste à inciter un comportement sans contraindre, en exploitant les biais cognitifs [1]. On ne dénombre pas moins de 180 biais cognitifs à l'origine de prises de décisions irrationnelles [2]. Ainsi, à l'heure actuelle, il existe une multitude d'applications du Nudge.

Dans cette étude, nous avons voulu montrer comment les enseignes peuvent, à travers le Nudge, influencer nos déplacements dans les magasins. Pour cela, deux expériences sont réalisées. La première vise à rendre compte des déplacements naturels dans un magasin à l'architecture traditionnelle. La seconde expérimente l'impact d'un Nudge « imitation du code de la route » sur le déplacement spontané d'individus. Afin de s'affranchir des leviers d'achat présents en magasin, cette expérimentation est conduite dans un lieu neutre, une Ecole Supérieure. Les étudiants sont incités de façon ludique à suivre et respecter une signalétique, ce qui modifie leurs déplacements.

2 ETAT DE L'ART

Le « Nudge » est utilisé dans divers secteurs, notamment la propreté, l'écologie, les transports mais aussi le management et le marketing. Il a plusieurs types d'objectifs, par exemple il peut s'immiscer dans les parcours instinctifs des individus (salariés, promeneurs, voyageurs, consommateurs…) pour les orienter sans pour autant les contraindre ou les gêner. Les premiers adeptes de ce genre de nudge sont les gares. En effet la RATP et la SNCF cherchent à faciliter les parcours en gare, en périodes de travaux mais aussi au quotidien. On retrouve une signalétique au sol, colorée, fléchée, avec le nom de la ligne ou des picots, aiguillant les passagers durant leur changement de ligne. Déploiement en 2016 à La Défense [3], 2017 en Gare de Saint Denis [4], 2019 en Gare de Saint-Lazard [5], sur le RERC vers Austerlitz [6], mais aussi dans le métro de Lyon [7] et 2022 dans sa gare TGV [8]. Ces déploiements se multiplient au regard des résultats très concluants.

Pour fluidifier encore plus les déplacements des voyageurs, les gares n'hésitent pas à dédier certaines issues à un sens unique de circulation pour que les flux sortants et entrants ne se croisent pas. En gare de Saint-Denis par exemple, les panneaux « sens interdit » destinés à dissuader les gens de prendre les issues à contre-sens ont été remplacés par des panneaux « impasse », une incitation plus douce, plus encline d'être respectée.

De la même manière, des librairies, des hôpitaux ou encore des entreprises mettent en place des marquages au sol pour guider vers le bon rayon, le bon service ou encore la bonne poubelle… L'enseigne Ikéa utilise subtilement le même concept de nudge. En effet, les magasins de la marque sont pensés de telle sorte que le client suit un parcours fléché avec un seul sens de circulation, le faisant passer devant tous les articles du magasin tout en suscitant des achats compulsifs. Cette manipulation douce des déplacements des consommateurs est bénéfique à l'enseigne [9][10].

En nous inspirant de ces différents Nudges, nous avons cherché à tester notre propre signalétique calquée sur un mini code de la route. Nous souhaitions évaluer dans un premier temps l'impact du marquage visuel dans un lieu à forte circulation.

3 MATERIEL & METHODES

3.1. Mesure qualitative des déplacements dans un magasin

Lieu	Magasin B&M de Claye Souilly 2 700m² de surface de vente
Durée	1 mois d'observations, tous les jeudis, samedis et dimanches : 15 minutes dans la matinée, 15 minutes le midi, 15 minutes en fin d'après-midi.
Matériel	- Feuille et stylo pour annoter - Plan de la surface de vente
Echantillon	700 – 1500 clients/jour
Résultats	Mesure visuelle de la fréquentation des rayons à des jours et horaires variables Indicateur : nombre moyen estimé de personnes/rayon/jour sur la période d'observation Transcription des différentes fréquentations par des couleurs sur le plan du magasin

Figure 1 : Tableau récapitulatif des paramètres relatifs au déploiement l'expérience 1

3.2. Mesure quantitative de l'efficacité d'un nudge sur les déplacements

Lieu	Lieu Neutre : Ecole Supérieure EBI (Ecole de Biologie Industrielle), couloir le plus fréquenté (rez-de-chaussée aile droite)
Durée	Le Nudge a été laissé 3 semaines
Matériel	- Gros rouleau d'adhésif blanc (marquage au sol) - Panneaux de circulation imprimés A4 et plastifiés - Ficelle pour accrocher les panneaux au plafond - Questionnaire Form de retour d'expérience (lien mail + QR codes dans le couloir)
Echantillon	Nombre d'individus soumis au Nudge : environ 650 élèves (5 promos x130 élèves) Elèves sondés via Form : 136 (soit 21%)
Résultats	Traitement statistique sous Excel des données du questionnaire Présentation des données sous forme de diagrammes
Complément	Des observations terrain des comportements « élèves » ont également été menées, indépendamment du questionnaire : lors des temps de pause mais aussi lors de nos passages dans le couloir pour assister à des cours en salle 11 et 12. Au total nous estimons à une quinzaine de moments d'observations de 5 min en moyenne sur des heures creuses, de passage, que ce soit le matin, le midi et l'après-midi. Variables 1/ Densité du flux d'élèves dans le couloir (vide, fluide, dense, embouteillé) 2/ Adaptation des déplacements au sens de circulation (du bon côté du trottoir)

Figure 2 : Tableau récapitulatif des paramètres relatifs au déploiement l'expérience 2

Concernant le choix des panneaux, le but n'étant ni de contraindre, ni d'obliger, ni d'interdire, nous avons éliminé les panneaux « sens interdit », « stop » ou « cédez le passage » au profit d'une simple « priorité à droite » qui indique les intersections entre les sorties de salle et le couloir.

De même concernant le marquage au sol, il est en ligne discontinue et non continue, limitant quelques peu le sentiment de contrainte. Les flèches quant à elles indiquent le sens de circulation de chaque côté du couloir. Et le panneau « serrez à droite » permet d'avertir les étudiants du « sens de circulation ».

Enfin le panneau « parking » au fond du couloir avait pour but de désengorger le carrefour du fond souvent embouteillé par des élèves attendant le début de leur cours.

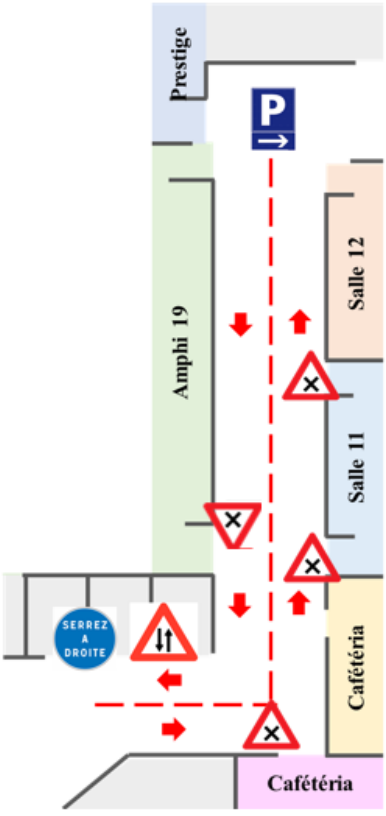
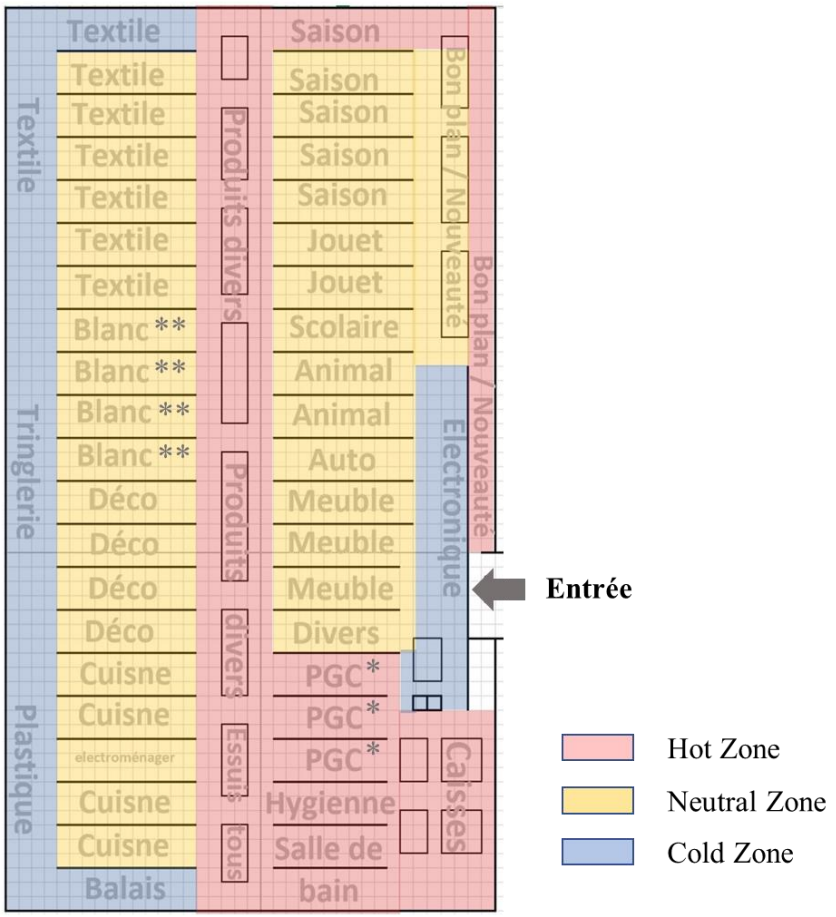


Figure 3. Schéma de l'installation du Nudge « signalisation routière » dans le couloir de l'école

4 RESULTATS

4.1. Analyse de la répartition des déplacements dans un magasin

La fréquentation dans le magasin dépend des espaces de vente. Trois zones se distinguent. Les zones chaudes sont très fréquentées, les clients y passent systématiquement (entrée, rayons « bons plans / nouveautés », allée principale ainsi que les endroits proches des caisses). Les zones neutres correspondent aux rayons, avec une fréquentation moyenne fonction des besoins des consommateurs. Et enfin, les zones froides, très peu fréquentées, regroupent les espaces où les clients ne vont presque jamais (contours du magasin, allée à côté de l'entrée).



*PGC : Produit de Grande Consommation
**Blanc : Literie, Draps, Rideaux

Figure 4 : Répartition des déplacements au sein du magasin par fréquentation des rayons

Sur le schéma on remarque que les clients s'éloignent rarement de la zone principale et restent dans des zones fréquentées. La surface de vente n'est pas exploitée à son maximum même avec des indications sur le lieu de vente (ILV) qui ont pour but d'attirer les consommateurs sur l'ensemble des rayons. Les indications étant accrochées en hauteur, il semble que peu de consommateurs les remarquent.

4.2. Analyse de l'efficacité du Nudge « imitation du code de la route »

4.2.1. Visibilité de la signalétique

Le premier point avant de mesurer si un Nudge fonctionne est de savoir si celui-ci est visible. Ici, 98% des sondés ont remarqué la signalisation routière installée dans le couloir. Le Nudge est donc bien repéré. Le marquage au sol, cité par 95% des sondés, est le mieux retenu, les lignes plus que les flèches. Les panneaux sont cités seulement par 44% des sondés, et ce, avec une mémorisation supérieure pour « priorité à droite » présent 4 fois. Par ailleurs, « serrez à droite » situé au début du couloir est mieux mémorisé que « parking », situé au fond du couloir. A noter que 26% mentionnent des panneaux non présents sur l'expérience, dû sûrement, pour certains, à une confusion avec le panneau priorité à droite.

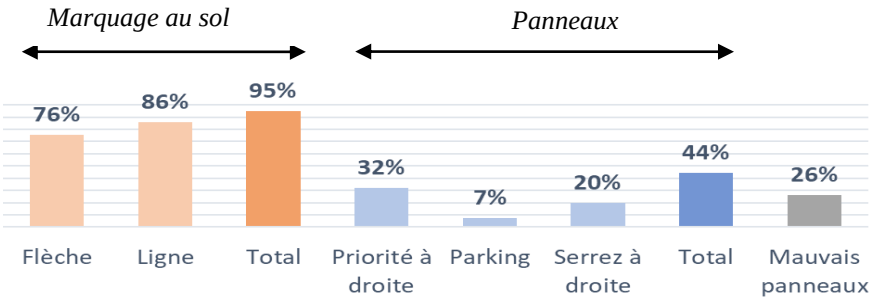


Figure 5 : Signalisation retenue et citée par les sondés

4.2.2. Réactions observées

Les élèves n'ont pas été prévenus de la mise en place du Nudge et n'ont reçu aucune explication ou consigne, cela pour ne pas biaiser leur réaction émotionnelle, leur interprétation et leur comportement. A la découverte du Nudge, 20% des sondés ont une réaction positive, 25% sont surpris ou étonnés, 11% ont une réaction neutre ou une absence de réaction, 29% sont dans l'incompréhension et enfin 15% ont une réaction négative.

3/4 des sondés déclarent avoir suivi la signalisation (Figure 6). Sur la durée de l'efficacité du Nudge, on observe 3 types de comportements : ¼ insensible dès le début, ¼ sensible jusqu'au bout, entre les deux, un groupe intermédiaire au sein duquel les fréquences et les temps de respect diffèrent (20% tiennent seulement quelques minutes, 18% 1-2 jours et 15% 1-2 semaines). Cette déperdition de l'effet du Nudge au fil du temps est révélatrice d'un phénomène de lassitude (Figure 7).

Tout le temps	1%	**77%**
Souvent	24%	
1 fois sur 2	16%	
Rarement	36%	
Jamais	23%	

Figure 6 : Récurrence d'adaptation des déplacements des élèves à la signalisation routière

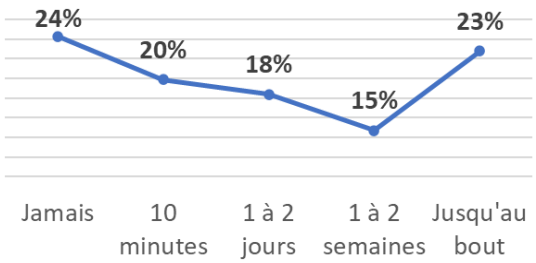


Figure 7 : Durée durant laquelle les sujets ont été réceptifs au Nudge

4.2.3. Impact/Pertinence

Nous avons analysé l'impact du Nudge pour optimiser et fluidifier la circulation dans le couloir. Parmi les sondés, 15% pensent que cela a un impact positif [a] et 26% pensent que c'est une bonne idée [b]. Ainsi, 10% ne voient pas d'impact mais valident le concept, qualifié de « ludique » mais chargé en informations. A noter, la moitié des élèves ne réussit pas à statuer sur l'intérêt du dispositif, très certainement perfectible pour améliorer son efficacité et séduire davantage.

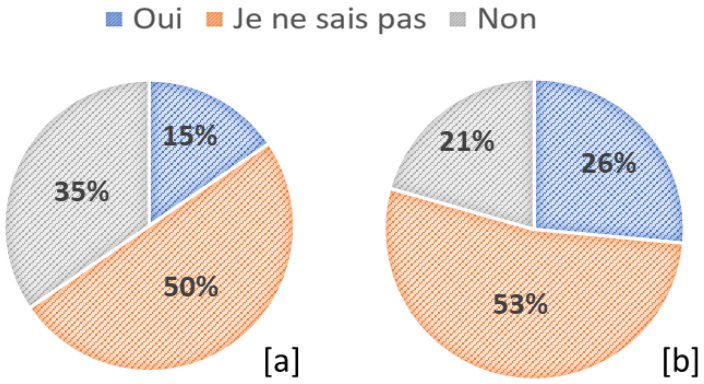


Figure 8 : Marqueurs de la pertinence de la mise en place du Nudge
[a] Jugé comme ayant eu un impact positif ; [b] Jugé comme étant une bonne idée

Les observations terrain et le sondage ont également permis de montrer que la circulation et l'adaptation spontanée au Nudge sont optimales quand le trafic est intermédiaire, ni saturé, ni nul. Enfin, le Nudge fonctionne si les gens y sont attentifs.

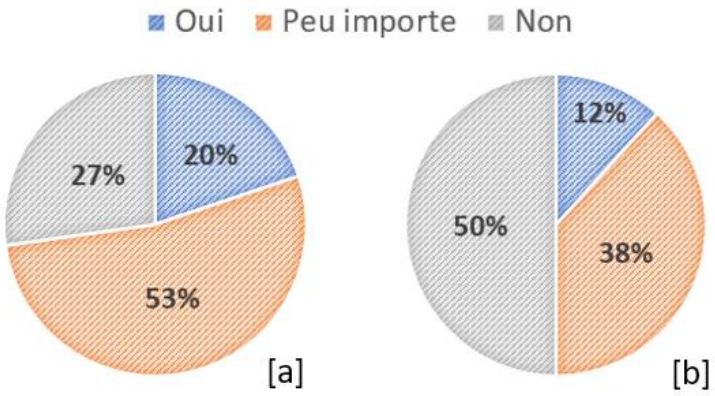


Figure 9 : Marqueurs de la pertinence de la mise en place du Nudge
[a] Favorable à la pérennisation du Nudge ; [b] Favorable à l'expansion du Nudge au reste du bâtiment

73% des sondés étaient favorables ou indifférents à la pérennisation de la signalisation [a] mais seulement 50% l'étaient à la diffusion dans l'établissement [b].

5 DISCUSSION

Il aurait pu être intéressant d'analyser les résultats en tenant compte de critères sociodémographiques mais pour cela il aurait fallu un groupe hétérogène représentatif. Au sein de notre école d'ingénieur, notre échantillon d'étude, très homogène, est forcément biaisé : jeunes adultes, 80% de filles, 5% d'étrangers. Cependant, il aurait certainement été pertinent d'identifier les étudiants détenant le permis de conduire de ceux qui ne l'avaient pas afin de recouper les comportements et pouvoir les comparer. Malheureusement c'est un attribut que nous avons omis de prendre en compte.

Quant à la transposition du nudge code de la route au sein d'un magasin, il semblerait adéquat de mettre des flèches sur le sol au niveau des artères principales afin d'inciter les consommateurs à ne pas rester en plein milieu des rayons. Il pourrait être plus judicieux encore de réorganiser la position des rayons dans le magasin pour une installation en forme de « serpent » avec moins de choix de directions et d'orientations comme c'est le cas avec l'organisation classique en « arête de poisson ». Ainsi, couplé à ce nouvel agencement, un fléchage au sol serait d'autant plus puissant et approprié. Mais concernant les panneaux testés, il est peu probable qu'ils apparaissent « ludiques » dans un environnement où il y a déjà énormément d'informations visuelles notamment marketing.

6 CONCLUSION

Les biais cognitifs exploités par le Nudge permettent d'influencer les déplacements des clients en magasin, et de réduire les zones froides. Pour une optimisation de la démarche sans perturber l'expérience client, il est conseillé d'exploiter le sol comme support d'information avec des messages simples ainsi que d'apporter des variations dans le temps pour limiter l'accoutumance.

La qualité de l'expérience client restant primordiale, la mise en place de Nudge marketing au sein d'une enseigne doit s'intégrer dans le processus d'achat sans le perturber, à l'image des pratiques d'Ikea. La disposition et l'atmosphère du magasin est faite pour mettre à l'aise, créer un cadre rassurant, libérer l'esprit en se laissant porter, créant une expérience plaisante qui peut faire penser à celle d'une visite guidée dans un musée.

6 REFERENCES

[1] « Un petit coup de pouce pour changer les comportements », Le Petit Coup de Nudge, 2020

[2] Florence Bauchard, « Le nudge, ou comment corriger les biais humains », Les Echos, 2019

[3] « Entre vous et moi #29 », Ensemble sur la ligne L, Transilien Ile de France Mobilités, 2016

[4] Florian Niget, « Gare de Saint-Denis : et si vous vous laissiez guider ? », le Parisien, 2017.

[5] « Entre vous et moi : spécial commentaires », Ensemble sur la ligne L, Transilien Ile de France Mobilités, 2019

[6] « La gare de Paris Austerlitz et les travaux d'été 2019 », Ensemble sur le RER C, Transilien Ile de France Mobilités, 2019

[7] Olivia Vansoen et Lucie Rivière, « Le SYTRAL expérimente le nudge à la station Part-Dieu », Communiqué de Presse, 2019

[8] « Un nudge pour améliorer l'expérience voyageurs à Perrache », SYTRAL Mobilité, 2022

[9] Jean-François Herbecq, *Ikea : le labyrinthe qui fait acheter*, rtbf economie, 2011

[10] P. Singh et al., « *Key Determinants of International Retail Success: A Case of IKEA Retail* », Int. J. Tour. Hosp. Asia Pasific IJTHAP, vol. 4, no 1, Art. no 1, 2021

Contact principal : Delphine HERMOUET

Coordonnées : d.hermouet@hubebi.com

PROJECT SELECTION BY APPLYING THE AHP AND AHP WITH PIVOT METHODS

Antoine Dauvergne[1], Egon Ostrosi[2]
[1] Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France
[2] ERCOS/ELLIADD EA4661, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France

Abstract: This paper proposes applying the AHP (Analytic Hierarchy Process) and the AHP with Gaussian Pivoting to assess alternative projects and help the decision-maker to select the best one by using team criteria. This application is conducted to illustrate the utilization of the AHP and the AHP with Gaussian Pivoting. Additionally, it is shown that AHP with Gaussian Pivoting has some benefits, such as a decrease in the number of required comparisons. It also facilitates the construction of consistent or near consistent matrices.

Keywords: Project Selection, Multicriteria Decision Making, Analytic Hierarchy Process (AHP), Gaussian Pivoting

1. INTRODUCTION

A proposal is the starting point for any project, but not every proposal can or should become a successful project. A feasible project must use wisely the given resources (human, financial, equipment) within a limited time. The purpose of the project selection process is to assess project feasibility based on predetermined criteria while using a set of structured processes. As a result, project selection is a multi-criteria decision problem.

The analytic hierarchy method (AHP), developed by Saaty at the end of 1970s, is a multicriteria decision making method that has been widely used in solving many decision-making problems. This paper proposes to use the AHP method and AHP with Gaussian Pivots for project selection in engineering design for the following reasons:

1. The AHP logic is simple, natural to our intuition and general thinking, and easily understandable.
2. The AHP with Gaussian Pivots is rational with straightforward computation process.

The paper presents the structure of the project selection problem with these two methods in a real case study. Nine different and open project proposals have been given to a team of engineering design students. The team should obtain a final ranking of projects and should select the best project based on its own criteria.

2. ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

AHP is a successive pairwise comparison process between each criterion and each alternative. The process allows for judgments on both intangible qualitative criteria and tangible quantitative criteria.

The application of AHP method in project selection is based on two principles: first, comparative judgment of the alternatives and the criteria; and second, synthesis of the priorities.

Firstly, the team has defined its own subjective criteria. This means that the team has judged which criteria is the best to be considered according to its common sense. The criteria are pairwise compared for relative importance and the project proposals are pairwise compared against each of the criteria for preference.

Then a final ranking of projects is obtained by using the relative importance of each criterion and relative preference for each project proposal. Figure xxx shows the results of the application of AHP.

Now, in this article, we will present you our criteria for the selection of process. Firstly, the selection has been made following student thinking and timing. In reality, and we already know it, some of our criteria won't be inside companies AHP process. Indeed, as students, we had multiple projects to do in parallel of this one. It's for that we can find some surprise inside our criteria. However, it didn't have a real impact on the methodology which is based on noting them.

Criteria
Link with our personal passion
Time to spend on it/ easy to make
Interest for environment
Originality
Subject waiting
Project Utility

Figure 1: Criteria Selection from our project selection

As we can see on the top, criteria aren't really those that we are finding in companies like time to spend on it or Subject waiting. Following this thinking, we evaluated all those criteria from what we thought it as the easiest one to apply and the most important in our mind.

We obtained those results after long talking between each member:

	Link with our personal passion	Time to spend on it/ easy to make	Interest for environment	Originality	Waiting of the subject	Project Utility
Link with our personal passion	1,00	0,25	3,00	2,00	0,20	2,00
Time to spend on it/ easy to make	4,00	1,00	7,00	6,00	0,50	6,00
Interest for environment	0,33	0,14	1,00	0,50	0,13	1,00
Originality	0,50	0,17	2,00	1,00	0,14	1,00
Waiting of the subject	5,00	2,00	8,00	7,00	1,00	7,00
Project Utility	0,50	0,17	1,00	1,00	0,14	1,00
Sum	**11,33**	**3,73**	**22,00**	**17,50**	**2,11**	**18,00**

Figure 2: Criteria impact from our project selection

This table is important because it sums all criteria and note them in function of what are their values. Then we can do another table to evaluate the importance criteria percentage.

Then after it, we had the table following with their evaluation based when we do a sum of criteria, we had the result of 1.

	Link with our personal passion	Time to spend on it/ easy to make	Interest for environment	Originality	Waiting of the subject	Project Utility	Medium wlue
Link with our personal passion	0,09	0,07	0,14	0,11	0,09	0,11	**0,10**
Time to spend on it/ easy to make	0,35	0,27	0,32	0,34	0,24	0,33	**0,31**
Interest for environment	0,03	0,04	0,05	0,03	0,06	0,06	**0,04**
Originality	0,04	0,04	0,09	0,06	0,07	0,06	**0,06**
Waiting of the subject	0,44	0,54	0,36	0,40	0,47	0,39	**0,43**
Project Utility	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06	**0,05**
Sum	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**

Figure 3: Criteria normalized from our project selection

This table is important. In fact, he shows us the weight of every criterion. As we can see on our project selection, the waiting of the subject has the highest value. If the project has a low value on this criterion, it has high chances to be selected.

Before looking on our result, we can see a bit what the people of the group wanted to work on it as project during the semester. One of them was more interested on an ocean robot cleaner (project 6). Other one was in favour of a juice maker (project 4). Personally, I wanted to do project 1 which was on an ecological bike with a lot of storage which would be used in African countries. At the end of it, it may be not one of the three wanted that will be selected.

Now, as the original AHP method is used by our own thinking, we will have no real logics between different values in our criteria.

This is for example the result for our leading criteria:

	subjects	1	2	3	4	5	6	7	8	9
The waiting of the subject	1	1,00	0,33	0,50	0,50	3,00	0,50	6,00	2,00	2,00
	2	3,00	1,00	2,00	1,67	6,00	2,50	8,00	5,67	4,67
	3	2,00	0,61	1,00	0,83	5,00	1,50	7,33	4,67	3,33
	4	2,00	0,78	1,33	1,00	5,33	1,83	7,33	5,00	4,00
	5	0,33	0,21	0,26	0,26	1,00	0,46	5,00	0,83	0,78
	6	2,00	0,90	1,11	0,94	4,00	1,00	6,67	3,83	3,11
	7	0,17	0,14	0,18	0,18	0,43	0,40	1,00	0,32	0,26
	8	0,50	1,12	1,20	1,20	1,33	0,79	4,33	1,00	0,67
	9	0,50	0,26	0,50	0,49	1,67	1,15	4,67	1,67	1,00
	Sum	11,50	5,35	8,09	7,07	27,76	10,13	50,33	24,99	19,82

Figure 4: Project impact on one criterion from our project selection

Logically, we need to readjust them and normalized them for having a 1 as sum result. As a surprise, the 2nd subject is the best one on this criterion. After doing that on our six criteria, we have reunited all our result on a single table and did the sum of every criteria value for each subject. We finally normalised this table and obtained the result:

Weight	Criteria	Subject N°								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,10	Link with our personal passion	0,17	0,09	0,21	0,13	0,02	0,16	0,06	0,06	0,10
0,31	Time to spend on it/ easy to make	0,27	0,14	0,10	0,17	0,03	0,07	0,10	0,08	0,04
0,04	Interest for environment	0,06	0,17	0,06	0,03	0,03	0,29	0,20	0,09	0,07
0,06	Originality	0,09	0,07	0,12	0,09	0,16	0,04	0,09	0,07	0,27
0,43	Waiting of the subject	0,10	0,22	0,15	0,17	0,04	0,14	0,02	0,09	0,07
0,05	Project Utility	0,06	0,20	0,11	0,08	0,05	0,21	0,18	0,08	0,04
	Results	**0,15**	**0,17**	**0,13**	**0,15**	**0,04**	**0,13**	**0,07**	**0,08**	**0,07**

Figure 5: Criteria impact from our project selection

The 2nd subject talked about Chlorine dispenser for a rural community in Peru. This subject was liked by everybody inside the group, but it wasn't the main favourite. As we can see upper, we have nearly all subject with the same amount, that is caused by the number of project but also the fact that they were nearly all interesting.

3. ANALYTIC HIERARCHY PROCESS WITH GAUSSIAN PIVOTS

A major limitation of the Analytic Hierarchy Process (AHP) is the redundant pairwise comparison for entering judgements among defined project proposals or criteria. For each local priority vector, $1 + 2 + \cdots (n-2) + (n-1)$ comparisons are required (where n is the dimension of the matrix). Thus, the total number of comparisons is:

$s_{n-1} = \frac{n-1}{2}(1 + n - 1) = \frac{n^2-n}{2}$

The number of comparisons placed upon the decision maker, become excessive as the number of criteria and alternatives increase.

Using the Gaussian Pivot only the first $(n-1)$ comparisons are necessary. It means that $1 + 2 + \cdots (n-2)$ of the classical AHP are redundant.

1	2	3
0.5	1	4
0.33	0.25	1

Figure 6: Pivoting gauss explanation

The Gaussian Pivot is very useful in the AHP method. In fact, instead of noting every subject, we just needed to apply it on one column and then just complete with the logic of Gauss. When you have a lot of criteria and subject, this method will earn us an incredible amount of time. After it, I will show you some examples of this method:

Interest for the environment	Subjects	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	1,00	0,33	1,00	3,00	3,00	0,17	0,20	0,50	2,00
	2	3,00	1,00	3,00	9,00	9,00	2,00	0,60	1,50	6,00
	3	1,00	0,33	1,00	3,00	3,00	0,17	0,20	0,50	2,00
	4	0,33	0,11	0,33	1,00	1,00	0,06	0,07	0,17	0,67
	5	0,33	0,11	0,33	1,00	1,00	0,06	0,07	0,17	0,67
	6	6,00	0,50	6,00	18,00	18,00	1,00	1,20	3,00	10,00
	7	5,00	1,67	5,00	15,00	15,00	0,83	1,00	0,67	1,33
	8	2,00	0,67	2,00	6,00	6,00	0,33	0,17	1,00	4,00
	9	0,50	0,17	0,50	1,50	1,50	0,07	0,10	0,25	1,00
	Sum	19,17	4,89	19,17	57,50	57,50	4,68	3,60	7,75	27,67

Figure 7: Gaussian Pivot subjects' impact on one criterion from our project selection

In this table, we judge all subject in function of the first subject. Then the first column has been completed, we just need to complete the table following our 1st column. So, for example, let's take the example of the subject 4 and 5. They have the same value of comparison in function of subject 1. Logically, if we follow the Gaussian Pivot, their line and column should be identical. In this table, it's the case. Thus, it respects the Gaussian Pivot.

The Gaussian Pivot can also be used to establish the weight of every criterion. In fact, the method has been applied along our project and gave that weight type:

	Personal passions link	Time to consecrate/ feasibility	Interest for environment	Originality	Subject waiting	Project utility
Personal passions link	1,00	0,25	3,00	2,00	0,20	2,00
Time to consecrate/ feasibility	4,00	1,00	7,00	6,00	0,50	6,00
Interest for environment	0,33	0,14	1,00	0,50	0,13	1,00
Originality	0,50	0,17	2,00	1,00	0,14	1,00
Subject waiting	5,00	2,00	8,00	7,00	1,00	7,00
Project utility	0,50	0,17	1,00	1,00	0,14	1,00
Sum	**11,33**	**3,73**	**22,00**	**17,50**	**2,11**	**18,00**

Figure 8: Criteria impact from our project selection

Same idea here, as we can see, Originality and Project utility have the same value in the comparison with Personal passions link. We have the same line and column by using the Gaussian Pivot. It leads so to less judgement and uses a more objective point of view.

Following that, we can see our result about project selection with the Gaussian Pivot.

Weight	Criteria	Subject N°								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,10	Personal passions link	0,18	0,05	0,18	0,18	0,02	0,10	0,09	0,10	0,10
0,31	Time to consecrate/ feasibility	0,28	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
0,04	Interest for environment	0,06	0,20	0,06	0,02	0,02	0,29	0,22	0,10	0,03
0,06	Originality	0,09	0,26	0,18	0,17	0,03	0,18	0,01	0,04	0,04
0,43	Subject waiting	0,09	0,26	0,18	0,17	0,03	0,18	0,01	0,04	0,04
0,05	Project utility	0,05	0,21	0,11	0,05	0,03	0,21	0,21	0,11	0,03
	Results	**0,15**	**0,18**	**0,13**	**0,12**	**0,04**	**0,14**	**0,06**	**0,06**	**0,06**

Figure 9: Gaussian Pivot Project selection

As we can see, we obtained the same project subject winner. It's not really a surprise in fact values used in the subjective part were nearly identic as the one used for the Gaussian Pivot method. So, we decided to do the subject 2 as the method lead us on it.

Now we will compare the two methods and their consequences.

4. COMPARISON OF AHP AND AHP WITH GAUSSIAN PIVOTS

The redundant pairwise comparison for entering judgments among defined project proposals or criteria is a significant limitation of the Analytic Hierarchy Process (AHP).

This method was the fastest one as we only had to evaluate all project proposals following a datum or referencing subject. Indeed, we just had to apply the Gaussian Pivoting on our project proposals comparison. It gives more objectivity in our thinking.

Otherwise, the Gaussian Pivot method have some drawbacks. In fact, if we need to select between different projects and two of them has been given the same value in function of our datum project, we can't put one of those two projects in front of the other. Another method drawback is the lack of subjectivity by using it. What does it mean? It means that it isn't based on our own judgement but mathematically.

However, it can be considered as a quality and even more as an advantage. Indeed, when we are in groups, some people can have a lack of objectivity and lead to their own wanted project. In other part, the biggest advantage of this method is the time saving. We don't need to judge all subjects in function of them.

Finally, this method is very useful in groups project because it reduces the speaking time between members, and we win a lot of time. In comparison, the Gaussian Pivot method took us 1 hour for doing it when the judgement method took us more than 3 hours.

5. CONCLUSIONS

Although AHP is applied successfully, it has presented certain problems. The large number of pairwise comparisons required may discourage considering many project proposals. Our experience has shown that the AHP is more adaptable to individuals than the group. On the other hand, the AHP with Gaussian Pivots decreases the number of required comparisons and facilitates the construction of consistent or near consistent matrices. It permits the pursuit of the best project in a simple mathematical form. Finally, if we don't have a lot of time, using the Gaussian Pivot method is by far the best one comparing it to the subjective one.

Contact principal : Antoine Dauvergne

Coordonnées : antoine.dauvergne@utbm.fr

A PROPOSAL OF C-K & TRIZ SYMBIOSIS AS A LEVER FOR PRODUCT INNOVATION

Guillaume DE CASANOVE[1], Claude GAZO[1], Raymond HALLOT[2], Thomas DELAPLACE[2], Frédéric SEGONDS[1]

[1] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI – Arts et Métiers Institute of Technology – HESAM University – 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris France
[2] SAIPEM S.A – 7 Avenue de San Fernando, 78180 Montigny-le-Bretonneux France

Abstract: The TRIZ is a very effective theory in the resolution of technical problems but can in different situations suffer from a lack of state-of-the-art and of technical development of created ideas. The C-K theory on the other hand is a very cognitive and knowledge-based theory but may be ledge on the technical development. This article will present a method that try to hybridize the two theories to exploit the best of both and to create a symbiosis allowing the knowledge and technical development to be the major points of the new method.

Key words: TRIZ, C-K theory, design methodology, innovative design, R&D

1. INTRODUCTION

The French R&D team at Saipem, an international group specialized in the offshore and onshore energy sector, was used to brainstorming and other simple methodologies for generating ideas and solutions to technical problems. However, for the past ten years the team has been faced with the TRIZ on several projects of ideation and search for solutions, in different contexts and applications (treatment of fluids, installation problems, design of parts or systems, etc.). The team have now an opinion on the theory and therefore benefits from a certain experience on the subject (about ten studies). The applications of the TRIZ have so far been made in two different ways: in a *pure* way, only from the TRIZ theory or in a *hybrid* way by creativity tools. Moreover, although experimented more recently in the company, a few studies on quite different subjects have been carried out with the C-K theory.

The main issues encountered using the TRIZ is the lack of state-of-the-art on the study subject by the participants and the absence of technical development of emitted ideas at the end of the study. The objective of this article is to develop and experiment a new methodology combining the TRIZ and C-K theory to support knowledge structuring and ideas development in the TRIZ.

2. STATE-OF-THE-ART

2.1. The two theories

To understand how to combine the TRIZ with the C-K theory, we first need to know how the two theories work. The TRIZ is a Russian theory helping conception of innovative solutions mostly in technical fields. It uses selected methodological tools (innovation and resolution principles, resolution standards) and proposes generic solutions models [1] thanks to the analysis of millions of patents [2]. Along with the tools, the TRIZ possesses "red wire" notions such as the evolution laws, describing the invariants' evolution of a system through time, the physical and technical contradictions, and the ideality as the main ones [3].

Saipem Classification - General Use

The C-K theory is a French theory proposing a scheme of idea development separated between two spaces: the C as Concept and the K as Knowledge. The two spaces are developed throughout the study with the use of expansion tools. The concept space is filled with ideas that exist, are wanted or to be developed and the knowledge one is filled with general or linked to concept knowledge. It is a way more cognitive and based on knowledge theory than other conception theory [5]. The theory can be applied through three extensions [6]:

- The **KCP** method consists of 3 phases: K, C and P. Phase K is the knowledge sharing phase. A group of experts and non-experts will share their knowledge on the subject to be treated and thus reach a common level of knowledge. We can consider this step as a "state-of-the-art" which shows the current weaknesses of the system, the new technologies identified, counter-intuitive cases. Phase C brings together all the participants of the C-K study and consists of creativity sessions in order to propose innovative concepts. Phase P brings together the innovative solutions of phase C to determine what will be the continuation of the development program for the selected concepts. It is the most common use of the C-K theory.

- The **C-K Invent** method is used to design new patents. This method makes it possible to develop patents without immediately developing the technology associated with it. The method is based on the study of patentability criteria: novelty and inventiveness and on the expansion of the space of knowledge by adding or linking effects or actions that are not present in the state of the original art.

- The **C-K Referential** method is based on C-K reasoning. The first step is the contribution of all available knowledge on the subject. This makes it possible to create trees in C and thus by passing from C to K, we embellish the two environments. The second step is to shape the tree so that the most original branches are on the right. Finally, experts are asked if any routes already known have been overlooked.

Unfortunately, the TRIZ is not exempt of limits and difficulties. In the upstream phase: state-of-the-art is not mandatory to apply the TRIZ, which may lead to lack of structured knowledge and challenges to define the ideality [4]. In the downstream phase: the outputs of the TRIZ are raw ideas to be further developed. It may be challenging to evaluate these ideas to select some for further work.

2.2. The hybridizations in the literature

Over the years, the TRIZ has been hybridized with many theories, methods, and creativity tools to compensate its or other tools' limits [7].

There are currently three types of combination [1]:

- The chaining, different methods are applied one after the other with a passage through the TRIZ. This makes it possible to cover the entire design process in a very thorough way and by making the most of each method. However, this requires very precise knowledge of the other methods applied as well as knowing how to chain them without problem.

- The support, we apply the TRIZ as a "common thread" and we add elements of other methods to it.

- The integration, the TRIZ is used as a component of an existing method. Some TRIZ steps or tools are applied in another design method when appropriate.

These three forms of hybridization are used in a large number of articles. This overcomes the limitations of TRIZ in some cases but also the limitations of other methods in others. If we take a look at the current state of hybridizations, we can be interested in 6 different hybridizations using the TRIZ and others design methods/theories that can inspire the way of how to hybridize the TRIZ with C-K.

Saipem Classification - General Use

2.2.1. TRIZ/C-K

The TRIZ has already been studied with the C-K theory before. These two theories are compatible and even seem to take full advantage of each other when the two are combined [8]. Indeed, the TRIZ can be used to develop the C-space thanks to its contradictions [5]. It also can be used to develop families of C-K concepts a study also done at Saipem [9].

2.2.2. TRIZ/Design Thinking

The TRIZ has also been hybridized with Design Thinking. This hybridization is made for three reasons. The first, add a user-centric and needs-oriented part to the TRIZ in order to better define the problem. The second, make the TRIZ lighter and easier to access without losing all its advantages. And finally, the use of rapid prototyping to make less obvious ideas more concrete [10].

2.2.3. TRIZ/Systematic Design by Pahl & Beitz

We find in the hybridized methods the fusion between the systematic design and the TRIZ. The TRIZ is used here as a theory to be applied in the systematic design. With the TRIZ we will be able to look for the contradictions of the system and synthesize everything in order to gain in efficiency [11]. The use of TRIZ with the systematic approach can also allow a better description of the analysis of the system with the notions of sub and super system. In addition, it can allow an improvement in the study of the safety of the system with the 40 inventive principles and the principles of separation [12].

2.2.4. TRIZ/Functional needs analysis

Functional analysis is very close to the TRIZ, and the two methods blend very well in the upstream phases of a project. Indeed, there are similarities in both descriptions of the main functions. We also find the connection between the stages of validation of the need and the multi-screen approach or the relation between the “Octopus” and the law of integrity of the parties. We are therefore in a hybridization in the upstream phases of TRIZ [1].

2.2.5. TRIZ/Bio-inspiration

TRIZ can be associated with bio-inspiration in order to integrate it into the process of creating a technical system. Indeed, with the use of its tools such as the law of integrity of the parts, one can then describe a living organism in technical characteristics, understand it and thus transpose to the industrial world a natural and organic solution [13][14].

2.2.6. TRIZ/Blue Ocean

The combination of TRIZ and BOS (Blue Ocean Strategy) has interesting potential in terms of innovation. Indeed, the combination between the study of market issues and the technical resolution of these can achieve new innovative solutions. Both methods fill their limits, the TRIZ does not have the ability to look at the market for new concepts and the BOS cannot precisely develop a concept [15].

2.2.7. C-K hybridizations

The TRIZ is not the only theory that tends to be hybridized. The C-K is also a good ground for hybridization because of its flexibility and simplicity. This is very well shown in its hybridization with the CANVAS business model [16]

2.3. Synthesis

The TRIZ and the C-K theory are quite different in their form and in their application to innovate. The TRIZ is more technical and friendly to a precise development and the C-K is more fluid and disposed to a huge knowledge development. The differences do not mean that they cannot be hybridized together as shown in the previous examples. The C-K appears to be even the best choice for the company problem. Moreover, all these combinations show the fertility of the TRIZ in being able to be hybridized in different forms.

3. RESEARCH OBJECTIVES

The objective of the research is to present a way to associate the TRIZ to the C-K theory in order to imagine a functional answer to a technical problem. To prove that the method is effective it has to confirm three hypotheses:

- The upstream phase will be expanded by the method, with more knowledge, to find solutions more suited to the problem, getting as close as possible to the Ideal Final Result (IFR)

- The hybridization of the TRIZ will make it possible to obtain more developed models of solutions in their realization and in terms of knowledge

- The contribution of knowledge in the process will reduce the decision time during the evaluation of ideas as well as allow a more serene and documented discussion.

This article will respond to the first hypothesis.

4. METHODOLOGY

4.1. Methodology proposition

Both TRIZ and C-K theory are quite time-consuming, so hybridization can be very time-consuming and tedious depending on how it is done. I will present here four different hybridizations which can be used individually but can also be combined with each other:

- The first one (Figure 1) is an implementation of TRIZ stages in the development of C-K trees. Indeed, if you place yourself at the time of the construction of the C space by opposition of the attributes, you can consider the notion of the contradictions of the TRIZ. During the development of the tree, when a branch splits into two, with the use of contradictions and their resolution principles, it could split into three. This third opportunity would be the realization of the other two attributes at the same time using the 40 principles of innovation for the resolution of technical contradictions. It provides additional knowledge in the K space necessary for the expansion of the C space. It is similar to the method in [5].

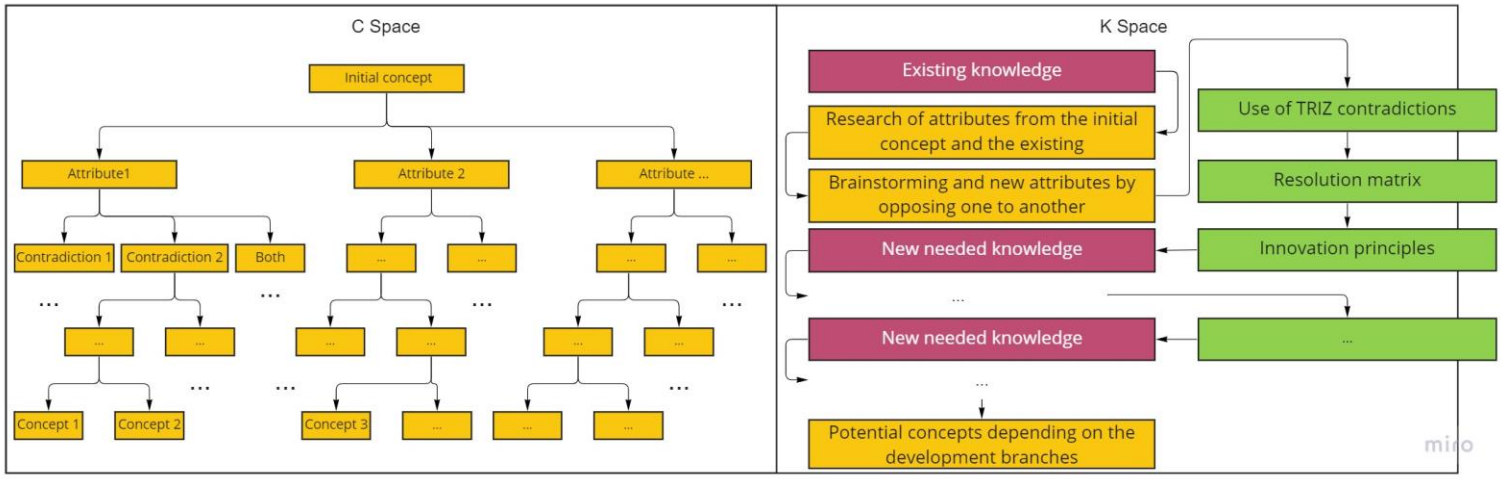


Figure 1. TRIZ contradictions inside C-K

- The second option (Figure 2) is to execute a TRIZ after a C-K process. At the end of a C-K study you can have different ideas with identified challenges to transform them into concepts. Indeed, during a C-K study we always end up with concepts where the participants feel more feverish at the idea of its realization, for lack of knowledge on the subject. Applying a TRIZ could help to remove uncertainties and develop the concept branch in the C-K tree.

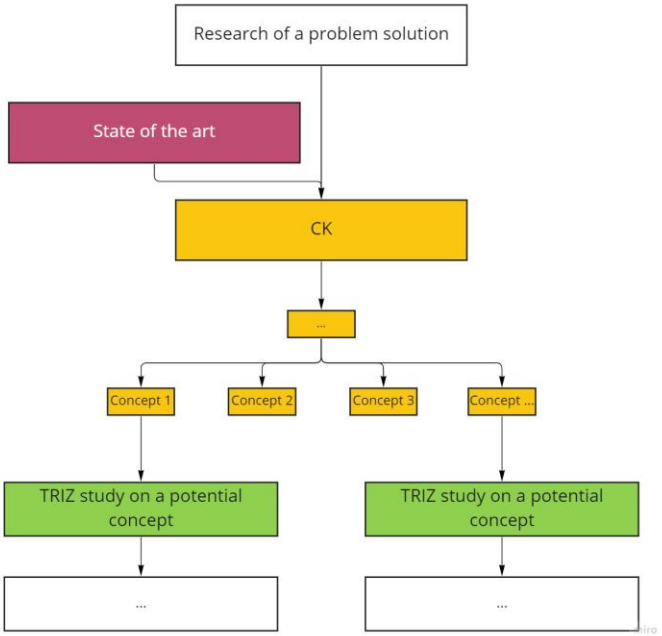


Figure 2. TRIZ after selection of a C-K concept

- The third option (Figure 3) is a metric to ideality. In this one, both TRIZ and C-K starts at the same time. The TRIZ is developed until the IFR. This result will then show which branch of the C-K is closer to ideality than others, and consequently be the more relevant to develop.

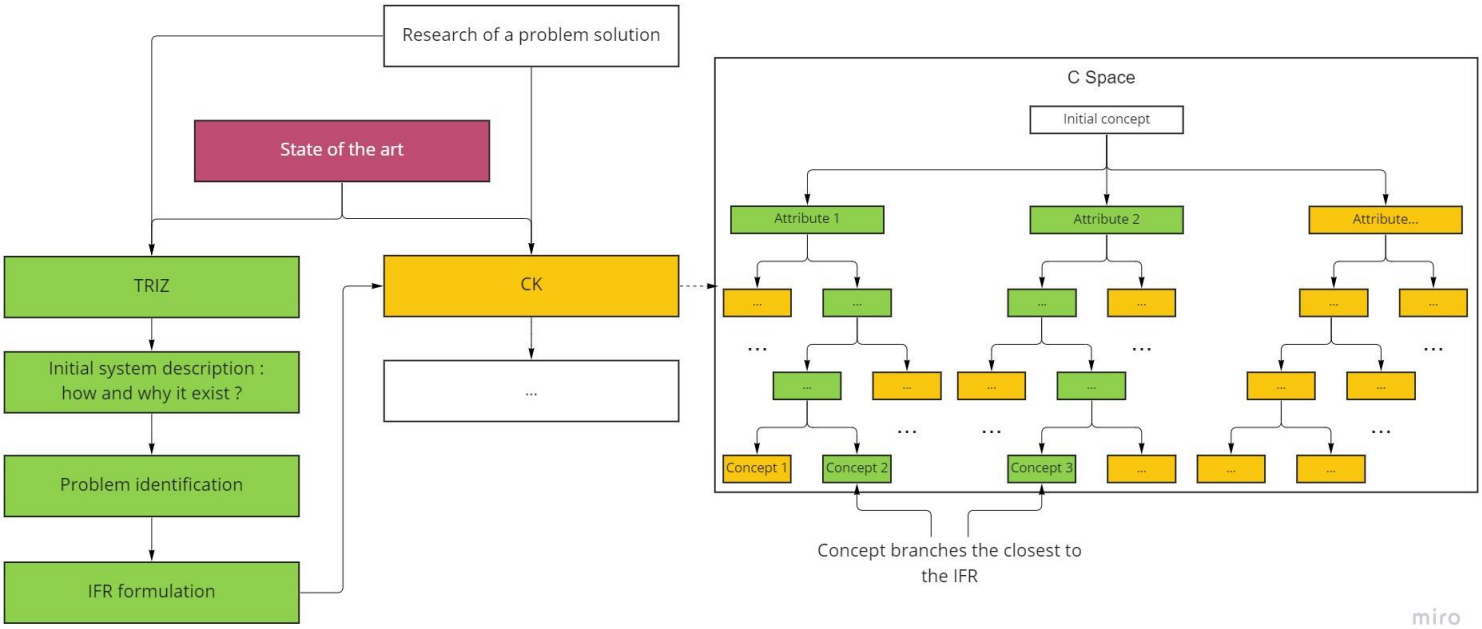


Figure 3. IFR metric

- Finally, the last method is a symbiosis between C-K and TRIZ by going back and forth between the two theories (Figure 4). The C-K theory is used in its the referential form, as a reference of concepts and knowledge and doing so serves as a knowledge data base The C-K would be

fed first by the state-of-the-art and then at the end of each TRIZ session by the knowledge and concepts provided. It keeps track to all the concepts developed during the TRIZ and provides knowledge when necessary. The organization of the method would be done by two teams, one of reference in charge of the C-K and working in back-office and the other to carry out the TRIZ study in the C-K team supervision.

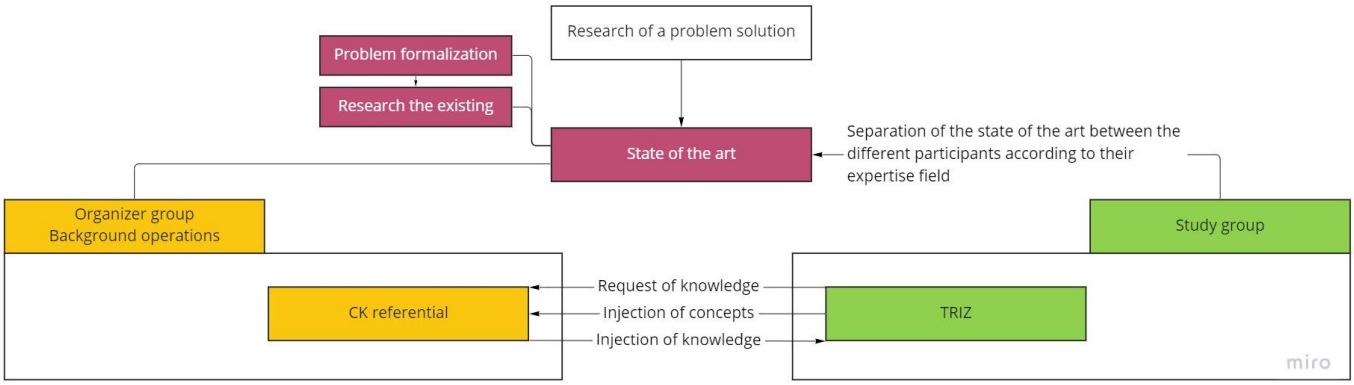


Figure 4. C-K and TRIZ symbiosis macro description

4.2. Selected methodology

The symbiosis option was selected considering the limitations faced by the R&D team with the TRIZ, to allow for knowledge structuring specifically for the problem to be solved. The hybridized process is built around two main work types:

- the project team performs the C-K part of the process in back-office. They drive the state-of-the-art, build the C-K tree, identify the relevant knowledge areas. This team also drives the interaction between the C-K and the TRIZ processes, to structure knowledge and concepts.

- additional experts/creative people are added to build the TRIZ team, which focuses on the problem-solving process and on the ideas' evaluation.

The C-K method is initiated first. Thanks to the state-of-the-art, the concept tree is developed, and existing knowledge is structured. Then multiple back and forth between both theories start (Figure 5). There are different kind of information exchanged:

- The request for knowledge of the TRIZ to the C-K: It allows to introduce the subject to the TRIZ team, in order to better identify the problem and to formulate it correctly, it is necessary to have a good knowledge of the existing situation and of the phenomena related to the problem. The TRIZ will therefore ask the C-K for knowledge of the state-of-the-art formatted in its tree to be able to position itself towards the problem, the referential C-K tree also facilitates the search of the IFR

- The contribution of concept by the TRIZ: Once the contradictions have been identified and solved through TRIZ, new concepts are generated in form of idea sheets during the TRIZ workshop. These concepts are translated in attributes in the concepts tree and so are a source of new knowledge and a way to expand the C space by adding non-existent concepts.

- C-K knowledge contribution: Finally, in connection with the previous point, the consolidation of the C-K tree should allow to identify missing knowledge for ideas' evaluation, but also to identify some underdeveloped branches and generate new ideas. Thus, the strength of this exchange is to revitalize the search for new ideas by providing knowledge that had been forgotten until then. This also allows you to venture into unusual and therefore undeveloped terrain.

In addition to these three main exchanges, there are also two others concerning specific TRIZ tools: the RIF and the contradictions.

- The purpose of the IFR is to state the ideal towards which the system must tend, but it can also question the existing and the state-of-the-art in search of new knowledge necessary to obtain concepts.

- C-K oppositions can be sources of contradictions in a TRIZ way. Thus, by considering them as they are, we can manage to find additional contradictions.

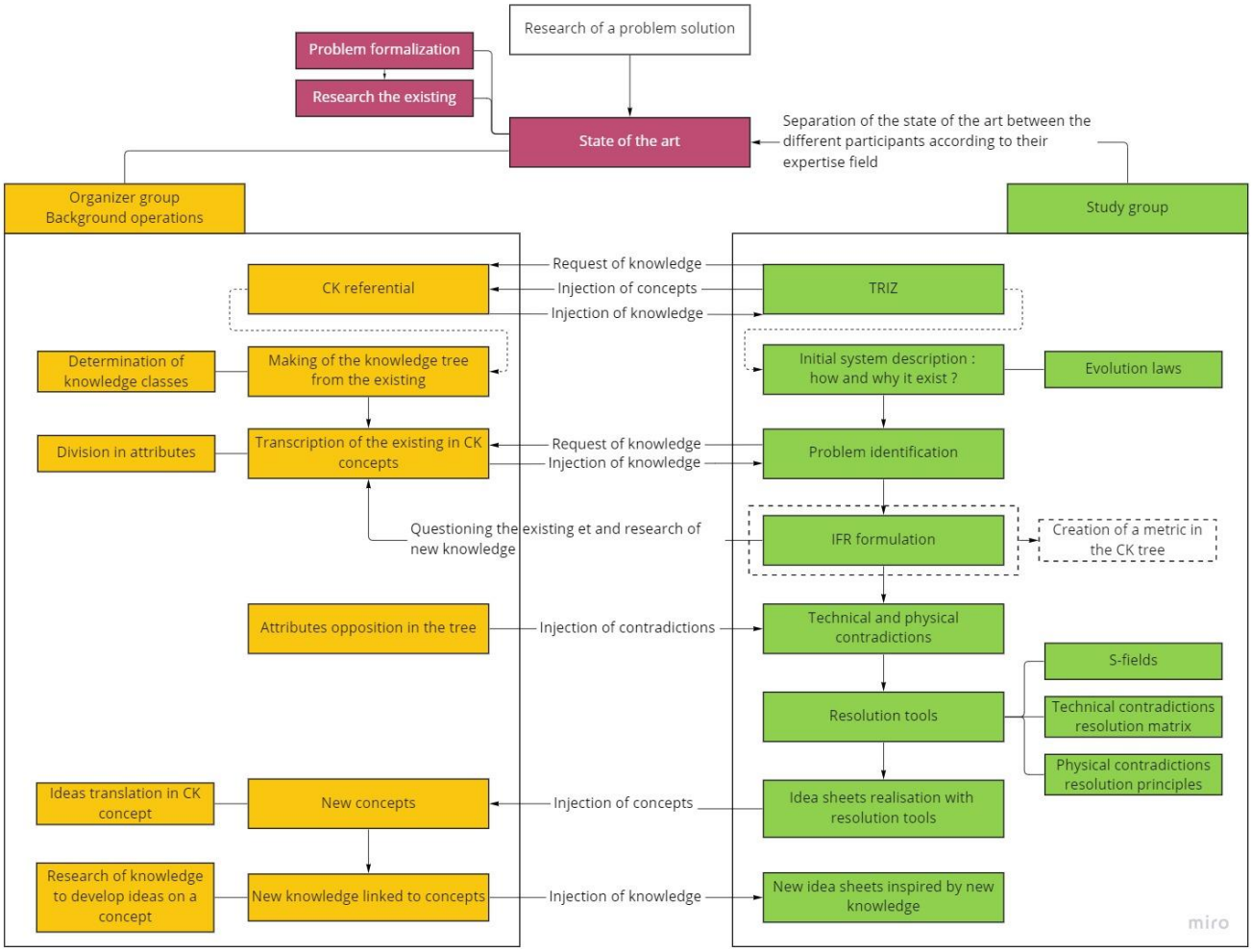


Figure 5. C-K-and TRIZ symbiosis micro description

5. EXPERIMENT

This method will be tested on two subjects: an analysis on a past ideation topic to consolidate the methodology which will be presented in this article and a full application of the method on an energy recovery problem in a future study.

This past TRIZ study took place over three days in a row followed by two sessions spaced several months apart for the review and evaluation of the idea sheets. The problem posed during the study was how to unclog a system from the sand inside. The whole study took place without state-of-the-art as well as with the consideration of a prohibition in the solutions: no active system, which also risks clogging. The result is the creation of 67 idea sheets solving the problem, however none was retained by the hierarchy, for lack of sufficient development of the ideas.

6. RESULTS

6.1. Method contribution

In the past study, the TRIZ-C-K symbiosis would have allowed a better understanding of the existing solutions and why some of them were not relevant thanks to the structured state-of-the-art. Knowledge sharing would have been more efficient. In addition, this would have made it possible to question the prohibition and to dissect it to determine the why and therefore seek to resolve it not to limit oneself in the search for a solution. The symbiosis also would have made it possible to simplify post-processing and the development of concepts in a systematic way by their translation into the tree and thus develop knowledge around each idea or even branch of the tree. It would also have allowed ideas to be evaluated more effectively, as the tree provides participants with the necessary knowledge to be able to judge a concept. Finally, the symbiosis would have best enhanced the presence of people during the TRIZ study. It would have made it possible to reduce the periods of discussion and judgment of ideas without factual knowledge and also would have involved more the participants in the study.

6.2. Method improvement

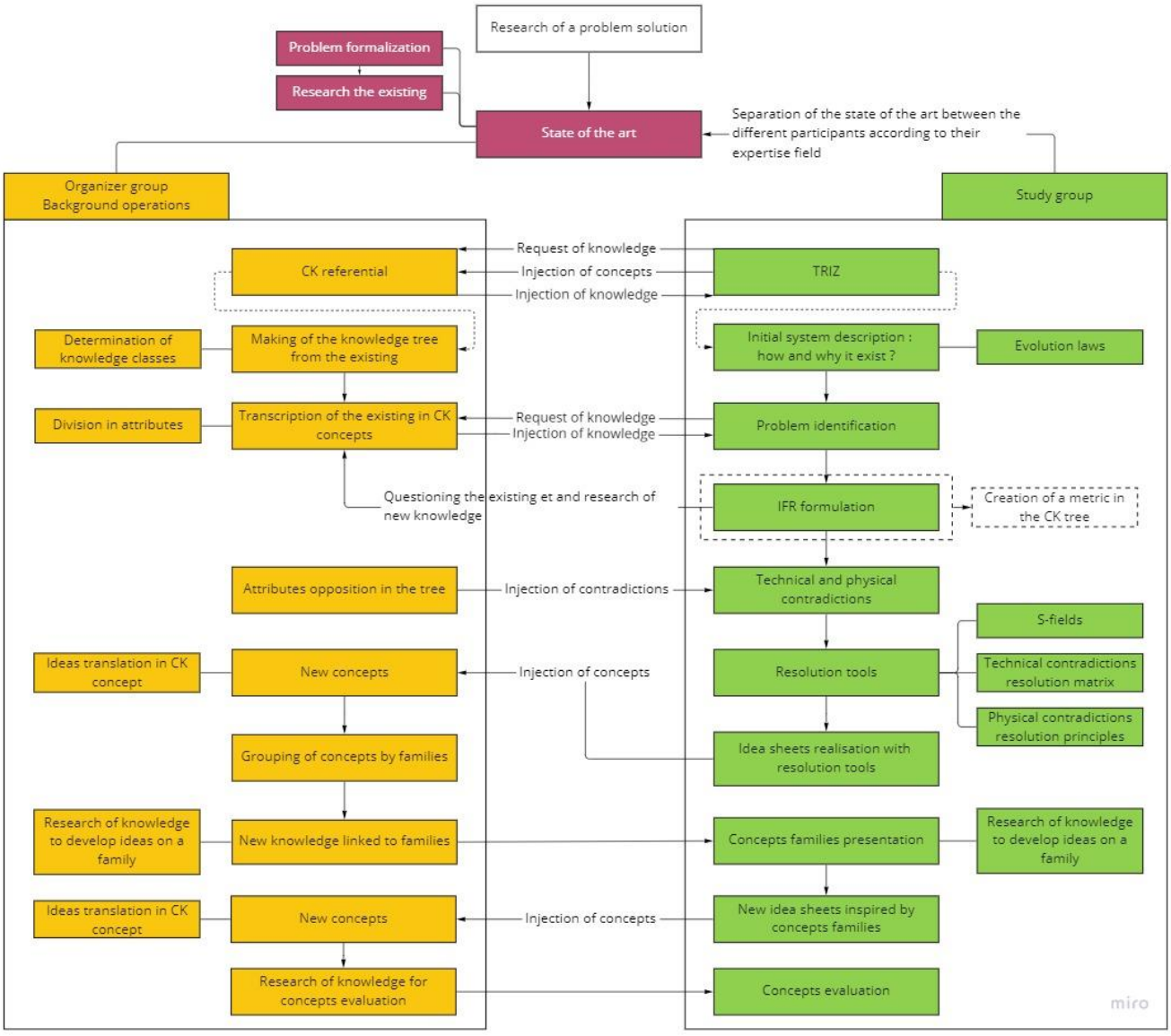


Figure 6. Consolidated C-K-and TRIZ symbiosis methodology

Having tried to apply this method, we found it was not developed enough in its second phase when creating the idea sheets. It has therefore undergone modifications regarding the various exchanges

between the C-K and the TRIZ at this level, with the addition of new stages which is presented in detail on Figure 6:

- The main addition of this version compared to the previous one is the grouping of ideas in the form of families of concepts in the tree. This meeting makes it possible to gather similar concepts and to seek knowledge related to them. This avoids obtaining and evaluating idea sheets with very strong similarities. The search for knowledge for these branches would be done by targeted interviews of 15 – 20 minutes. With the right expert one can develop knowledge more easily and efficiently and thus look for the stopping points for the development of a concept such as: What is wrong here? What needs to be changed to make this work?

- The second added step is the presentation of the tree to the participants of the TRIZ study. As a result, we present the progress of the tree as well as how the idea sheets are used. We can then look for new ideas following the presentations of the families of concepts, being more general they can unblock the participants. The contribution of knowledge by the tree also helps in this development. This presentation can be seen as a first evaluation where the most promising or neglected families can be studied in more detail.

- At last, new ideas are translated, and new knowledge is sought to evaluate them. The last step is therefore the systematic evaluation of the concepts in the tree. This phase is done after a period of research in order to formalize the tree as well as possible and to find all the knowledge necessary for the different concepts. The evaluation as a mandatory step promotes the development of ideas into concrete concepts, an idea in the form of a diagram and a description cannot be evaluated at its fair value. This also makes it possible to consolidate the families of solutions in their strength of proposal, the knowledge highlighting the technical feasibility of these.

- Finally, this improvement facilitates the follow-up of the concepts with the various evaluations carried out as well as the presentation of these.

7. CONCLUSION AND FUTURE WORK

Through this article the TRIZ, and C-K theory are linked one to the other to create a symbiosis that has shown very useful in the first application case. The method seems to fulfil its main objectives of adding a tangible and structured way to implement knowledge in the TRIZ theory as much as facilitating the monitoring of all the concepts created.

The study of the method is not yet finished as the second experiment is to be realized. Few steps have already been realized through different workshops and independent work:

- The first step was to describe the context of the study in a form of a tree to have an overall sight of the connections and the environment of the study. Doing so it allowed to see how a rough C-K tree would look like.

- The second step to have been realized is the C-K tree with the state-of-the-art. To translate a state-of-the-art into a C-K tree is a very good way to understand how technical solutions work. At the end of each branch is an existing solution and each previous iteration is a step of how the solution works. Some branches possess other characteristics due to other similar physical effects or thanks to the realization of the context tree. There is no real problem in the creation of the tree. The only difficult point is to know when to stop the development of attributes that are not present in the existing solutions (addition by opposition), and when to stop researching new knowledge.

- The last step was to start the TRIZ study and is still in progress. Unfortunately, if the subject is not technical enough, the TRIZ will have difficulties to be applied and this can short-circuit

Saipem Classification - General Use

all the study. This is what happened with the second experiment. The tree was not sufficiently precise to realize a TRIZ as planned so a solution was to realize a matrix with a description of all the systems on what the energy recovery can be applied, how they work, why they are used and how they can be used in the study. Each system is then confronted to ways (ends of C-K tree branches) of recovering energy. Doing so we open the possibility to find contradictions more precise than in the C-K tree but also relatively independent of a unique technical system. However even if some contradictions are found, it is difficult to immediately apply a TRIZ on it. The contradictions are still too blurry to create precise idea sheets.

8. REFERENCES

[1] Durand J., 2007, Mémoire de diplôme de recherche, *Développement de passerelles entre des méthodes de conception et la démarche d'invention TRIZ*, Unité mixte de recherche UFC – ENSMM – CNRS UMR 6596

[2] Cortes Robles G., 2006, Thèse de doctorat, *Management de l'innovation technologique et des connaissances : synergie entre la théorie TRIZ et le Raisonnement à Partir de Cas*

[3] Dubois S., 2008, Thèse de doctorat, *Contribution à la formulation des problèmes en conception de systèmes techniques*, Etude basée sur la TRIZ, INSA de Strasbourg, Français, tel-00281657

[4] Kurela M., 2016, *Résolution des contradictions techniques dans la conception des systèmes de lancement*, 20e Congrès de maitrise des risques et de sureté de fonctionnement, Saint-Malo, France

[5] Boujut J-F., Lincas C., 2009, *Innovative design methods in the food processing industry: discussion on C-K and TRIZ*, INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED'09 Stanford, USA

[6] Le Masson P., Hatchuel A., et Weil B., 2018, *Théorie C-K - Fondements et implications d'une théorie de la conception*, Techniques de l'ingénieur, https://doi.org/10.51257/a-v1-j8115

[7] Sojka V., Lepšík P., 2020, *Use of TRIZ, and TRIZ with Other Tools for Process Improvement*, Emerging Science Journal, Vol. 4, No. 5

[8] Dubois S., Guio R., Chibane H., 2020, *Differences and Complementarities Between C-K and TRIZ*, 19th International TRIZ Future Conference (TFC), Marrakesh, Morocco, pp.135-143, 10.1007/978-3-030-32497-1_12, hal-02905550

[9] Tome-Larose X., Gazo C., Delahaye T., 2020, *Proposition d'une methodologie de conception combinant capitalisation des connaissances et creativite technique*, eCONFERE'20

[10] Lee K., 2019, *Innovative Design Thinking Process with TRIZ*, 18th TRIZ Future Conference (TFC), Strasbourg, France. pp.241-252, 10.1007/978-3-030-02456-7_20. hal-02279754

[11] Sauli S.A., Ishak M.R., Mustapha F., Yidris N., *Idea generation method with hybridization of systematic approach and TRIZ for generating a new product at conceptual design*, Malaysia

[12] Kamarudin K.M., Ridgway K., Roshdi M., 2015, *Modelling the Conceptual Design Process with Hybridization of TRIZ Methodology and Systematic Design Approach*, TRIZ FUTURE, TF 2011-2014, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.424

[13] Caillieux L., 2018, Mémoire de projet de recherche, *Proposition d'une méthodologie innovante de résolution de problèmes incluant la bio-inspiration*

[14] Fayemi P-E., Gilles M., Gazo C., 2019, *Innovative Technical Creativity Methodology for Bio-Inspired Design*, 18th TRIZ Future Conference (TFC), Strasbourg, France, pp.253-265, 10.1007/978-3-030-02456-7_21, hal-02279783

[15] Trela M., 2013, *Optimisation des performances d'innovation : Une approche combinant inventivité technique et recherche du succès commercial*, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, Français, NNT :

Saipem Classification - General Use

2013ENAM0030, pastel-01016664
[16] Cortes-Robles G. et al. (eds.), 2019, *Managing Innovation in Highly Restrictive Environments*, *Management and Industrial Engineering*, Springer International Publishing, p279, https://doi.org/10.1007/978-3-319-93716-8_13

Contact : DE CASANOVE Guillaume

Contact information : guillaume.de-casanove@gadz.org

Saipem Classification - General Use

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2021, BALE, SUISSE.

THE IDEA'TEAM, A CREATIVE TEAM&METHOD TO QUICKLY INNOVATE IN A COMPLEX AND TECHNICAL INDUSTRY

de ROCHEGONDE Eric[1], GAZO Claude[1], MANTELET Fabrice[1], HALLOT Raymond[2], DELAPLACE Thomas[2]

[1] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI – Arts et Métiers Institute of Technology – HESAM University – 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France
[2] Saipem SA – Subsea R&D – 1 Avenue San Fernando, 78180 Montigny-le-Bretonneux France

Abstract

Creativity management is increasingly seen as one of the most powerful and promising avenues of growth for companies. The management of creativity in organizations aims to support and reinforce this capacity to think differently and to produce new and useful ideas. This paper presents a method that will hopefully allow to slowly infuse creativity amongst the different departments of the company.

Key words: creativity, R&D, offshore, energy, methods

1 Introduction

The exploitation of fossil fuels and renewable energy technologies is now more than ever a major challenge. Even if the trend is to reduce our use of fossil oil and gas, they remain essential. Therefore, a gradual transition is one of the only possible options to address the climate challenges. It therefore seems essential that the oil & gas industry urgently innovate in order to achieve its objectives. Its three major goals to quickly achieve are; reduce the carbon emissions; reduce the cost of exploitation; and improve the efficiency of exploitations systems. However, the offshore oil and gas industry is particularly complex and technical, this implies that the innovation process also becomes difficult. Indeed, this process, which is vital to boost the company, is far too greedy in time and resources.

Taking all of this in consideration the following question arises: How can we establish an ideation method for a team unfamiliar with the use of creativity in order to quickly answer the challenges of the oil & gas industry thanks to creativity?

2 State of the art & assumptions

In order to address this issue, we started by conducting a state of the art which is divided into three distinct parts. First and foremost, the aim is to get a glance to what is creativity and how it is employed nowadays in the industry The second part of this research focuses on the classification and purpose of different creativity tools and methods. Lastly but not least, the third guideline is to understand the challenges of forming a creative group, which firstly requires knowing what the different creative profiles are.

2.1 Creativity & the industrial creativity process

There are many ways to define creativity, firstly it's important to recall that creativity is an ability that everybody has naturally, no one is devoid of creativity. As a matter of fact, many people are considered having an innate creativity however creativity is like any other ability it can be trained and improved. In this research we focused on creativity as an industrial process. Indeed, creativity is an organized process which allows the fluid generation of a wide range of original and relevant ideas in order to find solutions to an industrial issue. Moreover, this process must address a few challenges:

- Framing the creativity process to focus our energies on the real challenges to be met.
- Choosing the most appropriate idea generation tools according to the problems encountered.
- Dare to move from intention to action.

The industrial creativity process is divided into several phases, and many researchers have proposed a definition of these phases. We quickly notice, by crossing the different works on the subject, that whatever happens the creative process is an alternation between a phase of divergence in a first time and then of convergence in a second time. Divergence is a process of extending the field of possibilities and convergence is a reduction of the space for action by placing it under contextual constraints. Many researchers will also introduce the notion of recurrence into their process; they will carry out the alternation between divergence and convergence several times.

2.2 Creative tools purpose & classification

The use of creative tools must lead to the establishment of an original way of thinking to find adapted and concrete solutions for any issues the industry has to offer. Thus, those tools have many objectives :

- They allow us to go towards irrational without risks in order to favor the emergence of non-trivial solutions.
- They have an identification function, they serve as a methodical exploration itinerary, allowing us to clarify our objectives.
- They allow us to approach the problem from different angles.
- They provide a training function for lateral thinking.
- They aim to improve the power of expansion that the innovative design process must have.
- They allow us to work in a group.

So, we can say that creativity techniques are necessary strategies to bypass our preconceived ideas and ways of thinking, crystallized by the habit.

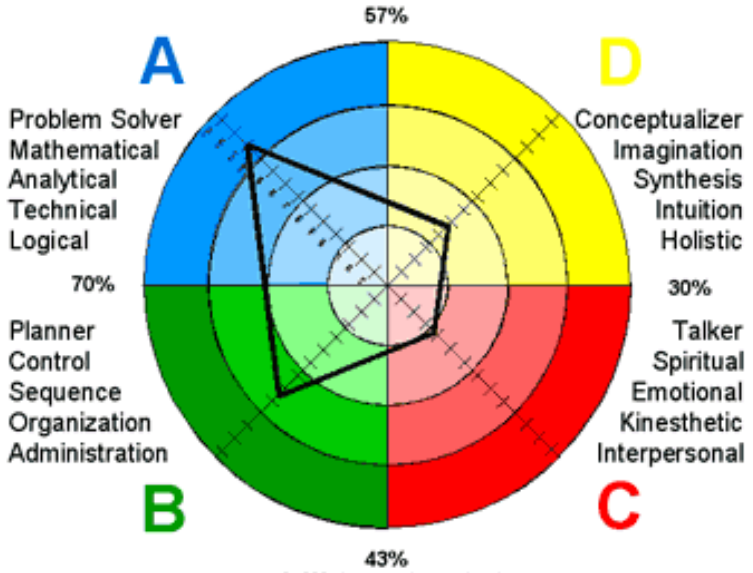
If we go through the different research papers on creativity techniques, we quickly realise that there is a very wide range of them. Researchers group these tools by category in order to simplify our choice when we need a creative tool. There are many different classifications, some group them by logic of functioning: associative, analogical, combinatorial, dreamlike, systematic, etc...
Others group them according to the intended purpose: definition of the problem, analysis of the problem, search for a solution, evaluation and choice of ideas, implementation, and follow-up. Finally, some even try to map the tools, it is the case of Luc de Brabandere, who places them between the rational and the irrational, it is also the case of McFadzean, who places them according to the preservation or not of the paradigm.

	PARADIGM PRESERVING	PARADIGM STRETCHING	PARADIGM BREAKING
Problem Boundaries	Unchanged	Stretched	Broken
Reduction in Cognitive Inertia	Low	Medium	High
Potential Apprehension	Low	Medium	High
Use of Imagination	Not necessary	Necessary	Necessary
Expression	Verbal/Written	Verbal/Written	Verbal/Written/Role playing/ Drawing/Visioning
Stimuli	Related stimuli	Unrelated stimuli	Fantasy and unrelated stimuli
Association of Information	Free association	Forced association	Forced association
Group Experience	Can be used by experienced and inexperienced groups	Groups require some experience	Should only be used by experienced groups
Creative Stimulation	Low	Medium	High

The creativity continuum, Model of McFadzean

2.3 Creative profiles & the creative group

To understand how to build a group we looked at the different creative profiles that exist. A good way to understand why there are different types of creative people is to look at Ned Hermann's studies on brain preferences.



Model for the analysis and evaluation of brain preferences

According to Hermann's typology our brain is composed of four complementary dials: A is the left cortical, D is the right cortical, B is the left limbic, and C is the right limbic. During a thinking process and in particular in the practice of creativity it is necessary to mobilise these four dials at the same time in order to generate the best ideas. The connections between the different parts of the brain are not the same from one person to another, hence the fact that there is a very wide range of different creative profiles. Ned Hermann classifies brain preferences or dominance into three categories and counts 81 different profiles.

Michael Kirton proposes in his work not to try to determine the intensity of a person's creativity but rather to look at the way in which that person expresses his or her creativity, through what is called his or her cognitive style. Thus, this cognitive style refers to a person's way of approaching and solving problems and influences the type of creativity that is deployed. This approach makes it possible to situate the type of creativity of an individual on a continuum that goes from an adaptive orientation to an innovative orientation.

Thus, Kirton's cognitive style approach and Hermann's brain preferences illustrate how cognitive preferences can strongly influence an individual's attitude towards using different creativity techniques. This section therefore concludes with the point that creativity is a complex activity at the intersection of individual qualities and social interactions.

Finally, setting up the creative group is a major challenge to ensure the success of the creative process. In order to correctly set up the group we can mostly rely on those 6 rules:

- People selected must have sufficient knowledge in the relevant sector.
- People selected will have different but compatible creative personalities.
- People selected must be sufficiently available.
- Everyone's interest must be considered.
- Communication and coordination between all parts involved must be optimally ensured.
- A strong group cohesion with mutual support is strongly recommended.

2.4 Assumptions

In order to establish a method which is able to answer our problem and once all this information has been taken into account namely:

- There are many different creative profiles.
- There is a wide range of creative tools of all kinds.
- No one is devoid of creativity.

We made the following assumption:

Assumption 1: The creative process and tools will have to be agile in order to adapt to the people who will join the project and who are not necessarily used to finding solutions through creativity.

We made a second assumption due to the fact that projects can vary greatly from one another in saipem's office, so the knowledge required for the industrial creativity process will change according to the projects.

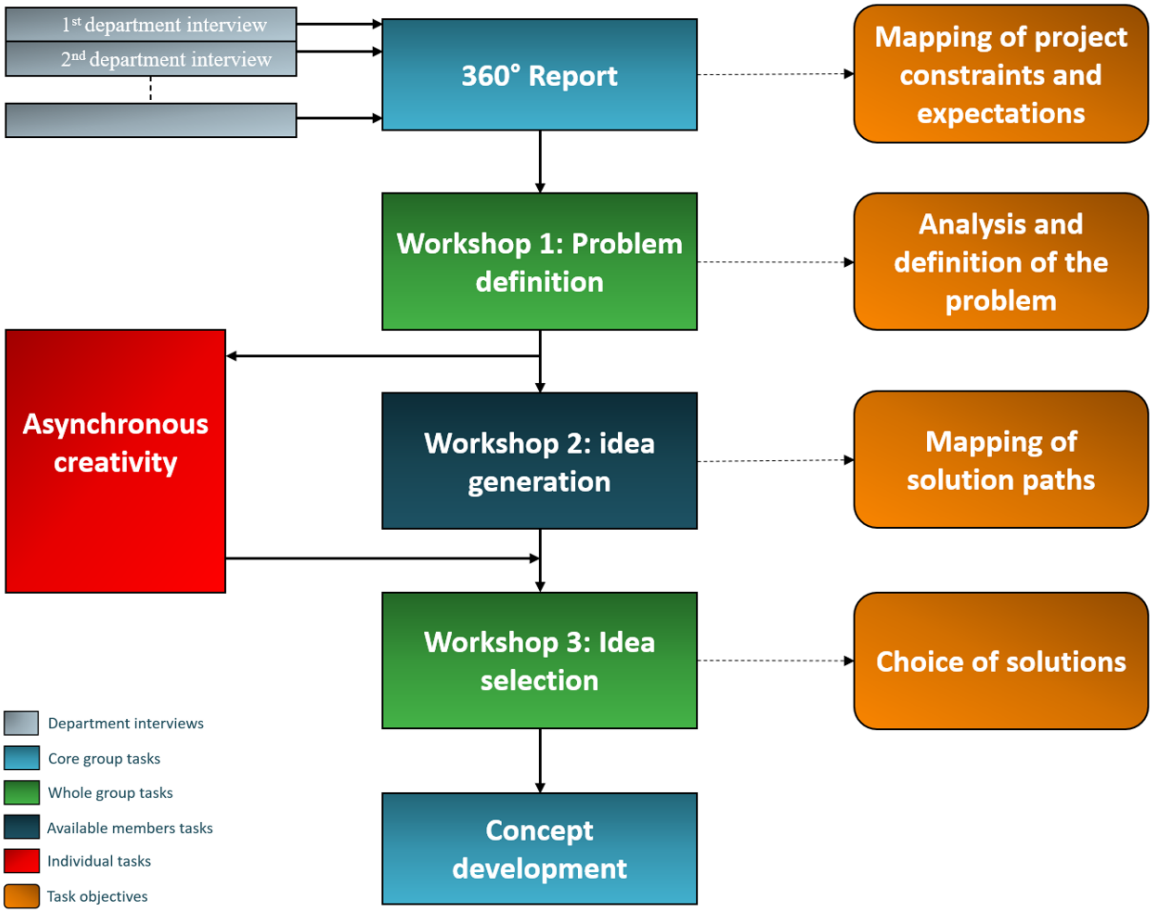
Assumption 2: The ideation team will be made up of a core group and other people will be added to the creative process depending on the knowledge needed to achieve it.

So, the method that will be implemented is agile, it will evolve according to the available resources and the constraints of the project, and it is likely that our model will undergo variations.

3 Method

3.1 360° report

To get started with our creative innovation process we decided to start defining and analyzing our problem by conducting a 360° report that will bring together all Saipem's knowledge related to the project. Concretely we are going to interview all the departments of Saipem concerned by this project in order to understand and have a global vision of what are the constraints of the issue. Once this report is completed, we will be able to start the ideation process.



Method Diagram

3.2 Problem definition

The first workshop will be a clarification workshop, as far as possible it is necessary that all departments concerned by the project must attend to this meeting. Therefore, before the team starts generating solutions, everybody will share a global understanding of what are the issues at stakes and most importantly everyone will agree on the definition of the issue.

The first step is to explore the problem. It will take place in two stages, first a divergent stage and then a convergent stage. To begin with, the objective is to direct creative efforts to draw up a portrait of the various gaps to be filled or objectives to be pursued, each of the problems or objectives identified will be formulated in a positive manner in vision statements, moreover the rules of divergent thinking will be applied, the objective being to formulate the greatest possible number of vision statements. Then once the vision statements have been identified, the one that best represents the priorities and deserves attention is chosen.

The second and last step of this workshop is the formulation of the challenge, once again we will proceed in two stages. The objective is first to broaden the reflection from as many perspectives as possible to better address it. The different angles found in the formulation of the challenge now allow the vision to be seen from a multitude of facets and perspectives. It is therefore a matter of selecting from these challenge statements the one that best clarifies our expectations.

3.3 Ideation

Once our problem is correctly defined and analyzed we will start the idea generation phase. The current context of the company makes it impossible for all team members to be present for the ideation phases. Therefore, in parallel to the ideation workshop done with most of the team, we will propose to the other members some individual creativity tools that can be used asynchronously.

3.3.1 Collective idea generation

The ideation workshop will take place face-to-face, if possible, with the available members. The objective is to generate a wide range of ideas that cover as many solutions paths as possible. For a start we will do a purge for two reasons, firstly because it allows people to say all the ideas they have already thought of and it is also a creative warm-up. During this stage, participants will be asked to come up with as many ideas as possible in a short period of time.

Once the introduction and the warmup completed, we can begin the idea exploration phase. The aim is to produce a great number of ideas. In order to generate ideas, we have many options in the choice of creativity techniques. Rather than offering a single tool, we will offer several tools that use different creative logics (analogue, associative…). In this way, participants will be able to choose the tools that suit them and, because of the different logics between the tools, this will open new perspectives with each new tool.

When the group judges that the number of ideas is sufficient enough and in quality it is time to converge and select one or more ideas to push them further in the process of innovation. Once again there are many tools that can easily allow us to classify/discuss/vote for the ideas however those tools are very situational. Indeed, the choice will be made according to the general atmosphere, for example if everyone seems to agree on the majority of the choices a simple vote will suffice. On the other hand, if there is a lot of disagreement, it would be interesting to use a more complete tool that would allow a discussion, like the lawyers Angel for example.

3.3.2 Asynchronous creativity

Idea Card N°	
Research question & context: (to be completed before distribution)	
Trigger words: (objects of the problem and objects in the problem environment) • Trigger word 1 • Trigger word 4 • Trigger word 7 • • • • Trigger word 2 • Trigger word 5 • Trigger word 8 • • • • Trigger word 3 • Trigger word 6 • Trigger word 9 • • •	
Title: **Description of the idea :**	**Sketch of the idea :**

Example of idea card that could be used for asynchronous creativity

The major challenge is to make a tool that allows people to find ideas by themself in a very short time. So it has to be a very easy to use and intuitive tool. The solution we firstly thought about was giving those participants a model of a blank idea sheet with a brief presentation of the objects of the problem and its environment and with inductive words to encourage associative logic. The participants will only have a few days to complete a defined number of sheets, the sens of urgency can sometimes be prolific to creativity and if the deadline is short, it will hopefully motivate them to think about it quickly.

Furthermore, if the participants can't manage to find ideas just thanks to that process, we could consider adding the SCAMPER method in the cycle. Instead of simply using related trigger words to generate ideas we can bring on the seven verbs of SCAMPER: Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put, Eliminate, Reverse. By combining either one of these verbs with the objects of the problem and eventually any other trigger words that inspires the person, the field of possibilities becomes very large.

Finally, just before the last workshop where the ideas will be studied in more details, we will need to gather up the idea cards from both the collective ideation and the asynchronous tool.

3.4 Solution selection

The solution selection will be the last workshop to take place, once again as far as possible it is necessary that every department concerned must attend the meeting. Indeed this is a key point of our creative process since we are going to choose the solution that Saipem may develop if the time and resources are available. Thanks to the results of the 360° report and to the experience of the participants the aim will be to deepen the ideas found previously, the objective is to challenge them to find the best solution(s) that will merit further attention in R&D.

A good way to do this may be to explore the positive sides first. We highlight the merits of the pre-selected ideas, we take care to criticize them constructively, we then express the concerns they raise. This is the time to identify obstacles or weaknesses that need to be reduced, worked around, or eliminated, but it is also the time to immediately shift into solution mode to strengthen the ideas.

Finally, the paths of solution need to be chosen, we can use the same tools as the one we used in the collective idea generation step. Those solution paths selected will be presented to the management in order to make sure everyone is on the same page and that the solutions that will be reinforced later will not be unnecessarily so. If the management approves the selected solution(s) among those reinforced, they will hopefully be developed by the R&D team and implemented in Saipem assets.

4 Experiment

The implemented model will be tested directly with a multidisciplinary team of engineers on an urgent industrial project. Each member of the team will have been carefully selected according to the criteria for setting up a creative group.

At the time of writing this article the ideation phase hasn't started yet, however we already started to build our 360° report and we're progressing towards a global understanding of our problem. Indeed we have already discussed with every different Saipem's departments concerned at least once, the objective is to discuss with everyone twice in order to have a more in-depth report.
In order to start conducting the interviews we had to choose which departments we wanted to sit with. However, the first interview we conducted gave us a more holistic vision of the problem, which allowed us to better see which departments we would interview.

5 Results & discussion

As the 360 report progresses, our understanding and vision of the problem becomes more refined. Indeed, after each interview we have a better understanding of all the ins and outs. This report will first allow us to draw a diagram of all the interactions between the different departments of Saipem in order to have a clear representation of those interactions. Just below is an example of a diagram of interaction between a chosen department and the others with whom he has interactions on a particular project. We chose not to give further details on the project we are carrying out since it's not especially relevant. The important thing to understand from this diagram is that projects include many departments who all come with there own constraints.

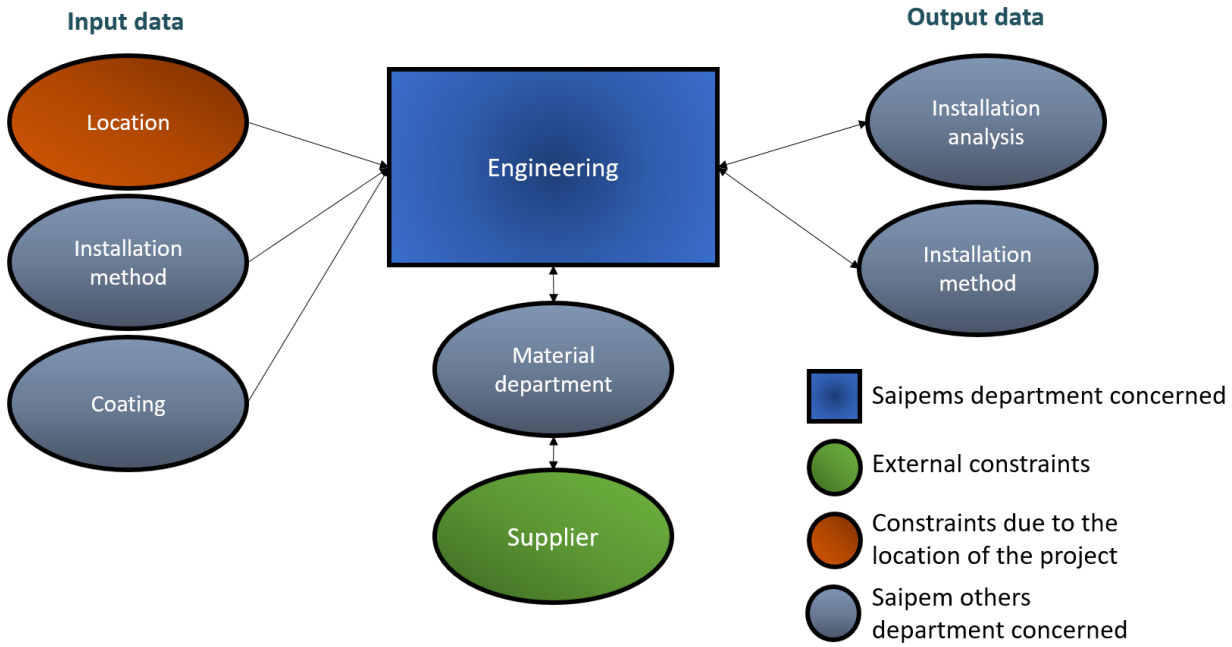


Diagram of interactions between the engineering departments and the other department in the case of this subject

Furthermore, it will allow us to map and list all the constraints related to the problem in each department concerned. Those listed constraints will be very useful for the rest of our ideation process, it will help us when transforming the ideas into solutions. Moreover, the departments interviewed showed interest in this 360° report and the conclusions it will lead to. Nevertheless, we will have to be careful in the use of those results we don't want them to stifle our creativity, we will bring them on the table at the time of the deepening of ideas into solutions.

6 Conclusion & Future Work

In all industries as complex and technical as offshore, finding creative solutions in a hurry can be complicated. Our method has two objectives, firstly we'll see if creativity can be successfully infused to engineers from other departments than R&D and secondly, we'll see if it's possible to quickly generate solutions by using the appropriate creative tools in the offshore energy industry. However as mentioned before the ideation phase hasn't begun yet, so it seems hasty to draw conclusions from our assumptions. The work left ahead of us will be largely decisive.

The next step of our program consists in selecting the team members that will take part in the ideation process, if they wish and if they are available. We also keep in mind that these members are likely to change, for instance if with discover during the ideation phase a solution path where à new type of knowledge is required we do not exclude the use of other persons.

Once the group is in place, we will choose the different creative tools which are going to be proposed. Of course, we will select techniques according to the profile of this creative group and according to the formulation of the challenge we selected at the end of the first workshop. Before the 3rd Workshop we are going to gather up the idea cards from the asynchronous participants and join them to the ones we generated collectively.

The final step, after the 3rd workshop (Solution selection), will be to show and explain to the management team the solution paths that have been selected and deepened. The expectations are high, if we find creative and efficient solutions that are furtherly designed and all participants are satisfied with the process, it will prove that a good use of creativity can be very profitable. Thus it will make it easier to infuse creativity all around the company.

7 References

[1] **Fabrice Mantelet, Frédéric Segonds, Camille Jean.** (2019). *Additive Creativity: An Innovative Way to Enhance Manufacturing Engineering Education.*

[2] **Pascal Alberti**. (2017). Technique de l'ingénieur. *Créativité industrielle, Définition et méthodes d'accompagnement.*

[3] **Charles Mille, Sylvain Fleury, Simon Pasi, Kevin Fournier, Lisa Izzouzi, Sébastien Duchossoy, Thomas Jean-Louis, Olivier Christmann, Simon Richir. (2019).** *Effets de stimuli externes non pertinents sur la créativité.*

[4] **Guy Aznar**. (2005). *Idées : 100 techniques de créativité pour les produire et les gérer*.

[5] **Martin Högl, K. Praveen Parboteeah**. (2007), *Creativity in innovative projects: How teamwork matters.*

[6] **Armand Lang, Frédéric Segonds, Camille Jean, Claude Gazo, Jérôme Guegan, Stéphanie Buisine, Fabrice Mantelet.** (2019). *A Proposal for a Methodology of Technical Creativity Mixing TRIZ and Additive Manufacturing.*

[7] **Marc Trela. (**2013). Thèse de doctorat. *Optimisation des performances d'innovation : Une approche combinant inventivité technique et recherche du succès commercial.*

[8] **Fabrice Thiebaud**. (2003). Thèse de doctorat. *Formalisation et développement de la phase de résolution de problème en conception industrielle.*

[9] **Kleidson Daniel Medeiros Leopoldino, Mario Orestes Aguirre González, Paula de Oliveira Ferreira, José Raeudo Pereira, Marcus Eduardo Costa Souto.** (2016). Creativity techniques: a systematic literature review

[10] **Elias Carayannis, John Coleman.** (2005). Creative system design methodologies: the case of complex technical systems

[11] **Luc de Brabandère**. (2010). Le plaisir des idées

[12] **Arthur B.VanGundy.** (2005). 101 activities for teaching creativity and problem solving

Contact principal : Eric de La Rochette de Rochegonde

Coordonnées : eric.de.rochegonde@gmail.com, 07 81 26 16 21

THE CREATION OF AN IN-VITRO MODEL – AN INTERDISCIPLINARY CHALLENGE

Saskia ECKERT[1,2], Pierre VEDEL[1], Kim-Anh NGUYEN-PEYRE[2], Christian KASSASSEYA[2], Nour BELKEZIZ[2], Pablo BARTOLUCCI[2], Frédéric SEGONDS [1]
[1] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI - Arts et Métiers Institute of Technology - HESAM University - 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France
[2] EFS UITC, Centre Félix Reyes, Equipe Recherche 2, 5 rue Gustave Eiffel, 94017, Créteil, France

Abstract: Systems engineering has become one of the key ideas in the development processes within highly multidisciplinary teams and is very appreciated in the 21st century for its opportunity to communicate more effectively. This is necessary due to products becoming more complex and connected. It allows us to see different work packages as black boxes and gives us the possibility to define communication and connection points. However, this approach has not yet been fully established in all types of industries. In order to fully utilize the potential of this attempt, this paper aims to develop a methodology suitable for biomedical laboratories to develop a prototype of a new biomedical device. The methodology aims to encourage communication in highly multidisciplinary teams, to reduce costs through early detection of potential problems, to improve quality through the integration of all areas of expertise, and to increase our understanding of complex research questions through a step-by-step approach to product requirements.

Mots clés (5 maxi) : Multidisciplinarity, Innovation, Systems engineering, Biology, Design

1 INTRODUCTION

Establishing *in-vitro* models and traversing the *in-vivo-in-vitro* divide has the need to solve complex, interdisciplinary problems [1]. Thus, biomedical laboratories today not only consist of medical and biological professionals. They are also in need of other areas of expertise, such as engineering. *In-vitro* models are often used when *in-vivo* studies reached their limits, e.g. because there is no equivalent test object in the animal models or there are ethical issues. An *in-vitro* model could be a physical twin system being set up with the aim of reproducing physiopathological phenomena in the human body to predict the reaction of the *in-vivo* system to specific experiments without interacting with a human or animal body.

There are different types of twin systems that can be set up to predict the reaction of our *in-vivo* system, such as *in-vitro* systems and *in-silico* systems. The *in-vitro* model is an experiment that physically exists in front of us, while the *in-silico* model is a computer simulation. It is important to understand that models can never portray the whole system and thus, a good model is a tradeoff between realism and simplicity [2].

Our study aims to develop a methodology for effective collaboration between engineers and biomedical scientists in biomedical laboratories. It will use the creation of an *in-vitro* model as proof of concept.

2 STATE OF THE ART

The key component of modeling and simulation is the definition of a system. A system is an arrangement of parts or elements that together exhibit behavior or meaning that the individual constituents do not [2].

1981 Ackoff [3] described 3 conditions that define a system. These conditions have been further developed, but they still form the basis of any system definition today.

(1) *The behavior of each element has an effect on the behavior on the whole.*
(2) *The behavior of the elements and their effects on the whole are interdependent.*
(3) *However, subgroups of the elements are formed, each has an effect on the behavior of the whole and none has an independent effect on it. To put it in another way, the elements of a system are so connected that independent subgroups of them cannot be formed.*

A system is a black box and is described by input values, output values and a system boundary. Thus, it has an environment and surrounding systems with which it interacts. Furthermore, a system consists of various subsystems that interact to convert the input values into output values.

The approach described above is known in the literature as "systems engineering". Systems thinking is an approach that supports holistic thinking [4]. Systems engineering is a methodical, disciplined approach for the design, realization, technical management, operations, and retirement of a system [4]. It is an interdisciplinary, multidisciplinary and transdisciplinary approach to evolve and verify an integrated and life-cycle-balanced set of system product and process solutions [5]. Systems engineering first emerged in the aerospace industry, but has since evolved over all types of industries. There are some first approaches in literature to integrate a systems engineering approach in the biomedical industry.
The central idea of this approach is to break down our system in smaller subsystems and then combine them back into a whole.

2.1. Systems Thinking Models

2.1.1. The Vee-Model

First approaches to systems engineering were made by Forsberg and Moos [6], who described the systems engineering approach with a Vee-Model. Originally the model was developed for Software development questions but then seemed appropriate for all kind of engineering fields. The Vee-model is a combination of a top–down ("Decomposition and Definition Sequence") and a bottom–up approach ("Integration and Verification Sequence") [4] and can be seen in Figure 1 :

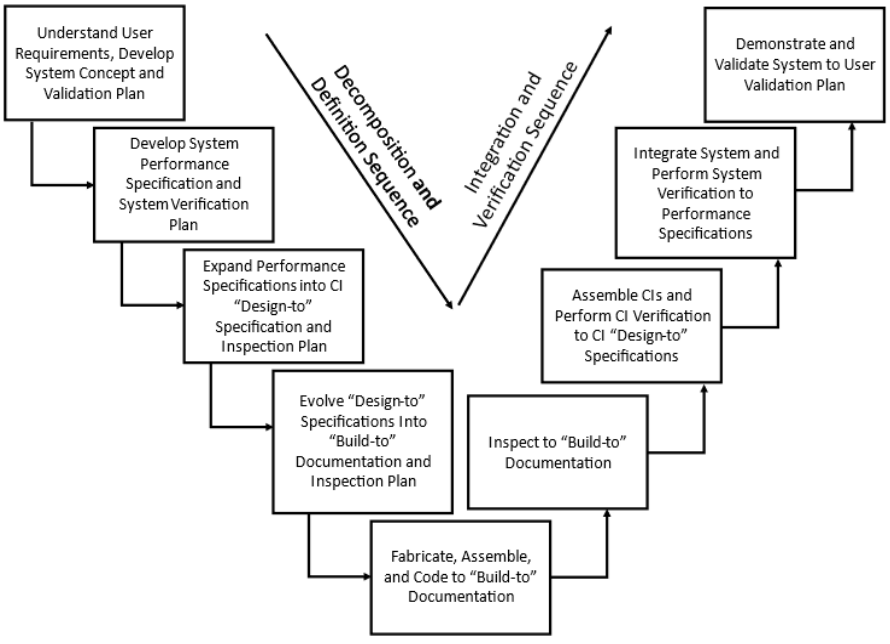


Figure 1. The Vee-Model as the central idea of systems engineering according to Forsberg and Moos [6]

This Vee-Model has been developed over time by many researchers. 3DSE Management Consultants GmbH has published a Vee-Model (Figure 2) that seems suitable for our project since it allows us to think in a more modular way. The long-term goal has to be to approach an agile system where elementary systems can easily be changed without having to make too many changes in other subsystems.

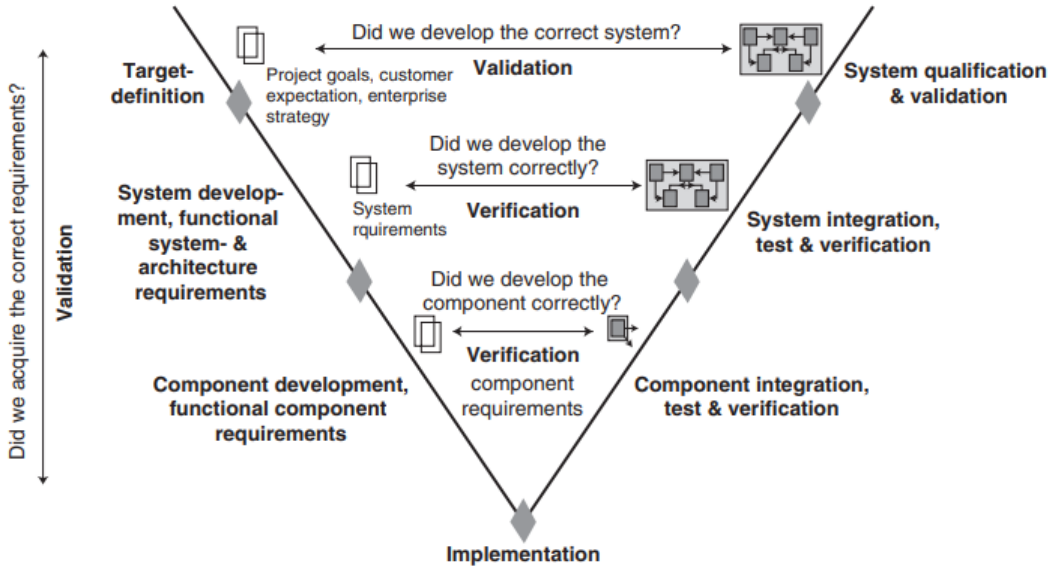


Figure 2. The Vee-Model according to 3DSE Management Consultants GmbH Munich taken from [4]

2.1.1. The Spiral Model

Kapurch [7] describes the systems engineering process as the pursuit of definition and understanding of design alternatives to support the decisions, coupled with the overseeing of their implementation. This "Spiral Development" was one of the first models that offered a great leap in agility [8,9]. It can be seen in figure 3.

It consists of the following 5 stages :

1. Recognize Need/Opportunity
2. Identify & Quantify Need, Goals, Objectives, Drivers and Constraints
3. Define Alternative Concepts, Perform Feasibility Assessments & Trade Studies
4. Finalize Requirements & Begin Design
5. Increase Resolution

These 5 stages will be further increased in Resolution until a "Zero In on a Feasible Concept" is achieved.

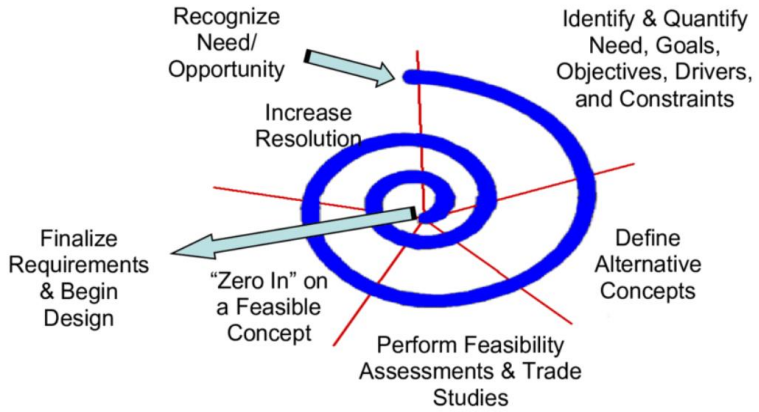


Figure 3. The Doctrine of Successive Refinement according to Kapurch [7] taken from [10]

Critics say that the lengthy planning of the spiral model does not allow it to be fully agile [9]. Highsmith defines agility as : “Deliver quickly. Change quickly. Change often.”
The characteristics of agile product development are the following [9] :

- Iterative development
- Focus on interaction and communication
- Reduction of resource-intensive intermediate artifacts

2.2. Bioengineering Models

Several models discussing the development in biomedical engineering can be found in literature.
Arntzen-Bechina and Leguy [11] have proposed a model of knowledge exchange in biomedical engineering in the form of a pyramid. The pyramid consists of three levels that that need to be considered, namely, people (at the bottom of a pyramid), process and technology (at the top of the pyramid). The challenge is to determine the right synergy by integrating people, processes and technology [11]. The methodology is based on the SECI model, an iterative model for transfering tacit knowledge into explicit knowledge through **S**ocialization, **E**xternalization, **C**ombination, **I**nternalization. The SECI-Model is shown in Figure 4:

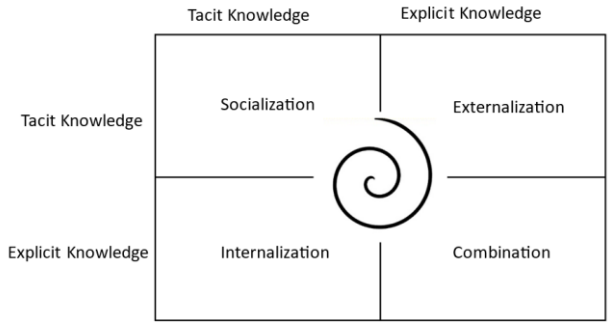


Figure 4. The SECI-Model for transfering tacit knowledge into explicit knowledge [11]

The SECI-Model can be considered one of the origins of knowledge management. Integrated in a biotechnical context, it seems very valuable when we try to develop an approach for multidisciplinary communication. Explicit knowledge consists of facts, rules, relationships and policies that can be faithfully codified in paper or electronic form and shared without need for discussion [12]. In contrast, there is tacit knowledge, knowledge that cannot be described in words, but exists nonetheless.

Arnetzen-Bechina and Leguy [11] have proposed a scenario for knowledge exchange and process in the biomedical field. To develop biomedical innovations, only a multidisciplinary competence approach resulting from collaboration of the triple helix University-Hospital-Industry is suitable to achieve efficient results [11]. The model shows that biological knowledge must be reduced and communicated to the point so that engineering teams have a concrete basis for development. This finding can be seen in Figure 5 :

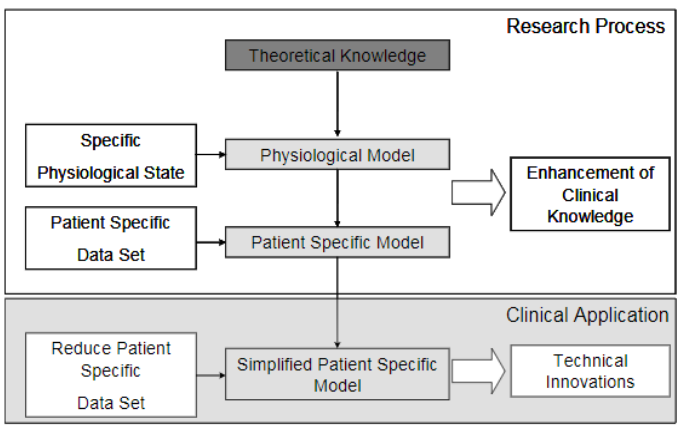


Figure 5. Scenario of knowledge sharing and process in biomedical field [11]

Wong et al. [13] have proposed a methodology that describes the phases of medical device development. The 5 phases are as follows :

1. Measurement (*in-vivo* or *in-vitro*)
2. Verification (analytical or experimental)
3. Design Evaluation (computational modelling or visualisation)
4. Design Modification (Case study and testing or performance analysis)
5. Design Optimization

Whenever a stage is not adequately met, the previous is reconsidered and rerun.

2.1.1. The AM-Biopart methodology

Collaboration between engineers and biomedical professionals in biomedical laboratories has already been discussed in the context of the AM-Biopart methodology [14, 15, 16], where AM is the acronym for Additive Manufacturing. The AM-Biopart methodology is a combination of methodologies for designing innovative products based on AM and methodologies for the manufacturing process of devices for biological applications [16]. The methodology is divided into the following 4 phases :

1. Initialization
    a. Understanding of medical context and clinical needs
    b. Literature review
    c. Acquire and convert patient medical imaging to digital model
    d. Secure patient information and data
    e. Clinical observations
    f. Requirements specifications
    g. Protection of intellectual property : patentability, NDAs
2. Concept and Feasibility
    a. Research of concepts in multidisciplinary teams
    b. Define manufacturing solutions
    c. Cost and Fabricability estimations
    d. Solutions for the products sterilization and shipping
3. Design and Development (see Figure 6)
4. Validation and Optimization
    a. Biological study
    b. Design Optimization
    c. Final users' (biologists) tests
    d. Formation for clinical use

It is a methodology that describes very well the integration of biologist feedback into the technical development process, the need for iterations, and the need for successive refinement (as seen in the simplified/complex geometry). However, this methodology describes the design process as a "Bottom-Up"-Approach, which does not seem quite sufficient in our development process. The original methodology was developed by Lenoir [16].

Ritter [14] modified the 3rd step (design & development) and incorporated more feedback from biologists, as well as a hierarchy of the development process and environmental conditions. This approach is already a first step towards more systemic thinking. The modifications can be seen in Figure 6:

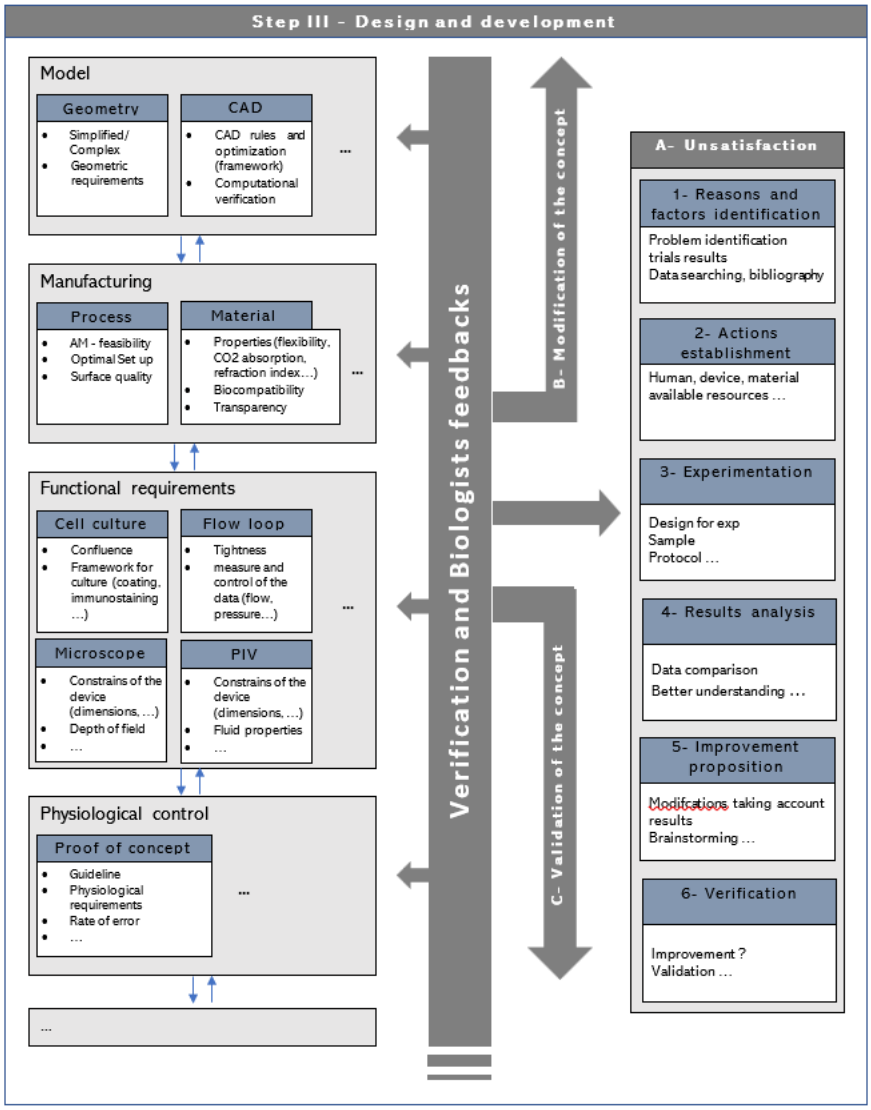


Figure 6. Further developed "Design and Development"-phase of the AM-Biopart methodology by Ritter [10]

2.4. Synthesis of the Models

All of the methodologies presented show interesting approaches for integrating an effective way of communicating in a biomedical laboratory. However, there is no approach in literature on how to combine a system's thinking approach with bioengineering models for product development. Therefore, this paper aims to combine the proposed methodologies. There will be a combination of a "Bottom-Up"-Approach with a "Top-Down"-Approach (as in the Vee-Model) with an adapted successive refinement (as in the Spiral-Model). We will adapt the various phases of the spiral model to better meet the requirements of both agile development and bioengineering models. The phases of the spiral model will incorporate an approach to transform tacit knowledge into explicit knowledge (as in the SECI-Model) as well as the AM-Biopart methodology. This is done to ensure more efficiency in the prototype development process of a biomedical laboratory.

3 PROPOSAL OF METHODOLOGY

Our new methodology is based on the Vee-Model presented in the section above. Forsberg and Moos [6] mention in their methodology the "Design-to"-Specifications and "Build-to"- Specifications, which seem very interesting in our case and are therefore added to the Vee-Graph presented by 3DSE-Management Consultants. As communication between different disciplines is not always easy, the component development step seems too linear in our case. We need a more iterative methodology. In our case, the spiral model seems to be suitable, as it allows us to go through similar steps several times

and to augment the resolution. The spiral starts with the “Build-to”-Specifications we got from the “Component Requirements” and leads us step-by-step to the implementation of our product.

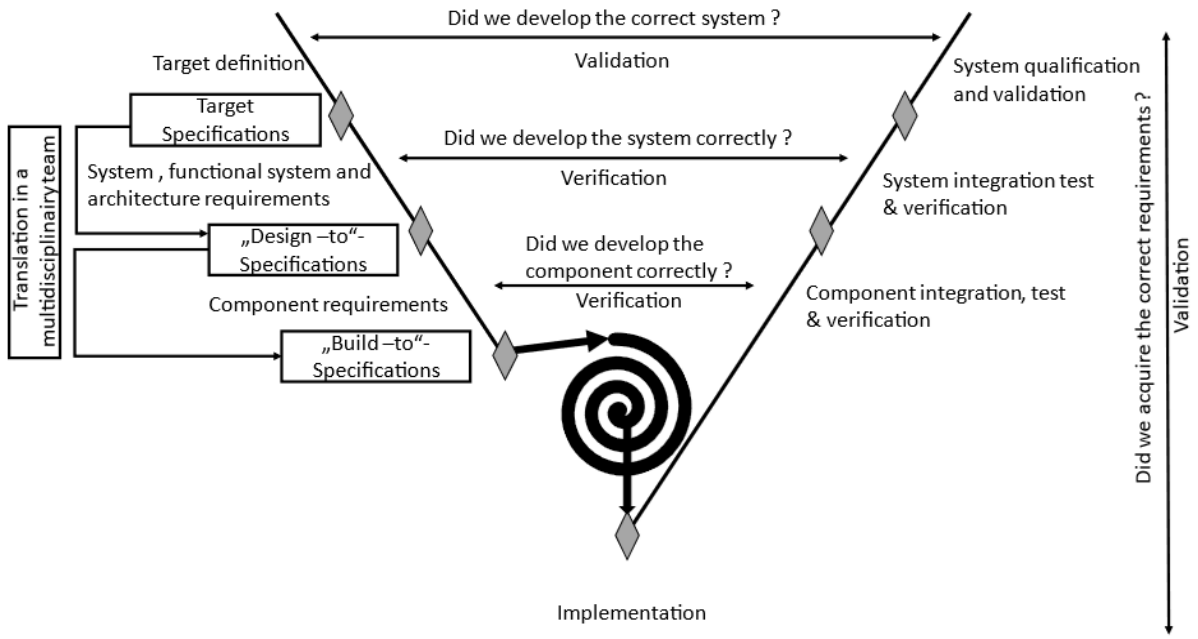


Figure 7. Modified Vee-Model with Spiral-Model integration

Since the Spiral-Model was also developed for software development, the original 5 phases (see Figure 3) need be adapted to bio-medical laboratories. The following translations are made :

Input: Recognize Need/Opportunity :
In our model, need is very well defined by “Build-to”-Specifications that form the input to our spiral model.

1. *Identify & Quantify Needs, Goals, Objectives, Drivers and Constraints :*
   Since the opportunities have already been defined at the level of target specifications at the higher level of the Vee-Model, it is more important in our case to concretize the “Build-to”-Specifications. At each stage of development, there are adjustments to the specifications that need to be taken into account in the next pass through the spiral.

2. *Define Alternative Concepts:*
   In the first cycle, a full state of the art needs to be done to get an overview of all possibilities that can be found in the literature. In the following cycles we will define alternative concepts step by step.

3. *Perform Feasibility Assessments & Trade Studies :*
   In our case, the feasibility will be discussed in a multidisciplinary team to evaluate the concept before beginning the design.

4. *Finalize Requirements & Begin Design :*
   All concepts should be developed further to gain a deeper understanding of the concepts themselves and problems that can arise.

5. *Increase Resolution :*
   The final step of the spiral is to increase the resolution. Now that we have started the design, the next step is to evaluate the strengths and weaknesses of our model in order to increase quality and move in the direction desired.

Output : Zero In on a Feasible Concept

The exit in our case will be our final concept to be implemented, and thus the southernmost point of the Vee model.

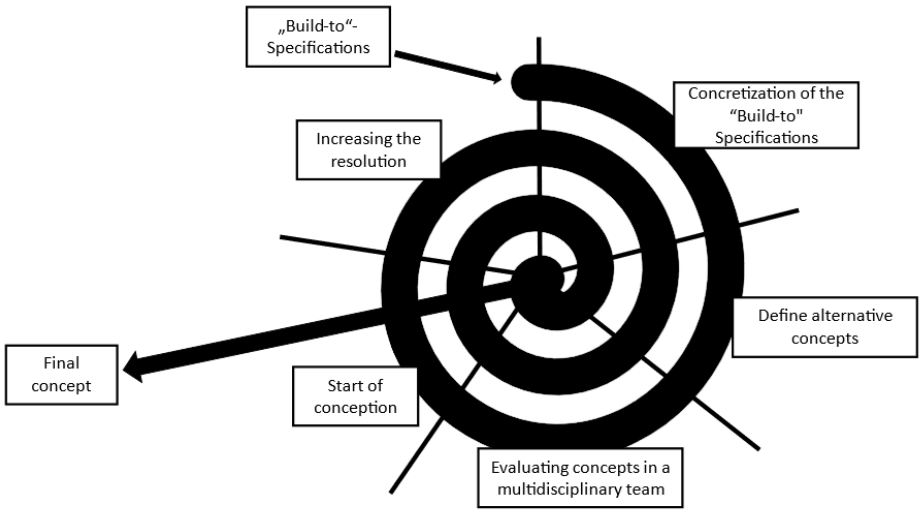


Figure 8. Modified Spiral-Model to be integrated in the Vee-Model

4 USE CASE

4.1. Application example in a bio-medical laboratory

The project aims to improve the understanding on physiopathology of cerebral vasculopathy in sickle cell disease. This is the most common monogenetic disorder, affecting over 5 million people worldwide. A 3D-printed carotid artery allows us to perform personalized experiments with personally printed carotid arteries integrated into a personalized flow loop. A cell culture is introduced in the 3D-printed model to reproduce the vessel to a certain extent. The results obtained with this approach allow us to validate an *in-silico* study and to understand the disease more in detail using our two twin systems.

Biomedical studies usually consist of *in-vivo*, *in-vitro* and *in-silico* studies. The following diagram (Figure 9) shows the interdependence of the different teams and the interaction between reality, an *in-vitro* model and an *in-silico* model. Since reality is not always understood, we only have an image of reality generated by imaging technologies.

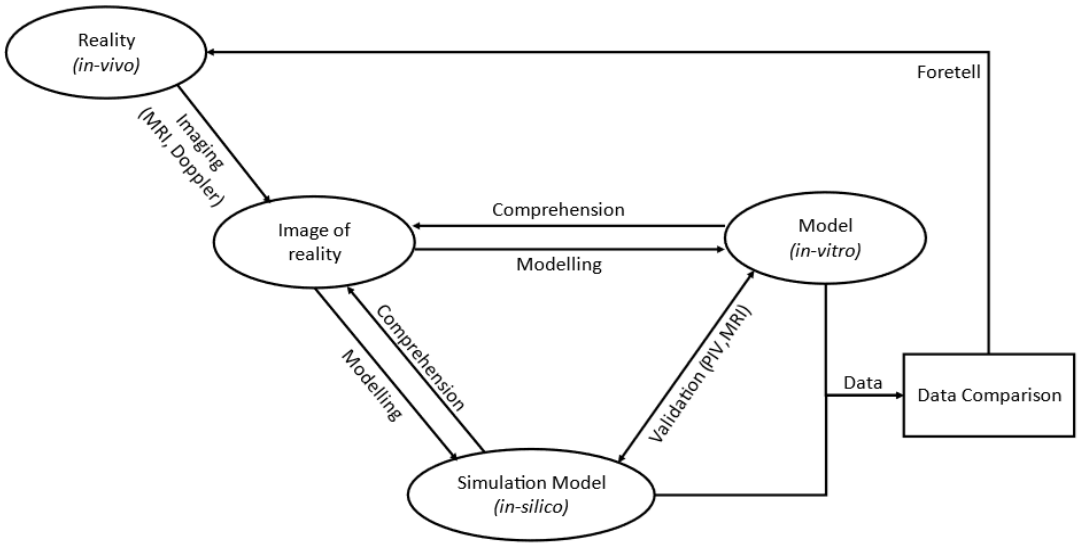


Figure 9. Scheme of dependence of the different teams

The work package of each team (responsible for the image of reality, the *in-vitro* model and the *in-silico* model) is described with a black box.

The proof of concept of the proposed methodology is done with the "*in-vitro*"-model. Therefore we need to define the "*in-vitro*"-model as our system and further define the subsystems and their interactions. Figure 10 shows our *in-vitro* system interacting with its environment with the following inputs and outputs :

1. Inputs (Medical imaging technologies) :
    a. MRI : "Magnetic resonance imaging"
    b. TCD : "Transcranial Doppler"
2. Outputs :
    a. PIV : "Particle Image Velocimetry" (optical measurement of the flow)
    b. Data for Data Comparison

For the *in-vitro* system itself, we can define the following 4 subsystems :

1. The 3D printed carotid
2. The flow loop
3. The cell culture
4. The PIV device

The first step of our modified Vee-Model is the target specification, i.e. the interaction of our system with its supra-system, also known as the environment. Hence there are the following target-specifications that can be expressed :

1. Intra-action to the image of reality :
    a. The *in-vitro* model is a model of the image we have of reality. Therefore, the geometry, cell culture and flow conditions should be as close as possible to the image we have of reality.
    b. The *in-vitro* model must enable the understanding of our image of reality by being an accurate image.
2. Intra-action to the *in-silico* system :
    a. Validation must be possible through PIV, so there must be good visibility in the *in-vitro* system.
3. Intra-action to the *in-vivo* system (reality) :
    a. The *in vitro*-model has to provide us with data, that help us to predict reality.
    b. The *in-vitro*-model should provide us with data in a form that allows easy comparison with the data from *in-silico* studies.

In a next step, we will approach a deeper level through the step "system, functional system and architecture requirements". This step will help us define the Design-to Specifications.
Our "Design-to"-Specifications are part of our system, in our case the *in-vitro*-system. The "Design-to"-Specifications mainly describe in detail how our planned product can be designed to meet the target definitions and we need to show the correspondence with the other sub-systems in our system and the target definitions.

If we take the flow-loop sub-system as an example in our case, we need to define the requirements for the subsystem itself ("Why does this subsystem exist?") and design this sub-system in accordance with the other subsystems ("How does the sub-system need to be designed to meet the requirements with the other subsystems ?").

After defining the "Design-to"-Specifications we need to translate the "Design-to"-Specifications into "Build-to"-Specifications, that represent the actual technical requirements of our component to be developed. The specifications should take the form of a checklist that can be easily followed when

deciding on technical solutions. For a better understanding of the above, Figure 11 shows an easy translation performed:

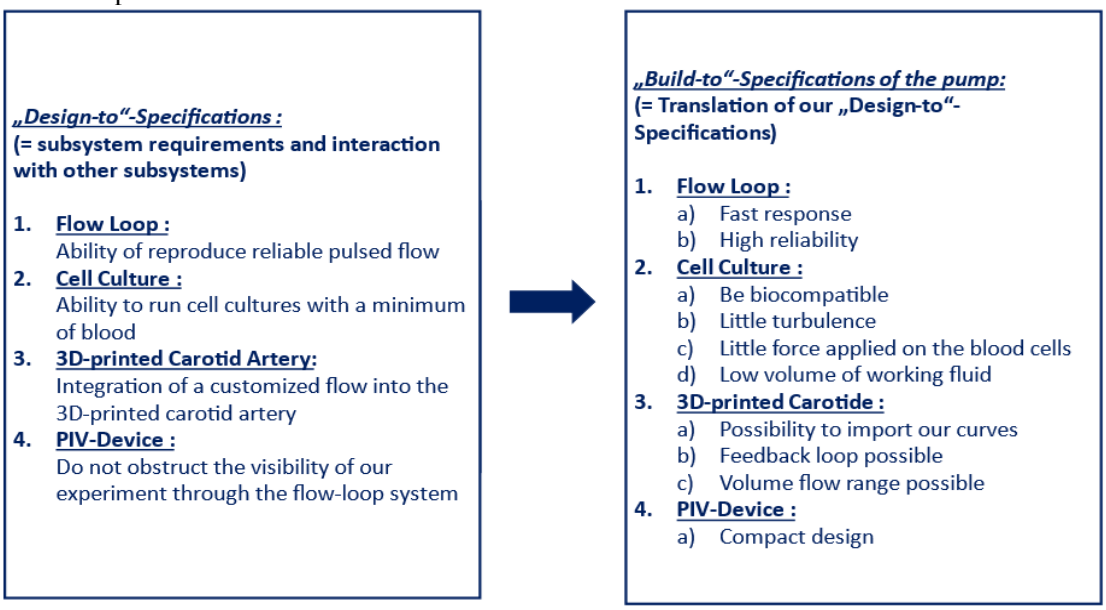


Figure 10. Translation of the "Design-to"-Specifications to the "Build-to"-Specifications

Once we have reached the "Build-to" Specifications, the Spiral-Model will be started to ensure an iterative design process and start with a successive refinement. At each run of the Spiral-Model, we will concretize the "Build-to" Specifications to provide a quantitative checklist of expected features.

Since there are no prior art proposals that take into account all our subsystems and thus allow us to reconstruct the system, a state-of-the art was created to find pumping systems that are able to provide us with a pumping signal as desired. Salman [17] proposes 3 subgroups of pumping systems. The most commonly used systems are presented below. The state-of-the art also proposes more complex solutions with the combination of different pump systems. These systems are evaluated in the second run of our spiral system.

1. *Generators for a constant volume flow with control :*
    a. Centrifugal pumps
    b. Gear pumps
    c. Gravity-driven systems
2. *Pulse generators :*
    a. Valves with constant volume flow generators
    b. Piston-cylinder configurations
3. *Commercially available pumps :*
    a. HarvardPump
    b. SuperPump
    c. CardioFlow

In a multidisciplinary team it was decided that the following plans were not sufficient to achieve our project goals :

- Gear pumps : Gear pumps exert too much force on the blood and therefore cannot be used.
- Gravity-driven systems : The very high demands on the curve (high frequency and high accuracy of the curve) do not allow a gravity-driven system.

The following are evaluated as critical :

- Centrifugal pumps : Hypothesis that centrifugal pumps exert too much force on the blood and are therefore not suitable.
- Piston-cylinder configurations : A high blood volume is needed, so this pump system may not be suitable.

After the start of the conceptual designs, more detailed plans will follow for further evaluation and creativity sessions with a better understanding of our question.

4.2. Comparison to the AM-Biopart methodology

The "Bottom-Up"-Approach of the AM-Biopart methodology follows very well a systems thinking approach. The development of a sub-system starts with a simplified product that is verified and becomes more and more complex until the final model is reached (corresponds to the spiral model). After implementation, the functional requirements are confirmed with the other subsystems (cell culture and flow loop). This is the "System integration test and verification" level. And as a final step, the AM-Biopart methodology proposes a validation of our developed system. Therefore, the method proposed in this paper shows a very high agreement with previous models presented in this direction.

5 FUTURE WORK

This paper proposes a design methodology that takes into account different disciplines and shows an effective way for agile product development in multidisciplinary teams in bio-medical laboratories. The main question that is answered is : "How can we, as a team of engineers and bio-medical professionals, ensure that products are developed with minimal cost by identifying potential defects early, improving quality by integrating all disciplines, and improving our understanding of complex research questions?"

This question is answered with a combination of the Vee model and the Spiral model. Both are very well-known models for agile product development.

The "Top-Down"-Approach of the Vee-Model describes the step of translating the target specifications of our product via "Design-to"-Specifications that are translated to "Build-to"-Specifications. These "Build-to"-Specifications define our entry into the Spiral-Model, that leads us through 5 phases to implement our subsystem. The "Bottom-Up"-Approach consists of verification and validation parts.

Future work includes further development of this methodology through a proof of concept on other subsystems to achieve a fully reliable methodology for efficient communication between engineers and bio-medical professionals.

REFERENCES

[1] NERSESSIAN, Nancy J. How do engineering scientists think? Model-based simulation in biomedical engineering research laboratories. Topics in Cognitive Science, 2009, 1. Jg., Nr. 4, S. 730-757.

[2] BLANCHARD, Benjamin S.; FABRYCKY, Wolter J.; FABRYCKY, Walter J. *Systems engineering and analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 1990.

[3] ACKOFF, Russell L.; ACKOFF, Russell Lincoln. *Creating the corporate future: Plan or be planned for*. University of Texas Press, 1981.

[4] HABERFELLNER, Reinhard, et al. *Systems engineering: fundamentals and applications*. Springer, 2019.

[5] SAGE, Andrew P.; ROUSE, William B. *Handbook of systems engineering and management*. John Wiley & Sons, 2014.

[6] FORSBERG, Kevin; MOOZ, Harold. The relationship of systems engineering to the project cycle. *Engineering Management Journal*, 1992, 4. Jg., Nr. 3, S. 36-43.

[7] KAPURCH, Stephen J. (Hg.). *NASA systems engineering handbook*. Diane Publishing, 2010.

[8] BOEHM, Barry. A spiral model of software development and enhancement. ACM SIGSOFT Software engineering notes, 1986, 11. Jg., Nr. 4, S. 14-24.

[9] COHEN, David; LINDVALL, Mikael; COSTA, Patricia. An introduction to agile methods. *Adv. Comput.*, 2004, 62. Jg., Nr. 03, S. 1-66.

[10] WHEATCRAFT, Louis S.; LEWIS, Layne. Concept Maturity Levels. In: INCOSE International Symposium. 2018. S. 1592-1607.

[11] ARNTZEN, Aurilla Aurelie Bechina; LEGUY, Carole. A model of knowledge sharing in biomedical engineering: Challenges and requirements. 2007.

[12] WYATT, Jeremy C. 10. Management of explicit and tacit knowledge. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 2001, 94. Jg., Nr. 1, S. 6-9.

[13] WONG, Kelvin KL. *Methods in research and development of biomedical devices*. World Scientific, 2013.

[14] Ritter, M., Segonds, F., Vedel, P., NGuyen, K.A., Kassasseya, C., & Bartolucci, P. (2020). Can additive manufacturing help to replicate a complex vascular phantom for medical research? Paper presented at the eCONFERE'20.

[15] NGuyen, K.A., Lenoir, L., Amar, V., Segonds, F., Akçay, N., Seguin, M., . . . Bartolucci, P. (2019). Development of a Personalized 3D Carotid Model for Cerebral Vasculopathy Monitoring in Sickle Cell Disease Blood, 134, 3570. doi: https://doi.org/10.1182/blood-2019-124327

[16] Lenoir, L., Segonds, F., NGuyen, K.A., & Bartolucci, P. (2019). A methodology to develop avascular geometry for in vitro cell culture using additive manufacturing. International Journal of Bioprinting, 5(2), 238. doi: http://dx.doi.org/10.18063/ijb.v5i2.238

[17] SALMAN, Huseyin Enes, et al. Biomechanical investigation of disturbed hemodynamics-induced tissue degeneration in abdominal aortic aneurysms using computational and experimental techniques. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2019, 7. Jg., S. 111.

Contact principal : Saskia Eckert

Coordonnées : Saskia_sophie.eckert@ensam.eu

LEAN APPROACH TO FOSTER ADDITIVE MANUFACTURING IN SUSTAINABLE DESIGN: A METHODOLOGICAL PROPOSAL

Alberto Faveto[1,2], Franco Lombardi[1], Paolo Chiabert[1], Frédéric Segonds[2]
1 Department of Management and Production Engineering - Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24, Torino 10129, Italy
2 Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI – Arts et Métiers Institute of Technology – HESAM University,151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

Abstract: Today, changes in market needs and technological advances influence the product development process. Products must satisfy high-quality standards, be delivered quickly, have a low environmental impact, and be reasonably priced. New phenomena such as distributed and urban manufacturing are emerging to cope with this. We are entering a new era of manufacturing. In this context, methods that prevent waste, support small workshops and encourage DIY are crucial. The purpose of this paper is to lay the foundation for a lean decision support methodology for sustainable design in additive manufacturing applications. In particular, we proposed a five-step procedure to generate empirical knowledge. The proposed method is applied to a Fused Filament Fabrication process evaluating the impact of nine variables on process time, energy and material consumption and production cost. Finally, we analysed the obtained results to give the designer some initial insight into the main parameters to consider.

Keywords: Additive Manufacturing, One-of-a-Kind Production, Sustainability, Quality Control, Lean Manufacturing.

1 INTRODUCTION

The development of the manufacturing industry is a dramatic sequence of changes in technologies and methodology that started at the beginning of the 20th century with the production chain and mass production. The advent of numerical control machines (CNC) in the 70s triggered the period of flexible manufacturing, which made it possible to produce several shapes with the same production line. In the 90s, thanks to the theorization of reconfigurable manufacturing systems (RMS) [1], a new brick was added, allowing the production of different product shapes with a variable production volume. Nowadays, we face a new revolution in the manufacturing industry, characterized by the democratization of the product that entails several paradigms: Crowdsource Manufacturing [2], Cloud Manufacturing [3], Urban Manufacturing [4], and Social Manufacturing [5]. Although they differ in some aspects, it is possible to find some points in common. These paradigms are characterized by (i) an open or easy-to-share design approach, (ii) low production volume, and (iii) high personalization: each user/customer designs and produces his product, creating it himself from scratch, following some design rules, or being supported by an expert designer or a crowd of them.

According to the literature, it is clear that additive manufacturing (AM) is the most suited technology for high complexity, low volume, and high customization application [6]. Moreover, the great majority of the platform that allows the sharing of design data and a democratized approach to manufacturing are based on AM, e.g., Makerbot Thingiverse, RepRap, GrabCAD, etc. [5]

In one-of-a-kind production (OKP), the probability of having defective products is very high [7]; moreover, designers have to test their ideas speedily and inexpensively. On the other side, a

distributed approach to manufacturing can cause a lot of waste and significantly impact the environment. Knowledge generation, storage, and reuse play a fundamental role. Bruno et al. have proposed a paradigm that involves the integration of the Product Lifecycle Management (PLM) with the Manufacturing Execution Systems (MES), employing a central Knowledge Base System (KBS), allowing the communication between designers and the production line in both senses [8]. In this way, it is possible to manage design using data from production to minimize defects [9]. Figure 1 displays a graphical representation of the described paradigm.

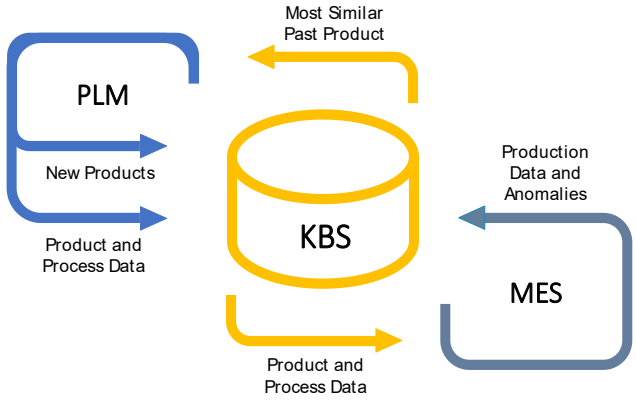


Figure 1 - Integration of PLM and MES through a central KBS, elaboration from Bruno et al. [8]

For all these reasons, as highlighted by Bikas et al., AM designers need to precognition the optimum process parameters and get insight from the production [10]. Furthermore, a tool to make designers aware of quality's impact on cost and environmental impact is crucial [11]. The present work proposes an approach to generate new knowledge during manufacturing to predict product quality and environmental impact by employing a Taguchi experiment in an additive manufacturing case study. In particular, we decided to focus our analysis on Fused Filament Fabrication (FFF) since, according to the literature, it is the most widely diffused technology for its cost-effective ratio [12].

2 STATE OF THE ART

In this section, we present the most relevant literature related to the study of different aspects of sustainability in additive manufacturing design. In particular, the first subsection is related to product quality. Customers' product quality specification is the main issue to be satisfied. The second subsection presents the central literature on environmental sustainability in additive manufacturing. In the third subsection, we cover the economic topic, and finally, in the last subsection, we present the main gaps we have found and want to fill with the present article.

2.1 Product Quality Issue

Additive manufacturing generates new issues in terms of the method of managing and verifying geometric product specifications. Since 1996, ISO Technical Committee 213 has been developing a standardized language to collect, share and verify geometric specifications throughout the product life cycle [13]. This methodology is called Geometrical Product Specification (GPS), and it consists of a standardized way to transform specifications into conditions (i.e., range/area of acceptability) for characteristics (e.g., the distance between two points). The definition of tolerances and specifications in additive manufacturing processes is more complex than in subtractive manufacturing since new process-driven issues and capabilities have to be specified along the product life cycle [14]. In particular, Ameta et al. identified five process-driven issues (build direction and location, layer thickness, support structures, use of heterogeneous materials, and scan/track direction while printing) and three process capabilities (complex geometry, topology optimized shapes features, and internal part infills). E.g., since the build direction or the infill pattern has a significant impact on product mechanical proprieties and surface quality, the designers have to specify this information with all geometric specifications [15].

On the other side, many studies have been proposed to estimate additive manufacturing product quality by investigating the effect of materials, technologies, and processes. Most of these studies focus on analyzing the effect of factors on surface roughness, mechanical proprieties, and dimensional

accuracy [16]. Cojocaru et al., in their work, propose a deep analysis of the impact of process parameters on different mechanical proprieties of PLA products manufactured through FFF [17]. In [18], the authors analyze various FFF parameter optimization articles, classifying them based on the feedstock filament. They also show that the additive manufacturing research focusing on product cost, process cost, and environmental factors is still a minority. Similar conclusions are presented in [16] and [19]. In particular, Mohamed et al. highlight missing optimization techniques to find the optimal combinations for a certain set of process parameters and the lack of studies focusing on production time and product cost [16]. Most studies that analyze the influences of design and manufacturing factors on product quality are process dependent and show a lack of generality and maturity, reflecting a shortage of reliability and reusability.

2.2 Environmental Sustainability Issue

One of the three main pillars of our analysis is the environmental sustainability of additive manufacturing processes. In the literature, it is possible to find a significant amount of research articles and reviews on this particular topic, meaning that the interest in knowing the future implications of additive manufacturing in an environmentally sustainable manufacturing paradigm is elevated. From a circular perspective, to decrease the impact of manufactured products on the environment, three different goals have to be pursued: (i) reduce the waste during the product lifecycle (narrow the loop), (ii) increase the lifespan of products (slowing the loop) and finally, giving new life to products (closing the loop) [20]

In scientific literature, the main object of analysis in environmentally sustainable additive manufacturing is the direct consumption of machinery. This concern is probably since material waste in additive manufacturing is inferior to traditional manufacturing, mainly in metal additive processes like electron beam melting (EBM) [21]. In [21], the authors study the FFF process with different materials and propose a model to estimate the total energy consumption based on the production time and the deposed material. While in [22], the influence of the principal manufacturing parameters on energy consumption, material wastes, and mechanical proprieties is studied. What is clear from many studies is that the main factor influencing energy consumption is process time: the longer the process takes, the more machine components will have to be heated and consume energy. Hence, layer height and infill strategy significantly impact energy consumption since they can enlarge the needed building time [22,23].

The study of the materials and their recyclability is another topic in recent scientific literature. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and nylon are two of the most common materials used in FFF processes. These materials are derived from crude oil, and their recyclability is not widely spread [24]. Another common material used in additive manufacturing applications is polylactic acid (PLA). As the two precedent materials, it is not considered recyclable. Nevertheless, it is produced by corn starch, and it is considered biodegradable. For this reason, its environmental impact is lower. In the literature, it is possible to find several examples of procedures and methodology to recycle material for FFF applications [24] and how the material behaves as a result of several recycling cycles [25].

Recently scholars have been investigating the usage of commonly recyclable and recycled materials. For instance, in [26], the authors present profound research on the effect of several parameters on the mechanical proprieties of high-density polyethylene HDPE. This plastic is widely used in consumers' applications like cosmetics and detergent flasks, and recyclable plants of HDPE are spread on a large scale. Finally, another way to reduce additive manufacturing's material environmental impact is by preventing the waste by ensuring the product quality, for example, by monitoring the product quality in real-time through defects image recognition [9,27]

A helpful tool that is becoming increasingly used is the Life Cycle Assessment (LCA). Some works present methodologies to support the designer in choosing the AM machine and selecting production parameters to minimize the product impact during its lifecycle based on environmental strategy decisions [28,29].

2.3 Economic Issue

The final goal of the manufacturer is to produce a product that satisfies the quality standards and minimizes the production costs. For this reason, the economic point of view is indissoluble from a comprehensive analysis. Khorram et al. studied in which context AM technology is sustainable from an economic perspective and the main organizational and operational factors that impact its

sustainability. Their analysis shows that additive manufacturing is mainly suitable for small companies that produce in small batches. Furthermore, AM can bring a vast advantage to these companies thanks to this technology. They can make inside what previously was outsourced [30]. In the same context, Baldinger et al. propose a profound cost estimation methodology to evaluate in a make-or-buy scenario if it is more convenient to design the part and produce it inside using AM or outsourced it [31]. Finally, Life Cycle Costing (LCC) is a tool not yet widely used in the study of AM. It might be intriguing to study the costs of the product manufactured in additive along its life cycle and perhaps study possible impacts on the circular economy.

2.4 Gaps

In this final paragraph, we decided to highlight the principal gaps we want to fill with the present work. It is clear the interest in studying a methodology to support the AM designer in decision making [32]. Nevertheless, we have perceived two main gaps: (i) the lack of a simple, standardized lean methodology to create and capitalize the knowledge in the OKP additive manufacturing process to allow quicker and wasteless prototyping and production, and (ii) the lack of a method to generate knowledge related to the product cost and its environmental impact as well as the product quality, in order to foster its sustainability all along the lifecycle with a particular outlook on circularity.

3 METHODOLOGY

A design optimization tool can be based on different approaches, in particular: (a) use the computer simulation to test design aspects' impact on final product performances, (b) use an analytical model based on physical law (white box modelling) to build a full optimization model, and (c) use an experimental data-driven approach (black box modelling) to estimate the relationships statistically [33]. Since the primary purpose of this work is to suggest an easy-to-replicate approach, the first two approaches (a-b) are not suitable candidates. Computer simulation needs previous knowledge and can be expensive in terms of costs and time. An analytical approach allows for achieving results in a fast and inexpensive manner. Nonetheless, an analytical approach needs a deep understanding of physical phenomena and complex mathematics to build deterministic functions [33]. For these reasons, we decided to develop an experimental data-driven methodology to estimate the relationships between parameters and performances.

A possible idea for making an empirical approach work would be to integrate it with the knowledge of process experts. The model would optimize qualitative and quantitative performances, i.e., manufacturing cost and environmental impact (like manufacturing, use, etc.). Each of the decided performances has to be weighted according to design decisions.

The proposed methodology is displayed in **Figure 2**, and it consists of five different steps: (A) benchmark design, (B) performance definition, (C) parameter definition, (D) design of experiment and finally, (E) result analysis.

According to de Pastre et Al., creating a general standardized benchmark for experimentation is impossible. The design choice must be made by evaluating the experimental decisions and the metrological limits and specificity of the production process [34]. Nevertheless, several guidelines exist, i.e., ISO 52902 [35]. For all these reasons, the first step of our proposed methodology is to generate a new benchmark in order to satisfy three distinct aspects: the design purpose, the manufacturing limits and finally, the metrological limits. These initial steps have to be finalized with the support of different experts. The designer has to choose the shapes, the structures and mechanical properties he wants to test. These choices must meet the capacity of the machines and the metrology instruments accessible [34]. Step two consists of the definition of the central performances the designer will assess. A combination of quality, environmental, and cost performance is recommended if possible. Park and Kremer extensively analyze the literature, proposing the most suitable set of environmental indicators from a practical and utility perspective [36]. The third step lies in the definition of the factors to be studied. The most commonly analyzed parameters are layer height, thickness, printing speed, build orientation, number of shell lines, nozzle temperature and plate temperature [17]. The fourth step entails the definition of the experiment design. A full factorial design is indicated if the number of studied factors is low. Nevertheless, a Taguchi experiment is broadly used in the literature for similar purposes [37]. Finally, the last step involves the analysis of the results to generate a statistical model able to predict the machines' performances for each set of parameters.

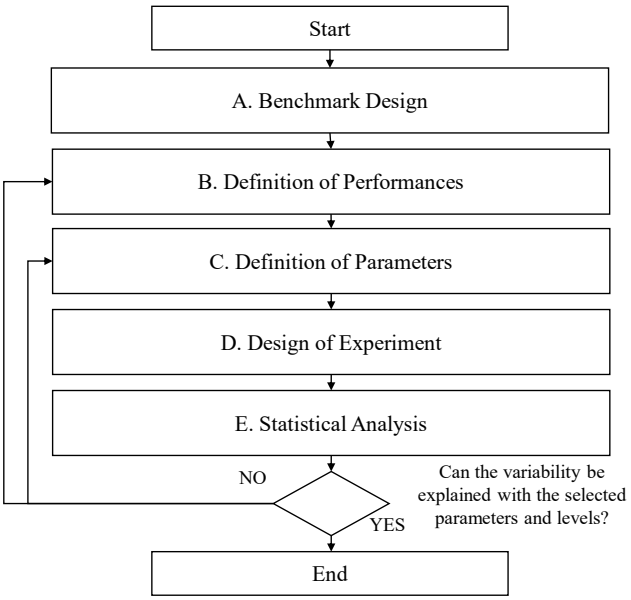


Figure 2 - Methodology Flow Chart

4 METHODOLOGY VALIDATION

In this chapter, we present the application of the proposed methodology in a real case study. Our experimentation is performed using a Raise 3D E2, a desktop additive manufacturing machine for FFF application with two independent extruders. The benchmark is designed with FreeCad (v0.19), and the G-code generation is performed using the machine's proprietary slicer IdeaMaker (v4.2.3).

4.1 Benchmark Design

Designing a benchmark part is the first step of the proposed methodology. As aforementioned, the design choices must match the experimental goals with production and metrological limits. In order to do that, we analyzed the machine limits, and we decided on the part dimensions keeping in mind the tools we possess, using the ISO 52902 as a reference. Figure 3 shows the orthogonal projection of the designed benchmark with the main measures detailed.

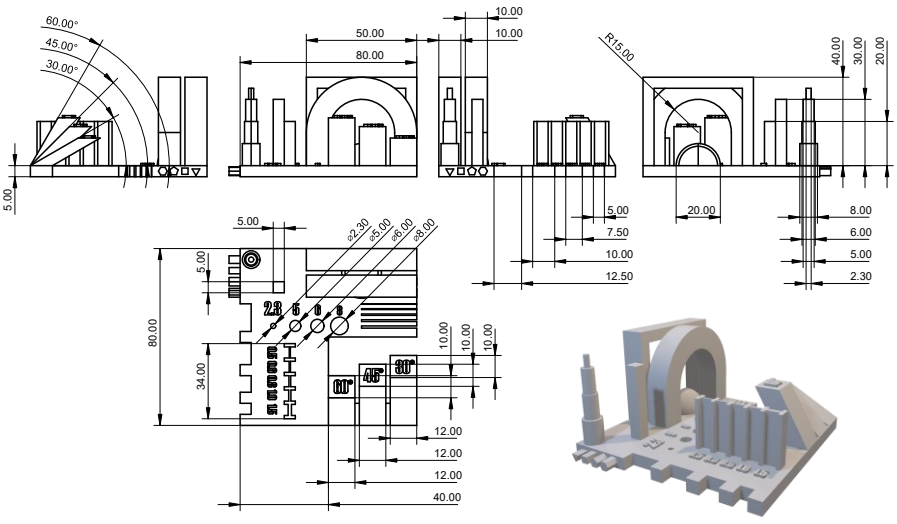


Figure 3 - Benchmark Orthogonal Projection (Left, Frontal, Right Back, and Top View) and 3D Representation with the main dimensions

The benchmark is composed of eleven subparts. Each subpart can assess the accuracy, the resolution or the surface texture of different geometrical shapes. Table 1 describes the main goals of the subparts.

Table 1 - Benchmark subpart specification

Subparts	Goals
Bridge	Test linear accuracy and surface texture
Arc	Test linear and circular accuracy and surface texture
Caved Emisphere	Test circular accuracy and surface texture
Holes	Test holes resolution (diameter and depth)
Pins	Test pin resolution (diameter and height)
Side	Test linear accuracy (position and straightness)
Ribs	Test ribs accuracy (thickness and straightness)
Slots	Test slot accuracy (width, flatness and parallelism)
60°, 45° and 30° Slopes	Test surface and overhangs texture with different slopes

4.2 Definition of Performances

As detailed before, it is possible to find an extensive list of FFF parameter analysis publications in the literature. Still, usually, scholars focus on: (a) Product Mechanical Proprieties [17] and (b) Product Quality [38]. In OKP applications, product quality to avoid rejection is crucial; nevertheless, we think a holistic approach should consider quality and several trade-offs like product cost and environmental impact. In this sense, we decided to study four different parameters: (i) the material consumption measured in g, (ii) the production time measured in s, (iii) the energy consumption measured in VAh and finally, (iv) the production cost measured in €.

In order to measure the energy consumption, we installed an amperemeter in series and a voltmeter in parallel on the machine alimentation circuit. The sensors are the AC5712 current sensor and ZMPT101B voltage sensor. Using an Arduino board (https://www.arduino.cc/), we measured the V_{RMS} and A_{RMS} each second to compute the apparent power in VA. After that, we used this value to calculate the whole energy consumption in VAh. According to the literature, the energy consumption in AM can be computed per piece and weight or volume of extruded material [21]. We decided to use the energy per piece since the produced part is a benchmark and has the same geometrical characteristics every time. Moreover, in the FFF application, it is more common to use this indicator. VAh represents the apparent energy absorbed by the machine, and this value keeps into account the active energy used by the device and the reactive power losses. Reactive power generates extra load, and the network must be appropriately sized. Furthermore, in industrial applications, reactive energy can consumption directly impacts energy cost, and, from an environmental perspective, a VAh-based bill is preferable. Analyzing the phase shift between system voltage and current, when the machine is stopped, the cos φ is around 0.89, while when the device is running, it drops as low as 0.4. This significant variation is justified by the use of induction motors inside the machine that draw reactive power to operate.

The production cost is evaluated using direct item cost allocation proposed in [39], considering three components: the material used, the energy consumption and the machine depreciation. In particular, a cost of 0.0246 €/g and 0.0258 €/g is considered, respectively, for the recycled and not recycled PLA. A cost of 0.1445 €/kVAh is considered equal to the average European price in the second half of 2021 for non-household consumers [40]. Finally, a charge of 0.20€/h is used to estimate the machine's wear and depreciation. This value is computed using the price of the device equal to 2.999 € and dividing it by its expected lifespan. In the literature, it is possible to find some additive machine expected life estimation: e.g., in [41], the authors proposed a machine lifespan comprised between 4.800 h and 14.400 h. However, they state that these values are estimated downward since the technology is recent, so the user is likely to change the machine frequently before it reaches the end of its life. For this reason, the expected life of 15.000h is chosen in the present work.

4.3 Definition of Parameters

We have considered some parameters related to Product Material, Manufacturing Parameters, and Product Finesse. According to Laverne et al., users who have scarce Additive Manufacturing Knowledge (AMK) and Eco-Design Knowledge (EDK) prefer to have simple guided parameters so they can spend the most time on creative design [28]. For this reason, we decided to focus only on

easily accessible parameters. In particular, we decided to analyze the impact of using a Recycled PLA instead of a normal one. The material used for this experiment is black PLA with a 1.75 mm diameter and a density equal to 1.24 g/cm^3. Then we decided to investigate the parameters present on the first page of the Slicer Software used to create the G-code (presence of support, presence of base, layer height, infill rate, shells number), and all the parameters suggested by the filament producer (working temperature, plate temperature, and printing speed). The levels have been chosen based on expert suggestions for the factors present on the software's first page. In contrast, we used the suggested filament producer's recommended range for the other parameters. Table 2 displays the experiment factor levels.

Table 2 - Factors and their levels

Factors	Level (–)	Level (+)
Material Type	Recycled PLA	Not Recycled PLA
Working Temperature	200°	215°C
Plate Temperature	T_a	50°C
Printing Speed	40 mm/s	80 mm/s
Support	No	Yes
Base	No	Yes
Layer Height	0.1 mm	0.3 mm
Infill Rate	10%	60%
Shells Number	1	3

4.4 Experiment Design

Since we have nine parameters on two levels, a complete DoE would require 2^9 tests. We, therefore, opted for an experimental plan with the Taguchi method formed by 32 orthogonal vectors (L32). Table 3 shows the entire experiment through 32 arrays based on the nine factors on two levels.

Table 3 - Taguchi Experimental Plan, nine factors on two levels using 32 orthogonal arrays.

Experiment ID	M	WT	PT	PS	S	B	LH	IR	SN
E1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
E2	–	–	–	–	+	–	+	+	+
E3	–	–	–	+	-	+	–	+	+
E4	–	–	–	+	+	+	+	–	–
E5	–	–	+	–	–	+	+	–	+
E6	–	–	+	–	+	+	–	+	–
E7	–	–	+	+	–	–	+	+	–
E8	–	–	+	+	+	–	–	–	+
E9	–	+	–	–	–	+	+	+	–
E10	–	+	–	–	+	+	–	–	+
E11	–	+	–	+	–	–	+	–	+
E12	–	+	–	+	+	–	–	+	–
E13	–	+	+	–	–	–	–	+	+
E14	–	+	+	–	+	–	+	–	–
E15	–	+	+	+	–	+	–	–	–
E16	–	+	+	+	+	+	+	+	+
E17	+	–	–	–	–	+	+	+	+
E18	+	–	–	–	+	+	–	–	–
E19	+	–	–	+	–	–	+	–	–
E20	+	–	–	+	+	–	–	+	+
E21	+	–	+	–	–	–	–	+	–
E22	+	–	+	–	+	–	+	–	+
E23	+	–	+	+	–	+	–	–	+
E24	+	–	+	+	+	+	+	+	–
E25	+	+	–	–	–	–	–	–	+
E26	+	+	–	–	+	–	+	+	–

E27	+	+	−	+	−	+	−	+	−
E28	+	+	−	+	+	+	+	−	+
E29	+	+	+	−	−	+	+	−	−
E30	+	+	+	−	+	+	−	+	+
E31	+	+	+	+	−	−	+	+	+
E32	+	+	+	+	+	−	−	−	−

5 RESULTS

In this preliminary analysis, we analyze the significance of the different variables on the four response performances, and then we examine the relative impacts qualitatively. In order to do that, we assess a simple linear model with all the variables, six of them are continuous numerical variables. At the same time, the last three (Material Type, Suppor and Base) are nominal variables (R-NR, Y-N and Y-N). The three nominal variables are transformed into six dummy variables, one for each manifestation (e.g., Material Type Recycled is a boolean variable equal to 1 if recycled PLA is used and 0 if not). Finally, to avoid multicollinearity, only three dummy variables are maintained, and the remaining effects are combined into the constant term of the regression model. As anticipated before, we started with the full linear model, and in order to find the significant variables, we cancelled the not significant ones starting from the higher P-Value and in each step, measuring the relative variation of the R^2. To represent significativity, we used the following convention: *** < 0.1%, ** < 1%, * < 5%, and † < 10%.

The first response analyzed is the material. The first model with all nine variables presents an R^2 equal to 0.9663. After four steps, we arrived at the model shown in Table 4, and the same results are graphically displayed in the box plot in Figure 4. The final model has an R^2 equal to 0.961 and an R^2 adjusted equal to 0.9535. A decrement inferior of 1% from the initial model demonstrates the strong non-significance of the eliminated parameter and the robustness of the final model. The F value of the final model with five variables is 128.1 on 5 and 26 degrees of freedom, and a corresponding P-value of 0.000.

Table 4 – Regression model coefficients with Material Consumption as a response variable

Response: Material	Coefficient	Std. Error	T Value	P-Value	
(Intercept)	11.34462	1.57397	7.208	0.000	***
Support Yes (boolean)	9.5	0.87443	10.864	0.000	***
Base Yes (boolean)	10.55	0.87443	12.065	0.000	***
Layer Height	42.45	4.37215	9.709	0.000	***
Infill Rate	0.26823	0.01749	15.337	0.000	***
Shells Number	3.01313	0.43721	6.892	0.000	***

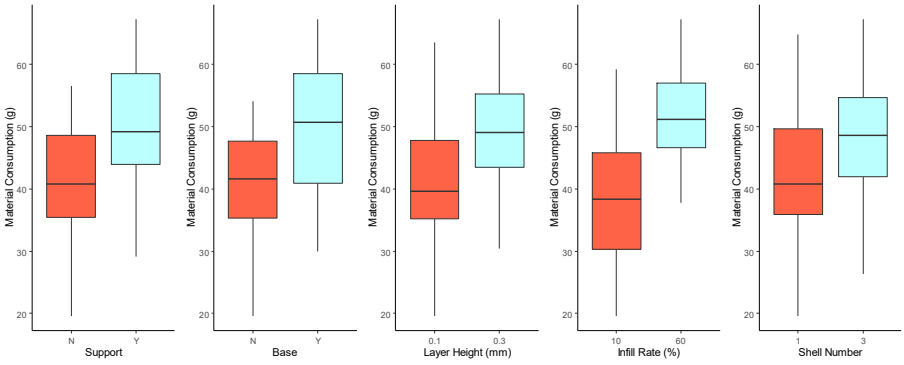


Figure 4 – Box plots of the significant factors in Material Consumption

The results obtained with the first model are pretty obvious. The temperature and printing speed variables do not significantly impact material consumption. Moreover, recycled or non-recycled PLA results in the same material consumption.

The second model has as a dependent variable the production time. The first model with all nine factors has an R^2 equal to 0.9049. Again, we removed all the not-significant variables one by one. The final resulting model has only three predictors: the boolean variable representing the presence of supports, the layer height and the infill rate. The R^2 of the final model is equal to 0.8934, and the adjusted one is 0.8819. Its F value is 78.19 on 3 and 28 degrees of freedom and a P-value of 0.000. The summary of the model is represented in Table 5, and the box plot of the significant variable is displayed in Figure 5.

Table 5 - Regression model coefficients with Production Time as a response variable

Response: Time	Coefficient	Std. Error	T Value	P-Value	
(Intercept)	44831.04	2792.42	16.055	0.000	***
Support Yes (boolean)	5016.69	1979.49	2.534	0.0171	*
Layer Height	-130189	9897.47	-13.154	0.000	***
Infill Rate	293.91	39.59	7.424	0.000	***

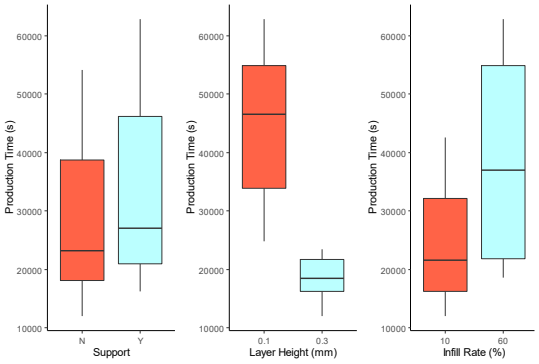


Figure 5 - Box plots of the significant factors in Production Time

The most interesting remark is the considerable impact of the layer height on the production time; this variable also influences the variability.

The third model analyzes the effect of the parameters on energy consumption. As in the two precedent cases, we started from the linear model with all nine independent variables. The first model started with an R^2 equal to 0.8863. At the end of the process, we arrived at a model with four predictors and an R^2 of 0.8674 and an R^2 adjusted of 0.8478. the final model has an F value of 44.17 on 4 and 27 degrees of freedom and a P-value of 0.0000.

Table 6 - Regression model coefficients with Energy Consumption as a response variable

Response: Energy	Coefficient	Std. Error	T Value	P-Value	
(Intercept)	907.714	147.992	6.134	0.0000	***
Plate Temperature	11.978	2.875	4.166	0.0003	***
Support Yes (boolean)	149.375	71.871	2.078	0.0473	*
Layer Height	-3906.12	359.356	-10.87	0.0000	***
Infill Rate	8.727	1.437	6.071	0.0000	***

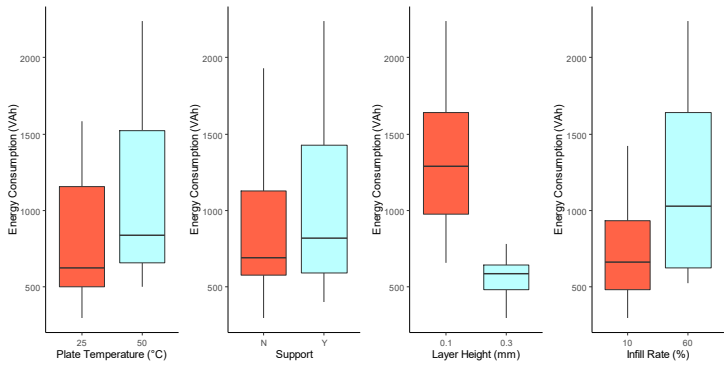


Figure 6 - Box plots of the significant factors in Energy Consumption

Again we noticed the layer height's significant impact on the average consumption and its variability. The literature shows that energy consumption and production time are strongly correlated since the more the production, the more the consumption [23]. From our analysis, it appears evident that all the variables that extend the processing time also impact energy consumption. However, the usage of the plate temperature can also increase global energy consumption. It would be interesting to see if the use of this tool has a significant impact on product quality.

Finally, in the final model, we study as a response variable the production cost. Its initial R^2 was equal to 0.8941. After the exclusion of four non-significant variables, we arrived at the model presented in Table 7, with an R^2 of 0.8860 and an R^2 adjusted of 0.8641. The final model has an F value of 40.41 on 5 and 26 degrees of freedom and a P-value of 0.0000.

Table 7 - Regression model coefficients with Production Cost as a response variable

Response: Cost	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	
(Intercept)	2.81698	0.245803	11.46	0.000	***
Support Yes (boolean)	0.540123	0.136557	3.955	0.001	***
Base Yes (boolean)	0.334544	0.136557	2.45	0.0213	*
Layer Height	-6.72495	0.682785	-9.849	0.000	***
Infill Rate	0.024343	0.002731	8.913	0.000	***
Shells Number	0.136184	0.068278	1.995	0.0567	†

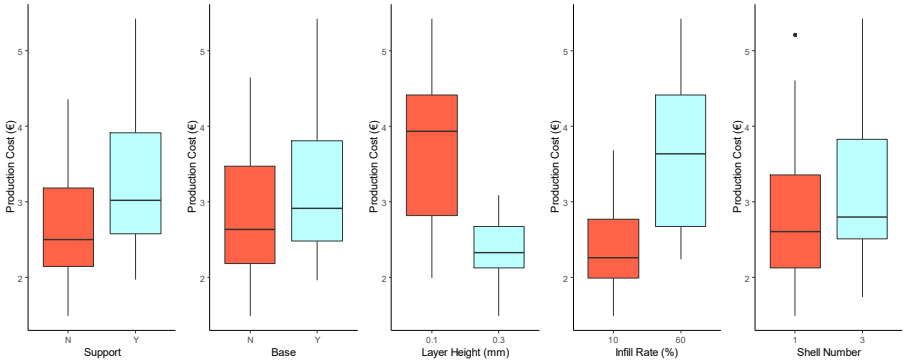


Figure 7 - Box plots of the significant factors in Production Cost

We built the cost variable as a combination of material, time and energy. So this final model is the most comprehensive one. It would be possible to optimize the product by minimizing the cost and diminishing the production time, the energy consumption and the material waste. Nevertheless, this final model did not consider the manufactured part's absolute quality, which plays a crucial role in the design optimization. Moreover, as detailed in paragraph 4.2, we estimate several values that exceptionally impact our analysis, like the cost of energy (very volatile from one period to another) and the expected lifetime of the machine. For all these reasons, in the future, the presented methodology will be supported with quality analysis, and the different performances will be used to

build a multiobjective optimization capable of disregarding the use of money as a generic target to be minimized.

6 CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENT

This article will focus on the methodology application, describing the complete standardized procedure proposed in detail. The results obtained are pretty promising. All four models presented are significant and able to explain much of the variability of the process. However, as previously mentioned, the proposed analysis has limitations: first, the lack of an adequate analysis of product quality, and secondly, the critical dependence on some assumptions made in the cost calculation. Future research will consider product quality as a fundamental index for overall product performance. Furthermore, the dependency of the model on the estimated cost parameters could be solved through sensitivity analysis to see how robust the final, cost-related model is with varying assumptions.
The four models presented are simple linear models. No interaction or study of any quadratic factors has been studied. Also, no assumptions and analyses on residuals have been made. In the future, more in-depth analysis of the definition of a forecasting model will be done.
Furthermore, since this approach should be used quickly and cost-effectively, a second goal would be to evaluate the proposed methodology's overall cost and ease of applicability in low formalized environments, e.g., fab lab or DIY applications.

REFERENCES

[1] Y. Koren, X. Gu, W. Guo, Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends, Front. Mech. Eng. 13 (2018) 121–136. https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0.

[2] X. Gong, R. Jiao, A. Jariwala, B. Morkos, Crowdsourced manufacturing cyber platform and intelligent cognitive assistants for delivery of manufacturing as a service: fundamental issues and outlook, Int J Adv Manuf Technol. 117 (2021) 1997–2007. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07789-7.

[3] O. Fisher, N. Watson, L. Porcu, D. Bacon, M. Rigley, R.L. Gomes, Cloud manufacturing as a sustainable process manufacturing route, Journal of Manufacturing Systems. 47 (2018) 53–68. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.03.005.

[4] A. Barni, E. Carpanzano, G. Landolfi, P. Pedrazzoli, Urban Manufacturing of Sustainable Customer-Oriented Products, in: L. Monostori, V.D. Majstorovic, S.J. Hu, D. Djurdjanovic (Eds.), Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing, Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 128–141. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18180-2_10.

[5] M. Lanz, E. Järvenpää, Social manufacturing and open design, Responsible Consumption and Production. (2020) 668–678.

[6] T. Pereira, J.V. Kennedy, J. Potgieter, A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, Procedia Manufacturing. 30 (2019) 11–18. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003.

[7] H. Yang, P. Rao, T. Simpson, Y. Lu, P. Witherell, A.R. Nassar, E. Reutzel, S. Kumara, Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing, Proceedings of the IEEE. 109 (2021) 347–376. https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034519.

[8] G. Bruno, A. Faveto, E. Traini, An open source framework for the storage and reuse of industrial knowledge through the integration of PLM and MES, Management and Production Engineering Review. (2020).

[9] G. d'Antonio, F. Segonds, F. Laverne, J. Sauza-Bedolla, P. Chiabert, A framework for manufacturing execution system deployment in an advanced additive manufacturing process, International Journal of Product Lifecycle Management. 10 (2017) 1–19. https://doi.org/10.1504/IJPLM.2017.082996.

[10] H. Bikas, A.K. Lianos, P. Stavropoulos, A design framework for additive manufacturing, Int J Adv Manuf Technol. 103 (2019) 3769–3783. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03627-z.

[11] F. Sini, G. Bruno, P. Chiabert, F. Segonds, A Lean Quality Control Approach for Additive Manufacturing, in: F. Nyffenegger, J. Ríos, L. Rivest, A. Bouras (Eds.), Product Lifecycle Management Enabling Smart X, Springer International Publishing, Cham, 2020: pp. 59–69. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62807-9_6.

[12] S. Singh, G. Singh, C. Prakash, S. Ramakrishna, Current status and future directions of fused filament fabrication, Journal of Manufacturing Processes. 55 (2020) 288–306. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.049.
[13] P. Chiabert, M. De Maddis, S. Ruffa, J. Yusupov, Probabilistic method in form error evaluation: comparison of different approaches, Int J Adv Manuf Technol. 92 (2017) 447–458. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0144-1.
[14] G. Moroni, S. Petrò, W. Polini, Geometrical product specification and verification in additive manufacturing, CIRP Annals. 66 (2017) 157–160. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.043.
[15] G. Ameta, R. Lipman, S. Moylan, P. Witherell, Investigating the Role of Geometric Dimensioning and Tolerancing in Additive Manufacturing, Journal of Mechanical Design. 137 (2015) 111401. https://doi.org/10.1115/1.4031296.
[16] O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, Adv. Manuf. 3 (2015) 42–53. https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7.
[17] V. Cojocaru, D. Frunzaverde, C.-O. Miclosina, G. Marginean, The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review, Polymers. 14 (2022) 886. https://doi.org/10.3390/polym14050886.
[18] S. Vyavahare, S. Teraiya, D. Panghal, S. Kumar, Fused deposition modelling: a review, RPJ. 26 (2020) 176–201. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106.
[19] M.U. Obi, P. Pradel, M. Sinclair, R. Bibb, A bibliometric analysis of research in design for additive manufacturing, RPJ. ahead-of-print (2022). https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0291.
[20] N. Bocken, P. Ritala, Six ways to build circular business models, Journal of Business Strategy. ahead-of-print (2021). https://doi.org/10.1108/JBS-11-2020-0258.
[21] F.L. Garcia, V.A. da S. Moris, A.O. Nunes, D.A.L. Silva, Environmental performance of additive manufacturing process – an overview, Rapid Prototyping Journal. 24 (2018) 1166–1177. https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2017-0108.
[22] C.A. Griffiths, J. Howarth, G. De Almeida-Rowbotham, A. Rees, R. Kerton, A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing, Journal of Cleaner Production. 139 (2016) 74–85. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.182.
[23] V. Lunetto, P.C. Priarone, M. Galati, P. Minetola, On the correlation between process parameters and specific energy consumption in fused deposition modelling, Journal of Manufacturing Processes. 56 (2020) 1039–1049. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.002.
[24] S. Chong, G.-T. Pan, M. Khalid, T.C.-K. Yang, S.-T. Hung, C.-M. Huang, Physical Characterization and Pre-assessment of Recycled High-Density Polyethylene as 3D Printing Material, J Polym Environ. 25 (2017) 136–145. https://doi.org/10.1007/s10924-016-0793-4.
[25] N. Vidakis, M. Petousis, A. Maniadi, E. Koudoumas, A. Vairis, J. Kechagias, Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene over Multiple Recycling Processes, Sustainability. 12 (2020) 3568. https://doi.org/10.3390/su12093568.
[26] C.G. Schirmeister, T. Hees, E.H. Licht, R. Mülhaupt, 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication, Additive Manufacturing. 28 (2019) 152–159. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.003.
[27] C. Liu, A.C.C. Law, D. Roberson, Z. (James) Kong, Image analysis-based closed loop quality control for additive manufacturing with fused filament fabrication, Journal of Manufacturing Systems. 51 (2019) 75–86. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.002.
[28] L. Floriane, B. Enrico, S. Frédéric, P. Nicolas, D. Gianluca, C. Paolo, TEAM: A Tool for Eco Additive Manufacturing to Optimize Environmental Impact in Early Design Stages, in: P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël, J. Ríos (Eds.), Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0, Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 736–746. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01614-2_67.
[29] L. Yi, M. Glatt, P. Sridhar, K. de Payrebrune, B.S. Linke, B. Ravani, J.C. Aurich, An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment, Additive Manufacturing. 33 (2020) 101120. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101120.
[30] N.M. Khorram, F. Nonino, G. Palombi, S.A. Torabi, Economic sustainability of additive manufacturing: Contextual factors driving its performance in rapid prototyping, Journal of

Manufacturing Technology Management. 30 (2018) 353–365. https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2018-0131.
[31] M. Baldinger, G. Levy, P. Schönsleben, M. Wandfluh, Additive manufacturing cost estimation for buy scenarios, Rapid Prototyping Journal. 22 (2016) 871–877. https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2015-0023.
[32] M. Alizadeh, M.N. Esfahani, W. Tian, J. Ma, Data-Driven Energy Efficiency and Part Geometric Accuracy Modeling and Optimization of Green Fused Filament Fabrication Processes, Journal of Mechanical Design. 142 (2020) 041701. https://doi.org/10.1115/1.4044596.
[33] R. Rai, C.K. Sahu, Driven by Data or Derived Through Physics? A Review of Hybrid Physics Guided Machine Learning Techniques With Cyber-Physical System (CPS) Focus, IEEE Access. 8 (2020) 71050–71073. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2987324.
[34] M.-A. de Pastre, S.-C. Toguem Tagne, N. Anwer, Test artefacts for additive manufacturing: A design methodology review, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 31 (2020) 14–24. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.008.
[35] ISO 52902: 2019 - Additive manufacturing - Test artifacts - Geometric capability assessment of additive manufacturing systems, BSI, 2019.
[36] K. Park, G.E.O. Kremer, Text mining-based categorization and user perspective analysis of environmental sustainability indicators for manufacturing and service systems, Ecological Indicators. 72 (2017) 803–820. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.027.
[37] X. Liu, M. Zhang, S. Li, L. Si, J. Peng, Y. Hu, Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method, Int J Adv Manuf Technol. 89 (2017) 2387–2397. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9263-3.
[38] K.-E. Aslani, K. Kitsakis, J.D. Kechagias, N.M. Vaxevanidis, D.E. Manolakos, On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the PLA fused filament fabrication process, SN Appl. Sci. 2 (2020) 1016. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2823-z.
[39] A. Faveto, F. Serio, V. Lunetto, P. Chiabert, Methodology for Commodity Cost Estimation Through Production Line Analysis and Simulation, in: Product Lifecycle Management. Green and Blue Technologies to Support Smart and Sustainable Organizations, Springer, Cham, 2022: pp. 28–43. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94335-6_3.
[40] Eurostat, Electricity price statistics, Statistcs Explained. (2021). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers.
[41] M. Mele, G. Campana, G. Fumelli, Environmental impact assessment of Arburg plastic freeforming additive manufacturing, Sustainable Production and Consumption. 28 (2021) 405–418. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.012.

Contact principal: Alberto Faveto

Coordonnées: alberto.faveto@polito.it, alberto.faveto@esnam.eu

MÉTHODE D'AMÉLIORATION DE L'INTEGRATION EXPÉRIENCE UTILISATEUR DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION : APPLICATION À L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

FRON Etienne[1,2], JEAN Camille[1], JOUBERT Morgan[2]
[1] Laboratoire de Conception de Produit et Innovation LCPI – Arts et Métiers Institute of Technology – HESAM University, 151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
[2] Stellantis, Route de Gisy – 78943 Vélizy-Villacoublay

Mots clés : User Experience, Innovation, Design process, Vision

L'objectif de la solution présentée ici est d'améliorer l'implantation de la méthodologie UX dans un processus global de conception en milieu industriel. L'approche se caractérise par une étude de l'existant de l'application de l'UX dans une grande entreprise. Après plusieurs enquêtes de terrain avec les parties prenantes, des problématiques ont été identifiées. Il s'agit de développer un nouveau processus outillé favorisant les échanges d'informations entre les différents services et ainsi justifier les besoins utilisateurs sur des programmes à court et long termes. L'application de cette solution est expérimentée au sein du constructeur automobile Stellantis.

1 CONTEXT

La méthode de l'expérience utilisateur (UX) peut être appliquée à tout type d'activité traitant de l'interaction finale entre le produit et l'utilisateur. La définition de la méthodologie UX est similaire à la capacité d'apprentissage et à la valeur d'usage. C'est un modèle de quantification de l'expérience utilisateur qui couvre presque tous les domaines, y compris les facteurs humains, l'ingénierie de la qualité, la psychologie, les sciences de l'entreprise [1]. L'UX est donc particulièrement connue pour son application dans l'environnement numérique avec les services et produits qui en découlent.
La particularité de l'UX dans la conception est son itération. Elle permet d'adapter le produit au maximum. Si un facteur insoupçonné, en amont du processus [2], vient perturber le dénouement d'une idée lors de la phase de test, il est alors naturel de repartir avec des données d'entrée plus pertinentes.

La méthodologie UX se compose de 5 phases : une phase de découverte qui permet de s'imprégner du sujet ainsi que des problématiques sous-jacentes. Une phase de définition qui décrit les problématiques, puis une phase de design (aussi appelée Idéation) qui formalise les solutions avec les utilisateurs finaux. Une phase de prototypage avec laquelle on réalise des maquettes de principe des solutions. Enfin, une phase de Test où l'utilisateur va pouvoir manipuler ces solutions et en faire des retours.

Seulement, dans l'industrie, la méthode UX peine à être en amont des concepts réalisés dans divers départements (concept de style, concept d'ingénierie et concept marketing) pour différentes raisons.
La première raison est sa jeune implantation dans les groupes industriels, l'approche centrée utilisateur a alors mis du temps à s'adapter avec les processus de conceptions déjà en place. Son deuxième défi est la complexité du marché actuel, l'utilisateur visé souhaite un produit parfaitement adapté à ses besoins et à ses caractères. C'est pourquoi l'usage est si difficile à déceler et figer.
L'objectif de cet article est de mieux implanter l'UX et de favoriser la communication entre les différents services de conception (design, techno, UX, etc..). On présentera en première partie un état de l'art sur l'UX et les méthodes existants de son intégration pour la conception de nouveaux produits. La deuxième partie présentera la problématique, la troisième illustrera au travers d'un schéma la méthode qui nous a permis de construire notre proposition. Enfin, la quatrième détaillera chacune des étapes. Une

conclusion synthétisera les contributions et soulignera les limites ainsi que les perspectives d'amélioration.

2 ETAT DE L'ART

2.1. Définition de l'UX

L'UX est généralement employée pour améliorer le parcours utilisateurs pour réaliser des tâches le plus rapidement et le plus intuitivement possible [3]. Dans l'industrie automobile, cette méthode s'adresse plus particulièrement au domaine des cockpits, c'est-à-dire de toutes les interfaces physiques et numériques que peuvent avoir le pilote mais également le copilote dans le véhicule. Cette intégration de l'UX permet de clarifier parmi les nombreuses attentes des innombrables types utilisateurs. Que cela soit pour l'intégration d'une technologie dans l'habitacle jusqu'à sa personnalisation par le conducteur. Ce positionnement permet également de réaliser un travail plus précis à partir des données deux processus plus en amont. La Brand Expérience [4] qui peut être assimilée à l'image et la philosophie de la marque sur le produit souhaité. Vient ensuite la Customer Expérience, ce processus permet de définir le lien général du produit, de la marque et de l'utilisateur sur tous le cycle d'utilisation (achat, entretien, maintenance…).

L'UX permet également de faire remonter dans le processus via l'intégration ; les problématiques de ces mêmes technologies embarquées. Pour cela, la méthodologie de l'UX intègre des spécialités différentes telles que l'ergonomie. Notamment pour tester et évaluer des IHM liées directement ou indirectement aux produits, mais également pour déterminer une étude quantitative et qualitative des typologies d'usage [5] (et non par des catégories de clients) sur un ensemble de gamme de produit existante.
On y intègre également des ingénieurs spécialisés en électronique qui vont travailler la partie Hardware des IHM. Ils interagissent avec les fournisseurs ainsi que les départements travaillant le Software afin de négocier des budgets et les ajustements techniques. Enfin, les designers, étant naturellement au centre de plusieurs disciplines [6], collaborent avec l'ensemble des parties de l'équipe. Deux catégories se distinguent alors : les designers UX qui vont imaginer l'ensemble du parcours utilisateurs tandis que les designers UI vont le matérialiser.

La figure 1 présente les différentes disciplines gravitant autour de l'UX dans le milieu des IHM.

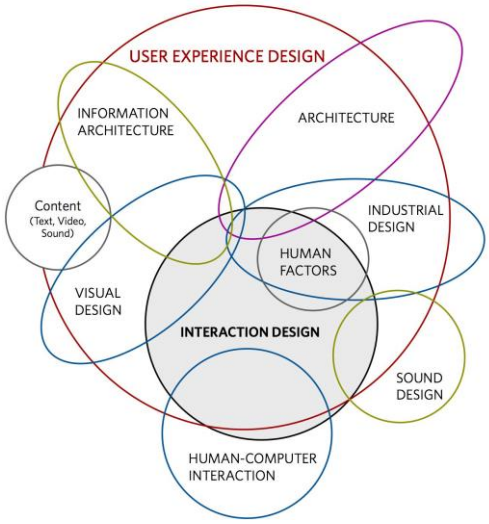


Figure 1. "The Disciplines of User Experience" (Kicker Studio, 2019) [7]

2.2. Mise en place de l'UX dans les organisations du milieu industriel via un Schéma Opérationnel de Développement

La création d'un nouveau produit, comme un véhicule automobile s'inscrit dans un long processus appelé Schéma Opérationnel de Développement (SOD) dans lequel converge à chaque étape de très nombreux corps de métier [8] ; de la conception jusqu'à l'industrialisation. Le schéma (figure 2) illustre ces différentes phases de projet.

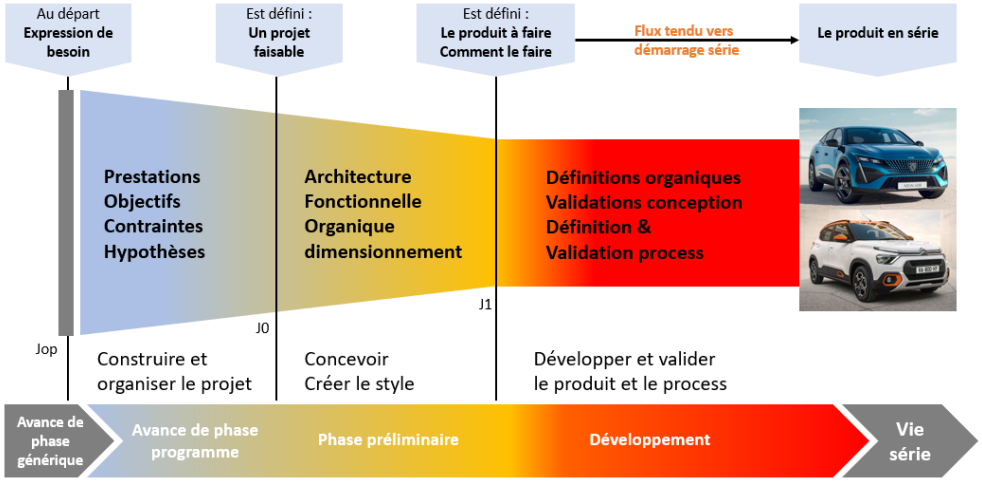


Figure 2. Schéma Opérationnel de Développement (inspiré d'une source Stellantis)

L'ensemble s'inscrit dans un contexte où les Équipes de stylistes ont de fortes capacités organisationnelles et influent de manière importante sur les choix d'éléments ou de nouvelles technologies embarquées. La dimension esthétique étant l'un des premiers critères d'achat dans l'automobile aujourd'hui [9] la raison esthétique est donc la plus écoutée pour se démarquer de la concurrence. Les équipes UX arrivent donc trop souvent tardivement dans le processus global et infuser des résultats dans les prises de décisions. Car le fonctionnement de l'UX dans la conception s'apparente à une forme de compromis au sein des équipes d'ingénierie et de style lors des phases de convergences.

Cependant, selon nos recherches, la littérature ne présente pas d'outil ou de méthode adapté à une meilleur prise en compte de l'UX dans les organisations.

3 PROBLEMATIQUE

Le manque d'implantation dans le processus, le rôle de l'UX et l'opportunité d'intégrer de nouveaux outils nous amène à la problématique suivante :

Comment mieux intégrer le processus UX en amont d'un schéma opérationnel de développement ?

Cette problématique peut s'adresser à des domaines où les produits comportent des IHM physiques et numériques dans des marchés contraints. On peut citer par exemple les smartphones, les siège cabines d'avion de ligne ou le marché de l'électroménagers. Chacun de ces domaines se démarquant principalement par l'expérience utilisateur via leur interface, leur affordance et leur intuitivité numérique.

4 DEMARCHE

Afin d'établir une proposition répondant à cette problématique, nous allons suivre le plan suivant :

Nous allons appliquer cette démarche au sein du groupe Stellantis, fusion des groupes de constructeurs automobile FCA et PSA en 2021. Ce grand groupe se compose donc de 15 marques d'origine européennes et américaines et est implanté partout dans le monde autant sur la production que la vente. L'ensemble du groupe rassemble en 2022 : 281 585 employés et représente aujourd'hui le 4e constructeur automobile mondial. Afin d'expérimenter cette démarche de manière locale, les étapes se déroulent sur les groupements de marques situées sur le site de Vélizy. Ce site regroupe principalement les départements s'inscrivants dans les phases amonts du Schéma Opérationnel de Développement.

5 RESULTATS

5.1. Étude de l'existant

Des entretiens de membres de l'Équipe UX de Stellantis ainsi que des acteurs annexes plus ou moins proches furent réalisés afin d'identifier plus précisément le positionnement de l'UX dans le Schéma Opérationnel de Développement. Dans un premier temps, les retours des postes les plus concernés permirent de faire ressortir chacun leurs problématiques ainsi que leurs attentes vis-à-vis des solutions envisageables. Puis, plusieurs réunions furent programmées pour mettre en accord ces mêmes postes dans l'optique de définir un objectif commun. Ces accords concernaient leur vision commune de la situation actuelle de l'Équipe UX et une forme d'idéalité vers laquelle se tourner. C'est-à-dire une mise en parallèle de la méthodologie vis-à-vis des autres départements. Ce travail nous a mené à la figure 1 représentant le processus idéal de conception.

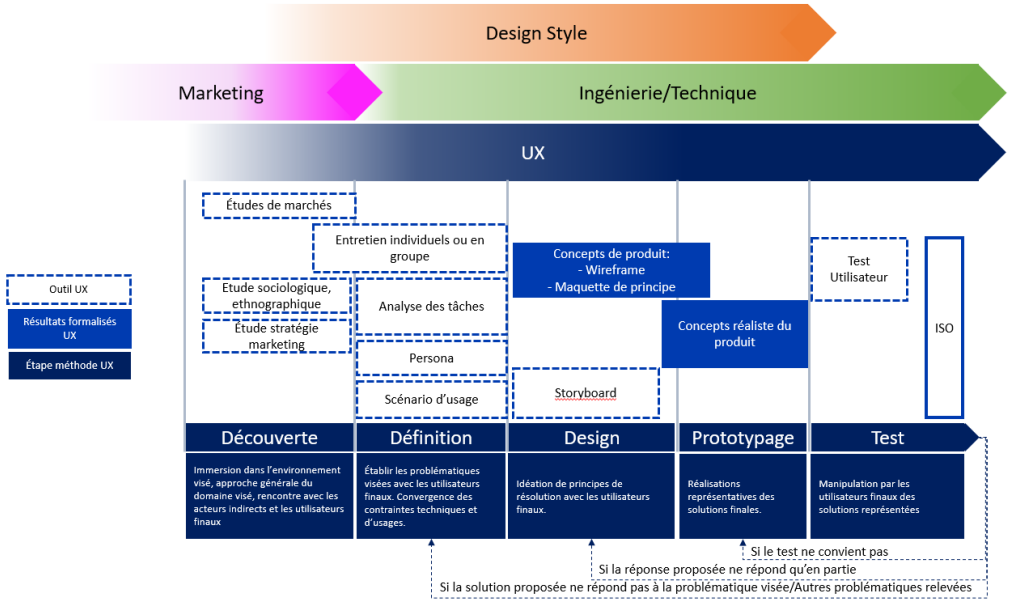


Figure 1. UX methodology integration scheme in an industrial process

Enfin, six acteurs indirects dans le processus de l'UX furent interrogés, ces derniers travaillent et collaborent soit en amont ou en parallèle des postes les plus concernés. Les entretiens abordaient autant les livrables, leurs partages des tâches ainsi que leur compréhension des postes en UX. Ces enquêtes de terrains ont permis de remonter des attentes et des problématiques sous-jacentes aux inconvénients de l'Équipe UX. Les principales problématiques étant l'absence de transversalité dans les décisions des marques ainsi que le principe de silotages au sein des équipes.

5.2. Proposition d'un outil

Afin d'améliorer la communication entre l'UX et les autres départements, nous avons créé un ensemble d'outils de communication et de production appelé Vision UX Transverse. Cette transversalité permet d'établir de manière large les objectifs d'expérience utilisateur d'un groupe sur plusieurs marques sélectionnées mais également de justifier des besoins et des estimations des usages lors des phases de convergence avec les autres entités. Chaque outil pouvant être dans un même temps des livrables, les données sont communiquées et peuvent évoluer selon les mutations des technologies ou des choix esthétiques. L'application transversale de cette méthode offre la possibilité d'établir un recensement des « modules » génériques employés par un ensemble de marque afin d'éviter d'allonger le budget des projets intégrés aux cockpits. La méthode vise donc à recenser ces modèles génériques pour les associer aux usages types étudiés sur des temporalités différentes.

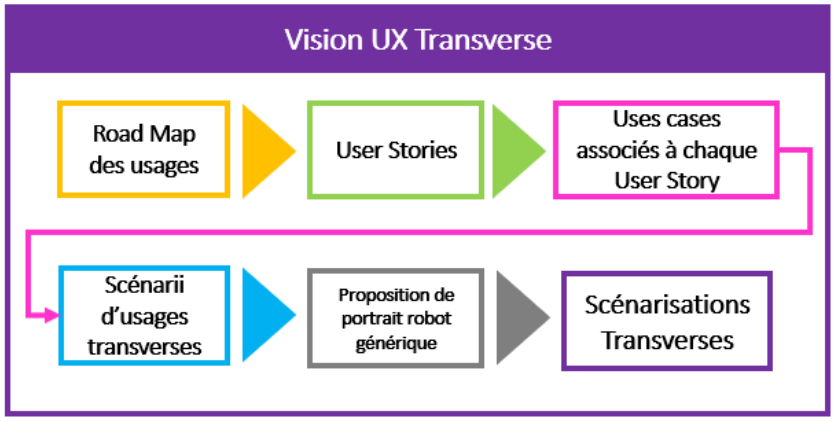


Figure 4. Overview of the Transverse UX Vision

5.2.1. Road Map des Usages

Afin d'avoir une vue d'ensemble des enjeux selon les programmes datés plus en amont, le processus débute en définissant les usages de manière large. S'apparentant à de l'Ergonomie Prospective car on prend en compte des données annexes au usages sélectionnés [10], le but ici est de notifier, sur une période précise et un contexte particulier, les besoin utilisateurs.
L'outil se caractérise sous forme d'un tableau. On sélectionne une famille de produit sur lequel, à travers le séquençage d'un trajet type : on détermine (en termes d'objectif, d'action et des interactions) des usages divers dans une temporalité donnée. Les usages sont décrits par des phrases du point de vue utilisateur afin de mieux se projeter et de rappeler dès le départ vers qui se tourne en premier lieu les enjeux.

5.2.2. User Stories

A partir de ces périodes définies et les grandes lignes des besoins utilisateurs. On en déduit de manière plus précis les contextes d'utilisation dans des scénarii types. On décrit alors des besoins sous forme « en tant que [tel utilisateur] dans [tel contexte], je souhaite réaliser [telle action] afin d'obtenir [tel résultat] ».
Selon un ensemble de famille de produit, on détermine le profil type utilisateur en catégorie puis en sous catégories (personae). On liste ensuite l'ensemble des contextes associés aux catégories des profils utilisateurs. Avec ces deux types d'informations on liste en catégorie les User Stories sous forme de phrase citée précédemment. Dans un dernier temps, on énumèrera les technologies embarquées citées dans les User Stories en leur décrivant leur taux de maturité technologique, la priorisation des marques concernées et l'évaluation UX.

5.2.3. Use cases associés à chaque User Story

A partir de ces User Stories, on veut concevoir le plus de possibilité de modalités d'interactions pour y répondre. Pour cela, on décrit ces modalités afin de garantir une opération réalisable dans la période donnée.
On formalise ces chemins d'interactions via une IHM physique (type « écrans central ») puis numérique (type « page d'accueil ») et enfin des effets retours (type « IA vocale »). Ces chemins établis par numérotation sont ensuite énumérés sous forme de liste appelée « Liste parcours de modalité ». Cette formalisation est évidemment évolutive selon les arrivées entre temps d'autre technologies ou de changement de priorisation des marques.

5.2.4. Scénarii d'usages transverses

Ces mêmes parcours de modalité d'IHM physiques puis numériques permettent ensuite d'aider à la rédaction des scénarii. Selon ces listes associées aux familles de produit, on y place, dans les étapes d'un trajet type ou d'un moment de vie entre l'utilisateur et le système (machine, objet ou service), les parcours de modalité d'interaction.

5.2.5. Propositions de portraits-robots génériques

En suivant l'outil précédent, on liste les technologies possibles selon les familles de produits et les propositions des équipes styles.
Le portrait-robot générique (figure 5) met en scène les solutions techniques les plus souvent évoqués précédemment dans les familles de produit. Cette formalisation comporte une représentation visuelle simplifiée d'un cockpit comportant les différents éléments de réponse. Chaque technologies ou éléments d'IHM (physiques et numériques) sont décrites selon leur évaluations.

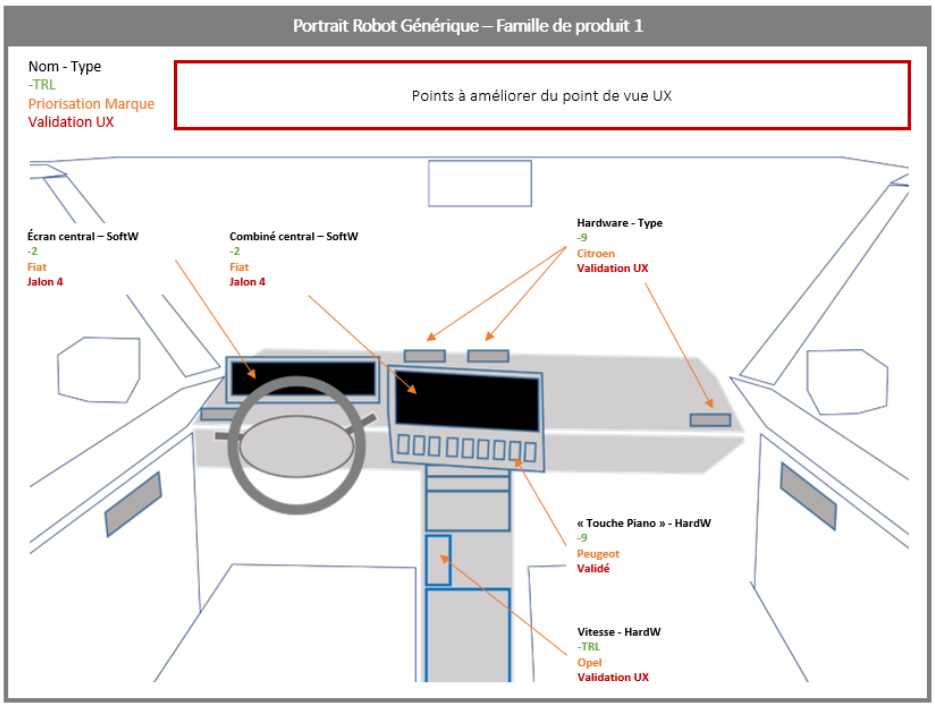


Figure 5. Portrait-Robot générique

5.2.6. Scénarisations transverses

Une fois le portrait-robot générique et les scénarii des parcours de modalité établis, le but étant ici de réaliser un Storytelling selon les familles de produits. L'outil présenté ici (figure 6) n'est qu'une aide à la réalisation des scénarii animés permettant de communiquer aux autres équipes (des marques composants la famille des produits) les projets en cours.

On représente graphiquement les étapes du trajet type à bord du portrait-robot ainsi que les interactions. Les technologies viennent ensuite s'implanter sur les types de cas d'usages. Les marques viendront se positionner ensuite sur les éléments cités.

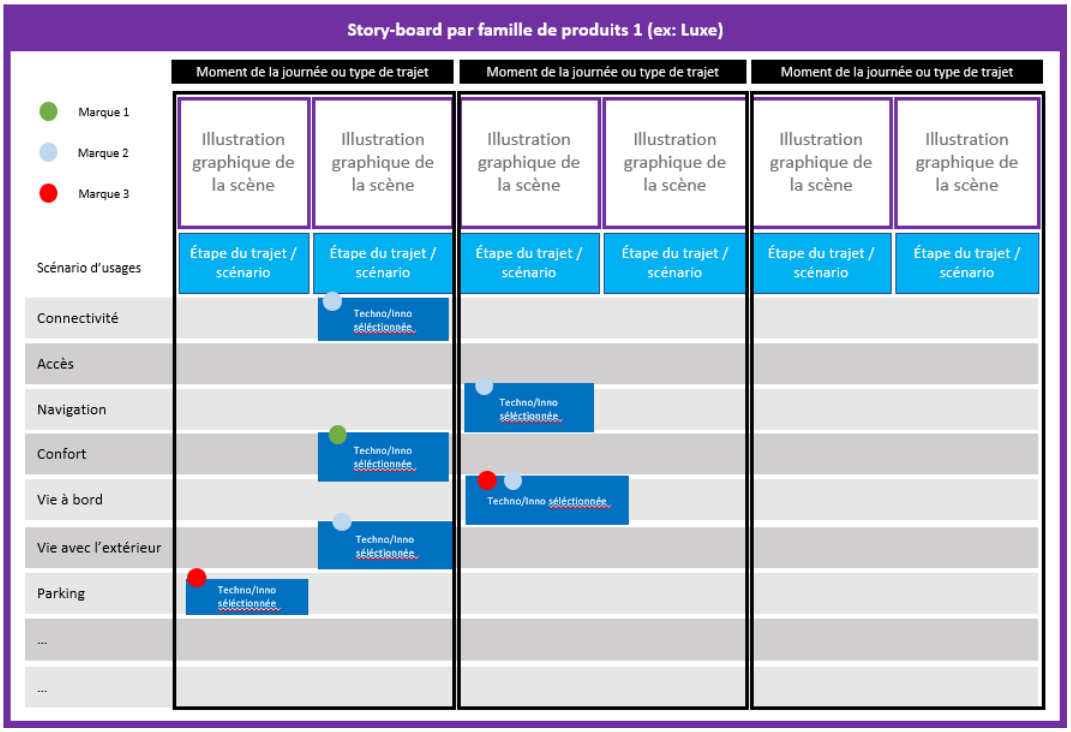


Figure 6. Scénarisation transverse

5.3. Test de l'outil

Cet outil sera mis en place pour les programmes à venir et testé afin de voir si la communication est plus fluide entre les équipes positionnées en phase amont ainsi qu'en avance de phase.

6 CONCUSION ET PERSPECTIVES

L'UX nécessite d'être mieux intégrée dans l'organisation des projets de véhicules. A la suite d'un cas d'étude, une proposition d'outil dénommé : Vision UX transverse permettrait de mieux accélérer le processus de conception en appuyant des points majeurs dans les choix des technologies et de l'expérience globale utilisateur tout en prenant en compte le principe itératif.
Toutefois, la limite de ce travail est le fait de s'être basé sur cas d'étude local. En effet, nous nous sommes penchés sur des programmes qui concernaient seulement quelques marques du groupe. De plus, nous avons présenté ici un processus linéaire, cependant, en vue des potentielles difficultés d'une implantation dans une organisation aussi importante, on peut imaginer d'autres moyen des déroulements des outils. En effet, la projection d'une Roadmap des usages peut être contrainte selon des contextes incertains, on peut parler d'environnement (économique et infrastructure) pouvant du jours au lendemain rebattre les cartes de manière partielle ou totale. On pourrait alors employer cet outil pas uniquement comme un point de départ mais également comme un élément de référence sur tous le long du processus.

Les perspectives de ces travaux seraient d'établir un système collaboratif de gestion, de création et de centralisation de connaissances permettant ainsi le partage d'information des différentes équipes. D'autres points sont également à identifier selon les cas d'usages de cette Vision transverse.

La Vision UX transverse devra être validée ou appuyée qu'en intégrant dans chaque outils les différents corps de métiers (transversaux ou dédiés à des marques) afin de pouvoir évoluer sous forme d'entente avant le point de convergence avec les autres départements.

7 REFERENCE

[1] Mehmood K., Mobile UX design, Thesis-Abstract,University of Lahore Gujrat Campus, Gujrat, p7, 2019.

[2] Daumal S., *Design d'expérience utilisateur : principes et méthodes UX*, Book, Editions Eyrolles, p20, 2019.

[3] Yang L., UX design for memory supplementation to support problem-solving tasks in analytic applications, Thesis, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, p57, 2018

[4] Klein A., Des usages situés aux classes de situations : contribution à un outil destiné aux acteurs de la conception.: le cas des usages de véhicules utilitaires légers, Thesis, Université Lumière Lyon 2, Lyon, p22, 2017.

[5] Blanchard P., Modélisation de la contribution du design industriel au processus de conception de produits ou services innovants dans un environnement contraint, Thesis, Arts et Métiers ParisTech, Paris, p8, 2015.

[6] Figure 2. "The Disciplines of User Experience". from Usabilis, *Panorama des métiers de l'UX/UI Design*, Web article, 2020.

[7] Figure 3. «360˚ Experience Circle | UX-CX-BX » from Usabilis, *Quelle différence entre expérience client (CX) et expérience utilisateur (UX) ?*, Web article, 2020

[8] Paillot D., Gestion de données pour la visualisation de maquettes numériques en environnement virtuel immersif. Application au Design Automobile, Thesis, Arts et Métiers, Cluny, p27, 2004.

[9] «Les français et le design automobile» from Festival de l'Automobile – Sondage ELAB, Web article, 2020

[10] Brangier E., Robert JM., *Le travail humain*, Book, Edition Puf, p10, 2014

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2022, BÂLE, SUISSE.

MÉTHODE HYBRIDE DE MANAGEMENT DE PROJET: COMMENT GÉRER LE NIVEAU D'AUTONOMIE DANS LES GRANDS PROJETS INDUSTRIELS?

Thierry GIDEL[1], Frédéric D'ARRENTIERES[2], Gabriel DOMINGUES[3]
[1] COSTECH / UTC – thierry.gidel@utc.fr
[2] Renault – frederic.darrentieres@renault.com
[3] COSTECH / UTC / RENAULT– gabriel.domingues@utc.fr

1 RÉSUMÉ

Nous partons de l'hypothèse que le concept d'autonomie est un élément central des approches agiles et par conséquent qu'il doit être intégré dans les approches hybrides pour ne pas dénaturer leur pertinence. Après avoir présenté ce concept en nous appuyant sur la littérature, nous l'avons confronté au terrain à l'occasion d'une série de 26 entretiens avec 21 praticiens du secteur automobile.

Nous présentons dans cet article le résultat de cette première analyse en distinguant les apports de ce concept d'autonomie au management de projet et les problématiques qu'il soulève.

Nous en déduisons des principes qu'il faudrait mettre en œuvre pour bénéficier des avantages que pourrait procurer l'autonomie sans pâtir de ses travers. Nous proposons aussi des méthodes, outils et organisation pouvant contribuer à son instrumentation. Nous identifions aussi des mécanismes permettant de responsabiliser les acteurs en symétrie de l'autonomie qui leur est accordé. Ces axes de recherches sont proposés pour servir de support à la discussion et mettre à l'épreuve cette recherche en cours de structuration.

Mots clés : hybride, autonomie, agile, management, projet, industriel, automobile

2 MANAGEMENT DE PROJET HYBRIDE

Au-delà de la construction des véhicules, une industrie automobile moderne développe aussi la mobilité de demain en travaillant autour d'axes majeurs d'innovation (la mobilité électrique, connectée, autonome, le développement de services de mobilité…). Pour que cela se concrétise, sachant que la quantité et la complexité de nouveaux projets est substantielle et en constante évolution, la façon de gérer les projets véhicules et les innovations associées doivent aussi évoluer.

La gestion de projet consiste à mobiliser et organiser diverses ressources nécessaires à la réalisation d'activités d'innovation, non répétitives de l'entreprise[1]. Des activités telles que la conception et le lancement de nouveaux produits, la mise en œuvre de nouveaux procédés de production, etc. [2], [3]. L'approche traditionnelle de gestion de projet a conduit à développer des organisations, des méthodes et des outils de structurations comme le Product Breakdown Structure PBS, Organisation Breakdown Structure OBS, Work Breakdown Structure WBS [4], ainsi que les outils de planification comme le PERT et Gantt [5]. Ces outils sont adaptés pour des projets de toutes tailles, pour l'externalisation de certains lots de travaux et pour un besoin connu en début de projet et relativement stable pendant toute sa durée.

Même si cette forme traditionnelle du management de projet a fait ses preuves [6], certaines limites sont apparues. L'évolution rapide des besoins, des marchés, des technologies sont venus renforcer ces limites. Cela a conduit à l'émergence d'une nouvelle approche de gestion de projet, avec la mise en œuvre de méthodes et de pratiques agiles.

Confidential C

Les méthodes agiles émergent dans l'industrie informatique, en particulier avec le développement des applications mobiles [7]. Cette industrie, caractérisée par de petites équipes co-localisées ayant un haut niveau de qualification, l'évolution constante des technologies, des besoins parfois difficiles à définir en amont et des modifications / mises à jour des applications en aval des projets, expliquent une évolution des méthodes traditionnelles. Dans ce contexte, une méthode qui, d'une part, met les acteurs au cœur du processus, et qui, d'autre part, se concentre sur les besoins / fonctions du logiciel plutôt que sur le contrat, les procédures ou la documentation a émergé [8]–[10]. La planification des projets agiles est basée sur un phasage avec une durée fixe avec des sprints qui peuvent être de 2 à 4 semaines. Il s'agit alors d'identifier des livrables intermédiaires utiles aux utilisateurs à court terme pour chaque sprint. Ces livrables doivent être présentés aux clients/utilisateurs à la fin de chaque itération pour recueillir leurs avis. Le fait de ne pas avoir une méthode de travail imposée à l'équipe et de pouvoir la faire évoluer à partir des retours d'expérience à chaque itération est aussi un des principes des approches agiles [11]. C'est ce principe qui permet de renforcer l'appropriation des méthodes par les acteurs et par conséquent leur engagement et leur motivation dans le projet. Les projets adoptant une approche agile préconisent aussi d'intégrer les clients à l'équipe projet élargie : ils participent à minima aux revues d'itération, mais peuvent aussi intervenir en cours d'itération. Les équipes ne sont pas nombreuses, normalement inférieures à 10 personnes, stabilisées et s'auto-organisent. Le suivi d'avancement se fait lors de réunions journalières de coordination, appelés scrum meetings qui permettent de confirmer que le travail prévisionnel a pu être réalisé et de résoudre d'éventuels points de blocages rencontrés pendant la réalisation du travail. Il existe des dizaines d'outils utilisés dans les méthodes agiles, mais la plupart de ces outils sont basés sur le management visuel, permettant à chacun de participer et de travailler ensemble. Des outils digitaux avec des kanbans ou tableaux avec des story maps sont largement utilisés (figure 1).

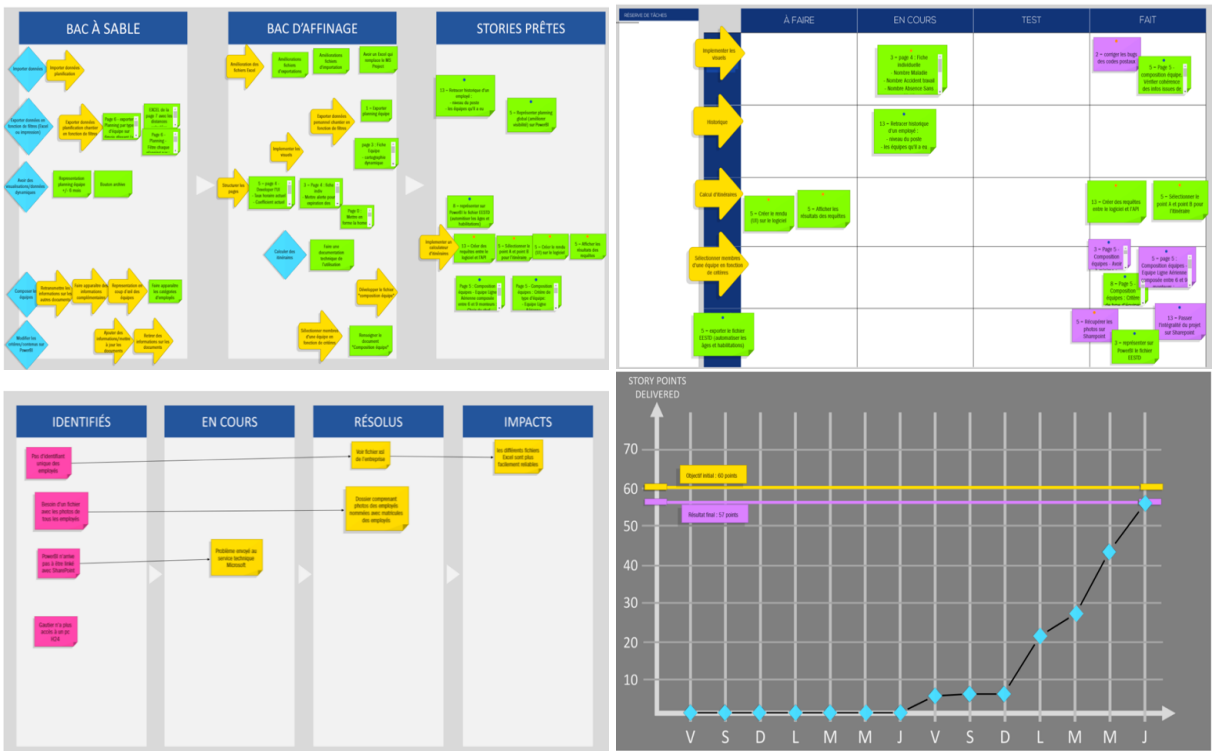


Figure 1 : Outils de management visuel agiles. Bac de fourniture (product backlog), bac de tâches (sprint backlog), tableau des obstacles, tableau d'avancement (burn-up chart).

Cette organisation semble très adaptée aux projets innovants actuels, cependant ses limitations (taille de projet, nombre de personnes ou capacité à produire des livrables partiels, par exemple) ou son organisation de travail peuvent rendre délicat voire impossible son application en contexte industriel. Pourtant, les premiers retours d'expérience dans les projets de développement automobile indiquent un bilan plutôt positif après avoir été contextualisés et avoir intégré des contraintes spécifiques industrielles.

Confidential C

Cette première analyse entraine plusieurs questionnements sur les contextes d'utilisations, les principes sous-jacents, les prérequis ainsi que les avantages et inconvénients des deux approches de management de projets, traditionnel et agile.

L'idée d'une méthode hybride combinant le meilleur des deux approches résulterait de la réponse à ces questionnements. À partir d'un état de l'art et d'une première série de 26 entretiens réalisés avec 21 personnes d'une grande entreprise automobile ayant toutes pratiquées cette approche hybride, nous formulons l'hypothèse que le concept d'autonomie est un élément central des approches agiles et par conséquent qu'il doit être intégré dans les approches hybrides pour ne pas dénaturer leur pertinence. Nous présentons dans le paragraphe suivant ce concept en nous appuyant sur la littérature ainsi que sur les entretiens réalisés. Ensuite, au paragraphe 4 nous proposons de premières propositions de principes, organisations, méthodes et/ou outils hybrides de gestion de projet.

3 LE CONCEPT D'AUTONOMIE

L'étymologie du terme autonomie vient du grec *auto*, « soi-même » et *nomos* « loi ». La capacité à édicter et suivre ses propres règles d'action en toute conscience est à la base de ce concept.

C'est cependant une notion assez complexe et qui présente des spécificités en fonction des échelles d'application. Afin de pouvoir la saisir, nous proposons de contextualiser son étude au cas du management de projet. Pour cela, nous distinguons quatre niveaux d'application (tableau 1) qui font intervenir l'autonomie individuelle, de l'équipe, du métier et de l'entreprise dans un contexte de travail.

L'autonomie peut commencer au niveau de l'individu lors de la réalisation de la tâche elle-même et des livrables associés. L'individu pouvant bénéficier de latitudes dans le choix des outils, des séquences de réalisation, etc. Elle peut aussi se situer au niveau de l'équipe qui décide de l'affectation et de la répartition des tâches entre ses membres. Cela peut se faire par délégation au scrum master ou sous la forme d'une décision collective. L'autonomie peut également se situer au niveau des méthodes de réalisation et d'évaluation des tâches et livrables associés. Plutôt que d'imposer des métriques, des façons de faire ou une instrumentation, les métiers habituellement garants des « bonnes pratiques » peuvent laisser ces choix à l'appréciation des individus ou de l'équipe. Enfin, plutôt qu'une déclinaison descendante des objectifs, une co-construction et/ou une latitude dans l'évolution des objectifs peuvent être laissées aux équipes.

Sans nécessairement le formuler en ces termes, les méthodes agiles préconisent une grande autonomie pour les individus, les équipes et les parties prenantes. Les principes agiles rappellent l'importance de laisser le choix des tâches, de leur répartition, des méthodes de réalisation, de la co-construction des objectifs et de leur priorisation aux individus et au collectif [11], [12].

La littérature met en avant les effets bénéfiques d'une plus grande autonomie des acteurs qui en contribuant à la définition des objectifs, des méthodes de réalisation, à l'identification et l'organisation des différentes tâches vont (re-)trouver du sens à leurs actions [13]. Cela contribue à la responsabilisation et à l'engagement des acteurs [14] ce qui a des effets positifs sur la motivation et l'efficacité [15].

Autonomie			
4 niveaux d'application:	À l'échelle de:	Attributs principaux:	Délégation possible à:
La définition et le cadrage des objectifs	L'entreprise	La stratégie, le business et les délais	La maîtrise d'ouvrage, product owner
La définition des méthodes de réalisation et d'évaluation des tâches	Du métier, du département	Le « know how » technique, les coûts et les plannings associés	L'assistance à maîtrise d'ouvrage, proxy product owner, « servant leader »
L'affectation, la répartition et la planification des tâches	De l'équipe	Le management, l'organisation, la synchronisation aux interfaces,	Du chef de projet local, Product owner et Scrum master
La réalisation des tâches et des livrables	De l'individu	De l'opérationnel et de la production quotidienne	Des équipiers

Tableau 1 : Les niveaux d'autonomie dans les projets

Confidential C

Cependant, l'autonomie ne présente pas que des bienfaits pour les projets. Cela engendre aussi des contraintes et des problématiques, à commencer par des contraintes liées aux aspects financiers. Le budget des projets n'est pas illimité et les décisions relatives au budget et aux ressources doivent être encadrées pour des raisons évidentes de stabilité financière et de rentabilité. Lors des entretiens, la gestion des ressources humaines a aussi été mise en avant comme un sujet sensible ainsi que l'accès aux ressources techniques (calcul, prototypage, etc.).

La seconde problématique évoquée par les acteurs est la capitalisation des données et son corolaire, l'accès à l'information. Les approches agiles insistent plus sur les résultats et les livrables que sur la documentation, l'enregistrement des décisions avec les raisons des choix. Il n'y a plus de formalisme imposé ni de classement des documents et informations ce qui rend l'accès à l'information beaucoup plus compliqué. Cette liberté a pour effet paradoxal une perte d'autonomie des acteurs : « J'apprécie les procédures, elles me rendent plus autonome, je n'ai pas toujours besoin de demander aux autres comment faire ! ».

Le troisième écueil mis en avant lors des entretiens est relatif aux difficultés d'interchangeabilité et/ou aux évolutions au sein des équipes agiles : définir ses propres règles fait souvent consensus, mais cela complique les changements d'équipe. « Comment comprendre les règles de la nouvelle équipe ? Surtout si elles ne sont pas formalisées ! » Cela pose aussi la question de la continuité à l'échelle lorsqu'il faut déployer les bonnes pratiques sans pouvoir les imposer.

Un quatrième point évoqué concerne les limites ou périmètres de prise de décision : la complexité, les interconnexions, la transversalité dans les projets rendent difficile la définition de périmètres réellement autonomes. Comment identifier des périmètres stables, avec pas ou peu d'interactions avec les autres équipes ? A défaut, comment gérer les interactions entre équipes et parties prenantes sans (trop) impacter leur autonomie ?

Il faut aussi noter que certaines personnes redoutent l'autonomie. Pour ces acteurs, l'autonomie est synonyme de responsabilité et cela peut donc dériver vers de la culpabilité. « Si j'applique les procédures et que cela ne fonctionne pas, je peux justifier mon travail. Si c'est moi qui aie décidé de suivre une fausse piste, on peut me le reprocher ». Nous pouvons voir qu'au-delà de préférences personnelles pour un travail structuré par nature, le fait d'avoir à définir ses propres règles peut conduire à un sentiment d'insécurité.

Enfin l'autonomie est compliquée à instaurer et à entretenir à l'échelle d'un projet automobile composé de multiples équipes qui sont fortement dépendantes les unes des autres sur le plan technique et doivent donc fréquemment interagir pour définir un produit performant et complexe.

En conclusion de ce paragraphe, nous retenons que le concept d'autonomie peut présenter des bénéfices intéressants à condition de prendre en compte les objections des acteurs relatives à ses limites. C'est en nous basant sur ces éléments que nous formulerons nos propositions dans le paragraphe suivant.

4 PRINCIPES ASSOCIES ET INSTRUMENTATION DU CONCEPT D'AUTONOMIE DANS LES PROJETS INDUSTRIELS

Comme nous l'avons vu précédemment, le concept d'autonomie peut être appliqué à 4 niveaux différents. Pour qu'il puisse être déployé, il faut préciser les principes à respecter et voir comment ces principes peuvent être instrumentés ou opérationnalisés.

Tout d'abord, il est important de rappeler les différentes hypothèses sous-jacentes au développement des approches classiques et agiles. La taille des projets, l'interdépendance entre les fonctions du produit du projet et l'évolution des besoins sont des facteurs différenciants entre les méthodes. Les approches agiles ont principalement été conçues pour de petites équipes de 10 personnes maximum, autonomes et stables dans le temps alors que les approches classiques permettent plus de flexibilité dans la taille des équipes. Par ailleurs, dans les approches classiques, le produit du projet n'a de valeur que s'il est livré complet : on ne peut pas livrer que la moitié d'un produit ou d'une ligne de production, alors que dans les approches agiles, qui viennent de l'informatique, on part du MVP (Minimum Viable Product) et il est possible d'ajouter des fonctions, y compris après avoir lancé le produit ou service. Enfin les coûts des modifications techniques sur un produit industriel sont très élevés et le nombre de modifications doit être limité contrairement au domaine du logiciel qui peut intégrer tardivement les évolutions en méthode agile.

Confidential C

Pour pouvoir (re-)donner de l'autonomie, il faut trouver le moyen de former de petites équipes pouvant produire des livrables intermédiaires relativement indépendants. Cela implique un **découpage** du projet en respectant des règles génériques : interfaces minimums entre les sous-projets, des livrables pouvant être testés de manière indépendante et ayant une taille compatible avec celle d'une équipe d'une dizaine de personnes maximum. Il y a finalement assez peu de littérature qui revienne sur cette structuration et ce découpage pourtant si critique. Dans beaucoup d'industrie, le projet doit combiner les visions fonctionnelles, celles des métiers, de la finance, l'organisation géographique et architecturale du produit ainsi que des contraintes de poids, de sécurité ou d'environnement. Ces visions et contraintes sont parfois contradictoires, ce qui complexifie le découpage et la structuration du projet. C'est cependant un prérequis essentiel si l'on veut confier à une petite équipe un sous-projet avec des objectifs et une autonomie décisionnelle. Cette étape fait appel à des compétences d'organisation du projet avec pour enjeu le besoin d'appréhender la complexité du projet en fonction du contexte du produit à développer.

Une fois les **équipes identifiées**, les périmètres produits (technique, métiers, maquette, livrables) formalisés et les périmètres des sous-projets (QCDP) validés, il faudra s'assurer de la stabilité des équipes et l'implication des équipiers. Cela qui nécessite de repenser l'organisation pour minimiser le turn-over, gérer les plannings des ressources humaines, vacances, congés paternité/maternité, formations, évolutions de carrière, en accord avec les projets. Il faut aussi veiller à la mise en place des routines de travail. Compte tenu des problématiques d'accès à l'information évoqué par les acteurs eux-mêmes, la colocalisation faciliterait l'autonomie. Cela aussi bien au niveau des choix techniques que des choix méthodologiques, des procédures, outils, voir normes et standards applicables.

Dès qu'il y a **plusieurs équipes**, il faut mettre en place une **structure de coordination**. On ne parle pas seulement de planification, mais surtout de **synchronisation**. La définition des processus et méthodes de synchronisation entre équipes, par exemple des Scrum de Scrum nécessite aussi de repenser le positionnement de la maîtrise d'ouvrage. Le product owner joue un rôle important, il est garant de la vision long terme alors que les équipes sont focalisées sur la production des livrables du sprint avec une vision à 2 à 4 semaines. Il peut être aidé à formuler et faire évoluer son besoin par un Proxy Product Owner jouant un rôle d'assistant maîtrise d'ouvrage et servant de relai auprès des sous-équipes.

La littérature propose aussi de combiner un phasage classique au niveau du projet global, le macro-planning avec des itérations agiles pour le micro-planning associé à une planification à la demande. Cela va de pair avec une orientation des revues de projet vers des éléments plus facilement évaluables par les clients et utilisateurs finaux, tels que des maquettes ou prototypes, qui feront que ces acteurs soient plus impliqués dans le projet en comprenant mieux les tenants et aboutissants. Il faut noter que cela nécessite un changement d'état d'esprit chez les concepteurs : écouter le client, les utilisateurs, prendre le temps de leur expliquer les enjeux, les défis techniques. C'est aussi un changement d'état d'esprit chez les managers et les clients. Une des critiques faites aux approches classiques est d'inciter les chefs de projet à commencer par faire les tâches simples au début du projet pour rassurer les clients et faire monter l'indicateur d'avancement du projet. Au contraire, les approches agiles proposent commencer par traiter les points durs : faire ce qui est difficile au début du projet pour lever les risques. Cela implique de ne pas avoir à rassurer les clients ou la direction sur l'avancement ou la faisabilité du projet. Cela démontre une acceptation de la prise de risque.

Enfin, lorsqu'il y a plusieurs sous-projets, comment garder l'autonomie des équipes en assurant la coordination nécessaire des sous-équipes ? Comment s'assurer du rôle actif des clients et utilisateurs au niveau de chaque sous-projet ? Comment gérer la centralisation des achats avec une décentralisation des relations fournisseurs ? Les réponses à ces questions fondamentales de gestion et de management nécessiteront des réponses adaptées.

Aussi, dans les approches classiques, les **besoins sont réputés stables** : une phase d'avant-projet permet généralement de les stabiliser alors que dans les approches agiles, le client reconnait qu'il ne sait pas précisément ce qu'il veut et que c'est en voyant les résultats intermédiaires qu'il pourra préciser et formaliser ses propres besoins. La question se pose si nous avons des projets industriels importants, mobilisant par exemple une centaine de personnes et des besoins difficiles à capter, un CdCF qui va se préciser en cours de projet, une volonté d'innover. Des mécanismes doivent alors être mis en place pour

Confidential C

coordonner les différents sous-projets, représenter les utilisateurs et autres parties intéressées, assurer les négociations du cahier des charges et les négociations aux interfaces, la résolution de problème. L'identification des acteurs de ces négociations est fondamentale : Maîtrise d'ouvrage ou Product Owner, assistance à maîtrise d'ouvrage ou proxy product owner, chef de projet ou scrum master, équipiers : tous ont un rôle à jouer. La définition d'un cadre précisant le niveau d'autonomie de chacun, couplé à l'application du principe de subsidiarité doit permettre une prise de décision au plus près de l'action. Mais pour tenir compte des remarques des acteurs, il faudra aussi mettre en place des mécanismes permettant d'influencer l'environnement et le collectif. C'est dire la mise en place d'organisations et d'outils de négociations aux interfaces, de résolution de problème et permettant la prise en compte des exigences transversales (sécurité, masse, etc.).

Lorsque les équipes sont identifiées, que les cadres et règles applicables à chaque équipe sont formalisés, que les modalités d'échange aux frontières sont définies, il faut s'assurer que les **libertés données à l'intérieur du cadre** permettent une réelle autonomie. Pour cela la mise en place de structures organisationnelles permettant aux équipes de customiser les méthodes et outils par rapport aux besoins propres de chaque sous-équipe sans perdre la cohérence globale est essentielle. Cela nécessite un travail très complexe de simplification de l'empilement des strates de procédures accumulées par l'entreprise. Cette simplification du mille-feuille accumulé au fil des années nécessite beaucoup d'expertise métier afin de bien comprendre pourquoi chacune des feuilles est présente, ce qu'il faut garder et ce que l'on peut supprimer, combiner, fusionner.

L'accès aux données reste une question importante, qui entre en tension avec la souplesse possible dans les approches agiles du fait de la taille et de la stabilité des équipes. Pour les plus grands projets, des bases de données, les livrables et résultats intermédiaires, les comptes rendus justifiant les choix critiques devront être capitalisés. Mais il faudra aussi revoir ce qu'il faut mettre sur les plans d'une pièce : Géométrie, cotation fonctionnelle, tableau de matière, traçabilité des validations, etc. Autant de points qu'il faudra définir.

Enfin, il ne faut surtout ne pas négliger l'accompagnement et les formations nécessaires à la montée en compétence permettant la transformation organisationnelle et managériale. Dans les approches hybrides, les équipes réalisent toutes les tâches : techniques bien évidemment, mais aussi de définition et répartition des tâches, de contrôle de l'avancement, de contrôle qualité, d'analyse des risques… il faut former tous les équipiers afin qu'ils puissent réaliser cela.

5 DISCUSSION

Le concept d'autonomie nous semble porteur, plus précis et moins fuyant que la notion d'agilité. Les enjeux globaux associés aux méthodes hybrides sont une amélioration des délais et des coûts. Ces gains d'efficacité reposent sur un meilleur engagement, motivation et responsabilisation des équipes grâce à une gouvernance garantissant une autonomie aussi grande que possible des acteurs par application du principe de subsidiarité dans une organisation adapté. Cela procure une autonomie aussi bien au niveau du choix des méthodes et outils permettant le pilotage du projet qu'au niveau du produit lui-même. L'approche doit néanmoins permettre de garantir un niveau de contrôle (qualité, coûts, délais, performances) et de coordination (gestion du temps, synchronisation, planification) des acteurs inhérents aux projets industriels de cette taille.

En parallèle à l'autonomie, il est indispensable d'approfondir les mécanismes permettant de développer la responsabilisation des équipes, à travers l'adhésion aux objectifs collectifs du projet, le devoir d'alerte entre équipes, la motivation individuelle pour prendre des décisions, la transparence sur l'avancement et les risques. L'enjeu est en effet d'instaurer une relation équilibrée et coresponsable avec les parties prenantes et les managers du projet.

Nous n'en sommes qu'au début de cette recherche, les propositions sont encore à valider et pour cela nous construisons actuellement le protocole de recherche.

Confidential C

6 RÉFÉRENCES

[1] G. Garel, *Le management de projet*, Éditions la Découverte. Paris, France, 2011.

[2] T. Gidel et W. Zonghero, *Management de projet, vol.1, Introduction et fondamentaux*, 2ème., vol. 1. Paris: Hermes/Lavoisier, 2020.

[3] T. Gidel et W. Zonghero, *Management de projet 2, Approfondissements*, 2ème éd., vol. 2. Paris: Lavoisier, 2021.

[4] PMI, *PMBOK® Guide*. Project Management Institute; Sixth Edition, 2017.

[5] H. Kerzner, *Project Management, a Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*, John Wiley and Sons. New York, 2017.

[6] V. Giard et C. Midler, *Pilotages de projet et entreprises*, Economica. Paris, 1993.

[7] R. Hoda, N. Salleh, J. Grundy, et H. M. Tee, « Systematic literature reviews in agile software development: A tertiary study », *Information and Software Technology*, vol. 85, p. 60-70, mai 2017, doi: 10.1016/j.infsof.2017.01.007.

[8] M. Bianchi, G. Marzi, et M. Guerini, « Agile, Stage-Gate and their combination: Exploring how they relate to performance in software development », *Journal of Business Research*, vol. 110, p. 538-553, mars 2020, doi: 10.1016/j.jbusres.2018.05.003.

[9] A. S. Campanelli et F. S. Parreiras, « Agile methods tailoring – A systematic literature review », *Journal of Systems and Software*, vol. 110, p. 85-100, déc. 2015, doi: 10.1016/j.jss.2015.08.035.

[10] K. Beck *et al.*, « Manifesto for Agile Software Development », 2001. http://agilemanifesto.org/ (consulté le nov. 01, 2020).

[11] S. Denning, « The Challenge of Leadership in the Age of Agile », *Leader to Leader*, vol. 2018, nº 89, p. 20-25, 2018, doi: 10.1002/ltl.20371.

[12] K. Dikert, M. Paasivaara, et C. Lassenius, « Challenges and success factors for large-scale agile transformations: A systematic literature review », *Journal of Systems and Software*, vol. 119, p. 87-108, sept. 2016, doi: 10.1016/j.jss.2016.06.013.

[13] G. De Terssac, « Autonomie et travail. » PUF, 2012.

[14] E. M. Morin et B. Cherré, « Les cadres face au sens du travail », *Revue française de gestion*, p. 83-95, 1999.

[15] R. El Bilani, P. Montpied, et J.-F. Le Maréchal, « Autonomie et motivation lors de l'apprentissage avec un simulateur », *Didaskalia (Paris)*, vol. 31, p. 11-46, 2007.

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2022, BÂLE, SUISSE

DREAM: DESIGN RULES EXTRACTOR FOR ADDITIVE MANUFACTURABILITY, PROCESSING OF NATURAL LANGUAGE AND FREE-HAND SKETCHES

GLOTIN Arthur[1,2], PINQUIE Romain [3], OURADI Acia[1], OUAZINE Cyril[1], SEGONDS Frederic [2]

[1] AKKA Technologies - 3 Av. du Centre, 78280 Guyancourt, France

[2] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI – Arts et Métiers Institute of Technology – HESAM University – 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

[3] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

Key words: Additive Manufacturing, Design for Additive Manufacturability, Natural Language Processing, Image Analysis, Ideation

ABSTRACT

This paper describes the development of a computational design assistant that supports designers willing to evaluate the additive manufacturability of ideas generated during ideation workshops and provide them indicators linked to Additive Manufacturing (AM). Targeted end-users are designers, students or people involved in innovative design processes, especially beginners in AM. The input is an idea sheet consisting of a text and an image, briefly describing an idea resulting from creativity sessions. To recommend applicable design rules, the analysis of the idea card is twofold. First, the assistant analyses the textual description and associates additive manufacturing constraints based on textual similarity. Second, it processes the free-hand sketch to detect geometrical and topological features constrained by additive manufacturing design rules. This paper details the development of the image analysis part and its paralleling and comparison with the textual part. This part relies upon the vectorization of the free-hand sketch, before performing a geometric analysis on the curves and regions of the image.

1 INTRODUCTION

Because of their novelty, developments in Additive Manufacturing (AM) are under-exploited by designers. Even if knowledge management is an integral part of the innovation strategy for enterprises, AM processes are difficult to master for individuals with little awareness. However, the potential of these technologies is significant and their application within the design process makes them a major asset [1]. Product development represents significant costs, right from the early stages of development [2]. Thus, including the AM knowledge at the emergence of ideas can help to detach from established solutions and boundaries to offer new perspectives for designers. Ideation workshops are a mean to formalize the generation of ideas, following 3 mains phases: abstraction of the problem, goal setting and ideation by inspiration [3]. Using those ideations workshops to include the solutions offered by AM is relevant, as it allows to broaden the spectrum of potential solutions.

The main advantage of AM processes resides in their ability to rapidly prototype the generated ideas. Prototyping is an innovation process that helps to concretize a project by materializing it, to be able to evaluate et redesign it easily. For this, Design for Additive Manufacturing (DfAM) provides opportunities for rapid conceptual and functional evaluation in the development phases [4] by considering the technical, geometrical, and other aspects of AM during the design stage [5]. It can be used in this case for rapid prototyping, in its "manufacturing-driven design strategy", used during the second phase of production of innovative solutions [6].

Figure 1. Idea sheet example

It is in this context that the project: DREAM (Design Rule Extractor for Additive Manufacturability) was initiated, aiming to design a computational assistant to evaluate the printability of a concept described on an idea sheet. An idea sheet is composed of a textual description and a free-hand sketch representing the concept, as displayed in Figure 1. The objective of the tool is to analyze the content of this idea sheet and to obtain indicators on the manufacturability of the concept with AM processes, according to the AM design rules. Targeted end-users include industrial designers, students or people involved in design processes with little knowledge about AM. The assistant must evaluate innovative products at the beginning of the design phases, with the aim of prototyping them [7]. The project consists of two parts: one part dedicated to the analysis of the textual description [8], and one part dedicated to the free-hand sketch analysis. The research question associated with this paper is the following: How can we obtain sufficiently reliable indicators of manufacturability of a concept described in a text and image set?

2 STATE OF THE ART

Before dealing with the process of solving the initial problem, it is necessary to learn about the different key notions of the project, which will be necessary for the understanding of the solving process. We will start reviewing the current practices of the application domain including knowledge related to additive manufacturing rules, then we will discuss existing computational techniques to achieve the image processing of the free-hand sketch and the processing of textual data.

2.1. DESIGN RULES FOR DFAM

Additive manufacturing rules exist in many forms and representations that can be complex to interpret [9]. For our case study, what we call "design rules" are the design constraints that must be respected to obtain a good print. Thus, evaluating of the manufacturability of a design is checking these different rules. These rules are part of the knowledge of companies and are a resource that can be difficult to access and understand [10]. However, tools such as worksheets and additive manufacturing handbooks can be used to identify DfAM rules, with both textual and pictorial representations to check a part before printing [11][12]. Furthermore, those rules depend on the different AM process, and the parts won't encounter the same problems. For this reason, we will only focus on the Fused Deposition Modeling (FDM) process. However, these analyses are manual and require an advanced representation of the part. The identification of these design rules is therefore an important task in the creation of the tool. For examples, those rules can be relating to the geometry of the part: about its dimensions, the complexity of its surfaces, or the presence of axis or holes.

2.2. IMAGE PROCESSING FOR IDENTIFYING DESGIN RULES FOR DFAM

The objective of image analysis is to enhance and enrich the quality of AM rules recommendations. For this purpose, drawing analysis algorithms can be used to extract geometric shapes or patterns associated with certain design rules [13]. The main difficulty in this study is that the inputs are highly variable [14], depending heavily on the person making them, and much information is lost in the graphical style and drawing skills. Extracting the designer's original plots and making them interpretable by a computer is a complex step that can generate errors [15].

Vectorization of drawings is relevant for this purpose, converting it into a set of computable mathematical functions. Figure 2 represents two Bezier curves and their control points [14][16]. This approach transforms an image composed of millions of pixels into a limited number of curves that can be interpreted and modified [14]. Sketch vectorization algorithms are numerous and are often used in the artistic field to facilitate the artist's work during digital colorization [17]. These algorithms usually use a pre-processing part, to improve the pixelated drawing. From this clean image, vectorization algorithms extract the skeleton of the drawing using various methods to break away from the thickness of the contours [17], and locate important geometric points such as line ends, junctions, and abrupt changes in angle [18]. From this, a topological graph [15][20] is generated to connect these points and make a first approximation of the design, which is then optimised and/or simplified by an energy minimisation algorithm [15][20][21]. From this set of vectors, it is then necessary to identify the elements to be associated with the design rules in AM.

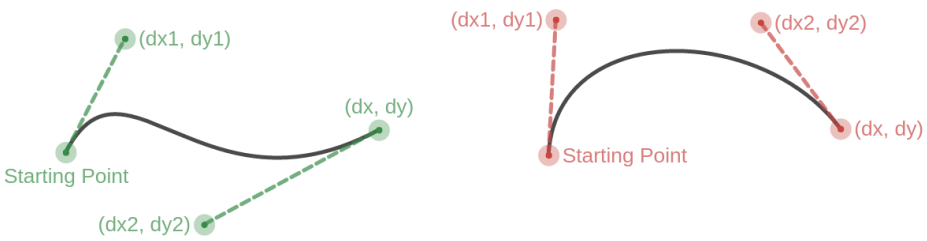


Figure 2. Cubic Bezier curves

Automatic Feature Recognition (AFR) is a set of methods for identifying "features". These are regions of a part with interesting geometric or topological characteristics in terms of shape or manufacturability [22] [23]. Today, AFR is present in Computer Aided Design (CAD) to characterise geometric areas such as extruded bosses, holes, etc. Currently, there are two main families of AFR, the so-called internal methods, directly implemented in CAD software, and external methods, where the 3D file is analysed by external software [24]. All current methods rely on 3D files to extract geometric primitives, classify them to simplify geometric identification, and finally locate interesting patterns on the parts.

Most of these methods are based on logic rules, as listed in Figure 3 [24], which progressively decompose the part to identify its structure. However, the input to these algorithms is a 3D file containing a lot of information about the part, and for our case, we would have to adapt this input to 2D patterns to identify the different areas of interest and then approach existing methods of part decomposition.

Classification of AFR approaches

Form feature extraction		Pattern recognition
Geometric feature extraction	Form feature identification	
1. External approach 2. Internal approach	1. Syntactic pattern recognition 2. State transition diagrams and automata 3. Logic (if–then) rules and expert systems 4. Graph-based approach 5. Convex-hull volumetric decomposition 6. Cell-based volumetric decomposition 7. Hint-based approach 8. Hybrid approach	Logic rules
	1. Graph-based approach 2. Face coding 3. Contour-syntactic approach 4. Volume decomposition	Artificial neural networks

Figure 3. Classification of AFR approaches

Among those approaches, some of them rely on machine learning, which is a scientific field belonging to artificial intelligence and aims to automatically teach an algorithm to spot recurring patterns in different data sets [25]. To achieve this learning, algorithms use parameterized models that are trained on data sets called: “datasets”, which are used to find optimal operating parameters. For the DREAM tool, we are looking to identify specific features of geometries or shapes on images, so we can only Supervised learning algorithms, for which the data in the dataset is labelled, i.e. the input data is associated with the expected result of the algorithm. The algorithm then trains itself to minimize the difference between this theoretical result and the calculated result. However, the number of input data needs to be very large to start having conclusive results [26], and it is difficult to quantify the exact number of data to make the software work. To solve this problem, labelled data corpus exists, but have to be adapted to fit the application of the project.

2.3. TEXTUAL PROCESSING FOR IDENTIFYING DESIGN RULES FOR DFAM

This part concerns the analysis of the textual analysis part already carried out for the DREAM tool. Its analysis aims to better integrate the image analysis in the final computational assistant. The analysis of the text of the idea map is based on natural language processing (NLP) algorithms, which aim to calculate the similarity between the sentences of the text and the additive manufacturing design rules. These additive manufacturing rules are based on geometric and mechanical criteria and are listed as questions to be asked about the concept [11]. The prototype built last year using Python language, whose structure is detailed in Figure 4, takes as input the descriptive text of a concept and outputs an Excel file with the sentences of the text sharing sufficient similarities with the design rules. To do this, the program splits the text into "chunks" containing groups of sentences. These sentences are then processed with the Stanza pipeline [27], which turns the words into tokens and lemmatizes them down to their root. A tagger is then used with the NLTK (Natural Language Toolkit) library to identify the grammatical category of the different words, before filtering irrelevant one. Next, the tokens are semantically extended using the Gensim library, which performs word integration, i.e. it calculates the semantic distance between the different words [28]. The words are transformed into semantically enriched vectors of tokens are then compared to the design rules using a Cosine similarity function [29]. Phrases that are sufficiently close to the design rules are finally registered with their similarity score and the associated rule. Finally, we obtain indicators on certain sentences in the text, indicating the text segments that are potentially affected by the design rules for manufacturing with the FDM technology, or that will be problematic with respect to the manufacturing processes. This part can still be improved, as not all rules are implemented, and only FDM rules are considered.

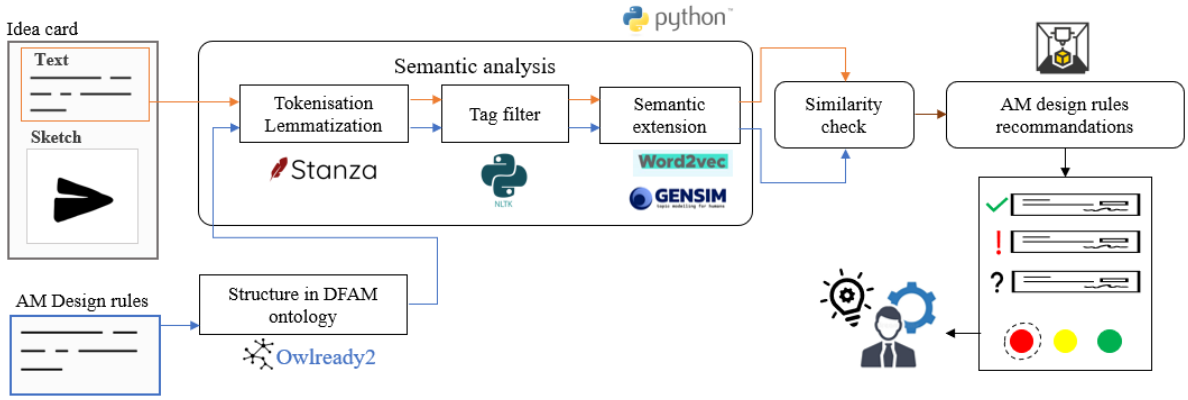


Figure 4. Architecture of the textual analysis part of the DREAM tool

2.3. SYNTHESIS

In accordance with the bibliographic research part, the image analysis part is at the center of several domains that do not necessarily answer each time to the initial problematic. Indeed, automatic pattern recognition via AFR does not apply to input drawings, but rather to CAD files. To get closer to this approach, it is therefore necessary to succeed in making the drawings of the idea sheets interpretable by computer. For this purpose, vectorization is relevant, as it allows a set of pixels to be transformed into a set of geometric vectors. However, the existing algorithms concentrate on artistic applications, and particular attention must therefore be paid to simplifying the vectors to reduce the number of data treated by the program. It will facilitate the search for additive manufacturing rules on a drawing. For the latter, it is therefore necessary to succeed in formatting them in such a way that they are comparable both in the text and in the image, hence the need to create a database allowing the possible comparison between the different rules. On the drawing, these rules must therefore be translated in order to be identifiable.

Finally, the machine learning approach will not be discussed, as there is no corpus of annotated data for recognizing FA features in 2D sketches. The creation of a dataset adapted to the case study will be a very tedious task and not very feasible in the time available for the project.

3 RESEARCH POSITIONING AND GOALS

3.1. ISSUES AND OBJECTIVES

To better define the research problem, concrete objectives must be defined in accordance with the prototype already produced in the textual analysis section. Firstly, with the initial problem, indicators of the manufacturability of the concept described in the idea sheet must be obtained to provide indications enabling a designer unskilled on additive manufacturing to redesign and judge the product without the help of an expert. However, in the case where the textual and image parts do not detect any AM characteristics, it is not possible to conclude on the manufacturability of the concept, and it is therefore necessary to add a constraint of reliability of the tool. Indeed, it is necessary to be able to compare the results of the tool with the results of several AM experts and calculate a Kappa score to get an agreement score between “experts’ to be able to quantify the relevance of the results obtained. Two scores can then be defined, one for the reliability of the tool, and one for the manufacturability of the concept. According to this positioning, the following research question can be addressed: How can we obtain sufficiently reliable indicators of manufacturability of a concept described in a text and image set?

3.2. RESULTS OF THE TEXT ANALYSIS PART

The current prototype generates a table as shown in Figure 5, where each design rule is associated with its similarity score and the triggered words. We can see these results in the textual context in Figure 6. In this example, for a description of 472 words, the DREAM tool prototype identified 6 extracts to be associated with AM design rules, where 4 were successful and 2 were not. The image analysis part should therefore enrich the textual analysis, to study the influence of both parts on the object's manufacturability analysis.

Similarity	Rule	Rule annotation	Triggered words	Tokens from the text
Number of sent by chunk = 1, Number of expanded words by token = 5, Similarity treshold = 0.35				
0,503986	Max_part_size_rule	The overall length of the full	['increased', 'more',	['overall', 'structure', 'cylindric
0,392915	Small_holes_rule	Holes made on the part shou	['par-5', 'birdie', 'put	['removable', 'cup', 'rest', 'ontl
0,486854	Min_bars_size_rule	A circular bar must be larger	['bars', 'rectangular',	['frame', 'make', 'vertical', 'cyli
0,43245	Small_holes_rule	Holes made on the part shou	['cm', 'circumferenc	['entire', 'diameter', 'peel']
0,370328	Small_holes_rule	Holes made on the part shou	['smaller', 'large', 'tir	['Plant', 'vegetable', 'small', 've
0,368605	Materials_rule	The prototype should be func	['used', 'allow', 'use'	['effortless', 'use']

Figure 5. Raw results from the DREAM Tool prototype

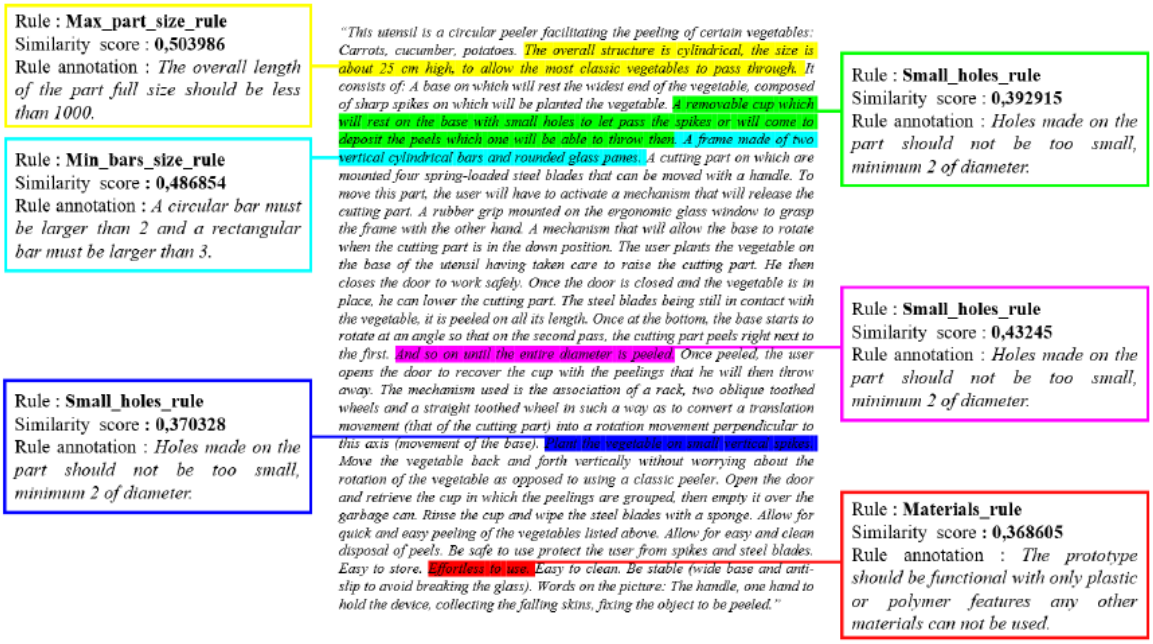


Figure 6. Results from the DREAM Tool prototype in the context

4 A PROPOSAL FOR FREE-HAND SKETCHES PROCEDURAL ANALYSIS

Finally, according to the previous development, the architecture of the image analysis part is summarized and described in Figure 7.

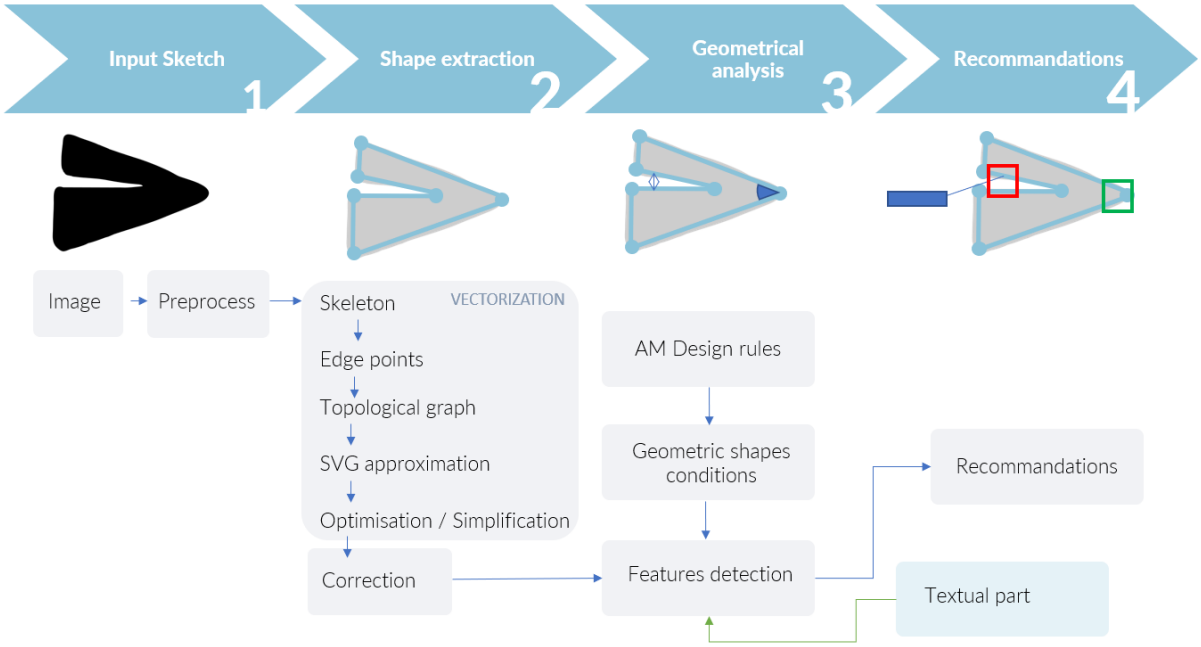


Figure 7. Preliminary architecture of the image analysis part of the DREAM tool

By reinjecting this workflow into the general structure of the image analysis part, we obtain the Figure 8, representative of the global functioning of the tool. It illustrates the complementarity between the different indications at the level of AF design rule recommendations. Thus, a quantitative study of the results between the two parts could serve as a basis for the joint improvement of both.

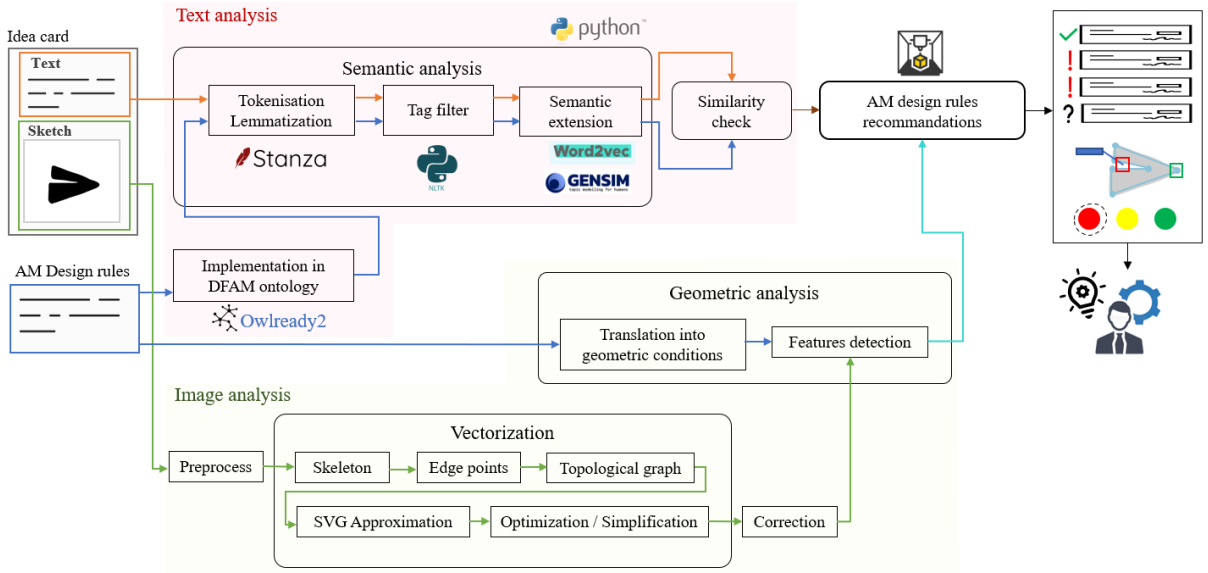


Figure 8. Completed architecture of the DREAM tool

4.1. INPUT SKETCH AND SHAPE EXTRACTION

The image will concentrate on scanned image. A formalized idea sheet can be produced to facilitate the identification of relevant information. For image vectorization, many paths can be taken, but we will reuse the global structure of the fidelity/simplicity algorithm [15], adapting it to the tools available on Python. The algorithm will be reprogrammed for compatibility and adaptability of the project, as the source code isn't available. To do so, the program will repeat the main steps of vectorization, i.e. a skeletonization with an algorithm based on image regions or on the reduction of contour thicknesses, an identification of important junction points, an elaboration of a topological structure graph, then an approximation of a vectorized contour which will be optimized and simplified by a simplification algorithm.

After vectorization, a correction can be made on the vectorized drawings with user control to possibly reconstruct primitives, such as lines that could be approximated by a curve.

4.2. GEOMETRICAL ANALYSIS AND RECOMMANDATIONS

As previously mentioned, the detection of additive manufacturing rules will be based on the identification of regions and curves corresponding to the respective features. For example, the distance between two parallel or quasi-parallel lines belonging to the same surface represents a wall. This approach is based on AFR methods, that can be adapted to the DREAM tool by replacing the 3D files by the vectorized image. To do so, it is necessary to translate the written AM rules to geometrical conditions. Depending on those conditions, the surfaces and curves will be classified and compared to the parameters of the rules.

Following this analysis, the recommendations will be displayed on the sketch using a graphic interface, showing the results of the geometrical analysis.

4.3. TOOLS USED

To carry out the development of the tool, the program will be under Python for a continuous integration with the textual analysis [8]. The main libraries will be OpenCV for the image processing part, as well as SVGPathTool for the creation and manipulation of vectorized images.

5 FIRST RESULTS

5.1. INPUT SKETCH AND SHAPE EXTRACTION

The current state of the image analysis program allows to open an image, select the region of the sketch, skeletonize the image, and detect the edge points. The graphic interface is programmed with the library Tkinter, that allows to display images and include widgets to operate the program. The input is a .png image of an idea sheet designed for the prototype. The analyzed object is a simple cube, as the program will be tested with increasing difficulty of ideas. This approach will allow to identify difficulties and problems inside the program, while integrating different cases and situations.

After opening the image and selecting the part of the image that will be analyzed with OpenCV and Tkinter, a step of image correction is applied, allowing to control the luminosity and threshold of the input image, as shown in Figure 9. On this figure, we can see a draft of a formalized idea sheet that resumes the main parts of an idea sheet, with the text and sketch part, while adding some subsidiaries information about the idea.

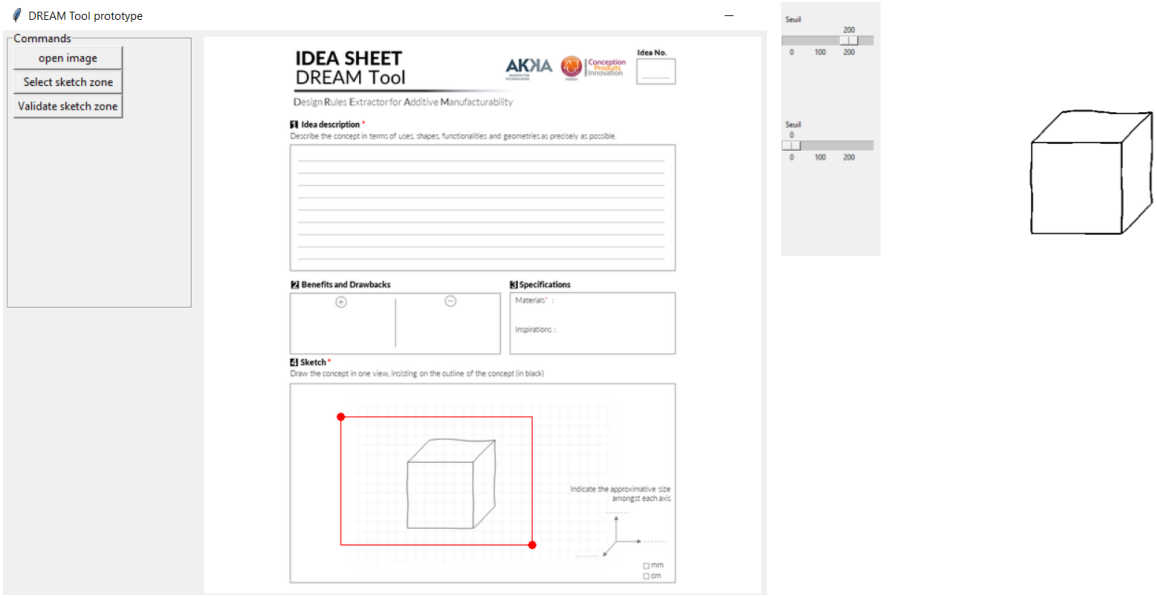


Figure 9. Input and preprocess of the sketch

The skeletonization is made with the function “skeletonize” from the library Skimage. On Figure 10, two methods are displayed, Zha84[] and Lee94[], to compare the results on different use cases. For the cube example, we can’t see a relevant difference between the two methods.

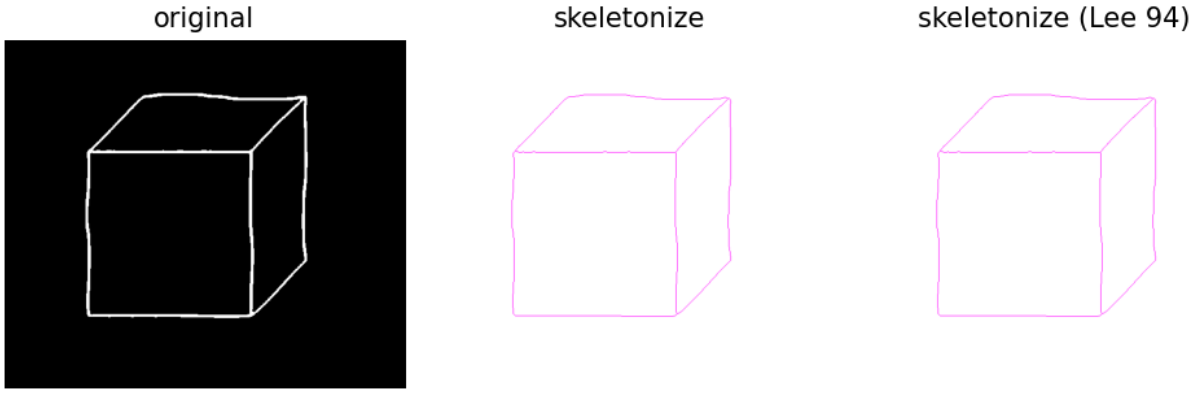


Figure 10. Skeletonization of the clean sketch

Finally, the edge points of the sketch are identified using OpenCV with the Harris Corner Detection [] function, as displayed in Figure 11. However, the argument of this function has a great impact on the outcome of the program, on the precision and number of points detected. To counter this problem, adding a manual interaction with the user to change those parameters can be relevant.

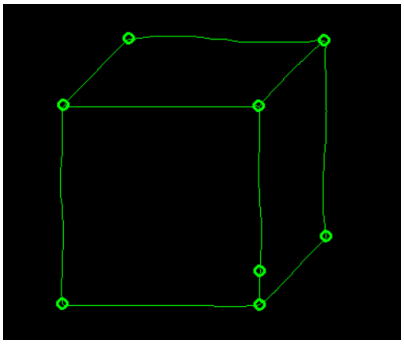


Figure 11. Identification of the edge points

5.2. FUTURE WORK

The upcoming work will rely on the creation of vectors between the identified points, that will be fitted to the 1-pixel line skeleton. To do so, a quadratic function will minimize the distance between the pixel line and the vector by changing the control points of the Bezier Curve. After this step, an algorithm will further increase the precision and simplification of the curve to obtain a clean vector representation of the sketch. Afterward, the geometrical analysis part will look for the regions and lines associated to AM design rules. A comparison will therefore be made to see if the criteria match the characteristics required by the design rules. Finally, the detected features will be displayed using the OpenCV and Tkinter libraries.

6 CONCLUSION AND FUTURE WORK

Offering new possibilities to designers during the prototype phases with AM with help to reduce costs and production time by anticipating manufacturing errors while offering knowledge to any beginner in AM. To do so, the study of idea sheet from the ideation workshops offers plenty of information, even with little knowledge of the described product. The text and image parts contain different type of data that can be harvested and analysed respectively with natural language processing and image analysis. As the text analysis part is already prototyped, the current goal is to develop the free-hand sketch analysis to obtain comparable results. Later, the duality between the two parts could also be studied to improve the computational assistant's results.

For the sketch analysis part, the difficulty resides in the high variability of the input drawing, and its interpretation for a computer. To do so, the processing and modification of the input image is necessary to achieve an analysis. To that extent, preprocessing coupled with vectorization reduces the number of information treated by the program, by freeing itself from the background and the scale of the strokes, to get a set of computable mathematical function. This model will then be able to be geometrically analysed to be compared to a set of AM design rules translated to geometric conditions. Finally, the display of those element will give indications for designer will helping to better understand AM processes.

On another side, a quantitative evaluation of 3D printed concepts can be done by comparing the results of 3D prints for which the designers used the DREAM tool to prints made by someone with the same knowledge level of 3D printing. However, this approach needs a unique interpretation of a sketch and the applicable rules.

Finally, although the tool is oriented towards AM, it would eventually be possible to modify the rules to deal with other manufacturing areas, the method remaining the same.

REFERENCES

[1]: M. François, F. Segonds, M. Rivette, S. Turpault, P. Peyre, *Design for additive manufacturing (DfAM) methodologies: a proposal to foster the design of microwave waveguide components.* Virtual and Physical Prototyping, 2019, 14 (2), pp.175-187, 2019

[2]: E. Herzog, *An Approach to Systems Engineering Tool Data Representation and Exchange* Science and Technology, no. 867, 2004.

[3]: T. Richter, H. Watschke, F. Schumacher, T. Vietor, E*xploitation of potentials of additive manufacturing in ideation workshops,* The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC2018) Bath, UK, 2018.

[4]: B. Rocheton, F. Segonds, F. Laverne, N. Perry, *HESAM: A Human centered Sustainable Additive Manufacturing tool for early design stages*. Computer-Aided Design & Applications, 18(2), pp258-271, 2021

[5]: F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, M. le Coq, *Assembly based methods to support product innovation in design for additive manufacturing: An exploratory case study*, Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, vol. 137, no. 12, 2015, doi: 10.1115/1.4031589.

[6]: F. Laverne and S. G. Industriel, *Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d ' intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique,* HAL Id : tel-01448311 l ' École Nationale Supérieure d ' Arts et Métiers Concevoir avec la Fabr, 2017.

[7]: F. Segonds, *Design By Additive Manufacturing: an application in aeronautics and defence*, Virtual and Physical Prototyping, vol. 13, no. 4, pp. 237–245, 2018, doi: 10.1080/17452759.2018.1498660.

[8]: Fossey, Oscar & Segonds, Frederic & Pinquié, Romain, *DREAM: Design Rules Extractor For Additive Manufacturability.* CONFERE2021, Saint-Malo, 2021

[9]: Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., et al.. *Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints,* CIRP Annals-Manufacturing Technology, 65(2), pp. 737–760,2016.

[10]: L. Kassner, C. Gröger, B. Mitschang, and E. Westkämper, *Product life cycle analytics -next generation data analytics on structured and unstructured data*," in Procedia CIRPvol. 33, pp. 35–40, 2015.

[11]: J. W. Booth, J. Alperovich, P. Chawla, J. Ma, T. N. Reid, and K. Ramani, *The design for additive manufacturing worksheet*, Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, vol. 139, no. 10, pp. 1–9, 2017

[12]: W.-C. Cheung and J. Moultrie, *3D Printing Design Rules*, p. 6, 2013.

[13]: Kumar, G.; Bhatia, P.K. *A detailed review of feature extraction in image processing systems,* In Proceedings of the 2014 FourthInternational Conference on Advanced Computing & Communication Technologies, Rohtak, India, 8–9 February 2014

[14]: C. Yan, D. Vanderhaeghe, and Y. Gingold, *A benchmark for rough sketch cleanup*. ACM Trans. Graph. 39, 6, 2020

[15]: J-D. Favreau, F. Lafarge, and A. Bousseau. *Fidelity vs. simplicity: a global approach to line drawing vectorization*. ACM Trans. Graph. 35, 4, 2016.

[16]: A. Bartolo, K. P. Camilleri, S. G. Fabri, J. C. Borg, and P. J. Farrugia. 2007. *Scribbles to vectors: preparation of scribble drawings for CAD interpretation*. In Proceedings of the 4th Eurographics workshop on Sketch-based interfaces and modeling (SBIM '07),New York, NY, USA, pp. 123–130, 2007

[17]: E. Simo-Serra, S. Iizuka, K. Sasaki, and H. Ishikawa, *Learning to simplify: fully convolutional networks for rough sketch cleanup*. ACM Trans. Graph. 35, 4, Article 121 , 2016

[18]: X. Hilaire, K. Tombre, *Robust and accurate vectorization of line drawings*. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI) 28, 6, 2016.

[19]: S.-H. Zhang, T. Chen, Y.-F. Zhang, S.-M. Hu, And R. R. Martin, *Vectorizing cartoon animations.* IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG) 15, 4, 2009.

[20]: G. Noris, A. Hornung, R. W. Sumner, M. Simmons, And M. Gross, *Topology-driven vectorization of clean line drawings.* ACM Transactions on Graphics (TOG) 32, 1, 4. 2013

[21]: M. Bessmeltsev and J. Solomon, *Vectorization of Line Drawings via Polyvector Fields*, ACM Trans. Graph. 38, 1, Article 9, 2019

[22]: S. Subrahmanyam, M. Wozny. 1995. *An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided process planning*, Computer in Industry, Volume 26, Issue 1, pp. 1-21, 1995

[23]: T. Schjelderup Leirmo, K. Martinsen, *Deterministic part orientation in additive manufacturing using feature recognition*, Procedia CIRP, ISSN 2212-8271, Volume 88, pp. 405-410, 2020

[24]: B. Babić, N. Nešić, and Z. Miljković, *Automatic feature recognition using artificial neural networks to integrate design and manufacturing: Review of automatic feature recognition systems.* Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 25(3), 289-304, 2011

[25]: S. Michalski, J. Carbonell and T. Mitchell, *Machine Learning: An artificial Intelligence Approach*, 1983

[26]: X. -W. Chen and X. Lin, *Big Data Deep Learning: Challenges and Perspectives*, in IEEE Access, vol. 2, pp. 514-525, 2014

[27]: P. Qi, Y. Zhang, Y. Zhang, J. Bolton, C. D. Manning. *Stanza: A Python Natural Language Processing Toolkit for Many Human Languages*.

[28]: Y. Li, T. Yang, *Word Embedding for Understanding Natural Language: A Survey*, Srinivasan, S. (eds) Guide to Big Data Applications. Studies in Big Data, vol 26. Springer, Cham, 2018

[29]: R. Pinquie, *Proposition d'un environnement numérique dédié à la fouille et à la synthèse collaborative d'exigences en ingénierie de produits*, pp. 109-111, 2016

Méthode de visualisation de données 3D et de localisation pour la conception d'une interface de commande d'un drone aquatique de surface (USV)

GUILLE Simon[1], MEYRUEIS Vincent[1], AOUSSAT Améziane[1]

[1]Laboratoire « Conception Produit et Innovation » École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 151, boulevard de l'Hôpital - 75013 Paris, France

Mots clés : interface, conception, expérience utilisateur, drone aquatique de surface, centré utilisateur

1 Contexte

Les drones sont de plus en plus utilisés dans différents domaines et regroupent un spectre de véhicules incluant tout « véhicule terrestre, naval ou aérien, contrôlé à distance ou de façon automatique » [1]. Les drones aquatiques de surfaces (USV) ont d'abord été employés à partir de 1990 par l'US Navy pour des missions anti-terroristes marines [2]. Ensuite, leur utilisation a été étendue à l'industrie [3], ils permettent de diminuer les coûts, de faciliter l'inspection et tout cela sans mettre en danger les vies humaines.

En phase d'utilisation l'opérateur d'un drone n'aura pas toujours de vision directe sur ce système, c'est pour cela que des équipements de perception et positionnement sont implémenter sur ce dernier pour transmettre à l'opérateur l'état de fonctionnement du drone au travers d'une interface graphique implémenter sur un poste de contrôle qui centralise toutes les commandes de ce drone.

Le recours à la visualisation d'un jumeau numérique (interactif en temps réel) semble une solution intéressante pour servir d'interface de visualisation et de précession pour l'utilisateur.

Nous détaillerons dans cet article la conception de l'interface au travers de l'utilisation et la mise en place d'un jumeau numérique qui collecte en temps réel les informations de diffèrent capteurs pour permettre la bonne utilisation du drone par un opérateur non expert dans le pilotage de drone.

Nous détaillerons la chaine de traitement de l'information et chercherons à évaluer la meilleure méthode de conception d'interface utilisateur pour le pilotage du drone.

2 Etat de l'art

2.1 Perception du drone

Lors de l'utilisation du drone, l'utilisateur ne pourra plus voir le drone directement car il sera trop loin du point de pilotage. Le pilote n'a donc plus aucun retour d'information quant à l'état du drone. Pour cela nous devons étudier les différents types de perception qui sont utiles pour le pilote et comment les implémenter dans le système. On retrouve trois types de perceptions [4] :

- Intéroception : information sur l'état interne du robot
- Extéroception : information sur l'état du monde extérieur
- Proprioception : information sur l'état du robot vis-à-vis du monde extérieur

L'intérêt de transmettre ces perceptions à l'utilisateur est d'améliorer le pilotage du drone en informant le pilote de l'environnement dans lequel il évolue et de l'état du drone dans celui-ci. Cela se traduit par l'implémentation de différents capteurs sur le drone et l'analyse des données issues de ces derniers. L'objectif étant de pouvoir retourner la position du système dans l'espace ainsi que l'environnement qui l'entoure.

2.2 Matériel

Pour ce projet nous avons opté pour le matériel suivant : une caméra à champ de profondeur, une caméra de suivi et un sonar.

La caméra de suivi permet d'obtenir la position et l'orientation du drone grâce à une centrale inertielle et deux caméras fish-eyes [5]. Ce capteur renvoie des données nécessaires à la proprioception.

La caméra à champ de profondeur permet de récupérer un nuage de point de l'environnement qui entoure la partie émergée du bateau [6]. Ce capteur renvoie des données nécessaires à l'extéroception.

Le sonar permet de cartographier l'environnement autour de la partie immergé du bateau [7]. Ce capteur renvoie des données nécessaires à l'extéroception.

Figure 1. Exemple de capteurs pour la perception de l'environnement et de son positionnement dans l'espace

2.3 Système d'Exploitation (OS)

Afin de ne pas être limité par le système d'exploitation installé sur l'ordinateur embarqué nous avons choisi de travailler sur Ubuntu 16.04. Ensuite, pour utiliser les différents dispositifs nous avons installé ROS (Robot Operating Système) Kinetic. Cela nous permet de récupérer les données qui nous intéresse pour la réalisation de l'interface.

2.4 Traitement de données

Pour le traitement de données, nous avons choisi de travailler avec un algorithme de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)[8], pour être plus précis nous avons utilisé RTAB-Map (Real-Time Appearance-Based Mapping)[9]. Celui-ci permet de cartographier l'environnement et de positionner notre système dans l'espace. Nous utilisons pour ce faire les deux caméras Intel Realsense couplées : La D435i génère un nuage de point et renvoie également la position et l'orientation du système, la T265 va renforcer la précision sur la position et l'orientation car les données de la D435i sont trop peu précises et bruitées. Avec ces deux caméras, nous pouvons obtenir un résultat relativement précis de l'environnement.

En outre, nous utilisons un driver[10] afin de récupérer les données du sonar sur ROS. Le driver récupère les données brutes, les traite et les publie pour ensuite les mettre en forme.

2.5 Interface Utilisateur de pilotage

Avec l'émergence des drones personnels, la réalisation d'une interface orientée vers l'utilisateur devient donc une étape importante dans la démarche de conception du drone et de son interface de pilotage. L'objectif est de créer une interface qui est simple d'utilisation pour l'utilisateur, ergonomique et qui contient toutes les informations nécessaires sans surcharger l'écran de pilotage. Dans le commerce, la société Parrot fournit un travail avancé en termes d'interface utilisateur [12]. En effet, ils proposent une interface centrée sur la caméra du drone avec sur les bordures les informations importantes pour le pilotage et l'utilisation des différentes options du système. Par exemple, une section est réservée à l'altitude, la distance ainsi qu'à la vitesse du drone. Une autre est dédiée à la sélection du mode vidéo lors de la session. Enfin, un espace est utilisé pour l'affichage de la géolocalisation du drone afin de savoir où se situe le drone dans l'environnement et d'améliorer l'expérience de pilotage.

2.6 Utilisation du jumeau numérique comme interface de contrôle

La technologie des jumeaux numériques est également en plein essor dans le milieu des véhicules. Cela permet de connaître l'état du véhicule et de ce qui entoure le véhicule. Récemment, l'entreprise Volvo a choisi d'utiliser la technologie Unreal Engine d'Epic Games afin de créer un jumeau numérique de la voiture et de connaître l'environnement extérieur dans le but d'informer le conducteur de ce qu'il se passe dehors pour qu'il se sente en sécurité pendant la conduite. Une autre utilité du jumeau numérique de Volvo est d'afficher l'état de la voiture en temps réel. Par exemple, l'ouverture des portières ou encore l'allumage des feux [13].

2.7 Synthèse et constat

Au vu de l'état de l'art, nous pouvons nous rendre compte que les données reçus doivent être reprises pour qu'elles soient compréhensibles pour les futurs utilisateurs. En effet, les données telles qu'elles sont en sorti de capteur ne peuvent pas être utilisées pour piloter le drone et analyser l'environnement de manière aisée.

De plus, il faudra étudier la mise en place des différentes informations afin que le pilotage du drone soit le plus compréhensible et agréable pour l'utilisateur. Nous allons donc mettre en place une méthodologie de conception pour l'interface.

3 Problématique et Hypothèses

Aux vues de cet état de l'art nous proposons de traiter cette problématique dans la suite de ce papier :

Comment rendre compréhensible et organiser les différentes données pour la réalisation de l'interface utilisateur du drone ?

À la suite de cette problématique nous pouvons émettre les hypothèses suivantes :

- Utilisation d'un jumeau numérique pour aider au pilotage du drone
- Limiter la visualisation à l'environnement proche du drone
- Améliorer la visualisation des données des capteurs pour faciliter la compréhension

En prenant en compte ces hypothèses nous pouvons établir une méthodologie de conception pour l'interface.

4 Proposition d'une méthode pour la conception d'une interface utilisateur pour des utilisateurs non expert

La méthodologie peut être segmentée en quatre parties :

- Priorisation de l'information
- Utilisation d'un jumeau numérique
- Disposition spatiale des informations sur l'écran de l'interface
- Intégration de la méthode dans le cas de notre système

4.1 Transfert de l'information

Dans un premier temps, il faut récupérer toutes les données nécessaires pour le pilotage. Dans ces données on compte le nuage de point généré par la caméra à champ de profondeur Intel

RealSense D435i, la position dans l'espace issue de la caméra de positionnement Intel RealSense T265 et le nuage de point donné par le sonar.

Les données des deux caméras sont traitées par un algorithme de SLAM qui génère un nuage de point de l'environnement et qui positionne le système dans celui-ci. Ensuite, ces données et celles du sonar sont récupérées par un algorithme du package Rosbridge [11]. Cela permet de transférer les données émises par un publisher ROS par wifi (figure 5).

En outre, sur Unity nous avons télécharger la bibliothèque ROS# qui permet de récupérer les données émises par Rosbridge et de les mettre en forme. Une fois récupérées, les données sont donc traitées en fonction de leur nature (nuage de points, position et orientation) et sont afficher dans l'environnement 3D de Unity.

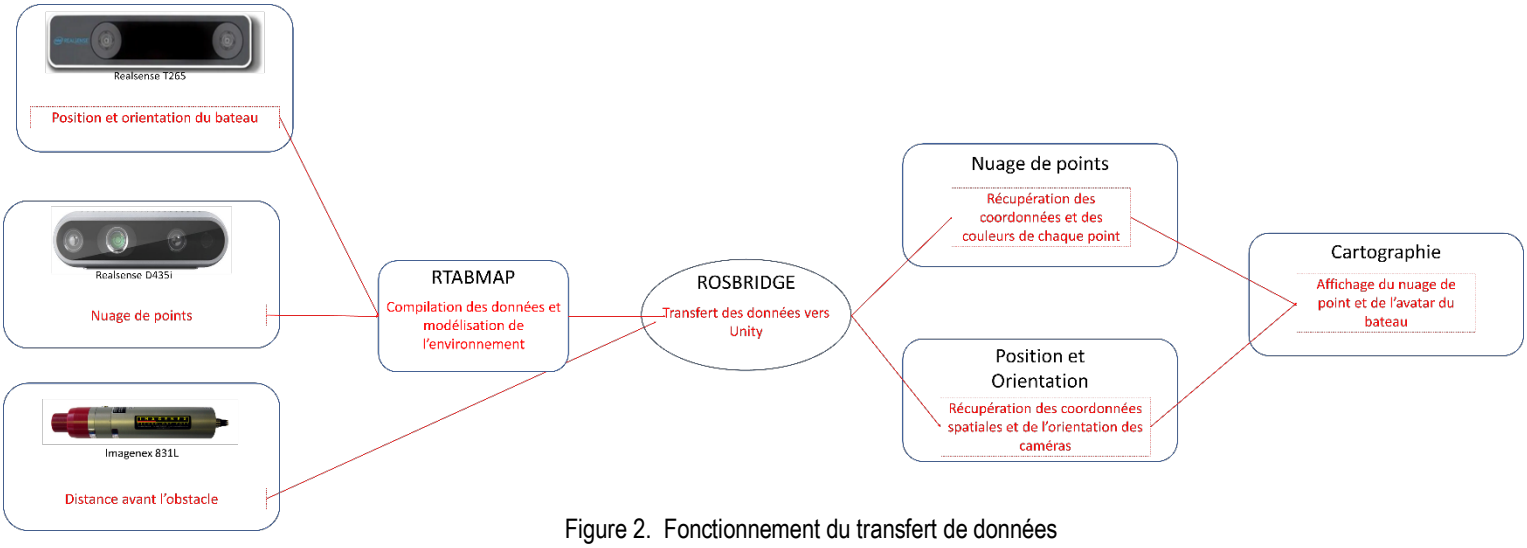


Figure 2. Fonctionnement du transfert de données

4.2 *Priorisation de l'information*

Dans un deuxième temps nous devons hiérarchiser les informations transmises à l'utilisateur. Nous allons donc « identifier les registres d'informations, hiérarchiser ces données et les prioriser » [13]. Nous devons donc passer en revue toutes les informations que nous disposons pour la réalisation de l'interface et ensuite définir l'importance de chaque information. Nous avons pu dégager les informations suivantes :

- Flux vidéo caméras
- Position du drone
- Voyant enregistrement
- Heure, Date
- Intensité du réseau wifi

Ensuite, il faut définir quelles informations sont indispensable pour le pilotage du drone et quelles informations peuvent être mises de côté si l'espace n'est pas suffisant pour toutes les afficher. Pour cela, nous avons établi une échelle de priorité pour l'ensemble des éléments présent sur l'interface :

- 1 : peu important, peut être mis de côté facilement
- 2 : important, peut être mis de côté s'il n'y a vraiment pas le choix

- 3 : indispensable, ne peut pas être mis de côté

Dans un tableau on note chaque information afin de déterminer pour la suite quelles seront les informations à garder en permanence à l'écran et lesquelles peuvent être cachées. Par exemple, on peut réaliser le tableau suivant afin de voir quelles sont les informations importantes :

Information	Coefficient de priorisation
Flux vidéo caméra	3
Position du drone	3
Voyant enregistrement	3
Heure, Date	2
Intensité du réseau wifi	3

4.3 Utilisation du jumeau numérique

Avec le jumeau numérique nous pouvons obtenir plusieurs informations qui sont plus ou moins facilement intégrable à l'interface. En effet, l'intérêt du jumeau numérique est d'informer sur l'état du système mais celui-ci doit être intégré de manière réfléchie afin de ne pas gêner l'expérience de pilotage. Par exemple, nous pouvons utiliser le jumeau pour afficher la distance parcourue du drone. Cela peut se faire sous la forme d'une « jauge » sur laquelle se déplacerait un icone indiquant la position du drone et la distance parcourue. Cela n'implique pas un trop grand encombrement sur l'interface car il serait disposé sur un côté.

En outre, avec la génération d'un nuage de points de l'environnement nous pouvons également placer se jumeau dans l'environnement reproduit par le nuage. Par exemple, nous pouvons imaginer le drone dans un tuyau cylindrique. Nous pouvons imaginer plusieurs vues pour cette configuration afin de les implémenter dans l'interface de pilotage.

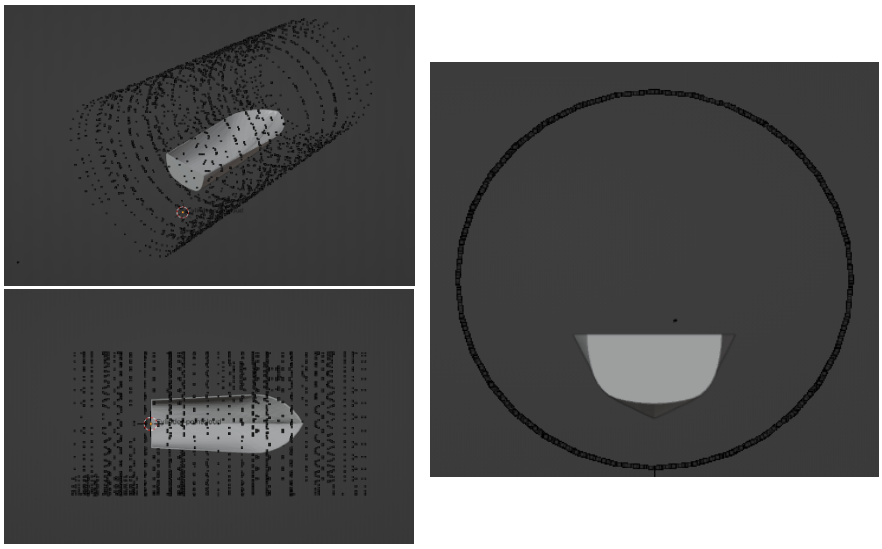


Figure 3. Jumeau numérique dans plusieurs configurations

Ces vues du jumeau numérique permettent d'informer facilement l'utilisateur de l'orientation du bateau par rapport à son environnement. En effet, le pilote n'a pas besoin d'être expert pour comprendre l'état du bateau. Il n'a pas besoin de savoir lire et interpréter un indicateur d'attitude pour connaître l'orientation du système.

4.4 Disposition spatiale des informations sur l'écran de l'interface

Pour la disposition des informations nous avons représenté, sous la forme d'un canevas, une interface utilisateur type. Nous avons mis en avant les différentes zones de cette interface afin de les identifier en fonction de leur utilité.

- Zones rouges : zones dites « coup d'œil », elles permettent d'avoir des informations sur l'état du système en un coup d'œil. Nous pouvons prendre comme exemple l'intensité du réseau en haut à droite sur la majorité des téléphones portables ou encore l'indicateur d'enregistrement sur les caméscopes. Ces zones ne sont pas vouées à être regardées en permanence et n'influe pas directement sur le pilotage du drone.
- Zones vertes : zones d'utilité secondaire, ces informations indiquent également sur l'état du système. En revanche, elles sont plus utiles que les zones « coup d'œil » pour le pilotage du drone. On peut prendre comme exemple une boussole qui indique le cap du drone ou encore la position du drone dans son environnement.
- Zone bleue : zone d'utilité principale, les informations présentes sont indispensables au pilotage du drone. Par exemple, nous pouvons intégrer le flux vidéo de la caméra ou encore les vues du jumeau numérique. Pendant le pilotage, l'utilisateur passera la majeure partie de son temps d'utilisation sur cette zone donc elle doit être la plus compréhensible possible.

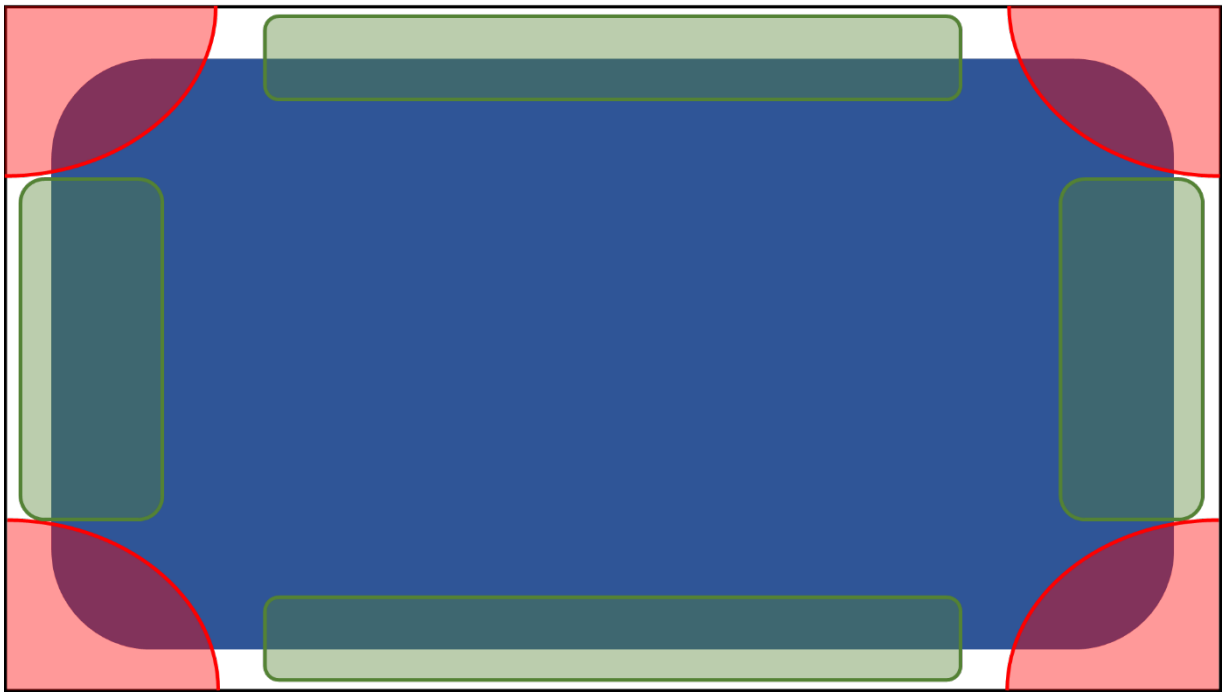


Figure 4. Canevas de l'interface utilisateur

Pendant la conception de l'interface nous avons appliqué des techniques de mise en page. Notamment le principe de symétrie [14] qui permet d'avoir une interface équilibrée et qui permet de se repérer facilement. Nous avons également utilisé le principe de transparence [14], cela permet d'afficher des informations (zones verte et rouge) en permanence sur l'écran sans trop gêner l'utilisateur. Cette technique sert aussi à afficher des messages d'erreur sur l'écran, par exemple lors d'une perte de connexion.

4.5 Intégration de la méthode dans le cas de notre drone

Dans le cas de notre système, le poste de commande est composé de deux parties : une manette qui sert à gérer les mouvements du drone et un ordinateur qui permet de supporter l'interface utilisateur que nous sommes en train de produire. Les deux parties sont liées et peuvent interagir entre elles.

Pour la réalisation de l'interface, nous nous sommes appuyés sur les trois étapes précédentes ainsi que sur ce qui se faisait sur le marché afin de comprendre comment était positionné les informations. Nous avons pu réaliser une ébauche d'interface dans laquelle toutes les informations sont placées selon les techniques mise en avant plus tôt. Nous avons également intégré le jumeau numérique à l'interface afin d'avoir un suivi de l'état du système et permettre un meilleur pilotage du drone.

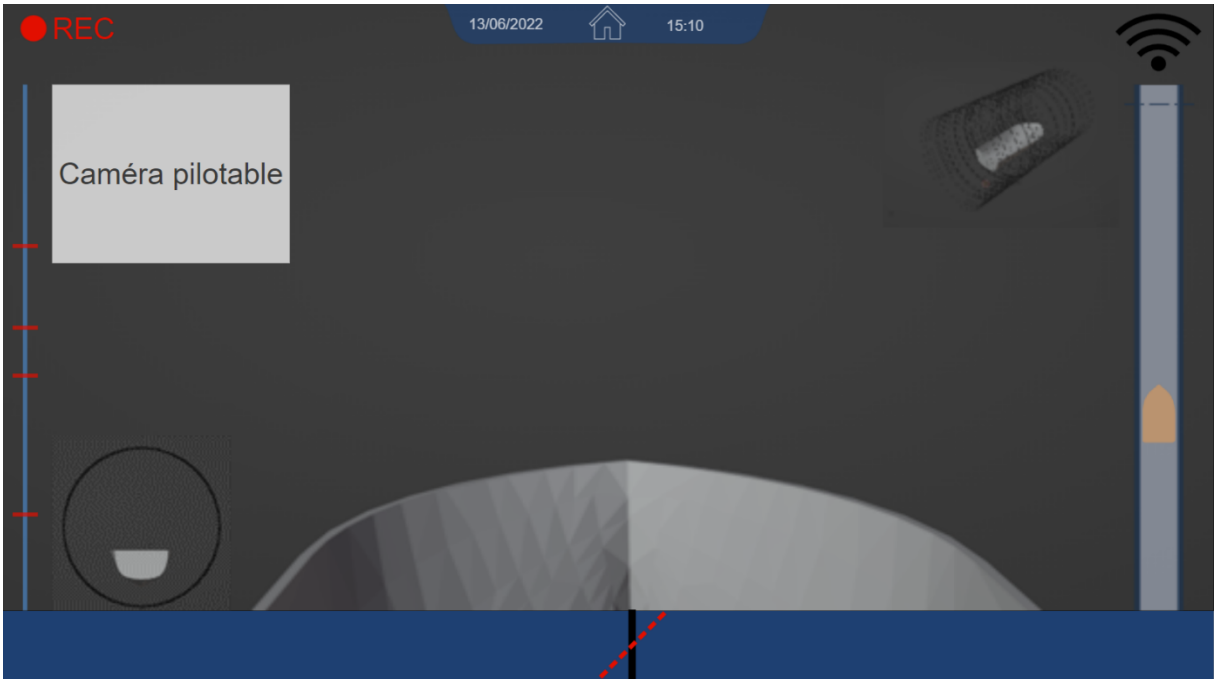


Figure 5. Exemple d'ébauche d'interface utilisateur pour le pilotage

Sur cette ébauche on peut noter que les différentes techniques sont utilisées. En effet il y a un axe de symétrie défini par la proue du bateau avec une répartition homogène et équilibrée des informations. De plus, les informations présentes sur l'interface ont un coefficient d'opacité inférieur à un afin de garder la plus grande visibilité possible pour l'utilisateur. Nous avons également utilisé la technique de transparence pour les messages d'alertes, par exemple ici pour une perte de connexion entre le drone et le poste de pilotage.

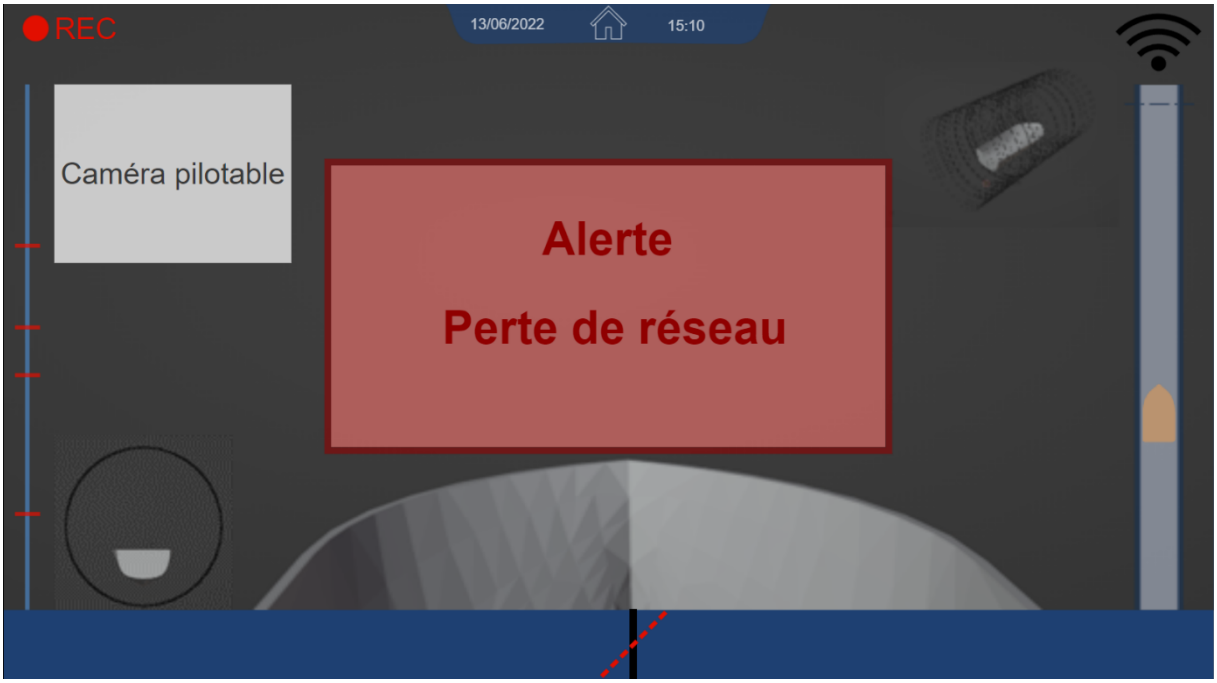


Figure 5. Exemple de message d'alerte

Dans notre exemple, nous avons couplé des actions sur la manette avec des interactions sur l'interface. Nous avons affecté un bouton spécialement pour l'enregistrement. Nous pouvons aussi coupler les boutons ou les joysticks avec d'autres fonctionnalités présentes sur le drone et sur l'interface.

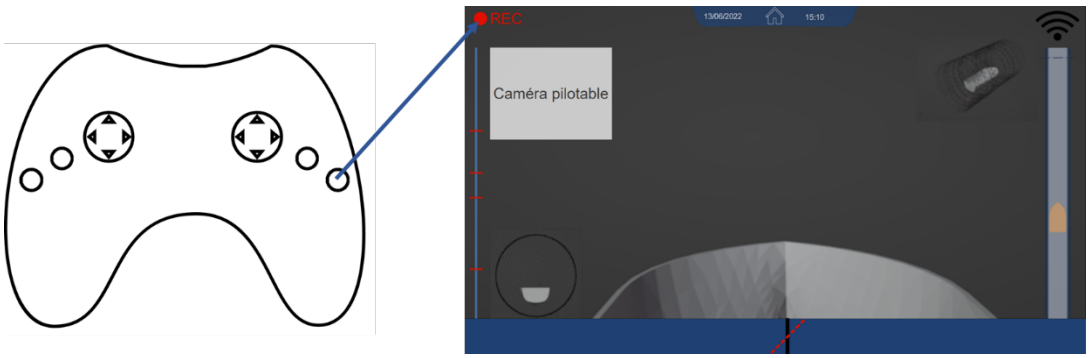


Figure 5. Exemple d'interaction entre la manette et l'interface

5 Résultats / Discussion

L'étude étant encore en cours l'ensemble des résultats n'a pas pu être obtenu et l'efficacité de la méthode reste à démontré cependant, le poste de commande produit fera l'objet d'une expérimentation vérifiant sa pertinence en conditions. La méthode de conception pourra être jugée pertinente si le poste de commande du drone conçue répond à l'ensemble des besoins de l'opérateur tout en s'adaptant aux conditions difficiles de l'environnement. Une attention particulière sera portée sur la mise en forme des données du jumeau numérique et des flux vidéo issu des caméras.

6 Conclusion et Perspectives

La recherche précédente a permis d'organiser et de fusionner plusieurs techniques pour en tirer une méthode adaptée à la conception d'interface homme-machine dans notre cadre. Cependant, il faudra encore faire des tests afin d'avoir des retours des utilisateurs et optimiser la mise en place des informations. De plus, à l'aide d'un état de l'art plus fourni les étapes de cette méthode pourraient être enrichies d'outils déjà existants ou même d'outils spécifiques comme des tableaux recensant les primitives comportementales virtuelles récurrentes et les commandes sensori-moteur associées dans le cas des interfaces hommes-machine.

REFERENCES :

[1] G. Chamayou, Théorie du drone. La fabrique éditions, 2013.

[2] RADM Dr.S.Kulshrestha, « Unmanned Systems – Evolution and their Emerging Role

[3] J. Manley, « Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development », janv. 2008, p. 1 4. doi: 10.1109/OCEANS.2008.5289429

[4] Fraichard, Thierry. "Comment se déplace un robot ?," n.d., 79.

[5] Intel® RealSenseTM Tracking Module 2 (TM2) Datasheet, https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2019/09/Intel_RealSense_Tracking_Camera_Datasheet_Rev004_release.pdf.

[6] Intel® RealSenseTM Camera 400 Series Product Family Datasheet, https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2022/03/Intel-RealSense-D400-Series-Datasheet-March-2022.pdf.

[7] IMAGENEX MODEL 831L DIGITAL PIPE PROFILING SONAR, https://imagenex.com/assets/images/downloads/831L_Manual.pdf.

[8] M. Abouzahir, A. Elouardi, S. Bouaziz, R. Latif, A. Tajer, EURASIP J. Adv. Signal Process. 2016 (2016) 88.

[9] M. Labbé, F. Michaud, J Field Robotics 36 (2019) 416–446.

[10] ROS driver for the pipe profiling sonar IMAGENEX 831L, Alberto Quattrini Li, 29 juillet 2019.

[11] rosbridge_suite - ROS Wiki, http://wiki.ros.org/rosbridge_suite.

[12] nodesign.net. "FreeFlight 6 - nodesign.net - Interface de pilotage du drone Anafi de Parrot." Accessed June 15, 2022. https://www.nodesign.net/portfolio/freeflight-6-2-anafi/.

[13]Unreal Engine. "The Path to Zero Collisions: Behind Volvo Cars New Electric HMI Program." Accessed June 15, 2022. https://www.unrealengine.com/en-US/spotlights/the-path-to-zero-collisions-behind-volvo-cars-new-electric-hmi-program.

[14] Vanderdonckt, Jean, and Xavier Gillo. "Visual Techniques for Traditional and Multimedia Layouts." In *Proceedings of the Workshop on Advanced Visual Interfaces - AVI '94*, 95–104. Bari, Italy: ACM Press, 1994. https://doi.org/10.1145/192309.192334.

FORMALISATION D'UN MODELE METHODOLOGIQUE STRUCTURANT POUR LA CREATION DE VALEUR BASEE SUR L'APPROCHE DESIGN THINKING

Fabio ICARDO[1,2], Améziane AOUSSAT[1], Nathalie TUIZAT[2]
[1] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI), 151 boulevard de l'hôpital – 75013 Paris
[2]Logic Design, 221 Bd Jean Jaurès, 92100 Boulogne-Billancourt
Mots clés (5 maxi) : Design Thinking, Formalisation, Process, Modèle

1 INTRODUCTION

Pour une organisation, investir dans l'innovation est vital afin de répondre aux évolutions du marché en termes de demande et de concurrence. Le Manuel d'Oslo définit quatre types d'innovation : les innovations de produit, les innovations de procédé, les innovations de commercialisation et les innovations d'organisation. Une organisation a donc plusieurs leviers pour innover et créer de la valeur, que ce soit à travers son offre ou ses méthodes de management.

L'innovation est par définition un synonyme de création de valeur. Depuis la conceptualisation de l'approche Design Thinking en 1980 à Stanford, de nombreuses démarches de résolution de problèmes ont vu le jour. Les entreprises dans le secteur du conseil se basent notamment sur ces approches pour structurer et développer leurs activités.

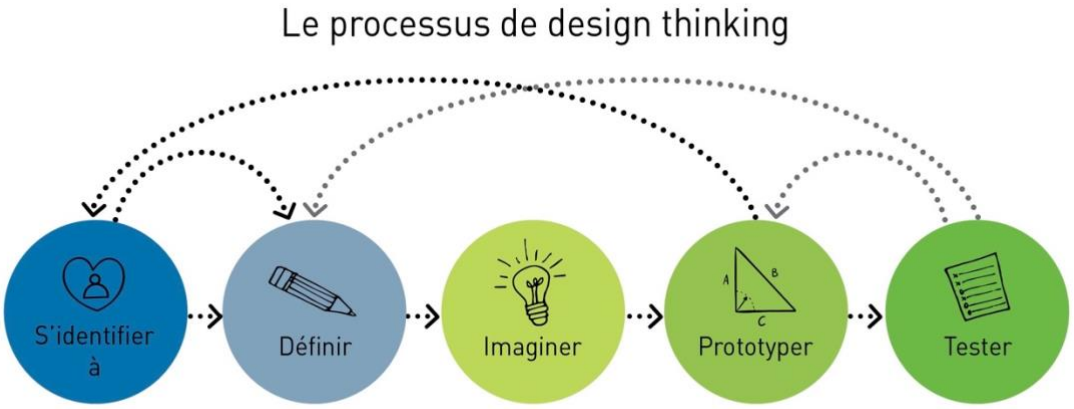


Figure 1.1 : Processus de Design Thinking

Le Design Thinking, aussi appelé « innovation participative », est une approche agile et collaborative dont la créativité est le moteur. Elle mêle le domaine du design ainsi que celui du management. Cette intelligence de résolution se base sur le participatif ainsi que sur l'itération. Généralement, le Design Thinking est décrit par un processus de cinq étapes : empathie, définition, idéation, prototypage et test. De nombreuses méthodes de management et de gestion de projet découlent de cette approche qui met l'individu au centre en l'intégrant dans tout le processus de

création de valeur. En conseil, le Design Thinking permet d'intégrer la dimension collaborative au sein de l'équipe projet. L'aspect itératif est aussi crucial dans cette approche car une démarche « test and learn » permet de se rapprocher au mieux de la satisfaction du besoin.

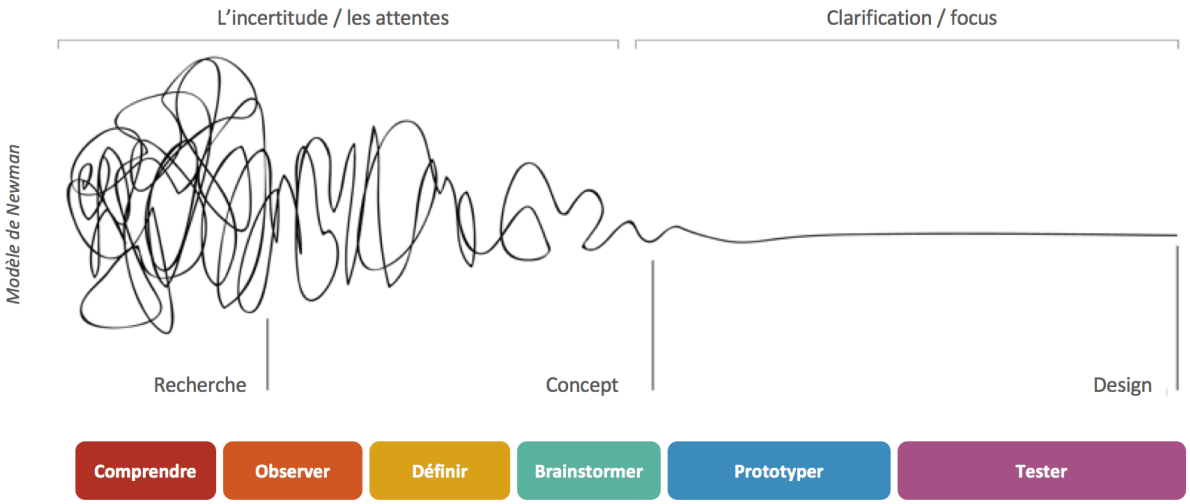


Figure 1.2 : Le Design Thinking selon Damien Newman

Les représentations du Design Thinking diffèrent selon ceux qui la pratiquent. L'une des plus répandues est le « double diamant » développée par le UK Design Council. Le processus de Design Thinking est représenté par des phases de divergence puis de convergence qui sont caractérisées par les cinq étapes du Design Thinking.

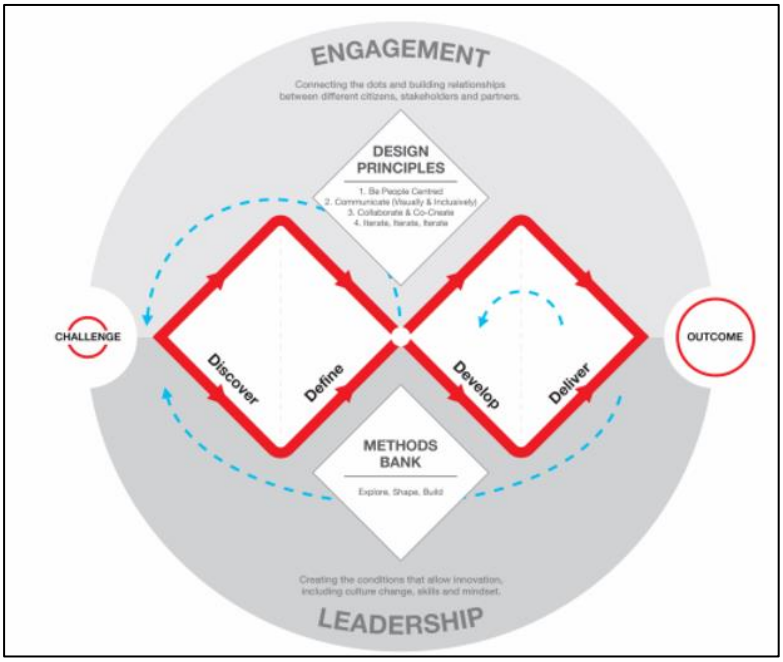


Figure 1.2 : Le Design Thinking selon le UK Design Council

Les démarches qui en découlent sont basées sur l'expérience ainsi que la capitalisation de la connaissance. Les représentations des étapes du Design Thinking sous forme schématique ne sont pas suffisantes pour qu'une organisation traite de manière efficace les problématiques d'entreprise. La formalisation d'un modèle méthodologique structurant est donc primordiale pour assurer la cohérence et l'efficacité d'une organisation basée sur l'innovation participative.

L'intérêt de la formalisation est multiple. Elle vise à développer un référentiel qualité en entreprise qui permet à la fois de limiter les zones d'incertitudes et aussi améliorer le service fourni. Le

triangle d'or « Coût-Qualité-Délai », utilisé en gestion de projet, est pertinent pour mesurer la performance d'une activité. Afin d'être compétitif dans un marché hyper concurrentiel, il est nécessaire de chercher la meilleure synergie possible des coûts engendrés, de la qualité du service fourni et des délais de réalisation. Le time-to-market est directement corrélé à la gestion de ces trois contraintes.

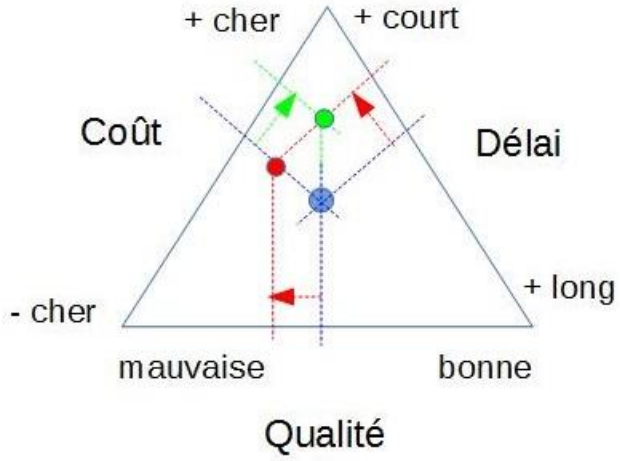


Figure 1.3 : Triangle Coût-Qualité-Délai

Par nature, les approches qui découlent du Design Thinking sont évolutives. Cet aspect n'est pas incompatible avec la formalisation d'un modèle visant à capitaliser les connaissances et compétences des individus, dans une logique d'amélioration continue. La description seule des activités et des ressources ne suffit pas à modéliser convenablement les différents processus d'une organisation. De plus, les modèles classiques avec une approche opérationnelle, décrivant les activités de la manière la plus exhaustive possible, ne sont pas les plus adaptés pour le Design Thinking.

2 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

L'objectif de cette étude est de développer un modèle méthodologique structurant pour la création de valeur, reproductible et généralisable, basé sur une approche Design Thinking.

Le développement de ce modèle est pertinent pour capitaliser la connaissance et ainsi la création de valeur au sein d'une organisation.

3 ETAT DE L'ART

3.1. Approches de formalisation

On s'intéressera aux démarches de résolution de problèmes qui se basent sur l'approche Design Thinking pour créer de la valeur. La difficulté de cette recherche est de mettre au point un modèle qui permet à la fois de laisser libre cours à la créativité mais également de structurer l'activité d'une organisation.

Formaliser signifie donner une forme à un élément ou un groupe d'éléments. Pour une entreprise, l'action de formaliser correspond à la description de la structure interne ainsi que des différentes activités et services. Cette initiative permet de mettre au point un modèle structurant pour l'activité de l'entreprise. Les bénéfices de la formalisation sont multiples. Elle est utile dans le développement d'un référentiel qualité au sein de l'entreprise afin de faciliter l'amélioration continue et le traitement des conflits dans l'organisation. Aussi, la formalisation permet de capitaliser les connaissances de l'entreprise dans une certaine mesure.

Selon les secteurs ainsi que les types d'activités, on retrouve diverses approches de formalisation. Les points de vue de ces différentes descriptions correspondent au niveau de détail souhaité.

Il est possible de distinguer quatre types d'approches classiques pour décrire une entreprise :

- L'approche axée sur l'organisation du travail (type Taylorisme) ;
- L'approche systémique (point de vue macroscopique) ;
- L'approche orientée collaborateurs ;
- La description par les processus.

La modélisation par les processus est la plus commune et la plus adoptée notamment avec la mise en application des recommandations des normes ISO de management de la qualité. L'analyse de l'organisation s'opère par les processus de l'entreprise qui contribuent à la réalisation du produit ou la fourniture du service. Cette vision transversale permet de clarifier l'enchaînement des processus et la structure de la chaine de valeur. La description de l'organisation doit être la plus claire et compréhensible par tous les acteurs. On peut donc trouver plusieurs documents structurants qui vont d'une description générale à une description plus fine de l'organisation et de chaque service qui la compose. On identifie :

- Les cartographies des processus ;
- Les fiches processus

La représentation de ces fiches et cartographie peut prendre diverses formes et s'adapte en fonction de l'activité, du type d'entreprise ainsi que de la cible de cette formalisation.

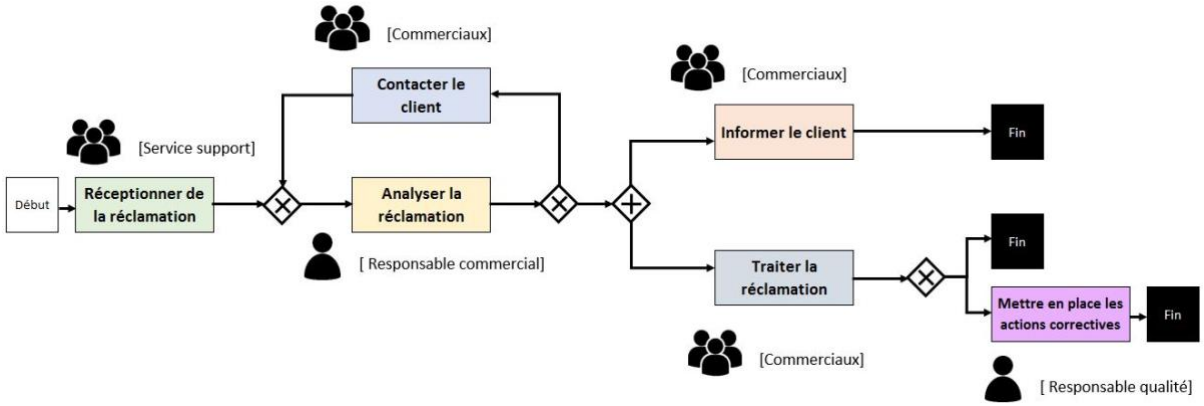


Figure 3.1 : Exemple de formalisation du traitement de réclamation par Iterop

Il existe de nombreux modèles de formalisation qui ont été développés pour répondre au besoin de décrire de manière précise des activités, des services ou des organisations.
Dans notre étude, la représentation systémique avec le modèle SADT est particulièrement intéressante. Le modèle SADT (Structured Analysis and Design Technique) est un modèle majoritairement utilisé en gestion de projet pour décrire un système, une activité ou même une organisation. Ce modèle offre une représentation graphique, par blocs, d'un système complexe par le principe de l'analyse fonctionnelle descendante. On distingue généralement deux types de diagrammes SADT :

- Les actigrammes, qui correspondent à une modélisation des activités du système ;
- Les datagrammes, qui correspondent à une modélisation des données du système.

Ce formalisme permet également de faire apparaître les intéractions entre les différents éléments qui composent notre système à l'étude. Le modèle SADT est donc pertinent pour décrire la structure d'un projet en décrivant les activités réalisées et leur découpage, sous forme d'un actigramme.

La description se fait par niveaux, du bloc le plus général (généralement noté A0), au bloc particulier, jusqu'au bloc détaillé. Cette représentation en strates peut se faire sur autant de niveaux que

nécessaire, il faut donc déterminer au préalable le niveau de description du modèle. Étant donné sa structure, le modèle SADT présente de nombreux avantages :

- Structure hiérarchisée ;
- Facilité d'adaptation ;
- Décomposition détaillée d'un système complexe.

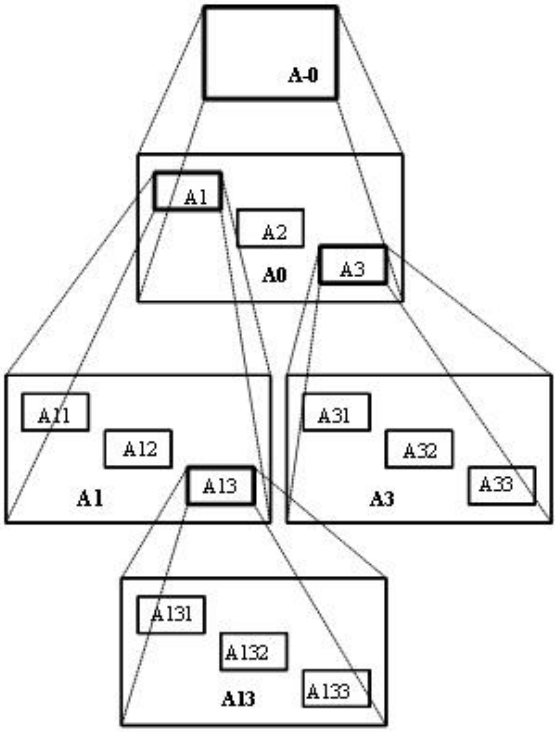


Figure 3.2 : Modèle SADT d'un système

3.2. Formalisation par les outils

Une manière de caractériser les démarches inspirées du Design Thinking est par les outils dont elles font appel. La gestion d'un projet d'innovation collaborative repose sur les cinq phases : empathie, définition, idéation, prototypage et test. Il est possible de décrire ces phases par une composition de différents outils. Dans sa formalisation du Design Thinking, Rémy Ferla propose une liste non exhaustive d'outils utilisés en Design Thinking :

Phase d'observation	Interviews / Questionnaires / Five whys? / Journey Map Analyse de la chaîne de valeur / Empathy map …
Phase définition	Personas / Expérience map / Etat de l'art / Diagramme d'affinité …
Phase d'idéation	Outils de créativité / Moodboard / Sketch / Scenario d'usage / Storytelling / Fiches Idées ...
Phase d'itération	Prototypage / Role-play / Business model canvas / Wireframe / Test utilisateur / Questionnaires / Validation canvas …

Figure 3.3 : Description du Design Thinking par les outils selon Ferla

La formalisation de ces outils apparaît donc essentielle pour construire un tel modèle méthodologique. Formaliser signifie réduire ces outils aux informations essentielles qui permettent la compréhension par un modèle de représentation simple. Cela peut se résumer à une fiche descriptive de chaque outil, comprenant toutes les informations jugées importantes.

L'intérêt est la captation du savoir-faire et des compétences, ainsi il est pertinent de faire apparaître les informations suivantes pour ce qu'on appellera les « fiches outils » :

- Nom de l'outil ;
- Description de l'outil ;
- Démarche d'utilisation ou de mise en place ;
- Les métiers et les missions de chaque personne qui intervient ;
- Les délais ;
- Éventuellement, les coûts associés ;
- Les spécificités liées à l'outil (pourquoi l'utiliser, quelles sont ses particularités…).

Ces fiches permettront de recueillir les compétences et le savoir nécessaire pour mettre en place les étapes de la démarche Design Thinking.

4 DÉMARCHE

4.1. Définition du modèle

La recherche bibliographique nous a permis de mettre en évidence la nécessité et la difficulté de formaliser le Design Thinking. Pour une organisation, la formalisation est un moyen de capitaliser sur les connaissances et compétences qui permettent de créer la valeur ajoutée dans son activité. Il est donc nécessaire d'établir un modèle qui correspond au type d'organisation qui est à l'étude. Plusieurs modèles peuvent décrire une même organisation, il n'existe pas de bon ou mauvais modèle, chacun ayant ses spécificités. Décrire et formaliser une méthode de résolution de problèmes basée sur le Design Thinking nécessite donc d'établir un modèle méthodologique à la fois structurant et laissant une certaine marge de manœuvre pour les activités d'innovation et de créativité. La représentation du Design Thinking sous la forme d'une « boîte à outils » semble être adaptée pour décrire de manière satisfaisante cette méthode de résolution de problèmes. Mais cette description n'est pas suffisante car elle ne communique pas assez sur la démarche ainsi que les étapes qui la compose.

Pour décrire et structurer la démarche d'innovation collaborative, on peut proposer une formalisation dérivée du modèle SADT. Ce modèle peut être simplifié tout en gardant le bénéfice de l'analyse fonctionnelle descendante et la hiérarchisation graphique. La représentation sous forme de bloc permet une clarté et une simplicité de lecture. On peut définir notre modèle avec trois niveaux de blocs :

- Le bloc « Phase », niveau le plus général du modèle qui constitue le découpage le plus global ;
- Le bloc « Étape », niveau intermédiaire de description, un ensemble d'étapes constitue une phase ;
- Le bloc « Outil », niveau de description le plus détaillé, un ensemble d'outils compose une étape.

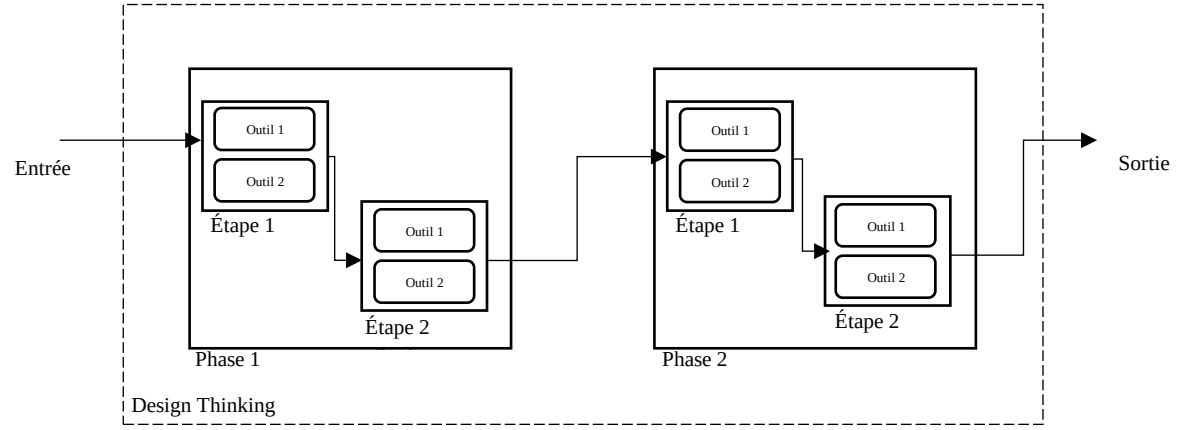


Figure 4.1 : Adaptation du modèle SADT

Le modèle adopté pour tous les blocs serait également similaire à celui de la formalisation SADT mais avec certaines modifications afin de correspondre aux spécificités du Design Thinking :

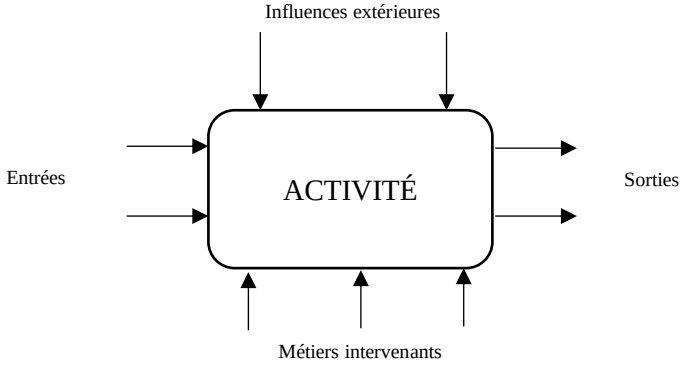


Figure 4.2 : Modèle de bloc inspiré du diagramme SADT

La description d'une méthode basée sur l'approche Design Thinking se fera donc par : les outils qui la composent avec les fiches outils correspondantes et la modélisation graphique inspirée de l'actigramme SADT pour une représentation globale de la méthode.

4.2. Mise en place du modèle

On considère ici une organisation dont la création de valeur ajoutée est basée sur une démarche inspirée du Design Thinking. Il s'agit donc de décrire cette méthode avec notre modèle défini précédemment avec les outils et la représentation graphique SADT.

La démarche adoptée pour cette étude s'appuie également sur une approche Design Thinking. La première étape consiste à appréhender la démarche d'innovation participative mise en place par l'organisation étudiée. Il peut être judicieux de décrire le parcours du besoin client, du besoin exprimé jusqu'à la satisfaction du besoin ainsi que déterminer tous les acteurs et métiers qui interviennent dans ce processus. L'important est de comprendre la démarche afin d'éviter les zones d'interprétation ou les biais personnels.

Il s'agira ensuite d'identifier les phases et étapes de la démarche afin d'avoir les informations nécessaires pour construire notre modèle. Ces informations peuvent être obtenues par l'observation ou des entretiens avec les différents membres de l'organisation. Ensuite, il est nécessaire de recenser de manière exhaustive tous les outils utilisés dans la démarche de résolution de problème. Lors de cet état de l'art, catégoriser les outils selon la phase et l'étape à laquelle ils interviennent est essentiel pour la construction des outils. Par ailleurs, formaliser les outils nécessite de définir les informations essentielles permettent de les décrire : description, ressources, acteurs, démarche, livrables, coût et délai. Ces données peuvent également être obtenues par le biais de l'observation, d'interviews ou des documents internes. La présentation des outils doit se faire avec un modèle commun pour assurer une cohérence et une facilité de compréhension. Il convient donc de définir une charte pour présenter les outils de manière adéquate avec le contexte d'application de l'étude. Dans cette logique, la création d'un lexique est pertinente pour définir un vocabulaire commun aux membres de l'équipe projet.

Enfin, la dernière étape est celle de la construction du modèle graphique en s'inspirant de l'actigramme SADT. On a défini précédemment un modèle de bloc pour la construction du diagramme (figure 4.2). Pour une meilleure clarté et facilité de compréhension, il est possible de rédiger une notice contenant l'essentiel pour comprendre le modèle ainsi qu'un lexique donnant les définitions des termes utilisés dans le diagramme.

5 CAS D'ÉTUDE

5.1. Présentation de l'étude

Pour illustrer cette démarche, on s'appuiera sur le cas de **LOGIC DESIGN** une entreprise dont l'activité repose sur la résolution de problèmes, par une démarche inspirée du Design Thinking.

Logic Design est une agence de conseil en stratégie, innovation et conception de packaging qui exerce son expertise depuis plus de 30 ans. Sa mission est d'accompagner ses clients dans la construction de leurs marques. Le positionnement de marque, l'architecture de marque, la planification stratégique, la charte graphique, le territoire visuel, storytelling, packaging, ... sont des éléments de réponse dont le client a besoin pour acquérir ou conserver le leadership d'un marché. Logic Design répond aux problématiques des entreprises par le prisme de la marque, c'est-à-dire développer des concepts qui soient en adéquation avec l'ADN de marque de leur client. Pour y parvenir, LD s'assure que la marque est cohérente sur les 3 piliers stratégiques que sont : la vision, l'incarnation et la réputation.

L'équipe Logic Design est composée de consultants en stratégie de marque, d'ingénieurs, de designers graphiques et de designers produit. Les points forts de l'agence sont la pertinence des solutions proposées par le biais de la démarche Open Pilot, qui vise à mettre l'utilisateur au centre de la réflexion et de la création, en s'appuyant sur l'ADN de la marque.

L'Open Pilot est une approche collaborative, agile et itérative qui permet de traiter des problématiques centrées sur la marque, dans l'objectif de développer leur leadership. Elle est déclinée de l'approche classique dite en « double diamant ». L'Open Pilot est une approche orientée résultats, les solutions proposées sont concrétes et pragmatiques.

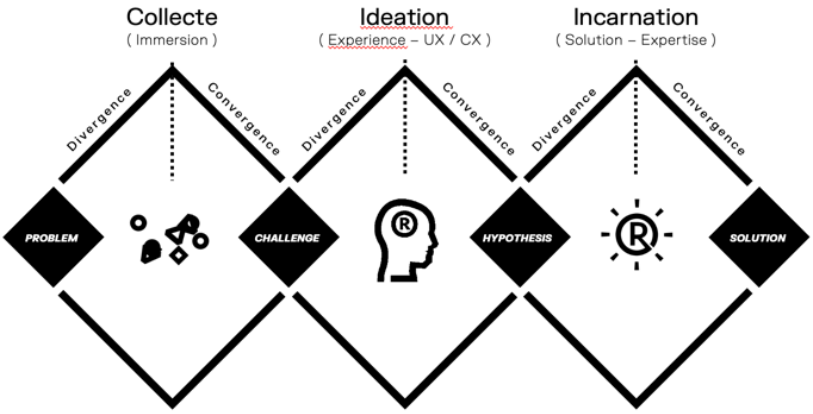


Figure 5.1 : La méthode Open Pilot

En effet, l'Open Pilot est une approche agile basée sur le Design Thinking, on peut la qualifier d'approche en « triple diamant ». Elle est centrée sur le consommateur (ou utilisateur en fonction des sujets) et permet d'intégrer un maximum les parties prenantes dans les trois étapes clés d'un projet : **Collecte, Idéation, Incarnation**. Le travail d'équipe et l'émulation de groupe est mise en avant au sein de l'agence et avec le client. L'échange d'information, de connaissance et de compétences au sein de l'équipe Logic Design est donc très efficace avec cette approche.

L'approche Open Pilot a commencé à être mise en place il y a une dizaine d'années. Elle s'est développée et enrichie au fur et à mesure des problématiques rencontrées. La variabilité des projets et la confrontation avec les clients a amené une flexibilité, une adaptabilité et une créativité au sein même de cette approche. Ce caractère flexible a pu parfois dénaturer le process établi, n'entrainant pas toujours un gain de temps et de pertinence.

La difficulté ici est d'apporter un formalisme structurant tout en conservant une certaine souplesse permettant de continuer de répondre aux clients de manière ad-hoc. Le but est que les équipes aient une vision très claire de la démarche, des étapes incontournables et des étapes variables dans un

projet. Il est nécessaire de verrouiller des incontournables afin garantir la qualité revendiquée par LD et de définir des variables permettant la créativité et l'adaptabilité au besoin client. Il apparaît donc intéressant de développer et formaliser un modèle permettant de capitaliser sur les connaissances et compétences de l'entreprise dans une démarche qualité. L'objectif sous-jacent, au-delà de la constance de qualité recherchée, est le gain de temps et l'appropriation par tous.

5.2. Formalisation du modèle

La première étape de la démarche est d'appréhender le fonctionnement de l'entreprise ainsi que l'approche de gestion de projet (ici l'Open Pilot). La durée de cette étape peut varier selon la taille de l'entreprise. Il est important de bien comprendre le cheminement du besoin exprimé par le client jusqu'à la satisfaction du besoin. Pour cela, on peut proposer un schéma simple qui résume les différentes étapes d'un projet :

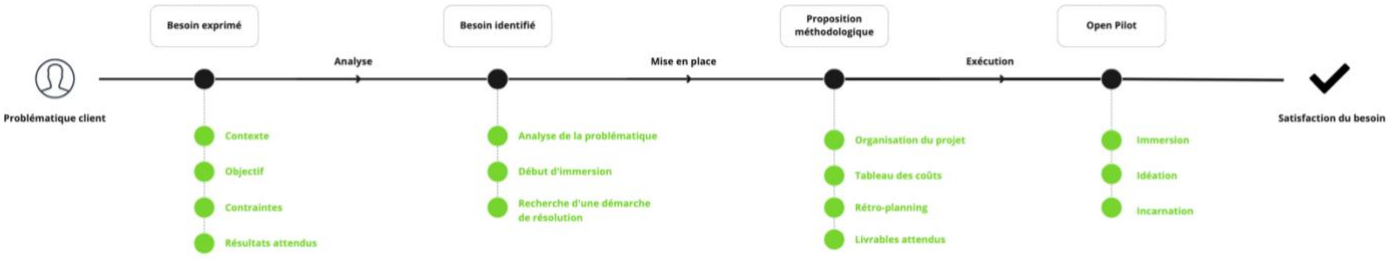


Figure 5.2 : Découpage d'un projet

Une fois la démarche comprise et assimilée, la mise en place du modèle et la formalisation peuvent être amorcés. Il faut donc entreprendre une phase d'observation ainsi que de recensement pour obtenir le découpage de la méthode de gestion de projet en phases puis en étapes. Ces informations peuvent être obtenues par le biais d'interviews avec les membres de l'équipe projet ainsi que l'observation de l'exécution des projets.

Dans ce cas d'étude, l'approche Open Pilot propose le découpage d'un projet en 3 phases : Immersion, Idéation et Incarnation. Dans une logique d'analyse fonctionnelle descendante, on identifie les étapes qui vont composer les 3 phases de notre projet. Grâce à l'observation ainsi que divers interviews internes menés au sein de Logic Design, on peut proposer un découpage des phases de l'Open Pilot. Chaque « diamant » est composé d'une phase de divergence suivie d'une phase de convergence.

La première phase de cette démarche est l'**immersion**. Le but de cette phase est de s'approprier le problème posé par le client et clarifier le contexte de l'étude.

La divergence a pour objectif d'apporter de la matière afin d'aider à résoudre la problématique client. Les consultants en stratégie récoltent des diverses données qui seront analysées ensuite : l'analyse de données sur la marque (l'entreprise en question), l'analyse de la concurrence et des tendances et l'analyse des données concernant la cible du client. Les enseignements de cette phase sont essentiels pour réaliser une proposition pertinente pour l'orientation stratégique du projet. Les consultants en stratégie ont pour mission de déceler les signaux faibles du marché afin de réaliser des hypothèses pertinentes et se projeter. À l'issue de l'immersion, une synthèse de toutes les données ainsi que les pistes d'opportunités décelées par les consultants en stratégie est fournie au client.

La convergence correspond à l'alignement de Logic Design et du client sur un challenge pour la suite de l'étude. Les meilleures orientations stratégiques sont choisies et un challenge est défini à partir des plateformes d'opportunités identifiées. Le matériel nécessaire à l'idéation est également préparé à la fin de cette phase (Moodboard, Personae, Stimulus pour la créativité…).

Une fois les stratégies optimales identifiées, la phase d'**idéation** peut être amorcée. L'idéation a pour but de générer des idées innovantes à partir du challenge défini précédemment.

La divergence a pour objectif de générer un maximum d'idées. Les consultants en stratégie ainsi que les créatifs organisent des séances d'idéation adaptées pour le challenge. Les clients participent parfois à ces séances afin d'être intégrés un maximum dans le process. Il est également possible de faire intervenir les consommateurs dans cette phase, lors de carrés consommateurs créatifs (idéation guidée avec des consommateurs).

Lors de la convergence, les idées seront ensuite catégorisées puis prioriser afin de faire une sélection. À l'issue de cette phase, les clients obtiennent une synthèse des idées qui ont émergé pendant ces séances d'idéation, avec un accent sur les idées retenues pour la suite.

La dernière phase de la démarche est l'**incarnation**. Les idées avec le plus de potentiel sont conceptualisées et prototypées.

Lors de la divergence, chaque idée va être étoffée au maximum pour mettre au point un concept. Les prototypes peuvent être de plusieurs types : prototype physique (impression 3D) et prototype visuel (design graphique et 3D).

Lors de la convergence, ces concepts et stimulus graphiques sont soumis à des tests consommateur pour vérifier leur pertinence. Les enseignements de ces tests serviront à améliorer les concepts et les prototypes. À l'issue de cette phase, les clients reçoivent une synthèse globale du projet avec les concepts et prototypes optimisés ainsi que des conseils stratégiques pour la mise en œuvre sous forme de plan d'action.

Les besoins des consommateurs sont au centre de toutes les réflexions. Les recommandations stratégiques ainsi que les choix réalisés tout au long d'un projet sont motivés en grande partie par les enseignements sur la cible. Il s'est donc avéré très utile et intéressant d'intégrer, de manière collaborative, les consommateurs dans les différentes phases du projet. Que ce soit en immersion, en idéation ou en incarnation, il est possible de faire participer le consommateur à la réflexion. Le carré consommateur est un outil imaginé dans ce but. À la différence des séances d'idéation classiques faisant intervenir le client, les carrés consommateurs vont faire participer uniquement les consommateurs. Ces sessions peuvent servir à :

- Obtenir des données quantitatives ou qualitatives, pour orienter les consultants en stratégie (Phase d'immersion) ;
- Générer ou enrichir des pistes créatives (Phase d'idéation) à partir des signaux faibles
- Faire adhérer la cible consommateur aux concepts créatifs des concepts (Phase d'incarnation).

Une fois le découpage déterminé, on peut synthétiser les informations afin de vérifier la cohérence de la description et procéder à une vérification en interne avec l'équipe de Logic Design. Voici la planche synthétisant les informations précédentes, avec le modèle défini en partie 4.2. :

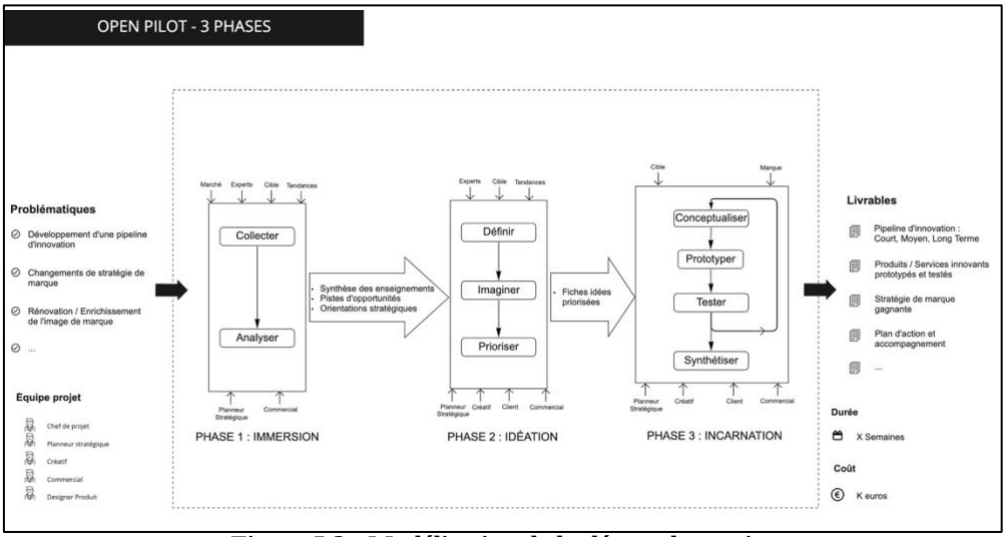


Figure 5.3 : Modélisation de la démarche projet

Ce modèle représente donc la démarche mise en place pour les projets, avec l'approche Open Pilot. Selon les besoins ou encore les contraintes des clients Logic Design, la durée et les étapes de chaque phase peuvent être adaptées.

Pour terminer la modélisation de la démarche, il est nécessaire de mettre au point la liste des outils utilisés lors des projets. Pour rappel, les outils sont les éléments de notre modèle qui vont permettre de réaliser les différentes étapes d'un projet. Ces outils permettent de transformer la matière d'œuvre à chaque étape. On peut catégoriser ces outils dans un tableau afin de mieux les distinguer.

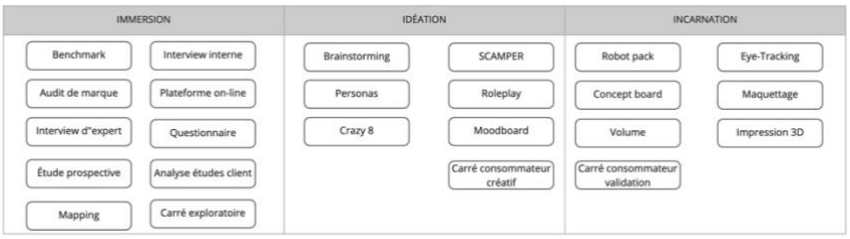


Figure 5.4 : Tableau des outils utilisés en projet

Ces outils ont été catégorisés selon la phase à laquelle ils interviennent. Chaque outil à son but et intervient à un moment précis. Mais il est possible d'utiliser un ou plusieurs outils dans plusieurs phases d'un projet selon le besoin. Ce tableau est donné à titre indicatif. Une fois la liste des outils réalisée, il est possible de décrire les étapes de notre modèle, grâce à la même logique d'analyse fonctionnelle descendante du diagramme SADT. Le niveau macroscopique représente la démarche Open Pilot découpée trois phases. Le niveau intermédiaire correspond au découpage des phases en plusieurs étapes. Et pour aller plus loin, on peut décomposer chaque étape de notre démarche grâce aux outils listés précédemment.

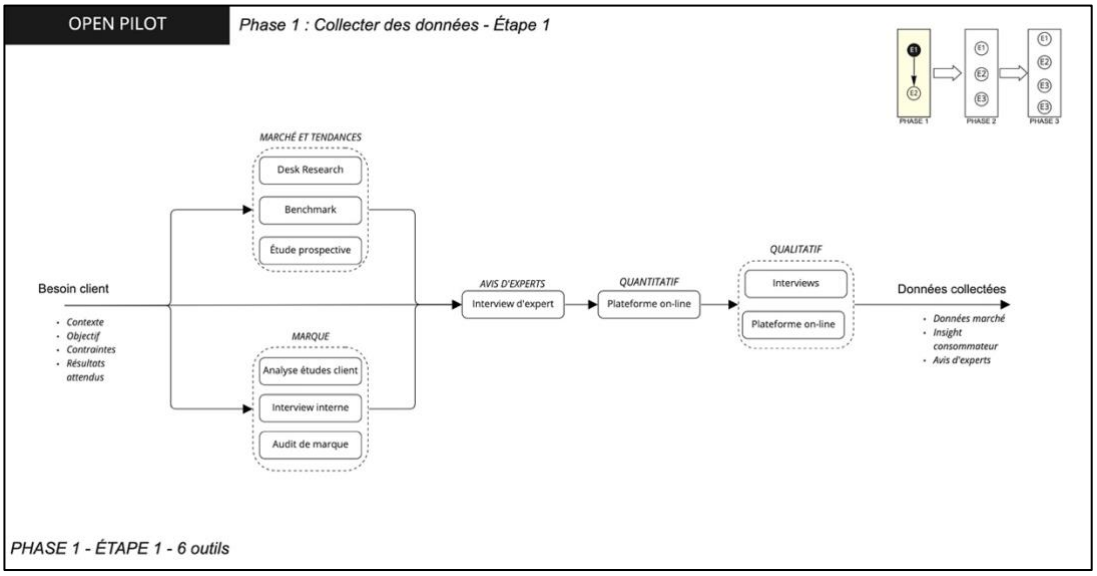


Figure 5.5 : Phase 1, Étape 1, collecter des données

Pour illustrer, voici le découpage de l'étape « collecter des données », pour la première phase de la démarche. Les outils permettent de transformer la matière d'œuvre entrante, ici le besoin client, en matière d'œuvre sortante, ici les données collectées. Ces différents outils ont des fonctionnements différents ainsi que des buts différents. Il y a trois types de données sur lesquelles travailler : les données marché, les données sur la cible du client et les données sur l'entreprise client. C'est pourquoi les outils peuvent être accompagnées de fiches explicatives qui résument leur utilisation (partie 3.2) pour une meilleure compréhension du modèle.

La représentation graphique de la démarche permet d'apporter de la clarté sur la gestion de projet. Le modèle reste assez simple pour être compréhensible par tous et modifiable si besoin. Cette simplicité permet donc par une simple identification et un code couleur, de verrouiller les permanents (c'est-à-dire les outils indispensables pour réaliser cette étape et garantir la qualité et la satisfaction du client) ainsi que les variables (c'est-à-dire les outils dont l'utilisation n'est pas essentielle pour aboutir à la solution). Ci-dessous, les outils variables sont identifiés en gris.

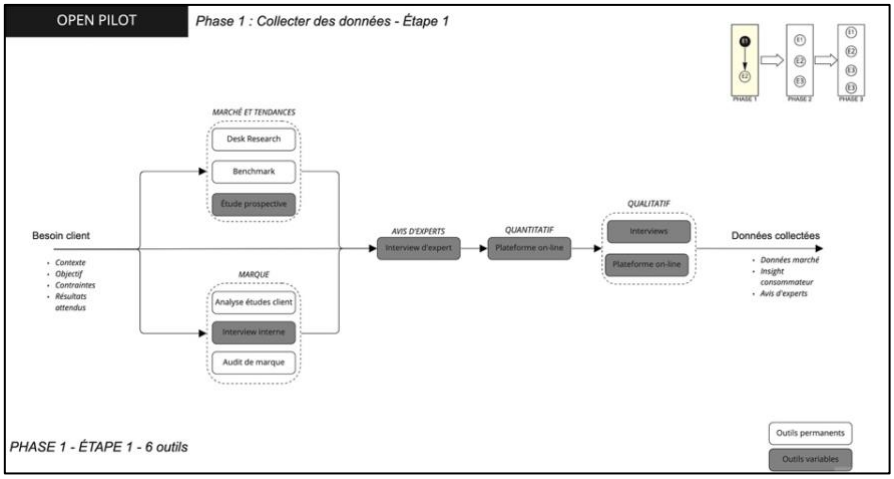


Figure 5.6 : Phase 1, Étape 1, collecter des données

5.3. Évaluation du modèle

Le modèle défini précédemment a pour objectif de capitaliser la connaissance et les compétences qui composent l'agence Logic Design. Pour évaluer la pertinence du modèle, il faut mesurer les incertitudes engendrées par son intégration, sa compréhension et son utilisation. Pour cela on peut mettre en place divers moyens pour l'évaluer. La première étape est la présentation en interne. Il est nécessaire de présenter ce modèle aux collaborateurs en interne pour avoir les premiers questionnements et avis. Un questionnaire peut être élaboré pour mener des interviews avec chaque métier dans l'agence afin d'évaluer le niveau de connaissance avant l'intégration du modèle et après son intégration. Il peut être également judicieux de modéliser des projets déjà réalisés avec le formalisme proposé afin de mesurer les écarts entre l'offre formalisée et les démarches pratiquées.

Cette étape n'a pas encore été réalisée dans le cadre de ce projet donc ce sont des pistes proposées pour évaluer et quantifier la pertinence de notre modèle.

REFERENCES

[1] Eric Dosquet, *L'innovation agile guide de survie dans un monde en disruption*, 2017
[2] Didier Janssoone, *Management de l'innovation*
[3]Fabien Bonnet, *Le Design Thinking – Au cœur d'un discours sur la rationalisation de l'émergence en organisation*, Approches Théoriques en Information-Communication, N°3, p25-34, 2021
[4] Thierry SIEBENBORN, *Une approche de formalisation du processus de changement dans l'entreprise*, 2005
[5] Ferla R., *Intégration du Design Thinking au CRDC Saint-Gobain*, Paris : Ecole des Arts et Métiers de Paris, 2018
[6] Pauline Lacom, *Proposal of a Modelling of the Innovation Process in an International Manufacturing Company*, Journal of Technology Management & Innovation, Vol 12, Iss 2, 2017
[7] https://logic-design.com/fr/methode-open-pilot/

Contact principal : ICARDO Fabio

Coordonnées : fabio.icardo776@gmail.com

OPTIMIZATION OF THE SUBLAYER EMBEDDED ON CFRC FOR COLD SPRAY METALLIZATION

KHANDAR Shantan[1,2], RAOELISON Rija Nirina[2], PADAYODI Essolé[1], ZHANG Teng[1], ZAIM-MOUNAJED Wassim[1], SAGOT Jean-Claude[1]

[1] Pôle ERCOS, ELLIADD (EA. 4661) University of de Bourgogne Franche Comté, University of Technology of Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort, France.
[2] ICB, UMR 6303 CNRS, University of Bourgogne Franche Comté, University of Technology of Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort, France.

To meet the environmental requirements, the aircraft industry needs materials with a good lightweight potential to reduce CO2 emissions. Carbon Fiber Reinforced Composites, or CFRCs, are upcoming materials that have been replacing metals in various aircraft component manufacturing processes. The Boeing 787 Dreamliner passenger airliner, for example, is made up of 50% composite material by weight. Despite their low weight, low density, high specific strength, high specific stiffness, and corrosion resistance, CFRCs show high resistance to electrical conduction. It is a crucial drawback since aircraft components need to be electrically conductive to prevent vital structural damage and provide good lightning strike protection. One possible strategy that has been examined to overcome the issue is using the thermal spray technique to provide the fuselage and the wings with an electrically conductive coating made of copper powder. The cold spraying technique is an emerging thermal spraying technique used for the metallization of CFRC, but even though it has its advantages (cost-efficient, convenient, etc.), its major drawback is the poor adhesion of the coating to the polymeric matrix. To overcome this issue, a sublayer made of the matrix and metallic particles is embedded on the CFRC. This study focuses on two aspects: first, on optimizing the sublayer process; and second, on comparing the performance of a sublayer made of thermoset matrix and metal particles to a sublayer made of a thermoplastic matrix and metal particles. The erosion issues and the adhesion of the coating are the major factors to consider.

Keywords: Metallization, Lightning strike protection, Cold spray, CFRC, sublayer

1. INTRODUCTION

1.1 Preface

Carbon fiber Reinforced Composites or CFRCs are an upcoming material that has been replacing metals in various industrial applications. One such major application is manufacturing aircraft components using CFRC [1]. CFRC is used almost everywhere in aircraft, especially airplanes. Unlike metals or metallic alloys, CFRC shows high resistance to electricity. It is a crucial drawback since aircraft components need to be electrically conductive to prevent vital structural damage and provide good lighting strike protection [2, 3]. Currently, manufacturers are using various methods to prevent this drawback. One such strategy is using metallic mesh reinforced composites. It involves an expensive and complex manufacturing process and low adaptability. Another possible strategy that has been examined to overcome the issue is by using the thermal spray technique. Various techniques such as Plasma spraying and Arc Spraying have already been investigated as possible solutions [4, 5]. However, because of molten particles, these high-temperature techniques tend to degrade the polymer matrix rather than form a metallic coating. The cold spraying technique is an emerging thermal spraying technique used to overcome the issue caused by other methods. Although Cold Spraying is cost-efficient, convenient, and can produce oxide-free coating, its major drawback is the erosion of the polymeric substrate [6, 7].

1.2. Literature Review

Various studies on cold spray coating on CFRC substrates have been investigated in the past. We can summarize some of them below:

a) In 2011, X.L. Zhou et al. [8] concluded that Al coating and CFRP-PEEK substrate exhibit good bonding. Uniform coating with little porosity can be observed. The coating retains the original microstructure of the powder and no oxide formation. The microhardness of Al increases following the Cu particles bombarding. The surface conductivity of the Cu layer is higher than that of the Al coating.

b) In 2016, Hanquing Che et al. [9] concluded that there was a need to differentiate between the development of the first layer and the build-up of subsequent layers. Tin was reported to be more successful than Cu and Al while depositing on polymer. High-pressure Cold spray of Al and Cu coating is unsuccessful due to the erosion of substrate. More erosion was observed in Cu coating than on Al coating. With low-pressure Cold spray, Cu coating was unsuccessful due to erosion. Coating of Sn with low-pressure CS was successful.

c) In 2017, Hanqing Che et al. [10] concluded that the deposition efficiency of mixed Sn-Cu powder was found to be 6 times more than that of Sn powder. Higher Cu content in the mixture led to lower deposition efficiency. The addition of Cu to Sn did not increase the overall conductivity but led to a decrease.

1.3 Cold Spray Process

Cold spray is a high-energy solid-state coating and powder consolidation method also known as supersonic particle deposition. It is a practical approach for using metals, metal alloys, and metal mixes in a variety of applications. Cold spray accelerates metal powders through a supersonic de Laval nozzle above a critical velocity for particle adhesion using an electrically heated high-pressure carrier gas, such as nitrogen or helium. The bonding mechanism is a combination of mechanical interlocking and metallurgical bonding from re-crystallization at highly strained particle interfaces. Cold spray technology converts heat energy into kinetic energy [11].

There are two methods of the cold spray system: the high-pressure cold spray system and the low-pressure cold spray system. The difference between the two is that the low-pressure cold spray system uses a low-pressure powder feeder to move the spray powder down the nozzle [12]. Metallization is a technique in which a metallic layer is formed on the surface of the substrate. Copper metallization was performed on diverse polymers to confer an electrical conductivity, tribological properties, an intermediate bonding function, an antifouling reaction, antibacterial properties and further functional performances the copper structure can generate [16-22].

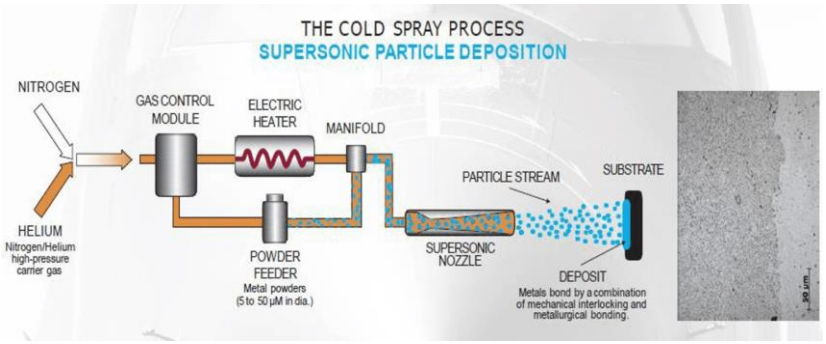


Figure 1. Schematic Diagram of a Cold Spray System.

Figure 2. Need for Metallization.

The cold spray process is governed by various process parameters which are illustrated in figure 3 while monitoring the process outputs which are illustrated in the figure. 4.

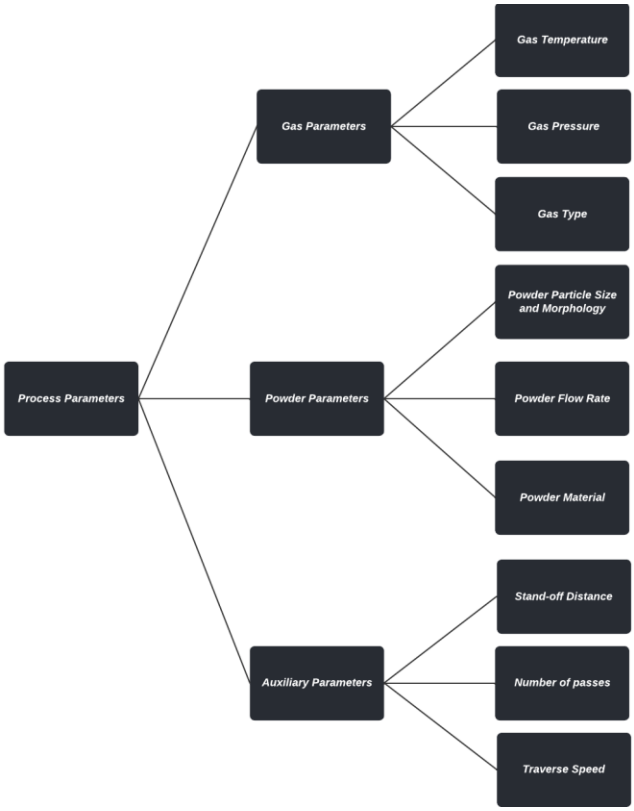


Figure 3. Cold Spray Process Parameters.

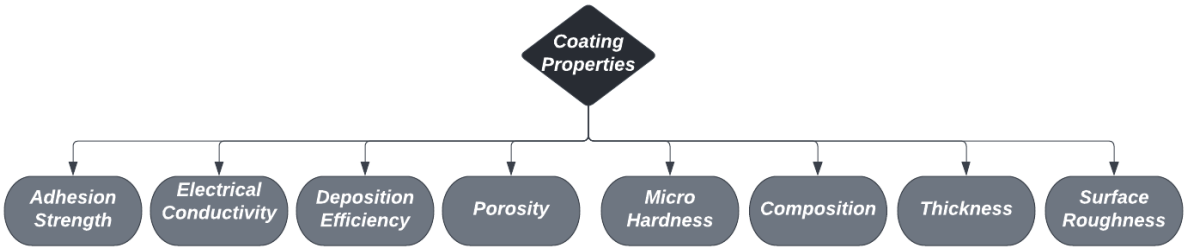


Figure 4. Cold Spray Process Outputs.

2. Methodology

2.1 Sub-Layer Optimization

The current study aims to investigate the potential benefit of the addition of a metallic sublayer on the surface of the CFRC substrate during cold spray metallization. This is achieved by fabricating

the test samples using the Vacuum Infusion Process (VIP). The Vacuum Infusion Process (VIP) is a technique that uses vacuum pressure to drive resin into a laminate [13]. We plan to fabricate the carbon-fiber test samples with a Copper sublayer.

The following steps were realized during the fabrication of the test sample:

I. A mixture of copper particles and epoxy was prepared for the sublayer. The mixture is then evenly spread on a flat, clean surface and left to polymerize for about 12-15 hours.

II. Once the sublayer is polymerized, 8 layers of carbon fiber (0/90) stacking are prepared along with 1 layer of each peel ply, release film, and flow media. These layers are arranged as shown in figure 5.

III. The setup is then sealed in a vacuum bag and resin inlets(yellow) and vacuum outlets(orange) are placed at appropriate positions (figure 6) to ensure a uniform and proper flow of resin mixture.

IV. A mixture of epoxy resin, resin hardener, acetone, and peroxide are prepared in an appropriate ratio. The setup is then completed by attaching the vacuum pump and resin trap. Figure 7 shows a typical VIP setup.

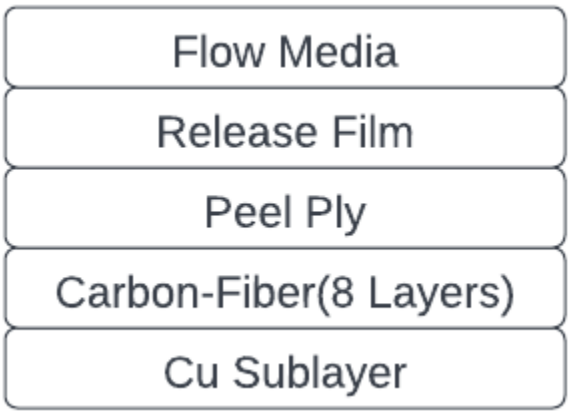


Figure 5. VIP Layer Setup

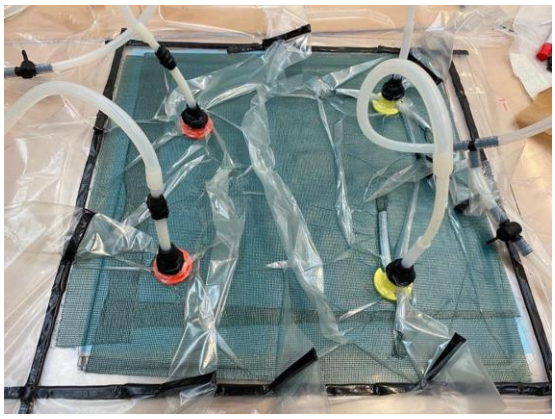


Figure 6. VIP Setup

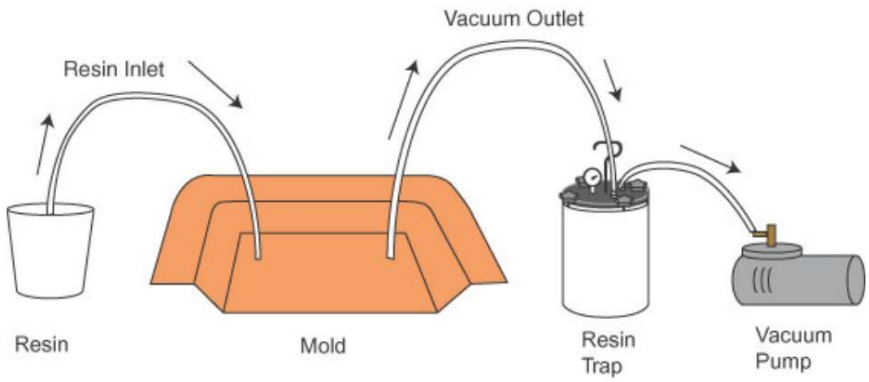


Figure 7. VIP Process Schematic

2.2 Low-Pressure Cold Spray

Low-pressure cold spray tests were carried out using a commercially available DYMET 423 system on two sets of samples: thermoset composites and thermoplastic composites. Both sets of samples were embedded with a copper sub-layer. The feedstock powder material used for the process was Tin Alloy (Sn + Al_2O_3), Copper Alloy (Cu + Al_2O_3), Aluminum Alloy (Al + Al_2O_3), and Zinc Aluminum Alloy (Al + Zn +Al_2O_3). The process parameters are given in table 1. For the experiments, square sections of 60 x 60 mm were sectioned from both sets of samples. Before spray coating, half the samples were degreased with ethanol whereas the other half were sandblasted.

Carrier Gas	Nitrogen
Gas Pressure	0.84 MPa
Gas Temperature	200 - 300 ^{0}C
Powder Feed Rate	30 g/min
Nozzle Traverse Speed	100 mm/s
Increment	6 mm
Number of Passes	3
Standoff Distance	30 mm

Table 1. Process Parameters for Low-Pressure Cold Spray.

3. Results and discussion

In general, thermoplastic composites performed better than thermoset composites. A homogenous coating was observed on the thermoplastic composites except in the case of copper alloy and zinc-aluminum alloy where minor erosion was observed.

In the case of thermoset composites, a coating could be seen but at the same time, there was the erosion of the substrate.

Table 2 illustrates the weight difference obtained in the case of thermoset composites and table 3 illustrates the weight difference obtained in the case of thermoplastic composites.

Powder	Surface Preparation	Weight Difference (g)
Sn + Al_2O_3	Ethanol **(S1)**	-0.44
	Sand-Blast **(S2)**	-0.81
Cu + Al_2O_3	Ethanol **(C1)**	-1.65
	Sand-Blast **(C2)**	-1.23
Al + Al_2O_3	Ethanol **(A1)**	-0.47
	Sand-Blast **(A2)**	-0.23
Al + Zn +Al_2O_3	Ethanol **(Z1)**	-0.48
	Sand-Blast **(Z2)**	-0.24

Table 2. The weight difference for thermoset composites

Powder	Surface Preparation	Weight Difference (g)
Sn + Al_2O_3	Ethanol **(S3)**	0.33
	Sand-Blast **(S4)**	0.26
Cu + Al_2O_3	Ethanol **(C3)**	0.03
	Sand-Blast **(C4)**	-0.15
Al + Al_2O_3	Ethanol **(A3)**	0.01
	Sand-Blast **(A4)**	0.02
Al + Zn +Al_2O_3	Ethanol **(Z3)**	-0.02
	Sand-Blast **(Z4)**	0.06

Table 3. The weight difference for thermoplastic composites

We summarize the results in table 4.

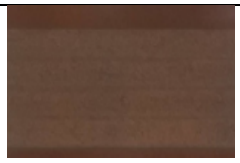
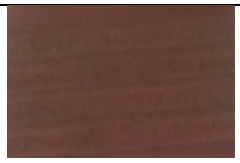
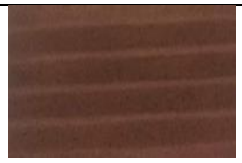
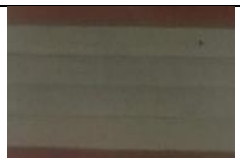
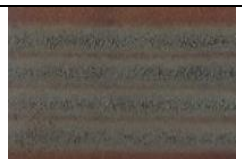
A1	**A2**	**A3**	**A4**
 **C1**	**C2**	 **C4**	 **C4**
S1	**S2**	 **S3**	**S4**
Z1	**Z2**	**Z3**	 **Z4**

Table 4. Low-Pressure Cold Spray results on Thermoset and Thermoplastic composites.

As seen from the results the Cu coating on both the sets of composites yielded poor results this may be attributed to the fact that the kinetic energy of the Cu particles is high, and they have poor deformability. A thick and uniform coating can be seen in the case of Sn coating on thermoplastic composites (S3, S4), this is due to the soft material nature of Sn which facilitated the metallurgical bonding between the Cu sublayer and incoming Sn particles. We can also observe that the addition of zinc in the Al alloy did not make any significant difference in fact with the addition of zinc there seems to be a bit more erosion of the substrate as observed in cases Z1, Z2, and Z3. In terms of surface preparation, there is no significant pattern that we can observe since some samples performed well when sandblasted than ethanol and vice versa. More testing is necessary to come to a finite conclusion regarding the surface preparation of the substrate before the low-pressure cold spray tests.

When compared to thermoset composites, thermoplastic composites have good impact resistance and good adhesiveness to metal [14], we can corroborate this with the results obtained in our tests as the thermoset composites on the impact of the powder material showed severe erosion however thermoplastic composites were able to withstand the impact and allow for a coating buildup.

4. Conclusion

In this study, we investigated the possibility of including a metallic sublayer in the CFRC to increase its viability during cold spray. We used vacuum infusion process (VIP) to fabricate the CFRC embedded with the Cu sublayer. We compared thermoset composites with thermoplastic composites and can conclude that thermoplastic composites are more suitable to use during low-pressure cold spray than thermoset composites. Tin alloy (Sn + Al2O3) when sprayed on thermoplastic composites (S3, S4) showed the best results whereas Copper alloy (Cu + Al2O3) was sprayed on both sets of composites showed the worst results.

The future scope of work related to this study can include the investigation of the effects of surface preparation on the substrate, fabricating and testing a sublayer with a different material, performing high-pressure cold spray tests, and comparing the results with low-pressure cold spray.

5. References

[1] Soutis, C. (2005) 'Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction', *Materials Science and Engineering: A*, 412(1–2), pp. 171–176. doi:10.1016/j.msea.2005.08.064.

[2] Gagné, M. and Therriault, D. (2014) 'Lightning strike protection of composites', *Progress in Aerospace Sciences*, 64, pp. 1–16. doi:10.1016/j.paerosci.2013.07.002.

[3] Kawakami, H. and Feraboli, P. (2011) 'Lightning strike damage resistance and tolerance of scarf-repaired mesh-protected carbon fiber composites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(9), pp. 1247–1262. doi:10.1016/j.compositesa.2011.05.007.

[4] Decla, F. 'Metalisation of an organic matric composite (CFRP) with Plasma Spray'. Available at: https://www.theses.fr/1997ENMP0777.

[5] Vyawahare, S. 'Protective thermal spray coatings for polymer matrix composites'. Available at: https://soar.wichita.edu/bitstream/handle/10057/684/t06143.pdf;sequence=1.

[6] Raoelison, R.N. *et al.* (2018) 'Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date', *Additive Manufacturing*, 19, pp. 134–159. doi:10.1016/j.addma.2017.07.001.

[7] Melentiev, R., Yu, N. and Lubineau, G. (2021) 'Polymer metallization via cold spray additive manufacturing: A review of process control, coating qualities, and prospective applications', *Additive Manufacturing*, 48, p. 102459. doi:10.1016/j.addma.2021.102459.

[8] Zhou, X.L. *et al.* (2011) 'Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray', *Surface and Coatings Technology*, 206(1), pp. 132–136. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.07.005.

[9] Che, H., Vo, P. and Yue, S. (2017) 'Metallization of carbon fibre reinforced polymers by cold spray', *Surface and Coatings Technology*, 313, pp. 236–247. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.01.083.

[10] Che, H. *et al.* (2017) 'Cold spray of mixed metal powders on carbon fibre reinforced polymers', *Surface and Coatings Technology*, 329, pp. 232–243. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.09.052.

[11] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S. Flow phenomenon of micron-sized particles during cold spray additive manufacturing: High-speed optic observation and characterization. Adv Powder Technol 2020;31:1060–79. https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.037.

[12] 'Cold Spray'. Available at: https://coldspray.com/.

[13] 'Vacuum Infusion Process'. Available at: https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning_Center.

[14] 'Thermoset-vs-Thermoplastics'. Available at: https://www.thomasnet.com/articles/plastics-rubber/thermoset-vs-thermoplastics/.
[15] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S, Xie X. High deposition efficiency and delamination issues during high-pressure cold spraying metallization of PEEK using spherical copper powders. Int J Adv Manuf Technol 2020. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05349-z.
[16] Raoelison RN. Analytical description of solid particles kinematics due to a fluid flow and application to the depiction of characteristic kinematics in cold spraying. Powder Technol 2017;319:191–203. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.029.
[17] Raoelison RN, Aubignat E, Planche M-P, Costil S, Langlade C, Liao H. Low pressure cold spraying under 6bar pressure deposition: Exploration of high deposition efficiency solutions using a mathematical modelling. Surf Coat Technol 2016;302:47–55. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.068.
[18] Raoelison RN, Koithara LL, Costil S, Langlade C. Turbulences of the supersonic gas flow during cold spraying and their negative effects: A DNS CFD analysis coupled with experimental observation and laser impulse high-speed shadowgraphs of the particles in-flight flow. Int J Heat Mass Transf 2020;147:118894. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118894.
[19] Raoelison RN, Xie Y, Sapanathan T, Planche MP, Kromer R, Costil S, et al. Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date. Addit Manuf 2018;19:134–59. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.001.
[20] Raoelison RN. Cold spray coating of PEEK surface by copper deposition: Interfacial adhesion at high deposition efficiency and bonding strength. CIRP J Manuf Sci Technol 2021:6.
[21] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S, Xiliang X. Capability of cold spraying to obtain high deposition efficiency for the metallization of PEEK. Proc. Int. Therm. Spray Conf., Japan: 2019, p. 557–62.
[22] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S, Planche MP. Powder jet variations using Low Pressure Cold Spraying – for an improvement of the spraying yield. Proc. Conf. Therm. Spray. 2019, Japan: 2019, p. 9–14.

Contact principal : *KHANDAR Shantan, shantar.khandar@utbm.fr , RAOELISON Rija-Nirina rija-nirina.raoelison@utbm.fr*

Coordonnées : Université de Bourgogne Franche-Comté, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, 90010, France

VIRTFAC, VERS UN JUMEAU NUMERIQUE D'USINE

Luc Jager, Aymeric Schauli, Quentin Misslin, Thierry Blandet
Université de Strasbourg, CNRS, IGG, ICube UMR 7357, France

Résumé : Le consortium franco-allemand VIRTFac (Virtual Innovative Real Time Factory) a pour mission le développement d'une plateforme web d'usine virtuelle dont la fonction est d'une part d'accompagner les entreprises à divers degrés de maturité dans la planification de l'évolution de leur système de production, et d'autre part d'aborder les problématiques de recherche associées à l'usine virtuelle et aux nouvelles techniques d'information. Nous sommes partenaire en particulier en charge de la partie réalité virtuelle pour l'analyse de l'ergonomie de postes de travail (Simulation ergonomique des activités du travailleur), de la simulation et de la restitution de jumeaux virtuels d'ateliers de production. Le projet envisage l'expérimentation des outils de réalité virtuelle sur l'usine-école de Haguenau puis leur validation sur des cas réels proposés par les partenaires industriels. Nous avons développé les différents démonstrateurs du projet, pour cela nous avons dû mettre en place une architecture spécifique autour d'une base de données et développer différents outils pour constituer la plateforme VIRTFac qui sera utilisée par les industriels.

Mots clés: Réalité Virtuelle, usine du futur, industrie 4.0, ergonomie

1 INTRODUCTION

Le consortium franco-allemand VIRTFac (Virtual Innovative Real Time Factory) a pour mission le développement d'une plateforme web d'usine virtuelle dont la fonction est d'une part d'accompagner les entreprises à divers degrés de maturité dans la planification de l'évolution de leur système de production, et d'autre part d'aborder les problématiques de recherche associées à l'usine virtuelle et aux nouvelles techniques d'information. Nous sommes partenaire en particulier en charge de la partie réalité virtuelle pour l'analyse de l'ergonomie de postes de travail (Simulation ergonomique des activités du travailleur), de la simulation et de la restitution de jumeaux virtuels d'ateliers de production. Le projet envisage l'expérimentation des outils de réalité virtuelle sur l'usine-école de Haguenau puis leur validation sur des cas réels proposés par les partenaires industriels. Nous avons développé les différents démonstrateurs du projet, pour cela nous avons dû mettre en place une architecture spécifique autour d'une base de données et développer différents outils pour constituer la plateforme VIRTFac qui sera utilisée par les industriels.

2 MODELE NUMERIQUE, OMBRE NUMERIQUE, JUMEAU NUMERIQUE

La première notion à préciser est celle qui est employée régulièrement, celle de jumeau numérique. De nombreuses définitions tentent de préciser ce qu'est un jumeau numérique et il est clair que la notion de « réplique numérique » est insuffisante et nous conserverons l'idée initiale de Michael Grieves de 2002 [1] [2]. Nous allons préciser les notions de modèle numérique, ombre numérique, et jumeau numérique (Figure 1). Dans le modèle numérique l'échange de données entre le physique et le modèle numérique ne sont pas automatiques. Tous les échanges se font manuellement, aucune modification de l'état du physique ou du modèle numérique n'a de conséquences directes sur l'autre. Dans l'ombre numérique, un changement dans l'objet physique peut entrainer une modification automatique du numérique. Enfin pour le jumeau numérique, il existe un flux de données entre la composante physique et le numérique et vice versa. Le physique peut contrôler le numérique, tout comme le numérique peut intervenir dans le physique. Ce flux constant complètement intégré est nécessaire pour

définir ce qu'est un jumeau numérique [3]. Parfois le concept de jumeau numérique est utilisé à tort par exemple quand on parle de jumeau numérique des océans : on peut faire des simulations, recueillir des données pour piloter un modèle numérique mais il est évidemment impossible en retour d'agir sur l'océan.

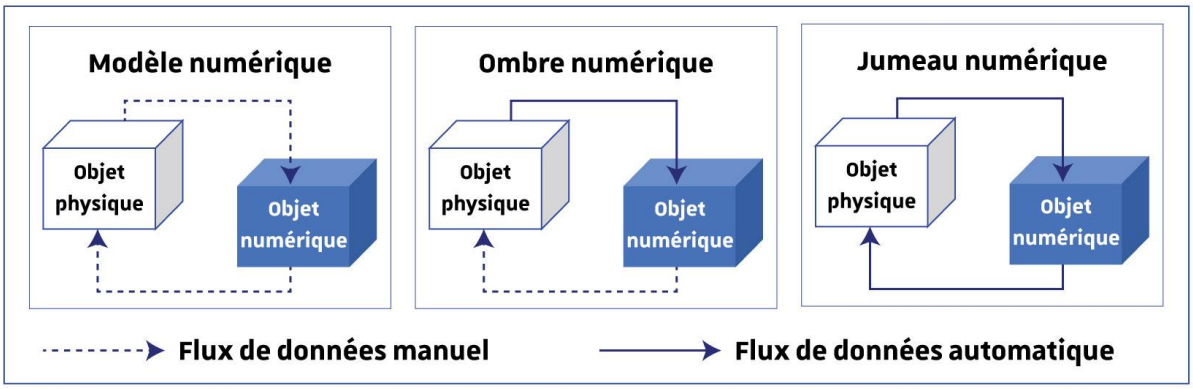


Figure 1 : Modèle numérique, ombre numérique et jumeau numérique

Contrairement à la simulation « classique », le jumeau numérique fournit en temps réel des informations sur l'état actuel de fonctionnement du système réel auquel il est associé pour en créer une représentation dynamique. Ces informations proviennent de différents types de capteurs ou de données issues des logiciels de gestion de l'usine. Le jumeau numérique va servir à la formation, à l'organisation et à l'optimisation d'une ligne de production, à améliorer des processus de fabrication et prévenir des défaillances, des pannes, des usures, des défauts de fabrication pour prévoir et programmer les interventions de maintenance. Le jumeau numérique couvre des besoins qui peuvent être très différents, en fonction du système physique concerné, des données recueillies (capteurs, IOT), des résultats du traitement des données, de la numérisation de l'entreprise, de son activité, etc. Dans nos développements, nous avons pu valider le transfert de données et leur traitement depuis une ligne de production mais la fermeture des systèmes ou l'impossibilité d'un pilotage externe nous a empêchés de valider le concept de jumeau numérique.

3 L'INFRASTRUCTURE LOGICIELLE DE VIRTFAC

L'objectif du projet est de proposer des outils capables de répondre aux besoins de numérisation de l'industrie de demain (Figure 2). Pour cela les entreprises, petites ou grandes, devront se doter d'équipements matériels, d'outils connectés et de logiciels capables de simuler et de traiter leurs données pour améliorer leur flexibilité et leur productivité. L'humain qui est au centre des préoccupations des managers est une partie importante de notre projet. Nous considérons la prise en compte de la santé au travail et l'objectif de diminution du nombre de TMS par l'analyse des gestes des opérateurs et de la qualité ergonomique des postes de travail. Cette analyse est effectuée a posteriori ou dans la phase de conception des postes. Nous souhaitons accompagner les entreprises dans leur passage à l'industrie 4,0 [4]. Certaines ont adopté des logiciels de type MES ou ERP. Les logiciels de pilotage de la production, ou MES (Manufacturing Execution System) sont des systèmes qui permettent de gérer et de suivre la production en temps réel. Ces Logiciels créent un lien numérique entre l'atelier de production et les logiciels de gestion d'entreprise (ERP, Enterprise Resource Planning). L'ERP, véritable « colonne vertébrale » d'une entreprise, est un progiciel qui permet de gérer l'ensemble des processus opérationnels d'une entreprise : la gestion des commandes, les stocks, la paie, la comptabilité, la production. Nous avons créé des passerelles à partir et vers ces outils permettant de traiter en temps réel des données issues des lignes de production (capteurs, IoT).

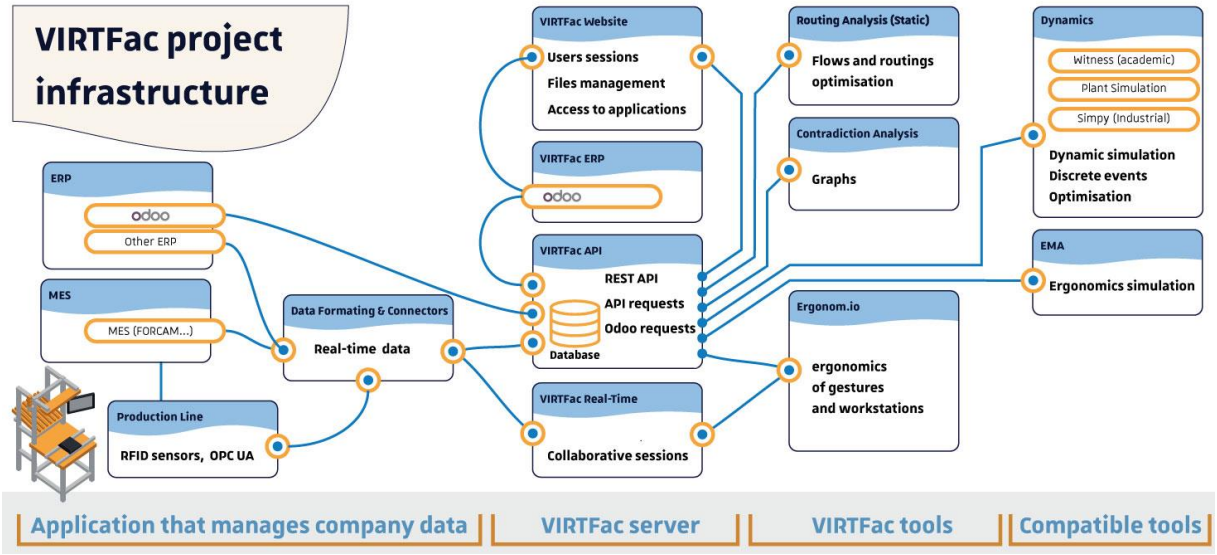


Figure 2 : L'infrastructure applicative de VIRTFac

Les données stockées et échangées dans VIRTFac sont :

Des modèles 3D (CAO, numérisation ou modélisation) stockées en JSON
Des données de capture de mouvement
Des données utilisateurs (profils, avatars virtuels, comptes, système de gestion de groupe, de compte etc.)
Des données brutes formatées (issues de tableurs ou d'export d'applications tierces)
Des données de communication temps réel (issues de capteurs ou par exemple lors de l'utilisation d'Ergonom.io en mode collaboratif)

Les applications développées par les partenaires du projet VIRTFac sont accessibles soit dans un navigateur internet sur ordinateur, smartphone ou tablette (Figure 3) soit par téléchargement et installation.

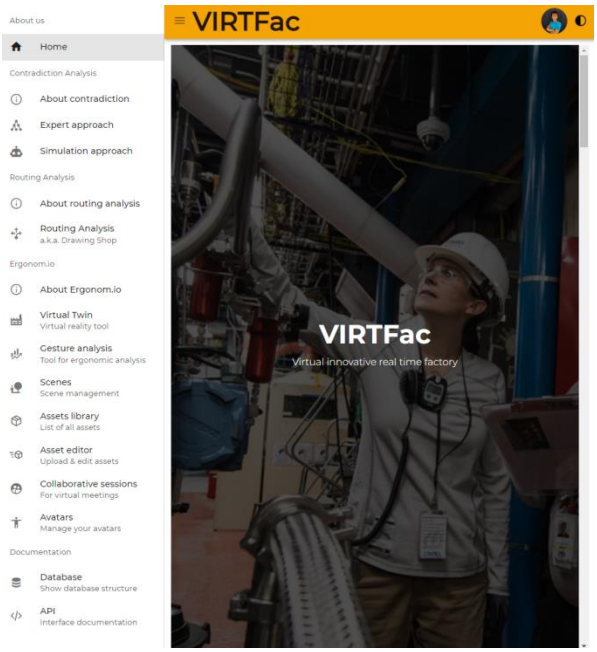


Figure 3 : Interface web de VIRTFac

Pour chaque application, un système de comptes permet de gérer les droits d'accès aux données qui sont stockées dans une base de données et la possibilité de travail collaboratif en réalité virtuelle. Les applications accèdent à cette base de données par des requêtes via une API VIRTFac. Sont ainsi disponibles : une application d'analyse de gamme, par visualisation et l'analyse de flux des lignes de production, une application d'analyse de contrainte automatique (analyse des objectifs et contraintes, pour solutionner les conflits), une application d'analyse de contrainte par un expert (visualisation des données de contraintes et d'objectifs) et une application d'analyse de contradictions [5].

Ergonom.io est une application de réalité virtuelle qui, à partir de la numérisation de l'usine et de la numérisation des gestes va permettre l'analyse des postures et des mouvements des opérateurs pour permettre leur amélioration pour la prévention des TMS (Troubles musculo-squelettiques) et aussi permettre la correction de l'ergonomie de leurs postes de travail [6]. Par ailleurs cette application va

simuler des activités humaines et suivre en temps réel le fonctionnement d'une ligne de production. Cette application va également inclure des outils de visualisation en réalité virtuelle des simulations dynamiques à partir de flux de données issues de Witness ou de Plant Simulation qui seront traités comme les flux issus de la ligne de production.

4 OMBRE NUMERIQUE ET SIMULATION EN REALITE VIRTUELLE

L'architecture de VIRTFac va nous permettre de proposer des fonctionnalités particulièrement intéressantes dans la réalité virtuelle (Figure 4). Les utilisateurs se connectent et ont ainsi accès à des « rooms » et des espaces 3D dans lesquels ils vont pouvoir collaborer. Ils seront représentés dans la scène par leur avatar virtuel. Ces espaces peuvent avoir été enregistrés ou construits à partir de composants 3D issus de CAO, de numérisation ou de modélisation. Ces composants stockés au format glTF sont importés dans l'application de réalité virtuelle développée dans le moteur de jeu Unreal Engine. glTF est un format normalisé libre de description de scènes ou d'objets 3D basé sur le format JSON [7]. Il permet de stocker un grand nombre d'informations sur la topologie des objets, les normales, les UVs, les données des matériaux ou des textures, des clefs de maillages, des squelettes, etc...

On peut ainsi recomposer une ligne de production avec des éléments mobiles ou transformables grâce aux caractéristiques intégrées dans le format glTF. Pour réaliser une ombre numérique de la ligne de production, un serveur OPC UA lié à la ligne dans l'usine fournit toutes les informations qui restituent en temps réel son fonctionnement dans la réalité virtuelle. Un *middleware* convertit les données en informations exploitables, il permet également le traitement des données de simulation dynamique générées par le logiciel Witness, ce qui permet une utilisation et une exploitation identique en réalité virtuelle des données réelles ou des données simulées. Par ailleurs, on va retrouver dans la réalité virtuelle tous les composants qui sont accessibles dans le navigateur web. C'est un module de basant sur Chromium Embedded Framework (CEF) qui se charge d'interpréter ces composants qui apparaissent ainsi dans la réalité virtuelle comme des « web menus ». De cette manière, on va pouvoir réaliser par exemple des analyses ergonomiques dans la réalité virtuelle, afficher des graphes à partir des données de numérisation des gestes tout en observant ces gestes restitués sur un avatar de l'opérateur.

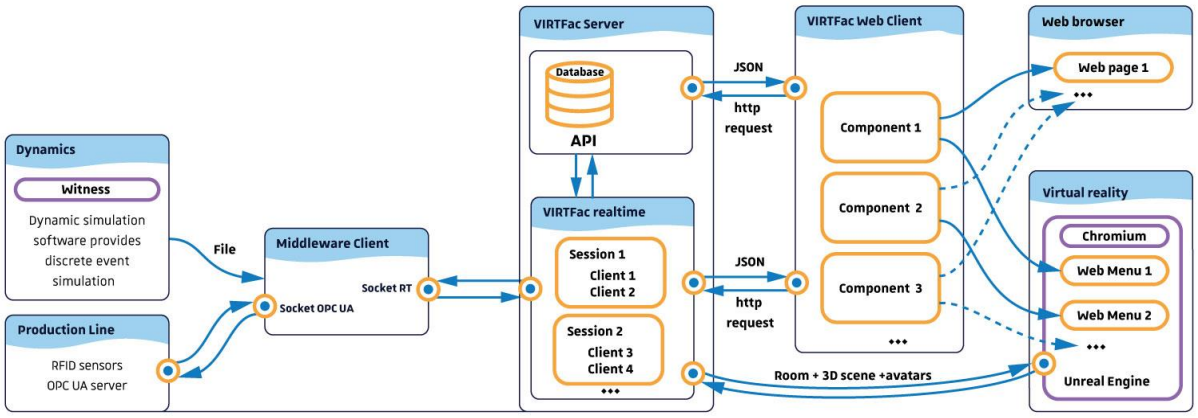


Figure 4 : Ombre numérique et simulation d'une ligne de production en réalité virtuelle

5 CONSTRUCTION D'UNE SCENE 3D

On importe le bâtiment dans lequel on veut installer la ligne de production virtuelle qui peut être une copie du réel, une amélioration d'une installation existante ou une création. Nous offrons également un outil qui permet de rapidement construire la 3D de bâtiments à partir d'un outil de dessin de plans. Ce bâtiment est ensuite accessible dans la librairie d'objets 3D. Les objets issus des logiciels de CAO doivent être vérifiés et on va modifier par exemple le centre de transformation de cet objet ou son échelle pour ensuite faciliter sa manipulation dans la construction de scènes (Figure 5).

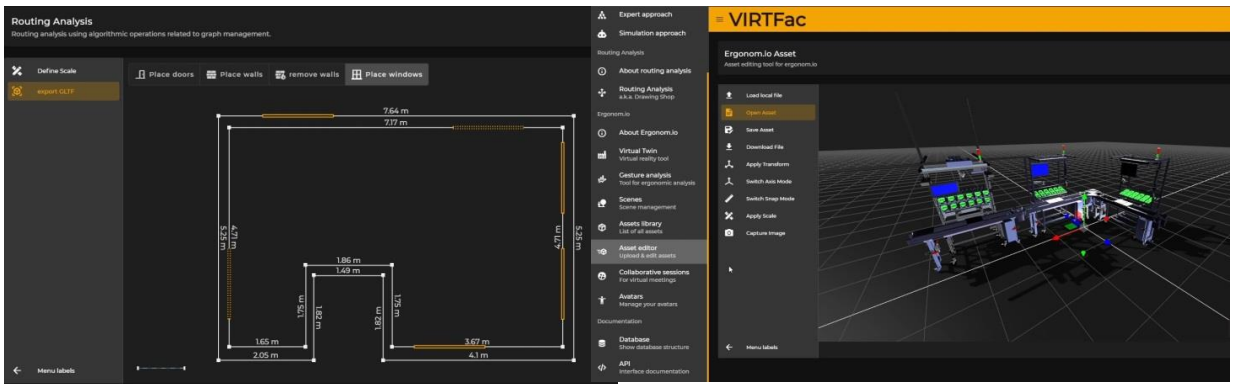


Figure 5 : Module de dessin de plan de bâtiments et de vérification des objets importés

Les objets peuvent intégrer une méthode de transformation de leur géométrie par un squelette qui leur est associé. Un squelette est défini par une hiérarchie de nœuds, avec pour chaque nœud une transformation locale qui lui est propre, représentée par trois vecteurs de translation, rotation et facteur d'échelle ou directement sous forme matricielle. Les objets sont stockés et apparaissent disponibles dans une librairie accessible pour la création de scènes (Figure 6).

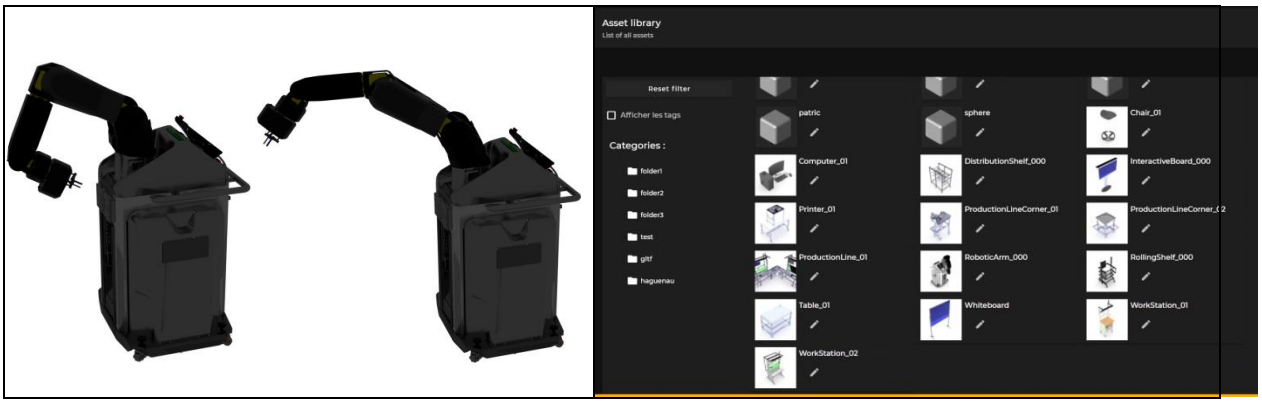


Figure 6 : un robot avec son squelette pour animation et la bibliothèque d'objets

Comme nous l'avons déjà précisé, les composants web présents dans un navigateur se retrouvent dans des web menus accessibles dans la réalité virtuelle (Figure 7). On va d'abord charger le bâtiment puis les différents objets pour construire la ligne de production à partir du web menu correspondant à la librairie d'objets. Une méthode de simulation va venir s'ajouter à cette création de scène, pour paramétrer les attributs d'un objet (positionnement, rotation, couleur etc.) en fonction d'un évènement reçu du middleware. Cette animation permettra l'observation en virtuel des différentes modifications d'une ligne réelle ou simulée à partir des données transmises par le middleware. Une fois l'objet ajouté dans la scène, on va donc le paramétrer directement via un menu spécifique. Une fois la scène construite, il est possible de la sauvegarder (Figure 8).

Figure 7 : les web menus dans la réalité virtuelle pour intégrer un objet à partir de la bibliothèque

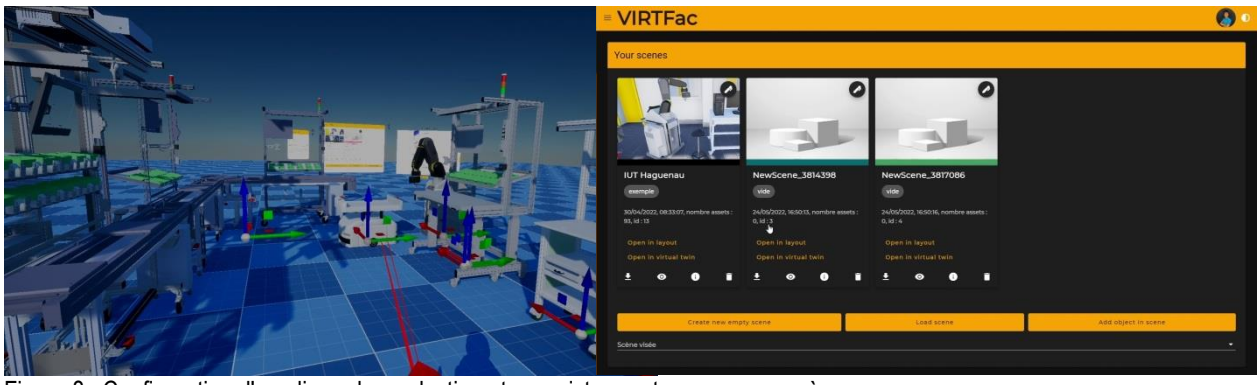


Figure 8 : Configuration d'une ligne de production et enregistrement comme une scène

Ainsi, nous avons modélisé une ligne de production de l'usine école de l'IUT de Haguenau et intégré les postes de travail d'une nouvelle ligne à partir de données de CAO (Figure 9). C'est cette nouvelle ligne qui comporte différents capteurs qui va nous permettre à partir du serveur OPC UA associé de pouvoir afficher une copie dynamique de la ligne.

Figure 9 : Ligne de l'usine-école de l'IUT de Haguenau et sa version numérique

6 ANALYSE DE L'ERGONOMIE DES GESTES DES OPERATEURS ET DES POSTES DE TRAVAIL

Une analyse ergonomique est réalisée poste par poste (Figure 10). En fonction des possibilités, ce poste sera numérisé (par photogrammétrie ou scanner 3D), remodélisé (ce peut-être même une version très sommaire du poste) ou sorti d'un logiciel de CAO pour être stocké puis rappelé dans le module de réalité virtuelle.

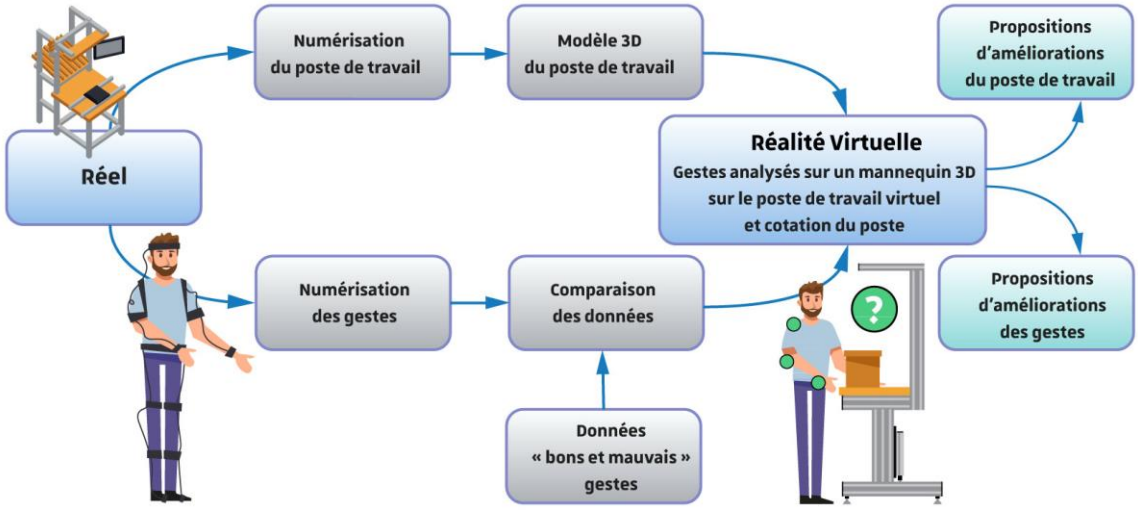


Figure 10 : Le processus d'analyse de l'ergonomie des gestes et des postes de travail

On procède ensuite à la numérisation des gestes de l'opérateur. L'acquisition des données se fait à l'aide d'une combinaison de données (ici Perception Neuron) (Figure 11). Nous avons plusieurs possibilités : on peut animer un avatar en temps réel dans la scène ou enregistrer les données pour en faire une analyse ultérieure. L'outil « gesture analysis » permet de voir la restitution des gestes sur un avatar et produit des graphiques qu'on peut analyser ultérieurement. Ce même outil peut être affiché dans la réalité virtuelle, il est ainsi possible d'observer les gestes restitués, les graphiques et des indicateurs ergonomiques.

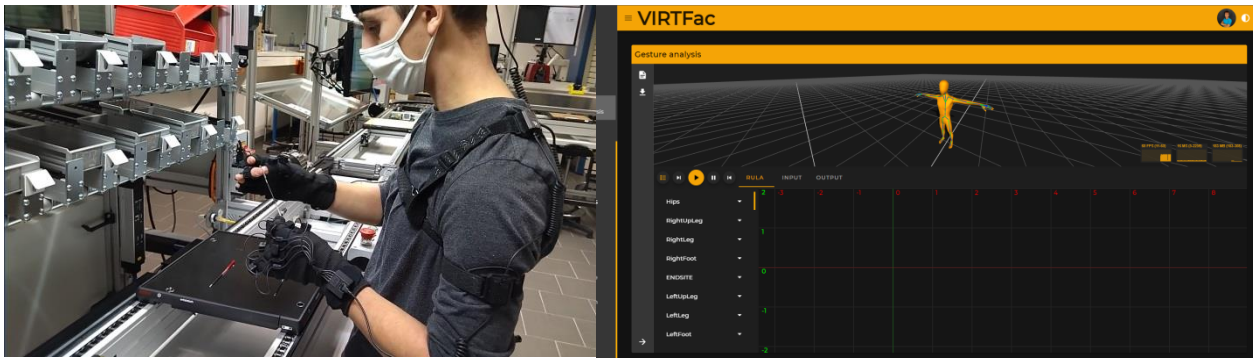


Figure 11 : Numérisation des gestes d'un opérateur, visualisation et traitement des données dans le module d'analyse

Dans la réalité virtuelle, il faut absolument que l'avatar qui restitue les gestes de l'opérateur sur son poste de travail présente une morphologie la plus proche possible de celle de l'opérateur. Ainsi dans la réalité virtuelle, un ergonome pourra observer et analyser une restitution réaliste depuis différents points de vue.
Pour gérer la morphologie, nous avons développé un module de personnalisation d'avatar (Figure 12) dans lequel on définit le genre, la taille, les dimensions des membres, une couleur de peau, la taille et la couleur des cheveux, la corpulence, les couleurs des vêtements, etc. Cela permet à un utilisateur de créer un avatar virtuel au plus proche de son image, et ainsi rendre aussi plus immersive les sessions de réalité virtuelle avec plusieurs utilisateurs. La personnalisation de l'avatar est une interface web qui est utilisable en web menu directement dans la réalité virtuelle. L'avatar est décomposé en parties distinctes et cohérentes qui sont : la tête, le haut et le bas du corps, chaussures, mains, cheveux et barbe. Un squelette est associé à l'avatar, ce qui permet son animation à partir des numérisations obtenues par la combinaison de données ou par cinématique inverse sur les bras lorsque l'utilisateur porte un casque de réalité virtuelle. Dans le premier cas, c'est une configuration à partir de la capture de mouvement qui permet d'adapter la taille et la morphologie de l'avatar, et dans le second cas c'est sa taille déterminée par la hauteur du casque de réalité virtuelle et le positionnement des manettes qui permettent d'ajuster la taille des bras et le positionnement des mains dans l'espace.

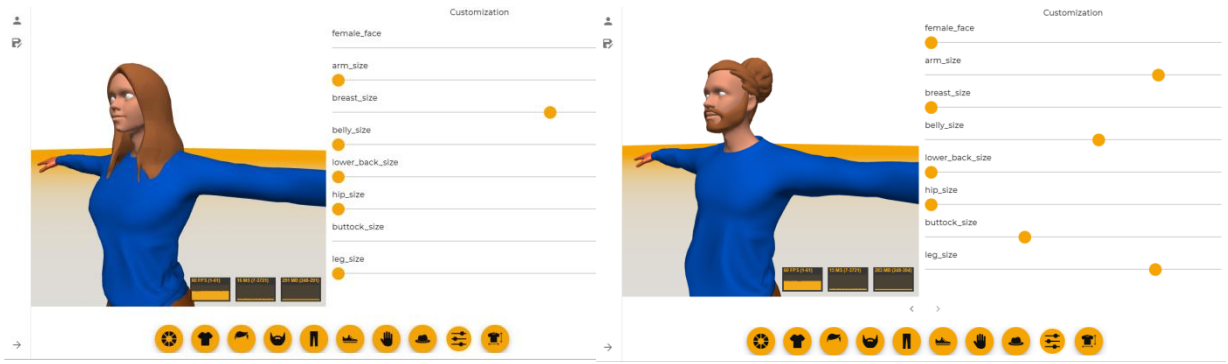


Figure 12 : Le module de personnalisation des avatars

Il est maintenant possible de restituer les gestes de plusieurs opérateurs sur une ligne de production en les positionnant par rapport à leurs postes de travail (Figure 13).

Figure 13 : restitution des gestes numérisés sur des avatars devant leurs postes de travail

Dans le format de données 3D, nous avons intégré les clefs de maillage, qui donnent la possibilité de modifier les dimensions de certaines parties des objets, pour pouvoir par exemple monter ou descendre le plateau d'une machine de production ou la hauteur d'un poste de travail (Figure 14). Une clef de maillage contient, pour chaque sommet qui le compose, une certaine morphologie/forme de l'objet. La représentation finale de l'objet est alors calculée dynamiquement par interpolation entre ces différentes clefs de maillage. Cette interpolation se fait par un facteur pour chaque clef, ce qui permet de moduler différentes configurations possibles avec un curseur par clef de maillage. C'est cette possibilité de modification que nous allons exploiter pour améliorer l'ergonomie d'un poste de travail en tenant compte de la morphologie de l'opérateur.

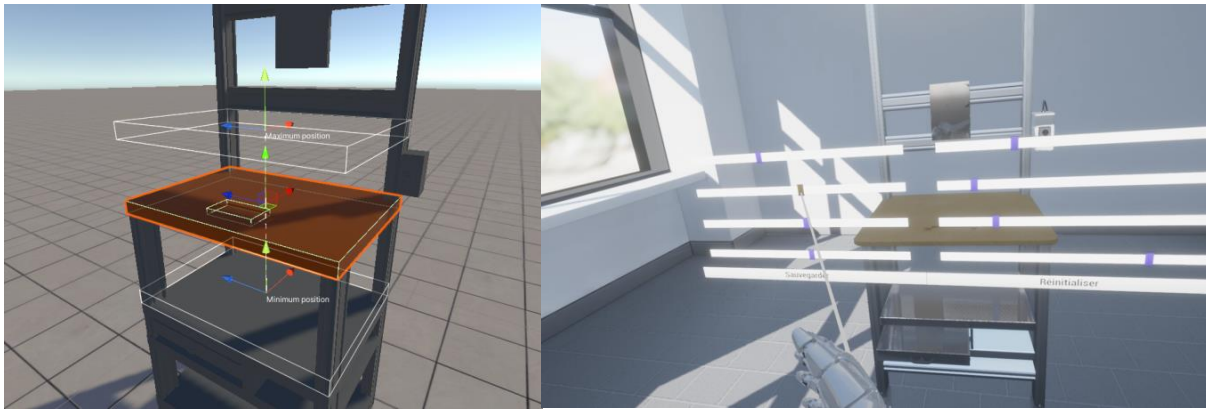


Figure 14 : Clefs de maillage sur un poste de travail et son adaptation dans la réalité virtuelle

L'objectif d'une analyse ergonomique est de faire diminuer les risques de TMS. Il se trouve que les principaux problèmes de santé au travail pour des opérateurs manuels se situent au niveau des mains et des poignets, des coudes et des épaules. Dans une première implémentation, nous allons nous intéresser à une méthode d'analyse ergonomique qui considère la partie supérieure du corps. L'analyse ergonomique va permettre de détecter des mauvais gestes qui seront en partie causés par une mauvaise adaptation du poste de travail à la morphologie de l'opérateur (Figure 15). L'analyse des gestes doit permettre de détecter d'autres causes à ces mauvais gestes.

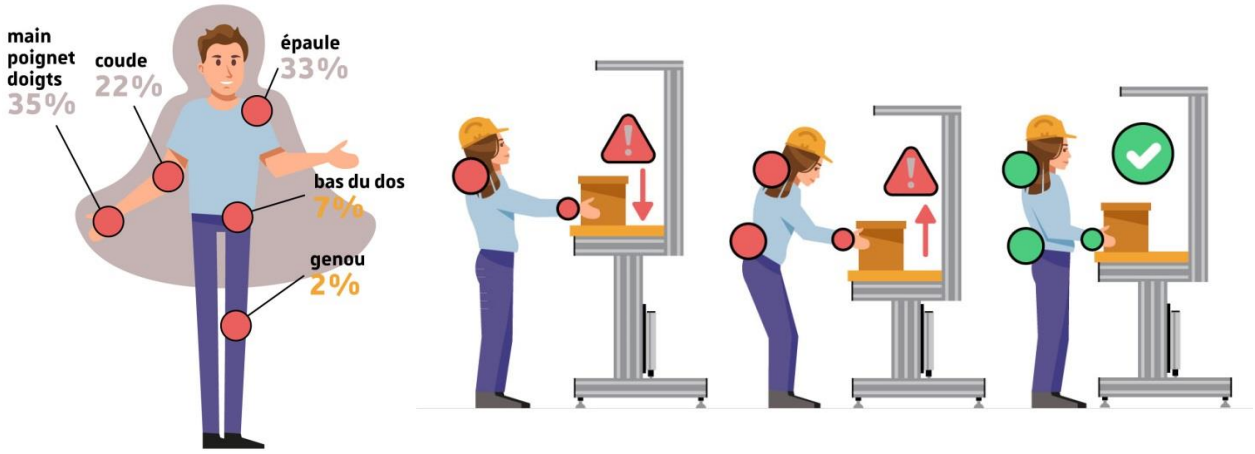


Figure 15 : Localisation des problèmes de TMS et le poste de travail qui peut en être la cause

Nous avons implémenté la méthode RULA (Rapid Upper Limb Assessment). Pour cela nous nous sommes référés aux données fournies par l'INRS qui définissent pour chaque articulation une zone acceptable ou zone de confort, une zone non recommandée et enfin une zone dangereuse ou pathogène qu'il faut chercher à éviter surtout si le geste est répétitif ou d'une durée importante (Figure 16).
Nous calculons donc pour chaque articulation les informations d'angles qui sont comparées aux données de référence.

Figure 16 : Définition des zones de confort, non recommandée et dangereuse pour le coude et l'épaule

Des boules / marqueurs sont positionnées au niveau de chaque articulation, et en temps réel le calcul des angles comparés aux données de référence permet de qualifier la qualité du geste en affectant une couleur verte, orange ou rouge si le geste est confortable, à éviter ou dangereux (Figure 17). La méthode RULA permet également de coter chaque poste et en temps réel, une valeur de cotation est affichée au-dessus de chaque opérateur en réalité virtuelle.

Figure 17 : Codes couleur affichés sur les articulations des opérateurs en fonction de la qualité de leurs gestes et cotation des postes de travail

Ici les gestes ont été enregistrés avec une combinaison de données par un opérateur sur un poste de travail réel et restitués sur les avatars. Il est également possible de travailler sur un poste virtuel en portant la combinaison. Ceci permet d'étudier a priori les qualités ergonomiques des postes de travail qui sont modifiables dans la réalité virtuelle soit par l'opérateur lui-même soit par un ergonome qui observe et analyse les gestes de l'opérateur (réel) sur son poste de travail virtuel, le poste sera ensuite construit pour éventuellement être adaptable aux différentes morphologies des opérateurs amenés à l'utiliser.

7 CONCLUSION

Le projet VIRTFac nous a permis de mettre en place un ensemble applicatif et une infrastructure logicielle originale, qui allie environnement web, avec des outils d'analyse et de simulation qui échangent des données à travers notre API. La grande originalité de notre travail est la possibilité d'accéder à la plupart de ces outils directement dans la réalité virtuelle, pour aménager, modifier, tester ou améliorer à la fois l'organisation d'une usine, ses lignes de productions ou ses postes de travail. Nous considérons la prise en compte de la santé au travail et l'objectif de diminution du nombre de TMS par l'analyse des gestes des opérateurs et de la qualité ergonomique des postes de travail a posteriori ou dans la phase de leur conception. Les difficultés liées aux conditions sanitaires ne nous ont pas permis de valider tous nos développements dans plusieurs environnements industriels, ce que nous allons programmer pour les prochains mois notamment pour exploiter toute la dimension virtuelle du projet et envisager le développement de nouvelle fonctionnalités.

REMERCIEMENTS

Cette recherche est réalisée dans le cadre du projet Offensive Sciences numéro 3.11 « Virtual Innovative Real Time Factory » (VIRTFac) qui bénéficie du soutien financier de l'Offensive Sciences de la Région Métropolitaine Trinationale du Rhin Supérieur, du programme INTERREG V Rhin Supérieur et du Fonds européen de développement régional (FEDER) de l'union européenne.

RÉFÉRENCES

[1] Grieves, M. (2002, December 3, 2002). PLM Initiatives [Powerpoint Slides]. Paper presented at the Product Lifecycle Management Special Meeting, University of Michigan Lurie Engineering Center.

[2] M Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication - White paper, 2014 - Florida Institute of Technology

[3] J. Chapelin , B. Rose , B. Iung. Intégration du jumeau numérique dans le cycle de vie d'un projet industriel. 17ème colloque national S-mart, Laval, France, mars 2021

[4] F.Marmier, I.Rasovska, L. Dubreuil, B. Rose. Industry 4.0 Learning Factory: a canvas for specifications. 11th Conference on Learning Factories, CLF2021, Jul 2021, Graz, Austria. hal-03404976

[5] glTF : https://www.khronos.org/gltf/

[6] Q. Misslin, J. Grosjean, T. Blandet, B. Rose. Ergonom.io ou l'ergonomie pour l'usine du futur, Confere 21, St-Malo, France, Université de Strasbourg (Eds.), juillet 2021

[7] NaserGhannad, Roland de Guio, Pierre Parrend. Feature Selection-Based Approach for Generalized Physical Contradiction Recognition. Systematic Complex Problem Solving in the Age of Digitalization and Open Innovation, 597, Springer International Publishing, pp.321-339, 2020, IFIP Advances in Information and Communication Technology, 10.1007/978-3-030-61295-5_26. hal-03384053

Contact principal : Thierry Blandet

Coordonnées : thierry.blandet@unistra.fr

HOW TO IMPROVE THE PACKAGING OF VACUUM CLEANER ACCESSORIES TO ENHANCE CONSUMER COMPREHENSION: AN EYE-TRACKING STUDY

KOEGLER Félix[1,3], SAGOT Sylvain[2], CANAL Adélaïde[3]
[1] ESTA Belfort, School of Business and Engineering, Belfort 90000, France
[2] ESTA Belfort, School of Business and Engineering, ERCOS Research Group, ELLIADD Laboratory (E.A. 4661), UBFC, Belfort 90000, France
[3] Groupe SEB, SEB International Service, 70310 Faucogney-et-la-Mer, France

Abstract: *Packaging is the only link between a brand and a consumer at the point of sale. The message delivered to the consumer through the packaging is thus key to ensuring a good customer experience. Previous studies analyzed how packaging design could attract more and help the brand to stand out from its competitors. However, the impact of packaging design on consumer comprehension has not been clearly defined. This study proposes an eye-tracking experimentation to evaluate what packaging design layout optimizes the comprehensibility of the information presented on the packaging. The experimentation has been conducted with 20 participants using a Tobii Pro Nano sensor. A questionnaire was submitted after the experimentation to collect their feeling about the layouts presented. Findings suggest that vertical layouts improve the comprehensibility of the accessory compatibility and that multiple elements are observed by the participants when trying to understand the additional function of the accessory. Overall, participants' preference goes for vertical packaging design with verbal elements on the left and non-verbal elements on the right as it feels more natural for a Western reading system user. This study provides important implications to enhance customer in-store experience by informing companies on how to optimize their accessory packaging.*

Keywords: *Eye-tracking, accessory packaging, comprehensibility, customer experience.*

1 INTRODUCTION

Today, customer experience is a key pillar for companies, therefore every business should be customer-centric. Indeed, according to HubSpot [1], 66% of customers expect companies to better understand their needs. Regarding the product itself, the in-store customer experience is mostly done by the packaging. Actually, packaging conveys attractive messages about product characteristics and are even perceived as an important product attribute by consumers [2]. By using an eye-tracking experimentation, this study aims to investigate the impact of vacuum cleaner accessories packaging facing layouts on their comprehensibility in order to avoid consumers purchasing mistakes.

In the present study, we examine the impact of the facing layout on its comprehensibility. More specifically, the purpose is to determine what packaging design optimizes the consumer's comprehension of the accessory compatibility and the additional function the accessory offers to the finished product. In our study, an additional function is considered as a functionality that the consumer can do with his or her product thanks to the accessory; for example, a crevice tool allows to clean tight and hard-to-reach spaces.

The objective is to understand what packaging facing layout is the most convenient by answering these two research questions: (1) What packaging facing layout optimizes the comprehensibility of the vacuum accessory compatibility with the finished product? (2) What packaging facing layout optimizes the comprehensibility of the additional function that the vacuum accessory offers to the finished product?

The final goal of this study is to improve the information seeking easiness and consequently the in-store customer experience. The results will allow Groupe SEB to identify important design guidelines for vacuum cleaner accessories packaging. This research addresses a concrete need and wish of the company to enhance the comprehensibility of the accessory by adjusting the new 2022 packaging design.

The paper is structured as follows. The second section presents a state of the art of the main Areas Of Interest (AOI) found on packaging designs and, with a focus on their location on a layout. The third section describes the material and methods. The fourth section presents the results which allows to validate the proposed approach and gives the key findings. The fifth section presents a discussion of the results in comparison to existing literature and gives some research perspectives. The last section concludes the paper by giving the main implications.

2 LITERATURE REVIEW

Product packaging can be defined as the material of any nature that is used to form, contain, protect, handle, deliver and transport a product from the producer to the consumer [2]. However, packaging also has a marketing role as it provides an attractive method to communicate and consumers rely on them to find information about the product [2].

Packaging design can influence the perception of multiple items such as the functions of the product, the brand preference, the value, and the quality [3], [4]. Indeed, multiple verbal and non-verbal elements can affect perception such as the package graphics, the color, the placement of the elements, the product information, the typography, the packaging material, the size and shape [2]-[4]. More than perception, packaging design also has an impact on consumer comprehension [2].

2.1. Areas Of Interest (AOIs)

When it comes to defining what key elements consumers look on packaging, we find multiple results, but they all lead to three main elements: the brand, the title (or product name), and the image. Firstly, it seems that the "brand" is the element that, per unit area, receives the most attention [5], [6]. The "logo" of the brand is also a dominating element when it comes to consumer attention [7], [8]. In a nutshell, the brand appears as a structuring element around which the consumer integrates the meaning of the marketing message [5].

However, some authors highlight that the "title", or product name, is an area of interest that is highly looked at [9], [10]. The "title" certainly has the power to attract the consumer [8].

Graphical elements are also key elements of packaging design. Some studies underline that "image" has the highest number of fixations and therefore attention from the consumer [11], [12]. Moreover, it appears that "image" draws more attention to an AOI than a text would do in the same place [10]. Nevertheless, it appears that the comprehensibility of the pictograms is higher when verbal elements such as text are available near to it [13].

From another perspective, it seems that consumers analyze the elements of packaging by firstly looking at the most important element from a size perspective and then going on to the smaller ones [14].

2.2. AOIs placement

Furthermore, the layout of packaging plays a role into catching the attention of the consumers. Previous works highlight that the center of the packaging is a highly observed area [15] and that the elements placed there are viewed more frequently and for a longer period of time than the ones surrounding the center [16]. This is also where most of the consumers start their first gaze when looking at a packaging [17]. Therefore, it appears that brand-related visuals such as logo and product name have an increased visibility when placed at the center – or side – of the packaging [13].

However, this tendency can be influenced by the packaging style. If some packaging get concentrated fixations in their center, some others distribute more the gaze of the consumers [18]. Furthermore, the size of the packaging can impact the gaze of the participants, for example vertical packaging make the consumers firstly looking at the center and then moving up and down [9].

The upper part of the packaging is also an area greatly considered by the users as it seems to engage them more than the lower part [14]. Though, it appears that the optimal position from a height point of view on the packaging varies from one element type to another and that the results differ between studies. Some studies show that verbal elements such as a claim seem to be more effective when located on the top or the middle part of the packaging [19] whereas some others find redundant areas of interest with logo at the top, and the text at the bottom [20].

From a packaging side point of view, once again literature provides multiple tendencies and it as mostly to do with the human brain or cultural habits. Thus, the brain laterality seems to play an important role in the fact that packaging is precepted asymmetrically. An article reveals that recall is better for verbal stimuli when placed on the right-hand side of the packaging design and non-verbal stimuli when placed on the other side [21]. A study also exposes that verbal element such as the product name (or title) increases its visibility when placed at the center or on the right side of the packaging [13]. On the other hand, cultural habits also influence the way consumers analyze packaging. For example, it appears that people using the Western reading system tend to prioritize the top part and left-hand side of the packaging facing [14].

Finally, the visual attention given to elements such as pictograms can also vary depending on the demography [13] and culture [22], [23], [24].

2.3. Research gap

Even if some tendencies are identified through the literature, we can also highlight that those results may vary from one packaging to another one. Therefore, what is true for one packaging is not necessarily true for another one. Areas Of Interest (AOI) and items looked by consumers vary from one packaging design to another [18].

Moreover, previous research have been mainly focusing on the attractiveness of the packaging from a "marketing" point of view, so the product stands out from its competitors [9]. Whether it is through the analysis of emotions when seeing a specific AOI [18], [17], through the analysis of changing specific attributes of the product packaging [25] or even through the analysis of viewing patterns [14], the end goal is to impulse buying by better engaging consumers so they are willing to try the product. Nevertheless, these studies give great insights into how consumers read packaging and what and where they focus their gaze on. However, consumer comprehension is little studied in the literature. Therefore, we try to address this gap with an eye-tracking experimentation.

3 MATERIAL AND METHODS

3.1. Context

In our study, the consumer, who is the person that buys goods from a shop, already knows what she or he needs (as she or he already owns the final product) and knows what finished product he or she has. Therefore, no competition is involved, and the buying decision is not based on product attractiveness.

3.2. Research questions

The aim of the study is to improve the comprehensibility of packaging and consequently the in-store customer experience by analyzing the research information phase on the packaging. More specifically, we can highlight two research questions:

- RQ1: What packaging facing layout optimizes the comprehensibility of the accessory compatibility with the finished product?
- RQ2: What packaging facing layout optimizes the comprehensibility of the additional function that the accessory offers to the finished product?

3.3. Participants

20 French participants (8 men, 12 women) with ages ranging from 22 to 70 volunteered to take part in this study. The age split matches the findings of the latest usage and attitude (U&A) study from Groupe SEB on the Home Cleaning market. To match the U&A study, all participants were targeted to meet 3 requirements: they all own a vacuum cleaner, they are all the main user of it, and they are all responsible for purchasing housing equipment.

All the participants reported normal or corrected-to-normal vision, and no color-blindness.

3.4. Stimuli

The packaging studied have multiple constraints that we cannot modify. They must follow brand guidelines and the size of the packaging has to fit the accessory inside. Consequently, we did not study and/or change the following elements: font, colors, facing size and shape.

For the experimentation, we created 4 different packaging designs from a placement point of view as presented in Figure 1. To ensure that the participants did not get used to the information displayed on the facing, we chose to change the accessory name, image, claim and compatibility on each packaging. However, we carefully chose accessories that are all common to vacuum cleaners: aqua head (1), crevice tool (2), parquet floor brush (3) and a sofa brush (4).

(1) Aqua Head packaging (2) Crevice tool packaging (3) Parquet brush packaging (4) Sofa brush packaging

Figure 1: Packaging designs created for the eye-tracking experimentation

All packaging had an original size of 1890×2676 pixels which relates to a 0,7071:1 ratio. They were displayed on a 2560x1440 pixels computer screen.

3.5. Experimental protocol

The eye-tracking experimentation was conducted in a quiet room with constant artificial lighting at the Digital Lab of ESTA. Each participant was seated 60 to 70 cm from the eye-tracking sensor located just below the 31,5 inches AOC LCD computer screen as shown in Figure 2. The sensor used was a Tobii Nano Pro coupled with the Tobii Pro Lab software. This is a video-based pupil- and corneal reflection eye-tracking sensor. Consequently, the system was not intrusive and enabled the participants to move freely in the limited area while recording accurately.

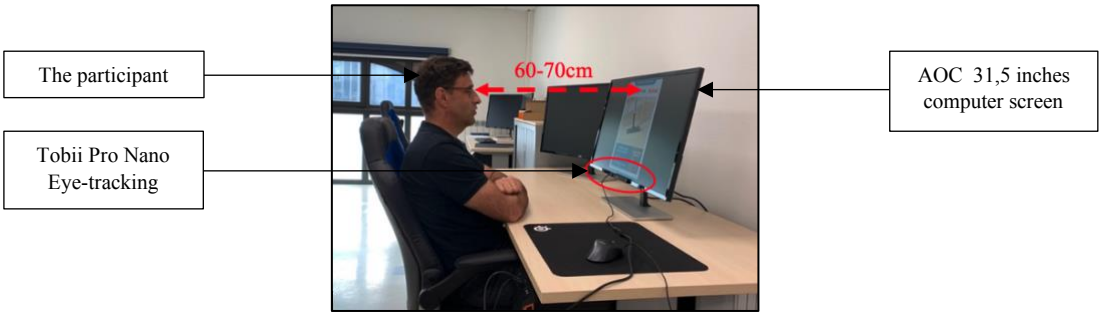


Figure 2: A participant during the eye-tracking experimentation

To ensure a flawless run of the experimentation, we used a powerful computer equipped with a high-end 3600X AMD processor and NVIDIA RTX 2070 graphic card.

First, the participants were informed of the general instructions for the session and the purpose of the study. The interviewer got their consent to be both eye-tracked and video recorded. Once in front of the computer screen, the participants were informed orally as well as through a slide on how the eye-tracking experimentation was going to be conducted: a slide asks them to find a specific information on the packaging image displayed afterward, and, when the packaging is shown, they have to answer orally to the question asked on the previous slide as soon as they find the answer on the packaging displayed.

Then, a 5 points calibration of the eye-tracking monitor was done. Then, the experimentation started; 8 questions relative to "Compatibility" and "Additional function" accompanied by 4 packaging (x2) were thus presented.

A first slide giving a situation (with a picture of a vacuum cleaner) and a question about "Compatibility" was then presented for 10 seconds to the participant. Following it, a white screen was displayed for 2 seconds to release the participant gaze. Then, a packaging was displayed and, as soon as the participant replied to the question, the interviewer switched to the next question. The aim of not having a timed slide for the packaging is to measure the response time of the participant.

The next question was about the "Additional function" that the accessory provides, once again displayed for 10 seconds. Afterward, a new white screen (2 seconds) and then a packaging was displayed so the participant could answer before going to the next question. This process would go on until the end of the experimentation and is shown in Figure 3.

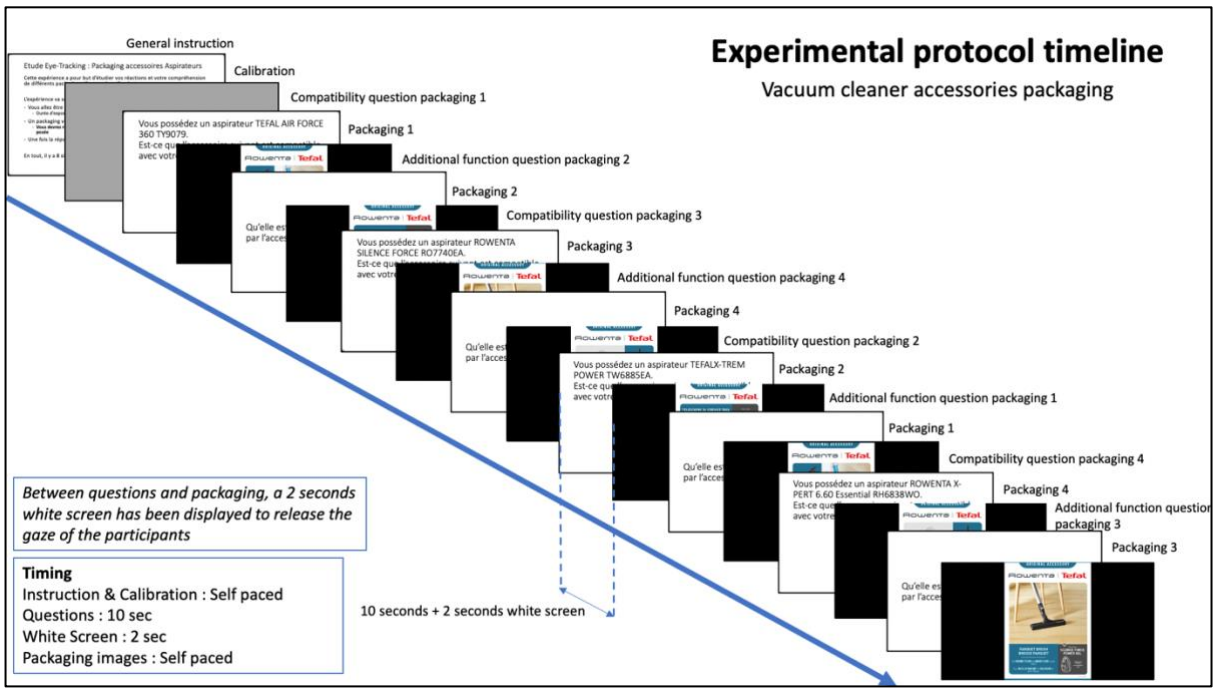


Figure 3: Experimental protocol timeline

The answer could be "YES" or "NO" for a (closed) question about compatibility and could be a phrase for a (open) question about the additional function provided by the accessory. The participants were asked to do this task 8 times: 4 times they were asked to say if the accessory was compatible with a given product and 4 times they were asked to give the main additional function of an accessory. To avoid repetition, we alternated the packaging, so the participant did not see the same packaging twice in a row.

All the experimentations were video recorded with a GoPro HERO 10 camera set with a 4K resolution and a frame rate of 60 images per second. Participants were filmed from a right-hand back side point of view. This allowed us to get more qualitative data as well as the response times and the correctness of the answers given by the participants.

After the experimentation, the participants were asked to submit an online questionnaire using Google Forms to get their feedback on how they felt about the packaging designs presented.

3.6. Measurements

3.6.1. AOIs

To analyze visits and fixations of the participants, the AOIs were set for each packaging. The AOIs selected on the facing were: (1) original accessory label, (2) brand names, (3) product picture (for 2 out of the 4 packaging), (4) title (accessory's name), (5) claim, (6) image, (7) compatibility and (8) reference as shown on Figure 4.

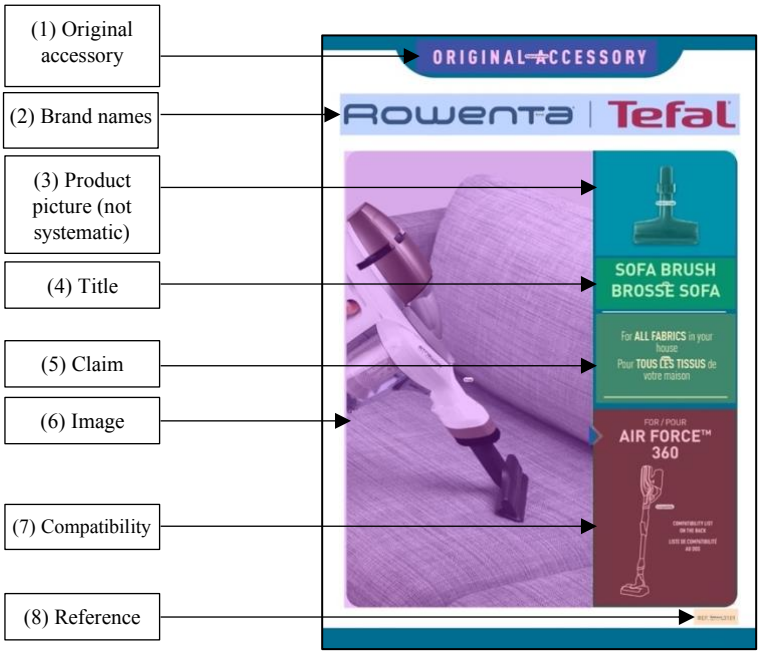


Figure 4: AOIs identified for each packaging design – sofa brush example

From a quantitative point of view, the measures that were considered in the analysis were the Time to First Visit (TFV), the Time to First fixation (TFF), the Total Duration of Fixations (TDF) and the Number of Fixations (NF). For qualitative results from the eye-tracking measures we used Heat Maps.

3.6.2. Video records

The recordings allowed us to determine a Time to Response (TR). The TR is the time from when the packaging is shown to the moment when the participant starts to answer the question or shows a sign of comprehension. The TR was manually timed by the same person. Moreover, the video records allowed us to know if the participants were right or not when answering the questions.

3.6.3. Quantitative questionnaire

The questionnaire submitted after the experimentation allowed us to get the feeling of the participants concerning the 4 packaging layouts. Comments were also taken into account to get more insights into the participants' choices and motivations.

4 RESULTS

4.1. Eye-tracking data analysis

The eye-tracking results considered in the analysis are what the participants look from the moment a packaging appears to when they start to answer the question or show a sign of comprehension. We estimated that their gaze when they start to answer the question is not useful as they already saw the information needed to reply and processed it in their mind.

Before going further, we define the key elements that allow consumers to properly understand the compatibility and the additional function on a packaging. To understand the compatibility, AOI "Compatibility" is key, AOI "Brand names" gives a partial answer. Concerning the additional function, AOI "Claim" is the most important as it verbally gives the function added by the accessory. AOI "Image" and AOI "Title" give a partial answer.

4.1.1. AOIs distribution

The first parameter we analyzed to get an idea of layout effectiveness is the number of participants (n=20) that fixed the AOIs. Results are showed on the Table 1.

Area of Interest	Packaging 1 Compatibility	Packaging 2 Compatibility	Packaging 3 Compatibility	Packaging 4 Compatibility	Packaging 1 Additional function	Packaging 2 Additional function	Packaging 3 Additional function	Packaging 4 Additional function
Brands	17	10	13	8	8	8	9	7
Claim	17	16	18	19	19	18	11	14
Compatibility	20	18	20	20	15	15	15	15
Image	19	19	20	19	20	20	20	20
OA	6	3	1	2	1	0	0	1
Product Image	14	NO AOI	NO AOI	11	13	NO AOI	NO AOI	9
Reference	2	0	1	1	0	1	0	0
Title	17	20	20	17	17	16	20	17

Table 1: Number of participants that looked each AOI

On the Table 1 presented above we can see that the AOI "Compatibility" has been fixed by every participant (when looking for the compatibility) unless for packaging 2. Packaging 1 shows a high fixation rate for the "Brand names" AOI as 17 out 20 participants looked at it.

When looking for the additional function, participants did not always look at the AOI "Claim", especially for packaging 3 and 4. On the contrary, the "Title" has been fixed by everyone on packaging 3 and still shows good engagement for the other layouts. Concerning the "Image", every participant fixed it.

4.1.2. Order of visit and fixation

To get an idea of what participants looked at first and what they looked afterwards, we analyzed the TFV and the TFF. The orders of the AOIs looked by the participants are showed in Table 2.

Position	Average order for first Visit (Compatibility)	TFV (Compatibility) (ms)	Average order for first Fixation (Compatibility)	TFF (Compatibility) (ms)	Average order for first Visit (Additional function)	TFV (Additional function) (ms)	Average order for first Fixation (Additional function)	TFF (Additional function) (ms)
1	Image	327	Image	507	Image	212	Image	449
2	Title	1010	Title	1219	Title	1228	Title	1600
3	Claim	1273	Compatibility	1500	Product Image	1516	Product Image	1745
4	Product Image	1338	Claim	1567	Claim	1554	Claim	1850
5	Compatibility	1458	Product Image	1947	Brands	2122	Brands	2011
6	Brands	2759	Brands	2999	Compatibility	2336	Compatibility	2534
7	OA	4137	OA	NOT AVAILABLE	OA	6240	OA	NOT AVAILABLE
8	Reference	7619	Reference	NOT AVAILABLE	Reference	7050	Reference	NOT AVAILABLE

Table 2: Time to First Visit and Time to First Fixation comparison for each AOI

It appears that the participants always started by looking at the "Image" which is at the center of every packaging and then visited the "Title".

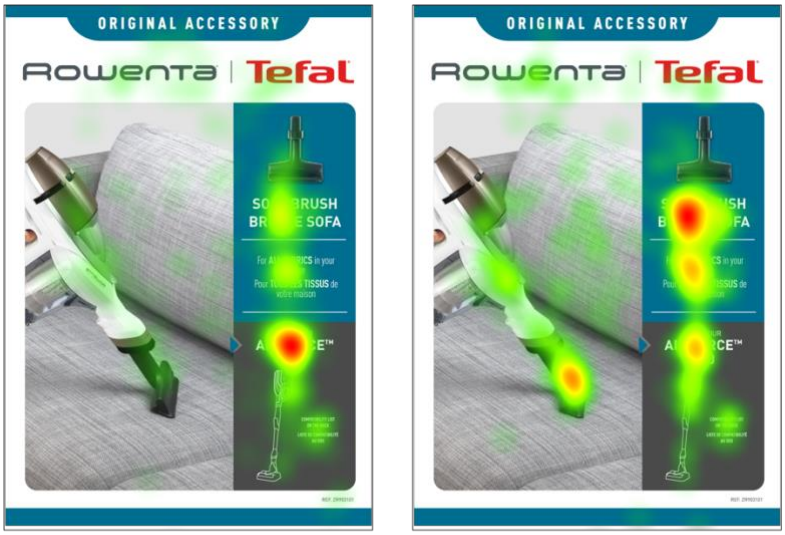
For the compatibility, AOI "Compatibility" is not an area firstly visited by the participants, however they immediately understand that this information is useful as they fixed it after 1500ms which is 42ms

after the first visit. This might be due to the fact that the "Compatibility" AOI contains verbal and non-verbal elements. Therefore, AOI "Compatibility" is the third one fixed by the participants. This ranking is true for 3 out of the 4 packaging designs presented. The only packaging design where the AOI "Compatibility" is later fixed is the very first packaging presented to the participants. This might be explained by the fact that it was the first time that they had seen a packaging in the experimentation, they therefore needed to understand the different information that they could find on it.

For the additional function the order of visits and fixations is the same. Participants started to look the AOI "Image", then the "Title", then the "Product image" (when available) to finally fix the "Claim" after 1850ms. As for the compatibility, the layout of the packaging does not seem to influence the order of fixation unless for the first packaging shown to participants to find the additional function.

4.1.3. Heat maps

The analysis of heat maps gives more qualitative data. We can see that for the compatibility, the only hot point is located on the AOI "Compatibility" and more specifically on the vacuum cleaner range name(s) compatible with the accessory. However, when it comes to the additional function, the gaze is more dispersed on the packaging and multiple hot points are visible as shown on Figure 5. We find them on several AOIs: "Claim", "Title", "Image", and "Compatibility". We also realized that depending on the packaging studied, the participants did not focus on the claim as much as on the other AOIs mentioned before.



Compatibility
Hot point = AOI "Compatibility"

Additional function
Hot points = AOIs "Title", "Image", "Claim" and "Compatibility"

Figure 5: Heat maps of packaging n°4 for both Compatibility and Additional function questions

4.2. Combined data analysis

4.2.1. Comprehensibility and Fixations

To evaluate packaging effectiveness, we analyzed participants' answers accuracy as shown in Table 3. We realized that the accessory compatibility is the pain point for comprehensibility as the accuracy rate is only about 74% on average whereas for the additional function it is about 94% on average.

Packaging presented	Packaging 1 Aqua Head Compatibility	Packaging 2 Crevice Tool Compatibility	Packaging 3 Parquet Brush Compatibility	Packaging 4 Sofa Brush Compativility	Packaging 1 Aqua Head additional function	Packaging 2 Crevice Tool additional function	Packaging 3 Parquet Brush additional function	Packaging 4 Sofa Brush additional function
Answers accuracy rate (%)	85%	75%	60%	75%	80%	100%	100%	95%

Table 3: Answers accuracy rate for all packaging designs

From a number of fixations (NF) point of view, the packaging layouts 1 and 3 revealed more fixation on AOI "Compatibility" than packaging 2 and 4 for the accessory compatibility comprehension. It ends with more overall fixations on key AOIs to understand the compatibly as shown in Figure 6 (A). For the additional function, packaging 1 and 2 got more fixations on key AOIs.

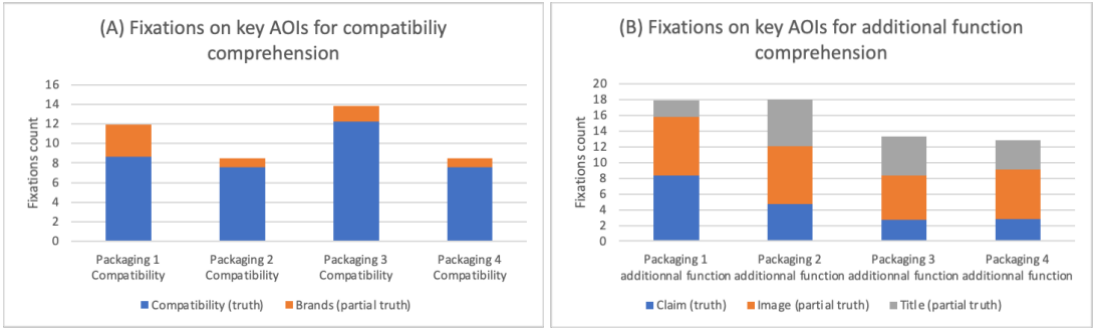


Figure 6 (A and B): Number of fixations on key AOIs for compatibility (A) and for additional function (B)

Since a high number of fixations implies either a high level of interest or a difficulty with comprehension, we combined these metrics with the answer accuracy rate.

Combined with the answer accuracy rate we could conclude that packaging 1 seems more interesting for participants as well as clearer than the other ones when looking at the results for compatibility. On the contrary, the high number of fixations for the packaging 3 seems to show a difficulty in comprehension. This result is not necessarily linked to the packaging layout but more to the information presented inside as the packaging 3 showed two vacuum cleaner ranges compatible which misled some participants. However, it allowed us to highlight that when multiple product ranges are compatible with an accessory, the range names should be clearly separated.

We can see the same scenario with the additional function study on the Figure 6 (B). Packaging 1 shows a high number of fixations due to a difficulty for the participants to understand the function of this – unusual – accessory. Thus, this result does not show a clear result from a layout point of view. However, packaging 2 with verbal elements at the top and non-verbal items at the bottom seems to interest more people than the other layouts.

In our study, the Number of fixations (NF) and the Total Duration of Fixations (TDF) were closely linked and had the same proportion unless for packaging 1 were the participants fixed the claim for long periods to understand the additional function of the accessory.

4.2.2. Processing Time for compatibility

One metric to evaluate comprehensibility is the Processing Time (PT) shown in Table 4. PT is found by deducing the TFF (Time to First fixation) of key AOI to the TR (Time to Response).

Packaging presented	Packaging 1	Packaging 2	Packaging 3	Packaging 4
	Aqua Head Compatibility	Crevice Tool Compatibility	Parquet Brush Compatibility	Sofa Brush Compativility
Mean Processing Time (s)	5,28	5,74	5,88	4,01

Table 4: Processing Time (PT) for compatibility comprehension

This result highlights that vertical layouts (Packaging 1 and 4) seem to be more understandable when it comes to compatibility as participants showed a shorter Processing Time (PT). This goes in the same way as the answers accuracy rate showed before.

We did not analyze the PT for additional function as it can be deduced from multiple AOIs.

4.3. Participants' feeling

After the experimentation, the participants had to answer a short questionnaire so they could give their feeling. We counted the number of times a packaging appeared for each question as shown in Table 5. We then calculated the mean value for "positive marks" (MVPM) and for the "negative marks" (MVNM). This allowed us to calculate an overall mark by deducing the MVNM from the MVPM. A positive result means that the participants felt at ease with the concerned packaging.

Packaging	Verbal element position	At ease for compaitibilty	Not at ease for compaitibilty	At ease for Additional function	Not at ease for Additional function	Overall preference	Mean value of apparition for "positive" marks	Mean value of apparition for "negative" marks	Overall mark
Packaging 1	Left	9	2	9	2	10	9,33	2	7,33
Packaging 2	Top	3	8	2	9	1	2,00	8,5	-6,50
Packaging 3	Bottom	5	7	4	4	5	4,67	5,5	-0,83
Packaging 4	Righ	7	4	4	4	5	5,33	4	1,33

Table 5: Count and calculation of packaging preference (result between -20 and +20)

As we can see in the Table 5 above, vertical layouts with verbal information on the left or on the right are preferred compared to the horizontal layouts. More than comparing vertical versus horizontal packaging layouts, we can also underline that packaging 1 with verbal information on the left-hand side is favored by far. If we dig into this result by looking into the comments the participants wrote in the questionnaire, this has mostly to do with the fact that people in France use the Western reading system.

5 DISCUSIONS AND LIMITATIONS

5.1. Discussions

In summary, our study reveals two major findings for packaging comprehensibility.

First, vertical layouts revealed easier comprehensibility, and this has been confirmed by the preferences of the participants. Results and participants also mentioned that they felt more at ease with the verbal elements on the left-hand side and the image on the right hand-side. These feedbacks are similar whether when speaking about compatibility or additional function. These findings corroborate with the Western reading system mentioned by Rebollar *et al.* [14]. However, it is the opposite of what Rettie and Brewer [21] reported in their article. Back in 2000 they did not track the eye movement and were only studying the recall after a 500ms exposure to a packaging. Even though they were analyzing what participants remembered from the packaging to analyze what layout was the best, they did not ask them to find and understand a particular information on the packaging. As the purpose was slightly different to ours, their findings might not be as reliable for packaging comprehensibility.

Second, research of information for compatibility is straight to the point and concentrated on one unique area whereas for the additional function the gaze is much more dispersed. It implies that the claim is not the only place where consumer look for the additional function information. The "Image" and the "Title" get participants attention as it has been observed previously in packaging design studies [8]-[12]. Therefore, according to Dobson and Yadav [2], they need to be crystal clear to properly communicate the message. However, "Brand" names did not get a lot of attention from the participant compared to what Droulers *et al.*[5] and Stanley and Elrod [15] reported. This difference might be justified by the fact that our protocol requested the participants to find specific information on the packaging and kept the same brands on the packaging designs. When it comes to clear verbal message, it has also been stated that when multiple vacuum ranges are compatible with the accessory, the range names need to be clearly separated to avoid misunderstanding. However, these results do not show any significance difference between packaging design layouts.

5.2. Limitations and recommendations for further research

Our study also has some limitations. Firstly, the experimentation on packaging has been conducted in a virtual environment (on a 2D computer screen). It would be interesting to do it in a real environment as the results could be different. Although a study indicated that the physical environment enabled a significantly faster search performance compared to the virtual projected image [26]. Moreover, our study kept the same questions and packaging order. Future research on packaging comprehensibility could add the fact of having a randomized order in their protocol.

Another point to highlight is that the participants were all French residents and 90% of them were native. Since culture influence the perception of packaging design [22]-[24], this would be interesting to carry out the same experimentation in other countries, especially countries that do not use the Western reading system.

Colors can also influence the packaging perception [9], [27] as for example the time needed to notice a packaging on a shelf [8]. Future research could study the impact of color on packaging comprehensibility.

Last, our study focused on the packaging facing only. However, a packaging has most of the time six faces. An eye-tracking experimentation conducted in a 3D environment would allow to study the impact of the other faces on the packaging comprehensibility.

6 CONCLUSIONS

Taken together, the outcomes specify what packaging layout improves consumer comprehension and thus enhance the in-store customer experience. Moreover, it brings up how high is the impact of packaging layout on consumer comprehension and feeling.

This study allows to highlight that vertical layout with verbal elements on the left-hand side and non-verbal elements on the right-hand side enhance the comprehension and the comfort of consumers for both compatibility and additional function comprehension. However, compatibility comprehensibility needs to be brushed up to avoid purchasing mistakes. On the other hand, additional function description should be clearer and stand out more to enlighten people's understanding of the accessory benefits while the main picture and title need to be specific and crystal clear.

Therefore, Groupe SEB will adjust its brand guidelines for accessories packaging to make it easier for the consumer to understand.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank Groupe SEB for its support as well as the ELLIADD Laboratory (E.A. 4661), the ERCOS Research Team and the ESTA School for the help and the material provided. Finally, we would like to thank all the participants of the eye-tracking experimentation.

REFERENCES

[1] Hubspot, "9 Customer Experience Trends & Stats That'll Define the Next Year," Apr. 18, 2022. https://blog.hubspot.com/service/customer-experience-trends (accessed May 03, 2022).

[2] Paul Dobson and Arvind Yadav, "Packaging in a Market Economy: The Economic and Commercial Role of Packaging Communication," 2012.

[3] E. S.T. Wang, "The influence of visual packaging design on perceived food product quality, value, and brand preference," *Int. J. Retail Distrib. Manag.*, vol. 41, no. 10, pp. 805–816, Sep. 2013, doi: 10.1108/IJRDM-12-2012-0113.

[4] G. Pantin-Sohier, "L'influence du packaging sur les associations fonctionnelles et symboliques de l'image de marque," *Rech. Appl. En Mark. Fr. Ed.*, vol. 24, no. 2, pp. 53–72, Jun. 2009, doi: 10.1177/076737010902400203.

[5] O. Droulers, M. Lajante, E. Jamet, S. Lacoste-Badie, and M. Minvielle, “Effet de la complexité visuelle du packaging sur l’attention portée à la marque,” *Rev. Sci. Gest.*, vol. 261–262, no. 3, p. 39, 2013, doi: 10.3917/rsg.261.0039.
[6] Sarah M. Stanley and Cassandra C. Elrod, “Assessing perceived quality through package design: an eye tracking study,” *Issues Inf. Syst.*, vol. 15, no. II, pp. 375–382, 2014, doi: 10.48009/2_iis_2014_375-382.
[7] Agnieszka Cholewa-Wójcik and Agnieszka Kawecka, “The influence of effectiveness of packaging elements on the consumers’ preferences with the use of marketing eye-tracking technique,” pp. 49–61, 2015.
[8] G. Franken, “Packaging design and testing by eye tracking,” in *Proceedings - The Tenth International Symposium GRID 2020*, Nov. 2020, pp. 347–354. doi: 10.24867/GRID-2020-p38.
[9] M. Husić-Mehmedović, I. Omeragić, Z. Batagelj, and T. Kolar, “Seeing is not necessarily liking: Advancing research on package design with eye-tracking,” *J. Bus. Res.*, vol. 80, pp. 145–154, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jbusres.2017.04.019.
[10] B. Piqueras-Fiszman, C. Velasco, A. Salgado-Montejo, and C. Spence, “Using combined eye tracking and word association in order to assess novel packaging solutions: A case study involving jam jars,” *Food Qual. Prefer.*, vol. 28, no. 1, pp. 328–338, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.foodqual.2012.10.006.
[11] J.-V. David, M.-R. Ana, F.-B. Santiago, and A.-V. Faustino, “Aspects of Industrial Design and Their Implications for Society. Case Studies on the Influence of Packaging Design and Placement at the Point of Sale,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, p. 517, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11020517.
[12] S. Fuentes, C. Gonzalez Viejo, D. D. Torrico, and F. R. Dunshea, “Digital Integration and Automated Assessment of Eye-Tracking and Emotional Response Data Using the BioSensory App to Maximize Packaging Label Analysis,” *Sensors*, vol. 21, no. 22, p. 7641, Nov. 2021, doi: 10.3390/s21227641.
[13] M. Memişoğlu and Y. Yener Girişken, “The Evaluation of Pharmaceutical Packaging Pictograms via Eye Tracking Technique,” *Innov. Pharm.*, vol. 13, no. 1, p. 5, Feb. 2022, doi: 10.24926/iip.v13i1.4307.
[14] R. Rebollar, I. Lidón, J. Martín, and M. Puebla, “The identification of viewing patterns of chocolate snack packages using eye-tracking techniques,” *Food Qual. Prefer.*, vol. 39, pp. 251–258, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.foodqual.2014.08.002.
[15] Sarah M. Stanley and Cassandra C. Elrod, “Assessing perceived quality through package design: an eye tracking study,” *Issues Inf. Syst.*, vol. 15, no. II, pp. 375–382, 2014, doi: 10.48009/2_iis_2014_375-382.
[16] D. J. Graham and R. W. Jeffery, “Location, Location, Location: Eye-Tracking Evidence that Consumers Preferentially View Prominently Positioned Nutrition Information,” *J. Am. Diet. Assoc.*, vol. 111, no. 11, pp. 1704–1711, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.jada.2011.08.005.
[17] Alex Gofman, Howard R. Moskowitz, Johanna Fyrbjork, David Moskowitz, and Tõnis Mets, “Extending Rule Developing Experimentation to Perception of Food Packages with Eye Tracking,” *The Open Food Science Journal*, 2009.
[18] N. M. Gunaratne *et al.*, “Consumer Acceptability, Eye Fixation, and Physiological Responses: A Study of Novel and Familiar Chocolate Packaging Designs Using Eye-Tracking Devices,” *Foods*, vol. 8, no. 7, p. 253, Jul. 2019, doi: 10.3390/foods8070253.
[19] M. Sielicka-Różyńska, E. Jerzyk, and N. Gluza, “Consumer perception of packaging: An eye-tracking study of gluten-free cookies,” *Int. J. Consum. Stud.*, vol. 45, no. 1, pp. 14–27, Jan. 2021, doi: 10.1111/ijcs.12600.
[20] Ubaldo Cuesta, Jose Ignacio Niño, and Luz Martínez, “Neuromarketing: Analysis of Packaging Using Gsr, Eye-Tracking and Facial Expression,” 2018.
[21] R. Rettie and C. Brewer, “The verbal and visual components of package design,” *J. Prod. Brand Manag.*, vol. 9, no. 1, pp. 56–70, Feb. 2000, doi: 10.1108/10610420010316339.
[22] C. J. A. Machiels and U. R. Orth, “Multisensory Packaging Design across Cultures,” in *Multisensory Packaging*, C. Velasco and C. Spence, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 287–315. doi: 10.1007/978-3-319-94977-2_11.
[23] B. M. Brand and R. Reith, “Cultural differences in the perception of credible online reviews – The influence of presentation format,” *Decis. Support Syst.*, vol. 154, p. 113710, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.dss.2021.113710.
[24] S. Sagot, E. Ostrosi, and P. Lacom, “Computer-assisted culturalization process integration into product-website design,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 26, p. 100252, 2021, doi: 10.1016/j.jii.2021.100252.
[25] B. Piqueras-Fiszman, C. Velasco, A. Salgado-Montejo, and C. Spence, “Using combined eye tracking and word association in order to assess novel packaging solutions: A case study involving jam jars,” *Food Qual. Prefer.*, vol. 28, no. 1, pp. 328–338, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.foodqual.2012.10.006.
[26] C. Tonkin, A. D. Ouzts, and A. T. Duchowski, “Eye tracking within the packaging design workflow: interaction with physical and virtual shelves,” in *Proceedings of the 1st Conference on Novel Gaze-Controlled Applications - NGCA ’11*, Karlskrona, Sweden, 2011, pp. 1–8. doi: 10.1145/1983302.1983305.
[27] J. Huang, Y. Peng, and X. Wan, “The color-flavor incongruency effect in visual search for food labels: An eye-tracking study,” *Food Qual. Prefer.*, vol. 88, p. 104078, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.foodqual.2020.104078.

OPTIMISATION DE LA COORDINATION SANITAIRE ET SOCIALE D'UN TERRITOIRE : PROPOSITION METHODOLOGIQUE - APPLICATION AU PROJET TSN SANTE LANDES

Damien KRIER[1], Camille JEAN[2], Jérôme WITTWER[1]

[1] Research Center U1219, Bordeaux Population Health, Université de Bordeaux, Bordeaux, France
[2] LCPI, Arts et Métiers Institute of Technology, HESAM Université, Paris, France

Résumé : La coordination sanitaire et sociale est un enjeu majeur pour améliorer la qualité des systèmes de santé. Elle implique de nombreux acteurs et activités, nécessite la connaissance des rôles et des ressources de chacun, repose sur l'échange d'informations et vise à faciliter une prestation de soins appropriée. En France, différentes structures de coordination sont apparues depuis les années 60, certaines étant le fruit d'une volonté politique, d'autres venant d'initiatives locales. Néanmoins, les missions de chacune des structures peuvent se chevaucher et diminuer l'efficience de l'organisation globale. L'objectif de ces travaux de recherche est de proposer une méthode permettant de simuler l'impact d'un changement organisationnel sur l'activité des différents dispositifs de coordination existants à des fins d'optimisation. Pour générer cette proposition, une démarche de recherche-action a été mise en place avec le projet TSN Santé Landes permettant de construire la méthode tout en l'expérimentant.

Mots clés : Système de santé, Coordination, Conception, Système Organisationnel Complexe, Optimisation

1 CONTEXTE

Dans la majorité des cas, la bonne orientation des patients dans le système de soins est assurée par le médecin généraliste dit de premier recours. De par son rôle pivot, le médecin généraliste a une connaissance de l'histoire du patient, de son environnement et de sa situation sociale qui lui permet d'assurer un parcours de soins en adéquation avec ses besoins [1]. Dans le cas de patients en situation complexe, le médecin généraliste et autres professionnels de premier recours peuvent avoir besoin d'un appui fonctionnel ou appui à la coordination. La complexité des patients provient en général de la coexistence de problèmes médicaux, psychosociaux, fonctionnels associés à des facteurs culturels, environnementaux et/ou économiques [2]. La coordination sanitaire et sociale est un des challenges des systèmes de santé [3]. L'appui à la coordination du parcours de santé vise à mieux évaluer la situation et à mobiliser l'ensemble des ressources nécessaires afin de prévenir d'éventuelles rupture dans le parcours de soins (maintien au domicile, anticipation des hospitalisations, sortie d'hospitalisation dans les meilleures conditions) [1,4]. Elle implique de nombreux acteurs et activités, nécessite la connaissance des rôles et des ressources de chacun, repose sur l'échange d'informations et vise à faciliter une prestation de soins appropriée [5].

En France, si on s'intéresse aux parcours de santé des personnes âgées en situation de dépendance, l'objectif de maintien à domicile a été introduit dans les politiques publiques à partir des années 60. Les réseaux de santé et structures de coordination y sont notamment favorisés pour répondre à ce besoin [1]. Cette vision, toujours d'actualité, entend notamment maintenir le plus longtemps possible ces personnes dans leur cadre de vie, éviter l'exclusion et la relégation en institution [6,7]. Le maintien à domicile suppose une coordination la plus étroite possible entre les différents acteurs du maintien à domicile : aide-ménagère, soins infirmiers à domicile, portage de repas, professionnels de santé libéraux. Suivant l'évolution de la politique sociale et sanitaire, il a semblé que cette coordination devait être assurée localement. Ainsi l'État a institué un dispositif par une circulaire du 6 juin 2000, il s'agissait des CLIC, Centres Locaux d'Information et de Coordination gérontologique pilotés à l'échelon départemental. Un autre dispositif, expérimenté dans le Plan National Alzheimer 2008-2012, est venu compléter l'offre en matière de coordination, il s'agit des MAIA : Maisons pour l'autonomie et l'intégration des Malades Alzheimer [8]. Plus récemment (2014), sous l'égide du ministère des solidarités et de la santé, le Paerpa, parcours de santé des aînés, a été déployé sur plusieurs territoires pilotes (au moins un par région). Aussi, la DGOS a lancé une vaste expérimentation dans le cadre des investissements d'avenir, impliquant 5 territoires pilotes et doté de 80 millions d'euros : le programme Territoire de Soins Numérique (TSN). TSN a pour but de développer et mettre en place des systèmes innovants pour coordonner les parcours des patients. Santé Landes (TSN Aquitaine) est un des 5 projets retenus et a permis le développement d'un système d'information innovants accompagnés par la mise en place d'une nouvelle structure organisationnelle : la cellule territoriale d'appui Santé Landes (CTA). En s'appuyant sur des outils numériques innovants, cette cellule a vocation à mieux coordonner les acteurs locaux impliqués dans le maintien à domicile des personnes en situation psycho-médico-sociale complexe et ainsi faciliter et fluidifier les parcours de santé. Ce dispositif est venu s'ajouter aux autres dispositifs locaux et nationaux répondant déjà partiellement à l'objectif donné aux plateformes territoriales d'appui (PTA), coordination territoriale d'appui (PTA) et autres dispositifs mentionnés précédemment. Ainsi, les missions de cette nouvelle structure peuvent chevaucher celles de structures existantes rendant peu lisible leur intervention [9].

Conscient de la question du partage efficient de l'activité entre les différentes structures et décideurs, le législateur a cherché à unifier l'action de ses initiatives en un dispositif unique. La création du Dispositif d'Appui à la Coordination (DAC) en est la traduction. Cette forme d'intégration verticale de l'activité d'appui pose la question de la rationalisation des dispositifs existants en termes d'activités et réallocations des ressources. *Les acteurs mise sur la coordination et la collaboration entre les acteurs publics. C'est une stratégie qui s'entend pour les structures dépendantes d'une même tutelle (comme l'ARS par exemple), mais qui ne donne pas de garantie pour les structures dépendantes des autres échelons (département, commune et intercommunalités).* Dans cette perspective, mieux décrire ces dispositifs et caractériser leurs activités sont des enjeux majeurs. Aussi, analyser les effets des composantes spécifiques de la coordination des soins (par exemple, les mécanismes de coordination, les caractéristiques spécifiques aux tâches de chacun, etc.) permettrait de déterminer si une composante particulière (rôle, type et niveau d'activité, etc.) affecte l'efficacité de l'intervention [10]. Le développement d'une taxonomie des dispositifs de coordination en France parait-être une étape indispensable ainsi que la définition d'indicateurs clés. Cela suppose les moyens de collecter de manière fiable l'information nécessaire à leur mesure, pour évaluer *in itinere* l'impact en vie réelle et garantir un pilotage éclairé en collaboration avec l'ensemble des parties prenantes. C'est ce que propose d'initier ce travail de recherche.

L'objectif est de proposer une méthode systémique permettant d'objectiver la situation sur un territoire et de soumettre des recommandations d'optimisation aux décideurs. Cette proposition se base sur les travaux menés en Science de la Conception relatif à la création et l'optimisation de systèmes organisationnels complexes [11,12]. Une démarche de recherche-action a été mise en place avec le projet TSN Santé Landes permettant de construire la méthode tout en l'expérimentant.

2 PROPOSITION METHODOLOGIQUE

La figure 1 présente la méthode systémique permettant d'objectiver la situation sur un territoire et de proposer des recommandations aux décideurs. Celle-ci est composée de 7 étapes décrites par la suite sous la forme d'un guide méthodologique.

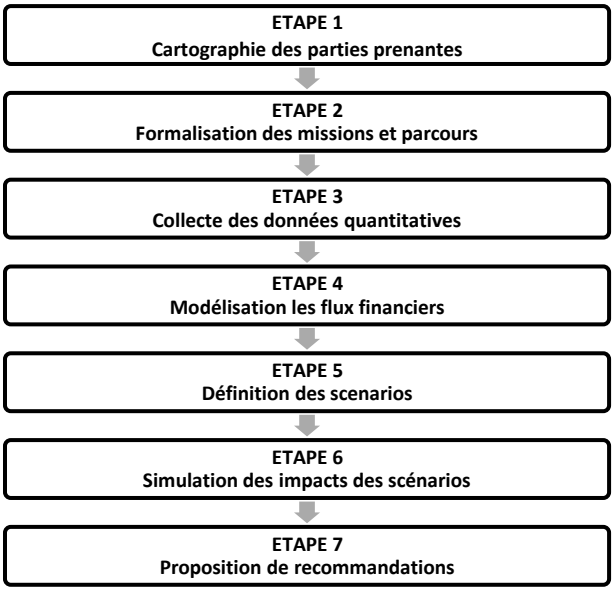


Figure 1 : méthode systémique permettant la proposition de recommandation concernant la coordination sanitaire et sociale d'un territoire

Étape 1 : Cartographie des parties prenantes

Il conviendra tout d'abord d'identifier l'ensemble des parties prenantes impliquées dans le maintien à domicile sur un territoire donné, des structures de coordination (entités) jusqu'aux financeurs, tels que :

- Pour les financeurs : L'état, ARS, collectivités locales, Assurances Maladie, mutuelles et assurances complémentaires ;
- Pour les structures de coordination : CLIC, MAIA, Centres d'action sociale (CCAS/CIAS), réseaux de santé, associations (exemple : ADMR), ainsi que les plateformes ou cellule territoriale d'appui type PAERPA ou CTA TSN.

Pour chacune des structures impliquées dans le maintien à domicile et sa coordination, précisez leur rôle, leurs missions et leur périmètre d'action. Dans un premier temps, utilisez les rapports publics officiels, les textes de lois, les livres blancs et la littérature scientifique. Puis conduisez des entretiens ciblés semi-directifs auprès de chaque partie prenante identifiée, afin d'obtenir une cartographie exhaustive la plus proche possible de la réalité. A ce stade, un certain nombre d'activités (ou missions) spécifiques à chaque structure est à votre disposition.

Étape 2 : Formalisation des missions et modélisation des parcours

Trouvez un langage commun à toutes les structures : partez des activités ou missions spécifiques à chaque structure, puis généralisez-les en quelques grandes missions. De manière que toutes les activités décrites par les structures soient inclues dans une des grandes missions définis. Le but de cette étape est de trouver le bon niveau de langage, suffisamment général pour être commun aux différentes structures, mais également précis afin d'obtenir un modèle sensible à des modifications.

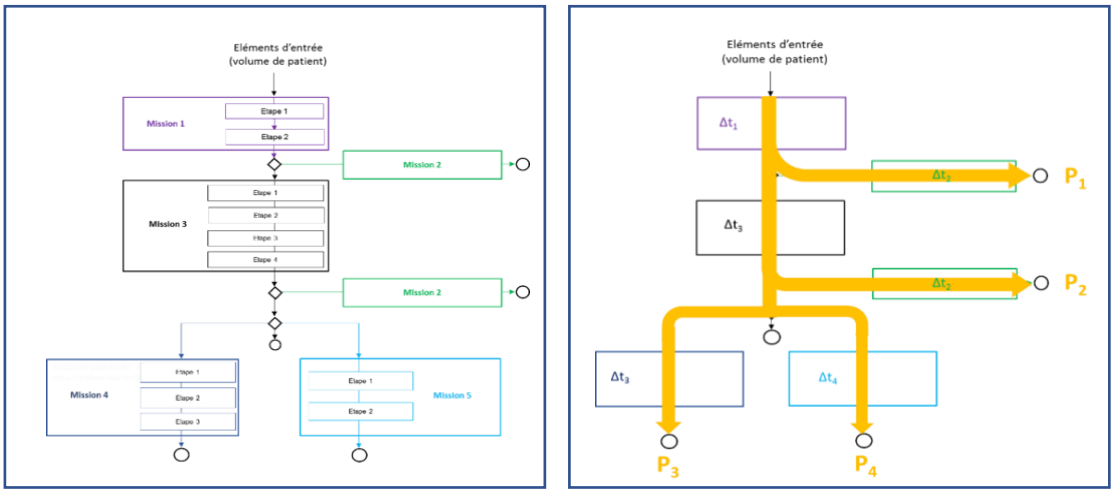


Figure 1 Exemple de modélisation : détaillée (à gauche), simplifiée avec les différents parcours possibles (à droite)

Enfin, formalisez ces missions en processus, base structurelle du modèle. Les missions sont représentées par des cases. L'enchainement des missions correspond à des processus, si bien que les éléments d'entrée (ensemble des demandes OU patients entrant dans les structures) sortent du modèle en étant passés par un certain nombre de missions. Ces cheminements au travers des missions (processus) définiront les différents parcours patients possibles au sein d'une structure de coordination (cf. flèches jaune, *Figure 1*).

Ainsi, la modélisation permet de décrire le flux des patients au travers des différentes structures organisationnelles en utilisant des paramètres quantitatifs. Cette étape peut demander des itérations entre la précédente et celle-ci.

Étape 3 : Validation le modèle et collecte des données quantitatives

Une fois la structure du modèle définie, réalisez une deuxième vague d'entretien auprès de chaque entité afin de :

- Valider la structure du modèle (missions et parcours) : chaque situation rencontrée correspond-t-elle bien à un des parcours du modèle ? testez des cas concrets.
- Collecter des données quantitatives, par exemple :
    - Nombre unitaire annuel (patient ou demande pris en charge) ;
    - Répartition des patients selon le niveau de complexité (exemple : charge faible, moyenne ou élevée) ;
    - Estimation du temps passé par mission selon le niveau complexité du patient ;
    - Budget annuel (masse salariale + coût de fonctionnement) et répartition en fonction des sources de financement.

Pour compléter la collecte des données, utilisez les rapports d'activités des entités ou autres rapports publics officiels, les livres blancs et la littérature scientifique. Si des données manquantes subsistent, élaborez des hypothèses crédibles après avoir conduit des entretiens avec les experts de terrain.

Le tableau 1 donne une vision globale de l'activité en volume de patients en fonction des parcours et des différentes entités composant le système. Des tableaux similaires peuvent être réalisés en fonction du temps passé (par parcours) et du coût des entités.

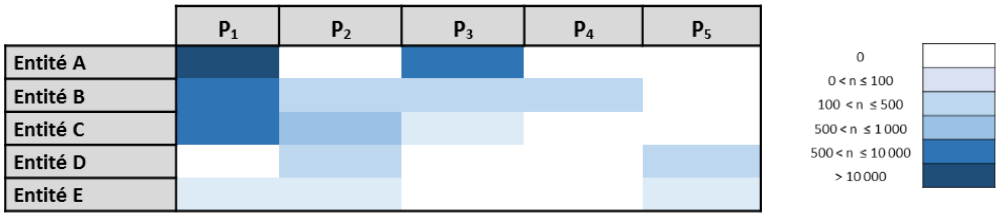


Tableau 1 Volume annuel de patients par parcours en fonction de l'entité

A partir de ces données d'entrée, un certain nombre de données sont calculées. L'ensemble de ces données (collectées et calculées) serviront de paramètres de base pour l'étape 6 de simulation.

Étape 4 : Modélisation des flux financiers entre les parties prenantes

Identifier les flux économiques liant chacune des parties prenantes. Le préalable à cette étape est d'obtenir les données de financement de chaque entité (étape 3). Pour les données manquantes, consultez la littérature et/ou élaborez des hypothèses crédibles après avoir conduit des entretiens avec les experts de terrain.

Étape 5 : Définition des scenarios et des hypothèses chiffrées

Constituez un groupe de travail afin de générer des scénarios lors d'une séance de créativité, puis sélectionner, lors de séances de travail, les plus pertinents qui seront simulés par la suite. Ces travaux devront permettre aussi de quantifier les modifications structurelle et comportementale, via des hypothèses chiffrées, de chacun des scénarios générés (cf : *Etape 6*). L'objet de la séance de créativité est de réfléchir à des scénarios de répartition des parcours avec pour principal objectif d'optimiser la coordination des parcours de santé sur un territoire donné. Pour mener à bien la séance, élaborez des supports qui permettront de visualiser l'organisation globale du système, les principales caractéristiques (types et volume de personnes pris en charge) et les points forts de chaque entité. Plusieurs séances de travail peuvent être nécessaires pour sélectionner les scénarios les plus pertinents.

Étape 6 : Simulation des impacts des scénarios

Les scénarios permettent de reproduire deux types de modifications :

- Structurelle : redistribution d'un ou plusieurs parcours (volume de patients) entrainant une nouvelle répartition des flux financiers,
- Comportementale : effets attendus des modifications organisationnelles, liés aux modifications structurelles et/ou à l'implantation d'un SI innovant.

Les différentes simulations permettent ensuite de tester de manière quantitative des hypothèses. La *Figure 3* reprend ces étapes. D'abord, les modifications structurelles (cf. scenario 1 de la *Figure*) sont prises en compte, puis les calculs impactant les modifications comportementales sont effectués (cf. scenario 1', *figure 3).*

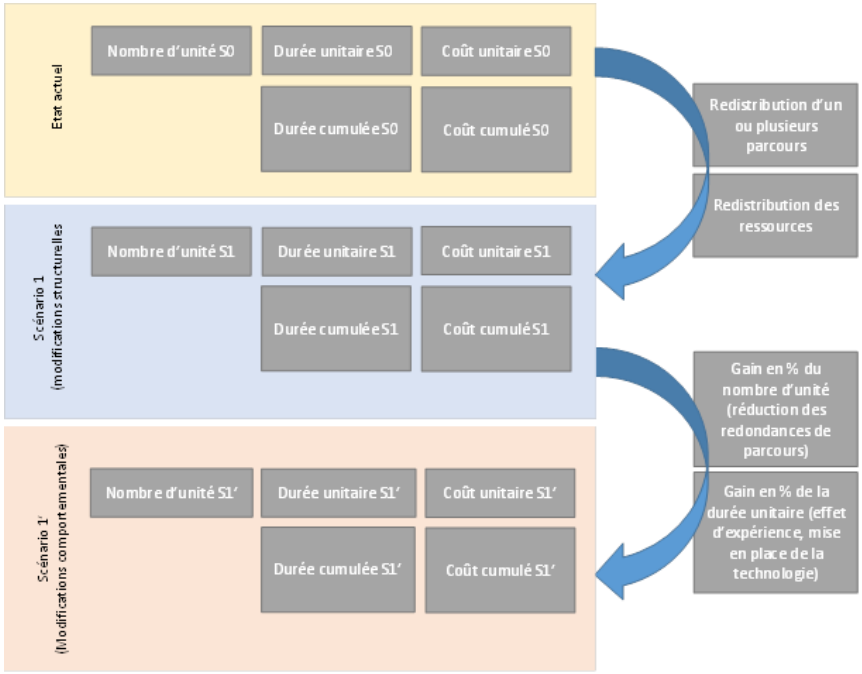


Figure 3 Étapes réalisées par le modèle lors d'une simulation

Étape 7 : Comparaison des résultats et proposition de recommandation

Représentez les résultats sur un graphique et comparer afin de voir si le système et les structurent gagnent économiquement à mettre en place des scénarios. Basé sur ces résultats, proposez des recommandations.

3 CAS D'APPLICATION : TSN SANTE LANDES

La méthode a été construite et expérimentée avec le projet TSN Santé Landes. 5 structures de coordination ont été incluses dans l'étude, 7 missions ont été définies et 7 parcours patients ont été décrits. La collecte de données [13–18] a permis de quantifier 4 types de paramètres clés. Ainsi, il a été possible de répartir les personnes prises en charge selon leur complexité, d'établir le volume annuel de personnes ou demande prises en charge par structure, de préciser la durée unitaire des missions en fonction de la structure et du type de patient et d'estimer le coût annuel de chaque structure en prenant en compte la charge salariale et les coûts de fonctionnement. Une démarche de validation a été entreprise auprès des 5 structures de coordination pour valider le modèle. Après calculs, l'activité annuelle de chaque structure a pu être précisée.

Après avoir modélisé le système actuel de coordination, une séance de créativité a été organisée avec 4 personnes et a duré 3 heures. L'objet de la séance a été de réfléchir à des scénarios de répartition des parcours avec pour principal objectif d'optimiser la coordination des parcours de santé dans les Landes. A l'issue de ce travail, 7 scénarios ont été générés. Ces scénarios ont été simulés en prenant en compte les modifications structurelles puis les modifications comportementales. Ainsi, la méthode a permis de simuler aussi bien des réallocations de parcours et redistribution de flux financiers que des modifications organisationnelles tel que les effets d'apprentissage et de spécialisation. Les résultats des scénarios ont ensuite été comparés les uns avec les autres et des recommandations effectuées tel le renforcement d'une structure de manière ciblée.

L'application de cette méthode au projet TSN Santé Landes a été perçue positivement par les décideurs public (comité scientifique EvaTSN). Cette méthode n'inclut cependant l'aspect de la coordination que de manière quantitative et ne permet pas d'évaluer la perte ou le gain de la

qualité du service apporté aux usagers. Elle doit ainsi être utilisé de manière complémentaire aux outils existants dans la littérature. Elle nécessitera également d'être éprouvée sur d'autres cas d'étude afin de pouvoir être généralisée.

4 CONCLUSION

Ces travaux ont permis d'élaborer une méthode systémique pour objectiver la prise de décision public dans le cadre de la coordination sanitaire et sociale d'un territoire. Cette méthode est composée de 7 étapes et permet notamment de réaliser une taxonomie des différentes missions d'« appui à la coordination », une quantification de l'activité de chaque structure et une simulation de l'impact d'un changement organisationnel sur l'activité des différents dispositifs existants. Cette méthode a été construite et expérimentée avec le projet TSN Santé Landes. Cela a permis d'éclairer la décision publique et être source de proposition quant à la pérennisation d'une innovation organisationnelle.

REFERENCES

1. DGOS. « Améliorer la coordination des soins : comment faire évoluer les réseaux de santé ? » Guide méthodologique. 2012.
2. HAS. Note méthodologique et de synthèse documentaire. « Coordination des parcours. Comment organiser l'appui aux professionnels de soins primaires ? ». 2014.
3. World Health Organization. Continuity and coordination of care: a practice brief to support implementation of the WHO Framework on integrated people-centred health services [Internet]. 2018 [cité 20 avr 2022]. Disponible sur: https://apps.who.int/iris/handle/10665/274628
4. Peterson K, Anderson J, Bourne D, Charns MP, Gorin, Hynes DM, et al. Health Care Coordination Theoretical Frameworks: a Systematic Scoping Review to Increase Their Understanding and Use in Practice. Journal of general internal medicine. mai 2019;34(1):90-8.
5. Schultz EM, McDonald KM. What is care coordination?: International Journal of Care Coordination [Internet]. 27 août 2014 [cité 20 avr 2022]; Disponible sur: http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053435414540615
6. Fouquet A, TREGOAT JJ, SITRUK P. L'impact des modes d'organisations sur la prise en charge du grand âge. IGAS; 2011.
7. Gramain A, Wittwer J. Prise en charge pour nos personnes âgées dépendantes : quels enjeux économiques ? 2012;46-60.
8. Roussel V, Vollet D, Hadjab F. Les coordinations gérontologiques dans les espaces ruraux : quelle efficacité ? Gérontologie et société. avr 2010;33(135):259-83.
9. ANAP. Les coopérations dans le secteur médico-social - Guide méthodologique. 2012.
10. McDonald KM, Sundaram V, Bravata DM, Lewis R, Lin N, Kraft SA, et al. Definitions of Care Coordination and Related Terms [Internet]. Closing the Quality Gap: A Critical Analysis of Quality Improvement Strategies (Vol. 7: Care Coordination). Agency for Healthcare Research and Quality (US); 2007 [cité 12 avr 2022]. Disponible sur: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK44012/
11. Jean C, Jankovic M, Cardinal JSL, Bocquet JC. Predictive modelling of telehealth system deployment. Journal of Simulation. 2014;9:1-13.
12. Jean C, Duong TA, Cardinal JSL, Jankovic M, Bocquet JC, Espinoza P. Le partage de la valeur économique entre les acteurs d'un projet de télémédecine : enjeux méthodologiques ? European Research in Telemedicine. 1 juin 2016;5(2):37-44.

13. Castel-Tallet M, Aquino J. Enquête auprès des gestionnaires de cas. Lettre de l'observatoire de la Fondation Médéric Alzheimer. 2016 [cité 20 avr 2022]; Disponible sur: https://www.cnsa.fr/enquete-aupres-des-gestionnaires-de-cas
14. CTA. Extrait bilan d'activité. 2017.
15. Département des L. Extrait du rapport d'activité. 2016.
16. DGFiP. Comptes des établissements publics locaux 2000-2010. 2011.
17. EPA. Extrait bilan d'activité. 2016.
18. MAIA. Extrait rapport d'activité. 2016.

BONNE PRATIQUE POUR CONCEVOIR UNE COQUE D'UN DRONE AQUATIQUE DE SURFACE (USV)

LA ROZE Dylan1, MEYRUEIS Vincent[1], AOUSSAT Améziane[1]
[1] Laboratoire « Conception Produit et Innovation » (LCPI), École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 151, boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

Résumé : Dans le cadre d'un projet confidentiel, le projet est de concevoir un drone aquatique de surface avec le logiciel CAO CATIA V5. Ainsi, dans cet article scientifique, nous allons voir une procédure pour identifier et comprendre les points caractéristiques d'un drone tel que la ligne de flottaison, le tirant d'eau, le métacentre et autres, puis comment les prendre en compte dans la conception. Il y aura également une présentation d'une veille sur quelques les outils numériques qui peuvent accompagner la conception du drone. Une démarche d'ingénierie concourante et la prise en compte de jumeau numérique dans la conception qui sont nécessaires pour la phase d'utilisation avec un pilotage à distance par un utilisateur.

Mots clés (5 maxi) : Drone aquatique, USV, Jumeau numérique, Conception et Stabilité

1 CONTEXTE ET ENJEU

Le terme drone désigne un véhicule ou un robot autonome ou avec un pilotage à distance doté d'une autonomie et d'équipements pour sa mission. Les drones sont classés en 4 catégories [1]:

- Drones aériens : UAV/UAS (Unmanned Air Vehicle / Unmanned Aircraft System)
- Drones marins de surface : USV/USS (Unmanned Surface Vehicle)
- Drones sous-marins : UUV/UUS (Unmanned Underwater Vehicle)
- Drones terrestres : UGV/UGS (Unmanned Ground Vehicle)

Le marché des drones dans le monde, le civil et militaire, connaît une croissance exponentielle avec une entrée de 200 millions d'euros en 2017 pour les constructeurs et exploitants français, soit une croissance de 900% entre 2012 et 2017. On estime en 2013 que seulement 10% des drones commercialisés sont destinés pour les civils et le reste étant à usage militaire. En 2021, les recettes des drones grand public atteindra 5 milliards de dollars [2]. Les utilisations de drone sont soumises à des réglementations suivant chaque territoire. Dans ce domaine, la France a été le précurseur de la réglementation sur l'utilisation de drone civil dans un espace aérien.

L'étude porte sur l'optimisation de la conception d'un drone aquatique de surface (USV (Unmanned Surface Vehicule)) innovant afin d'améliorer un drone existant. La conception entière du USV est réalisée avec le logiciel de CAO Catia V5. En partant du besoin auquel doit répondre le drone, il n'est pas évident d'établir la forme du drone, la répartition des masses, préparer un jumeau numérique pour son pilotage à distance, sa propulsion et autres, c'est tout l'enjeu de ce projet. En d'autres termes, la méthode de conception d'un drone est assez différente de celui d'un bateau. Voici quelques différences entre un bateau et un drone USV :

- L'échelle
- Vitesse d'évolution
- Résistance aux chocs
- Mise à l'eau

- Manœuvrabilité
- Transportabilité
- Robustesse au chavirement
- Jumeau numérique
- Centre de gravité des équipements et du drone

L'enjeu est alors de savoir définir les paramètres caractérisant le drone durant sa phase de conception afin qu'elle puisse être exploitable dans les meilleures conditions. Ces derniers sont : la ligne de flottaison, moment de redressement, les aspects hydrostatiques et hydrodynamiques, la **manœuvrabilité**, ses équipements et la propulsion. Sa conception est réalisée avec la méthode de l'ingénierie concourante qui permet de l'adapter aux changements lors de la conception et lors de son utilisation. De plus, le prise en compte d'un jumeau numérique est un point caractéristique du projet qui permet d'assurer le pilotage du drone par un utilisateur à distance dans sa phase d'utilisation.

Durant cette étude, on s'intéressera à l'identification de la ligne de flottaison permettra de définir la flottabilité ainsi que la stabilité.

2 ETAT DE L'ART

2.1. Eléments caractéristiques de la conception d'une coque de bateau

Il existe plusieurs points caractéristiques qui définissent un bateau (***Figure 1***) et parmi cela, il y en a certain qui sont important pour la conception mais également pour réaliser des simulations. Les voici :

- *La ligne de flottaison :* Niveau représentant la séparation entre l'eau et l'air.
- *Plan de flottaison :* Le plan formé au niveau de la ligne de flottaison.
- *Le tirant d'eau :* La hauteur de la partie immergée. Elle varie en fonction de la charge, du mouvement de l'eau et du drone.
- *La carène :* La partie immergée du flotteur.
- *Centre de carène :* Centre de gravité du volume de carène (volume immergé).
- *Le métacentre :* Point formé à l'intersection de l'axe longitudinal d'un navire et de la verticale passant par le centre de carène, lorsque le navire est incliné. Ce point est important pour vérifier l'équilibre des bateaux.

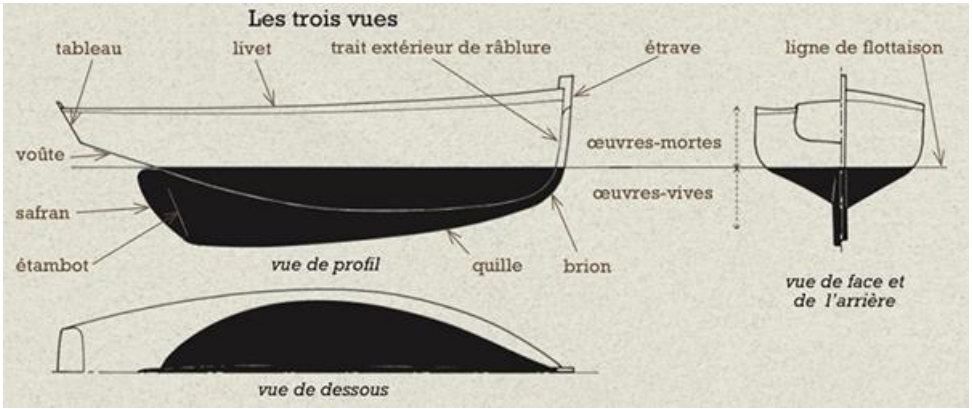


Figure 1 : Différents appellation des parties de bateau [3]

2.2. Etude de la stabilité d'une coque de bateau

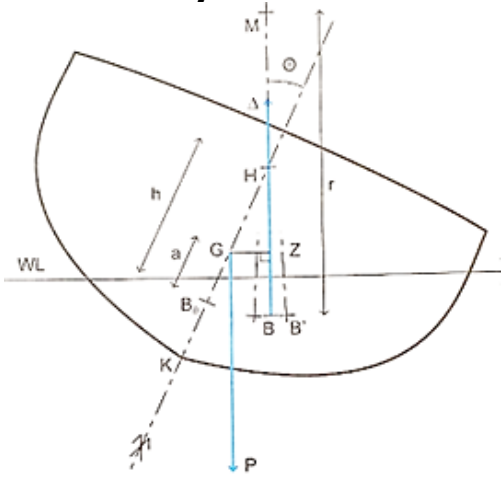


Figure 2 : Schéma des forces hydrostatiques

La notion d'équilibre et de stabilité sont définies par la poussée d'Archimède et le métacentre de carène noté M [4]. Au repos, le bateau flotte si la poussée d'Archimède est supérieure au poids du drone. En mouvement, le volume immergé va se déplacer et de même pour le centre de la carène. On le note souvent, C pour le centre de carène ou B pour Buoyancy (
Figure 2). Ce déplacement va générer un bras de levier noté GZ entre la force du poids du bateau et la poussée d'Archimède et créer un moment appelé moment de redressement tendant à redresser le bateau. Ce moment appelé module de stabilité initial transversal est définie comme :

$$\boldsymbol{M = P * (r - a) * \sin(\theta)}$$

Avec *r* le rayon métacentrique (formule de Bouguer) et *a* la distance initiale entre le centre de carène et le centre de gravité. Le rayon métacentrique r se calcule avec la formule de Bouguer uniquement dans le domaine de stabilité à de petites inclinaisons :

$$\boldsymbol{r = \frac{I_\Delta}{V}}$$

Avec I_Δ le moment quadratique de la surface de flottaison par rapport à son axe d'inclinaison exprimé en m^4 et V le volume de carène exprimé en m^3. Sur Catia, pour obtenir le rayon métacentrique, on peut créer un paramètre qui prend le rayon métacentrique avec les mesures du moment quadratique de surface de flottaison et avec le volume de carène et nous le générer avec la formule de Bouguer.

On peut décomposer le module de stabilité en deux parties [5] :

- $+P * r * \sin(\theta)$ appelé « Couple de stabilité de forme »
- $-P * a * \sin(\theta)$ appelé « Couple de stabilité de poids »

Ainsi pour garantir la stabilité, on peut faire varier la forme, le plus large, et la répartition du poids du drone, les plus lords au plus bas. De plus, il faut que le centre de gravité soit au-dessous du métacentre sinon le moment généré contribuera avec l'inclinaison au retournement du bateau.

Finalement, la stabilité est assurée si :

- La poussée d'Archimède est supérieure au poids du drone,
- Le centre de gravité se situe au-dessous du métacentre de carène.

2.3. Veille des drones USV et la forme de la coque

Une veille des drones sur le marché permet de voir la diversité des formes de la coque et les différents moyens de propulsion (aquatique ou aérien) (Figure 3).

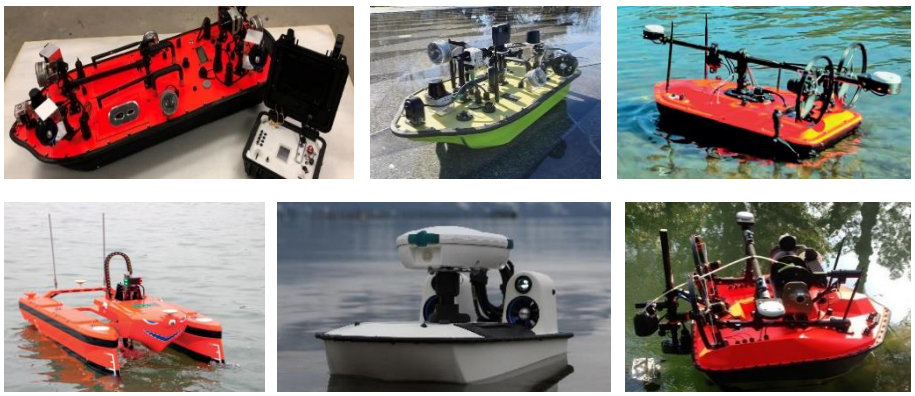


Figure 3 : Drone USV sur le marché [7][6] [8] [9] [10] [11]

Le choix de la forme de la coque est réalisé en fonction de son milieu d'exploitation ainsi que des caractéristiques voulu (stabilité, rapidité, dimension, etc.). Il en existe 5 formes récurrentes : à fond plat, à fond rond, à fond en V, en triple V et en multicoques (Figure 4).

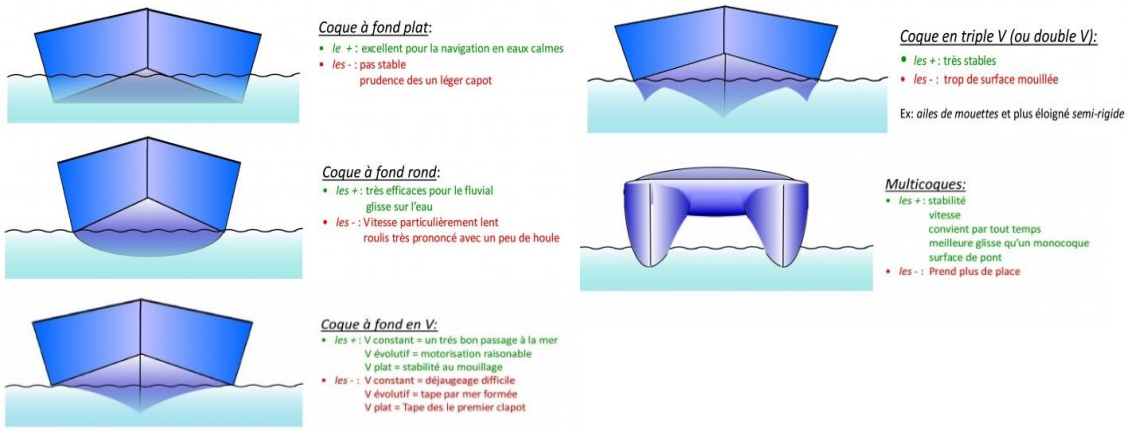


Figure 4 : Forme de la coque d'un bateau avec leurs avantages et inconvénients [12]

2.4. Outil numérique pour la conception d'une coque de bateau

Les outils numériques dans le domaine naval ne sont pas évidents à trouver et proposent des fonctionnalités différentes entre elles. Voici quelques logiciels ainsi que leurs caractéristiques obtenues grâce à une veille :

- *Locopias* : Permet de réaliser des simulations uniquement pour les cargos et les grands navires. Ne permet pas d'importer des fichiers à partir d'une CAO. [6]

- *Freeship* : Permet de construire avec des nuages de points la coque et de l'extraire en format : BMP, DXF ou IGES. [7]

- MAAT Hydro : MAAT Hydro est un solveur hydrostatique solide. Il permet de générer une coque rapidement avec des données sur les dimensions sur le bateau (longueur, largeur et hauteur) ainsi que son centre de gravité. Néanmoins, la forme générée n'est pas modifiable, elle est automatique. De plus, le logiciel permet de voir en temps réel une simulation d'angle de rotation (roulis, tangage et lacet) ainsi que le moment de redressement associé. Ne permet pas d'importer des fichiers à partir d'une CAO. [8]
- *Numeca* : C'est un logiciel diversifié qui propose dans les domaines de l'automobile, aérospatiale, naval et de l'énergie. Dans la catégorie navale, on est assisté sur la résistance, la propulsion, le maintien en mer et de la manœuvrabilité. Il y a différents types de bateau à disposition : pétroliers, conteneurs, embarcations à grande vitesse, voiliers ou yachts de luxe, même les hydroptères et les hélices en eau libre. [9]
- Orca3D : C'est un module qui s'installe sur Rhinoceros. Elle permet d'assister lors de la construction de la coque ainsi que d'extraire des informations sur la coque comme le métacentre, la ligne de flottaison, l'angle maximum avant le chavirage, etc. [10]

Pour mon projet, j'ai choisi le logiciel Rhinoceros 3D avec le module Orca3D. En important ma CAO (Catia) vers Rhinoceros 3D, en format Step puis obtenir les mêmes informations que ceux obtenue sur Catia pour vérifier si les résultats sont similaires.

2.5. Constat après l'état de l'art

Cet état de l'art nous permet de voir certains éléments à identifier est à prendre en compte durant la phase de conception. De plus, on a identifié un logiciel qui permettra d'extraire ces informations afin de les comparer à chaque modification.

La limite est l'utilisation de différentes plateformes, CATIA et Rhinoceros. L'objectif est de pouvoir avoir toutes ses informations (centre de gravité, métacentre, ligne de flottaison, etc.) avec Catia. Pour compléter, une vérification par une simulation est fortement recommandée.

Comme indiqué dans la partie contexte, il est important de noter que le cahier des charges ainsi que le comportement entre un bateau et un drone ne sont pas similaires au vu de leur taille. On ne peut pas affirmer que la conception d'un bateau est applicable pour un drone du type USV.

3 PROBLÉMATIQUE

Suite à l'état de l'art se dégage la problématique suivante : Comment concevoir un drone de type USV en vue de sa réalisation et de sa simulation pour le pilotage et la formation ?

Pour répondre à la problématique, on pose comme hypothèse :

- Extraire des paramètres propres à la stabilité de la coque du bateau
- Extraire des paramètres propres au système de propulsion à air du drone
- Pouvoir caractériser la manœuvrabilité du drone par expérimentation réelle et virtuelle

Dans la suite nous avons élaborer une démarche pour répondre à la problématique et évaluer les hypothèses.

4 DÉMARCHE DE CONCEPTION

La démarche que je vous propose se décompose en 4 phases qui sont : Traduction du besoin, Interprétation du besoin, Définition du besoin et Validation du besoin [Figure 5].

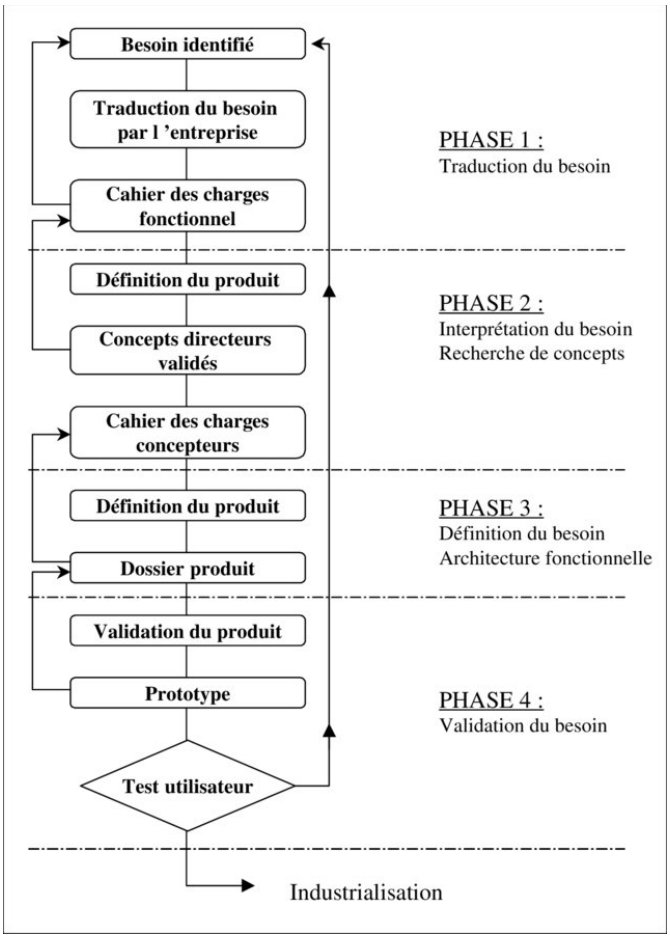


Figure 5 : Modélisation de la démarche de conception de produits nouveaux [AOUSSAT 96]

- Phase 1 : Traduction du besoin : La première phase permet d'identifier le besoin, la comprendre et émettre un cahier des charges fonctionnel. Dans le cas d'un drone de bateau, une fois avoir analysé le milieu de fonctionnement, les fonctions auxquelles doit répondre le drone seront émis pour constituer un Cahier des Charges fonctionnel.

- Phase 2 : Interprétation du besoin : La deuxième phase va avoir lieu la recherche de veille, réfléchir au concept d'usage et technologique et des créativités commerciales et financières, qui permettrons de faire des choix et de choisir une orientation. Ensuite, une validation des concepts permettra d'aboutir au cahier des charges Concepteur. C'est une phase où on choisit la forme adaptée vis-à-vis du cahier des charges fonctionnel, on se ressource d'information et on génère des concepts du drone.

- Phase 3 : Dans cette phase, on va définir le produit. L'utilisation des méthodes émit dans cet article vont être pris en compte pour concevoir le drone (ligne de flottaison, métacentre, etc.).

- Phase 4 : Cette phase correspond à la phase de prototypage et de test pour valider le produit.

5 EXPERIMENTATION DE LA DEMARCHE

5.1. Ligne de flottaison

Afin validé la méthode pour déterminer la ligne de flottaison mise en place sur Catia, on réalise une expérience réelle avec un protocole d'expérimental ainsi qu'avec des calculs de théorique.

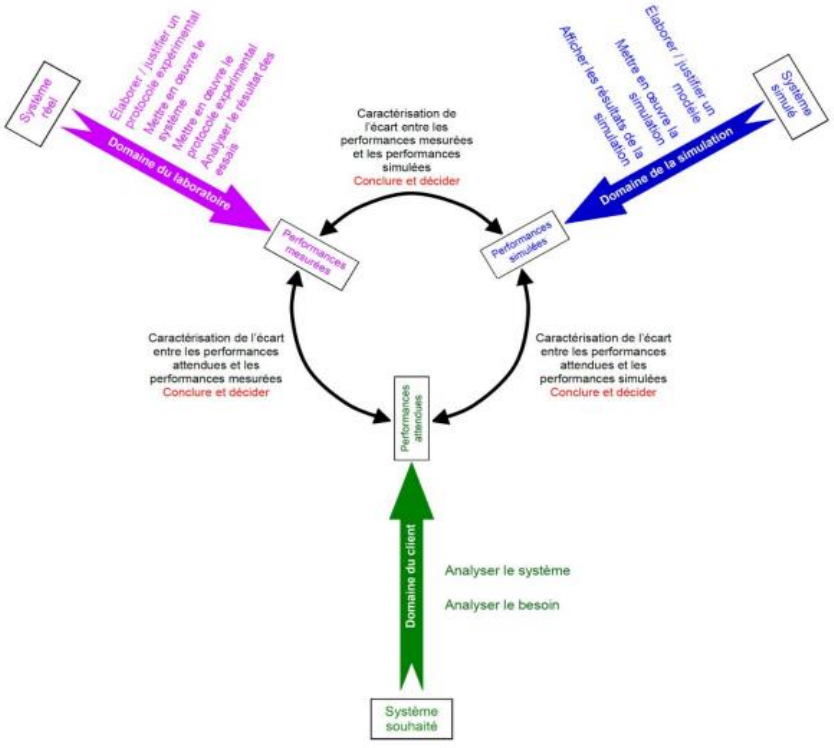


Figure 6 : Démarche pour caractériser les écarts entre la théorie, l'expérimental et la simulation

5.1.1. Protocole expérimental sur l'évaluation de la ligne de flottaison

Voici le protocole expérimental :

- Prendre un solide simple à modéliser en CAO ou dont on dispose de la CAO. Le solide doit pouvoir flotter dans un fluide dont on connaît la masse volumique.
- Disposer d'un outil de mesure afin de mesurer la ligne de flottaison à l'équilibre une fois déposé dans le fluide.

Dans mon cas, j'ai utilisé un bloc en mousse de dimension 300x199x152 mm^3 de poids de 993g avec comme fluide de l'eau. Pour lire la ligne de flottaison, j'ai attaché un réglet avec des élastiques autour du bloc en mousse (***Figure 7***). Le protocole expérimental est de déposer le bloc dans le fluide, attendre l'équilibre de l'eau puis de mesurer la ligne de flottaison. L'expérience est réalisée dans un premier temps avec le bloc en mousse puis avec une masse ajoutée.

Figure 7 : Bloc de mousse avec et sans masse pour l'expérience réelle

5.1.2. Calcul théorique :

Selon la théorie, si l'objet flotte alors il y a une égalité entre la poussée d'Archimède et le poids du solide. Autrement dit, il y a une égalité entre la masse du solide et la masse d'eau déplacée. Sous forme mathématique, on a :

$$\vec{\Pi} = \vec{P}$$

$$\rho_{fluide} * L * l * h = m_{solide}$$

$$\boldsymbol{h = \frac{m_{solide}}{\rho_{fluide} * L * l}}$$

Avec Π la poussée d'Archimède en N, P le Poids du solide en N, ρ_{fluide} la masse volumique en $kg.m^{-3}$, L la longueur en m, l la largeur en m et h le tirant d'eau en m.

5.1.3. Simulation sur CATIA:

Déterminer la ligne de flottaison est essentiel en CAO car c'est elle qui définit l'enfoncement du drone dans le fluide. Dans la théorie, le niveau d'eau est obtenu avec la relation de la poussée d'Archimède :

$$\vec{\Pi} = -V_{immergé} * \rho_{fluide} * \vec{g}$$

Avec V pour volume en m^3 et ρ la masse volumique en $kg.m^{-3}$.

Jouer sur le volume pour augmenter la poussée d'Archimède, mais également le poids du drone. Il faut alors trouver un compromis toute en gardant en tête les contraintes dimensionnelles.

Une méthode pour identifier la ligne de flottaison, avec une coque CAO Catia est de créer la carène (partie immergée de la coque) avec un collage spécial du corps principal en tant que résultat avec lien (« Édition » puis « collage spécial » puis « En tant que résultat avec lien »). Puis on applique un matériau dans lequel il sera exploité (Exemple : eau de mer). Ensuite, pour reproduire le niveau d'eau, il faut créer un plan décalé à partir d'un plan indépendant à la coque afin de l'utiliser comme paramètre variable dans la fonction Optimisation (« Démarrer » puis « Gestion des connaissances » puis « Product Engineering Optimizer » et on trouvera la fonction dans les fonctions associées). Dans la fonction, le critère de vérification sera d'après Archimède, l'égalité de la masse de la coque et de la masse de la carène qui sont deux paramètres à créer précédemment.

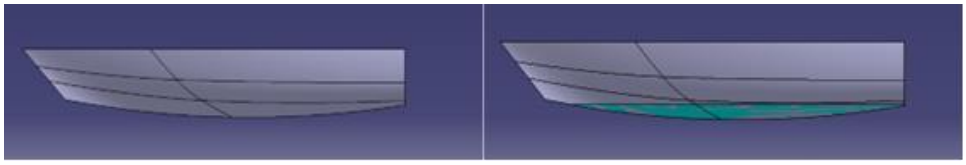


Figure 8 : CAO sur CATIA avec une coque de bateau et sa carène

En suivant cette méthode on obtient la ligne de flottaison suivante pour le bloc sans masse ajoutée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et avec la masse ajoutée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

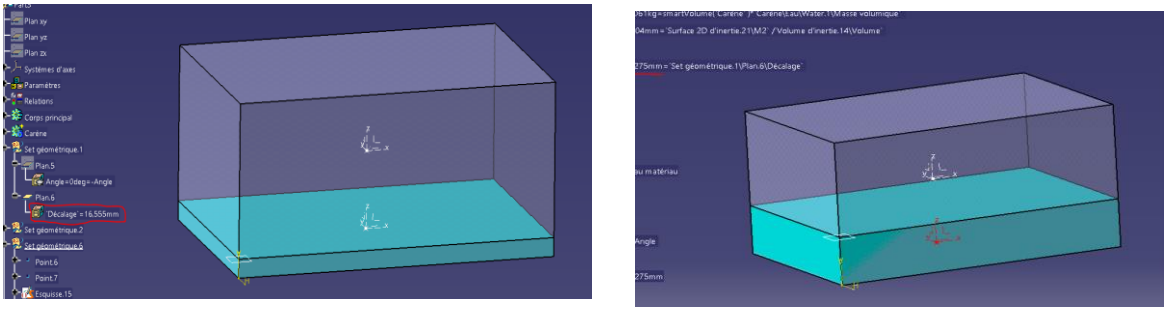


Figure 9 : Ligne de flottaison d'un bloc de mousse avec et sans masse ajoutée sous Catia

5.1.4. Analyse des résultats :

Voici un tableau récapitulatif des lignes de flottaison trouver avec le bloc en mousse sans masse :

	LIGNE DE FLOTTAISON (MM)
RESULTAT THEORIQUE	17.5
RESULTAT REEL	17
RESULTAT SOUS CATIA	16.5

Tableau 1 : Résultat de la ligne de flottaison théorique, réelle et simulé

Voici un tableau récapitulatif des lignes de flottaison trouver avec le bloc en mousse avec une masse de 2kg :

	LIGNE DE FLOTTAISON (MM)
RESULTAT THEORIQUE	53.9
RESULTAT REEL	54.6
RESULTAT SOUS CATIA	51.3

Tableau 2: Résultat de la ligne de flottaison théorique, réelle et simulé avec une masse

Les écarts peuvent être justifiés par la mousse qui absorbe de l'eau ainsi que la masse volumique de l'eau utiliser dans l'expérience aie une masse volumique légèrement différente à celle sur Catia. Néanmoins, on observe des résultats suffisamment proches pour considérer que la méthode employée dans la partie 2.2. sous Catia soit validé.

De plus, on obtient les mêmes résultats sous Rhinoceros avec le module Orca3D sur une coque de drone :

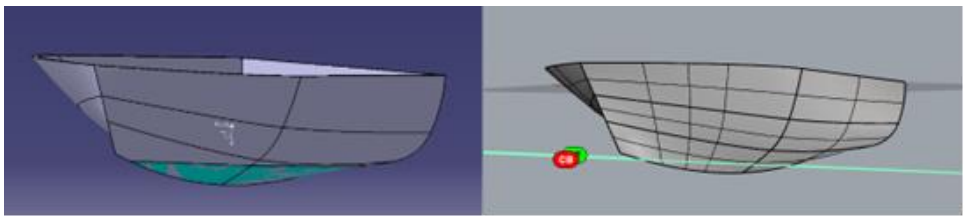


Figure 10 : Comparaison des résultats entre Catia (à gauche) et Rhinoceros avec Orca 3D (à droite)

De même, on peut ajouter à la procédure sur Catia une coupe avec un plan incliné représentant une gîte. Les résultats obtenus sur Catia et Rhinoceros sont similaire :

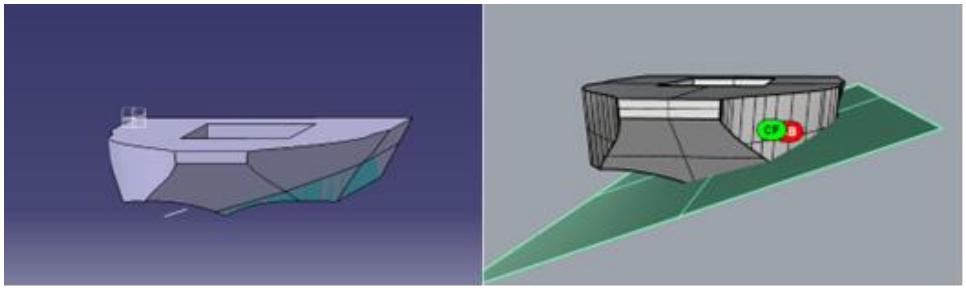


Figure 11: Comparaison du plan de flottaison avec une gîte entre Catia (à gauche) et Rhinoceros avec Orca3D (à droite)

De cette façon, j’ai pu valider la procédure d’identification de la ligne de flottaison mise en place précédemment ainsi que le calcul du métacentre en trouvant des résultats similaires. Ce qui me permettra par la suite de travailler uniquement sur Catia.

REFERENCES

[1] Note de veille : Les drones pour la surveillance environnementale, Sept 2013.

[2] Revenus des drones grand public dans le monde 2015-2021, Statista Research Departement , Juin 2016.

[3] B. F. e. H. Roche, Nommer les formes, https://www.chasse-maree.com/toutsavoir/nommer-les-formes/.

[4] D. P. e. al., Architecture naval - Connaissance et pratique, Dunod, 2018.

[5] D. LAVOILLE, Étude sur la flottabilité et la stabilité.

[6] LOCOPIAS - SARC, https://www.sarc.nl/locopias/.

[7] [Navimodélisme RC - Logiciels - Freeship], https://navi.modelisme.com/article366.html.

[8] Sistre shipdesign software, https://www.sistre-shipdesign-software.com/.

[9] NUMECA | Computational Fluid Dynamics Software & Solutions | NUMECA International, https://www.numeca.com/home.

[10] Orca3D Marine CFD, https://orca3d.com/pages/orca-marine-cfd.

[11] Inpectbydrone, https://www.inspectbydrone.fr/inspection-drone/drone-flottant/.

[12] Drone aquatique CT2MC, https://ct2mc.com/wp-content/uploads/scan.pdf .

[13] Spyboat goose CT2MC, https://ct2mc.com/la-gamme-spyboat-inspections-eaux-de-surface/.

[14] WiBoat C4 ADCPro, https://www.adcpro.fr/drone-marin-catamaran-auto-pilote-wiboat_c4.

[15] Duck Spyboat, SPYBOAT_DUCK_Fiche_technique.pdf (spyboat-technologies.com).

[16] Spyboat Swan CT2MC, https://ct2mc.com/la-gamme-spyboat-inspections-eaux-de-surface/.

[17] Les différents types de carène ~ Conseils bateau Hyères, https://www.yachting-conseil.com/fr/services/conseils/les-differents-types-de-carene.

Contact principal : LA ROZE Dylan – dylan.la_roze@ensam.eu

Coordonnées : Laboratoire « Conception Produit et Innovation » École Nationale Supérieure

d'Arts et Métiers, 151, boulevard de l'Hôpital - 75013 Paris, France

DIGITALISATION FOR A TERRITORIAL CIRCULAR ECONOMY: TOWARDS AN INTEGRATED PLATFORM

José LAMEH[1], Ghada BOUILLASS[2], Michael SAIDANI[3,4], Bernard YANNOU[5]

[1] Université Paris Saclay CentraleSupélec, Laboratoire Genie Industriel, Gif-sur-Yvette, France
https://orcid.org/0000-0001-9762-663X
[2] Université Paris Saclay CentraleSupélec, Laboratoire Genie Industriel, Gif-sur-Yvette, France
https://orcid.org/0000-0003-4931-2665
[3] Department of Industrial and Enterprise Systems Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL, USA
[4] Université Paris Saclay CentraleSupélec, Laboratoire Genie Industriel, Gif-sur-Yvette, France
https://orcid.org/0000-0002-8269-4477
[5] Université Paris Saclay CentraleSupélec, Laboratoire Genie Industriel, Gif-sur-Yvette, France
https://orcid.org/0000-0003-4511-4450

Abstract: The digital transition and the ecological transition are happening simultaneously and transforming businesses and policies around the world. The exponential development of digital technologies generates unprecedented quantities of data and changes the way all societies function. Hence, significant opportunities are created for sustainability and circular economy strategies to be implemented. The concept of smart territories is emerging as one of the new paradigms for territorial management coupling the digital tools to sustainability and circular economy models. This new concept has not been fully exploited yet and many challenges on how to achieve smart territories are still to be identified and tackled. The present work explores the main building blocks of smart territories, data exploitation, digital technologies and digital twins and their synergies with the implementation of circular economy strategies. A systematic literature review is performed to analyse the precedent works and complemented by MERISE methodology to sketch the mock-up of a digital territorial platform. Through this work, potential contributions of digital tools to promote and accelerate the circular economy on a territorial level are shown. The findings are discussed and analysed, and then positioned and applied for the Paris-Saclay territory. After the current field is analysed, a mock-up of a platform is proposed through the MERISE methodology. There, simulations could be done by public authorities and the main actors to compare, test, and evaluate different scenarios.

Keywords: Territorial circularity, digital tools, decision-making support, data economy, Geographic Information System

1 INTRODUCTION

The continuing trends in population, policy, industry, economy, technology and human behaviour, known as the "business-as-usual" scenario is heading our world towards a climate catastrophe. The sixth assessment report (AR6) [1] of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), highlights threatening increase in carbon dioxide emissions attributed to human and industrial activities. The IPCC finds that climate change is a threat to the well-being of humanity and the health of the planet. However, it is possible to decrease the effects of climate change by acting now, to preserve our future. In an effort to bring effective solutions to this problem, the COP26 agreement required countries and governments to reinforce those goals by the end of next year instead of the five-year period previously stipulated during the 2015 Paris Agreement [2], [3]. In this context, the European sustainable development report, 2021[4], enshrines the principle of the six SDG transformations for a clean Europe. The report also includes the SDG index for the European Union, its member states, and partner countries

targets to transform the European Union to achieve the Sustainable Development Goals (SDG). These principles include, but are not limited to, innovation, sustainable communities, circular economy (CE), zero pollution, and digital transformation [4]. As a matter of fact, doubling the circularity of the global economy could reduce by 39% the emissions of greenhouse gases, according to the circularity gap report (2021) [5]. The shift from a linear to a CE offers great potential for long-term sustainable development. Not only it reduces the waste of materials, goods and energy, but also it maximizes the utilization of all raw materials, minerals, energy and resources in its various forms. It also contributes to creating better economic and investment opportunities for companies and institutions, as well as environmental and social benefits for the different stakeholders [5].

The growth of digital technologies has impacted businesses and cultures around the world, creating more opportunities for circular economy strategies to be implemented [6]. The new digital technologies are expected to drive the CE and increase the efficiency of the actions and strategies that are implemented by both industrial firms and public authorities. Today, the world stands on the cusp of a new revolution, the "Fourth Industrial Revolution". It is the application and the fusion of Artificial Intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), robotics, biotechnology and 3D printing, and the revolution in the field of social networking sites and the digital world, quantum computing, and other technologies [7]. The breadth and depth of these changes herald a transformation of all production, management, and governance systems. The possibilities are endless for the billions of people communicating, and will be multiplied by new technological inventions in different areas [8]. Today, artificial intelligence is being increasingly adopted to support the decision-making process thanks to an impressive progress in computing power systems and the availability of vast amounts of data. The application of the artificial intelligence can today be achieved in various fields from software used to discover new drugs to algorithms used to predict long-term sustainable energy pathways at the level of the globe. Meanwhile, technology is constantly interacting with our real world. Engineers, designers, and architects combine computational design, 3D visualisation, artificial intelligence to make decisions concerning territorial planification and support effective actions and policies.

If at the heart of its agenda, the European Commission placed the ecological and digital transitions as the greatest challenge of our generation, a gap remains existing on the practical implementation of these strategies at many territories. There is, in fact, a lack of a consistent framework and supporting tools and methods that can guide the local authorities within the ecological and digital transitions, while meeting the needs of the involved and affected stakeholders. Hence, a territorial digital service platform is needed to centralize data and the computing process required to provide reliable information for public authorities. For instance, the "Communauté d'agglomération de Paris-Saclay" (CPS) is looking for deploying digitalisation in its territory to achieve circularity and to mitigate the effects of climate change by identifying the appropriate actions. The CPS is a French inter-municipal structure created in 2016, located in the Essonne department in the Île-de-France region. Alongside the Greater Paris Metropolis (at 20 km south of Paris), the territory constitutes a sector for the development of innovation on a regional and international scale. It is composed of 27 municipalities that share economic centres of influence, cluster of innovation, research and technological excellence. Those interact at the middle of an operation of national interest, lands and protected natural spaces. It is hence a territory of exception, being a centre of economic development and a world-class scientific area. Moreover, CPS hosts on its territory many higher education and research establishments making important companies to settle in the territory so they can carry out their research and development activities.

In these circumstances, the CPS aims for circularity on its territory. In concordance with the Territorial Climate, Air and Energy Plan (PCAET in French), CPS aims to develop a Territorial Digital Services Platform (TDSP) that enable real-time monitoring of cyclical indicators linked to the flows of household and green waste, mobility of people and flow of goods on the territory. Once these are integrated in a platform, data can be collected and centralized to enable their measurements. Subsequently, several scenarios could be studied through simulation and digital twin modelling. This will help the various stakeholders in their decision making by providing them with reliable information [9]. With this background, and in order to present a tool addressed for territorial actors, this study aims to investigate the potential contributions of digital technologies to support and accelerate the circular economy transition by answering the following research questions: What are the main digital

technologies and how do they support and accelerate the circular economy transition on a territory? On what information and data are they based? How can a territorial actor use a platform combining data and technologies – such as digital twins – in order to achieve territorial circularity?

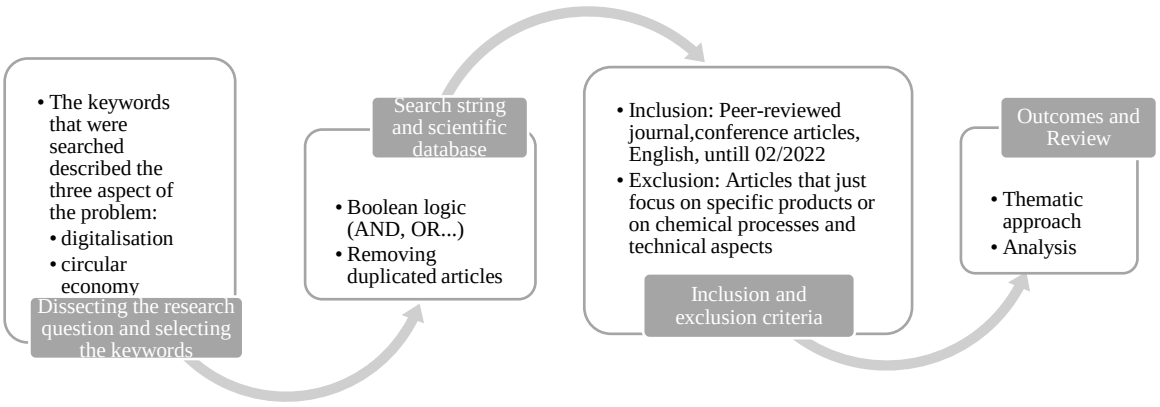
To answer the above settled research questions, a systematic literature review is carried out via Scopus and then the MERISE methodology is chosen to establish the mockup of the platform. MERISE is usually used in the field of information systems development, software engineering and project management to design and development a system. Then, the results are discussed by (i) presenting the data economy, (ii) presenting the identified digital tools, and (iii) linking the deployment of digital tools for a transition towards a circular economy of a territory by presenting the mock-up of the platform. Finally, a conclusion is made by joining perspectives and future propositions, while mentioning challenges and difficulties that should be tackled.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1. Systematic *Literature Review*

This work was based on the systematic literature review methodology (SLR) [10]. It was detailly described in a parallel work realised by Bouillass et al. [11]. This method is usually used since it is easy to be replicated by future scholars. The criteria used are summarized in this following figure. However, the full study was the pillar of another paper.

Figure 1. Systematic Literature Review steps



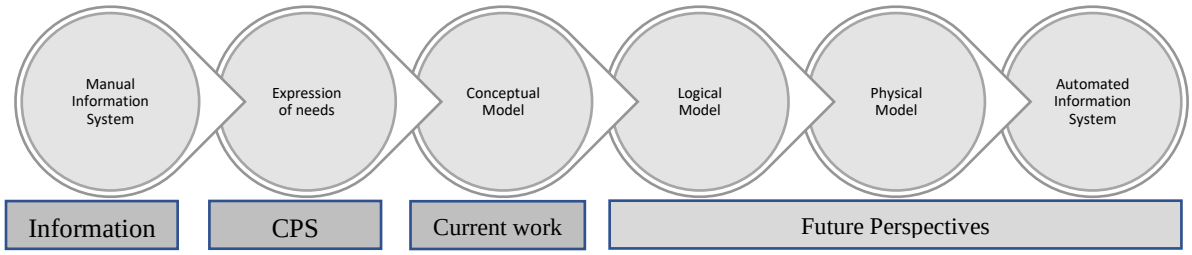
The analysis showed that digitalisation for CE is at the core of today's world business strategies [12]. In fact, in summary, the SLT showed that new technologies could assist people in decision-making relating CE [12]. However, a study determined that research tackling digitalization and sustainability is still insufficient, by linking the digital economy to the indicators of the Sustainable Development Goals (SDG) [13].

2.2. MERISE method

After showing and presenting the results of the SLR, all the concepts will be integrated into one platform. This article presents the idea and links it with other works to present the mockup for the CPS.

Information systems require methods in the design phase to be able to set a model to rely on. A virtual representation of a reality in such a way as to bring out the points of interest is called analysis [14]. There are several methods of analysis, the method most used in France being the MERISE method MERISE, which is used for IT projects and is based on the separation of the data and its processing to be carried out into several conceptual and physical parts. This ensures the longevity of the model [14]. Here, the design of the platform and the information system follows the succession of several steps represented in the following figure.

Figure 2. MERISE Methodology steps



This succession of steps is called the abstraction cycle for the design of information systems [15];

a) The steps of this method start with defining the objectives of the general system definition and a manual information system.
b) Then, a preliminary study is done via the expressions of needs. The expression of needs is a step consisting in defining what is expected of the automated information system. This requires making an inventory of necessary elements for the information system and defining the system by asking future users about their needs. It is usually followed by a detailed study leading to the conceptual data modelling.
c) Once the needs are defined, the conception model on which we will focus here will be created by taking the information flows into account.
d) The logical model represents a software choice, and the physical model reflects a material choice for the information system. Once these are settled, an automated information system will hence be finalised. This happens when the technical study, the software production and its implementation are done.

In this paper;

a) the manual information system is done through literature review and the data economy model
b) the expression of needs is done in collaboration with the CPS
c) the conceptual model is presented in the mock-up of the platform by showing the user interface and describing use cases.
d) Logical, physical and hence automated information system are out of scope and could be done at a later stage.

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Data Economy

The literature showed that data is the stimulus of societies that forms the basis for many critical decisions. However, organizations must have an extensive data quality process flow to ensure data validity, as accurate data can help deliver valuable results. Therefore, to take advantage of the explosive growth of big data, territories need to use a data quality management framework before they begin extracting actionable insights from information. The data quality management framework ensures consistency, accuracy, and validity. Data economy explains data quality management and data economy, identifies the criteria to ensure data quality, and classifies territorial data into categories. Territorial related data can help accelerate the broader transition to the CE – which is a complex and multifaceted system – by providing the financial community with the indicators on which to make investment decisions [16]. Several data scientists defined some key data quality dimensions to assess quality and value. (i) Completeness: Data collected is sufficient and there is no missing information. (ii) Consistency: Data is synchronized, unified, and standardized. (iii) Accuracy: Data is error-free and reliable. (iv) Timeliness: Data is available when expected. (v) Uniqueness: Data is not duplicated and is distinguished. (vi) Validity: Data meets the criteria or standards.

The report of IBM (2020) stated that the cost of data breach is $3.86 million [17]. If this is a considerable number, it is because data became one of the most important aspects of our societies. This is unanimously recognized. In 2014, Xiao et al. predicted that data may be one of the most important trading commodities of the future [18].

Organisations are competitively structuring data to use it in decision making. The European Circular Economy Research Alliance presented a structural view of the data economy [19]. To reach the main digital technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data, Artificial Intelligence (AI), and Distributed Ledger Technologies (DLT), it is essential to start with a data-driven culture and then move the several stages of dissecting the data by integrating, collecting, analysing and sharing it.

a) Data-Driven Culture: In the last decade almost, many of the major companies made the data a part of their culture. At a larger scale, societies are doing so. This means holistically embracing corporate data management in all its forms, basing its supply chain security on machine learning, boosting marketing through automated campaigns, offering customer support through artificial intelligence services…
b) Data capture is the collection of all types of unstructured and structured information and transforming it into data that is read by computers. When all the data that come from several various sources are merged and linked together, data integration phase is reached. This will help us analyse data to make conclusions based on the available information. Finally, when individuals and organizations make sense of the information transformed into data, sharing will help multiple applications and users improve the process and making it more accurate with getting more and more data.
   In terms of territories, a lot of information and data could be generated. Based on the literature survey, a classification of data by the main themes and categories was done (see Table 1).
c) Intelligence: After data is captured, integrated, analysed and shared, room is made for intelligence and technologies that could be used for decision making and optimising choices while simulating scenarios. The mock-up of the platform that is developed in this current work, relies on this principle.

Table 1. Territorial data classified by the main themes and categories

Energy	Environment	Transportation, flows & Mobility	Territory and demographic data
▪ Geothermal Networks ▪ Energy potential ▪ Consumption and types of energy ▪ Electric charging stations ▪ Heat loss	▪ Water ▪ Weather ▪ Carbon footprint and gas emission ▪ Chemical compounds in air (acidification…) ▪ Water or soil ▪ Pollutants	▪ Flows of human mobility: transport ▪ Bio-waste flows ▪ Mobility of goods ▪ Raw materials ▪ New facilities ▪ Raw materials ▪ Manufactured goods ▪ Food waste flow ▪ Flow of recycling and repairs ▪ Waste stream	▪ Cadastral data ▪ Municipal Division ▪ Communal division ▪ Population density ▪ Household expenditure

3.2. Digital Tools

In the recent years, digital tools have been playing a key role in terms of transforming societies and business [20]. Digitization is a logical consequence of technological evolution and more particularly of the Internet and IT. It allows processes to gain in efficiency by integrating various digital tools to tradition operations [21]. In this section, the different technologies and digital tools are presented while distinguishing between the levels of operations they can be integrated in, i.e., data collection, data analytics, data integration (digital twins, artificial intelligence, machine learning) and data sharing.

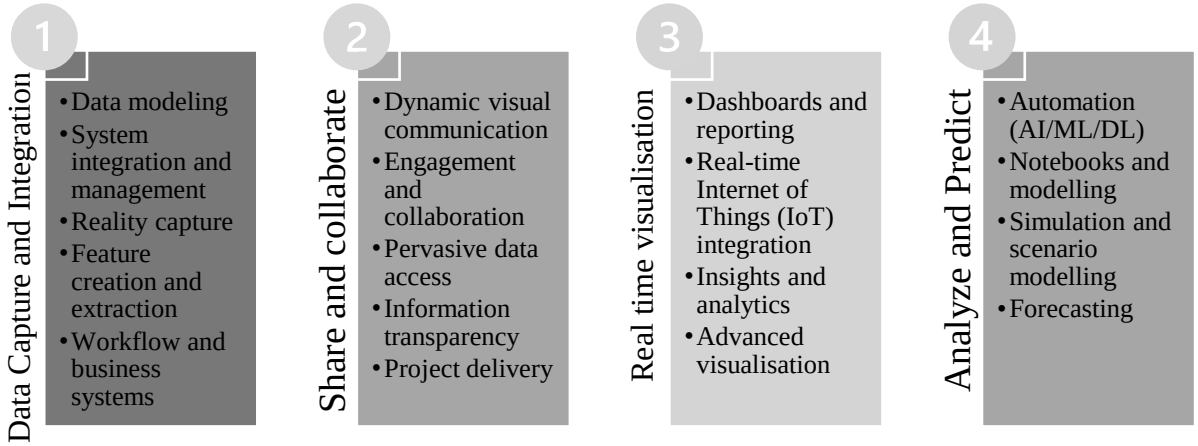
3.2.1 Data Collection: RFID, Sensors and Internet of Things

The RFID (Radio Frequency Identification) system offers the possibility of automatic management of the large amount of information to be processed. The equipment makes it possible to automatically synchronize the physical flows with the information flows. The term RFID encompasses all technologies that use radio waves to automatically identify objects or people. It is a technology that makes it possible to memorize and retrieve data remotely using a tag that emits radio waves [22]. The RFID system works as follows: The RFID tag is itself equipped with a chip connected to an antenna, the antenna allows the chip to transmit data (serial number, weight, etc.) which can be read using a transceiver reader. Once the information has been transmitted to the RFID reader - which is usually equipped with an antenna, - the radio waves are converted into data, read by RFID software [23].

RFID and sensors form an essential part in the field of Internet of Things known by IoT [22]. IoT is a computer concept that expresses the idea of various physical devices connected to the Internet and the ability of each device to identify itself to other devices. It is a virtual network that combines various things classified within electronics, software, sensors, and actuators and connects them via the Internet, which allows these things to exchange data with each other [24]. It is worth noting that the term "thing" on the Internet of Things is not limited to inanimate objects and small devices only, the "thing" may be a person carrying a heart rate monitor, for example, a child carrying a tracker, a car equipped with sensors, lighting systems in homes and shopping centres. The world of the Internet of Things is very complex and difficult to define in a specific sentence. On a technical level, it means the process of collecting huge amounts of random data from various things connected to the Internet, analysing it, and then predicting its behaviour in the future [25]. This includes many protocols (EPC C1G2) and programming languages (PHP).

3.2.2 Data integration and Digital Twins (DTs)

DTs elements are linked with data in several steps. However, since the main part is the integration of all the data in the system, DTs are presented in this section. DT is the replica of an object, a system, an implementation, or a process in digital form [26]. DTs have truly revolutionized the industrial world by changing not only the phase of product development or the use of equipment, but also large-scale project development such as territorial planification and infrastructure development. Before the emergence of the DT concept, a company physically created an object to subject it to a set of tests, make changes. With the DT, the data collected on the evolution of the object makes it possible to anticipate it and optimize its technological and sustainability performance [27]. The concept of DT was applied in several areas in order to model and simulate some problems. It was usually linked wis IoT, AI and Industry 4.0 [28], [29]. Benefits of DT are many. Not only it improves the reliability of products, but once applied, it could improve the safety level, build consumer confidence and most essentially, reduce repair costs by anticipating future failures and risks. The way how organisations capture information, visualize and analyse data, and integrate them into systems and networks was enhanced and improved with the boom of DT. The following figure helps us visualise the several elements of DTs.
Figure 3. Elements of Digital Twins



Since the study tackled the territorial aspect, in our case, the study presents a Geographic Information System (GIS) that will be the DT that will be created to integrate several models. GIS is a system designed to map, analyse, store, process, present and manage all types of geographic data that are mapped on different layers. For instance, it can display the territorial data (table 1), allowing people to see different data patterns and relationships [30]. Once these are visualized, organizations and public authorities can make better informed decisions based on analysis and predictions. This improves information sharing and collaboration across the various stakeholders [31]. For instance, agriculture, urban and town planning, oil spill, disaster management, mapping and navigation, business, marketing, and sales, are some of the several applications of the GIS.

3.2.3 Data Analytics: Big Data, AI and Machine Learning

a) Big data: The arrival of big data is sometimes presented by many articles as a new technological revolution similar to the discovery of steam (early 19th century), electricity (late 19th century) and computing (late 19th century), qualify this phenomenon as the last stage of the third industrial revolution, which is in fact that of "information". In any case, big data is considered to be a source of profound upheaval in society [32]. Big data is a set or sets of data of various classifications that have unique characteristics (such as size, speed, diversity, variance, data validity). These characteristics cannot be efficiently processed using current and traditional technology to achieve benefit from it. The technological creations that have facilitated the arrival and growth of big data can broadly be categorized into two families: on the one hand, storage technologies, particularly driven by the deployment of cloud computing. On the other hand, the arrival of adjusted processing technologies, especially the development of new databases adapted to unstructured data and the development of high-performance computing methods. The 3V model shows the features of the big data and identifies the three main characteristics, i.e., Volume, Variety, and Velocity,: [33].
b) Artificial Intelligence and Machine Learning: In order to process all the data more efficiently, an additional technological layer has been added to big data. This layer is called Artificial Intelligence (AI). To define it, we must first remember that today there are only weak AIs which are machines that reproduce human intelligence (without awareness of what they are doing) [34]. AI is hence a process of mimicking human intelligence that relies on the creation and application of algorithms executed in a dynamic computing environment. Other recent definition given for AI is the artifacts that detect situations and respond to those circumstances with actions [35]. Its purpose is to enable computers to think and act like human beings. Advances in deep learning (machine learning methods based on the learning of data models) have allowed AI to become an essential technology in data processing. AI and ML were shown to increase productivity and improve business processes at several levels [36].

3.2.4 Data Sharing: Cloud Technology, Cyber Systems and Supply Chain integration

Data sharing is the fact of making data used available to other and different users and stakeholders operating within the same perimeter, in a win-win logic. Data sharing requires rigorous supervision in order to avoid any risk of data leakage. This is where main technologies are deployed:

a) Cloud technology: In cloud computing, companies no longer use their computer servers, but access online services from an infrastructure managed by the supplier. Applications and data are no longer on the local computer, but in a cloud made up of interconnected remote servers. This makes data sharing simpler.
b) Cyber Systems: In parallel, in the same context of data sharing, a cyber-physical system is a system where computer elements collaborate for the control and command of physical entities in a high level of security.
c) Supply Chain integration: Moreover, one main application of collaboration and data sharing is the supply chain integration where businesses are linked together by sharing their data and using it. Data sharing sometimes takes the form of a partnership between two companies that offer complementary but non-competitive products or services, for example, a tour operator and a transport company.

3.3. Data and the emergence of smart sustainable territories

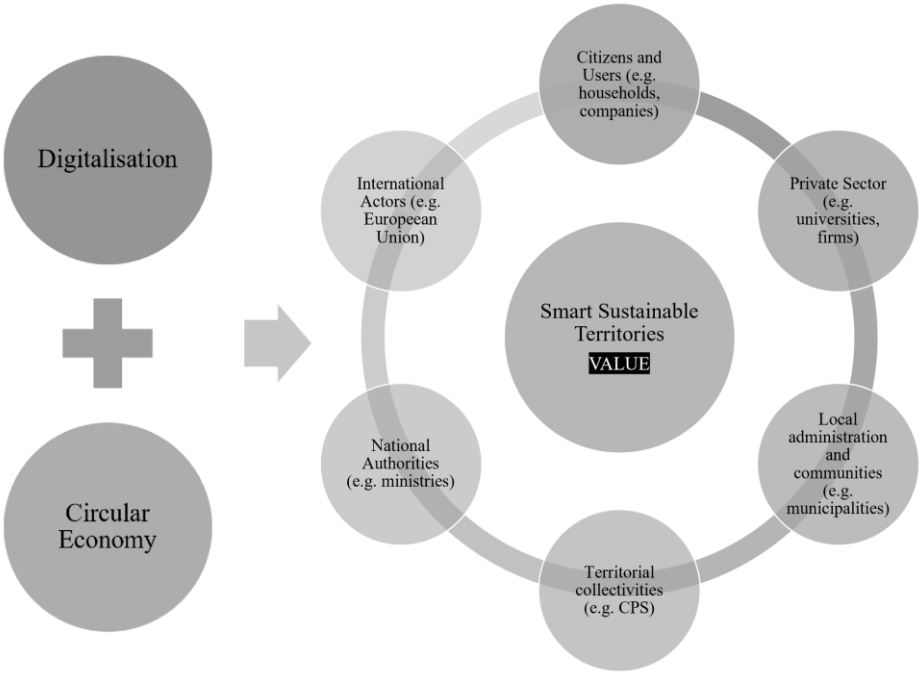
The following table illustrates the potential use and application of the main digital tools on a territory. Concrete and tangible examples for each item are listed. These digital tools are inter-connected since after data is collected, it is integrated and combined to be analysed. After these steps, sharing could happen between the several stakeholders to reach common results. To conclude, when combining these main technologies and digital tools together with the commonly used tools such as LPWAN, Wi-Fi, fibre network, and 5G. Moreover, smart circular object and supply chain integration accompanied with cyber-security strategies will play a huge impact on businesses and societies in general.

Table 2. Application of main digital tools on a territory

	Digital tools	Applications or territories
Data Collection	▪ RFID ▪ Sensors ▪ Internet of Things	▪ Track mobility and transportation of goods and people. ▪ Measure the energy consumption. ▪ Inventory management. ▪ Waste and recycling rate.
Data Integration	▪ Digital twins ▪ Data systems	▪ Visual representation of data on maps. ▪ Virtual replica of a territory. Assess renewable energy potential such as solar irradiation potential of buildings.
Data Analytics	▪ Big data ▪ Artificial Intelligence ▪ Machine learning	▪ Reuse and recycling parameters (efficiency, rate) ▪ Optimisation of circular supply chain performance ▪ Monitoring of circularity indicators ▪ Increase automation, autonomous connected vehicles, collaborative robots, ▪ Global pollution control
Data Sharing	▪ Cloud Technology ▪ Cyber-physical Systems ▪ Supply Chain integration	▪ Information transparency. ▪ Integration of capabilities. ▪ Share information and enhance collaboration. ▪ Deployment model in which the hosting and all the processing carried out on data by a cloud service are physically carried out within the limits of the territory.

Once we apply digitalisation for the territory and we reach the CE, we can talk about Smart Sustainable Territories (SST) that merge the idea of smart territories with the idea of sustainability and CE. “Coupling”, a term in computer science that describes the automatic exchange of information between software components was used to describe the interaction that could be done between LCA and GIS [37], we extend this idea and make the coupling between digitalization in general and CE. Value can be captured for SSTs by linking the several stakeholders together. Services offered through data sharing could be used by several actors at different scales as shown in the following figure.

Figure 4. Value created when digitalisation and CE are applied towards Smart Sustainable Territories



3.4. Integrating data: The platform's mockup

This research and work were done in order to be implemented for the Communauté d'Agglomération de Paris-Saclay. As developed in the previous section, data is integrated and exploited through digitalisation for a circular economy of the territory. In this section, a recap of the actual state and already existing platforms is presented. Then, the model created and developed in a group project of several master's students is briefly presented through the MERISE Methodology.

3.4.1. Actual State

In this case study of the CPS and for any other territory that wishes to develop the circular economy, it is crucial to know all these data through regional platform tools that go beyond the quantification of mass. In 2013, the Environmental Conference encouraged the Regions to develop flow knowledge platforms in order to visualize the progress gap between low and high performance in the use of resources mobilized in the territories while producing knowledge and the governance of these flows. This following table represents the main existing platforms at CPS and their characteristics.

Table 3. Recap of Existing Platforms

Platform	Created	Goal	Pros	Cons
Cartoviz	By ESRI France, in 2017	Identification and Visualization of Data	GIS, Data shown, Maps downloaded and printed	No superposition and links between Data
SIOM Direct	By SIOM, in 2019	Waste Management	Communication	No filter of information
OPALIS	By ROTOR, in 2017	Professional operators and sellers of deconstruction materials	Information of waste management	Lack of geographic information
ACTIF	By CCI Occitanie, in 2016	Identification and Matching for a recovery of waste from companies	Visualisation of companies on a map	Lack of alimentation of information
ECLIPSE	By Orée, in 2016	Evaluation of performance of ecology and territorial strategies	3 users' interface: visitor, animator and observator	Only addressed to EIT and professionals. Inscription required.
INEX Circular	By Inex Circular, in 2017	Characterization of actors and resources of a territory through AI	Complete service, cost anticipating	Paid, focuses mostly on companies
Info Chantiers	By Université Paris-Saclay, in 2017	List of worksite activities	Open source and calque system	Update of information, verification to be done
System X	By Institut de Recherche Technologique	Merging, visualising and analysing heterogeneous data, focusing on Energy	Simulating Strategies	Not exhaustive
Decarbonized City	By CosmoTech	Energy Planning	Territorial Data and Digital Twin	Covers on aspect
Cartofiches	By the French Government	Wastelands information (industrial, commercial, residential)	Official sources	Limited for data
Plateforme maMob'	By the Agglomération Paris-Saclay	Transportation and mobility	Information from the community itself	Still need more development
Data Enedis	By Enedis	Consult and compare data on the themes of Electricity Production and Consumption with the geographical mesh	Territorial aspect: municipalities, departments and regions…	Only one aspect is tackled: the electricity

As represented in the tables, the platforms are many. A single platform that joins and regroups all the information and data and helps in the decision making is not available. However, in order to reach circular economy for a territory, the several factors and data should be combined and studies together. Another issue is that the different stakeholders should interact together and be able to visualise and analyse real time data.

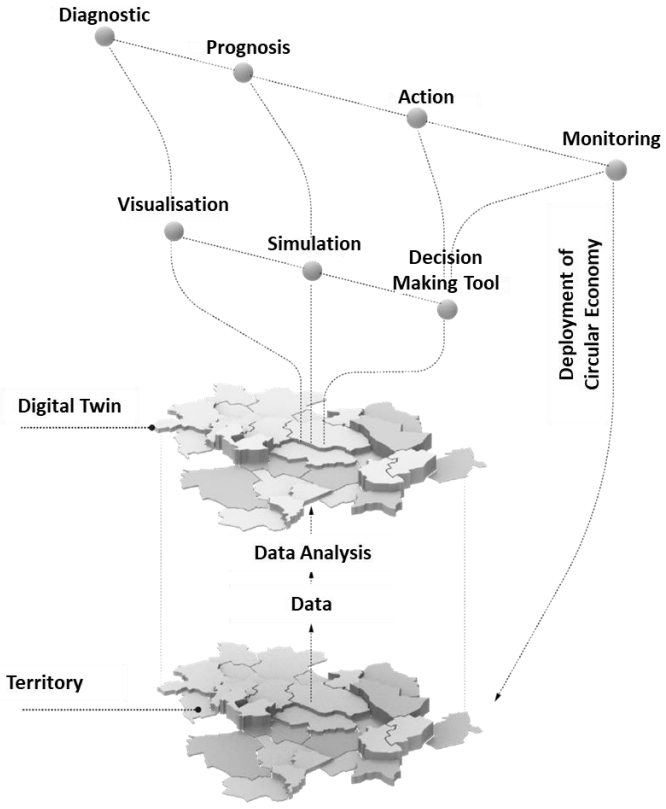
3.4.2 The Proposed Platform - Future State

Having a systemic view of data sets allows all actors and stakeholders to have an alignment on the current state of organizational systems and makes room for improvement. Therefore, a complete, clear and centralized visualization would allow all stakeholders to align themselves on a common language. The challenge of this data centralization tool is to make complexity intelligible.

It merges flows, information and data into a digital twin and a GIS where several technologies were deployed in the model. The goal is to create a tool for simulating decision-making scenarios. It focuses on the principle of interoperability. This is illustrated in figure 5.

The mock-up of the platform is developed by highlighting the main ideas behind its design, showing its main representation, and presenting its functional diagram, and architecture. This would be a tool offered for the CPS as a solution for their needs. Future work could consist of developing the whole platform by following the requirements needed.

Figure 5. The platform: A digital twin for the territory.



The mock-up platform is created following the MERISE methodology.

a) The manual information system is the fact of collecting all the data and information available on the territory (through RFID and technologies mentioned), as well as the various available flows.

b) The expression of needs was done by CPS. Creating a circular economy development tool that would include the flows of the territory and develop a decision support tool to reduce the impact of activities on CPS. This platform could: (i) Collect data. (ii) Measure/visualize (raw data). (iii) Build and understand (indicators). (iv) Compare and interpret. (v) Track and predict. (vi) Analyse the causes. (vii) Set targets. (viii) Define actions. (viv) Propose action plans. (x) Simulate action plans. (xi) Decide on, recommend/optimize action plans. (xii) Follow action plans. (xiii) Assess business performance. (xix) Evaluate citizen/user performance.

c) The conceptual model is the mock-up of the platform created that helps the users visualise data, and flows, and focus on simulation of scenarios with the evaluation based on the indicators. The platform interface is made up of several panels and bars organized around a workspace, in order to make the interface ergonomic. The interface is made up of 4 main areas:
- **The menu bar:** through which you access the tool and the type of indicators you want to apply.
- **The toolbar:** offers the navigation tools needed to select and move around the interface. It also includes the functions that allow you to print, save, choose (decision support) an optimal simulation. –
- **The space or viewing area:** on which the different layers of data corresponding to the panes are visible. The data related to the sectors, actors and flows are based on historical data of the territory while the last layer makes it possible to illustrate the simulations on data which can be speculative. It is possible to switch each space in satellite view, or in Data view (3D elevation) according to the desires of the users. There is a modularity of the visualization to visualize the data in different dimensions.

Figure 6. Platform main representation

- The filters panel: allows to focus on specific, temporal, geographical, text or informative data. Applying a filter on one or more data makes it possible to target information and generate data combinations. This panel has 4 panes: (i) "Sectors - Territories" which offer different cartographic views according to cadastral data, minimum distances, partnership zones… (ii) "Stakeholders - Activities" which offers the different views of CE stakeholders and the different activities of recovery, recycling, repair, reuse. (iii) "Flows" which allows you to filter the different data concerning the waste streams, available, recovered, collected, etc. on the territory according to the selected actors. (iv). "Simulation" which allows testing of data hypotheses through interactive graphs. All sections have their circularity indicators. The indicators are on the scale of the territory, but also on the scale of the actors, and flows.

Adding multi scales data, combining them, visualising them and generating scenarios for getting help in decision making is the main objective of the platform. The scenarios are evaluated and compared. Other than the cost estimation, indicators for evaluation of Circular Economy could be used. An inventory of the latter was done by the Organisation for Economic Co-operation and Development [38]. Impacts of a solution could be evaluated by checking the impact that generates ecological damage (e.g., Climate change and the greenhouse effect, acidification), the impact that generates health damage (e.g., Radiation) and the impact that generates a decrease in resources (e.g., depletion of natural resources, energy consumption.)

d) The logical model and the platform programming are out of the scope of this project. This could be done after the full validation and the decision to implement the project. However, the functional diagram and the architecture of the platform show that the main part of the tool is the data that we identified and collected in previous sections. Not only they are visualized on this platform, but they are interpreted and analysed to create simulations where stakeholders can compare and test hypothesis to visualize their impact on the territory. Results would then be shared for the several actors of the CPS. The later will be working on a common cloud. This could enhance alimentation, maintenance, verification and use of the information and data present.

Figure 7. Architecture of the Platform

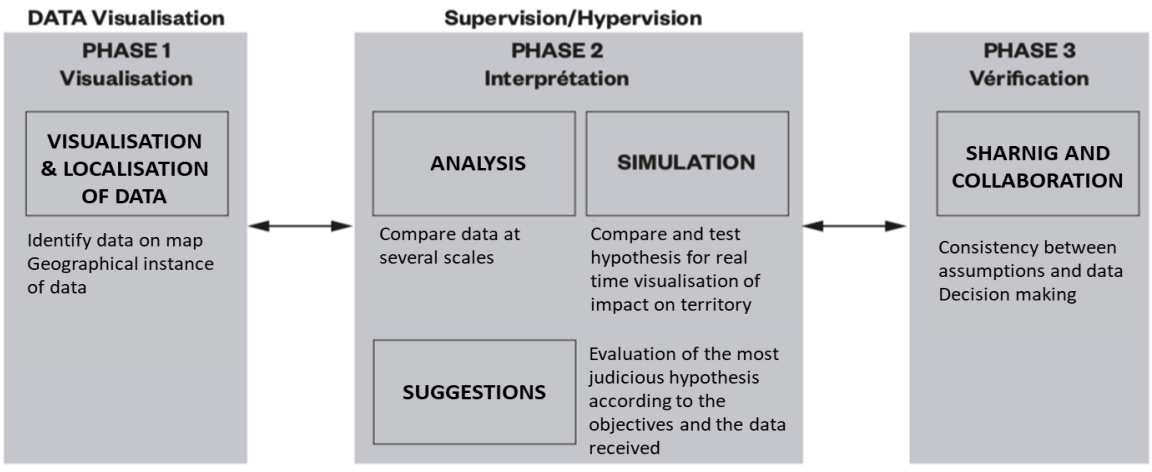
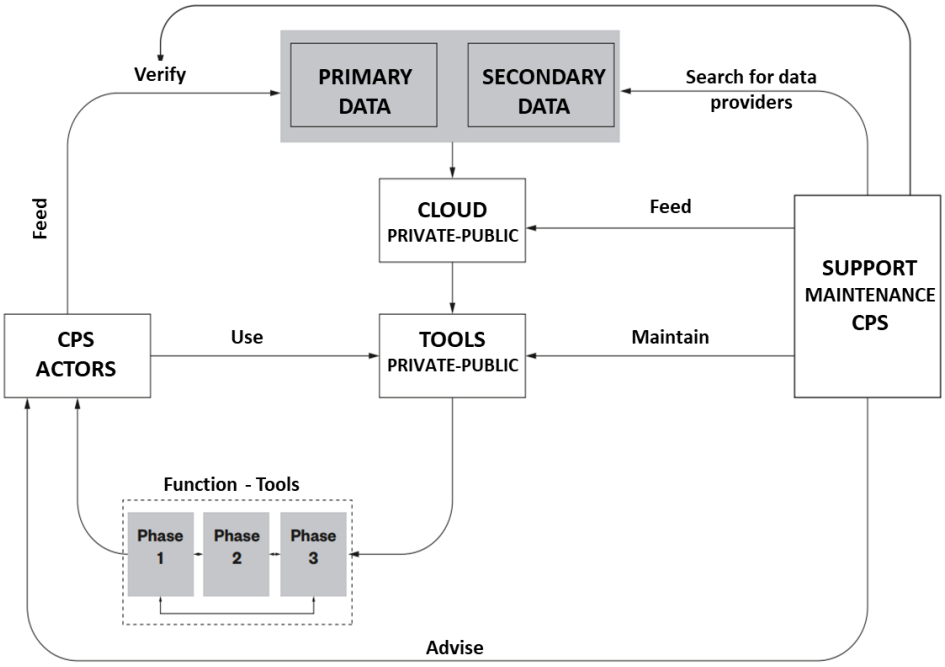


Figure 8. Functional Diagram



3.4.3. Applications and Scenarios

To better understand the principles and make the ideas more practical and pragmatic, some use cases are developed in this section. Five different ways of applications are presented through scenarios.

Scenario 1: A year and a half ago, the SIOM opened the yellow bins to a lot of other waste, the problem is that there are a lot of sorting errors, and the collection trucks no longer make suitable routes: there is an excess of empty trucks, transport is inoperative.
The platform would be useful for citizens who want to have better support on sorting in order to limit waste, do better sorting. The platform would also be useful for rippers so they can see the filling rate of the bins and find the best route to collect the waste without spending too much energy.
The SIOM and the CPS deploy connected trash cans that allow visualizing and hence monitoring the filling rate. This optimized collection rounds and helped with decision-making, especially in terms of adding or removing containers.

Scenario 2: A young entrepreneur wants to develop an activity in the territory that will allow the recycling of a certain number of waste streams. However, he does not know if his upgrading activity will help create or maintain jobs.The platform would be useful for companies. It would make it possible to assess the costs of setting up and the upgrading activity that has the most potential in order to be able to generate an activity that can create jobs. The platform indicates the upgrading activities present in the territory and highlights the activities as well as the flows thanks to this representation it is easy to represent the potential deposit and thus the deployment of one or more revaluation activities. Through the platform, CPS can guarantee the homogeneity of the data.

Scenario 3: A company is managing a destruction site in Saclay. Usually, people do not want to buy back the lumber that was salvaged, but since the company does not have any storage space, it has to get rid of it quickly. The platform would be useful to find a buyer as soon as possible. It would also allow the company to post an ad thanks to its "matching" viewing mode. It would also make it possible to find resource centres or other recovery companies that could recover them. Through the directory and waste filters in the platform this could be achieved.

Scenario 4: In Courtabœuf area, a company wishes to enrol in an industrial and territorial ecology approach, but the decision makers do not know the maturity of the company compared to other companies or even the potential they could have. The platform would be useful to assess the maturity

according to an indicator sheet to be completed. It would also make it possible to visualize potential partners to limit the loss of value and why not generate gains. It would make it possible to observe the interactions that already exist as well as their density. Through the platform, visualization of potential actors could be done.

Scenario 5: A facilitator wants to identify a potential company to join the symbiosis. He realises that he is one of the missing resource players within the ecosystem, but he does not know which company could join us. The directory platform categorizes the companies and offers sufficient detail of the companies so that the facilitator can decide on the best decision by coming into direct contact with the subjects. This could be done through the visualization and the monitoring of the actors on the platform.

4 CONCLUSION

Conceived as an operational approach to managing the resources of a territory in a loop, circular economy requires a sufficient knowledge on the resources flows and actors as well as their connectivity. In parallel, the shift to digitization concerns all territories and public authorities are challenged by a growing need for data and digital tools. The territorial actors have many assets to take the initiative on these subjects. They will be able to take advantage of the rapid coverage of the territory through networks. This will help them integrate a logic of connected objects and data collection. This research work contributes to the exploration of these concepts and proposed some avenues for research on the issues of the territorialization of CE through digitalisation. Based on a SLR, this work answered the main research question by providing a model, a concept and then a mock-up of a platform that could be used by a public or private territorial actor that acts as a decision-maker.

In fact, if the value of accumulated information is generated in the data economy model, digital technologies are needed to handle this data. The main tools technologies that support and accelerate the circular economy transition were found to be RFID and sensors, and IoT for the data collection, digital twins for the data integration, big data, AI and machine learning for the data analytics, and cloud technology, cyber systems and SC integration for the data sharing. Digital tools were found to be a momentum for the transition towards territorial circularity. Examples and applications of the digital tools and their effect on the CE of the territories were developed. Hence, digitalisation and CE for Smart Sustainable Territories were followed by a model of the infrastructure of a Smart Sustainable Territory.

In parallel, in order to fill the gap of the actual state where several non-sufficient initiatives are created, a mock-up of a platform having centralized visualization is presented. This would allow all stakeholders to align themselves on a common language. Through MERISE methodology, adding multi scales data, combining them, visualising them and generating scenarios for getting help in decision making is the main objective of the platform would be possible. A territorial actor like the CPS, would be interested in establishing strategies, making decisions, and simulating scenarios based on data like the flows of household and green waste, the mobility of people and the energy consumption. All over this study, a roadmap was proposed, the main titles were established. Accordingly, the territorial digital platform could be developed. Based on the created model, territorial actors could tackle on several challenges and cross the limitations that existed.

Finally, the mock-up done, confirms that, indeed, digitalization and data deployed for the various circular economy approaches make it possible to reduce the production of waste and better use of resources, which meets the initial objectives. One of the contributions of the CE, is the collaboration of the various actors of the territory. Whether at the level of communities and companies for industrial and territorial ecology approaches, or between citizens and communities for the functional economy, there is a need for knowledge of the specific needs of the people involved. Understanding each other not only makes it possible to pool skills and resources, but also to create relationships of trust. These links thus created are necessary both for the sustainability of the projects but also to stimulate new dynamics of collaboration that can give rise to other innovations. Hence, if other researchers came up with several alternatives, these remains to be converged towards a common goal via a common tool. A roadmap was presented here. Even though MERISE method is not new, its

capacity to understand the background and define the needs, while including and embracing all of them, makes it interesting. Remains to be seen what actors on the CPS are ready for the collaboration and for the development of the platform.

ACKNOWLEDGMENT

The authors want to thank the Communauté d'Agglomération de Paris-Saclay, represented by Eva PINEAU, Stéphanie MORLAND and Anthony HUA, for their time, their feedback during the meetings, and their contribution to characterizing and investigating the data on the territory of Paris-Saclay. Finally, a special thanks to Baptiste COTTEN, who contributed to the design of the platform.

REFERENCES

[1] IPCC, 'Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change', Cambridge University Press, 2021. Accessed: Aug. 28, 2021. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

[2] UN, 'Paris Agreement', United Nations, 2015. Accessed: May 02, 2021. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

[3] UNFCCC, 'COP26: The Glasgow Climate Pact (UN Climate Change Conference UK)', UNFCCC, Glasgow, 2021. Accessed: Jun. 24, 2022. [Online]. Available: https://ukcop26.org/the-glasgow-climate-pact/

[4] G. Lafortune *et al.*, 'Europe Sustainable Development Report 2021: Transforming the European Union to achieve the Sustainable Development Goals', SDSN, SDSN Europe and IEEP, France, Paris, 2021. Accessed: Jun. 24, 2022. [Online]. Available: https://www.sustainabledevelopment.report

[5] L. Haigh, M. De Wit, C. Von Daniels, A. Collorichio, and J. Hoogzaad, 'The Circularity Gap Report', Circle Economy, 2021. Accessed: Mar. 01, 2022. [Online]. Available: https://www.circularity-gap.world/2021#downloads

[6] European Parliement, 'Report on a European strategy for data', A9-0027, 2021. Accessed: Aug. 12, 2021. [Online]. Available: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0027_EN.html

[7] 'The Fourth Industrial Revolution: what it means and how to respond', *World Economic Forum*. https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/ (accessed Mar. 10, 2022).

[8] 'Reports', *World Economic Forum*. https://www.weforum.org/reports/ (accessed Mar. 10, 2022).

[9] P. Saclay, 'Actualisation du projet de territoire 2021-2031', *Site Internet du/de la Paris Saclay*. http://www.paris-saclay.com/fonctionnalites/publications-131/actualisation-du-projet-de-territoire-2021-2031-6131.html?cHash=3eb5602facc15270621e757100bce49c (accessed Mar. 10, 2022).

[10] Y. Xiao and M. Watson, 'Guidance on Conducting a Systematic Literature Review', *J. Plan. Educ. Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 93–112, Mar. 2019, doi: 10.1177/0739456X17723971.

[11] G. Bouillass, M. Saidani, J. Lameh, and B. Yannou, 'Digital technologies to advance circular economy at territorial level: challenges and solutions', *IEEE ICE - IAMOT Conf. 2022*, 2022.

[12] C. Chauhan, V. Parida, and A. Dhir, 'Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises', *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 177, p. 121508, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.techfore.2022.121508.

[13] D. Esses, M. S. Csete, and B. Németh, 'Sustainability and Digital Transformation in the Visegrad Group of Central European Countries', *Sustainability*, vol. 13, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13115833.

[14] K. Masivi and R. Shukla, 'A Study and Analysis in Database Design by MERISE.', *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 4, Jan. 2018, doi: 10.26808/rs.ca.i8v4.05.

[15] 'merise.pdf'. Accessed: Mar. 11, 2022. [Online]. Available: https://www.uv.es/nemiche/cursos/merise.pdf

[16] 'Open Data and the Circular Economy | data.europa.eu'. https://data.europa.eu/en/datastories/open-data-and-circular-economy (accessed Mar. 11, 2022).

[17] IBM Security, 'Cost of a Data Breach Report 2020', p. 82.

[18] Y. Xiao, L. Y. Y. Lu, J. S. Liu, and Z. Zhou, 'Knowledge diffusion path analysis of data quality literature: A main path analysis', *J. Informetr.*, vol. 8, no. 3, pp. 594–605, 2014.

[19] ‘Ecera white paper on digital circular economy’. Accessed: Mar. 11, 2022. [Online]. Available: https://www.era-min.eu/sites/default/files/publications/201023_ecera_white_paper_on_digital_circular_economy.pdf
[20] P. Parviainen, M. Tihinen, J. Kääriäinen, and S. Teppola, ‘Tackling the Digitalisation Challenge: How to Benefit from Digitalisation in Practice’, *Int. J. Inf. Syst. Proj. Manag.*, vol. 5, no. 1, pp. 63–77, 2017, doi: 10.12821/ijispm050104.
[21] J. Reis, M. Amorim, N. Melao, Y. Cohen, and M. Rodrigues, ‘Digitalization: A Literature Review and Research Agenda’, 2020, pp. 443–456. doi: 10.1007/978-3-030-43616-2_47.
[22] F. Costa, S. Genovesi, M. Borgese, A. Michel, F. A. Dicandia, and G. Manara, ‘A Review of RFID Sensors, the New Frontier of Internet of Things’, *Sensors*, vol. 21, no. 9, Art. no. 9, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21093138.
[23] Z. Meng and Z. Li, ‘RFID Tag as a Sensor - A Review on the Innovative Designs and Applications’, *Meas. Sci. Rev.*, vol. 16, Dec. 2016, doi: 10.1515/msr-2016-0039.
[24] S. Kumar, P. Tiwari, and M. Zymbler, ‘Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review’, *J. Big Data*, vol. 6, no. 1, p. 111, Dec. 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0268-2.
[25] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, ‘Internet of Things (IoT): A Literature Review’, *J. Comput. Commun.*, 2015, doi: 10.4236/jcc.2015.35021.
[26] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, ‘Characterising the Digital Twin: A systematic literature review’, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 36–52, May 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
[27] R. Carvalho and A. R. da Silva, ‘Sustainability Requirements of Digital Twin-Based Systems: A Meta Systematic Literature Review’, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 12, Art. no. 12, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11125519.
[28] T. Y. Pang, J. D. Pelaez Restrepo, C.-T. Cheng, A. Yasin, H. Lim, and M. Miletic, ‘Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an “Industry 4.0” Shipyard’, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11031097.
[29] A. Y. C. Nee and S. K. Ong, ‘Special Issue on Digital Twins in Industry’, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 14, Art. no. 14, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11146437.
[30] I. Widianingsih, R. M. Masri, and A. G. Abdullah, ‘Literature study on the theory of GIS-based multi evaluation criteria’, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1375, no. 1, p. 012083, Nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1375/1/012083.
[31] ESRI, ‘Digital Twin Technology & GIS | What Is a Digital Twin?’ https://www.esri.com/en-us/digital-twin/overview (accessed Mar. 14, 2022).
[32] ‘Kumar, D & Duvvuri, Duvvuri B K Kamesh & Umar, Syed. (2014). A Study on Big Data and its Importance.’
[33] ‘Understanding the 3 Vs of Big Data - Volume, Velocity and Variety’, *Coforge Salesforce Business Unit*, Sep. 08, 2017. https://www.coforge.com/salesforce/blog/data-analytics/understanding-the-3-vs-of-big-data-volume-velocity-and-variety/ (accessed Mar. 14, 2022).
[34] M. A. Boden, ‘Creativity and artificial intelligence’, *Artif. Intell.*, vol. 103, no. 1, pp. 347–356, Aug. 1998, doi: 10.1016/S0004-3702(98)00055-1.
[35] P. Rajendra *et al.*, ‘Impact of artificial intelligence on civilization: Future perspectives’, *Mater. Today Proc.*, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.113.
[36] K. K. Ramachandran, A. Apsara Saleth Mary, S. Hawladar, D. Asokk, B. Bhaskar, and J. R. Pitroda, ‘Machine learning and role of artificial intelligence in optimizing work performance and employee behavior’, *Mater. Today Proc.*, vol. 51, pp. 2327–2331, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.544.
[37] L. Aissani, *Spatialization in LCA. Interests, feasibility and limits of eco-design. EcoSD Annual Workshop 2017*. Presses des Mines, 2019, p. 132. Accessed: Mar. 11, 2022. [Online]. Available: https://hal.inrae.fr/hal-02609220
[38] OECD, *The Circular Economy in Cities and Regions: Synthesis Report*. OECD, 2020. doi: 10.1787/10ac6ae4-en.

Main contact: LAMEH José
joselameh@hotmail.com
+33623895133

HOW TO CHALLANGE AN EXISTING TECHNOLOGY WITH DIFFERENT INPUTS

LASSERRE Romain[1,2], CLAUDE GAZO[1], JEAN Camille[1], VUILLAUME François[2], GABRIELI Claude[2]

[1] Laboratoire Conception de Produit et Innovation LCPI – Arts et Métiers ParisTech, 151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris

[2] ELM Leblanc (Bosch), 124 Rue de Stalingrad, 93700 Drancy

Abstract: The present paper provides a combination of Design Thinking and TRIZ approaches through a double-diamond approach with the objective of innovating on existing technology. The paper develops an experimental approach on a case study in the field of thermal technology (domestic heating equipment).

Key words: Innovation, TRIZ, Creativity, Thermal Technology, Design Thinking

1 INTRODUCTION

In industry, innovation is the key of success to remain attractive to customers. Industrials must find always new ideas to improve or create new technological products, more efficient, more aesthetic, and with more options to meet the needs of the market. For this purpose, companies can either go to new markets with disruptive innovation or stay in their markets with iterative innovations. It is often difficult to generate new ideas based on already existing and functional technologies. Because very often it is difficult to move away from the product to find other alternative solutions. The purpose of this paper is to set up an approach to challenge an existing technology. To answer this issue, this paper will present in the first part a methodological state of the art. Then, in the second part, the presentation of a method. And finally, the presentation of a case study and the application of the method to it.

2 STATE OF THE ART

This first part presents a literature review of methods and tools to innovate. In the case of a redesign or an optimization of an existing product or technology, it is imperative to succeed in detaching from the product. Otherwise, imagination and creativity will be hampered. That is why methods and theory were imagined to help structure the research and ideation process. Among, these methods we find the Design Thinking [1][2], the C-K method [4], TRIZ [3], the blue ocean strategy [5], and others which have each their particularity. In this article, as they are widely used, two of them will be presented: Design Thinking and TRIZ

2.1. Design thinking

The design thinking model was developed in 1980 at Stanford university by Rolf Faste and was brought to evolve thereafter. This method is human-centered and helps to innovate through visual formalisation such as mapping. It brings together what is desirable from the human point of view, with characteristics that are technologically and economically viable [8]. This method is structured in two principal phases: problem understanding and solution exploration. In the first phase (first diamond) we start with a discovery and technology research, to deviate from the problem studied. Then, we synthesize

research and converge toward a specific problem. The second diamond corresponds to the creativity phase which results in concept ideas being converted into prototypes.

This method is well adapted to structure innovation projects that aim to respond to a need or a requirement but may not be sufficient to seek innovation on an existing product.
However, this method is human-centered and is based on our empathy, which can quickly limit the creativity of hidden and technological parts of the system. So, for objects or systems that are installed once and then don't move, or even interact very little with the user. This method alone does not allow to consider all the possible technical and technological possibilities for this kind of system.

2.2. TRIZ

TRIZ is a Russian theory developed by Genrich Saulovitch Altshuller in 1946 and which means: Theory of Inventive Problem Solving. This theory consists of the use of tools allowing the detection and the analysis of an initial problem and its reformulation in an abstract domain. Then, dedicated resolution tools such as 40 principals can be used [5].

TRIZ allows for an exhaustive resolution of the solutions applicable to innovation problems after having identified the functions and the objectives that a technical system must fulfill. It is not always easy to up in place in a project on a super system, without specific problem to improve such as a subsystem or a mechanism. But there are very interesting tools that can be used without using all the theory. Such as the process of ideal object and contradiction to help for improvement, or the TRIZ contradiction Matrix for the phase of creativity to have a direction for improvement [6].
However, TRIZ allows to solve only one contradiction at a time, so it is generally a laborious tool to set up for complex systems. Which forces to approach the problem in sub-problem, which can complicate the beginning of a project.

Based on the strength and weakness of the design thinking method and the TRIZ theory, we propose to combine both of them to foster innovation for complex system situations.

3 METHOD

To find ideas for improvement or evolution through the different subsystems. It can be, as well, a reduction of the cost with another technology, a change of materials, or a more ecological system. For this purpose, it is important to structure a method that adapts to our problem based on both existing methods and theories. The purpose of combining design thinking and TRIZ is to develop products such as designers do, through its 5 stages (Empathy, definition, ideation, prototype, and test) with a human center view and the fundamental concepts of TRIZ, which might guide in the process of solving the intrinsic problems generated by designing [9]. Figure 1 represents this method.

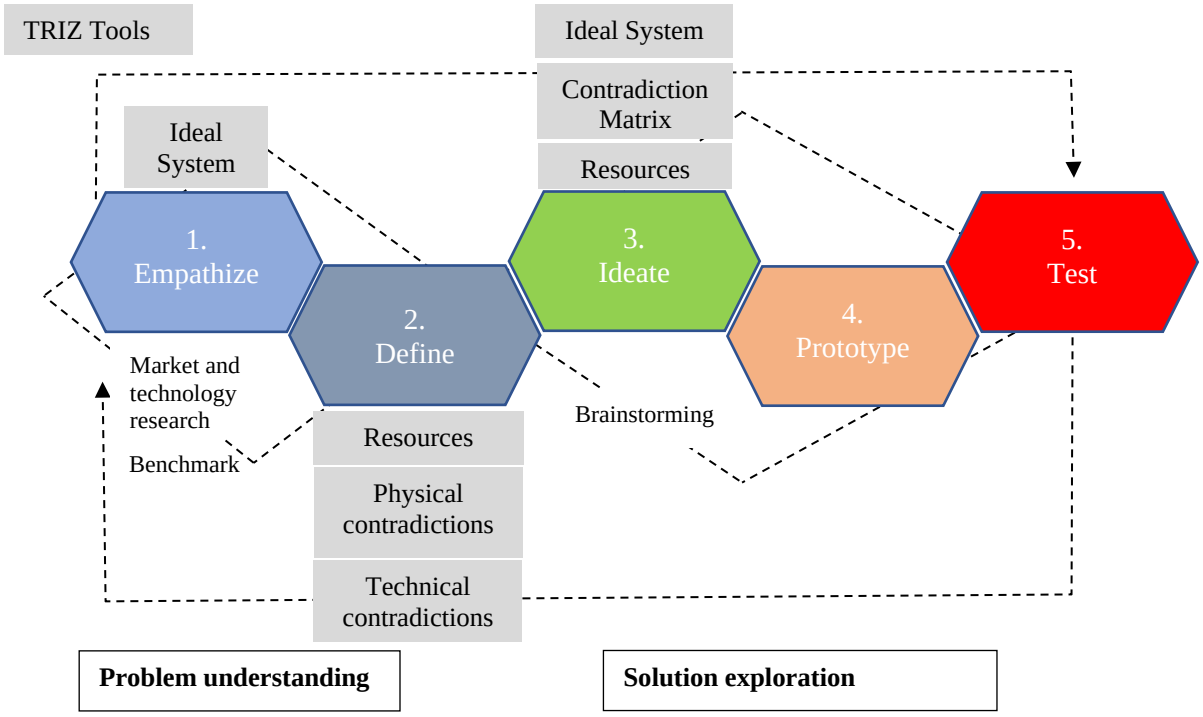


Figure 1: Method with Design thinking and TRIZ

The interest in making this association is to fill in the gaps between Design Thinking, which can be too human-centered, and TRIZ which lacks structures in its process. Moreover, the interest of TRIZ is to be able to use each tool in an agile way, according to the needs and the problem encountered at any phase of the project. This allows a certain amount of leeway and improvisation in the project process. **Empathy phase** consists in studying the market, the existing technologies, the human factor, and its interaction with the product. For this, design thinking tools such as *mapping,* and *benchmarks* are used to illustrate the research. At the end of this, we can imagine the *ideal system* for the human being.
Define phase consists in refocusing on a specific problem. For this, TRIZ tools such as *physical and technical contradictions* allow finding the potential problem to solve. Once the problem is found, we can start looking for innovative solutions.
Ideate phase consists in realization of concept sheets for answering the problem. For that, Design Thinking and TRIZ tools can be useful in their field, TRIZ with the *contradiction matrix,* for example, can provide ideas to respond to the contradictions identified in the definition phase.
The last two phases: **Prototype** and **test phase** aim at validating and identifying potential modifications to the selected solutions.

4 PRESENTATION OF THE CASE STUDY

To test our methodology, we test it on a case study. This part presents the heating system product.
A heating system is designed to heat water from renewable or fossil energy source to feed the heating circuit and to heat domestic hot water. This system is composed of heat pumps and traditional or condensation boilers. The boilers can have different combustible such as wood, electricity (renewable or not), biomass, oil, or natural gas. In this paper, the technology to be challenged is a wall-mounted gas condensing boiler with an integrated hot water tank (figure 2).

Figure 2: Product study (Egalis ballon icondens ELM Leblanc)

As shown in figure 3, the cold water of the heating circuit arrives at the bottom and circulates in the condenser, which allows it to gain some degrees thanks to the exploitation of the smokes produced by the burner, before finishing being heated up at the burner and to be sent back in the heating circuit. The exploitation of the energy (in the form of heat) present in smokes allows the condensing boiler to reach the best efficiency of about 95% on average over the year. Then, as shown in figure 4, the hot water is directed simultaneously through the three-way valve to the heaters and the hot water tank. To heat domestic hot water, there are two technologies, either a coil in the tank such as in the picture, or a plaque exchanger outside the tank. The principal difference between a coil and a plate heat exchanger is the heat transmission which is better for the plaque exchanger because of its larger exchange surface, which makes the plate heat exchanger faster and with a better flow rate but more sensitive to limescale [6].

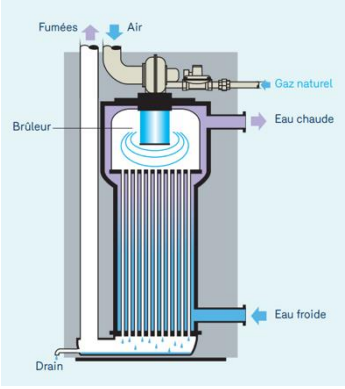


Figure 3: Functional diagram [11]

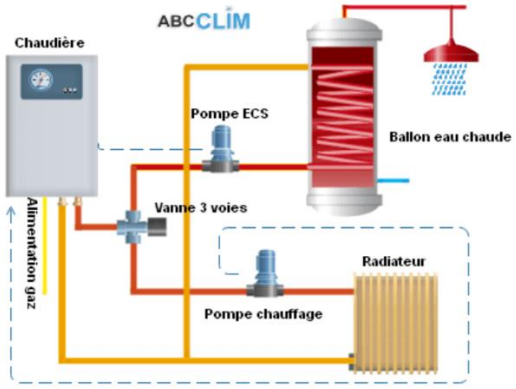


Figure 4: complete system with a boiler, hot water tank, and heating

We will apply our method in this case study to foster innovation in this complex system.
At first, it was necessary to become competent in the field of domestic boiler with documentation and discussion with colleagues. Learn about customer feedback to be aware of potential problems, from there we can start to see solutions, but we often remain vague and not necessarily relevant to the market. For this, it is important to structure your approach to have a guideline (figure 5). So, we applied the proposed approach mentioned above. The objective of this approach is to identify the needs of users and the current and future market to facilitate creativity and the generation of a viable concept for the company based on an already functional product. Ultimately, this case study will allow us to see if this method brings interest and real results in terms of concepts and innovative ideas that are industrially viable.

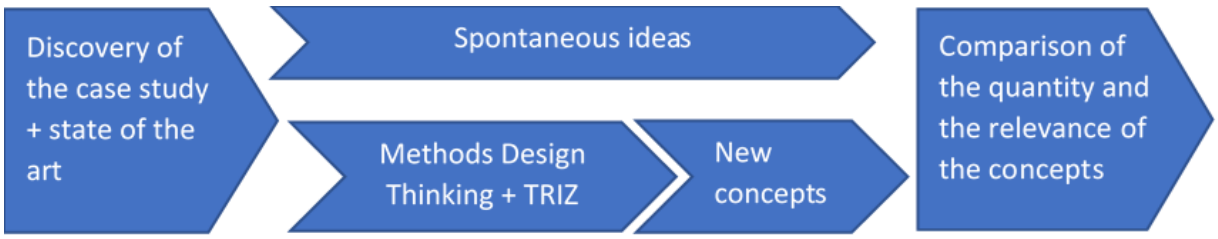


Figure 5: protocol

5 RESULTS

In this part, I am going to develop the "Design thinking + TRIZ method" step (see figure 5), and I am going to specify each step of it by following the diagram in figure 1.

5.1. Empathy

This first phase of divergence has for goal to take knowledge in a global way of the market, the technical solution, and the studied product. At the end of this phase, we can also identify the different ways of innovation taken by the competitors, which can allow us to focus on solutions where the competition is less important. We must get to know the product and the global functioning of the technologies that compose it. It is not necessary to go into the details of the system, because the purpose of this step is only to get to know the product and to identify its potential advantages and disadvantages. As we can see in figure 1, this first stage is principally based on Design Thinking tools with market and technology research, benchmark which is much better suited to identify the needs.

5.1.1. Market study

Initially, in the study of the market, it is interesting to make the study on the product close to the product studied, so it is interesting to study it globally before. So, in our case study, it is the market of wall mounted gas condensing boiler. The market of wall mounted gas condensing boiler is a competitive market with more than 18 competitors (such as Bosch, Viessmann, Ariston, Vaillant, Atlantic…) in a world market. The target of this market is the whole of the small and medium size housing (apartments and small houses). In this type of housing, we will look for a compact product, allowing us to meet our needs and easily integrate into the housing (if we can not hide it in a dedicated area). In France, approximately 11 million households use natural gas.

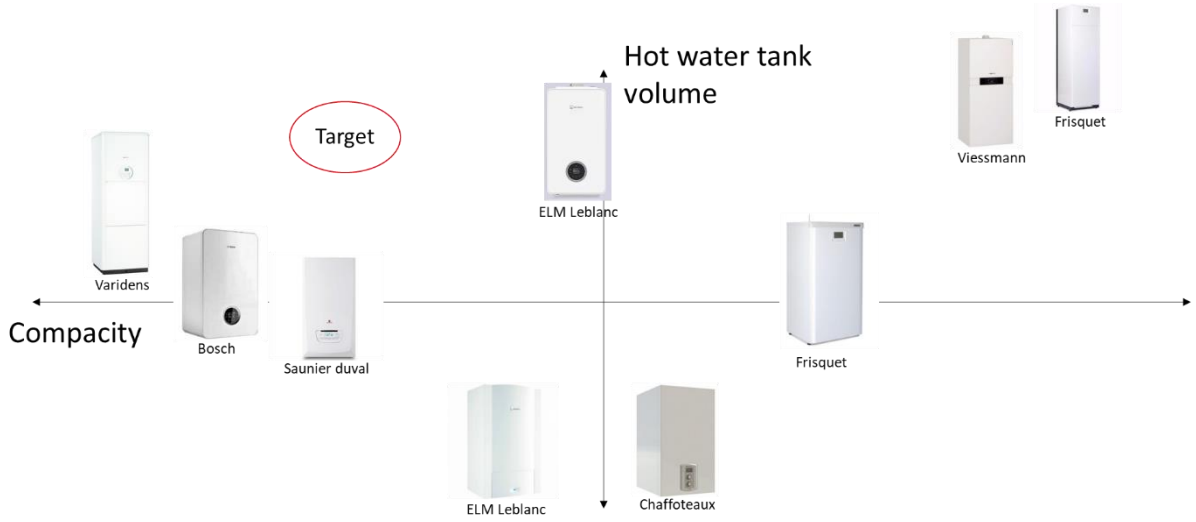


Figure 6: Benchmark of gas condensing boiler

In figure 6 we can see that the different manufacturers have to make choices in spite of equivalent machine power of about 22-25 kW, they have to make a choice between compactness and a practical hot water storage volume.

Figure 7: Benchmark of gas condensing boiler

In figure 7 we can see that the boilers have globally the same shape, some of them are more modern with rounded lines, noble materials for the front cover and/or color.

5.1.2. Technical solution

After having realized a market study on the studied product, it is important to widen the possible technical solutions (like subsystem) in order not to miss novelty answering the needs. These other solutions can allow answer the French market which begins to constrain the CO2 emissions by the heating devices, reducing by the same occasion the possible solutions in the short and long term. To answer the problem of ecology and global warming, many companies have imagined solutions less energy consuming, seeking to hybridize two distinct energy sources. In this type of solution, the manufacturer often opts for a solution with renewable energy (such as solar) as the main source of energy to the system and a solution of fossil energy as a supplement. The performance of this type of system is

based on an intelligent controller that optimizes the use of renewable energy and compensates for the lack of fossil fuels.

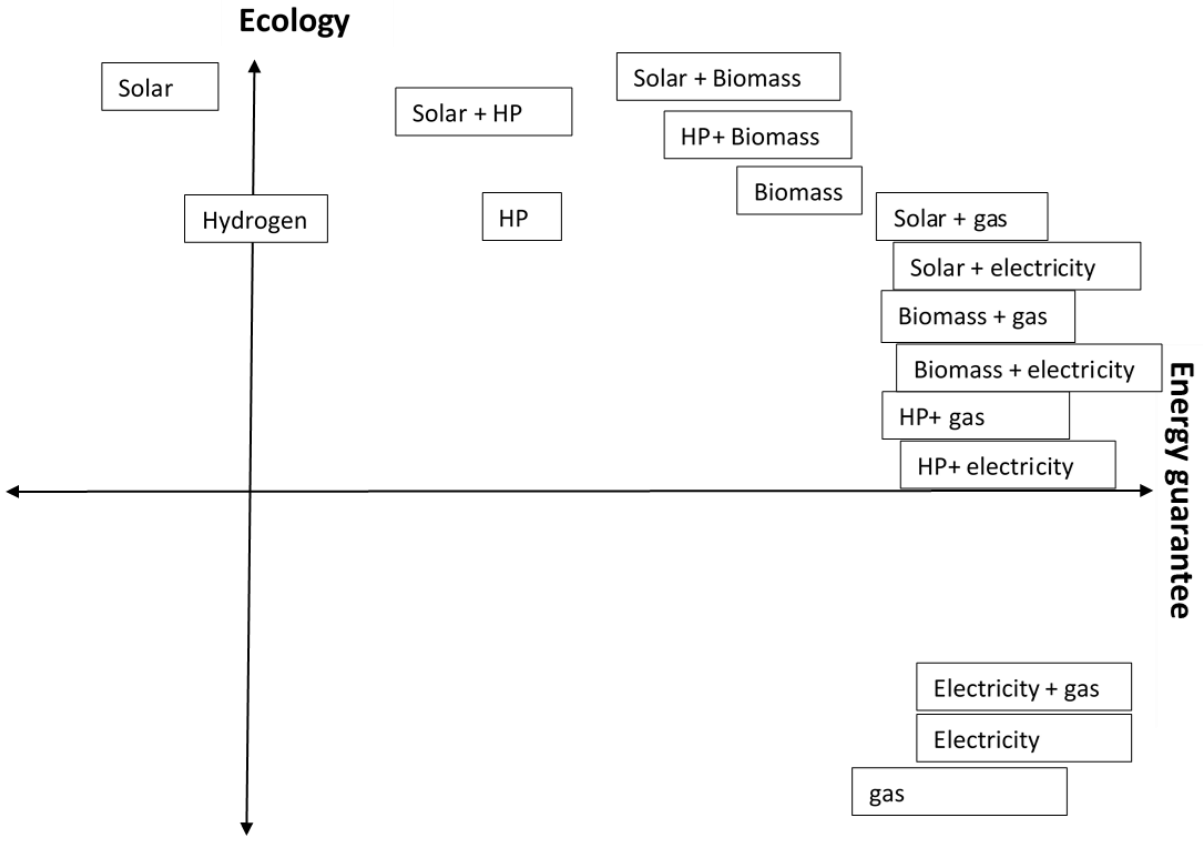


Figure 8: Mapping of existing solutions based on different energies

Other manufacturers have opted to improve the performance of single-energy solutions by reducing losses, improving storage and efficiency. Some have reduced the energy footprint of their solution by adding electricity production to heat production (microgeneration: combustion battery).
All these solutions are more or less constraining from a point of view, space, access to energy, installation required.

5.2. Definition

In the definition phase, the objective is to clearly define the needs and the target that we are trying to reach, based on the existing markets and solutions seen previously, so that we can then imagine an innovative solution. Some tools allow us to formalize and illustrate this step, like TRIZ tools such as a physical and technical contradiction as proposed in figure 1.
But before that, we must take care of the external constraint and the present and future regulations that have to be respected. If we look at the French market, there are new regulations with the RE 2020 which comes into force in 2022 and should continue to be more restrictive in the future.
This new regulation (RE 2020) imposes significant constraints on the heating of domestic housing [12]:

collective housing:

- The primary energy consumption must not exceed 85 kWheq/m²/year on average with a maximum of 70 kWheq/m²/year of non-renewable energy
- Since 2022, heating systems + hot water must not reject more than 14 kgCO2eq/m²/year and this limit will be increased to 6.5 kgCO2eq/m²/year by 2025.

house:

- The primary energy consumption must not exceed an average of 75 kWheq/m²/year, with a maximum of 55 kWheq/m²/year of non-renewable energy.
- Since 2022, the heating + DHW systems must not reject more than 4 kgCO2eq/m²/year.

The target market being collective housing and small houses, compactness remains an important criterion.

By using TRIZ tools, it is possible to formalize the needs without restricting them to a solution. By applying the TRIZ tools of principal function and ideality to the balloon subsystem, we obtain the following notion:

- The system equivalent to the balloon must allow a system to heat a fluid, then store it, and then redistribute it as hot water.
- The system thus has a device allowing the transfer of heat from a hot source to the fluid and an envelope allowing the maintenance of the heat.

The ideal in this case is a system that allows to supply hot water immediately at will, through a system adaptable to different systems, upgradable, compact and without losses.

If we are interested in the constraint in the TRIZ sense of the balloon system or equivalent:

	Balloon volume	
	high	low
Storage quantity	+	-
space requirement	-	+

5.3. Ideation

After defining the expectations that the system should meet, we have sought to generate concepts that meet the expectations. For this, we can use concept generation methods based on creativity sessions (like the one proposed in figure 1). During this session, we can use tools as *brainstorming*, *purge*, *inversion*, and *inspiring mood board* from **design thinking**.
But also, *constraint matrix* from **TRIZ**: in the case of the balloon mentioned above, by seeking to improve the storage volume by degrading the shape, we obtain the following research tracks:

- Extraction:
    - Extract from the object a disturbing part or property
    - Extract only the necessary part or property
- The Russian doll:
    - place an object in another one which, in turn, will be placed in another one and so on.
    - To make an object pass through another one by its cavities.
- The change of physical and chemical parameters of an object:
    - Change the phase state of an object
    - Change its concentration or consistency
    - Modify the degree of flexibility
    - Change the temperature

The goal of the ideation phase is to answer the needs by finding solutions to the problem raised. But it can also allow finding other additional use to this new product to distinguish it from the competition, to approach new user experience. From this point of view, we can see that the boilers have passed through time from our garage or closet to our kitchen or bathroom without new use, only the appearance has changed to fit these places. This line of thought can lead to new concepts.

5.4. Prototype and test

This last phase of prototyping will allow us to characterize whether the new system meets the needs in terms of efficiency, environmental constraints, and size. It will also simply verify that the system does not have any problems of operation. And finally, to validate the ergonomics in terms of user experience to be able to bring modifications if it is necessary.
For complex systems, it can be interesting to characterize the sub-systems as we go along to identify the problems as soon as possible without having yet realized the final prototype, which can be much more expensive to realize.

The experimentation of the effectiveness of the method (Design Thinking + TRIZ) is in progress through the protocol figure 5, I am currently in the ideation phase. The results of this method will be clearly identified only at the last stage during the comparison stage, although the creativity and the number of concepts are more consistent with this method.

6 CONCLUSION, LIMITS, AND PERSPECTIVES

After presenting a review of literature about design thinking and TRIZ, the article describes the steps implemented for the creation of new concepts for a complex system in the field of domestic heating. The creativity phase is still in progress, especially for the user experience part, which is not very developed in the home heating sector, apart from connectivity and remote control.
Then, the prototyping stage will allow validating or not the expectations to re-create and re-design before making the final prototype.The ideas and concepts resulting from the ideation can be adapted to other products.

This is method is interesting in its global structure to frame a project and in the exploitable tools for both the user experience aspect of design thinking and the more technical problem solving aspect of TRIZ. Nevertheless, TRIZ can be complicated to implement because of the need to have an expertise in the studied field, as well as the complexity of exploiting the results of certain tools when we are not used to using them. TRIZ also needs to be explained in a group creativity session to be properly used.

The effectiveness of this method will be evaluated by the simplicity or not of use and implementation, but also and above all by the relevance of the concepts obtained in the long term of its use, at the level of interest that they bring, and of the industrial viability.

7 REFERENCES

[1] Satu Grönman and EilaLindfors., *The Process Models of Design Thinking*, Design and Technology in Education, Section III, p110-118, Finland, 2021

[2] Sebastian Kernbach and Anja Svetina Nabergoj., *Visual Design Thinking: Understanding the role of knowledge visualization in the design thinking process*, 22nd International Conference Information Visualization, p362-367, 2018

[3] Ismail Ekmekei and Emine Elif Nebati, *Triz Methodology and Applications*, 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship (WOCTINE), p303-315, 2019

[4] Pascal LE MASSON, *Creativity and design reasoning: how C-K theory can enhance creative design*, international conference on engineering design, , Cité des sciences et de industrie, PARIS, 2007

[5] Marc Trela, *Optimisation des performances d'innovation : Une approche combinant inventivité technique et recherche du succès commercial*. pastel-01016664, p1-183, 2013

[6] Semyon Savranski, *Engeneering of Creativity*, https://www.opensourcetriz.com/triz-philosophy.html

[7] D.G. Prabhanjan, G. S. V. Ragbavanand T. J. Kennic, *Comparison of heat transferrates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger*, Int Comm Heat Mass transfert, Vol 29, No 2, pp 185-191, 2002

[8] Hugo Domingo García-Manilla, Jesús Delgado-Maciel, Diego Tlapa-Mendoza,

Yolanda Angélica Báez-López and Leonardo Riverda-Cadavid, *Integration of Design Thinking and TRIZ Theory to assist a User in the Formulation of an innovation Project*, Managing Innovation in Highly Restrictive Environments, Springer, p303-327, 2019

[9] Kyeongwon Lee. *Innovative Design Thinking Process with TRIZ*. 18th TRIZ Future Conference (TFC), pp.241-252, Strasbourg, France., Oct 2018, 10.1007/978-3-030-02456-7_20. hal-02279754

[10] Ricardo Henrique Da Silva,Paulo C. Kaminski,Fabiano Armellini, *Improving new product development innovation effectiveness by using problem solving tools during the conceptual development phase: Integrating Design Thinking and TRIZ*, Creative and innovation management, vol 29, N°4, p685-700, 2020

[11] Energir, *Chaudière à condensation*, 6824_Fiche_chaudiere_condensation_FR_epr02.pdf (energir.com)

[12] Cegibat, *RE 2020 : les grands principes*, RE 2020 : les grands principes | GRDF Cegibat, mise a jour le 17/02/2022

Contact principal : LASSERRE Romain

Coordonnées : lasserre.romain8@gmail.com

L'OPTIMISATION PAR ESSAIS ET ERREURS DE L'APPRENTISSAGE PROFOND PAR RENFORCEMENT DANS LES JEUX VIDEOS

Cédric Letalleur[1]
[1] CESI école d'ingénieurs Rouen, cedric.letalleur@viacesi.fr

Résumé : L'automatisation des jeux vidéo à l'aide de l'apprentissage par renforcement existe maintenant depuis un certain temps, seulement des problèmes de complexités encore trop importants sont toujours malgré la communauté de chercheurs active sur ce sujet. Selon nous le problème de complexité pourrait être résolu si l'on améliore le système de récompenses qui n'est aujourd'hui qu'une simple valeur. Si l'on transforme ce système de récompense en un ANN qui détecterait un certain « plaisir » ou une certaine « addiction » à cette dernière cela réglerait le problème du temps d'entraînement beaucoup trop long.

Mots clés: Reinforcement Learning, Credit Assignment Problem, Deep Learning, Jeux vidéos

1 INTRODUCTION

Pour l'automatisation des jeux vidéo il existe le machine learning ainsi que le deep learning. Le Deep Learning ou en français l'apprentissage profond, est un domaine émergent de la recherche sur le Machine Learning (ML). Il comprend plusieurs couches cachées basées sur des réseaux neuronaux artificiels. [17]. L'automatisation, par le biais des modèles d'apprentissage profond par renforcement (DRL), des jeux vidéo permettent à des agents(bots) de finir un niveau, voir un jeu vidéo en entier. L'apprentissage par renforcement ou Reinforcement Learning se base sur une méthode où l'agent reçoit des récompenses après avoir effectué une action son but est donc d'avoir le plus de récompenses possibles pour par la suite avoir une Intelligence Artificielle (IA) qui effectue ce que l'on attend d'elle. La démarche du Reinforcement Learning est comparable à un dressage d'un chien avec des friandises comme récompense. Les jeux vidéo se déroulent dans un environnement virtuel, le DRL apprend en se basant sur ce qui passe dans un environnement donné [1], les jeux vidéo sont donc une manière d'appréhender pour le futur des IA très compétentes dans un environnement réel, par exemple le parc automobile mondial autonome. Dans un monde qui se veut de plus en plus digital l'intelligence artificielle a tout à fait sa place pour automatiser la plupart des environnements existant, ce qui nous amène à la problématique suivante : comment optimiser par essais et erreurs le Deep Reinforcement Learning (DRL) dans les jeux vidéo ? L'objet de notre recherche est donc de proposer une nouvelle solution plus optimisée d'automatisation de jeux vidéo. Ce qui nous a amené d'abord à effectuer une analyse de l'existant, puis un état de l'art et pour finir le futur du DRL par essais et erreurs.

2 ANALYSE DE L'EXISTANT

Durant notre processus de recherche, nous avons pu observer divers travaux concernant l'optimisation de modèles de Deep Reinforcement Learning ou de création de nouveaux modèles de DRL. Dans ces recherches d'optimisation de ce modèle d'IA, nous avons investigué sur un modèle récent créé par des chercheurs chinois qu'ils ont nommés le MBCA (Model-Based Credit Assignment)

[2], Dong Yan, Jiayi Weng, Shiyu Huang, Chongxuan Li, Yichi Zhou, Hang Su, Jun Zhu. Ce modèle se découpe en deux parties distinctes une partie Model-Based et une partie Model-Free, effectivement en mettant ces deux méthodes dans le même modèle d'IA ils ont réussi à faire un modèle prenant les avantages d'un Model-Based Learning et de supprimer ses inconvénients par l'utilisation d'un Model-Free Learning. Car effectivement le but de cela est de réduire la complexité de calcul et d'espace mémoire mais aussi réduire la complexité d'échantillonnage. Vous pourrez retrouver le schéma du MBCA sur la Figure 1 [2], on distingue alors bien la partie du Model-Free s'occupant de faire circuler les informations états de l'environnement à l'agent, récompense à l'agent, action de l'agent dans l'environnement puis envoyer le prochain état de l'environnement au Model-Based qui lui va prédire la récompense que va obtenir l'agent suit à l'état de l'environnement.

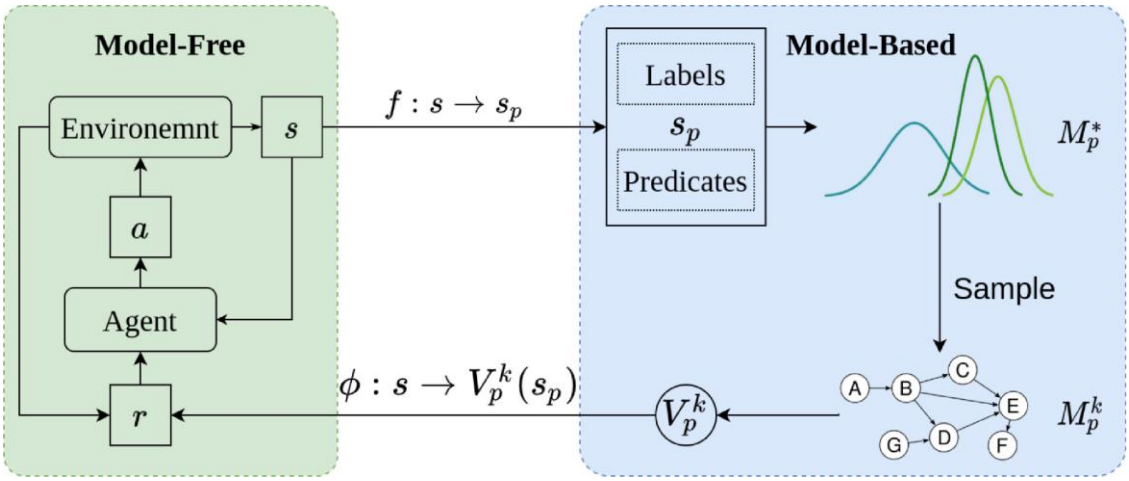


Figure 1. Modèle MBCA illustré sous forme de schéma

Pour résumer, l'algorithme du Model-Based Credit Assignment (MBCA) utilise dans un premier temps les données générées par l'agent qui interagit avec l'environnement pour construire un modèle plus compact. Ensuite il va résoudre ce modèle pour obtenir la fonction valeur optimal qui sera utilisé pour obtenir la valeur de l'état dans le modèle originel. Cette estimation va guider l'agent pour explorer l'environnement de manière plus efficace [2]

3 ETAT DE L'ART

Dans cette section, nous allons commencer par revoir les articles scientifiques concernant le Deep Reinforcement Learning dans les jeux vidéo. Puis nous allons vous introduire les articles scientifiques récents essayant de régler le Credit Assignment Problem (CAP) pour accélérer la vitesse d'entraînement du DRL.

3.1. Deep Reinforcement Learning dans les jeux vidéo

Le premier projet, qui a donné le point de départ de la révolution du DRL, a été le développement d'un algorithme capable d'apprendre à jouer à toute une série de jeux vidéo Atari 2600 à un niveau surhumain, directement à partir des pixels d'une image [3]. Spécifiquement, le modèle DQN [7] a combiné le Q-Learning [8] avec un réseau neuronal convolutif (CNN) et a obtenu des performances au niveau surhumain sur de nombreux jeux Atari. En apportant des solutions à l'instabilité techniques d'approximation de fonctions en RL, ces travaux ont été les premiers à démontrer de manière convaincante que les agents RL pouvaient être formés à partir de la vue seule de l'environnement et uniquement sur la base d'un signal de récompense. La deuxième réussite marquante a été le

développement d'un système hybride, AlphaGo, qui a battu un champion du monde humain en Go [4], parallèlement à l'exploit historique de Deep Blue d'IBM aux échecs deux décennies plus tôt [5]. AlphaGo était composé de réseaux neuronaux formés à l'aide de l'apprentissage supervisé et de l'apprentissage automatique en combinaison avec un algorithme de recherche heuristique traditionnel. Les algorithmes DRL ont déjà été appliqués à un grand nombre de projets, tels que la robotique, où les politiques de contrôle des robots peuvent désormais être apprises directement à partir des données fournies par les caméras dans le monde réel [6]. Par la suite nous avons pu observer de plus en plus de projet concernant des Intelligences Artificielles sur des jeux vidéo plus difficiles comme l'IA qui a automatisé le jeu StarCraft jeu en ligne sur ordinateur [9]. Par cette recherche ils ont pu démontrer que de nombreuses applications d'intelligence artificielle (IA) nécessitent souvent que plusieurs agents intelligents travaillent en collaboration. Un apprentissage efficace pour la communication et la coordination intra-agent est une étape indispensable vers l'IA générale [9]. D'autres articles scientifiques aussi sont présent pour prouver que l'Intelligence Artificielle peut être supérieur à l'humain dans les jeux vidéo après un bon entrainement. Comme pour Vlad Firoiu, William F. Whitney et Joshua B. Tenenbaum dont l'objectif de leur article scientifique est de battre le meilleur joueur du monde au jeu Super Smash Bros Melee [20], un jeu de combat sur console. Au fur et à mesure de ces dernières nous avons alors pu assister à de multiples méthodes pour optimiser le Deep Reinforcement Learning comme :

- DQN [7] est un réseau neuronal convolutif, entrainé avec une variante du Q-Learning, dont l'entrée est constituée de pixels et dont la sortie est une fonction de valeur estimant les récompenses futures.

- Double DQN [11] adaptation spécifique à l'algorithme DQN et montrent que l'algorithme résultant non seulement réduit les surestimations observées, mais que cela conduit également à de bien meilleures performances sur plusieurs jeux.

- Actor Critic [12] a le pouvoir rechercher des politiques optimales en utilisant des estimations de gradient à faible variance les a rendus utiles dans plusieurs applications réelles, telles que la robotique, le contrôle de l'énergie et la finance.

- A2C [13] (Advantage Actor Critic) est une méthode améliorée d'Actor Critic qui utilise des ANN (Artificial Neural Networks)

- A3C [14] (Asynchronous Advantage Actor Critic) plusieurs agents jouent simultanément et optimisent un contrôleur DNN (Deep Neural Network) en utilisant la descente de gradient asynchrone. Possède un entrainement deux fois moins long sur un seul processeur multi-core au lieu d'un GPU.

3.2. Credit Assignment Problem

Actuellement, le Deep Reinforcement Learning est principalement basé sur l'apprentissage par renforcement par la méthode Model-Free, car les réseaux neuronaux profonds se généralisent bien pour représenter la fonction valeur/politique. Récemment, l'apprentissage par renforcement profond par la méthode model-free a atteint des performances surhumaines dans de nombreux jeux [3]. Cependant, malgré ces résultats remarquables, ses performances sont encore loin de répondre aux attentes face à de nombreux problèmes complexes, par exemple les jeux en 3D [15]. Contrairement aux méthodes d'apprentissage avec le model-free, qui estiment directement la fonction valeur/politique à partir de l'expérience, les méthodes avec le model-based maintiennent un modèle de l'environnement et le résolvent pour obtenir la stratégie d'interaction optimale. Bien que les méthodes model-based atteignent la limite de regret optimale, elles ne peuvent résoudre que des problèmes à petite échelle en raison de la complexité élevée de l'espace et du calcul engendrée par le stockage et la résolution du modèle.

Les méthodes de Credit Assignment sont largement utilisées pour améliorer les performances car elles peuvent être facilement intégrées aux algorithmes existants [16]. Toutes ces méthodes nécessitent non seulement une grande connaissance du domaine mais aussi de nombreux réglages. Par ailleurs, ces

méthodes sont à sens unique. Le crédit accordé par ces méthodes est fixé et prédéterminé avant le début de l'entraînement.

4 LE FUTUR DU DRL PAR ESSAIS & ERREURS DANS LES JEUX VIDEOS

Dans cet article scientifique nous avons pu constater que le Deep Reinforcement Learning qui est un modèle d'Intelligence Artificielle a tout à fait sa place dans le futur, mais quels seront les méthodes utilisées ? Lors de cette section nous allons pouvoir voir ensemble les méthodes futures du DRL.

L'apprentissage profond par renforcement se base sur un système d'essais et erreurs avec un système de récompense comme lorsque l'on souhaite dresser un chien. Mais cela actuellement provoque certaines complexités qui ralentit énormément l'apprentissage de jeux vidéo simplistes (par rapport aux environnements du monde réel) comme un jeu de combat [10]. Ces complexités que nous devons réduire sont :

- Complexité de mémoire
- Complexité de calcul
- Complexité de l'échantillon (nombre d'échantillon d'entraînement pour obtenir un modèle satisfaisant)

Au fur et à mesure du temps ces problèmes s'atténuent par le biais de nouveaux hardwares comme les ordinateurs quantiques et leurs grandes puissances de calcul ainsi que de nouveaux modèles réduisant le problème de complexité de calcul, des stockages en mémoire de plus en plus grande et rapide. Seulement cela ne suffit pas il nous faut diminuer ces complexités en améliorant les méthodes existantes. Actuellement nous avons pu remarquer comme cité précédemment que les méthodes les plus populaires selon leur efficacité sont les méthodes qui permettent d'utiliser plusieurs méthodes à la fois pour justement palier à leurs propres inconvénients.

Avec les méthodes actuelles (Model-Free) les complexités de mémoire et de calcul ont énormément diminué ce que nous cherchons donc à effectuer pour faire avancer ce modèle est de diminuer sa complexité de l'échantillon pour diminuer son temps d'entraînement.

Pour cette partie nous restons sur notre exemple du dressage de chien, quand le chien a suffisamment compris que lorsqu'on lui dit assis il doit s'assoir on ne donne plus de récompenses pour cela ou alors une récompense plus faible. Pour nos agents dans nos modèles l'on pourrait effectuer le même cycle, donner des récompenses pour quelque chose qu'il a déjà acquis est juste gourmand en complexité de mémoire de calcul et d'échantillon. Il nous faudrait plutôt diminuer les récompenses au bout d'un certain nombre de fois que l'on s'aperçoit que l'agent réussi la même action récompensable (par exemple : ouvrir une porte). De cette manière nous allons pouvoir faire réfléchir notre Intelligence Artificielle à comment elle doit être de nouveau récompensée.

Selon nous pour le futur du Deep Reinforcement Learning nous allons devoir modifier le système de récompense pour qu'il ressemble de plus à un système de récompense lié au plaisir (à la dopamine), c'est-à-dire, les récompenses diminuent l'agent doit réfléchir comme un humain qui va aller acheter sa glace pour sécréter de la dopamine car c'est son plaisir. Il faut attribuer une vraie notion de plaisir selon dans le système de récompenses de notre Intelligence Artificielle. Aujourd'hui les mathématiciens et les neurologues arrivent ensemble à créer des ANN (Artificial Neural Network) comme le CNN alors maintenant notre hypothèse est telle que si nous pouvons recréer des neurones artificiels nous pouvons alors recréer le chemin neuronal effectuer par le cerveau lorsqu'il sécrète de la dopamine.

Pour entraîner le réseau de neurones artificielles nous avons besoin d'un dataset, nous avons récupérer un jeu de données contenant le fonctionnement de la récompense sur l'environnement choisi, CartPole-v0 de la bibliothèque OpenAI Gym [18]. Sur cet environnement nous avons pu observer, sur la documentation, que la récompense est donnée si la barre du CartPole est entre -12 et +12 degrés, sous la forme d'une récompense à chaque étape passée dans cet intervalle. La réflexion faite de notre ANN durant notre avancement de notre recherche est d'affecter une récompense autre

que 0 ou 1, mais de préférence une valeur qui est proche de 0 si l'angle de la barre est proche de -12° ou 12° est une valeur proche de 1 quand l'angle est proche de 0°, la récompense pourrait être de 0.89 dans un cas où la barre est proche de 0°. Une fois le modèle DopaminAI entraîné nous pourrons juste le placer dans la reward function de l'environnement, ici le CartPole-v0. Ce qui nous donnerait un modèle schématique avec deux ANN (voir *figure 1.*) dans le modèle DRL qui est pour ma recherche un Proximal Policy Optimization (PPO).

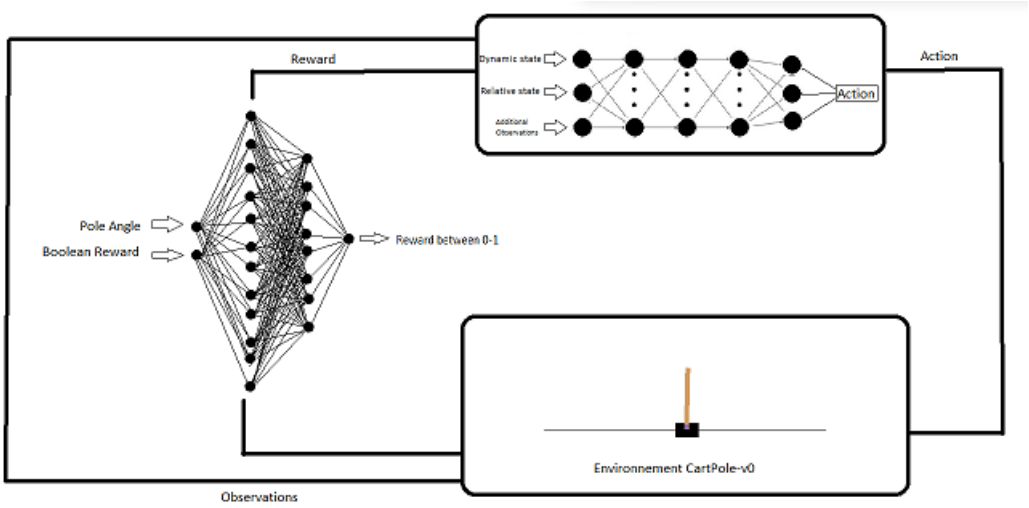


Figure 1. Schéma de notre prototype d'optimisation de DRL

Actuellement sur un repository GitHub (cedricltlr/DeepReinforcementLearningResearch) vous pourrez observer l'avancée de notre recherche sur le Deep Reinforcement Learning par essais & erreurs. Vous pourrez alors observer comment nous avons mis en place notre Intelligence Artificielle.

5 CONCLUSION

Le Deep Reinforcement Learning dans le jeu vidéo est très populaire et permet de faire avancer les méthodes d'entrainement de cette IA pour que cette dernière soit fiable pour de grands projets dans des environnements réels, comme un parc automobile autonome. Seulement aujourd'hui une trop grande complexité d'échantillon est encore présente dans ces méthodes d'IA ce qu'il fait que des projets peuvent être non entrainable par un temps trop long d'entraînement. Pour remédier à ce problème nous avons pensé à la méthode d'apprentissage par renforcement, quand on veut l'expliquer à une personne qui ne connait pas cette dernière que le dressage du chien est assez imagé avec le système de récompenses. Alors si l'on arrive à réinterpréter l'effet du plaisir, de la dopamine sécrétée par le cerveau dans une IA cette IA devrait avoir envie telle une addiction de rechercher du plaisir en cherchant une nouvelle récompense. Pour conclure, une fois que les méthodes DRL seront optimisés par essais & erreurs, dans les jeux vidéo, en ayant un Artificial Neural Network reproduisant le système de dopamine pour le système de récompenses de l'agent, alors les méthodes de Deep Reinforcement Learning auront une complexité d'échantillonnage énormément réduit et donc des IA plus rapide à entraîner. Lorsque ces Intelligences Artificielles seront assez rapides à entraîner pour des environnements virtuels tels que les jeux vidéo, ces méthodes seront alors prêtes pour un large éventail de projet se passant dans des environnements réels comme le parc automobile autonome.

6 REFERENCES

[1] K. Arulkumaran, M. P. Deisenroth, M. Brundage, A. A. Bharath., *Deep Reinforcement Learning: A Brief Survey*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol34., N6, p26-38, 2017.

[2] Dong Yan, Jiayi Weng, Shiyu Huang, Chongxuan Li, Yichi Zhou, Hang Su, Jun Zhu., *Deep reinforcement learning with credit assignment for combinatorial optimization*, Pattern Recognition, Vol124., 2022.

[3] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, Rusu AA, Veness J, Bellemare MG, Graves A, Riedmiller M, Fidjeland AK, Ostrovski G, Petersen S, Beattie C, Sadik A, Antonoglou I, King H, Kumaran D, Wierstra D, Legg S, Hassabis D., *Human-level control through deep reinforcement learning*, Nature, 518 (7540) (2015), p. 529

[4] Silver D, Huang A, Maddison CJ, Guez A, Sifre L, van den Driessche G, Schrittwieser J, Antonoglou I, Panneershelvam V, Lanctot M, Dieleman S, Grewe D, Nham J, Kalchbrenner N, Sutskever I, Lillicrap T, Leach M, Kavukcuoglu K, Graepel T, Hassabis D., *Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search*., Nature. 2016

[5] Campbell, Murray, A. Joseph Hoane and Feng-hsiung Hsu., *Deep Blue*, Artif. Intell, N134, p57-83, 2002

[6] Tuomas Haarnoja, Sehoon Ha, Aurick Zhou, Jie Tan, George Tucker, Sergey Levine, *Learning to Walk via Deep Reinforcement Learning*, arxiv, 2019

[7] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, M. Riedmi ller, *Playing Atari with Deep Reinforcement Learning*, NIPS Deep Learning Workshop, 2013

[8] Watkins, C.J.C.H., Dayan, P., *Q-Learning*, Machine Learning, 8, p279-292, 1992

[9] Peng Peng, Ying Wen, Yaodong Yang, Quan Yuan, Zhenkun Tang, Haitao Long, Jun Wang, *Multiagent Bidirectionally-Coordinated Nets: Emergence of Human-level Coordination in Learning to Play StarCraft Combat Games*, arxiv, 2017

[10] Vlad Firoiu, William F. Whitney, Joshua B. Tenenbaum, *Beating the World's Best at Super Smash Bros. with Deep Reinforcement Learning*, arxiv, 2017

[11] van Hasselt, H., Guez, A., & Silver, D., *Deep Reinforcement Learning with Double Q-Learning*, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 30(1)

[12] I. Grondman, L. Busoniu, G. A. D. Lopes and R. Babuska, *A Survey of Actor-Critic Reinforcement Learning: Standard and Natural Policy Gradients*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Vol.42, N6, p1291-1307, 2012

[13] T. Chu, J. Wang, L. Codecà and Z. Li, *Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Large-Scale Traffic Signal Control*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.21, N3, p1086-1095, 2020

[14] V. Mnih, A.P. Badia, M. Mirza, A. Graves, T. Lillicrap, T. Harley, D. Silver, K. Kavuk uoglu, *Asynchronous methods for deep reinforcement learning*, International Conference on Machine Learning, p1928-1937, 2016

[15] M. Kempka, M. Wydmuch, G. Runc, J. Toczek and W. Jaśkowski, *ViZDoom: A Doom-based AI research platform for visual reinforcement learning*, 2016 IEEE Conference

on Computational Intelligence and Games (CIG), p1-8, 2016

[16] Pocius, R., Isele, D., Roberts, M., & Aha, D, *Comparing Reward Shaping, Visual Hints, and Curriculum Learning*. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, *32*(1), 2018

[17] Vargas, Rocio, Mosavi, Amir, & Ruiz, Ramon, *Deep Learning: A review*, 2017

[18] Greg Brockman, Vicki Cheung, Ludwig Pettersson, Jonas Schneider, John Schulman, Jie Tang, Wojciech Zaremba

Contact principal : LETALLEUR Cédric,

cedric.letalleur@viacesi.fr

ECO-DESIGN MATURITY MODEL: PROPOSAL TO FOSTER ECO-DESIGN INTEGRATION IN DRUG DEVELOPMENT

Simon MASSOT[1,2], Duc-Nam LUU[1,2], Nicolas MARANZANA[1], Améziane AOUSSAT[1]
[1] Arts et Métiers Institute of Technology, LCPI, HESAM University, 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France
[2] Sanofi, 82 avenue Raspail, 94250 Gentilly, France

Abstract : The use of the Eco-design approach could help pharmaceutical companies improve the environmental footprint of their products. In order to reach this goal, it is necessary to track and support the integration of this approach within the NPD process. Maturity models are tools designed to assist practitioners in their job, enabling the follow-up of implementation of specific topics. Hence, the use of an Eco-design maturity model seemed appropriate. The review of existing Eco-design maturity models allowed the identification of their strengths and weaknesses. Therefore, their analysis and evaluation resulted in the identification of key aspects for the design of a specific model for pharmaceutical companies. The proposed Eco-design maturity model is based on the existing models and is adapted to the specificities of the pharmaceutical NPD process. The model will be used by R&D managers and is composed of Eco-design tools and Eco-design management practices. A detailed application method is submitted for a better use of the model. Finally, further actions to be carried out are suggested to investigate the reliability and use of the model.

Keywords: Eco-design, Pharmaceutica Industry, Process, Maturity, Management

1 INTRODUCTION

The development of human society has a lot of consequences for the environment [1]. For many years, the environmental impacts of human activities have been growing exponentially [2]. Only a few years ago, the scientific community and people at large have become more interested in the environment [3]. Nowadays, the international community considers the negative environmental impact of human activities as one of the biggest challenges of the 21st century [4].

In 2009, a group of scientists defined a set of nine quantitative planetary boundaries [5]. Those boundaries correspond to processes that regulate the stability and resilience of the Earth system. Within the boundaries, humanity can operate safely. However, transgressing them may lead to deleterious or catastrophic events. In fact, crossing the thresholds will be the origin of non-linear, abrupt, and major environmental changes. At the present time, six out of the nine boundaries have been transgressed [6][7].

In 1972, the publication of the Meadows Report emphasized for the first time in the history of humanity the serious ecological crisis [8]. Since 1988, a panel of experts on the environmental aspects work at IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) with the goal of providing clear and comprehensive data and assessment of the state of scientific, technical, and socio-economic knowledge on climate change. The IPCC reports aim to explain the causes, impacts and response strategies for climate change [9]. The reports are created for any government and organization; and throughout the years, many such reports have been created. In the last report, the IPCC warned governments about the urgency of the situation. The 6th report states that humanity has only three years to deploy solutions in order to manage and contain climatic changes.
The dramatic situation that we are facing regarding climate change only represents one of the nine planet boundaries presented previously. Thus, it is easily understandable that this critical situation is also true for the five other boundaries which have been transgressed.

Consequently, some actions emerged at different levels [10]. The 17 Sustainable Development Goals (SDG) were set up in 2015 with the goal of reaching peace and prosperity for people and the planet [11]. They are a call to action, commonly supported by all countries with a deadline in 2030.
SDG can be transferred to the industrial level, engaging organizations to act for a sustainable world. Therefore, the pharmaceutical sector is directly affected by some of those goals. As an example, the third SDG "Good health and well-being" is an intrinsic part of pharmaceutical companies. Since their goal is to provide treatments for diseases and care for their affordability and availability. Additionally, the twelfth and the thirteenth can be considered. They correspond to "Responsible consumption and production" and to "Climate action", respectively. Those goals emphasize the role of product development and its processes on the environmental impacts on the planet.

Most of the organizations have implemented these aspects by integrating the SDG into their strategic plans [12]. For instance, the Eco-design is one approach that allows companies to achieve these goals. As a matter of fact, Eco-design addresses some of them by integrating the environmental aspects of the product in a life cycle perspective.

Nevertheless, because the Eco-design approach is focused on the product level, some aspects are put aside such as the societal and the economic ones. Therefore, Eco-design is a part of the solution and can be combined with other approaches to fulfill the SDG.
The goal of this paper is to propose a model for tracking Eco-design integration. When integrating this approach in companies, three levels should be considered: the macro, by defining a clear strategy; the meso, by integrating environmental requirements into New Product Development (NPD); and the micro, by supporting teams with operational tools [13]. Considering that most companies have set their environmental goals [12] and strategies, the meso and micro levels are the ones that we should put emphasis on.

Even though the product performance of Eco-designed products can be well assessed with specific tools, it is completely different when evaluating the integration of the Eco-design approach within companies and projects. As Eco-design is not fully embedded within the pharmaceutical sector, the following research question appears.
How to foster an Eco-design approach into pharmaceutical NPD?
The hypothesis related to this question is that: *An Eco-design maturity model could be adapted to track its integration in both meso and micro level f the pharmaceutical NPD process.*

2 METHODOLOGY

The goal of this paper is to propose a model to ensure their integration, using a specific case of the pharmaceutical industry, through the semi-systematic literature review [14] of the existing Eco-design approach and tools. This article aims to propose a specific maturity model for pharmaceutical industries that allow the tracking of "how" Eco-design is performed.

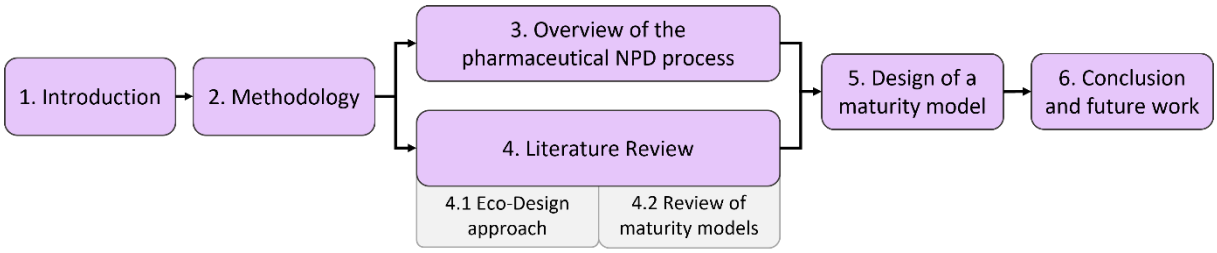


Figure 1. Logic flow of the article

Figure 1 shows the logic flow of the article. The chapter three of this article gives an overview of the pharmaceutical process in order to understand the industrial context and its associated needs. The understanding of medicine product aspects and its phases of development are key knowledge to succeed

in the implementation of Eco-design. It is necessary to understand how it works and what the most important phases of the implementation of the Eco-design approach and its tools are.
This part was mainly performed through review [14] of documentation, and scientific publication from pharmaceutical companies and associations.
Then, a semi-systematic literature review [14] was conducted regarding the Eco-design approach (chapter 4) and Eco-design maturity models (chapter 5). This part was mainly performed through peer-review papers available on Eco-design and on maturity models.
A comparison between the existing maturity models has been done in order to analyze and evaluate them regarding specific criteria. The strengths and weaknesses of each model has been assessed and is presented in detail in the paper.
Finally, a proposition of an Eco-design maturity model for the pharmaceutical industry is suggested in the chapter six, which could fill the gaps identified from other models.

3 OVERVIEW OF THE PHARMACEUTICAL NPD PROCESS

The purpose of this part is to highlight some aspects of the pharmaceutical process. The goal is to better understand how it works, and what the constraints that we might face when integrating the Eco-design approach are [15]. A medicine is composed of one or several Active Pharmaceutical Ingredients (API) [16], mixed with excipients, in order to obtain a galenic form. Then, the galenic form is either stored in packaging or a device for the use phase of the patient.

Pharmaceutical NPD processes are shared within every pharmaceutical company from organic chemistry to biologicals [17]. The NPD process is subject to many regulations and norms which restrict the work within the pharmaceutical sector. The numerous steps and regulations are required to ensure the efficacy of the final product and the safety of patients.

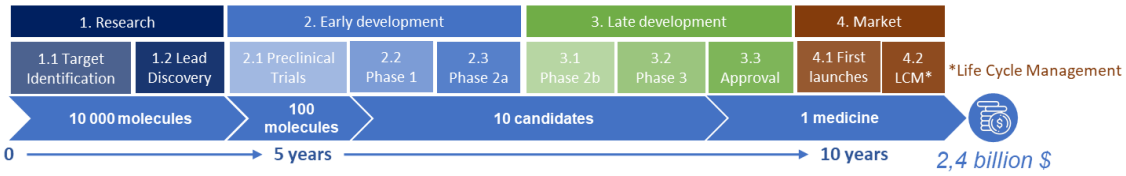


Figure 2. Pharmaceutical NPD process, adapted by Luu et al. [18] from Romasanta [19]

The research phase implies target identification and lead discovery. In this phase the origins of a disease and the potential targets for the future medicine are identified. Then, scientists have to identify and filter the best molecules with a therapeutic interest. Even though this phase is the basis of the pharmaceutical NPD process, it is a very specific one because for a lot of projects, companies acquire small pharmaceutical companies with knowledge and skills for a specific therapeutic application. Thus, the project directly starts at the second stage of the process.

Early development is the second stage of the process. Within this stage there are three different sub-phases. Preclinical trials relate to the investigation of specific effects of the API. For example, its efficacy will be tested. Those trials are conducted in vitro (with cells), in vivo (with animals), or with informatic models. During this phase, researchers need the largest number of API in order to run all the necessary tests.
The first tests in humans begin in phase 1. The tests assess the kinetic profile of the API and its metabolism. The selected humans are healthy probands. In order to administer the medicine, a preliminary galenic form is set. However, this form is usually different from the last one that will be produced at the end of the process.
The final sub-phase of early development concerns the phase 2a clinical trial. During this phase, scientists have to determine the therapeutic dose with the best efficacy with minimal side effects. Another galenic form is generated, this time closer to the final form. This step is highly important because it has to reflect the effect of the final product.

The following stage, late development, starts at the end of the phase 2a. Composed of three sub-phases, the first one, phase 2b is exactly the same as phase 2a with a larger panel of patients. The phase 3 focuses

on the efficacy of the new medicine. To do so, either the patients are given the new medicine or a corresponding existing treatment, or in some cases, a placebo.
Once the previous phases have been performed and have demonstrated good results, applications for authorization are sent to the authorities related to the market targeted countries. The application differs from one country to another because of their regulations.

The last stage of the process, market, refers to the tracking of the new medicine in real conditions. The medicine is now available for use by patients, but it is still tracked in order to identify any potential side effects, to ensure safety of patients. The 2.4 billion dollars at the end of the process represents the average amount of money required to develop a drug.

Unlike common product design processes where processes, in the pharmaceutical sector, the industrialization phase starts as soon as the API shows positive results. Furthermore, the pharmaceutical NPD process requires a lot of time. The overall process can last more than ten years, which means that stages such as early or late development can last approximately between five to eight years.

This short description of stages and phases of the pharmaceutical NPD process put the emphasis on the complexity of this sector. When integrating Eco-design, it is important to understand this process with details, the major steps with the biggest environmental impacts and the stakeholders involved.

3.1 Eco-design opportunities within the pharmaceutical NPD process

Like any other design process, the pharmaceutical one does not avoid the basic principles of design. We can indeed compare the opportunities to integrate Eco-design within the process to the design paradox. When starting a project, designers have a large panel of possible actions. Unfortunately, they do not have a large quantity of data about the design project, thus, complicating the decision making. At the end of the project, the quantity of information available is important. However, because of the progress that has been made during the project, only a few options are available. Consequently, it is mostly in the middle of the development that designers have the most opportunities, between the concept and detailed development [18]. Nowadays, environmental risk assessment is performed for medicine product. Nevertheless, it does not include the environmental profile in a lifecycle perspective."

In order to integrate the Eco-design approach within Research & Development (R&D) processes, one of the major aspects is to understand who the involved stakeholders and their related activities are. Those people are divided into different functions. The following is a non-exhaustive list of R&D functions: Project management, pharmaceutical sciences (Biologics, Chemicals, Manufacturing), Clinical operations, Clinical supply chain, Clinical strategy, Regulatory affairs, etc. Each of these functions gather people with different goals and impacts on the process.

Through this quick description, we can imply that there is a need to integrate a Lifecycle mindset in the design of medicine product. It also seems relevant to support the management by proposing a way to track the Eco-design integration.
Alongside to these needs, some constraints are briefly described. The diversity of functions, and therefore culture / way of working for a same product is one example. We can also mention the wild range of technologies used to develop medicine. Other constraints that R&D are facing is the time. As described, the medicine NPD is a long journey and usually, every action who led to a time reduction of development is welcomed. Finally, as a last example, actors of R&D are usually not familiar with environmental issues and therefore do no integrate those aspects in the development, at least with a holistic and Lifecycle perspective.

4 LITERATURE REVIEW

A literature review of the Eco-design approach, tools, and models was conducted in order to better understand what Eco-design is and what areas should be improved upon.

4.1 Eco-design approach and tools

The Eco-design can be defined as “a systematic approach, which considers environmental aspects in design and development with the aim to reduce adverse environmental impacts throughout the life cycle of a product”[20]. The concept of Eco-design appeared in the 1990’s within the scientific community. Even though this field of research is recent, a lot of different environmental approaches have been used for the past years [21].
In an effort to allow the integration of Eco-design, Brones et al., 2015, proposed a specific framework based on the assessment of more than 50 integration models [13]. This model is the one that we used for the integration of the Eco-design approach into the pharmaceutical NPD process.
The authors built a model with a vertical and transversal integration. The transversal integration, also called “Soft side” refers to the human factors and culture of the company when implementing change within an organization. The vertical integration refers to systemic levels which can be divided into three levels: Macro for the strategic objectives; Meso for the tactical, process management; and Micro for the operational, tools.

Eco-design tools are directly related to the product and its environmental footprint. A lot of Eco-design tools are available and permit the products environmental performance assessment & improvements. Rousseaux identified 629 Eco-design tools which can be use by any designers [22]. Those tools can be divided into different categories [23]. For example, the tools can be quantitative (e.g., Life Cycle Assessment), semi-quantitative, or qualitative. Additionally, the tools do not have the same impacts regarding the process phases [24].
One of the most well-known and recognized tool is the Life Cycle Assessment (LCA). This quantitative tool is a systemic phased approach and consists of four steps: goal definition and scoping, inventory analysis, impact assessment, and interpretation. Thus, depending on the stage of the process and the associated data available, not all the tools can be used. As an example, the inventory of a LCA requires a huge quantity of data to remain relevant and therefore may not be adapted for early development stages of design.

4.2 Eco-design Maturity Models

A maturity model is specific tool that can be used by organizations in order to improve their performances regarding specific criteria. Maturity models are divided into different levels, usually from one to five, but sometimes more or less. The number of levels depends on the organization’s needs. Each level is characterized by certain requirements that have to be met [25]. The levels are also ordered sequentially from an initial (level 0 or 1) to an end level (level 5 or 6). The latter is the perfection level, the final goal of the organization. Kohlegger defines maturity models as “phases of increasing quantitative or qualitative capability changes of a maturing element in order to assess its advances with respect to defined focus areas” [26].

Nowadays, a lot of maturity models are available and can be used to reach maturity levels regarding different goals. The models have numerous goals, some of them focus on quality, some on management, others on cybersecurity, etc. Since each model is focused on a specific topic, the use of a model can only lead to improvements directly linked to that specific topic. In other words, when using a maturity model for innovation, solely the capability levels of the organization will be likely to improve [27]. Indeed, those models need to be based on solid scientific elements about the concerned topic.
If maturity models emerged in the seventies, it is merely a few years ago that models specifically designed for the Eco-design approach appeared [28]. Most of those Eco-design maturity models are based on the existing models available in the literature. The Organization Project Management Maturity Model (OPM3) and Capability Maturity Model Integration for Development (CMMI dev) [29], are popular models that have been commonly used by multiple organizations throughout time.

4.2.1 Synthesis of the existing maturity models

Due to the significant role of those existing models in the creation of the Eco-design maturity models, we will depict the OPM3 model [30] and how it operates. The purpose of OPM3 is to provide a way for organizations to understand organizational project management and aims to support organizations to plan for improvements regarding their organizational project management maturity. OMP3 categorizes capabilities in terms of their association with the five project management process groups: Initiating, Planning, Executing, Controlling, Closing. A capability being a specific competency that must exist in an organization in order to execute project management processes and deliver project management services and products. Capabilities are ordered as incremental steps. The application method is pretty simple because it relies on four steps: prepare the assessment, perform the assessment, plan for improvements, and implement the improvements.

For the purpose of understanding how maturity models were built, how they work and what we could get from them, an analysis and synthesis of diverse maturity models have been completed. This maturity model's analysis began with three generic maturity models. The OPM3 and CMMI, previously mentioned and the Occupational Health and Safety Positioning Grid (GPPST) [31]. Then, six different maturity models based on the Eco-design approach and/or on the environment were selected. The model's analysis allowed their assessment regarding specific criteria directly related to the need of a pharmaceutical company, focusing on the NPD process.

The Ecodesign Maturity Model (EcoM2) was the first model to be analyzed [32]. The model designed by Pigosso in 2012 focuses on the integration of Eco-design within companies. Five maturity levels permit the tracking and evaluation of this implementation from the "no consideration" to the "global integration into the company strategic planning". The use of this model is not only based on the diagnosis of the current situation but also on a whole process of improvement. In summary the application method works as follow: After the realization of the diagnosis, propositions are suggested for improvement projects. Then, those projects are sorted in a portfolio management in order to plan their implementation and assess the results.
The evaluation of the company's maturity profile can be completed by the assessment of Eco-design practices. Eco-design practices are considered as "Eco-design activities that aim at integrating the environmental issues into product development and related processes and which application can be supported by Eco-design techniques and tools". The model identifies two main patterns for Eco-design practices: the practices related to the product development itself (Management) and the practices related to the technical issues of product design (Operational). Additionally, Eco-design methods, techniques and tools have been identified to support the application of those practices.

The distinction between management and operational dimensions is not anew. In fact, several authors established this distinction. In 1998, Fiksel and McDaniel presented differences among organizational and technical issues for Eco-design implementation [33]. Later, Pascual and Stevels divided Eco-design into a managerial dimension [34], related to business aspects of the discipline, and an environmental dimension, related to the technicalities of the products. The parallel can also be drawn with Brones and the vertical integration of Eco-design, referring to different systemic levels: macro, meso, micro, as shown in chapter four.

Once the Eco-design practices have been assessed through a series of interviews with the appropriate stakeholders, the maturity profile of the company is defined. Using this maturity profile, the company will be able to select the right practices to focus on and how to implement the Eco-design approach with Eco-design projects.

The second model is the Eco-Innovation Maturity Model (Eco-Mi) designed by Xavier in 2020 [35]. This model refers to the following key question: How to systemize eco-innovation practices in order to support eco-innovation integration and evolution of organizational maturity?
Similarly to the EcoM2, this method not only encompasses diagnosis of the Eco-design profile, but a whole process of implementation for improvements. Eco-Mi is based on four dimensions of innovation management: Strategy, Structure, Resources, and Culture.
There are five maturity levels related to the evolution of organizational maturity, from the non-application of eco-innovative practices to their application and holistic integration. A total of 142 Eco-

innovative practices were identified and categorized into the previous dimensions. The appraisal of each practice is carried out by the means of capability levels addressed to all of the practices.
The application method is composed of three steps. First, the maturity of the company is assessed. Then, an analysis conducted by specialists in order to provide improvement propositions. Finally, the results are controlled and monitored by the means of a steering committee and the use of a certain bridging tool to support the improvement strategy.

The third one is the Eco-design Maturity Meter [36][37]. This tool is a "gamified" platform for any organizations that would like to assess the maturity of Eco-design and life cycle thinking into their product/service offer [38]. The developed method is based on two publications on Eco-design and environment and supported by different partners. The authors defined a series of 12 questions in order to evaluate the maturity level of the company. Four maturity levels have been set up, from level one initial to level 4 controlled and improved. This tool presents the advantage of providing instant results and benchmarks to compare your score with other companies from the same sector.

Then, the fourth one, named Convergence [39] is a steering method which helps stakeholders with their decisions and how to integrate environmental and social concerns into the company's strategy. This method is not exactly a maturity model but because of its structure some similarities have been identified and need to be further analyzed. In summary, the Convergence method answers specific questions, commonly shared by each Eco-design maturity model:
What needs to be implemented into the Eco-design process? What Eco-design tools should be used? What actions have priority? How does one favorize the diffusion of environmental knowledge?

Two additional maturity models focused on the environment were selected: the Maturity Grid for Environmental Management (MGEM) [40], and the Maturity Grid Assessment Tool (MGAT) [41]. These models are meant to improve the environmental performances of products through the use of different environmental tools. The goal is to encourage debate and discussion about the results and the room for improvement. While the MGAT is focused on environmental conscious design on medical devices, the MGEM has a larger scope. Founded on five drivers: ISO 14001, Cleaner Production, Eco-design, Green Supply Chain Management, and Life Cycle Analysis, it aims to identify opportunities in the environmental management of industrial companies.

4.2.2 Evaluation of the Eco-design maturity models

The selected models are based on a semi-systemic literature review [14]. As the last years have shown an increasing number of Eco-design maturity models, it does not represent an exhaustive list. Nevertheless, the selected maturity models were chosen carefully in order to represent the globality of existing models.

As presented previously, each maturity model has been evaluated regarding specific criteria. The criteria that we defined are related to the industrial needs and constraints.

Thus, the first criterion, called "precision" refers to the scientific background of the model. The quality of the results is correlated to the design process of the model.
The second one, called "simplicity" refers to the functional structure of the model and how easy it is to understand its functioning.
The third one "for everyone" focuses on the public concerned by the use of the model. As an example, a really complex model would only be used by Eco-design experts.
The fourth one "quickness" refers to the length of time it takes for users to fill up the model with the accurate information.
The last one "for any organization" refers to the fact that the model is generic enough to be used in any type of organization without specific implementation barriers.

The assessment of each criterion was done by addressing a specific grade/score from one to three. A score of one meant that the criterion was not respected; a score of two, the criterion was respected; and a score of three, the criterion is completely respected. The results obtained are presented in the figure below.

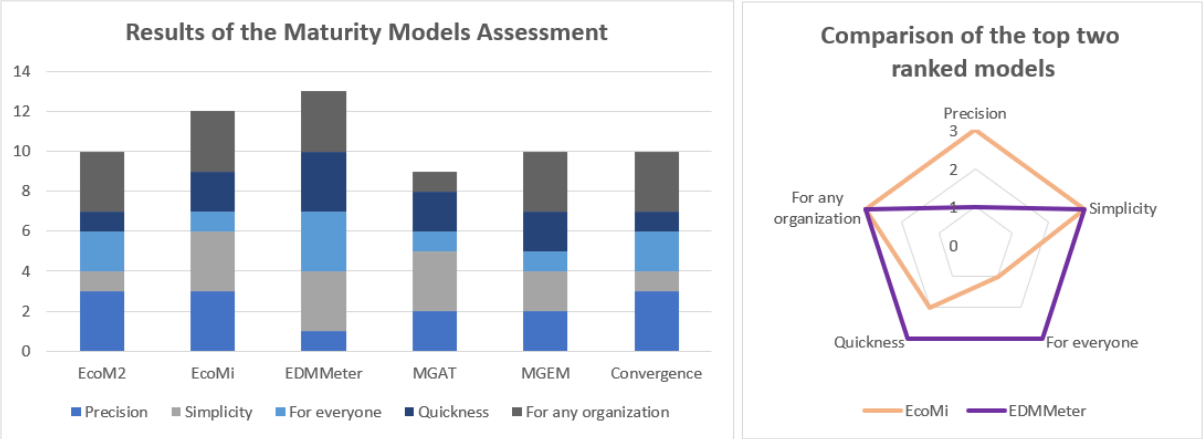


Figure 3. Comparison between Eco-design Maturity Models

The analysis of this figure emphasizes the fact that all the models have a good global score. However, two models stand out, the Eco-Mi and the Eco-design Maturity Meter. The radar diagram allows for a better identification of the differences that exist between those two models. The analysis of this diagram helps us understand the strengths and weaknesses of each model. This diagram emphasizes the fact that the models show big differences. On one hand, Eco-Mi is a really precise model with a lot of scientific information. However, the use of the model is fastidious and cannot be carried out by everyone. In addition, the time required to fulfill this model is important.
On the other hand, EDMMeter is quite the opposite. All the inconveniences of Eco-Mi are turned into strengths here. The model is really simple, and the results are obtained really quickly. Nevertheless, the quality of the results is less important than Eco-Mi.

To conclude on this assessment, this analysis demonstrates that the model that we will design for pharmaceutical R&D project managers has to be a combination of those two models. A model easy to use, which does not require a lot of time to complete, based on a solid and concrete scientific background.

5 DESIGN OF A SPECIFIC ECO-DESIGN MATURITY MODEL

The Eco-design maturity model focuses on the integration of Eco-design within NPD processes and not on the improvement of products' environmental performances. Nowadays, the assessment of environmental performances of products can be conducted efficiently through LCA for example.
The other aspect, the integration, intent to track how Eco-design is performed within the projects and to diffuse the Eco-design mindset within R&D stakeholders. Maturity models follow the integration of such elements. For instance, Pigosso clarified that maturity levels are "tied to the degree to which companies have institutionalized Eco-design practices. In this sense, the environmental profile of products is not considered in the definition of maturity in Eco-design".
However, most of the Eco-design maturity models are generic and designed for the use of any type of company. The potential problem that follows is that those models may not be well adapted for all the situations. Given that circumstance, the design of a specific maturity model adapted to the pharmaceutical NPD process seemed to be appropriate [42].

The presented project aims to define and design a specific maturity model which could be used by any pharmaceutical company in order to support the integration of the Eco-design approach, within their R&D processes. Managers are at the forefront of Eco-design integration within the NPD process. Therefore, the maturity model that we are designing has to be adapted for their way of working.
The review of existing models and the analysis of the pharmaceutical NPD process let us to redefine the scope of the project [43]. As mentioned previously, the Eco-design integration which represents the heart of this project is founded on the publication from Brones and Monteiro de Carvalho. At first, the focus of attention was on the meso level (process management). Then, we identified a potential interest in including the micro level (operational) into the model. Thus, the maturity model that we propose is

divided into two parts: the organizational and the operational one, respectively referring to the meso and micro level.

This way, the first part of our project was to define the Eco-design maturity levels. Five maturity levels were identified. The first one refers to the incomplete integration of Eco-design. The latter one corresponds to the systemic and holistic integration of Eco-design. Due to the distinction between management and operational parts, the same sub-categories were added to these levels. Therefore, it is possible to determine the maturity level of Eco-design management, and the maturity level of Eco-design tools used.

The diagram below represents how the combination of the operational and management maturity levels permits the identification of the Eco-design maturity level of the phases and/or the project.

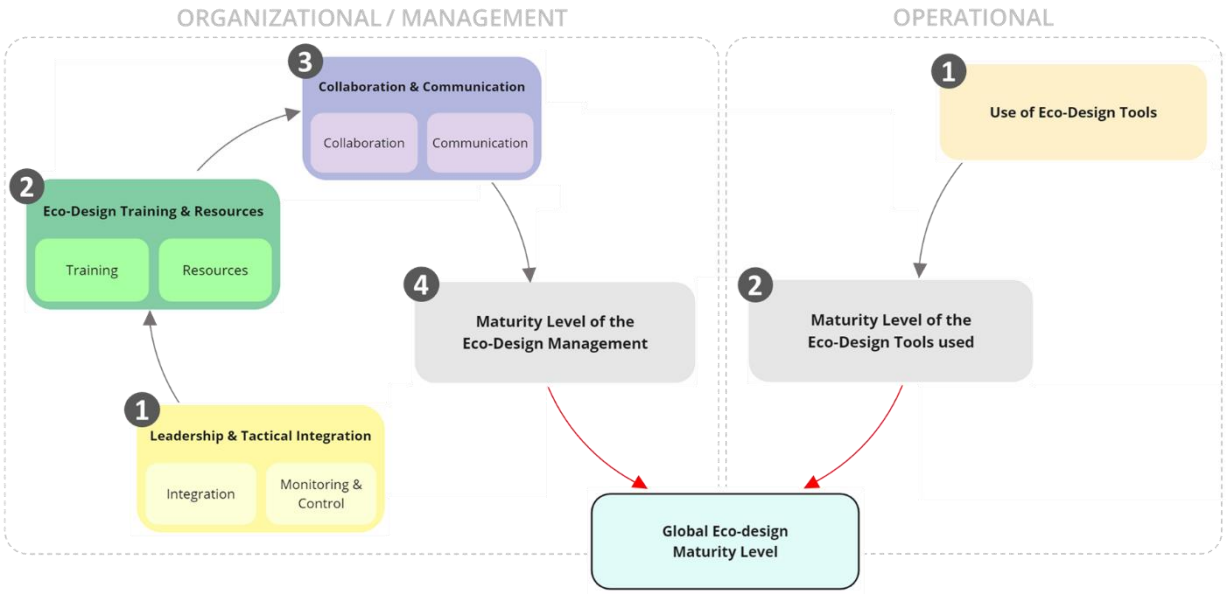


Figure 4. Application method of the eco-design maturity model for pharmaceutical companies

The organizational part of the maturity model was established by the analysis of Eco-design management practices available in existing Eco-design maturity models, such as EcoM2, Eco-Mi and the Ecodesign Maturity Meter. Firstly, the practices from those models were identified and analyzed with the aim of outlining which ones were the most suited to our pharmaceutical NPD process. In parallel, practices were compared in order to identify redundancies. The objective of this step was to ascertain the most relevant practices linked to our industrial and scientific needs.
Secondly, the selected practices from those different maturity models were combined with the purpose of establishing a limited list of Eco-design management practices that fits into the assessment of R&D process management maturity. Finally, a total of 27 practices were identified and distributed among the above-mentioned categories.
Due to the results from the maturity model assessment, we want to combine scientific and industrial needs. Hence, the number of practices to be evaluated by managers had to be significantly reduced to limit the time required for the use of the model. Nowadays, companies have to be competitive, to produce more, with better quality and better services. Therefore, it is complicated for the stakeholders within the company to take time from their schedule to think about other aspects of their work, such as the environment [44]. However, the model that we propose aims to be as precise and quick as possible. The Eco-design Maturity Model is at the border of scientific and industrial needs [45].

The operational part is directly related to the use of Eco-design tools during the phases of the process. The identification of the tool's maturity level allowed the categorization of the existing Eco-design tools regarding their performances. Consequently, if it is possible to identify which tools have been used during the project, the maturity level related to those tools can be determined.
Furthermore, the analysis and review of Eco-design tools acknowledged the presence of tools categories such as quantitative, semi-quantitative, qualitative. The correlation between the type of tools and the

phases of the pharmaceutical NPD process emphasized the fact that all the tools are not always relevant for each phase. For instance, quantitative tools (e.g., LCA) cannot be used during the early stage of the process due to the lack of available data. Therefore, one of the biggest aspects of our model was to help project stakeholders in the identification of the most suited Eco-design tools regarding their function and the concerned project phase.

The use of the model follows a specific path. At the beginning of each phase, R&D managers are guided to the Eco-design maturity model. The model will guide users during the whole phase. The first task is to select the appropriate process phase (e.g., Research). Then, users have to select the function for which they are working for (e.g., Pharmaceutical sciences). Consequently, a specific table containing all of the suitable tools appears. This table has to be used as a checklist to follow during all the phases.
R&D managers will refer to that table in order to track what are the available tools and to indicate the tools that have been used. As we mentioned earlier, the goal of the model is not to give the access to all of the Eco-design tools available in the literature, only to provide the appropriate tools to the managers. Throughout the phase, managers refer to this table and validate the checkbox whenever the tools have been used. The calculation of the maturity level corresponding to the tools will depend on the number of the utilized tools and on their categorization.
At the end of the phase, managers can finally assess the Eco-design management maturity level. In order to evaluate the management of Eco-design, they have to self-assess the 27 Eco-design practices by attributing them a score. The score directly refers to the maturity levels identified, which are defined as "capability levels" in that situation. Hence, the score attributed goes from one to five, the latter being the best possible rating.
As a result of the assessment of every practice, the maturity level of Eco-design management is established. Moreover, a radar diagram is generated enabling a better visualization of the scores. The presented outcomes can also be compared to the results from anterior phases of the project, or even to the results from other projects.
To conclude this maturity assessment, both of the maturity levels are combined, yielding the global maturity level of the phase.

As mentioned through the presentation of the pharmaceutical NPD process, the process is divided into several stages and phases which can last many years. Thus, it would be counterintuitive to conduct one and only maturity assessment at the end of the project. Given that circumstance, the maturity level of a project would be determined as follows. Along the phase, managers refer to the Eco-design tools table. When the phase is completed, they evaluate their management maturity level. Results are combined in order to provide a global maturity level of the phase. This procedure is replicated for each phase. Finally, all of the levels are gathered to draw the maturity level of the project.

6 CONCLUSION & FUTURE WORK

The proposal of a specific Eco-design maturity model for the pharmaceutical NPD process could help companies to achieve some of their environmental goals. As presented during this article, many Eco-design maturity models are available in the literature. However, none of those maturity models target a specific sector such as the pharmaceutical one. We developed a model which is based on existing maturity models and focuses on the pharmaceutical NPD process. At first, only the Eco-design tools suited for pharmaceuticals were selected. Secondly, the use of the model indicates to users what the adequate tools to use regarding the current process phase are and the specific function of the user (e.g., Pharmaceutical sciences). In addition, the Eco-design management practices selected represent the analysis and evolution of the Eco-design mindset in pharmaceutical projects. Finally, a main aspect of our model is that it needed to be functional considering both of the scientific and industrial needs and backgrounds. The proposed approach is theoretical. Therefore, our model needs to be tested and evaluated. A first step could be a review of the model by Eco-design experts, in order to ensure the relevance of the model from an environmental perspective. The adaptation to the needs and current way of working of R&D managers is crucial. Therefore, inputs from them are required to remain relevant from a user's side. A survey could be a way to gather data regarding their current vision of Eco-design and how they envision to integrate it. Those information would help us in the design of a prototype which could be tested by R&D practitioners.

7 REFERENCES

[1] Takala, M., *Environmental Awareness and Human Activity*, International Journal of Psychology, Vol., N°26, p585–597, 1991.

[2] Markham, A.C., *A Brief History of Pollution. Routledge*, 1st Edition, 2021.

[3] Mura, M., Longo, M., Micheli, P., Bolzani, D., The Evolution of Sustainability Measurement Research, International Journal of Management Reviews, Vol., N°20, p661–695, 2018.

[4] UNEP., *21 Issues for the 21st century: results of the UNEP foresight process on emerging environmental issues*, UN Environment Program, 2017.

[5] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*, *Ecology and Society*, Vol., N°14, p2-32, 2009.

[6] Persson, L., Carney Almroth, B.M., Collins, C.D., Cornell, S., de Wit, C.A., Diamond, M.L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M.W., Søgaard Jørgensen, P., Villarrubia-Gómez, P., Wang, Z., Hauschild, M.Z., *Outside the Safe operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities*, Environmental Science & Technology, Vol., N°56, p1510-1521, 2022.

[7] Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R.J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., Singh, C., Greve, P., Gerten, D., Keys, P.W., Gleeson, T., Cornell, S.E., Steffen, W., Bai, X., Rockström, J., *A planetary boundary for green water*, Nature Reviews Earth & Environment, Vol., N°3, p380-392, 2022.

[8] Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., *The Limits to Growth (1972), in: The Limits to Growth (1972)*, Yale University Press, p101–116. 2013.

[9] Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B., *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, IPCC, 2022.

[10] UNEP., *Annual report 2021*, UN Environment Program, 2021.

[11] United Nations, *THE 17 GOALS | Sustainable Development*, https://sdgs.un.org/fr/goals, accessed the 29/04/2022.

[12] Jose, A., Lee, S.-M., *Environmental Reporting of Global Corporations: A Content Analysis based on Website Disclosures*, Journal of Business Ethics, Vol., N°72, p307–321, 2007.

[13] Brones, F., Monteiro de Carvalho, M., *From 50 to 1: integrating literature toward a systemic ecodesign model*, Journal of Cleaner Production, Vol., N°96, p44-57,2015,

[14] Snyder, H., *Literature review as a research methodology: An overview and guidelines*, Journal of Business Research, Vol., N°104, p333–339, 2019.

[15] Luu, D.-N., Maier, C.-J., Maranzana, N., Gachet, H., Aoussat, A., *Integration of environmental aspects into NPD process: a framework for the Pharmaceutical Industry*, IFIP 18th International Conference on Product Lifecycle Management, 2021.

[16] ISPE., *Active Pharmaceutical Ingredients, Baseline Guide*, Vol., N°1, 2007.

[17] ICH., *Pharmaceutical Quality System Q10*, 2008.

[18] Luu, D.-N., Gachet, H., Maier, C.-J., Maranzana, N., Aoussat, A., *Eco-design and medicine: Opportunities to implement eco-design in the pharmaceutical R&D process*, Journal of Cleaner Production, 2022.

[19] Romasanta, A. K. S., van der Sijde, P., van Muiljlwijk-Koezen, J., *Innovation in pharmaceutical R&D: mapping the research landscape*, Scientometrics, Vol., N°125, p1801-1832, 2020.

[20] ISO, *ISO 14006:2020(en), Environmental management systems - Guidelines for incorporating ecodesign*, 2020.

[21] Schäfer, M., Löwer, M., *Ecodesign-A Review of Reviews*, Sustainability, Vol., N°13, p315, December 2020.

[22] Rousseaux, P., Gremy-Gros, C., Bonnin, M., Henriel-Ricordel, C., Bernard, P., Floury, L., Staigre, G., Vincent, P., *Eco-tool-seeker: A new and unique business guide for choosing ecodesign tools*. Journal of Cleaner Production, Vol., N°151, p546–577, 2017.

[23] Bellini, B., Janin, M., *Ecoconception: état de l'art des outils disponibles*, Techniques de l'ingénieur, 2019.

[24] Janin, M., *Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus*, ENSAM, 2000.

[25] Klimko, G., *Knowledge Management and Maturity Models: Building Common Understanding.* European Conference on Knowledge Management, p269-278, 2001.
[26] Kohlegger, M., Maier, R., Thalmann, S., *Understanding Maturity Models. Results of a structured Content Analysis*, Conference I-KNOW '09 and I-SEMANTICS '09, 2009.
[27] Maranzana, N., Gartiser, N., De Guio, R., Caillaud, E., *Proposition d'un modèle de description des capacités d'innovation basé sur les processus et les pratiques*, 19e Congrès Français de Mécanique, 2009.
[28] Gouvinhas, R., Reyes, T., Manfredi Naveiro, R., Perry, N., Romeiro Filho, E., *A proposed framework of sustainable self-evaluation maturity within companies: an exploratory study*, International Journal on Interactive Design and Manufacturing, Vol., N°10, p319-327, 2016.
[29] Chrissis, M. B., Konrad, M., Shrum, S., *CMMI (Capability Maturity Model Integration): Guidelines for Process Integration and Product Improvement*, Addison-Wesley Professional, 2011.
[30] PMI., *Organizational Project Management Maturity Model (OPM3)*, Knowledge Foundation. Pennsylvania, 2003.
[31] INRS, *Grille de positionnement en santé et sécurité au travail (GPSST)*, 2020.
[32] Pigosso, D., Rozenfeld, H., McAloone, T. C., *Ecodesign maturity model: a management framewok to support ecodesign implementation into manufacturing companies*, Journal of a Cleaner Production, Vol., N°59, p160-174, 2013.
[33] Fiksel, J., McDaniel, J., Spitzley, D., *Measuring Product Sustainability*, Journal of Sustainable Product Design, Vol., N°6, p7-18, 1998.
[34] Pascual, O., Stevels, A., *Ecodesign in industry is not an environmental issue*, International congress and exhibition: Electronic goes green, p.855-859, Berlin, 2004.
[35] Xavier, A., Reyes, T., Aoussat, A., Luiz, L., Souza, L., *Eco-Innovation Maturity Model: A Framework to support the Evolution of Eco-Innovation Integration in Companies*, Sustainability, Vol., N°12, p3773, 2020.
[36] Boucher, J., Jenny, C., Plummer, Z., Schneider, G., *How to Avoid Pigeonholing the Environmental Manager?*, Sustainability, Vol., N°10, p2538, 2018.
[37] Haned, N., Lanoie, P., Plouffe, S., Vernier, M-F., *Profitability of Ecodesign: An Economic Analysis*, Bibliothèque Nationale de France, 2014.
[38] Ecodesign Maturity Meter,. https://myecodesignmaturity.eu/en.html, accessed the 16/04/2022.
[39] Reyes, T., *Convergence, L'éco conception, source d'innovation*, https://convergence.utt.fr/, accessed the 12/04/2022.
[40] Campos, T.L.R., *Maturity grid to evaluate and improve environmental management in industrial companies*, Clean Technologies and Environmental Policy, Vol., N°22, p1485-1497, 2020.
[41] Moultrie, J., Sutcliffe, L., Maier, A., *A Maturity grid assessment tool for environmentally conscious design in the medical device industry*, Journal of Cleaner Production, Vol., N°122, p.252-265, 2015.
[42] Knight, P., Jenkins, J., *Adopting and applying Eco-design techniques: a practitioner's perspective*, Journal of Cleaner production, Vol., N°17, p549-558, 2009.
[43] Maier, A. M., Moultrie, J., Clarkson, P. J., *Assessing Organizational Capabilities: Reviewing and Guiding the Development of Maturity Grids*. IEEE Transactions on Engineering Management, Vol., N°59, p138-159, 2010.
[44] Luttropp, C., Lagerstedt, J., *EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development*, Journal of Cleaner Production, Vol., N°14, p1396-1408, 2006.
[45] Faludi, J., Hoffenson, S., Kwok, S. Y., Saidani, M., Hallstedt, S., Telenko, C., Martinez, V., *A Research Roadmap for Sustainable Design Methods and Tools*, Sustainability, Vol., N°12, p8174, 2020.

Contact : Simon Massot
Contact details
Sanofi
82 avenue Raspail,
94250 Gentilly, France
simon.massot@sanofi.com

EXTENDED SUMMARY: A STATE-OF-THE-ART ON HOW KNOWLEDGE MANAGEMENT IMPROVES CONSULTANTS' PERFORMANCE

MohammadReza Mirafzal[1], Piyush Wadhera[2], Julie Le Cardinal [3]
[1] LGI CentraleSupelec University, mohammadreza.mirafzal@centralesupelec.fr
[2] Sibylone, pwadhera@sibylone.fr
[3] LGI CentraleSupelec University, julie.le-cardinal@centralesupelec.fr

Abstract: *This study aims at revising the history of knowledge management in consulting firms to discover what sources, technologies, tools, and users have been used and how knowledge management may thus help to improve consultants' performance within a consulting firm. An analysis of the state-of-the-art is proposed to tackle the problem and give some insights. Through this analysis, the authors propose key indexes to improve consultants' performance via a knowledge management system. In order to achieve this goal, the state of the Art of knowledge management applied to consulting firms is discussed in the first section. Section 2 presents a brief multidisciplinary study of works related to the subject. The methodology is then discussed in section 3. Section 4 focused on results and proposed insights about literature. Outputs are demonstrated in section 5, and finally, a brief conclusion is provided in the last chapter of this study.*

Keywords: Knowledge Management, Consulting Organization, Consultant Performance

1 KNOWLEDGE MANAGEMENT AND CONSULTING FIRMS

With the global technological growth in organizations, transforming data into information and knowledge plays a more significant role in innovating and leading the market's competition. Tangible sources are vital to an organization's life. On the other hand, intangible sources, such as knowledge and experience, provide innovation, creativity, and better decision-making. Nowadays, expertise is more accessible, knowledge and experience accumulate effortlessly, and data is stored more effectively. Therefore extracting knowledge – often called the intellectual capital [1] – has become a vital asset to any business firm [2]. Knowledge management captures, shares, disseminates, and responds to the existing knowledge in an organization [2] and is thus an ideal solution for intellectual capital management.

It is important to note that knowledge management activities are not directly related to business income or do not provide cost-efficiency directly. However, taking advantage of knowledge as a vital resource creates an opportunity to improve organizational performance in other processes [3]. Knowledge management tries to enhance know-how or savoir-faire in an organization by capitalizing on knowledge. As a result, the company may achieve better individual or organizational performance by enhancing personal or organizational competency [4]–[6]. In some cases, by capturing clients' information through consultants, knowledge management may help define a better market strategy or provide a better client solution [7]. Therefore, it is plausible to say knowledge management helps develop cost-efficiency in the long term.

A consulting company is a knowledge seller by nature [1], [2], [8], [9]. Organizations prefer to focus on their core business activity in the competitive professional market and outsource other business processes to a consulting firm to reduce expenses and improve performance in the market. Consulting firms thus help companies by taking up a pivotal yet secondary role in their business processes, such as improvements in professionalism or better strategic and operational articulation of complex systems and processes [10]. Therefore, consulting firms' experience and knowledge can bring significant advantages to these companies [1], [2], [10]. Moreover, recognizing clients' needs

concerning their industry sector is the critical task of a consulting organization that makes them unique in the market [1]. In this way, acquiring and sharing experience and knowledge inside a consulting organization is essential to keep them alive in the market.

A consulting company's experience and knowledge come from its consultants' projects and missions [2]. Accessing these experiences and knowledge could be challenging in consulting firms because they are stored in consultants' brains and documents. As a matter of fact, consultants are the primary stakeholders of a consulting firm's knowledge management system and practices. In light of these arguments, the following study focuses on the literature on knowledge management in consulting firms. It sheds light on KM resources, techniques, technologies, tools, users, and critical issues concerning previous scientific cases of KM in consulting firms. Ultimately, the authors aim to answer a primary problem of this study:

P1: How to improve consultants' performance via a knowledge management system?

2 RELATED WORKS

Given the multidisciplinary nature of the subject, review articles in the domains of knowledge management, knowledge management and consultancy, e-business, and information management were thus studied. Knowledge management studies became popular in the 1990s when several studies showed their value [11]–[19]. With this growth and attention to the subject, review articles started to summarize some points of view for researchers, especially in consulting firms. For instance, in general knowledge management, Dunford [9] reviewed studies in knowledge management and claimed that knowledge acquisition and application processes correlate strongly with a firm's capacity to innovate. In 1999, Sarvary [1] examined centralized and decentralized methods in consulting firms to understand KM's impact on competitiveness. Apostolou and Mentzas [8] analyzed ten articles (about implementing KM in consulting firms) from literature to compare the alignment of people, technologies, business strategies, and goals related to implementing a KM system.

More recently, Mahmoud et al. [20]] reviewed previous cases of implementing knowledge management systems to increase organizational performance and adapt knowledge management strategies and business strategies in consulting firms to cover knowledge management in consultancy. Mazorodze and Buckley [21] studied knowledge management in knowledge-intensive organizations to find knowledge management processes, infrastructures, and barriers in knowledge-intensive organizations.

After some years, knowledge management started integrating with other disciplines, and studies started to be published. In e-business and information management, Kumar et al. [22] studied 36 articles about IT consulting firms and showed, through literature, that a crucial competitive edge for IT consultancy firms is knowledge management activities, especially those focusing on human resources and clients. The impacts of IT systems and human resources strategies on knowledge management performance were studied by Koch [23]. The author analyzed this hypothesis in two engineering organizations that stuffed more than 500 employees. The author examined each organization's information systems, personal training, organizational culture, office design, and knowledge production. Koch argued that IT and human-based tools directly relate to organizational knowledge production.

Also, concerning the recent revolution in computer science and the massive role of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) in every industry, their impact on the KM system has been an exciting subject for researchers. Al Mansoori et al. [24] questioned using artificial intelligence and information systems in knowledge management through a literature review study. The authors filtered several articles and eventually selected 15 articles to study. They tackled several aspects of these articles, such as the role of AI and IT in knowledge management, the domains included in this subject, and different techniques contemplating AI and IT in knowledge management.

Vadari and Desik [25] reviewed the different roles of artificial intelligence and machine learning algorithms in knowledge management. The authors examined four stages of knowledge management – knowledge acquisition, knowledge storage, knowledge dissemination, and knowledge use – to discover the different artificial intelligence applications and machine learning algorithms. The authors also argued the main KM processes to implement artificial intelligence algorithms, the primary algorithm to be used, and how they impact KM to improve its efficiency.

The authors have noted the lack of studies from consultants' point of view. In doing so, this study tried to fill this gap and reviewed scientific articles that contributed to consulting firms clarifying

KM resources, techniques, technologies, tools, users, and critical issues. As a result, this study showed the resources, techniques, technologies, and tools to improve consultants' performance and argued critical issues that cause defeat.

3 METHODOLOGY

In this section, the authors contemplated the process of collecting articles, reviewing articles, taking notes, and finally analyzing the notes. In order to discover the key metrics that contribute to the improvement of consultant performance, the data analysis steps used for the bibliographic study are applied to the following components of the KM process lifecycle 1) data collection in the design phase of KM, 2) knowledge sources of a KM system, 3) KM practices or techniques, 4) KM tools, 5) KM users, 6) critical issues of KM in consultancy (see Figure 2).

This article attempted to bring a literature review of knowledge management in the consulting firm from different cases and aspects. Therefore, the first step was to create a keywords database to have an article collection. Keywords should contain the different viewpoints of a knowledge management system – such as sharing knowledge. They should be oriented to consulting firms, knowledge-intensive firms, and, rarely, services firms to decrease the bias. The second limit was the article itself. The articles should have studied a case study to understand the details of KM at a consultancy. Moreover, the authors only selected the scientific articles from some different repositories, such as google scholar.

The present study's authors selected more than 50 articles through a primary analysis of abstracts and conclusions. However, after in-depth studies started, only 44 articles were eligible for this study. A brief quantitative analysis of publishing dates between 1999 and 2021 demonstrates some periodic trends in KM in consulting firms, such as between 2005 and 2007, as well as two periods between 2015 and 2021 (see Figure 1).

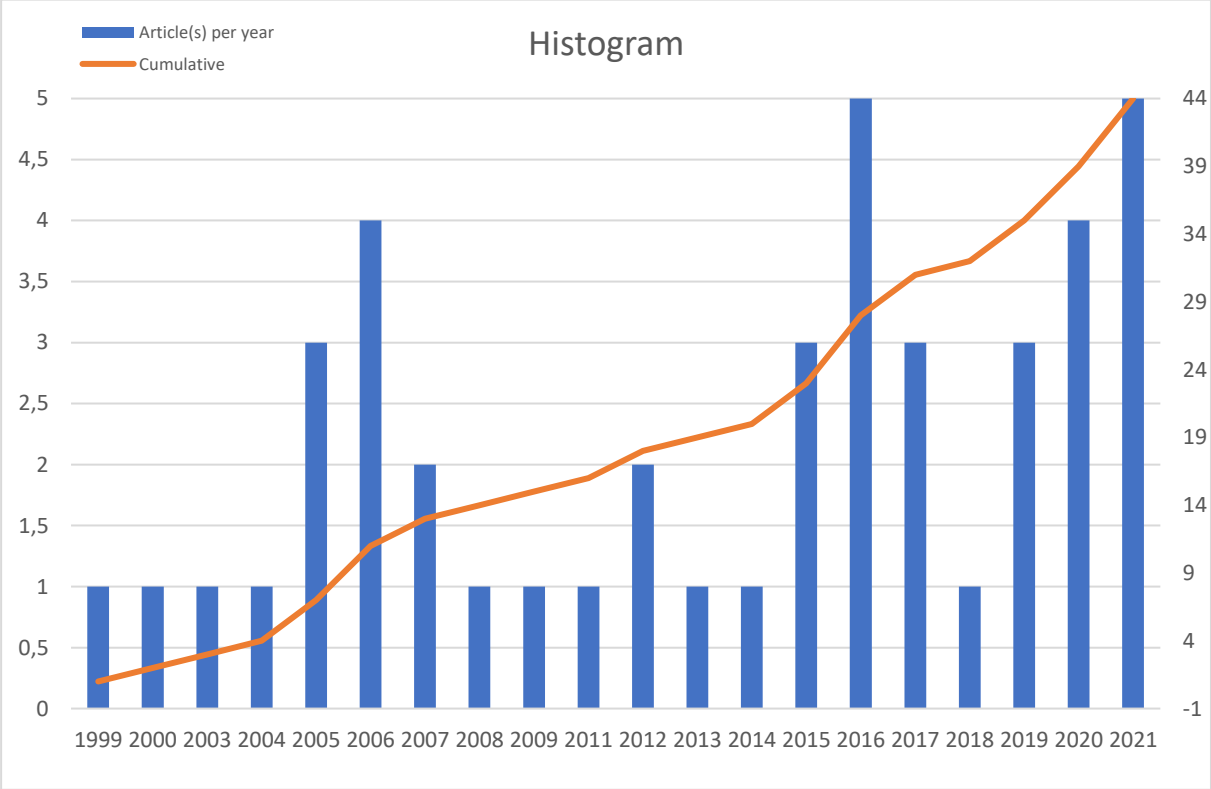


Figure 1. Selected articles histogram

In the next step, the authors studied the details of the case study(ies) in each article to extract some information. These pieces of information dealt with approaches to design a KM system, the KM system's resources, the techniques used by the KM system, tools applied to the KM system, users, and critical issues. Further reviewing and studying articles, the authors took notes and summarized each article's approach to implementing a KM system. Eventually, an NLP-based (NLP stands for natural

language processing) analysis extracted new knowledge and insights about articles. The result of this analysis is discussed in the following section.

Figure 2. Knowledge management aspects to be analyzed

4 RESULTS

This section discusses a brief argument about different aspects analyzed by the authors. These arguments are about data collection to design the knowledge management system, knowledge resources to feed the knowledge management system, different techniques or knowledge practices, technologies and tools, and users of knowledge management. Finally, critical issues found in knowledge management were selected to be discussed as an output in the next section.

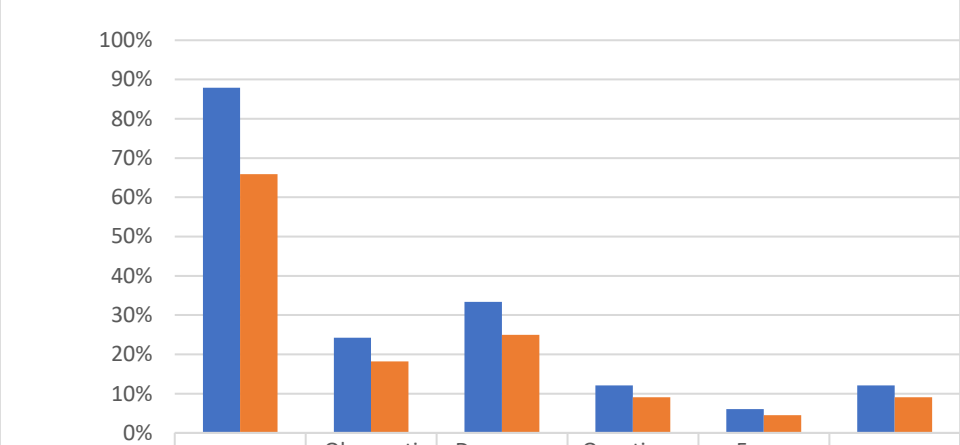
4.1. Data collection for KMS

There are several approaches to collecting the most necessary information about what must be provided to employees via a knowledge management system. This step is crucial in implanting a KMS to satisfy all the objectives while bringing the sharing culture to the organization. Data collection, in fact, is the pillar of a knowledge management system. Therefore it should be well-structured.

Most articles focused on interviews to capture the necessary information (see Figure 3). 29 articles (the one that mentioned their approach) out of all articles, i.e., 66% of articles, held interviews as an approach to gather information. This number is followed by 25% for document analysis and 18% for observation. Based on the literature for the first epoch, we can say the most common approaches are interviewing, observations, and document analysis. However, several articles did not mention anything about their approaches. Therefore, Figure 3 also shows the percentage of these methods among articles that mentioned their approaches.

Nevertheless, there are other semi-popular approaches, such as participating in the organization's meeting – the one related to the KMS objectives – and distributing surveys/questionnaires between stakeholders of the KMS to extract information. Moreover, there were some creative approaches to collecting data. For instance, Vu and Le [26] designed a basic knowledge management system as the trial version. They launched it with the help of some experts in the

organization to debug and find the most necessary types of knowledge. Therefore, they understood the most valuable knowledge (or knowledge resources) in a practical and efficient approach. Griffiths and Remenyi [27] tried to tackle information collection by participating in several workshops and taking advantage of "Socratic Dialogue" that they believed would complement interviews.



	Interview	Observation	Document	Questionnaire	Focus group	Meeting
Mentioned	88%	24%	33%	12%	6%	12%
All articles	66%	18%	25%	9%	5%	9%

Figure 3. Data collection approaches

4.2. Knowledge resources and techniques

After discovering what the knowledge management needs to provide for employees, knowledge engineers would discover different sources of knowledge to feed their system. According to almost every article about knowledge management, the knowledge management system tries to extract tacit knowledge from the employees.

However, according to the literature, tacit knowledge, i.e., experiences, and explicit knowledge, i.e., documents and manuals, are almost identically essential to a consulting firm. The analysis shows (see Figure 4) that 77% of case studies took advantage of explicit knowledge, followed by 66% that applied tacit knowledge. In several articles, both approaches were used to feed the KMS. These numbers are also based on all studied articles. Some articles did not mention their sources, though.

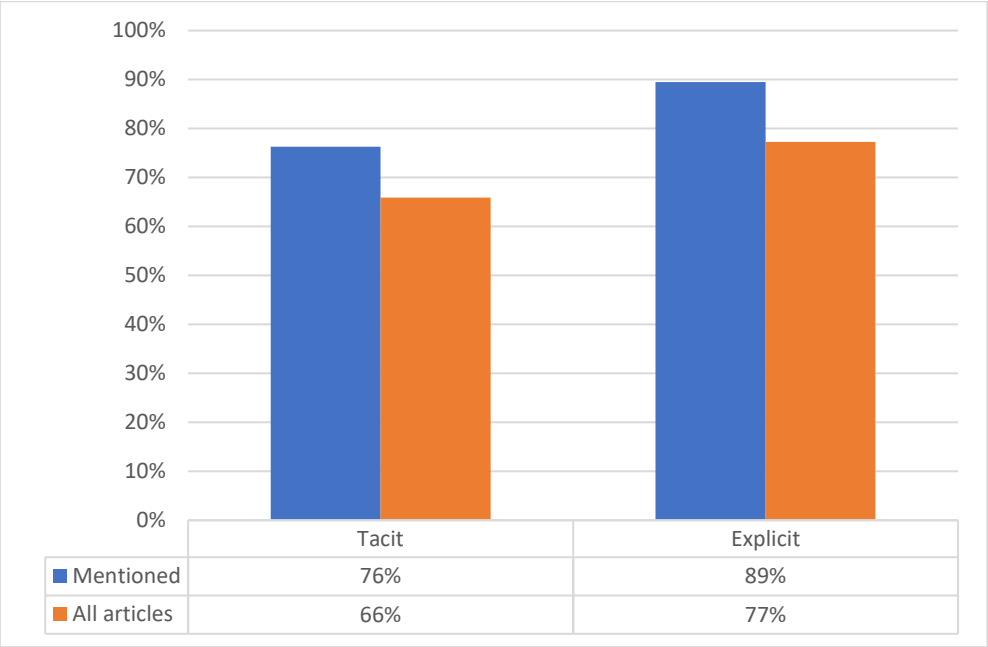


Figure 4. Knowledge resources

In order to feed the knowledge management system with tacit and explicit knowledge, several knowledge engineering techniques should be applied. Based on the literature, most case studies used documents (through storing in knowledge bases) to capture explicit knowledge. For example, Tserng et al. [28] applied document scanning and image processing to their knowledge-gathering process to obtain insights from their projects' documents.

The story about tacit knowledge is a bit different, however. Several well-known approaches have been used to extract knowledge, such as lessons learned, best practices (knowledge practices), face-to-face communications, and communities of practice (CoP). The CoP has been used the most, with a 30% usage rate in case studies, followed by 30% for lessons learned, 25% for best practices, 18% for training courses, and 11% for face-to-face communications. In the following figure, insights have been given.

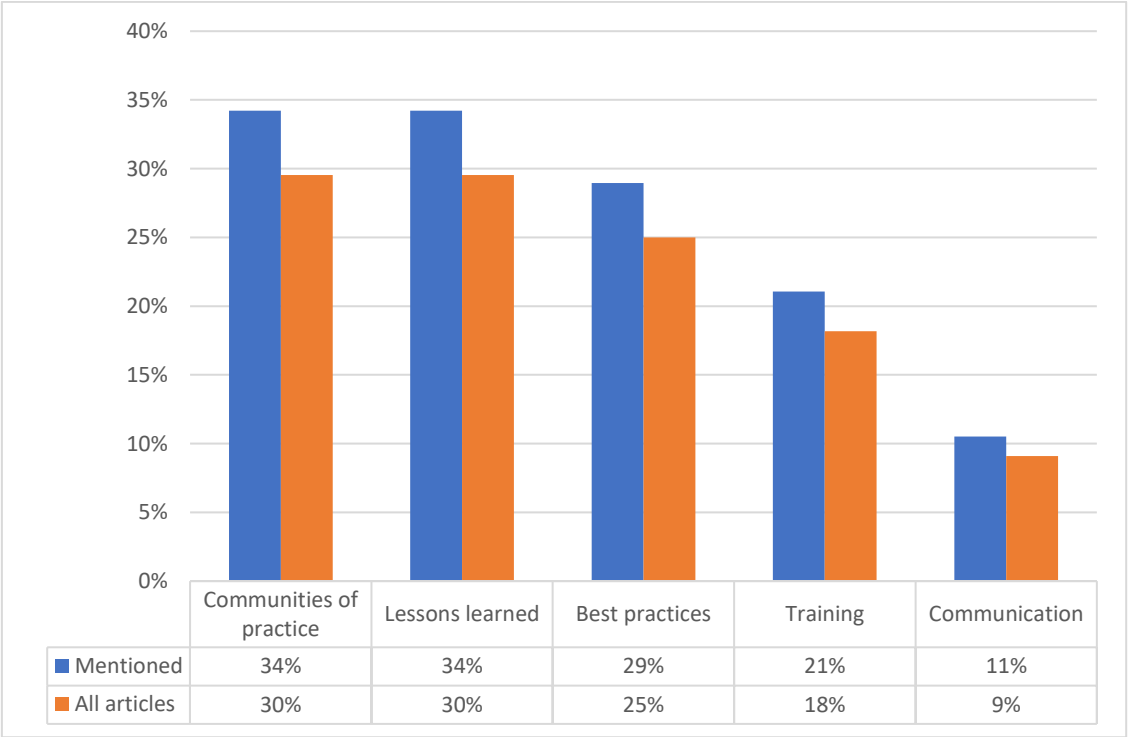
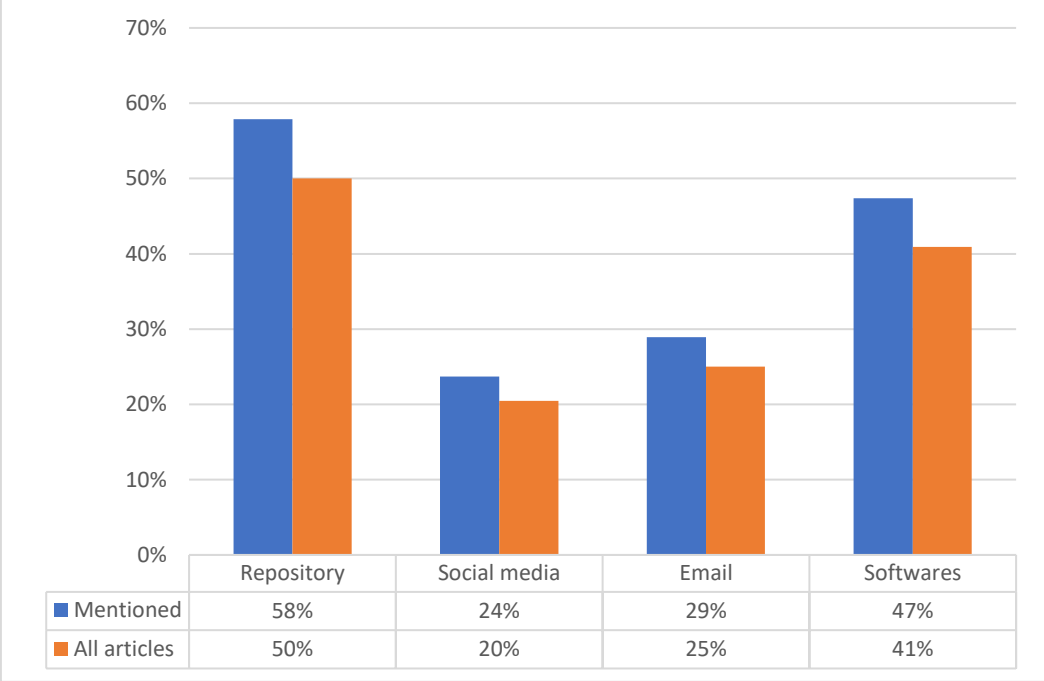


Figure 5. Techniques used for KM practices

4.3. Tools and technologies

The technologies used for different knowledge management processes over the years were then studied in our literature review. In the early years of knowledge management in consulting firms, providing a filing system or document repository was a common practice. However, taking advantage of email systems, lotus notes, and groupware was recurrent [29]. The literature review shows that developing a knowledge repository (knowledge base) using electronic documents has become a common practice in consulting companies ever since the emergence of information technologies like the internet and intranets, as well as the standardization of business machines like PCs and electronic databases. Based on the literature review, almost every knowledge management system counted on a knowledge repository after 2005.

Some cases applied different software (internal or online) to their repository to make it more user-friendly and accessible to their consultants [5], [7], [26], [30]–[37]. Moreover, in several cases after the year 2005, social media and crowdsourcing were used to help develop a more user-friendly and accessible knowledge management system [26], [32], [33], [38]–[41].



	Repository	Social media	Email	Softwares
Mentioned	58%	24%	29%	47%
All articles	50%	20%	25%	41%

Figure 6. Technologies used for KM practices

4.4. Users

There are a variety of users for a knowledge management system. It depends on different criteria, for example, the type of knowledge provided in the system. Based on the literature review, consultants are the primary users – 75% of cases – of knowledge management systems (see Figure 7). However, if the statistics were looked at more deeply, in 52% of cases, consultants were the only users of the KMS. In 23% of cases, every employee, such as consultants, human resource employees, and business managers, was a user of the KMS.

This fact gives insights into the importance of engaging consultants in the very first steps before designing the KMS. The knowledge management system should provide any kind of knowledge that consultants would need, not managers or anyone else. Therefore, in the first step, data collection to design a KMS, consultants should play the primary role in giving information about what is needed to be provided and the objective of the KMS.

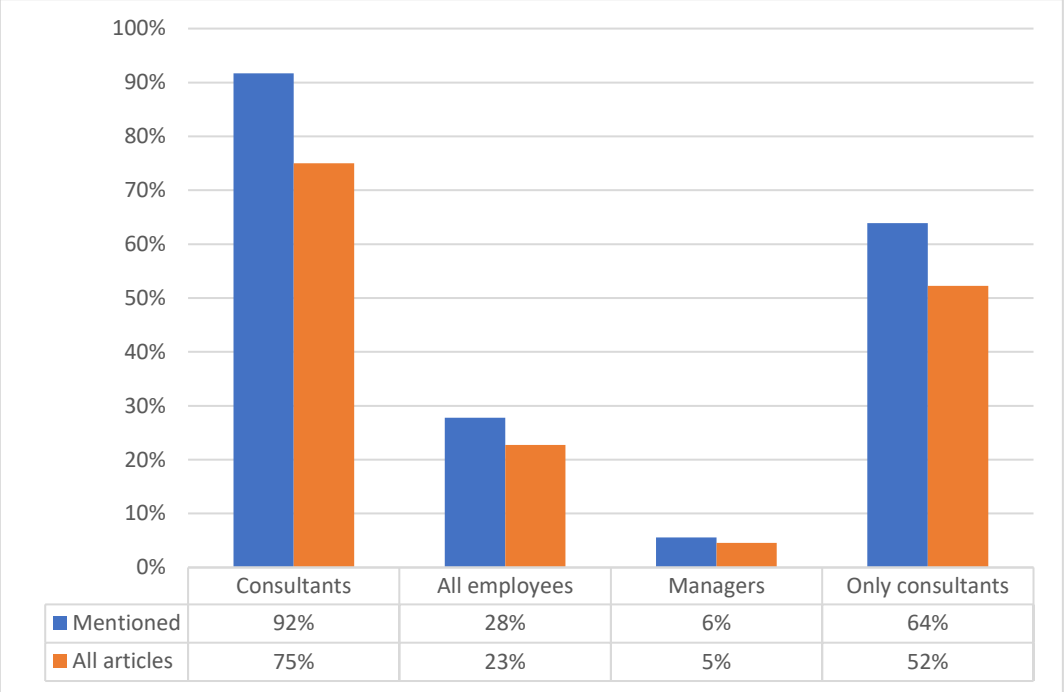


Figure 7. KM users

5 DISCUSSION AND OUTPUTS

Knowledge management may seem straightforward or basic; however, the knowledge management system will likely fail in many cases. Ambos and Schlegelmilch [42] pointed out this fact in their study:

"95 percent of the respondents said they would rather contact people they know over the phone than use the knowledge management systems."

A knowledge management system that is not being used is a failed system. Based on the literature review, several critical issues are reasons for a failed knowledge system. Cultural issues are the main pain points in any knowledge management system [31], [43]. Several cases noted different cultural problems after implementing the KM system [4], [5], [7], [26], [30], [31], [35], [39]–[41], [44]–[47]. Trust, competition between consultants, career advancement, and job security are the main factors in knowledge management (sharing) culture. These factors are found in the literature review, and they cause consultants' unwillingness to share knowledge or get involved with the system. Several activities deal with cultural problems and help motivate consultants, such as consultants' engagement before designing the system to convey a sense of importance to them. Moreover, the literature showed that reward systems could help motivate consultants to participate. In short, to establish a successful knowledge management system, a cultural shift is needed.

Management commitment was a vital issue argued by authors in the literature. In some cases, managers tried to oblige consultants to use the KM system only to improve their corporate image in the market [5]. In other cases, it was argued that managers did not believe in KM practices and decreased the budget [48]. However, knowledge management showed the need for a constant commitment to achieving its strategies, which eventually will cause cost-efficiency (as managers prefer the most). Speaking of strategies, one of the essentials in KM and its requirements was defining proper strategies aligned to the firms' strategies [27], [49]. KM strategies should be aligned with business strategies to show their performance and become more measurable and trackable.

Another critical issue influencing a KMS in consulting companies is non-structured or poorly structured documents. As the authors argued previously, explicit knowledge, i.e., documents, is an essential knowledge source for a consulting firm. Therefore, to examine the documents generated in missions and extract knowledge from them, well-structured documents provide efficiency and are less time-consuming. Besides, documents stored in the repositories could become very old and not-updated, which will cause trouble finding documents while doing missions. Therefore, finding

documents would be very time-consuming and frustrating in the end. In many cases, consultants prefer to search through online engines, such as Google, to find the information they need.

Although there are several more issues dealing with KM systems in the literature, the present study's authors highlighted the most important ones for consulting firms. As a result of this investigation, the authors believe that the very first step of KM, the design phase, is the most critical phase of KM in the consulting field. Implementing KM could be pretty challenging in any organization. The literature shows it could be tough and sometimes impossible in consulting firms. Nevertheless, the authors believe that if the knowledge engineers engage consultants from the beginning of the KM system and also structure every detail and strategy through their comfort and need of KM, the result of the KM system would be awe-inspiring and would bring innovation, creativity, and even cost benefits to the organizations.

In the literature, it has been seen that most knowledge engineers and managers try to analyze the existing knowledge and experience inside their firm and optimize the capitalization of knowledge. However, the authors believe that consultants are the heart of the KM system in a firm, and most of the energy used in the investigation should be consumed on understanding their culture, behavior, and needs. Even collaborating with (some) psychologist(s) in order to understand what is the actual culture is proposed by the authors. After constructing an appropriate culture of knowledge practices, the firms could spend some moments investigating the other advantages of the KM system, such as capitalizing on the clients and market knowledge to bring an advantage in managerial decision-making.

Ultimately, the literature approved the authors' hypothesis about improving consultants' performance via implementing a KM system. It has been mentioned in the literature that a successful KM system can improve organizational and personal performance. A proper KM system facilitates the mission task by reducing task redundancy [44] or bringing the missing knowledge and experience [26], [50]. Therefore, it is ensured that the KM system would enhance individuals' performance (in this case, consultants) via capitalizing on knowledge.

6 CONCLUSION AND FUTURE WORK

Due to industrial and technological development, every expertise has become more professional, and this routine is going on even faster. Therefore, employees capture more knowledge in a more diverse area. However, experience, as always, plays an essential role in any expertise. Thus knowledge management activities have become vital for any organization. On the other hand, consulting firms, often called knowledge sellers, deal with a lack of experience and knowledge in their missions for many reasons. In doing so, consulting firms try hard to capture, store, share and generate knowledge to keep on track, not lose clients, and provide better service to their clients. Moreover, knowledge management can help them enhance their chances in their competition with other consulting firms.

This study has analyzed and reviewed several case studies on knowledge management in consulting firms in order to investigate the data collection approaches in the design phase, knowledge resources, techniques and technologies, users, and ultimately critical issues and insights. The authors examined all their selected factors to understand whether they can augment consultants' performance in a consulting firm by applying a KM system. As a result, the authors argued the best and most used activities in each stage of designing and implementing a KM system. Moreover, the authors argued vital issues and brought insights to surpass these problems in order to conceive a successful KM system.

This study thus provides a complete survey for researchers to evaluate their knowledge with a fed literature review. However, the authors believe further works could contribute to investigating the integration of artificial intelligence with the provided KM activities. Consulting firms often deal with lots of documents and data. Thus, the authors suppose AI capabilities would enhance KM activities and bring new results to this field of research.

REFERENCES

[1] M. Sarvary, "Knowledge Management and Competition in the Consulting Industry," *Calif. Manage. Rev.*, vol. 41, no. 2, pp. 95–107, Jan. 1999, doi: 10.2307/41165988.

[2] M. Mas-Machuca and C. Martínez Costa, "Exploring critical success factors of knowledge management projects in the consulting sector," *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 23, no. 11–12, pp. 1297–1313, décembre 2012, doi: 10.1080/14783363.2011.637778.

[3] J. Darroch, "Knowledge management, innovation and firm performance," *J. Knowl. Manag.*, vol. 9, no. 3, pp. 101–115, Jan. 2005, doi: 10.1108/13673270510602809.

[4] A. Tsai, "A hybrid model of knowledge management for new service development," *J. Syst. Sci. Syst. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 424–447, Dec. 2016, doi: 10.1007/s11518-015-5280-2.

[5] M. G. Martinsons, R. M. Davison, and Q. Huang, "Strategic knowledge management failures in small professional service firms in China," *Int. J. Inf. Manag.*, vol. 37, no. 4, pp. 327–338, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.04.003.

[6] J.-W. Wu, J. C. Tseng, W.-D. Yu, J.-B. Yang, S.-M. Lee, and W.-N. Tsai, "An integrated proactive knowledge management model for enhancing engineering services," *Autom. Constr.*, vol. 24, pp. 81–88, 2012.

[7] K. Summerhayes and S. Luo, "Managing Knowledge in Professional Consultancy," *Monash Bus. Rev.*, vol. 2, no. 3, pp. 1–13, 2006.

[8] D. Apostolou and G. Mentzas, "Managing corporate knowledge: a comparative analysis of experiences in consulting firms. Part 1," *Knowl. Process Manag.*, vol. 6, no. 3, pp. 129–138, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-1441(199909)6:3<129::AID-KPM64>3.0.CO;2-3.

[9] R. Dunford, "Key challenges in the search for the effective management of knowledge in management consulting firms," *J. Knowl. Manag.*, vol. 4, no. 4, pp. 295–302, Jan. 2000, doi: 10.1108/13673270010379849.

[10] C. A. Putri, "Overcoming Project Delivery Delays in A Consulting Firm: A Knowledge Management Perspective," *IPTEK J. Proc. Ser.*, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2021, doi: 10.12962/j23546026.y2020i1.8488.

[11] W. R. Bukowitz and R. L. Williams, *The knowledge management fieldbook*. Financial Times/Prentice Hall, 2000.

[12] C. W. Choo, "The knowing organization: How organizations use information to construct meaning, create knowledge and make decisions," *Int. J. Inf. Manag.*, vol. 16, no. 5, pp. 329–340, 1996.

[13] T. Davenport and L. Prusak, *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*, vol. 1. 1998. doi: 10.1145/348772.348775.

[14] I. Nonaka, "A dynamic theory of organizational knowledge creation," *Organ. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 14–37, 1994.

[15] I. Nonaka and H. Takeuchi, *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation - Book - Faculty & Research - Harvard Business School*. New York: Oxford University Press, 1995. Accessed: Feb. 04, 2022. [Online]. Available: https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=38411

[16] I. Nonaka, I. o Nonaka, N. Ikujiro, and H. Takeuchi, *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*, vol. 105. OUP USA, 1995.

[17] K. M. Wiig, *Knowledge management foundations: thinking about thinking-how people and organizations represent, create, and use knowledge*. Schema Press, Limited, 1994.

[18] K. M. Wiig, R. de Hoog, and R. van der Spek, "Supporting knowledge management: A selection of methods and techniques," *Expert Syst. Appl.*, vol. 13, no. 1, pp. 15–27, juillet 1997, doi: 10.1016/S0957-4174(97)00019-5.

[19] M. H. Zack, "Developing a knowledge strategy," *Calif. Manage. Rev.*, vol. 41, no. 3, pp. 125–145, 1999.

[20] F. Z. M. Mahmoud, A. M. Mahmoud, and J. Ibrahim, "The knowledge management strategies used as a tool within and through strategic consulting firms to increase the organisational performance," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 2015.

[21] A. H. Mazorodze and S. Buckley, "Knowledge management in knowledge-intensive organisations : understanding its benefits, processes, infrastructure and barriers," *South Afr. J. Inf. Manag.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–6, février 2019, doi: 10.4102/sajim.v21i1.990.

[22] A. Kumar, P. Grover, A. K. Kar, and A. K. Pani, "It consulting: A systematic literature review," in *Conference on e-Business, e-Services and e-Society*, 2017, pp. 474–484.

[23] C. Koch, “Knowledge management in consulting engineering – joining IT and human resources to support the production of knowledge,” *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 10, no. 6, pp. 391–401, Jan. 2003, doi: 10.1108/09699980310509363.
[24] S. Al Mansoori, S. A. Salloum, and K. Shaalan, “The Impact of Artificial Intelligence and Information Technologies on the Efficiency of Knowledge Management at Modern Organizations: A Systematic Review,” *Recent Adv. Intell. Syst. Smart Appl.*, pp. 163–182, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-47411-9_9.
[25] S. Vadari and P. H. A. Desik, “The Role of AI/ML in Enhancing Knowledge Management Systems,” *IUP J. Knowl. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 7–31, Oct. 2021.
[26] P. N. Vu and T. V. Le, “Knowledge Management Model for Construction Design Consulting Companies,” *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 5, Art. no. 5, 2021.
[27] P. Griffiths and D. Remenyi, “Aligning Knowledge Management with Competitive Strategy: A Framework,” *Electron. J. Knowl. Manag.*, vol. 6, no. 2, Art. no. 2, Oct. 2008.
[28] H. P. Tserng, M.-H. Lee, S.-H. Hsieh, and H.-L. Liu, “The measurement factor of employee participation for Knowledge Management System in engineering consulting firms,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 22, no. 2, pp. 154–167, Feb. 2016, doi: 10.3846/13923730.2014.897963.
[29] M. Robertson and G. O’Malley Hammersley, “Knowledge management practices within a knowledge-intensive firm: the significance of the people management dimension,” *J. Eur. Ind. Train.*, vol. 24, no. 2/3/4, pp. 241–253, Jan. 2000, doi: 10.1108/03090590010321205.
[30] J. J. A. Bongku and Y. Kurniawan, “Designing the Knowledge Management System: A Case Study Approach in IT Consultant Company,” in *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Graphics and Signal Processing*, New York, NY, USA, juin 2019, pp. 48–52. doi: 10.1145/3338472.3338473.
[31] W. Lam, “Successful knowledge management requires a knowledge culture: a case study,” *Knowl. Manag. Res. Pract.*, vol. 3, no. 4, pp. 206–217, Nov. 2005, doi: 10.1057/palgrave.kmrp.8500068.
[32] H. Seifert and V. Nissen, “Crowd Workplace—A Case Study on the Digital Transformation Within IT- and Management-Consulting,” in *Digital Transformation of the Consulting Industry: Extending the Traditional Delivery Model*, V. Nissen, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 299–321. doi: 10.1007/978-3-319-70491-3_12.
[33] P. Wethyavivorn and W. Teerajetgul, “Tacit knowledge capture in Thai design and consulting firms,” *J. Constr. Dev. Ctries.*, vol. 25, no. 1, pp. 45–62, 2020.
[34] L. Bell, C. C. van Waveren, and H. Steyn, “Knowledge- Sharing Within the Project-Based Organizsation: A Knowledge-Pull Framework,” *South Afr. J. Ind. Eng.*, vol. 27, no. 4, pp. 18–33, 2016, doi: http://dx.doi.org.ezproxy.universite-paris-saclay.fr/10.7166/27-4-1580.
[35] K. Venkitachalam and H. Willmott, “Factors shaping organizational dynamics in strategic knowledge management,” *Knowl. Manag. Res. Pract.*, vol. 13, no. 3, pp. 344–359, Aug. 2015, doi: 10.1057/kmrp.2013.54.
[36] B. Cheuk and B. Dervin, “Leadership 2.0 in Action: a Journey from Knowledge Management to ‘Knowledging,’” *Knowl. Manag. E-Learn.*, vol. 3, no. 2, p. 119, 2011.
[37] Q. Wang, Z. Mao, B. Wang, and L. Guo, “Knowledge Graph Embedding: A Survey of Approaches and Applications,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 29, no. 12, pp. 2724–2743, Dec. 2017, doi: 10.1109/TKDE.2017.2754499.
[38] D. E. O’Leary, “Knowledge Management and Enterprise Social Networking: Content vs. Collaboration,” *Collab. Febr. 1 2015*, 2015.
[39] D. E. O’Leary, “Enterprise crowdsourcing innovation in the Big 4 consulting firms,” *J. Emerg. Technol. Account.*, vol. 16, no. 2, pp. 99–118, 2019.
[40] T. H. Powell and V. Ambrosini, “Espoused versus realized knowledge management tool usage in knowledge intensive organizations,” *Int. J. Hum. Resour. Manag.*, vol. 28, no. 2, pp. 356–378, Jan. 2017, doi: 10.1080/09585192.2016.1244911.
[41] A. A. Gde Agung, “Knowledge management system readiness analysis (Case study at human resource consulting company),” in *2014 2nd International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering Environment*, Aug. 2014, pp. 206–210. doi: 10.1109/TIME-E.2014.7011619.
[42] T. C. Ambos and B. B. Schlegelmilch, “Managing knowledge in international consulting firms,” *J. Knowl. Manag.*, vol. 13, no. 6, pp. 491–508, Jan. 2009, doi: 10.1108/13673270910997141.

[43] M. Nakash and D. Bouhnik, “Risks in the absence of optimal knowledge management in knowledge-intensive organizations,” *VINE J. Inf. Knowl. Manag. Syst.*, vol. 52, no. 1, pp. 87–101, Jan. 2020, doi: 10.1108/VJIKMS-05-2020-0081.
[44] T. Mezher, M. A. Abdul-Malak, I. Ghosn, and M. Ajam, “Knowledge Management in Mechanical and Industrial Engineering Consulting: A Case Study,” *J. Manag. Eng.*, vol. 21, no. 3, pp. 138–147, Jul. 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0742-597X(2005)21:3(138).
[45] D. Chauvel and C. Despres, “Organisational logic in the new age of business: the case example of knowledge management at Valtech,” *Int. J. Technol. Manag.*, vol. 27, no. 6–7, pp. 611–627, 2004.
[46] R. S. Sharma *et al.*, “Leveraging knowledge management for growth: a case study of Tata consultancy services,” *J. Inf. Technol. Case Appl. Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 29–65, 2007.
[47] S. Ghosh, L. Amaya, and M. J. Skibniewski, “Identifying areas of knowledge governance for successful projects,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 18, no. 4, Art. no. 4, Sep. 2012, doi: 10.3846/13923730.2012.700642.
[48] K. Sherif and B. Xing, “Adaptive processes for knowledge creation in complex systems: The case of a global IT consulting firm,” *Inf. Manage.*, vol. 43, no. 4, pp. 530–540, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.im.2005.12.003.
[49] M. Nakash and D. Bouhnik, “‘Knowledge management is not dead. It has changed its appearance. And it will continue to change,’” *Knowl. Process Manag.*, vol. 28, no. 1, pp. 29–39, 2021, doi: 10.1002/kpm.1655.
[50] K. Sherif, J. Hoffman, and B. Thomas, “Can technology build organizational social capital? The case of a global IT consulting firm,” *Inf. Manage.*, vol. 43, no. 7, pp. 795–804, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.im.2006.07.001.

Contact principal : Nom

Coordonnées

DRIVING INNOVATION AT EACH LEVEL: A METHODOLOGY FOR LARGE FIRMS.

Robin Navari[1,2], Frédéric Segonds[1] Mireille Rahmeh[2,] Frédéric Le Bouguenec[2]
[1,] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI -Arts et Métiers Institute of Technology -HESAM University-151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France
[2] MIB' INNOV VEOLIA, 30 Rue Madeleine Vionnet, 93300, Aubervilliers.

Keys words: Innovation methodology, network, collaborative knowledge, design process

ABSTRACT

In this paper, I will present specifics tools implement inside design thinking methodology. We will take an industrial context in lab of Veolia (MIB' INNOV) who develops a remote visual assistance system for their connected workers. They start with the Design thinking process in collaboration with the workers who were not kept in the loop throughout the whole process of development. They were reintegrated to test the first solution during the first proof of concept, and it was not totally accepted. The project went back to the construction phase and new collaborative tools were used, such as call for ideas on a digital platform, observation with operators in-situ, and workshop testing different prototypes to include as much as possible the final users. The purpose of the research is to improve design thinking process during a re-design with specific tools for larger firms to obtain the user's acceptance. The industrial goal is to find one or more solutions to deploy among volunteer agencies for a second proof of concept.

1 INTRODUCTION

To exist, a company should offer valuable services and products. To succeed and prosper, it should create an added value compared to competitors [1] That's why new methods of design, innovation and management are emerging and becoming widespread within companies. Design thinking, isa collaborative and client centric method that can be used by any firm that would like to learn from designer's practices. Depending on situations and strategies, each firm uses additional and specific tools to improve each part of the Design thinking process: understand explore and materialize. However, to implement this method there are 2 main problems:

The first is to establish a dialogue between groups of people who are different in their professions, their geography, and their needs. The goal is to make individual intelligence converge to create a shared and superior intelligence. The second is to keep the end user close to the conception's team to collect his feedback throughout the project. Thus, the main question is how to choose and include the adequate users and how to attract their attention, especially in big companies [2]?

Therefore, the research question of this paper is: "How to manage operational innovation projects and maintain a link between project managers and operators? "Innovation cells" are created to impulse and accelerate innovation, in these companies such as SNCF, VEOLIA or Orange, but they are dealing with both challenges just mentioned.

2 RESEARCH METHODOLOGIES

2.1 Design thinking process

Before explaining the unfolding the research, we will present you the design process used by MIB'INNOV (Veolia's team). It was the design thinking process as "cognitive style" [3]: Method that emerged in the 50's, the fundamental goal is to create innovation by reducing risks and uncertainty [4] [5]. Of course, but it also considered as the ideal method for collaborative work and co-creation [3], the user is always placed at the centre of the design through feedback loops. That why is interesting for Veolia's work team, the final product will be deployed and use by a wide number of operators, so they need to be clever during the conception to understand the specific user's needs and how to adopt their solution.

This technique has been democratised in France since 2010, in a form popularised in the book "Change by Design" by the CEO of IDEO Tim Brown. However, in the areas of turnkey methods that we could give him, the design thinking is a guarantee of success, especially if it is poorly conducted (process illustration above). If the user is only consulted for brainstorming at the beginning of the project and during field observations, it is likely that the solutions proposed by the teams are not suitable. It is very difficult to keep a permanent contact with the user/customer panel during the project, because in addition to this, there are all the organisational, time and resources issues.

Innovative design is a process of reasoning, organisation, modelling, and performance criteria that enable innovation [6], a necessary maturity for integrated clusters. It is difficult to master the entire design chain, to be efficient in field studies, costing, communication, management, and technology watch. Companies must therefore resort to subcontracting skills or to collaborative models [7]. This is what my article will focus on; how to get knowledge thanks to each person of own enterprise? To conduct design thinking process accurately and manage to do link throughout the project.

This diagram (figure 1) above represents each part of design thinking process and iteration between them. I highlight in red line the part of the process where MIB'INNOV team made mistakes during the first design phase.

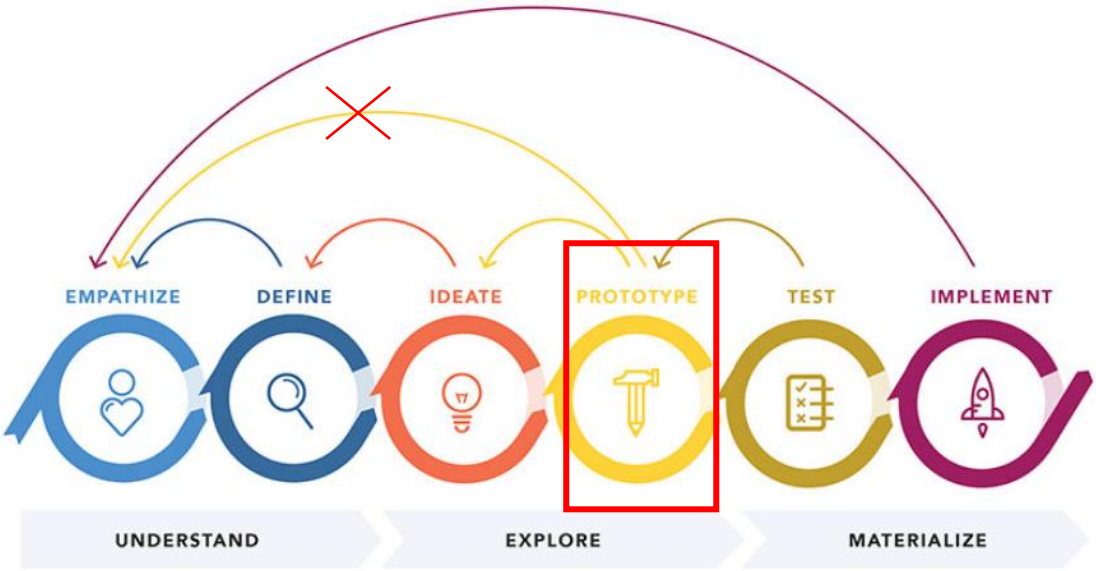


Figure 1. Nielsen Norman Group definition of design thinking. diagram made by Design thinking 101 INNgroupe.com

3 CONTEXT:

3.1 First difficulties encounted

We need to come back two years before, at the beginning of the remote maintenance project. MIB'INNOV work with two partners, one for software device and one other for hardware device. The first part was to develop an application with several functions like video conference, call and send picture. The choice was to use a smartphone because it is commonly used in agencies and represents today a usual object owned by everyone. The second part was to design a hardware as a support for this smartphone and headset, the goal is to allow operator used smartphone functions without any contact with him.

1/ UNDERSTAND

During the first phase, they work with users to collect their needs, for example, an anti-wave system to protect heart contact or reel to use phone without risk of falling.

2/ EXPLORE

Then, team project drafted the product specifications with operator's request among many choices bring by conception team and their hardware partner. The final use case was a harness wear by operator all day long.

3/ MATERIALIZE

During testing phase, the feedback was clear, this harness wasn't adapted (figure 2) for daily work. The strap around the neck was uncomfortable, it was too long to put it on and take it off, the phone was drooping in front because of reel. Finally, the system as it stands has not been adopted.

Figure 2. Veolia's operator with first harness

So, in our case study I will present you a series of tools used by the new teamwork to set up the feedback loop to the user phase. The goal will be to develop a second prototype strong of lessons learned from the first one, both on the application and on the hands-free kit call harness.

4 RESEARCH

3.1 Call for ideas: bring out a good idea through the numbers

This scheme figure 3 presents the main challenge (1.2.3), the tool used to resolve them and the issues for work team that implements the process.

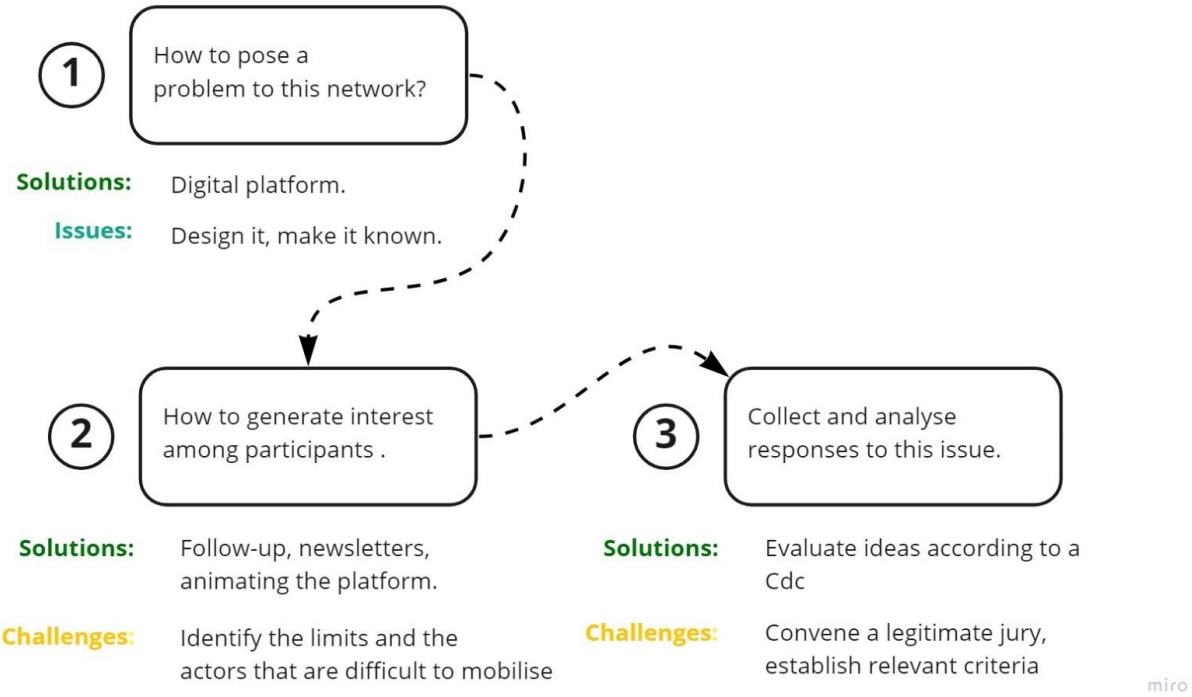


Figure 3. Diagram's process for the call ideas.

3.1.1 Redefined the requirements

"How to pose a problem to this network?" deal with a well-known phenomenon, collective intelligence. The collective knowledge of an entire firm can produce amazingly intelligence answers to a question, that's the same thing for Wikipedia or Google system, rights answer was create by an accretion of individual knowledge [8]. MIB'INNOV used a digital platform to unite seven thousand people, from every hierarchic level, around a same thematic. This platform call HYPE and everyone could publish an idee about the connected operator. User experience was drive through tree different subsection present as questions.

The first, **operating performance**: Which situations and activities this device can be useful for you?
The second, **commercial performance**: For which activities this remote assistance can give you an add-value for our clients?
The third, **ergonomics**: What can you imagine improving the first solution (harness I present before)? And especially how could we wear the smartphone in a comfortable way while being adapt for work situations?

Key numbers: 7100 guests send by emails. 320 connexions in the platform. 70 idees published.

3.1.2 Method and difficulties in reaching its audience

Data base allow us to identify which profile publish on the platform. More than the rest, support service had proposed their ideas, to a small degree just few operators give their experience from field.

So, “How to generate interest among participants?”. Different support was used, the first is poster to be sent to each agency, few thousands. The first objective of this poster is to inform about thematic and questions around it, each partner with a Veolia’s email can join platform and follow the expected user experience. A Q code was also created to send operator to a google board to submit their ideas without any email. On this board anything was collect and, in the platform, just two idees come from operator in agency.

In fact, the emerging issues is: How support service can concern their operator, closet to the field on their process? We’ll talk about it in discussion.

For the rest of firm’s service concerned, especially support, email was good way to keep ideas call campaign animated. It was managed by ambassadors who every week relaunch all the guests to participate, after each relaunch, participation growing up significantly, so the keys is to stay on digital environment guests.

3.1.3 Analyse ideas

To provide a fair analysis of the ideas possible, we named a panel of 16 persons. Each of them has to judge ideas (70) thanks to an evaluation grid. Ideas is judged according to its category, so the evaluation grid changes according to.

For exemple in figure 4, each person judge ergonomic ideas through this grid with eights questions. All answers were in a template of 4 propositions, except one with a yes or no. The four levels allow us to obtain clear-cut answers without neutrality. Moreover, coefficients are applied to the questions according to their importance in the specifications.

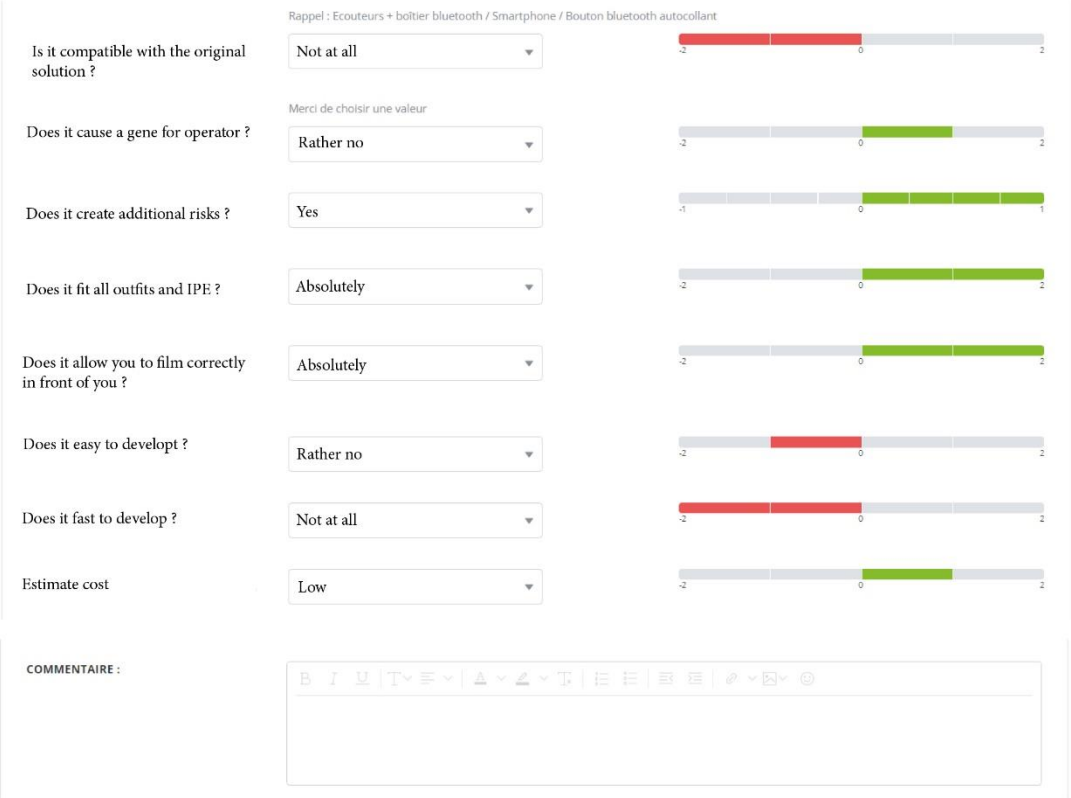


Figure 4. Ergonomic part evaluation

3.1.4 First results

This call ideas provided several information:

- **Use case from field** that allow us to understand in which situation our product will be use. Especially in commercial way (give and send information on live during an audit or expert assessment).
- **Specific example of maintenance situation** proposed by team field leader.
- **Sound visions** from connected operator, from the simplest to the most technological.

Theses information allows us to create a selection of solutions to organised workshop during which we will have them tested. That's our next point.

3.2 Focus group: Testing new ideas

Methodology: Focus group, used since 1920 as a market research technique [9]. With two key points. First, a research technique with interactional discussions about perception and attitudes. Second, develop a consensus guideline for evaluating each solution.
During this workshop, we stay alerted on two specifics typology of empathy: Emotional et cognitive [10].
The first is instinctive reaction and affective. Read into subjective assessment during testing phases and during debriefing.
For the second we need to change our point of view and understand how others experience was lived. Read into physical reaction of participants, how they handle objects, facial reactions, verbal's expressions.

3.2.1 First focus group

Participants: 5 + 3 from MIB'INNOV to drive.

Profiles: Heads of performance department, agency managers (previously operators), and a head commercial.

Solutions: 6. Figure 5 (3 examples)

Figure 5. Some prototypes tested during creatives workshops

Protocol:
1/ Equip yourself

2/ With/without PPE (helmet + vest + goggles + noise helmet)

3/ Take a photo/video in position e.g.: upper shoulder/shoulder/ bent/ squatting.

4/ De-equip yourself

Evaluations: Figure 6.

Requierements	**Critères**	Assesment
Transport	Bulk	
	Weight	
Perceived value	Esthetics	
	Sturdiness	
	Readibility	
Facilitate to get equipped	Actions	
	Time	
Wear	Comfort	
	Hold	

	Compatible EPI	
Bouton acces	Accessibility	
Take picture	Freedom of movement	
	Image quality	
Disarm	Actions	
	Time	
Sore the equipment	Time	

Figure 6. Specifications to evaluate solutions.

Evaluation: We gave them three stickers: green, orange and red, they can paste in the case assessment. At the end we had the opinion of each one, aligned with each criteria as a support during the collegiate debate.

Results from focus group:

- Consensus against strap around neck
- Consensus about the hook to hang the smartphone on the holder
- Consensus about the usefulness of the reels to deport the phone
- Divergent opinions on the general ergonomics. Between the harness and the shoulder strap

3.2.2 Second focus group

The only difference come from participants: We selected only agency managers that work on field, and two operators. This group represent more particularly our target users.

Results from focus group: The same thing

- Consensus against strap around neck
- Consensus about the hook to hang the smartphone on the holder
- Consensus about the usefulness of the reels to deport the phone
- Divergent opinions on the general ergonomics. Between the harness and the shoulder strap

3.2.3 Focus' group conclusions

What is interesting in our research?
Harness wasn't totally excluded, he got strong benefits (maintain and comfort) but his weaknesses come from details poor design, so we got indication of what we need to improve.

The difference between harness and shoulder strap gives us a crucial indication, it's a personal preference according to morphology, work situations and the time you wear it.
This conclusion could have been done a year ago during the first launch phase using tools presented previously. For now, the deployment we must propose different solution around harness and shoulder strap and for the harness we must work on details like type of hook, how to wear it and stabilize the phone.

5 EXPECTED OUTCOMES:

The remote maintenance project had a first failure, but the iterative method that was put in place allows us to think that during the second deployment, the main problem related to the support of the smartphone should be solved. On the other hand, the revision of the software interface should also improve the user experience.

To evaluate the impact of the future solution on the life of the agencies, we have set up KPIs (figure 7) to monitor, thanks to digital and human data, the time saved and the operational performance

Indicator	Unit	Canal 1	Canal 2
Use frequency	Nbr/ week	Rainbow	
Operating time	Minutes/ intervention	Rainbow	Discuss operators
Human time saving	Hour	Rainbow	
Gain of resources	Euros		
Aide résolution pb	% of success	Rainbow	
Gain d'autonomie	low - medium - high	Discuss Support	Operators
Enrichissement du Drive	Nbr photo/ agency	Drive agency	
Consultation du Drive	Number of accesses	Discuss Support	Operators
Confort du kit main libre	low - medium - high	Discuss operators	
Ergonomie RVA	low - medium - high	Discuss operators	
Ergonomie Rainbow	low - medium - high	Discuss Support	

Figure 7. KPI for proof 's of concept evaluation

6 DISCUSSIONS

It is essential to consolidate an active innovation network based on motivated individuals throughout the hierarchy. These relays are the links in the chain of action; the link must be maintained. However, we realise that it is easier to mobilise design office managers, agency managers, and support service executives than it is to mobilise the real players in the field. But the challenge is to be able to sound out these people, especially when the projects have an impact on the way they do their jobs. The solutions have not yet been found, but some hypotheses can be envisaged.

Strengthen the proximity with the actors in the field by making the team leaders more responsible: Increase the information chain to circulate from the "smallest to the largest". To do this, use the computer tools available (platforms) and above all, dedicate time to the feedback. An emissary can have this role: to inform the team leaders of their arrival and the subjects to be dealt with, to hold round tables or express meetings with each operator.

Workshops we have done are new in MIB'INNOV and we realize that soliciting collaborators and doing sessions together allows to create first of all a collaborative intelligence for specific topics, but also, this allows to consolidate an extensive group of people involved in the innovation in the company.

5 REFERENCES

[1] John Kay, English economist, p.19 of Corporate succès – How businessstrategies add calue, Oxford université press, 1993

[2] Lisa Carlgren, Maria Elmquist, Ingo rauth Center for business innovation, *Exploring the use of design thinkin in large organizations: Towards a research agenda* , Swedish Design Research Journal, 01-05-2014

[3] Lucy Kimbell, designer, *Rethinking Design Thinking*: Part 1 , Http://www.lucykimbell.com/stuff/DesignPractices_Kimbell_DC_final_public.pdf, 2011

[4] Emmanuel Brunet, *La boîte à outils du Design Thinking*, 2019, édition Dunod,

[5] Qu'est-ce que le Design Thinking ? https://www.usabilis.com/quest-ce-que-le-design-thinking/

[6] Pascal Le Masson, Benoît Weil et Armand Hatchuel, *Les processus d'innovation, conception innovante et croissance des entrepries*, Paris, Hermés Lavoisier, 2006

[7] Kymble Christophe, Valentin Dillies et Vincent Dortet-Bernadet, *Collaborer ou sous-traiter pour innover. L'incidence des financements publics*, Observatoire français des conjonctures économique (OFCE), 2021

[8] Thomas W. Malone, Robert Laubacher and Chrysanthos Dellarocas, *The collective intelligence genome,* MIT Sloan Management Review, 2010

[9] Richard A. POWELL and HELEN M. SINGLE, Department of Mental Health, University of Exeter, *Focus groups*, International journal for Quality in Health Care, Vol 8, No. 5, United Kingdom, 1996

[10] S. New, and L. Kimbell, "Chimps, Designers, Consultants and Empathy: A "Theory of Mind" for Service Design," Proc. Cambridge Academic Design Management Conference (CADMC 2013).

Contact principal : Navari Robin

Coordonnées : robin.navari@ensam.eu

ETUDE ET RECHERCHE D'UN SERVICE D'AMENAGEMENT DE JARDIN ACCESSIBLE A TOUS

POMMERET Fiona[1], MORTUAIRE Thierry[2], LEGOEFF Yann[3], AOUSSAT Ameziane[4]
[1] Laboratoire LCPI – 151 Bld de l'hôpital 75013 Paris

[1] POMMERET Fiona, laboratoire LCPI

[2] MORTUAIRE Thierry, Directeur général de NEVE

[3] LEGOEFF Yann, CEO de la société LGMCO

[4] AOUSSAT Ameziane, laboratoire LCPI

This article deals with the study and creation of a hybrid garden design service developed by an SME. First of all by a sociological and territorial analysis of the place of the garden as well as the study of the needs of the user and the company. The scope of hybrid services and what are the objectives and important points of such a service in an SME. The article then describes the methodology used to build this service and ends with a study of the expansion of the SME and the risks involved in developing an innovative project.

Jardin, micro-entreprise, design, service, transition numérique.

1 INTRODUCTION

Pour répondre à l'évolution des besoins des usagers qui, à la suite de la crise du COVID 19 se sont tournés vers des maisons avec jardin, les entreprises d'aménagement d'extérieur doivent s'adapter à la demande et proposer des projets dans l'air du temps tout en se démarquant de la concurrence. Parmi ces entreprises, les PME doivent continuer de se développer et proposer des projets à forte valeur ajoutée pour pérenniser leur existence.
Sur un marché, tel que l'aménagement, le chiffre d'affaires des entreprises est intimement lié à la réalisation de devis et de réalisations concrètes. Cependant, la main d'œuvre doit s'adapter aux différentes exigences du client et manque de réactivité et d'aisance face aux différentes actions à réaliser dans un jardin, générant ainsi un retard de chantier.
Dans un habitat, le jardin est considéré comme une pièce de la maison à aménager en dernier lieux. C'est un espace qui n'est pas fixe et qui évolue avec le temps. C'est pourquoi, l'usager va se concentrer sur l'ameublement de son intérieur pour à la fin se tourner vers le jardin. Mais un espace extérieur met du temps à se développer, et il faut de la patience pour que son idéal devienne réalité. Nous nous sommes penchés sur la symbolique du jardin de nos jours pour comprendre notre rapport à lui en s'appuyant sur le travail de Lama Asaad « *La nature en ville et le cas spécifique des jardins urbains : approche géographique et historique et la ville de Lyon et de son agglomération »*[2]
C'est pourquoi dans le but de développer l'entreprise NEVE, nous avons réfléchi à un concept polyvalent. Pour étudier ce thème, nous nous sommes intéressés à : Comment développer une PME en proposant un système hybride de jardin clef en main ?

Pour résoudre cette problématique, nous utiliserons différentes approches qui mêlent des disciplines connexes.
Tout d'abord, nous avons organisé notre projet en double diamant pour développer de nouveau le projet en se penchant sur le travail réalisé en amont. Ensuite, nous nous sommes intéressés au moyen pour optimiser une entreprise. En effet, pour développer une PME avec un projet hybride, il faut se pencher

sur toutes les possibilités d'optimisation. En utilisant le design ou le design user expérience, nous pouvons nous rendre compte du besoin des usagers et répondre à leurs attentes au mieux.
La section 2 portera sur l'étude de l'existant, et une analyse sociologique de notre rapport au jardin ces dernières années.
La section 3 mettra en avant l'hypothèse envisagée pour répondre à notre problématique et la portée que celle-ci pourrait avoir pour une PME.
La section 4 décrira les canaux du système réalisé dans le cadre de ce projet.
Enfin la section 5 portera sur les potentiels évolutions de cette innovation et les risques à éviter.

2 ETUDE DU CONTEXTE ET DU BESOIN

2.1 Étude de l'existant

2.1.1 La place du jardin en zone urbaine

La place du jardin dans notre société moderne est reliée à notre rapport à la nature. La première réflexion sur notre rapport à la nature et les prémices d'une pensée écologique est apparu en 1990 à la suite du rapport Brundtland. S'en est suivi une politique appelant à la construction et à la conception d'une ville qui maintient le contact avec la nature, donc qui permet un retour aux sources et à une qualité de vie. Car la végétation était utilisée principalement pour pallier les divers problèmes de pollution.
Les jardins collectifs dans la ville, comme les jardins ruraux, qu'ils soient d'agrément ou qu'ils aient une fonction alimentaire deviennent une des voies du développement durable. Cette évolution va conduire à un renouvellement des fonctions économiques, environnementales et sociales des jardins.[2]

Le jardin et l'espace extérieur a alors un grand lien avec la ville, sa topographie ainsi que ses températures. C'est pourquoi, les communes tendent à limiter leurs constructions dans les zones à ciel ouvert et à privilégier des lotissements écologiques avec des jardins et terrasse partagés pour améliorer la qualité de vie des habitants et s'implanter dans une politique de ville plus verte.
On retrouve des espaces verts privés, le plus souvent dans les régions proches de la mer et de l'océan, ainsi que dans les zones habitées par une classe plus ou moins aisé avec des terrains assez étendus.

L'aménagement de jardin en ville se caractérise par une organisation de la géographie de l'agglomération. En effet, le jardin a aujourd'hui une place centrale dans le choix de maison et dans la construction de logements. C'est un choix que font plusieurs régions en France dans la construction de leur espace foncier.
Les maisons avec jardin ou terrasse se localisent principalement dans les régions à l'ouest de la France telles que La Loire Atlantique, en région sud-est ou en Ile de France. En notant que cette dernière possède le moins de jardin par rapport au deux première.
71 % des foyers possèdent un jardin en France soit 20,2 millions de foyers. Dont 16 millions possèdent un jardin. [16]

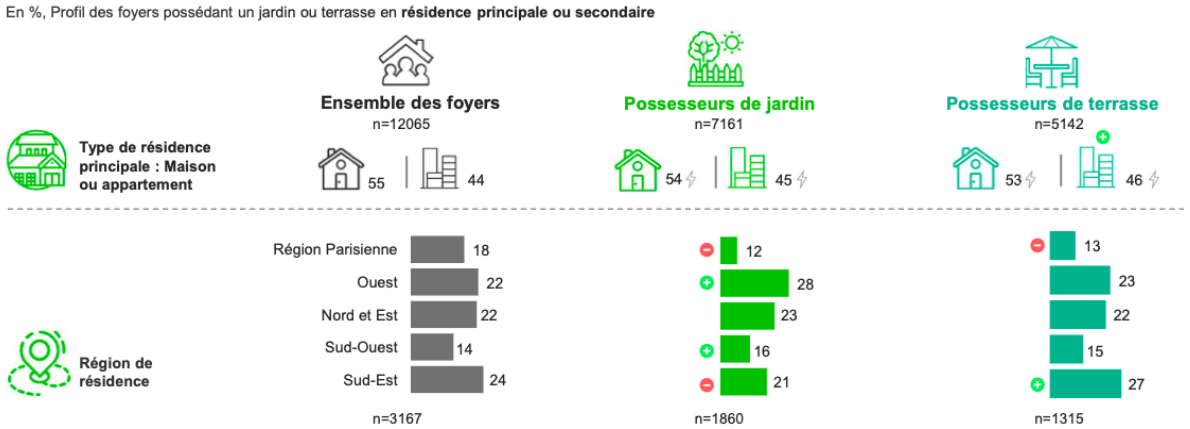


Figure 1. Étude de rapport, d'achat et de prestation sur le marché du jardin en 2019 – Kantar, France agrimer, Valhor – répartition des jardins et des terrasses en France (%)

Habiter en métropole ou en zone périurbaine induit des modes de vie différents qu'en campagne et un autre rapport à l'extérieur. En effet, en zone urbaine, habiter une maison avec jardin ou terrasse montre un changement de classe et une appartenance à une partie de la population aisée. Cette appartenance s'accompagne d'un mode de vie rythmé entre l'intérieur et l'extérieur.
Le jardin d'habitat (c'est-à-dire une maison avec jardin) est caractérisé par le mode de vie de ces habitants et reflète ces activités et ces besoins. Il est caractérisé par différents espaces : l'espace de culture (potager) l'espace de détente, l'espace fleuris, l'espace de repas.[4]
De plus, notre rapport au jardin peut évoluer. En effet, on retrouve un changement de comportement ou d'activité lorsqu'un foyer accueille des enfants. Le jardin devient donc un espace de partage et d'apprentissage pour les plus jeunes.
Ce changement nous renvoie aux pratiques faites en zone rural dans le domaine de l'agriculture qui est souvent une pratique de partage et d'apprentissage. Ce rapport urbain et rural se traduit donc dans le jardin des villes périurbaines.[2]

Le jardin le plus courant dans ces espaces pavillonnaires sont les espaces jouxtant les habitations, on les retrouve principalement derrière la maison ou avec une traverse sur le côté de la maison. On retrouve des espaces mesurant 300m^2 en moyenne. Il demeure un espace cacher des regards et tout comme la maison il est considéré comme intime, c'est pourquoi on retrouve beaucoup de haies, de palissade ou de clôture.[7]

Ces espaces sont très peu considérés par les politiques malgré qu'elle fasse passe du patrimoine végétal d'une ville. Cependant tout comme les jardins public ou jardin partagé, elles doivent respecter des mesures prise par la ville (initiative zéro pesticides, Paris) et peuvent être l'objet d'aide de la commune pour la préservation de la biodiversité ou la diminution de la pollution (plan biodiversité, ville de Paris)

Pendant l'année 2020, le virus de la Covid 19 a obligé les Français à rester enfermer chez eux de mars à mai 2020. Ils ont alors développé un nouveau rapport à leur jardin personnel et à l'espace vert collectif Chaque jour dans leur déplacement autorisé, ils se rendait dans les parcs et jardins pour profiter de l'air frais et s'évader du cadre de vie angoissant de la crise sanitaire. Les personnes ayant des jardins, ont-elles décidé de travailler en distanciel sur leur terrasse ou de passer leur soirée à l'extérieur.
À la suite de ce confinement, la tendance qu'avait les Français à se centraliser à Paris a changé. Ils se sont tournés vers des villes de province (Aix en Provence, Nantes, Bordeaux…), et se sont installés dans les zones péri-urbaines de ces dernières. Ou alors ont déménagé d'un appartement vers une maison avec jardin.
Il y a donc une forte demande en aménagement de jardin qui s'est faite pour les entreprises du paysage et fait grimper le chiffre d'affaires des entreprises qui stagnait depuis 2016.[16]

Figure 2. Image du parc des buttes Chaumont, confinement 2020 – Le parisien

2.1.2 – Le cas d'étude – Une entreprise d'aménagement d'espace vert

Notre étude se concentre sur l'entreprise NEVE basée à Ballainvilliers, elle s'est créée en 2020 en pleine crise sanitaire. C'est une entreprise d'aménagement de jardin et d'entretien d'espace vert.
Cette entreprise appartient au groupe LGMco, spécialisé dans le BTP et les travaux publics. Ce dernier a ouvert en 2017 et permet à NEVE de récupérer des clients.
NEVE est une entreprise à échelle humaine et familiale qui permet un contact facile et un travail minutieux.

Actuellement, les principaux contrats qu'honore NEVE proviennent d'appels d'offre public ainsi que de quelques contrats de particuliers. Le profil de ces derniers est principalement des personnes de classe aisée, mais NEVE pourrait également s'adresser à d'autres profils.

Cependant en se référant à l'étude de marché faite en 2019 par l'entreprise Valhor[16], le chiffre d'affaires du marché est principalement basé sur des clients particuliers.

Aujourd'hui l'espace vert personnel est entretenu soit par un professionnel soit par le particulier lui-même. Les enseignes de jardinerie (Botanic, Truffaut, Jardiland…) envahissent le marché et vendent tout ce dont on a besoin pour fleurir notre jardin ou l'entretenir. Cependant certains particuliers n'ont pas le temps ou les connaissances pour réaliser eux même leur jardin et préfèrent allouer un budget pour faire appel à des professionnels.
Le marché de l'aménagement de jardin se compose principalement de PME ou TPE de 1 à 5 employés qui interviennent chez les particuliers. En effet, les clients sont à 70% des particuliers avec un jardin en moyenne de 300m^2.
Pour une PME dans l'aménagement de jardin, pour se démarquer il faut proposer un service innovant à forte valeur ajoutée qui bénéficierait aux usagers et à l'entreprise.[16]

En région Parisienne, on retrouve plusieurs entreprises qui proposent des services inédits.
L'entreprise Green décor propose des formules selon le budget et la demande ce qui permet d'être transparent avec le client et de s'adapter à sa demande. En effet, le principal frein sur le marché, ce sont les devis qui peuvent très vite augmenter ; c'est pourquoi les formules peuvent être intéressante.
Spécialiser dans le balcon et les terrasse, l'entreprise Balcoon propose un catalogue de jardin d'ambiance pour permettre aux clients de se projeter plus facilement à un cout plus intéressant.
Ces deux entreprises aux services innovants sont des concurrents directs de NEVE qui voudrait proposer à son tour un service à forte valeur Et ainsi gagner en compétitivité en parts de marché.

2.2 Besoin de l'usager et de l'entreprise

2.2.1 Analyse du besoin de l'usager

Pour comprendre le besoin de l'usager, il faut tout d'abord analyser son rapport à la nature et ce qu'il recherche. D'après « Les espaces verts urbains : étude exploratoire des pratiques et du ressenti des usagers »[12] par VertigO, il est question d'une étude des espaces verts urbains tels que les parcs ou les bords de fleuve. Les résultats recensés laissent penser plusieurs choses : tout d'abord que l'espace vert en ville (parc ou jardin privé) est une manière de s'évader de la vie citadine et de se couper du stress et du bruit de la ville. En effet la végétation donne une impression hors du temps que recherche les citadins. Dans les jardins privés, on retrouve cet aspect grâce aux haies qui coupent la vision de l'extérieur.
De plus, on remarque une nette différence de comportement entre la vie urbaine et la vie dans un espace vert. Les usagers sont plus calmes, plus lents. Mais « substituer la ville aux sens suppose une certaine superficie en mesure d'offrir des proximités quotidiennes avec la nature »[12] C'est pourquoi on réussit plus à s'évader dans un jardin que sur une terrasse à superficie restreinte.
En ce qui concerne le ressenti du fleurissement, on retrouve une volonté de retrouver une « vraie » nature en ville (clergeau, 2007). Les usagers veulent retrouver une nature moins maitrisée et plus spontanée en supprimant les désherbages systématiques… Cette nouvelle vision de l'espace extérieur s'accompagne d'un souhait de retrouver une nature en ville et une biodiversité dans son jardin (insectes, oiseaux…).
Aujourd'hui, on retrouve beaucoup de particuliers qui installent des ruches dans leur jardin, ce qui permet un fleurissement et le développement d'un possible potager et parterre de fleurs.

L'occupation des espaces extérieurs par les particuliers peut être relier à la culture. En effet dans les pays du sud tel que l'Espagne ou le Portugal. On vit beaucoup en extérieur et on apprécie la fraicheur donner par la végétation. Le jardin est un lieu de rencontre et de partage pour la famille ou les amis mais aussi un lieu de restauration. Dû aux températures très chaude, les dîner se prennent en extérieur. On retrouve dans les jardins beaucoup de culture alimentaire, potager ou jardin fruitier. On retrouve une réelle volonté de manger ce que l'on produit réellement et de transmettre cette pensée aux prochaines générations.
Cette approche du jardin a été transmise dans les foyers français. Tout d'abord grâce au métissage, qui à amener les cultures à se croiser, mais aussi par rapport au réchauffement climatique. On effet nous allons plus profiter de notre jardin quand la température nous le permet et pour se rafraichir en soirée. Ce comportement était sectorisé dans les régions à forte chaleur tel que l'Occitanie ou la région PACA mais s'étend sur le reste de la France aujourd'hui. C'est pourquoi de plus en plus de foyers installent des piscines dans leur jardin.

Notre utilisation de l'espace vert va être rythmé de plusieurs temps selon la période de l'année, la composition du foyer (famille, retraité, jeune adultes…). On va retrouver des espaces de jeux, ou des installations pour les enfants tels que des balançoires ou des petites cabanes lorsque le foyer est composé de jeunes enfants. De manière récurrente on retrouve une terrasse avec un espace de repas, un barbecue… ainsi qu'un espace gazonné pour se reposer ou lire.

En s'appuyant sur ces observations, nous pouvons en conclure qu'en France il y a une forte tendance à s'installer dans une maison avec jardin. Le confinement de 2020 à aussi pousser les usagers à considérer leur jardin comme une pièce à part entière de la maison qui doit être aménager. Cependant cet aménagement est différent selon l'usager, les habitudes de jardinages ou le temps qui peut y consacrer c'est pourquoi 14,9 % des foyers ayant un jardin ou une terrasse ont eu recours à une personne extérieur pour aménager leur jardin.

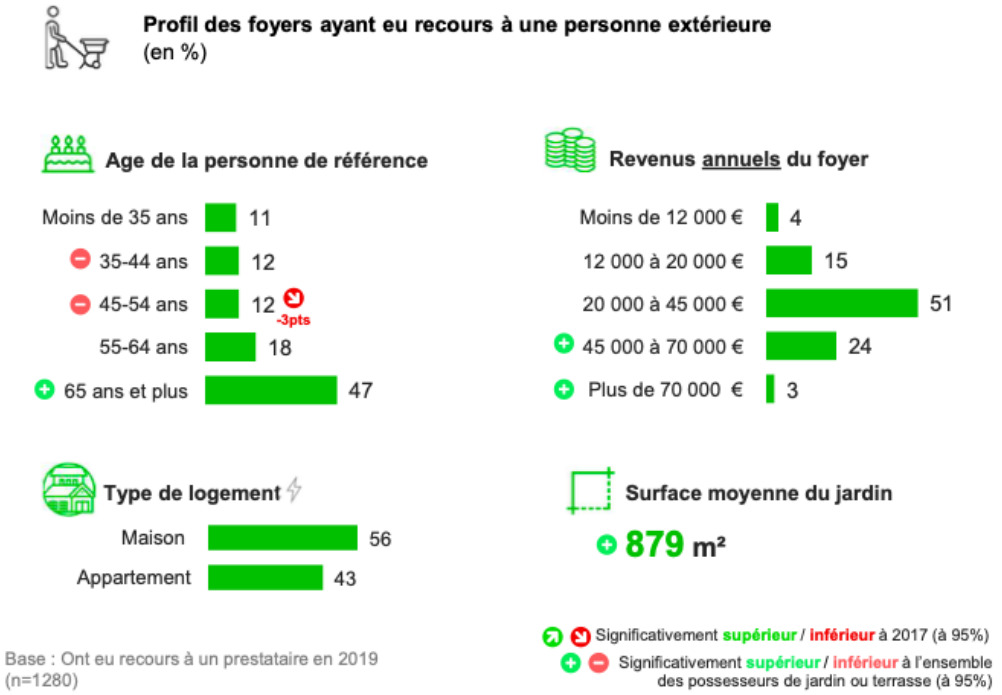


Figure 3. Personne ayant eu recours à des service d'espace vert – étude de marché 2019 Valhor

En se référant à la figure 3 : on remarque que les foyers ayant eu recours à des entreprises d'aménagement de jardin sont principalement des personnes ayant 55 à 65 ans et plus avec un salaire annuel de 20 000 à 70 000 €.
Le besoin identifié grâce à l'étude de marché réalisé par Valhor[16] est que l'usager va de plus en plus se tourner vers des entreprises de l'espace vert pour l'aménagement. Les chiffres sont en hausse depuis plusieurs années. Ces clients sont principalement des particuliers.
Ils ont besoin d'un jardin clé en main où ils pourront recevoir, manger, et se détendre dans un écrin de verdure citadin.

2.2.2 Les besoins identifier de l'entreprise

La réalisation d'un projet en innovation pour une PME s'appuie sur plusieurs aspects démontrer par l'article « le comportement d'innovation des PME dans les pôles de compétitivité : un cadre d'analyse ».

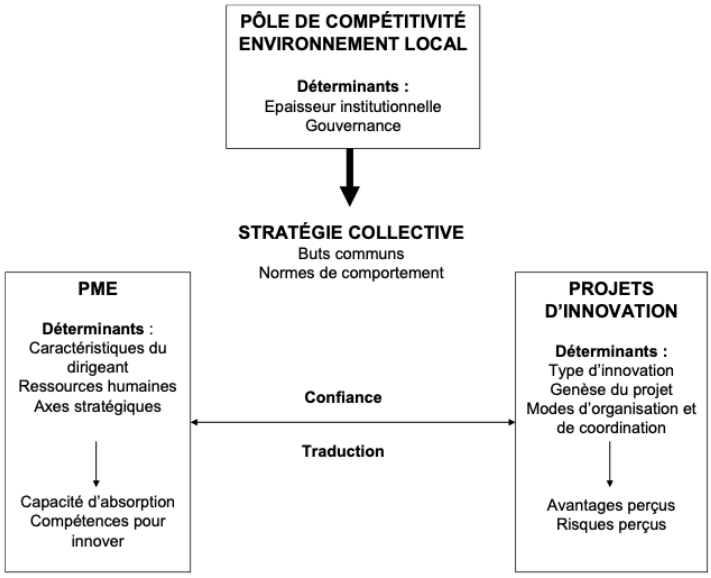


Figure 4. Déterminant du comportement d'innovation des PME dans les pôles de compétitivité – VertigO « le comportement d'innovation des PME dans les pôles de compétitivité : un cadre d'analyse »

Le premier étant la dimension collective nécessaire à la création d'un projet, de comprendre les besoins de chacune des parties et s'appuyer sur les connaissances de chacun, et ensuite de pouvoir penser en réseaux en travaillant avec des partenaires. Le concept de réseaux est une « forme organisationnelle privilégiée dans les travaux consacrés à l'innovation »[15] et permet une méta-organisation (callon, 1991, 1992) qui est une nouvelle forme de coordination en associant des acteurs de catégories différentes.
La dimension territoriale est un point non négligeable dans ce type de projet, car les entreprises se retrouvent rassemblées sur et dépendantes d'un même espace géographique. Ce qui permet une organisation de l'innovation sur un territoire. Cependant ce postulat de la proximité pour l'innovation peut créer des conflits d'intérêt, des risques d'opportunisme…

Sur le marché de l'aménagement de jardin, il est difficile de faire un gros chiffre d'affaires. Après une étude réalisée en interne par l'entreprise NEVE, ils ont remarqué que pour que l'entreprise puisse se développer comme elle le voudrait il fallait réaliser beaucoup de chantier et donc beaucoup de devis. Étant une PME ouverte depuis 2020, l'entreprise ne compte que 5 salariés donc un directeur général. Il faut donc pour eux, réussir à jongler entre la réalisation des devis et les chantiers.
Les besoins identifiés sont pour pouvoir développer l'entreprise NEVE, il faut augmenter le chiffre d'affaires en se démarquant de ces concurrents et en s'imposant sur un marché cible pas encore totalement acquis (passer des appels d'offres public à des particuliers)
Pour obtenir cette idéalité, il faut réorganiser en interne les différentes tâches et proposer un service innovant pour le client.

L'aménagement de jardin se réalise par étapes : la prise de contact, la réalisation du devis et les propositions de plan, la réalisation sur chantier, et la livraison du projet.
Ces étapes demandent une main d'œuvre expérimentée qui va devoir jongler entre des jardins qui ne se ressemblent pas avec des essences de végétaux et des besoins différents. Cette adaptabilité demande un temps qui pourrait être gagné par l'entreprise.
En s'appuyant sur une étude réalisée sur l'entreprise IKEA, on retrouve une industrialisation d'un service surmesure pour les cuisines ou pour les dressings. Grace à un logiciel sur le site d'Ikea, le client peut réaliser sa modélisation rêvée et avoir une fourchette de prix. Cette méthode permet à Ikea de prévoir en amont les démarches à suivre et à l'usager de pouvoir se projeter dans son projet.

On peut alors faire le parallèle avec l'entreprise NEVE et se demander comment industrialiser un service d'aménagement de jardin pour une organisation interne et un meilleur rendement externe.

3 Les services hybrides et leurs efficacités

3.1 Solution envisagée

L'hypothèse de résolution de notre problématique s'appuie sur l'élaboration d'un service hybride, s'appuyant sur le besoin de suivi des usagers et le besoin organisationnel de la PME. Neve s'inscrit dans une volonté d'innovation organisationnelle qui s'appuie sur l'étude de Cecile Ayerre « innovation technologique et organisationnelle au sein de PME innovantes : complémentarité des processus, analyse comparative des mécanismes de diffusion »[3].

L'innovation organisationnelle intervient ici sur la structure de certaines unités dans l'entreprise et vise à embaucher des cadres aux compétences variées dans l'entreprise pour aider à la séparation des activités de direction et les activités de recherche, qui était assumées par le directeur général. L'élément générateur de cette organisation s'appuie sur une technologie de deux plateformes numériques.

Le développement de ce service permettrait à NEVE de réorganiser sa manière d'aborder un chantier en rationnalisant l'espace à l'aide d'une fragmentation et d'une réorganisation de la main d'œuvre. De plus, toute l'organisation et la communication avec le client se ferait par le numérique en proposant un suivi de projet avant-pendant-après.

3.2 Le service hybride et leur porté pour les PME.

Le service hybrides est une question de gestion interne. Elle s'appuie sur la volonté de gérer au mieux ces ressources (physiques ou imperceptible) et de maitriser le risque opérationnel (temps, prix de main d'œuvre…). Tout en analysant à l'avance le contexte environnemental autour du projet qui pourrait être perturbateur de la stabilité du système, ce qui amène à une « permanente évolution adaptative »[14].
Sur le modèle des organisations hybrides de gouvernance, le client devient acteur du projet en interagissant dans la conception à travers du service hybride. Cette interaction entre le professionnel et le client permet une passerelle et une constante amélioration du service.

Le service hybride s'inscrit dans la transition numérique des entreprises et plus particulièrement des PME. Utilisation du numérique comme outils de communication et de transmission permet d'avoir un langage universel autour du projet et de pouvoir interagir avec des acteurs et des partenaires comme avec des clients.

4 LA MISE EN OEUVRE DU SERVICE

Le projet s'articule autour de trois entités, deux plateformes numériques reliées ou non, réalisées sur la base du besoin client et de l'entreprise. Ainsi qu'une organisation sous forme de concept fragmenté pour permettre une visualisation rapide pour l'ouvrier sur le chantier et un suivi d'avance pour le client plus facile.

4.1 Les interfaces numériques

Tout d'abord le service s'appuie sur une visualisation du chantier grâce à un logiciel de simulation. Qui permet une transparence avec le client et une visualisation in-situ. Ce service rentre dans la phase amont du projet lors des premiers contacts avec le client. Son développement s'appuie sur des logiciels tel que celui d'Ikea ou le logiciel d'entreprise de cuisiniste.

En effet, ces deux exemples mettent en lumière l'aspect sur mesure qui attire le client, et lui donne une impression de construire toutes les pièces de son espace. Cependant les modules proposés sont déjà fabriqués et il réalise seulement l'assemblage. De plus, cette manière d'aborder le montage d'un projet permet une fluctuation visible du prix et une adaptabilité pour le client qui pourra modifier ces choix directement sur le logiciel avec le professionnel.

La deuxième partie du service est une application mobile accessible à l'usager déjà client. Cette plateforme est développée dans l'objectif de proposer un suivi au client après l'installation de leur jardin. En effet à la suite d'une étude de la concurrence et des tendances sur le marché, NEVE a conclu que les clients avaient besoin d'un suivi pour bien s'occuper de leur jardin. L'application propose des conseils et coaching pour entretenir ses fleurs et ses arbres, et informe sur toutes les variables qui pourraient influencer le jardin (météo, humidité, période de l'année…). De plus l'application propose des options pour le jardin. Neve, pour ce projet souhaite signer des partenariats qui permettront de proposer du mobilier de jardin, des piscines, ou des structures extérieurs… dans l'optique de proposer un jardin totalement terminé à la fin de l'intervention. Cependant le client peut de lui-même demander du mobilier sur l'application et pourra parcourir les nouveautés des partenaires. Enfin, il peut accéder à un service d'entretien et une prise de rendez-vous sur l'application.

4.2 Le concept organisationnel

Pour permettre à NEVE d'organiser ce service en interne, l'hypothèse de fragmentation et de rationalisation a été proposé.

L'objectif était d'analyser les différents espaces dans le jardin pour créer des modules adaptés au plus grand nombre, pour cela NEVE s'est appuyé sur la vision du design pour tous. Les végétaux ont été choisis par rapport à leur couleur, leur forme mais aussi à l'adaptabilité à l'environnement (ici l'Ile de France). Sur ce modèle, un catalogue de dix modules est proposé, allant d'un simple module de gazon jusqu'à une terrasse. Cette rationalisation permet à l'entreprise une organisation interne rapide et une négociation des prix de la matière première plus efficace.
Grace à la préconception, le pôle bureau d'étude économise du temps. Les devis sont préconstruits et le prix des modules déjà définis au préalable avec le prix de la matière première, de la main d'œuvre et du déplacement.

L'aspect formel s'appuie sur une étude de la forme d'un jardin et d'une maison en la rationnalisant à la forme archétypale qui est le rectangle. Cette géométrisation de l'espace est de plus en plus courante dans les nouvelles constructions comme les lotissements ou les résidences avec cours intérieur. Cette inspiration est venue de la tendance américaine des rue pavillonnaires, très normées et alignées à la perfection. Cependant, pour s'adapter à la demande des particuliers ayant un jardin plus anguleux, le service propose des découpages spécifiques toujours géométrique en diagonal ou en arc de cercle ce qui réduit le prix des modules pour les espaces plus exigus.

5 PERSPECTIVE D'EVOLUTION ET RISQUE

5.1 Expansion de la PME et risques

Cette nouvelle organisation et ce service hybride innovant a pour objectif de faire développer l'entreprise NEVE et lui permettre d'être en mesure d'embaucher de la main d'œuvre : des cadres, des chefs de chantier, des assistants administratifs, etc… Elle permettra aussi de donner une visibilité aux autres entités membres du groupe LGMco.
L'arrivée sur un nouveau marché pour NEVE n'est pas sans risques. Le carnet d'adresses actuel de l'entreprise se composant principalement d'entreprises publics ne permet pas d'assurer une demande

dans les clients actuels. C'est pourquoi une étude des risques et des couts est nécessaire pour pallier cette éventualité.
En effet l'expansion d'une PME demande une réorganisation complète de l'entreprise dû à une forte demande mais aussi à l'arrivée de personne de secteur différents nécessaire au fonctionnement. Ainsi il faut réorganiser les tâches qui était jusqu'alors centralisées à une seule personne, et repenser la communication interne.

La capacité à gérer une innovation sur le long therme est importante pour l'entreprise NEVE. La capacité d'innovation d'une PME est calculée par rapport à son dirigeant[8]. La volonté de ce dernier à innover influence les freins et les choix du pôle R&D de l'entreprise. Cependant la bonne communication entre les équipes est primordiale au-delà du simple objectif donné à un salarié il faut construire une ligne directrice avec laquelle l'entreprise pourra se référer.
Ces détails qui construisent la capacité dynamique de l'entreprise et sa performance en innovation est appelée « micro-fondation » est un aspect des PME innovante très peu mise en avant mais qui est un risque élevé dans l'échec des projets innovants.[10]

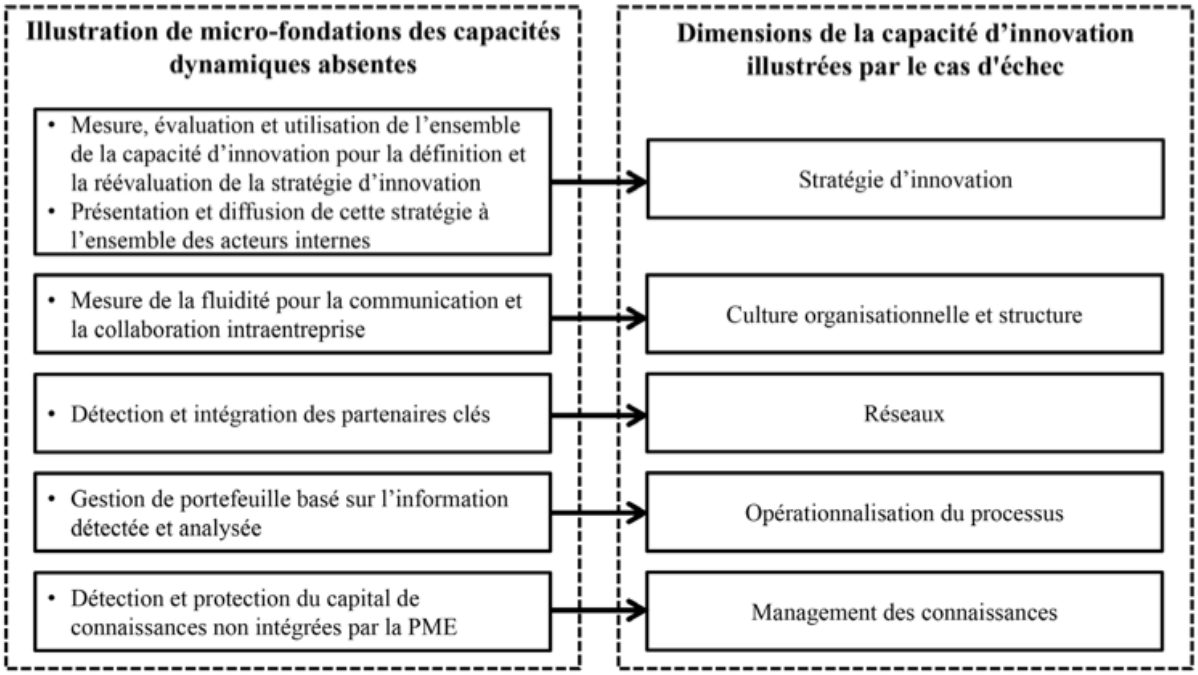


Figure 5. Micro-fondations des capacités dynamiques influençant par leur absence la capacité d'innovation – Antoine Pierre et Anne-Sophie Fernandez « Capacité dynamique et innovation en PME : analyse d'un cas d'échec », 2018.[8]

Comme illustré sur la figure 5 les micro-fondations influe sur certaines branches de la capacité d'innovation. Dans l'article « Capacité dynamique et innovation en PME : analyse d'un cas d'échec » par Antoine Pierre et Anne-Sophie Fernandez (2018), l'entreprise Alpha fait le cas d'une étude sur un échec en innovation et les auteurs ont analyser les facteurs qui ont conduit à cet échec.
C'est cinq capacités d'innovation n'ont pas ou ont été très peu prise en compte par le dirigeant qui a préféré se référer à la demande client qui n'était pas forcément pertinente face à ses concurrents.

En effet actuellement le marché voit émerger des PME innovante tous les jours qui possèdent une dynamique d'innovation très élevée comme des initiatives dans des écoles d'ingénieur avec des objectifs PME etc… C'est pourquoi les PME déjà existantes ne peuvent pas rester sur une première innovation.

6 CONCLUSION

Pour conclure, le développement d'une innovation en aménagement de jardin dépend de plusieurs facteurs : tout d'abord le facteur géographique du au rassemblement de nombreuse PME du même secteur en Ile de France. Le facteur humain interne à l'entreprise, les ressources humaines disponibles ainsi que la dynamique interne qui relie la gestion et le management de l'information et des équipes ainsi que la gestion des ressources et des projets. De plus L'innovation en PME est très importante pour aider au développement de l'entreprise, surtout dans le domaine de l'aménagement de jardin ou le client attend une proposition de service à forte valeur ajoutée pour choisir son prestataire.
Toutes ces données sont à prendre en compte en interne et forme les micro-fondation prépondérante au développement d'une innovation.
Enfin le développement d'un service en aménagement de jardin et le brevetage de ce dernier ne doit pas être une fin en soi. L'entreprise déposante du brevet et du dit système doit continuer à se renouveler et peut être continuer l'évolution du service selon la tendance du marché pour toujours garder l'ascendant sur ces concurrents directs.

7 BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES

[1] Teddy Arrif, Nathalie Blanc et Philippe Clergeau, *Trame verte urbaine, un rapport Nature-Urbain entre géographie et écologie*, Cybergéo, 2011.

[2] Lama Asaad, *La nature en ville et le cas spécifique des jardins urbains : approche geographique et historique de la ville de lyon*, HAL Open, p 1-209, 2017.

[3] Cecile Ayerre, Innovations technologique et organisationnelle au sein de PME innovantes : complémentarité des processus, analyse comparative des mecanismes de diffusion, érudit, p 9-34, 2012.

[4] Olivier Aznar, *Une caractérisation des services environnementaux à dimension paysagère produits dans les espaces ruraux*, OpenEdition journal, p 01-19, 2002.

[5] Julien de Benedittis, Sandrine Berger-Douce, Jean-Michel Degeorges, François Jaujard, Thibault Metailler, *Transition numérique et dynamiques intra et inter-organisations dans les PME*, HAL-EMSE, p 1-23, consulté le 05/06/2022.

[6] Luc Bergeron, Daphna Glaubert, *le design comme accélérateur de projets technologiques en phase d'incubation précoce*, Cairn, p 78-91, 2020.

[7] Julien Essers, Camille Robert-Bœuf, *Habiter la nature en métropole une hybridation ville-campagne par le jardin*, Développement durable et territoire, p 1-21, 2021.

[8] Anne-Sophie Fernandez, Antoine Pierre, *Capacité dynamiques et innovation en PME : analyse d'un cas d'échec*, Revue internationale P.M.E, p 131-165, 2018.

[9] Katherine Gundolf, Annabelle Jaouen, Leila Temri, *Le comportement d'innovation des PME dans les pôles de competitivité : un cadre d'analyse*, ResearchGate, p 1-26, 2006.

[10] Fréderic Guyon, *Les jardins familiaux aujourd'hui des espaces socialement modulés*, Erès édition, espace et société, p 134-147, 2008.

[11] Jean-Michel Larrasquet, Emilie Chapotot, *Innovation, usages, responsabilité*, deboeck supérieur, projectique, p 53-55, 2010.

[12] Nathalie Long, Brice Tonini, *Les espaces verts urbains : étude exploratoire des pratiques et du ressenti des usagers*, VertigO, p 2-19, 2012

[13] Aurélie Marchal, *réflexion sur l'innovation organisationnelle et l'ère du numérique*, EMS Edition, question de management, p 131-141, 2014.

[14] *Le design du système de contrôle de gestion des PME : une quête de stabilité adaptative*, Orbi, p 1-31, consulter le 14/06/22.

[15] Philippe Oswald, Nadine Richez-Battesti, *Vers un modèle hybride d'organisation et de gouvernance : une alternative à la banalisation en situation concurrentielle ?*, Recma, p 56-74, 2010.

[16] Valhor., *Etude du marché de l'aménagement de jardin*, 2019.

CONCEPT OF DIGITAL TWIN FOR MEDICAL DEVICES

Roberto Riascos[1,2], Egon Ostrosi[2], Jean-Claude Sagot[2], Josip Stjepandić[3]
[1] Roche Diabetes Care GmbH, Germany
[2] ERCOS/ELLIADD EA4661, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France
[3] PROSTEP AG, Germany

Summary. The concept of Digital Twin (DT) is expanding across industries. It aims to create digital surrogates of the product to reduce costs of physical field experience and exchanging decision-making information across product lifecycles. Connected devices and Internet-of-Things technology is evolving into cheaper implementations allowing companies to gather real usage information from the customers. This article explores the characteristics of a DT and explores the concept for medical devices. A specific business use case is described where a DT shall improve the battery usage of device during the development process and explores the expansion of the DT for later product lifecycles.

Mots clés (5 maxi) : Digital Twin, Medical Device, Modular Design, Product Lifecycle Management, Transdisciplinary Engineering

1 STATE OF THE ART

1.1 Digital Twins

Over the last few years, a concept called Digital Twin (DT) has continuously emerged as a comprehensive approach in industrial domains. The concept comprises a description of strong coherence between physical products, processes, or services "as delivered" and their virtual surrogates. It builds the foundation for connected products and services. Three main characteristics of DT have been identified: representation of a physical system, bidirectional data exchange, and connectedness along the entire lifecycle. We have explored this concept in non-technical disciplines and have found several similar approaches to interaction between the real world and its digital surrogates:

1.2 DTs in medical devices

Under medical devices we mean all instruments, apparatus and software intended for use in diagnosis, cure or prevention of diseases in humans or other animals. DT technology has the potential to transform healthcare in a variety of ways improving the diagnosis and treatment of patients, streamlining preventative care and facilitating new approaches for care planning.

The kernel of a DT consists of the simultaneous occurrence of the physical product and its digital surrogate. The surrogate model provides a virtual representation of the real system or object. Only those properties of the real system are mapped in the digital model that lead to an accurate virtual representation of device behaviour. With the digital model, it is possible to perform simulations and conduct analyses and evaluations that were previously done either by expensive physical simulations or based on mathematical calculations.

2 PROPOSED APPROACH

The large-scale development of medical devices relies on both mechanistic and data-driven techniques, and requires the integration and ongoing update of multiple module and component models developed across many different laboratories.
Analogous to typical approaches for preventive maintenance of complex products, DTs of medical devices, comprise the computational models of biological processes calibrated to patients using multiple heterogeneous data streams.

The design framework should be able to provide a performant interoperability and be generally applicable to all model types. A problem that needs to be solved for the design of hybrid models that integrate different modeling frameworks is the transformation of data types between models.
All modules either store data in a global model state, or forward data directly to one another. Finally, a good design should provide the architecture and means to collect and analyze data, which in turn, produces the results for sound decisions.

2.1 Use Case

A portable medical device needs an appropriate power supply which is provided by an exchangeable battery with estimated capacity for at least 2 weeks. The output of the battery depends on the several parameters such as:
• how often the device is used with the corresponding usage profile and the functionalities triggered,
• environment temperature and humidity of the device
• the amount of energy consumed by the device's systems, some of which could be of high power consumption.

In order to ensure a usable device during the stipulated timeframe the R&D department invests heavily in battery tests, collecting data to design the device to meet a standard profile. In parallel these tests help the R&D department to find the batteries in the market that deliver the above mentioned profile needs. The standard usage profile is clearly framed in the product's requirements and specifications.
Given the nature of the agile development of the product, performing extensive and long-lasting battery tests for each product change was impracticable for the short release iterations of the product. To solve this, the department decided to implement a DT of the battery that will grow in parallel with the real product and which shall be able to faithfully represent the product in short cycled simulations to support an iterative release.
In this use case the R&D department partners with a supplier that has extensive experience in the matter of battery simulations and supports several industries in this field. Based on the requirements and specifications created, edit and controlled in the Application Lifecycle System by the R&D department. User requirements are used to define several usage profiles; availability and costing requirements define batteries in the market to be considered to create the DT.
The supplier building the DT procures the short-listed batteries and characterizes them using laboratory testing. The results are validated with the physical tests performed with the devices and batteries in several conditions. The results are fed into the DT of the battery. During the development process and any change in the design, an impact analysis will determine if the battery is impacted, in which case a DT simulation/update will be triggered. Based of the change the new usage profile shall be determined.

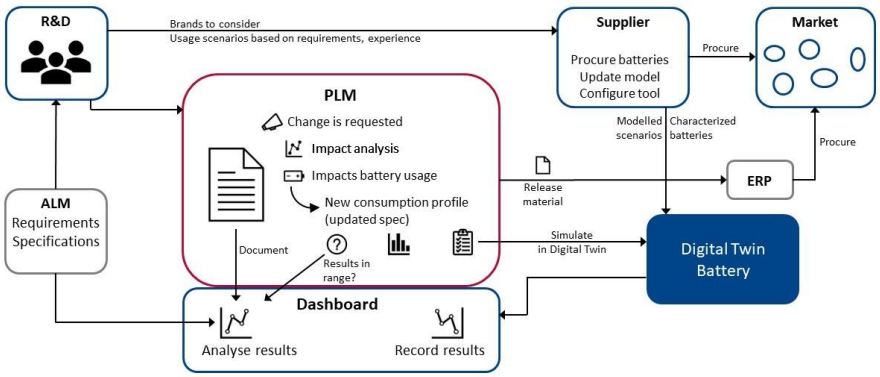


Figure 1 - Use case Battery Digital Twin.

A DT based simulation is triggered using the new design parameters and the new usage profile. Results of the DT simulation may differ, these can validate the proposed changes or trigger further modifications. Another possible result is the usage of another battery brand to perform optimally with the new design. The documentation resulting from the simulation is referenced to the item in the PLM system that represents the battery. The documentation is referenced to the updated version of the battery prior to the official release of the item. The released item determines which batteries will be procured and built into the next physical version of the device. The new information is stored in the PLM system and made available through a dashboard. The dashboard information shows the relation between the latest simulation and the specified expectations of the battery. The DT simulation is updated if the requirements or specification are updated, or if a new battery is considered for characterization.

4 CONCLUSION AND OUTLOOK

While this model is intended to support development, it shall be extended with internet of things capabilities to track real time battery usage to refine the DT model. Feedback is also expected from servicing the devices, hotline support calls and field surveys.
A transdisciplinary approach, to consider all the involved aspects, from technical knowledge, to personnel management to economics and innovation is a key factor to ensure the full exploitation of the medical devices potential. The apex of the DT implementation which is possible to this day represents a fully semantic DT, leveraging acquired knowledge with the use of AI-enabled agents. Machine learning, deep learning, data mining and analysis capabilities are required to construct a self-reliant, self-updatable and self-learning DT.

5 REFERENCES

[1] Council Directive 93/42/EEC of 14 June 1993 concerning medical devices. eur-lex.europa.eu.

[2] M. Grieves, J. Vickers, *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, in: F.J. Kahlen et al. (eds.) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches, Springer International, Cham, pp. 85-113, 2017.

[3] C.K. Lo, C.H. Chen, R.Y. Zhong, *A Review of Digital Twin in Product Design and Development*, Advanced Engineering Informatics, Vol. 48, 101297, 2021.

[4] C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, Y. Rezgui, *Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research*, Automation in Construction, Vol. 114, 103179, 2020.

[5] P.J. Ogrodnik, *Medical Device Design: Innovation from Concept to Market*, 2nd ed, Elsevier, London, 2020.

Contact principal : Roberto Riascos

Coordonnées : roberto.riascos@gmail.com

CONFERE'22
7 ET 8 JUILLET 2022, BÂLE, SUISSE

L'INNOVATION TRANSVERSALE

RICHARD Clémentine[1], Mantelet Fabrice[1] , Gazo Claude[1]
[1] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation LCPI – Arts et Métiers – 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

Mots clés (5 maxi) : innovation, co-créativité, méthodologies

1 INTRODUCTION

Les moyens actuels développés par les entreprises sont par défaut contraints aux postes attribués à chaque individu. En effet, de nombreux corps de métier et savoir-faire différents partagent un même but commun sans pour autant collaborer tous ensemble et contribuer à une innovation continue.
Le sujet de la recherche a donc pour objectif d'apporter de l'innovation transversalement au sein d'une entreprise. Il s'agit dans ce cadre d'application, d'accompagner la conduite de projet collectif et d'apporter des méthodes innovantes pour faciliter de développement de projet.

Au travers de l'innovation, la recherche se doit d'apporter des dispositifs et des méthodologies créatives qui concrétisent des intentions partagées afin de remplir des objectifs clairs sur un périmètre projet prédéterminé. L'innovation transversale est un système évolutif, une expérimentation. Elle a pour but d'apporter de la valeur à des acteurs qui ont des idées et des objectifs.
Mais surtout de co-construire avec toutes les parties prenantes et de connecter les savoir-faire présents dans l'entreprise tout en développant les compétences créatives de chacun pour apporter de nouvelles méthodes et outils.

Il est aujourd'hui crucial de tendre vers une innovation continue et de permettre aux entreprises et à ses acteurs de collaborer transversalement pour plus d'efficience projet et pour développer l'écoute et le partage entre les différents secteurs.
Le cadre d'application présent est appliqué à une entreprise d'horlogerie de luxe. Il y a donc des savoir-faire artisanaux très intéressants et à fort potentiel créatif. La plupart des horlogers ont en effet déjà été sensibilisés à la créativité durant leurs études. L'objectif est de valoriser et renforcer ces compétences enfouies. L'entreprise est divisée en plusieurs secteurs. Les projets se font déjà en équipe multi-secteur mais trop légèrement pour atteindre une réelle collaboration et développer une innovation collaborative et continue.

2 ÉTATS DE L'ART

2.1 Analyse du terrain

Le début de la recherche a consisté à comprendre et étudier les différents secteurs. Il a été nécessaire de découvrir pendant deux à quatre heures chaque secteur pour questionner et analyser leurs fonctionnements. La pratique est également importante pour se mettre réellement à la place des différents acteurs. Chaque personnalité est différente et a un rôle à jouer dans l'innovation continue et la collaboration. Tout comme les savoir-faire, les tâches accomplies quotidiennement sont très importantes pour déceler des compétences individuelles qui pourraient être des leviers d'innovation.

Les éléments et les informations recueillies permettent par la suite de mettre en œuvre des moyens et des outils qui facilitent les échanges entre les collaborateurs. Cela permet le partage de connaissance au travers des groupes pré-établis issus de milieu différent. Il y a aussi un partage d'information liée à une réflexion établie lors des séances. Pour développer leur autonomie, les outils découverts lors de séances créatives doivent être à leur disposition à tout moment de la journée. Par exemple, actuellement des moodboards sont exposées au sein d'un secteur, chaque personne est invitée à rajouter des mots, des images et donner son avis, cela donne lieu à des moments de partage et de discussions pertinents autour du sujet en question.

2.2 Les outils d'analyse

Pour garder une trace de ces informations, il est nécessaire d'utiliser des représentations visuelles plutôt que de l'écrit. De nombreux schémas ont permis la compréhension et l'interprétation des flux d'échanges dans l'entreprise, du plan des secteurs, des typologies de projet, des méthodologies utilisées. La réalisation d'un organigramme relationnel [1] a permis de comprendre et analyser les flux d'échange entre les secteurs lors des projets. Saisir l'organisation complète de l'entreprise demande de prendre du recul et de ne pas avoir directement accès aux schémas et information de présentation de l'entreprise afin de se faire une idée plus objective sur les principes de fonctionnement.
Une fois l'organisation analysée au travers du graphique, il a été nécessaire de retranscrire les métiers et savoir-faire. Une recherche a été réalisée pour trouver un moyen de créer un outil de méthode à l'aide des informations recueillies.
Un premier outil a alors été créé. L'outil est retranscrit sous forme de cartes, chaque carte représente un métier, chaque couleur représente un secteur et chaque contour représente une compétence. Sur cette face visible on peut également lire : les lieux, l'objectif, le domaine d'étude, le nombre de personnes, les atouts et les compétences.
Au verso la carte est vide, on y voit uniquement les cinq compétences générales. Ce jeu de cartes est très utile pour composer les groupes lors des séances car il permet d'organiser visuellement les groupes et d'avoir une vision objective avec le verso ou structurer avec le recto. Le jeu est potentiellement accompagné d'autres cartes dites 'séances' qui comportent un thème et des compétences nécessaires pour les réaliser. Cet outil est un potentiel support et une manière ludique de montrer et pratiquer la recherche.

3 PROBLÉMATIQUE

3.1 Constat

Les entreprises de tous les horizons sont à la recherche d'évolution constante. Pour se développer et innover positivement, il est primordial que les différentes personnes qui ont un même objectif collaborent et soient épanouies professionnellement. Pour améliorer la démarche d'innovation, réaliser des projets avec un maximum d'efficience pour gagner en pertinence et en temps est un réel bonus pour évoluer. De nombreuses actions peuvent être apportées. Elles s'étendent des sujets fonctionnels, structurels ou techniques jusqu'à des sujets relationnels et humains [2], toujours dans le but d'utiliser l'intelligence collective.

3.2 Objectifs

La recherche a pour ambition de permettre une collaboration constante entre les secteurs pour co-créer et s'engager dans une innovation continue. Mettre en avant chaque acteur et chaque savoir-faire pour valoriser tous les métiers et utiliser les compétences individuelles comme levier de l'innovation collective. Mettre en place des outils et des méthodes sur-mesure qui accompagnent les besoins et les projets d'entreprise.
Il faut amener les équipes à se sentir bien et répondre à des besoins physiologiques [3]. Des outils solides et faciles d'utilisation pour rassurer les équipes [3]. Créer des méthodes sur-mesure et instaurer

des règles pour que les équipes appartiennent concrètement à la démarche d'innovation [3]. Rendre visible et communiquer les créations et évolutions permet d'élever la valeur perçue de la démarche [3]. Enfin, l'expérimentation doit être constante tout comme les projets collaboratifs et la création de nouveaux outils [3].
Cette approche a également comme influence d'apporter de l'horizontalité. En effet, tous les profils de l'entreprise sont mis en avant au travers de leurs savoir-faire.
L'indice de réussite de la recherche est que les acteurs aient une compréhension et participation optimum et qu'ils soient autonomes. C'est donc de faire en sorte que chacun apporte régulièrement ses compétences au sein de différents projets à l'aide d'un outil support collaboratif.

3.3 Problématique

Comment permettre et faciliter la convergence des idées à l'aide des différents savoir-faire et acteurs de l'entreprise dans l'objectif de construire une stratégie d'innovation continue ?

Pour apporter de la valeur au travers des séances de créativités, il parait important d'introduire des méthodes variées et sur-mesure à l'entreprise et d'utiliser des moyens simples. L'idéal est de confronter des savoir-faire et des connaissances différentes afin de créer des binômes créatifs et complémentaires. Pour le bien de la recherche, il est également primordial de créer des supports créatifs et sensoriels pour éveiller la créativité, d'utiliser des visuels, des sons et des textures ainsi que de mettre en place des supports volumiques pouvant être interprétés comme ludique et qui transposent des univers visuels créatifs. La compréhension de l'entreprise est également primordiale pour mettre en place les bons outils au bon moment dans les mains des bonnes personnes.

Les axes principaux de l'innovation transversale sont, l'enjeu humain et relationnel, d'accompagner l'innovation, d'initier à la créativité, de renforcer la transversalité, de développer l'attractivité, d'augmenter la transparence et le partage des idées, développer la collaboration et la co-créativité, motiver et mobiliser les parties prenantes. Chacun doit être investi pour permettre l'innovation collective souhaitée.

4 DÉMARCHE ET RÉSULTATS

4.1 Plan d'action

Pour permettre une innovation transversale il faut combiner différentes approches, la co-créativité, la singularité, le suivi et les méthodologies, les outils. Tout d'abord la co-créativité a pour but d'introduire la démarche, d'utiliser l'intelligence collective et de faire émerger des acteurs créatifs. La singularité a pour objectif de pérenniser l'identité de la marque et de créer une harmonie entre l'existant et l'innovant ainsi que d'imaginer les futures ameliorations. Le suivi est là pour faire le lien, intervenir aux bons moments dans les bons projets, résoudre des problèmes liés aux différentes phases de création et aux différentes typologies de projets. Enfin les méthodes et outils sont les leviers pour entreprendre le partage de connaissance et de savoir-faire. Elles ont pour but de construire et accompagner de nouvelles approches. L'innovation transversale étant en constante expérimentation, les méthodes et outils organisationnels ont également pour objectif de noter, d'évaluer et donc d'améliorer les méthodes et outils proposés.

Un des atouts de la recherche est de pouvoir créer des outils au travers des typologies de projet bien différentes, ce qui permet d'avoir un champ d'action ouvert. En effet, plus un projet est défini plus son accompagnement doit prendre en compte le cadre et la structure qui le compose. Contrairement à la naissance d'un projet où la diversité des pistes créatives prime sur la corrélation avec la demande initiale.

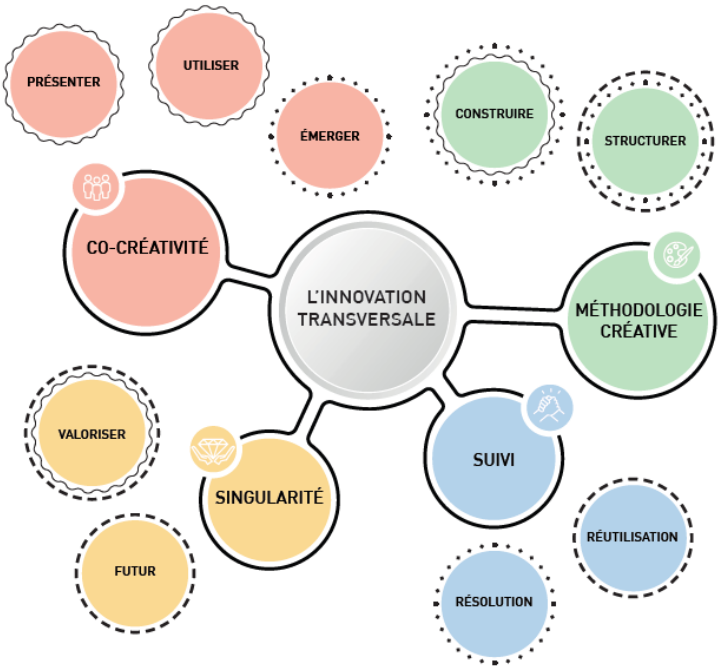


Figure 1. Cartographie du plan d'action de l'innovation transversale.

4.2 Supports et outils créatifs

Une des facettes les plus intéressantes de cette recherche est de devoir se projeter dans le cheminement créatif des participants afin de les amener à extraire et exprimer leurs idées en utilisant leurs connaissances personnelles et professionnelles. Trouver des moyens de les utiliser au travers des outils est également pertinent. Pour qu'une cognition à l'outil opère et donc qu'un chemin créatif se créé, il faut créer un affect visuel, les choses attrayantes fonctionnent mieux [4]. La volumétrie et le jeu ont alors pris une place importante dans la retranscription des supports visuels. À la suite d'une phase de recherche visuelle composée de plus de quarante planches issues de différents types d'inspiration, il a été nécessaire de les transposer sous une forme ludique afin de plaire et donc être utilisé.
À l'inverse l'idée est induite par la contrainte, l'image ou les mots-clés soumettent des propositions et des transpositions visuelles. *« Rien ne se perd, rien ne se crée : tout se transforme »*[5] en effet les idées étant issus de cheminement mental inconscient elle provienne d'image et de combinaison visuel, le tout est d'en avoir conscience pour utiliser aux mieux les outils créatifs. Pour le bien de la recherche et pour tester cette approche il a été nécessaire de réaliser et tester différents supports.
Les outils créatifs présents ci-dessus sont issus de la recherche visuelle.

Figure 2. Les outils créatifs utilises pendant la première séance.

Il y a au total 7 dès et 99 cartes. Les cartes sont composées des mêmes visuels que les dés mais elles comportent 3 mots-clés pour accompagner le chemin créatif. Ces deux premiers outils ont été réalisés dans le but de réaliser une première séance qui viendrait introduire la démarche d'innovation transversale.
La méthode d'approche établie consiste dans un premier temps à présenter et toucher un maximum de personnes ayant des métiers différents pour diffuser les processus de co-création et d'innovation. Le choix d'un projet a alors été un projet déjà existant mais ameér à évoluer. En effet cela permet aux participants de se concentrer sur la compréhension des outils et de la démarche. [6]. Dans un second temps les équipes collaboratives seront ciblées afin de conserver une cohérence globale des flux actuels et de permettre la restructuration individuelle.[6] Cette seconde phase se fera sur un projet plus libre, en utilisant une stratégie évolutive qui permet aux acteurs de développer leur autonomie progressivement.

4.3 Premières séance

La première séance avait pour but de tester les équipes, les méthodes et les outils, mais également comme vu précédemment de diffuser la dynamique d'innovation. Pour structurer et organiser la séance, la méthode des 7P a été utilisés.[7] Pour faciliter la compréhension générale du processus de création, l'utilisation des phases divergentes de la créativité était primordiale. Pour ce faire la séance a été découpé en 5 grandes parties, la présentation, la réflexion, la création, la décision et le bilan.

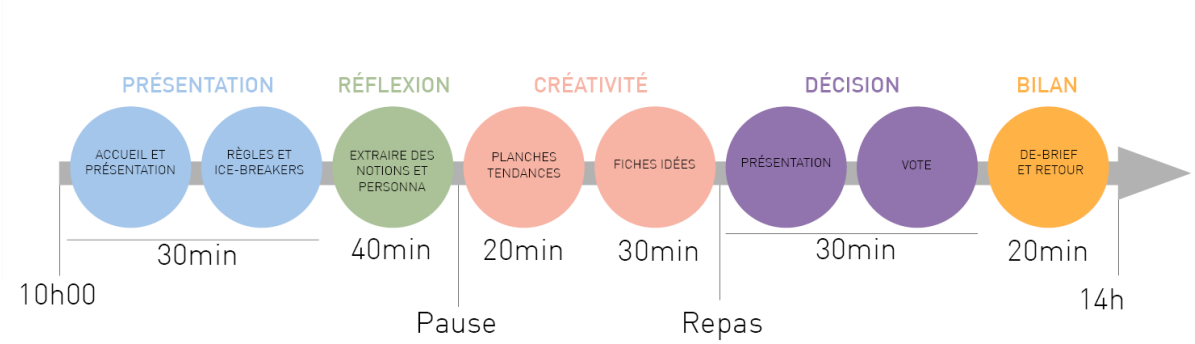


Figure 3. Plan de déroulement de la 1er séance

Afin de bien analyser la séance, il a été nécessaire d'avoir huit participants. À la suite de la présentation du workshop, de la recherche, de ses buts et objectifs, ils ont dans un premier temps écouté les règles de bienséance et réalisé un icebreaker avec un dessin/un mot-clé dans le but de détendre l'atmosphère. Ensuite les participants ont formé des nuages de post-it enjeux et attentes suite à la présentation des personnas. Cela a permis de définir le cadre du projet. Ils ont ensuite réalisé des moodboards issus de leurs réflexions. Ils ont réalisé ces moodboards en binôme à l'aide des mots-clés issus de la réflexion et des images mises à leur disposition. Cela a permis de créer une réelle collaboration entre les binômes composés de secteur différent. La présentation de leurs moodboard a également permis de trouver des pistes créatives. À l'aide des mots-clés, de leurs moodboard et des outils créatifs ils ont ensuite généré des idées. Les cartes étant nouvelles pour eux ils les ont principalement utilisées car les mots-clés les rassuraient. Enfin ils ont présenté leurs idées et voté selon certains critères. Pour finir a eu lieu un débriefing du groupe et un petit questionnaire. Cela a d'ailleurs aidé à anticiper les futures améliorations.

5 RETOURS ET ÉVOLUTION

5.1 Bilan de séance

Le bilan et le questionnaire de la séance ont permis de renforcer des étapes d'apprentissage et d'autonomie ainsi que des outils pour les autres séances. Les étapes les moins appréciées étaient la décision et la réflexion. Pour améliorer cela la prochaine réflexion proposera des questions simplifiées et plus d'accompagnement. Pour la décision le problème est lié au temps, il est donc prévu d'y accorder plus de temps. Enfin pour la créativité le reproche est venu d'un des participants qu'il a eu du mal avec la superposition des étapes qui lui est apparue comme obligatoire. C'est pour cela que rendre autonome rapidement les participants est primordial. Pour ce faire l'accompagnement de la compréhension du chemin créatif va être renforcé. Déjà accompagner par un exemple concret de la réflexion à l'idéation, il y aura pour la prochaine séance un exercice de transposition entre l'image et les mots clés avant la réalisation de la moodboard. Une explication plus détaillée liée au cheminement mental inconscient et les combinaisons visuelles seront également présentées. Ces deux séances valideront la phase de présentation et de test liées au projet de recherche. Pour l'instant les raisons pour lesquelles les participants souhaitent de nouveau participer sont : intéressant, partage entre les départements, positif pour l'entreprise, implication, évolution de l'entreprise, échange d'idées, travail d'équipe, enrichissant, créatif, génial.

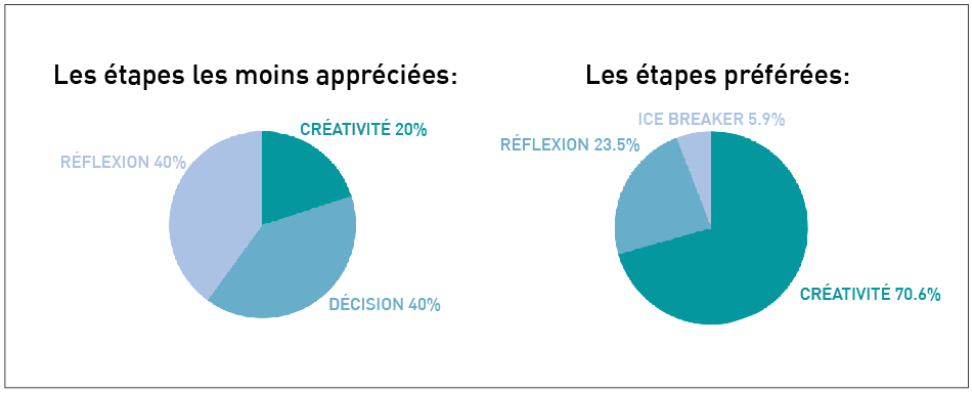


Figure 4. Retour du questionnaire de satisfaction de la 1er séance.

5.2 Les autres parties prenantes de l'innovation transversale

Pour atteindre l'innovation transversale, il faut former de manière générale sur le processus de création à l'aide des deux premiers workshops, adapter la méthode à l'entreprise en conservant la cohérence globale de l'organisation à l'aide des tests réalisés, favoriser l'autonomie et le réemploi en interne des outils et les adapter pour chaque secteur et projets.

Il est donc nécessaire de mettre très prochainement en place de futures séances créatives au sein des secteurs et au service des projets communs comme des nouvelles finitions esthétiques avec un secteur artistique et un secteur technique. Des nouvelles techniques d'affichage avec des secteurs techniques. Trouver des thèmes, des esthétiques ou des fonctions liées à l'histoire de l'horlogerie avec les secteurs communication et artistiques et développement de la singularité de la marque avec la communication le produit et la clientèle.
En parallèle, la recherche questionne les outils et méthodes pour faciliter la réinterprétation des idées et l'accompagnement, le suivi de projet et le développement. Pour se faire, la récupération du vocabulaire est primordiale pour permettre de retracer les solutions qui sont trouvées et pouvoir les injecter dans d'autres projets et des futurs outils.

6 CONCLUSION

Nous avons validé un certain nombre d'approches et de méthodes. Les outils ont également été testés et validés. Les informations recueillies ont permises de programmer une deuxième séance. La première phase a donc bientôt atteint ses objectifs, elle permet d'informer l'entreprise, et de tester des méthodes et approches tout en se perfectionnant pour répondre au mieux aux besoins des différents acteurs et les accompagner à développer l'innovation.
Dans les prochains temps, la recherche a pour but de préciser ces outils au sein des différents secteurs et de proposer des méthodes spécifiques aux projets et besoins de l'entreprise. Le temps étant restreint la recherche va être expérimenté sur deux sujets bien différents afin d'avoir plus de diversité au travers des outils et méthodes proposés. L'objectif final qui validerait une innovation transversale et constante serait que les différents secteurs s'inspirent et échangent de façon continue en dehors des séances.
L'avancement de la recherche révèle l'importance de l'innovation transversale. En prenant en compte les différents axes d'innovation transversaux on permet à l'entreprise de collaborer et innover avec efficience en utilisant le savoir-faire de tous. Sans oublier la mise en avant et le respect de la singularité de l'entreprise et le suivi de projet.

RÉFÉRENCES

[1] Brunet.E (2021) La boite à outils de la facilitation. Les méthodes de Anne Monot p.154
[2] Foliot.C Serikoff .G Zacklad.M (2019) Le lab des Labs p.36.37
[3] Foliot.C Serikoff .G Zacklad.M (2019) Le lab des Labs p.98
[4] Norman, D. A.(2002). Emotion and design: Attractive things work better. Interactions Magazine,ix
[5] Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) abstract
[6] Perrin F., Proposition d'une démarche d'intégration de nouvelles méthodes en conception: éléments pour la définition du rôle de l'intégrateur «méthodes» p.68
[7] Aldana.M, Dromer.V et Leméni.Y Passez au design thinking p.83

Contact principal : Richard Clémentine
Coordonnées :
+41 766 036 742
+33 6 85 42 96 33
20 Pellouaille, 79140 Combrand ,France

UN MODELE DE CONCEPTION CENTREE UTILISATEUR D'UN SERIOUS GAME POUR LA PREVENTION DES TMS

Thomas Rivière[1], Mohsen Zare[1], Bernard Mignot[1], Jean-Claude Sagot[1]
[1] Laboratoire ELLIADD Pôle ERCOS, UTBM-UBFC, Belfort, thomas.riviere@utbm.fr

Résumé : Notre étude porte sur la revue des modèles de conception de serious game. Elle s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche technologique visant la conception et le développement d'un serious game destinée à la prévention des maladies professionnelles, en particulier les TMS, et ce à des fins de formation initiale ou professionnelle. Bien qu'un modèle générique existe, la littérature ne rapporte pas de réel consensus. De plus, malgré les nombreuses disciplines traitant du sujet (sciences de l'éducation, informatique, ...) l'ergonomie et les sciences pour l'ingénieur demeurent en retrait avec une littérature encore discrète sur le sujet. Selon une analyse comparative des modèles existants, nous analysons les caractéristiques et fonctionnalités avec une perspective d'élaboration de proposition d'un modèle. Nos travaux viseront ensuite, l'application dudit modèle nous permettant de tester sa pertinence selon nos attentes ...

Mots clés : Serious game, modèle de conception, conception centrée utilisateur, Prevention, Santé au travail, TMS.

1 INTRODUCTION

La santé au travail est un défi majeur pour notre société. Le coût financier de 10 milliards d'euros (2017) des arrêts maladie en France témoigne d'un impact sociétal et financier considérable. Plus spécifiquement les Troubles Musculosquelettiques (TMS) figurent comme la première maladie professionnelle en France, et même en Europe, avec une tendance à l'augmentation au fils des années [1].

Cette tendance nous amène à nous interroger de l'efficacité des mesures préventives existantes. Bien que les formes d'interventions soient connues et identifiées des experts du domaine, et que certains progrès sont à déployer, les effets positifs de ces actions restent encore souvent de l'ordre du temporaire [2]. Plus particulièrement, la formation des opérateurs dans l'apprentissage des stratégies de réalisation joue un rôle essentiel dans la réussite des transformations. Néanmoins, si la formation est efficace à court terme, elle semble ne pas être durable dans le temps. Une hypothèse à cette limite observée serait que les formes d'interventions existantes minimisent l'importance des stratégies de régulation se limitant souvent à une approche trop générale sur les postures et gestes adaptés [3,4,5]. Notons également que le format de ces interventions se limitent souvent à un aspect classique et « scolaire » (cours magistraux, affiches, brochures, …), supposé peu engageant pour l'apprenant.

Selon cette problématique, une application multimédia pédagogique pourrait constituer une forme d'intervention pertinente. Plus précisément, un *serious game* offrant des situations d'apprentissage plus interactives et engageantes, adapté au contexte professionnel traité apparaitrait idéal.

Néanmoins, la littérature montre l'absence d'une réelle approche ergonomique dans le processus de conception d'un *serious game* adapté aux besoins et attentes du domaine de la santé au travail. L'objectif de cette communication est de proposer une méthodologie originale à caractère

multidimensionnel en intégrant l'ergonome et la démarche ergonomique dans le processus de conception pour développer et concevoir un *serious game* plus adaptés aux futurs utilisateurs.

2 SERIOUS GAME

Le *serious game* désigne usuellement un type de jeux vidéo dépassant le simple divertissement et dont la principale finalité est utilitaire [6]. Sa distinction avec le jeu vidéo « classique » se fait donc au niveau de la finalité voulue par les auteurs.

Ces finalités peuvent être multiples. Généralement destiné à l'apprentissage ou la formation, les *serious games* peuvent également avoir comme finalité un message marketing et/ou de communication [7].

La technologie immersive du *serious game* offre un environnement numérique où les individus peuvent interagir et se sentir dans un environnement qui pourrait se rapprocher de la situation réelle [8]. Un tel outil immerge la personne dans un contexte numérique et peut être utilisé pour développer les stratégies de réalisation face à une situation simulée, tout en évaluant les conséquences de cette activité [9]. Il permet ainsi de mieux comprendre l'activité future des opérateurs notamment en termes de conséquences sur la santé et la performance. Les moteurs de jeu comme le *Serious Game* ont été utilisés dans plusieurs domaines pour la formation, l'éducation et la conception de systèmes. Dans différents secteurs industriels, comme l'automobile, les moteurs de jeu sont utilisés pour former des opérateurs aux bonnes pratiques du travail, c'est-à-dire l'apprentissage des "bons" gestes et des "bonnes" postures sans pouvoir démontré l'efficacité de la prévention par le « bon geste » [10]. Cela soulève la question suivante : quels sont les bons gestes et les bonnes postures ? Chaque personne a sa propre singularité et développe ses propres gestes et postures face à une situation donnée en mobilisant l'ensemble de ses ressources (déterminants externes et internes).

Un *Serious Game*, avec des scénarii variés et différents niveaux de jeu, y compris un système d'évaluation des apprentissages, permet aux utilisateurs de mieux comprendre la régulation de l'activité et de prendre conscience des mauvaises postures pour sa santé.

3 ETAT DE L'ART SUR LES METHODES DE CONCEPTION

Le sujet des méthodes de conception dénombre une littérature fournie et riche abordé par plusieurs champs disciplinaires.

Notre revue de la littérature est narrative : elle se veut fournir une première synthèse informelle basée sur un état de l'art non exhaustif et non systématique. Ce choix de revue de littérature est privilégié dans les premières phases de projet de recherche [11]. Son emploi trouve sa justification dans sa capacité à répondre de manière que nous jugeons satisfaisante à notre problématique, tout en étant rapide à réaliser de part des critères méthodologiques peu contraignantes.

L'objectif est ici de décider d'une méthode de conception récente et validée scientifiquement intégrant l'utilisateur dans son cycle.

Basé sur une recherche documentaire, la première partie de cette revue considère les principaux modèles de conception analysés. La seconde partie propose un résumé des propriétés des modèles selon leurs avantage et limites respectives.

3.1. Le modèle de conception de Marfisi-Schottman et al.

Pour la thématique que nous traitons, les travaux de Marfisi-Schottman [12] ont permis l'élaboration d'un modèle constitué de sept étapes (voir figure *1*).

Basé sur une démarche de coopération, les étapes sont attribuées entre plusieurs experts : expert cognitif, expert du domaine, expert pédagogique, directeur artistique, … Le modèle s'accompagne d'outils conçus pour favoriser le travail de coopération entre les différents acteurs du projet.

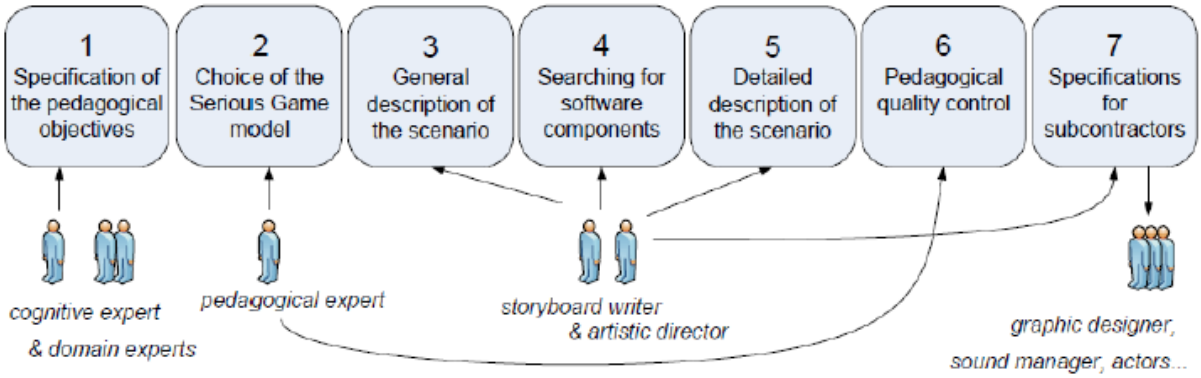


Figure 1. Le modèle de conception d'après Marfisi-Schottman et al. [12]

3.2. Activity Theory-based Model of Serious Games de Carvalho et al.

Les travaux de Carvalho et al. [13] visent la conception d'un modèle conceptuel de jeu sérieux basé sur la théorie de l'activité : *l'Activity Theory-based Model of Serious Games* (ATMSG). Le développement de ce modèle se veut apporter une réponse au manque de modèle concret existant.

Le jeu sérieux n'est pas considéré comme un outil isolé mais faisant partie d'un système complexe incluant les acteurs humains (joueurs, concepteurs et enseignant) et leurs motivations dans l'usage du jeu. Le modèle de conception fait la distinction entre les objectifs pédagogiques, d'apprentissage et ludique du jeu.

Le modèle distingue également le cas d'utilisation par l'utilisateur seul (intrinsèque) et le cas d'utilisation en complément des activités d'enseignement (extrinsèque) en proposant des éléments de conception qui répondent à ces deux cas d'usage.

3.3. La méthode DICE

Cette méthode est issue des travaux de Djaouti [14] avec une analyse comparative de dix modèles menés afin d'en généraliser un.

Sur la base de cette analyse l'auteur dégage quatre grandes étapes communes aux différents modèles proposés. Ces étapes constituent le modèle générique DICE (voir figure 2)

- Définir : Le chercheur précise le contenu sérieux à transmettre via le jeu (objectifs pédagogiques, liste des informations à transmettre, liste des compétences à acquérir, publicité)
- Imaginer : Partant du contenu sérieux, le créateur invente un *game design*.
- Créer : Un prototype est réalisé pour tester l'adéquation entre *game design* et contenu sérieux.
- Evaluer : Le prototype est évalué par un public cible. Les critères d'évaluation varient d'un projet à l'autre mais pour la plupart des *serious games*, le degré de transfert des connaissances est généralement mesuré.

Selon l'auteur, il apparaît difficile, voire impossible de penser un modèle universel à tous projets de jeu sérieux car le *serious game* (comme le jeu vidéo) comprend une partie artistique. Il n'est ainsi pas pertinent de vouloir standardiser un travail créatif.

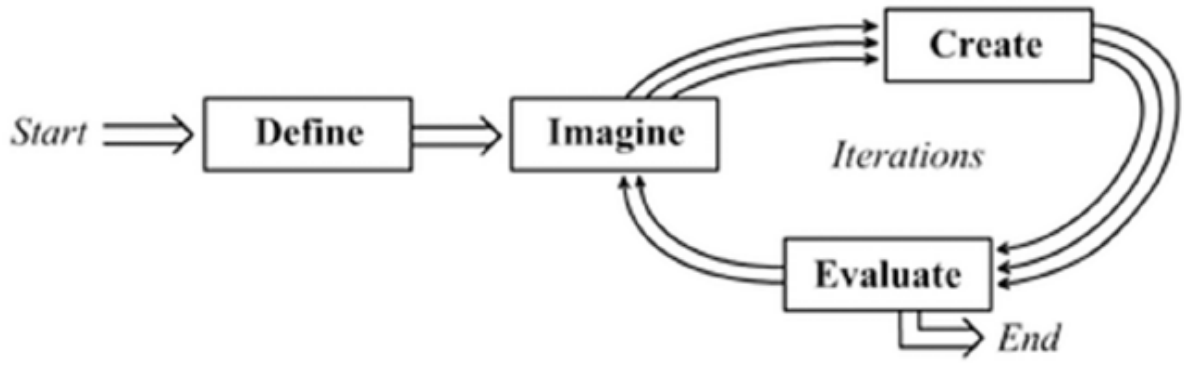


Figure 2. Le modèle générique DICE d'après Djaouti [13]

3.4. Méthode de conception de Boudier et Dambach

Première et seule méthode industrielle recensé [15] à notre connaisssnace, ces auteurs reconnaissent cinq étapes clés au développement d'un *serious game* (voir figure 3).

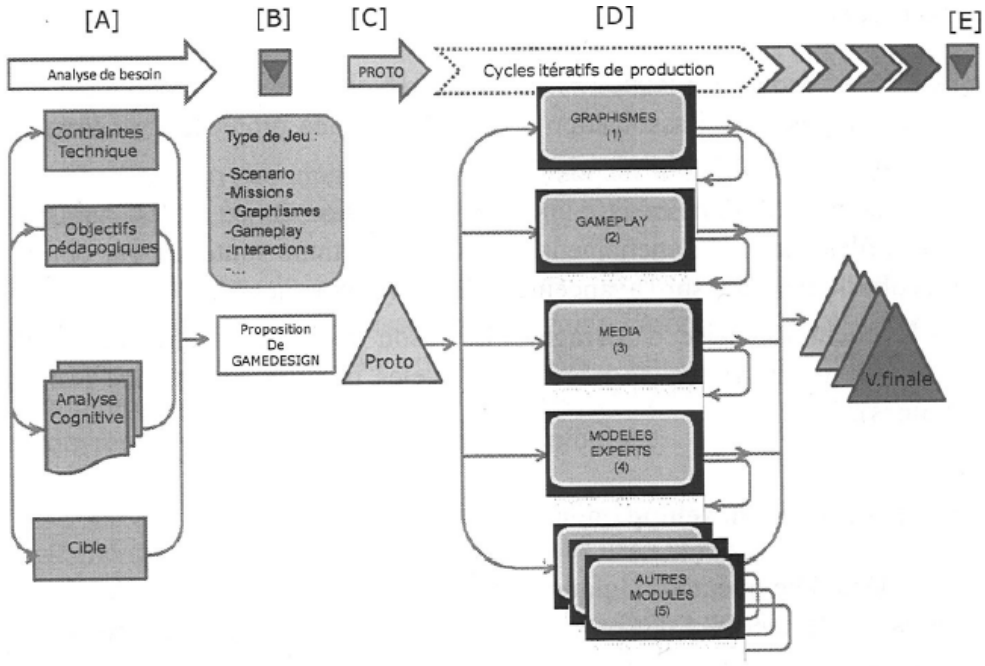


Figure 3. Cycle de développement d'un *Serious Game* d'après Boudier et Dambach [15]

1. Analyse des besoins : cette première étape consiste à recueillir les attentes des utilisateurs afin de convenir des connaissances à transmettre via le jeu. Il s'agit d'identifier et de concilier contraintes techniques et pédagogiques pour la définition des caractéristiques du jeu.
2. Proposition de *game design* : Sur la base de cette première étape est établi un premier concept de jeu détaillant le scénario, les graphismes, le gameplay, etc.
3. Création d'un premier prototype : Et alors réalisé un prototype, traduction du *game design* en un artefact jouable. Cette étape marque le début des phases de test.
4. Propositions itératives intermédiaires : Selon une logique itérative, le développement connait des cycles courts d'améliorations.
5. Livraison finale : Les objectifs du projet atteints et respectés, une version finale est délivrée.

3.5. Modèle DISC de Vermeulen et al.

Les travaux de Vermeulen et al. [16] ont permis la génération d'une méthode de conception de *learning games.*

Le modèle repose sur une méthode de co-conception unissant ingénieurs pédagogiques et enseignants chercheurs du domaine que l'on souhaite enseigner selon une méthode de travail itérative. Il a été pensé pour la conception d'un genre spécifique de jeu proche du jeu narratif à énigmes, dédié exclusivement aux étudiants et enseignants du cycle universitaire.

Le modèle comprend quatre étapes (voir figure 4).

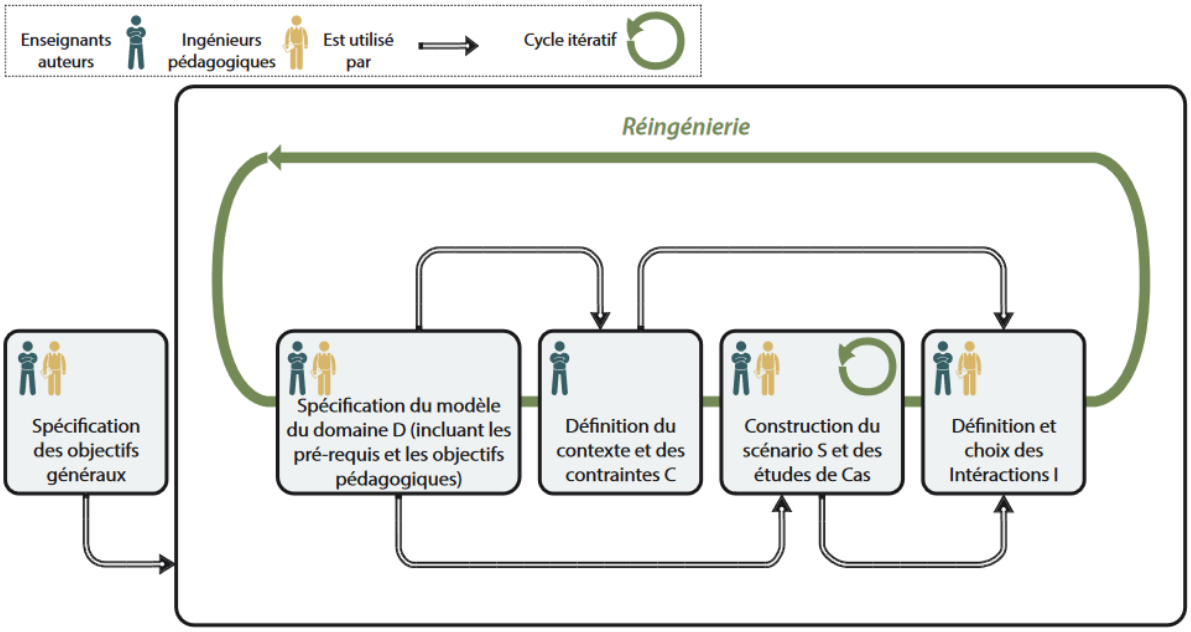


Figure 4. Modèle DISC d'après Vermeulen et al. [16]

Précisons que le modèle se veut faciliter une réingénierie de conception, soit permettre la modification et l'amélioration du jeu après sa diffusion et ce, par le corps enseignant seul.

4 Analyse

A partir des modèles de conception étudiées, se pose donc la question suivante : quelle serait le modèle la plus adaptée à notre projet compte-tenu des problématiques de notre sujet ? Il s'agit d'extraire les propriétés que nous jugeons pertinentes en considérations des contraintes et spécificités connexes à notre projet de recherche. La conception d'un modèle de conception centrée utilisateur basé sur les meilleures méthodes serait alors réalisable.

Modèles de conception de jeux sérieux	Points forts	Points faibles
Modèle de Marfisi-Schottman et al. [12]	La démarche coopérative est détaillée d'outils permettant la coopération entre les acteurs du projet.	Pas de détail sur les phases d'évaluation. N'intègre pas les utilisateurs.
ATMSG [13]	Le modèle est unique et abouti sur les notions de contexte d'utilisation considérant les utilisateurs selon un contexte d'activité spécifique. Une taxonomie de termes associés aux différents types d'activités (apprentissage, pédagogie, ludique) enrichit le modèle.	Conçu dans une démarche d'évaluation plutôt que de conception. Démarche collaborative très théorique, complexifiant la participation de non experts.
DICE [14]	Procure une structure fondamentale de modèle de conception.	Modèle (volontairement) très général.
Modèle de Boudier et Dambach [15]	S'accompagne d'exemples concrets d'application dans un contexte industriel.	Le rôle des acteurs n'est pas précisé. Les utilisateurs ne sont pas intégrés.

DISC [16]	Le modèle est relativement récent et s'accompagne d'une méthodologie détaillée.	Limité à un genre de jeu très spécifique. Conçu pour une cible universitaire.

Ainsi, dans le cadre de notre problématique, nous retenons certaines des caractéristiques des modèles étudiés. Notre modèle devra respecter les quatre grandes étapes du modèle DICE [14]. Sa démarche sera collaborative conformément aux standards de conception recensé. Il reprendra la méthode d'application issu des travaux de Vermeulen et al. [16], mais dans un cadre d'utilisation différent. Conçu pour être utilisé en classe pour des lycéens, nos travaux considèreront les cas d'usage des utilisateurs (intrinsèque vs extrinsèque) définis selon l'ATMSG [13].

5 DISCUSSION

Notre modèle de conception sera le résultat d'une veille documentaire qui a été adaptée en fonction des besoins de la prévention des TMS. Ce modèle permettra de visualiser les différentes dimensions et étapes d'un processus de conception en vue de mieux intégrer les acteurs du projet et d'assurer le développement d'un outil efficace, efficient et intuitif. La méthode de conception associée sera mise en œuvre dans un contexte d'application pour le développement d'un *serious game* pour la prévention des TMS à destination des lycéens professionnels.

REFERENCES

[1] Rivière S., Alvès J., Smaili S., Roquelaure Y., Chatelot J., *Estimation de la sous-déclaration des TMS en France : évolution entre 2009 et 2015,* Bull Epidémiol Hebd, 3, p42-48, 2021.

[2] Caroly, S., Coutarel, F., Escriva, E., Roquelaure, Y., Schweitzer, J. M., & Daniellou, F., *La prévention durable des TMS : Quels freins ? Quels leviers d'action ?* Rapport, 181, 2008.

[3] Clemes Stacy A., Cheryl O. Haslam, et Roger A. Haslam, « *What Constitutes Effective Manual Handling Training? A Systematic Review*, Occupational Medicine, 60, 2, p101-107, 2010.

[4] Norval M., *Les outils simples d'évaluation du risque d'apparition des troubles musculo squelettiques (TMS) : quelle intégration de la marge de manœuvre situationnelle (MMS) dans le cadre du repérage des situations à risques ? : étude de cas dans une industrie d'assemblage de moteurs diesel à usage non routier Operational leeway in work situations : do ergonomic risk assessment tools*

[5] Norval M., Zare M., Brunet R., Coutarel F., et Roquelaure Y., *Intérêt de la Marge de Manœuvre Situationnelle pour le ciblage des situations à risque de Troubles Musculo-Squelettiques,* Activités, 16, 2, 2019.

[6] Alvarez, J., *DU JEU VIDÉO AU SERIOUS GAME*, Thèse de doctorat, 2007

[7] Djaouti, D., Alavarez, A., Jessel, J.-P., *Classifuing Serious Games: The G/P/S model,* Handbook of Research on Improving Learning and Motivation through Educational Games: Multidisciplinary Approaches. Advances in Game-Based Learning. IGI Global, 2011.

[8] Jerald J., The Vr Book: Human-centered Design for Virtual Reality, Morgan & Claypool Publishers, 2015.

[9] Bernard, F. *Intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique : Apports des outils de simulation*. Thèse de doctorat, Bourgogne Franche-Comté, 2019.

[10] Wu X., & Fei, G., *Research of virtual reality technology in automotive engine assembly teaching*, 6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, p167-169, Chongqing, 2011.

[11] Nambiema, A., Fouquet, J., Guilloteau, J., & Descatha, A. *La revue systématique et autres types de revue de la littérature : Qu'est-ce que c'est, quand, comment, pourquoi ?* Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 82(5), 539-552, 2021.

[12] Marfisi-Schottman, I., George, S., & Tarpin-Bernard, F., *Tools and Methods for Efficiently Designing Serious Games*, European Conference on Games Based Learning, ECGBL, 226-234, 2010.
[13] Carvalho, M. B., Bellotti, F., Berta, R., De Gloria, A., Sedano, C. I., Hauge, J. B., Hu, J., & Rauterberg, M., *An activity theory-based model for serious games analysis and conceptual design.* Computers & Education*, 87*, 166-181, 2015.
[14] Djaouti, D., *DICE*: *A generic Model for the design process of serious games,* International Journal of Game-Based Learning*,* 10, 2, p39-53, 2020.
[15] Boudier, V., & Dambach, Y., *Serious Game : Révolution pédagogique,* Hermès Science Publications, 2010.
[16] Vermeulen, M., Mandran, N., Labat, J.-M., & Guigon, G., *Vers une approche Meta-Design des Learning Games avec le modèle DISC : De la conception à l'analyse des traces d'usage des étudiants par les enseignants,* STICEF (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation), 25(1), 2018.

Contact principal : Thomas Rivière

Coordonnées thomas.riviere@utbm.fr ; Tél +33 (0)3 84 58 33 20

EFFETS OF MARINE POYSACCHARIDES FROM TUNISIAN AND BRITTANY SEASHORE BIODIVERSITY ON DERMAL FIBROBLAST PROLIFERATION AND MATRIX METALLOPROTEINASES SECRETION

Sayettat S*[1], Shekoory A*[1], Defer I*[1], Duquesne L*[1], Msahli A*[2], Majdoub H[2], Senni K[2]
[1] École de Biologie Industrielle, EBInnov, 49 avenue des Genottes, 95895 Cergy-Pontoise, France
[2] Université de Monastir – Faculté des Sciences de Monastir, 90 Ave Mohamed V, Monastir 1002, Tunisia

Sulfated glycosaminoglycans are major players of tissue remodeling and tissue homeostasis. Thus, these compounds could be regarded as interesting drugs or actives for health. Unfortunately, it is difficult to synthetize them chemically. Indeed, they are often extracted from mammalian tissues which can pose sanitary, regulatory, and technical problems. Therefore, the use of sustainable marine resources to replace those molecules could be an alternative solution. We assessed the biological properties of three different sulfated polysaccharides extracted from marine biodiversity of Tunisia and Brittany. Thus, a chondroitin sulfate from sea cucumber and a dermatan sulfate from sea urchin showed a great potential for regenerative growth factor protection against proteolysis, and a low molecular weight fucoidan from brown algae, displaying some heparan-mimetic properties can be regarded as a tissue regeneration booster, promoting growth factors signal. Our preliminary results showed that these marine polysaccharides can be considered as interesting compounds for regenerative medicine or cosmetics.

Keywords: Marine biotechnology, Regenerative medicine, glycosaminoglycans, sulfated polysaccharides, metalloproteinase

1 INTRODUCTION

As proteins, polysaccharides can be regarded as major bioactive molecules with pleiotropic functions in organisms. It is now well documented that polysaccharides and especially glycosaminoglycans are bioactive molecules that show a great potential for therapeutic and biotechnological applications. They could for example be used in tissue regeneration, 3D cell culture, development of biomaterials, or drug design as well as cosmetic applications.

Glycosaminoglycans (GAG's) are a family of polysaccharides located at the cell surfaces or in the extracellular matrix formed by repeating disaccharide units, composed by an amino sugar and an uronic acid (or neutral sugar) [1]. Glycosaminoglycans are divided in five categories comprising chondroitin sulfate, dermatan sulfate, heparan sulfate and keratan sulfate, which are sulfated glycosaminoglycans, and hyaluronic acid, which is a very high molecular non-sulfated polysaccharide. Unlike Hyaluronic acids, sulfated GAGs were covalently bound to a protein core to form proteoglycans [2].

GAGs are involved in cell differentiation, cell adhesion, cell signaling as well as connective tissue structuring, for example, hyaluronic acid is a major structural macromolecule of extracellular matrix and heparan-sulfates are essential promoters of regenerative growth factors signaling. Their

many biological roles, particularly during tissue repair could be advantageously used in regenerative medicine or cosmetic. For example, heparan sulfate and dermatan sulfate glycosaminoglycans can be used in therapeutic applications as inducer of tissue repair [3]. Unfortunately, except hyaluronic acids now produced by fermentation, other sulfated GAGs such as heparan sulfate or chondroitin sulfates were hardly obtained from animal tissues and, their extraction and purification processes of those molecules face technical issues for their industrial adaptation.

Indeed, it could be interesting to find other sources of polysaccharides mimicking or replacing sulfated GAGs such as heparan sulfate or chondroitin sulfate. A possible source of sulfated polysaccharides that has not been fully exploited yet is the marine biodiversity. Indeed, marine organisms could be a sustainable alternative to polysaccharides extracted from mammalians.

In fact, marine polysaccharides have a wide range of structures and can derived from different sources (Algae, fish, echinoderms) and could be considered as bioactive useful compounds for therapy [1]. Those polysaccharides could possibly be easier to adapt to industrial processes and be more ethical if extracted from algae. for example, Fucans are polysaccharides derived from large brown algae. They are also synthesized by some marine invertebrates as sea cucumber or sea urchins' eggs. Fucans from algae are more active than fucans from invertebrates [1]. Thus, they are used in many studies since decades especially the native polysaccharides for its numerous biological activities. Fucans as other polysaccharides quoted previously are also sulfated. Fucans are divided into three groups: fucoidans, ascophyllans and sargassans. Fucoidans refers to complex fucans.

Depolymerized fucoidans are known to display heparan-mimetic properties, such as growth factors promotions or connective tissue degradation inhibitions. Moreover, sulfated fucoidans (or fucans) have been shown to present biological properties similar to GAG's. They are molecules of interest in cosmetology, for anti-aging and softening, because they would activate collagen synthesis and dermal fibroblasts proliferation.
Other marine organisms such as echinoderms or fish can be also regarded as sustainable sources of other sulfated GAGs such as chondroitin sulfates or dermatan sulfates.
Although their structure is known, the link between their structural characteristics and their biological activities remains partially unknown.

The aim of our research work was to study the biological properties of glycosaminoglycans extracted from marine organisms collected in Tunisia seashore and a sulfated polysaccharide from Brittany algae. We studied their impact on dermal fibroblast proliferation as well as metalloproteinase secretion, to assess whether they can positively act on tissue remodelling.

Thus, a chondroitin sulfate extracted from sea cucumber Holothuria polii from Tabarka site (53 kDa), a dermatan sulfate obtained from fish skin (10-15 kDa) both from Tunisian sealife and a low molecular weight fucoidan from Ascophylum nodosum, a brown algue (Algues et Mer) Ouessan, France), were studied.

2 MATERIALS AND METHODS

Human normal dermal fibroblasts were provided by the Tissue Engineering Research Unit (Paris 13 University) and were obtained from healthy patients after abdominal surgery with informed consent in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki. Cells were grown in Dulbecco's minimum essential medium (DMEM) Glutamax I supplemented with 10% fetal calf serum (FCS), 100 U/mL penicillin, 100 mg/mL streptomycin, and 2 mg/ mL fungizone. Cells in all experiments were used between passage 3 and 4.

2.1. Cell proliferation assay

6 different experimental conditions were performed in 24-well plates; (1) without treatment, or with FGF-2 (2ng/mL), (2) 10µg/mL of polysaccharides, (3) 100µg/mL of polysaccharides, (4) 10µg/mL of polysaccharide + FGF-2 (2ng/mL), (5) 100µg/mL of polysaccharides + FGF-2 (2ng/mL).

Counting: The cells were counted under a microscope using Kova® slides at days 2, 4, 7 and 10 to visualize if there is a proliferation. A column of the plate will be used to fix the cells by adding cold ethanol, to visualize them by staining.

2.2. Cytotoxicity assay

A neutral red cytotoxicity test was performed for each polysaccharide to estimate of the number of viable cells in a culture after 48h incubation. The principle of this test is based on the detection of viable cells by the absorption of neutral red dye. Cells are seeded in 96-well tissue culture plates and processed for the appropriate period. The plates are then incubated for 2 h with medium containing neutral red. Viable cells can take up neutral red by active transport and incorporate the dye into their lysosomes, but non-viable cells cannot take up this chromophore. After washing, viable cells can release the incorporated dye under acidified extraction conditions. The amount of released dye is used to determine the total number of viable cells and is measured at an OD of 540 nm.

2.3 Study of matrix metalloproteases secretion by cultured dermal fibroblasts

2.3.1. Culture conditions and production of metalloproteases

Cells are seeded in 24 wells plates, at the rate of 20 000 cells per well in DMEM/ 10%BSA, up to confluence. Cells are, then, placed in DMEM only, with or without IL-1ß (10 ng/mL) and with or without polysaccharide (1 µg/mL and 10 µg/mL). After 48 hours, mediums of each well are collected, to realized zymographies and cells are counted.

2.3.2. Zymographic analysis

Activity of metalloproteases were detected by zymography using SDS-PAGE gel copolymerized with gelatin and containing acrylamide/bis 30/0,8, SDS 10% and 1.5M Tris-HCl at pH8,8. The stacking gel contained acrylamide/bis 30/0,8%, SDS 10% and 0.125M Tris-HCl at pH 6,8. Each gel was polymerized by adding 10% ammonium persulfate and 0,1% Temed. During this phase, proteins are denatured so have lost their activity and are separated only according to their molecular weight. The gel is then placed in a renaturation buffer containing Triton X100 (2,5%), to remove SDS. And allow renaturation of proteins and therefore the restoration of their activity. As the result, the active proteins can degrade the copolymerized gelatin, where they stopped during electrophoresis.

Gel is then incubated in an incubation buffer containing Tris-HCl pH 7,4 and 30mM CaCl2 which restore gelatinolytic activities. After coloration by Coomassie Blue and decoloration, areas of degraded gelatin appear white and the gel is observed with an Imager.

3 RESULTS

3.1 Chemical structure analysis: FTIR (Fourier Transfer Infrared spectroscopy)

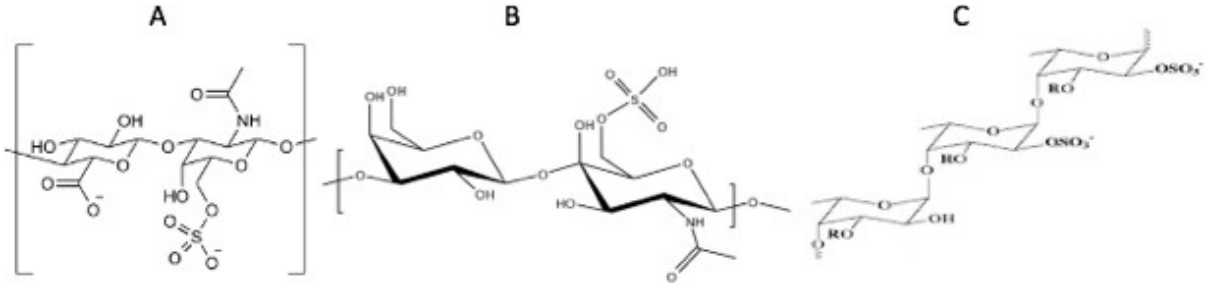


Figure 1. Polysaccharides structure of PHP (A), DS (B) and LMW fucoidan (C)

3.1.1. Chondroitin sulfate extracted from sea cucumber (PHP)

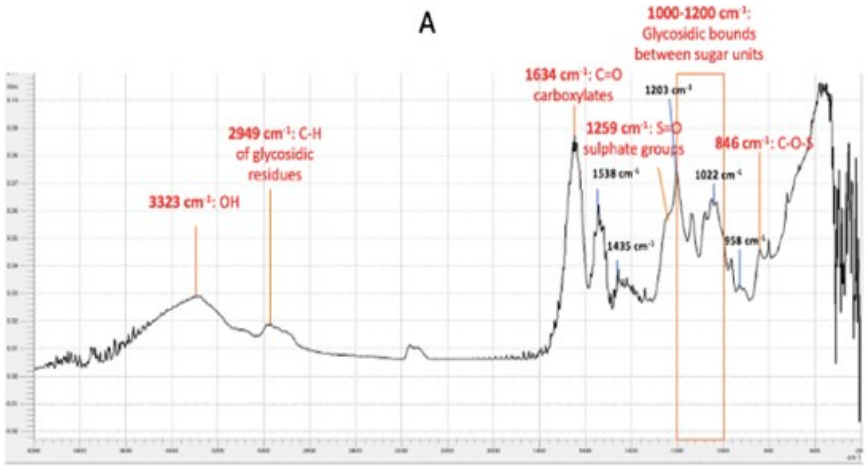


Figure 2. PHP FTIR spectra

Specific absorption peaks are exhibiting a glycosaminoglycan structure. Peak at 1259 cm^{-1} is characteristic of sulfated groups, peaks between 1000 and 1200 cm^{-1} show the presence of glycosidic bounds between sugar units. The peak at 2949 cm^{-1} refer to the C-H in glycosidic residues.

3.1.2. Dermatan sulfate extracted from fish's skin from Tunisian fisheries (DS)

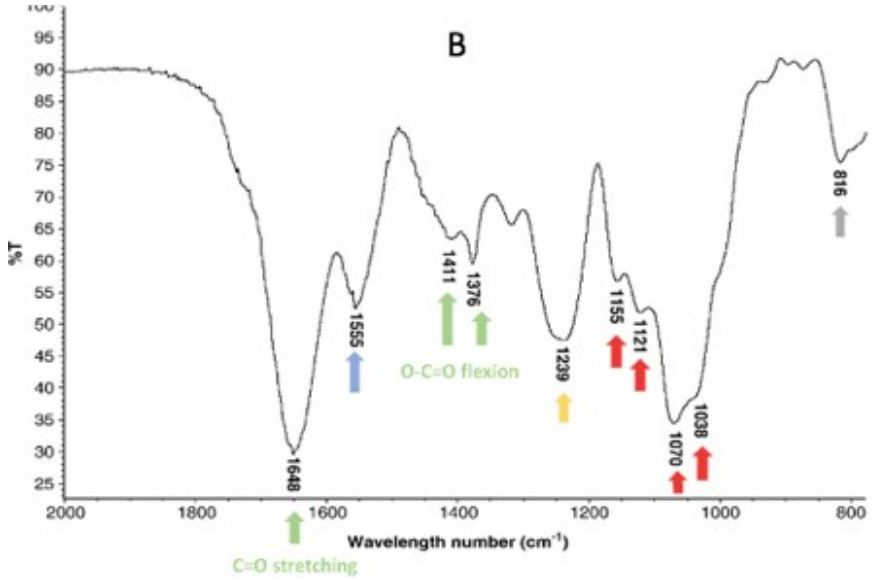


Figure 3. DS FTIR spectra

Specific absorption peaks are exhibiting a glycosaminoglycan structure. Thin and intense absorption peak at 1038, 1070, 1121 and 1155 cm^{-1} refer to cyclic variations of C-O- C, C-OH et C-C which suggests the existence of osidic cycles [4]. Uronic acids are highlighted by a strong absorption peak at 1648 cm^{-1} (C=O stretching) and two medium sized peaks at 1376 and 1411 cm^{-1} (O-C = O flexion) [5]. Another absorption peak at cm^{-1} can be associated with C= O stretching of acetyl groups, probably in acetylated hexosamine residues [6]. A strong and large absorption peak at 1240 cm^{-1}, characteristic of S= O stretching, as well as peaks at 816 cm^{-1}, highlighted the presence of substituents sulfate groups [5].

3.1.3. Low molecular weight fucoidan (heparan mimetic from brown algae)

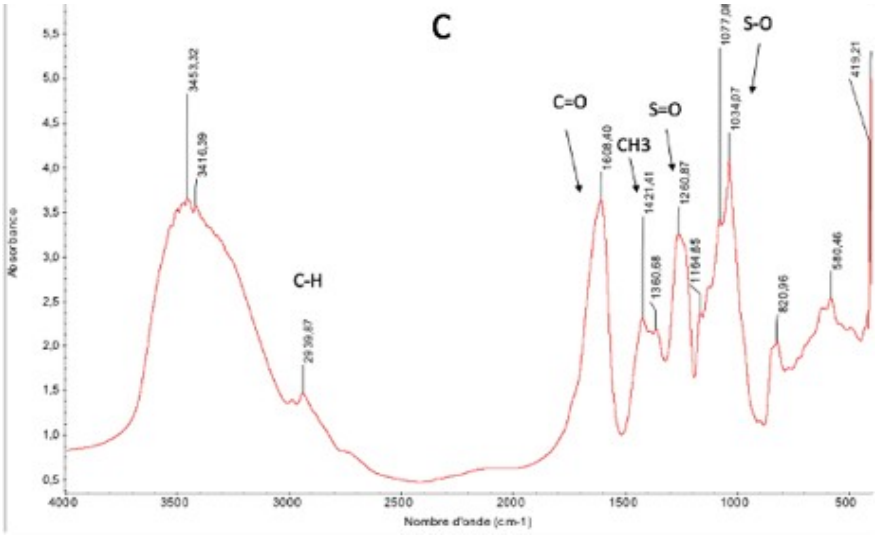


Figure 4. LMW fucoidan FTIR spectra

Specific absorption peaks characterizing sulfated polysaccharides are observed. Sulfate groups are characterized by peaks at 1034 and 1260 cm^{-1}, sulfated sugars by a peak at 820 cm^{-1}, and uronic acid by a peak at 1608 cm^{-1}.

3.2 Assessment of polysaccharides toxicity on dermal fibroblast: Neutral Red assay

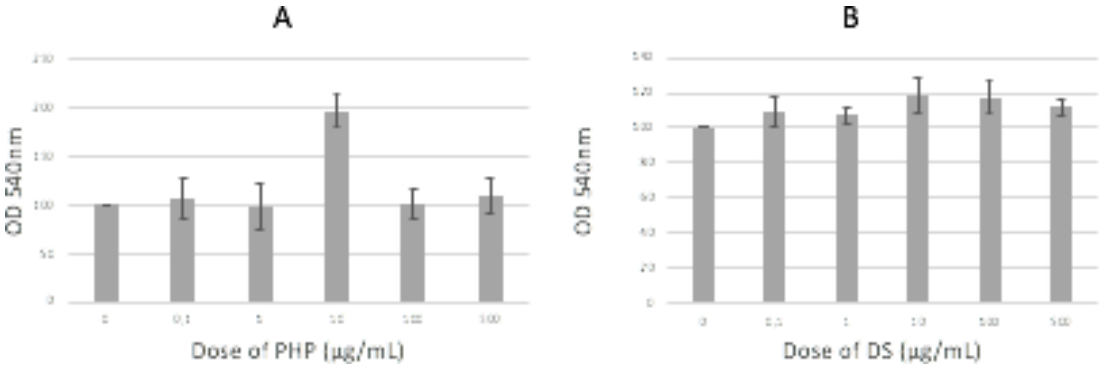


Figure 5. Neutral red toxicity assay for PHP (A) and DS (B)

The toxicity of polysaccharides on dermal fibroblasts have been assessed using Neutral Red assays performed on PHP and DS. Results are presented on the figures above.

No cytoxic effect has been observed for the tested polysaccharides, as the OD measured for each dose of polysaccharide is comparable to the control. As PHP and DS no cytotoxic effect of LMW fucoidan has been previously observed [7].

3.3 Proliferation assays

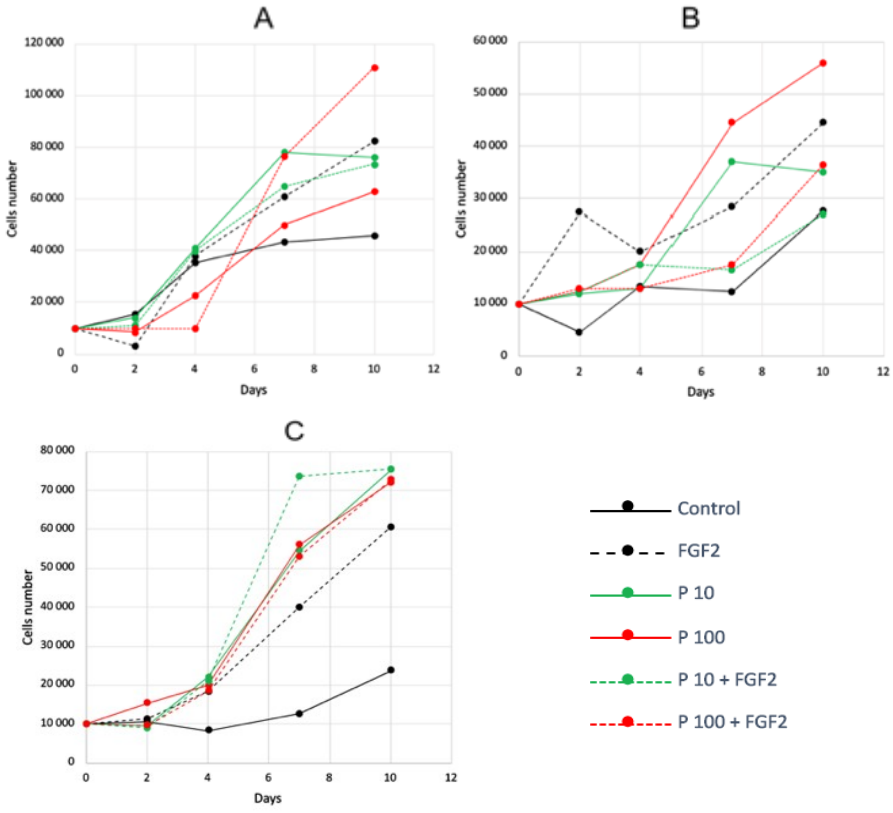
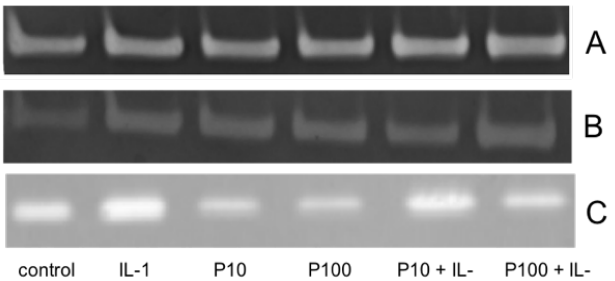


Figure 6. Proliferation assay of PHP (A), DS (B) and LMW fucoidan (C)

The measure of cell proliferation allows us to analyze the number of cells per mL at D2, D4, D7 and D10 for the different polysaccharides.

For the three polysaccharides an increase in the number of cells is observed along the culture. For PHP and DS, the increase is more progressive, as seen in the figure above (figure 4), it increases particularly when there is 100µg/mL of polysaccharide with FGF2 for PHP and without FGF2 for DS. However, the number of cells observed with PHP is significantly higher than that of DS, about 110,000 cells for the maximum compared to 55,000 for DS. For LMW Fucoidan, it increases more than the other polysaccharides, earlier, more rapidly and a strong increase is observed for 10µg/mL of polysaccharides with FGF2 to about 75,000 cells.

3.4 Zymography



		Control	P 10 µg/mL	P 100 µg/mL
PHP (A)	Without IL-1 (2 ng/mL)	100	95,26	82,29
	With IL-1 (2 ng/mL)	108,6	97,13	112,65
DS (B)	Without IL-1 (2 ng/mL)	100	85,79	85,74
	With IL-1 (2 ng/mL)	76,52	66,15	72,96
LMW FUC (C)	Without IL-1 (2 ng/mL)	100	61,7	36,7
	With IL-1 (2 ng/mL)	163,3	111,5	105,2

Figure 7. Evaluation of the activity of metalloproteinases for PHP (A), DS (B) and LMW fucoidan (C)

A decrease of the gelatinolytic activities associated with the reduction in the volume of the bands is observed with the DS and LMW fucoidan polysaccharides. This implies an inhibition of MMP-2 secretion by these polysaccharides. Conversely, PHP seems to have no effects on MMP-2 secretion because no significant variation in the volume of the bands is observed.

4 DISCUSSION

We observed a biological activity for three polysaccharides: Tunisian chondroitin sulfate extracted from sea cucumber Holothuria polii (PHP), dermatan sulfate extracted from fish's skin from Tunisia fisheries (DS) and low molecular weight fucoidan from brown algae Ascophyllum nodosum (LMW fucoidan), from Brittany coast in France.

It can be assumed that the delayed promotion of proliferation observed with DS and PHP is linked to a protection FGF- 2 against proteolytic degradation by protecting by proteinases present in cell culture media. For DS this mechanism is observed for high concentration of polysaccharides, while it is observed for either concentration of PHP which could shows some differences between affinity of these polyssacharides for FGF-2.
LMW fucoidan promotes the action FGF-2 directly, it boosts the cellular proliferation by fixing growth factor on cellular receptors [8].

The production of sulfated polysaccharides is complicated in bacteria (unlike hyaluronic acid that is easily produced in bacteria at industrial scale).

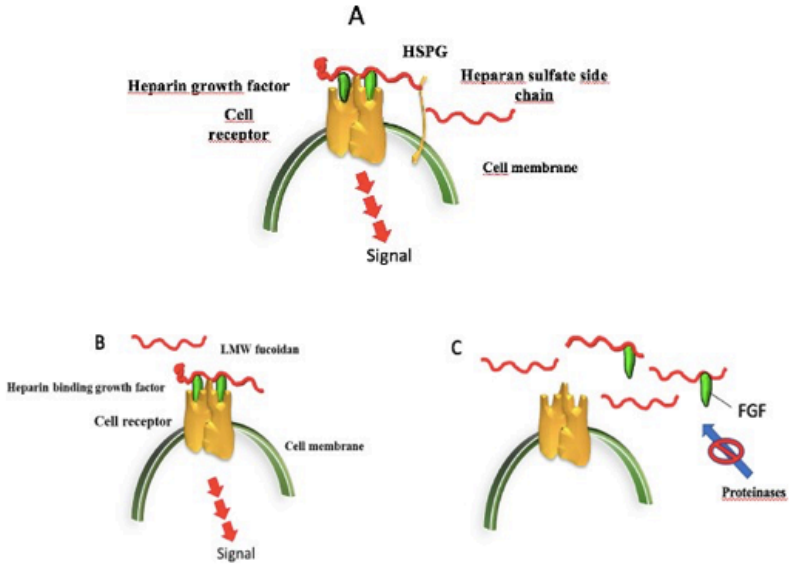


Figure 8. Action of polysaccharides on Heparin binding growth factor activity: Physiological role of heparan sulfate proteoglycans: harvesting and presentation of HBGF to receptor by heparan sulfate side. (B) LMW fucoidan have a typically heparan-mimetic activity by promotion of HBGF signaling. DS and PHP display a good affinity for HBGF and have able to protect them against proteolysis (C). Modified from Bou Karam et al 2021.

Indeed, currently commercialized drugs such as anticoagulant Heparin from porcin mucosa or Structum C45 chondroitin sulfate for the treatment of hip or knee osteoarthritis, are obtained by complicated industrial processes directly from mammals (beef cartilage), which cause a sanitary risk (mad cow crisis) [3].

Use of marine sources for a sustainable production of sulfated polysaccharides with glycosaminoglycan properties for therapy and cosmetic can be possible. Indeed, Dermatan sulfate extracted from fish's skin is regarded as a waste of industrial fisheries, it seems interesting to recycle this co- product to develop more sustainable therapeutics. Algae is sustainably and industrially harvested from natural environments and macroalgua culture is now developed. Finally, sea cucumber is largely breeding in Asia for food industry and some sustainable breeding associating Oyster breeding is developed in France [9].

5 CONCLUSION

Glycosaminoglycans used in cosmetics and therapeutics are mainly obtained from mammals, which cause ethical, and potential sanitary problem as well as complications during the industrial production process. Indeed, the use of polysaccharides obtained sustainably from marine organisms to replace those products (example of structum C45 used for osteoarthritis) could be interesting. We showed the biological effect of chondroitin sulfate obtained from sea cucumber and dermatan sulfate obtained from fish's skin to protect growth factors against proteolytic degradation, which could be used for tissue repair. Low molecular weight fucoidans obtained from Brittany's brown algae have a synergic effect with growth factor, which increase cellular proliferation and inhibit the proteolytic degradation. It could be used as a wound healing booster in wound dressing or treatment of chronic skin ulcer or for tissue engineering [1].

REFERENCES

[1] K. Senni *et al*., *Marine Polysaccharides : A Source of Bioactive Molecules for Cell Therapy and Tissue Engineering,* Mar. Drugs, Vol.9, N°9, Art. N°9, 2011.

[2] C. J et C. Js, *Biochemistry, Glycosaminoglycans,* Consulté le 26 janvier 2022, https://europepmc.org/article/NBK/nbk544295, 2019.

[3] M. B. Karam *et al*., *Heparan-mimetics: Potential agents of tissue regeneration for bone and periodontal therapies,* Med. Nov. Technol. Devices, vol. 11, p. 100066, 2021.

[4] N. P. Camacho, P. West, P. A. Torzilli, et R. Mendelsohn, *FTIR microscopic imaging of collagen and proteoglycan in bovine cartilage,* Biopolymers, Vol.62, N°1, p.1-8, 2001.

[5] V. Vicente-García, E. Ríos-Leal, G. Calderón-Domínguez, R. O. Cañizares-Villanueva et R. Olvera-Ramírez, *Detection, isolation, and characterization of exopolysaccharide produced by a strain of Phormidium 94a isolated from an arid zone of Mexico, Biotechnol.*Bioeng., Vol. 85, N°3, p.306-310, 2004.

[6] R. Smalley et J. Wakefield, *Correlation tables for infrared spectra*, An introduction to spectro- scopic methods for the identification of organic compounds., Scheinmann F.

[7] J.-F. Deux *et al.*, *Low molecular weight fucoidan prevents neointimal hyperplasia in rabbit iliac artery in-stent restenosis model,* Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol., Vol. 22, N°10, p. 1604-1609, 2002.

[8] A. Yayon, M. Klagsbrun, J. D. Esko, P. Leder, et D. M. Ornitz, *Cell surface, heparin like molecules are required for binding of basic fibroblast growth factor to its high affinity receptor*, Cell, Vol. 64, N°4, p. 841-848, 1991.

[9] C. GENTRIC, *Concarneau. Une filière d'élevage d'holothuries sur les rails*, consulté le 26 janvier 2022, Ouest-France.fr,2018.https://www.ouest-france.fr/bretagne/concarneau-29900/concarneau-une-filiere-d-elevage-d-holothurie-sur-les-rails-6073501.

Contact principal : SENNI Karim

Coordonnées: k.senni@hubebi.com

CONCEPTION D'UN SYSTEME DE DRAGAGE AUTONOME

Arthur TAVERNIER[1], Améziane AOUSSAT[2], Jean-Yves COLAS[1]
[1] VINCI CONSTRUCTION MARITIME ET FLUVIALE, 7 rue Ernest Flammarion, 94550
[2] Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI), 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris

Résumé : À la suite de l'appel d'offre en 2017 sur la réalisation d'un robot de dragage, WATERTRACKS et EDF ont signé un contrat de 10 ans et développent le robot de dragage NESSIE. En 2022, le groupe Vinci Construction Fluviale et Maritime souhaite se positionner sur ce marché. Pour réaliser ce projet complexe, le groupe se base sur une méthode d'innovation et conception rigoureuse et rythmé par plusieurs étapes de validation. Cette base permettra d'acquis pour ce groupe permettant par la suite de se focaliser sur la phase de conception et développement. Par l'intermédiaire du laboratoire de Conception de Produits et Innovation, ce projet de recherche industrielle constituera la validation des premières étapes de ce projet d'envergure.

Mots clés (5 maxi) : dragage, automatisation, sédiment, environnement, performance

1 INTRODUCTION

Les innovations sur le secteur maritime ne cessent de croitre ces dernières années. L'envie d'aboutir à des méthodes plus fiables, plus économes, plus technologiques et écologiques ressort sur les derniers projets réalisés dans ce secteur. Nous pouvons constater les aboutissements réalisés sur les fleuves français [1] enclins à un transport fluvial plus riche puisqu'il représente un potentiel en tant qu'alternative durable pour le transport des marchandises. Les barrages hydroélectriques [2], les recherches liées aux énergie nucléaires plus vertes ont apporté une nouvelle vision de la production d'énergie en France.

En ce sens, le domaine du dragage s'exporte à développer des dispositifs pour répondre à cette croissance de l'innovation. De créer un système automatisé pour le travail de dragage. De penser différemment la réalisation des chantiers en prenant compte des envies de l'entreprise. De répondre aux enjeux d'avenir tels que les enjeux technologiques, environnementaux et écologiques.

Le contexte de cette recherche provient d'un appel d'offre d'EDF en 2017 sur l'élaboration d'un système de dragage autonome pour leur barrage hydroélectrique. Ce système automatisé doit parvenir à réaliser des travaux de dragages complexes tout en ayant un contrôle permanent sur le rejet des sédiments dragués. Ce contrôle précis est dû à la nécessité de rejeter ces sédiments dans le groupe usinier du barrage, sous-entendu en passant directement par les turbines. Ces turbines ne doivent donc pas être affectées par les rejets des sédiments. Cependant, le groupe WATERTRACKS a réussi à convaincre le groupe EDF pour la réalisation de ce projet en développant le robot de curage NESSIE [3], toujours en phase de développement en 2022.

2 QUESTION DE RECHERCHE

Ce projet amène donc à se questionner sur l'aboutissement d'un projet de dragage automatisé pour le groupe Vinci Construction Maritime et Fluviale.

Quelle est la démarche de conception innovante pour l'aboutissement d'un projet de dragage automatisé pour le groupe Vinci Construction Maritime et Fluviale ?

3 DEFINITION DU DRAGAGE

Le dragage consiste à évacuer les fonds marins dans les fleuves, les mers, les lacs, les bassins, les retenues de barrage hydroélectrique selon plusieurs contextes. Il existe le dragage permettant de limiter les effets de crues, d'enlever les sédiments en amont d'un chantier marin ou bien pour l'entretien.

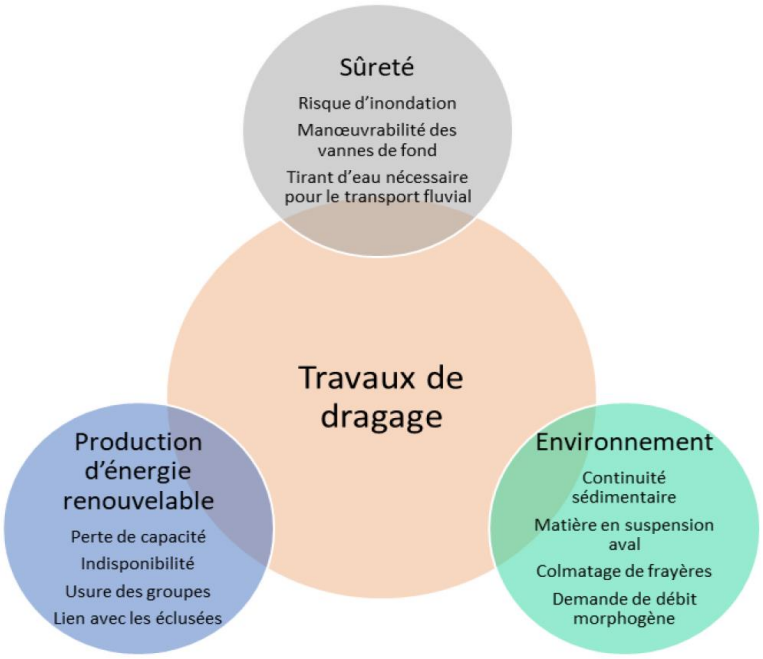


Figure 1. Enjeux des travaux de dragage en France

Pour cela, on utilise différents moyens répondant à ces problématiques : Dragues mécaniques (Pelle mécanique sur ponton, Benne preneuse sur ponton), dragues hydrauliques (Pompe sur ponton, Drague aspiratrice statique ou dynamique). Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour un chantier de dragage comme le montant du marché, durée du marché, volume à draguer, matériaux à draguer, profondeur maximale, accessibilité… Des études préalables sont alors réalisées pour permettre de choisir la meilleure procédure pour réaliser ce chantier. En France, ces travaux de dragages sont rythmés par la sédimentation des fleuves, des lacs/bassins, des retenues, amenée par le débit des mers, des fleuves, des chaines de montagne avec l'érosion de la roche. La réalisation d'un même chantier se reproduit tous les 2 à 10 ans.

4 DEMARCHE DE RECHERCHE

Depuis 2017, les recherches sur ce projet ont été mis en suspens pour réapparaitre en 2022. Les questionnements sur ce projet vont principalement parvenir sur les besoins et les envies concrets de l'entreprise. De comprendre précisément l'intérêt que porte le groupe sur la création de ce système en discutant avec les acteurs clés qui ont poussé à remettre au gout du jour ce projet. Pour m'imprégner de ces informations, il faut parvenir à obtenir des connaissances riches en amont de ces échanges. C'est pourquoi, une sensibilisation au métier du dragage avec une description détaillée de l'aspect technique du dragage est nécessaire. D'une part, un travail sur la partie théorique via des documents techniques sur tous les types de dragage et d'autre part, une partie plus immersive en me rendant directement sur un chantier de dragage. Enfin de me renseigner plus particulièrement de l'aspect environnemental, écologique, financière et des principaux acteurs autour de ce métier.

Ensuite, une recherche sur l'historique de la création de ce projet. De revoir l'appel d'offre initiale de ce projet, d'en comprendre les enjeux, de distinguer les pistes d'amélioration et de m'imprégner du besoin du groupe. Afin de se focaliser sur un type de marché, nous allons procéder à une définition de la cible commerciale. Cela nous permettra de se focaliser à court et moyen terme en matière d'objectif et de position pour notre dispositif. Cela demandera de lister selon plusieurs critères ces chantiers, de les hiérarchiser et de les analyser afin d'avoir une prise de recul sur le besoin réel. Des discussions auront lieu pour déterminer si la réalisation de ce projet pour certains types de chantier est intéressante ou non.

La grosse partie de ce projet de recherche concernera la définition de ce besoin. Dans un premier temps, il y aura une synthèse des spécificités permettant de réaliser les chantiers cibles retenus qui amèneront à une définition de l'objectif global des performances du dispositif de dragage. Cet objectif sera ainsi évalué en fonction de la concurrence sur le marché et des tendances actuelles. En sortie de cela, une rédaction du cahier des charges fonctionnelles va suivre marquant une étape dans notre projet. En ayant rédigé ce cahier des charges, nous pourrons alors nous exercer à plusieurs outils de créativité (Méthode Triz, Méthode C-K…). Ces derniers nous feront ressortir plusieurs concepts détaillés que nous allons analyser pour partir sur une seule direction.

Après avoir choisi le concept, une étude APS s'ensuivra signifiant la pré étude des différents composants de notre dispositif. Cette pré étude nous servira à l'élaboration du cahier des charges concepteur. Pour chaque élément qui composera notre machine, nous ferons une analyse et établirons des spécificités propres respectant certains critères. Lorsque ce cahier des charges concepteur sera établi, le but est de constituer un dossier d'investissement complet du projet. D'entreprendre des clarifications techniques avec les fournisseurs consultés lors de l'étude APS, d'établir un tableau de synthèse d'analyse d'offre et d'avoir une planification des ressources nécessaires au suivi de l'exécution du projet (suivi de fabrication, plan de tests).

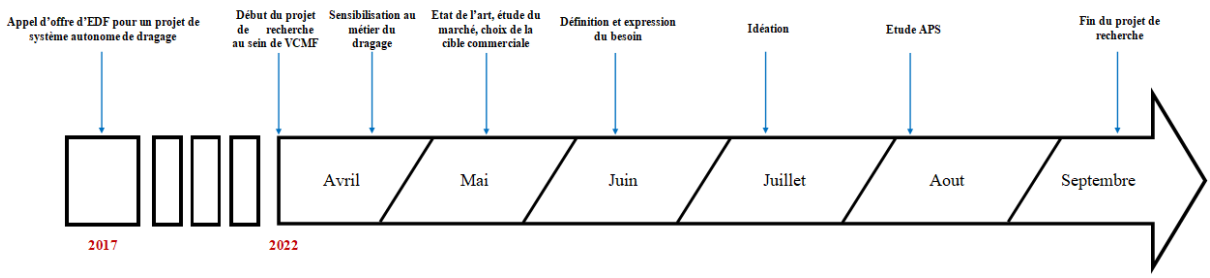


Figure 2. Frise sur la démarche de recherche

5 AVANT PROJET

5.1. Caractéristiques du dragage

Lors d'un travail de dragage sur une certaine zone identifiée, plusieurs études aux préalables sont indispensables. En effet, cette demande survient par l'intermédiaire d'une appel d'offre présentant certains critères à valider : Durée de travaux, mode de rejet, types de matériaux, impact sur l'environnement (Turbidité, oxygène, température) … Et on ajoute les défis techniques pour la réalisation de ces chantiers : marnage, accessibilité, profondeur, visibilité, conditions météorologiques. Sur ces critères, il faut établir des seuils d'exigences, des sujets d'études, des demandes d'expertises externes. Toutes ces caractéristiques propres à la réalisation de dragage traditionnelles seront à prendre en compte pour la conception de notre système de dragage autonome.

5.2. Définition de la cible commerciale

Le travail d'avant-projet se concentre sur les besoins et la stratégie du groupe en lui-même et sur le marché potentiel pour ce nouveau système de dragage. Cette correspondance doit émerger une envie de l'entreprise à vouloir développer un système cohérent. Pour parvenir à cette tâche, en premier lieu, le travail porte sur une collecte de donnée des marchés cibles réalisés et non réalisés par VCMF. Dans ces données, nous allons retrouver des caractéristiques quantitatives (quantité de dragage, profondeur, cadence journalière…) et qualitative (mode de rejet, matériaux, accessibilité…). Ces marchés sont regroupés en catégorie simplifiant la prise de décision, présenté sur le schéma ci-dessous :

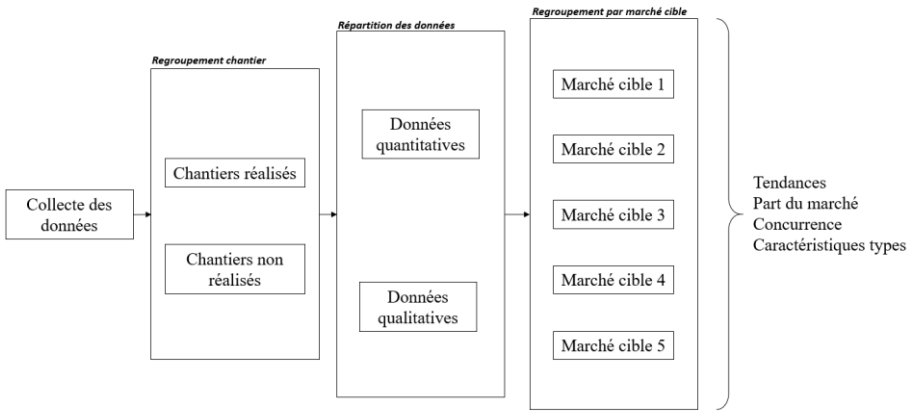


Figure 3. Schéma sommaire sur le choix de la cible commerciale

Cette recherche permet de se situer et d'en comprendre les enjeux de façon clair. Cette analyse a permis de façon général d'analyser le besoin de VCMF. Par la suite nous allons nous concentrer sur l'expression de ce besoin.

6 EXPRESSION DU BESOIN

6.1. Bête à corne

Pour exprimer ce besoin, on réalise une bête à corne. Sur celle-ci, nous allons indiquer les informations suivantes :

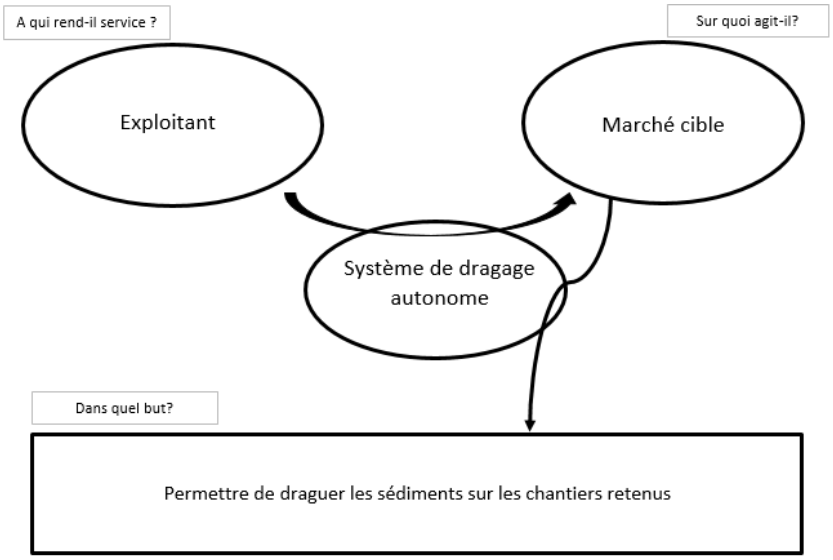


Figure 4. Bête à corne

En ajout de cette bête à corne, afin de clarifier le besoin, on va se demander :

6.2. Pourquoi ce besoin existe-t-il ?

Les processus à l'origine des sédiments et de leur devenir sont l'érosion, le transport, le dépôt et la compaction. L'implantation de barrages sur les cours d'eau s'accompagne toujours de modifications hydromorphologiques et physico-chimiques en perturbant notamment la continuité sédimentaire mais aussi écologique. C'est pourquoi, pour y remédier, des vidanges par la vanne de fond sont réalisées, ce qui génère une importante masse de sédiments rejetée et une perte de production pour les usines hydroélectriques, ou bien de réaliser des travaux de curage en rejetant en aval et plus récemment devant la prise d'eau usinière.

6.3. Dans quel but ce besoin existe-t-il ?

Ce besoin apparait suite à la demande de client pour la réalisation de travaux de dragage. En addition de ces travaux de curage complexes (profondeur, marnage, accessibilité), le but est d'avoir un contrôle sur le débit de matières rejetées et d'avoir un système autonome.

6.4. Quelles sont les causes d'évolution et de disparition de ce besoin ?

- Nouvelle technique/technologie de gestion des sédiments
- Arrêt des travaux de dragage du groupe VCMF

7 FONCTIONS DE SERVICES

7.1 Cycle de vie

Afin de déterminer les fonctions de service de notre système, permettant son dimensionnement, il faut tout d'abord établir le cycle de vie de notre produit. Ce cycle de vie regroupe les étapes importantes par lequel le produit va passer. Ici, le cycle de vie se représente comme suit :

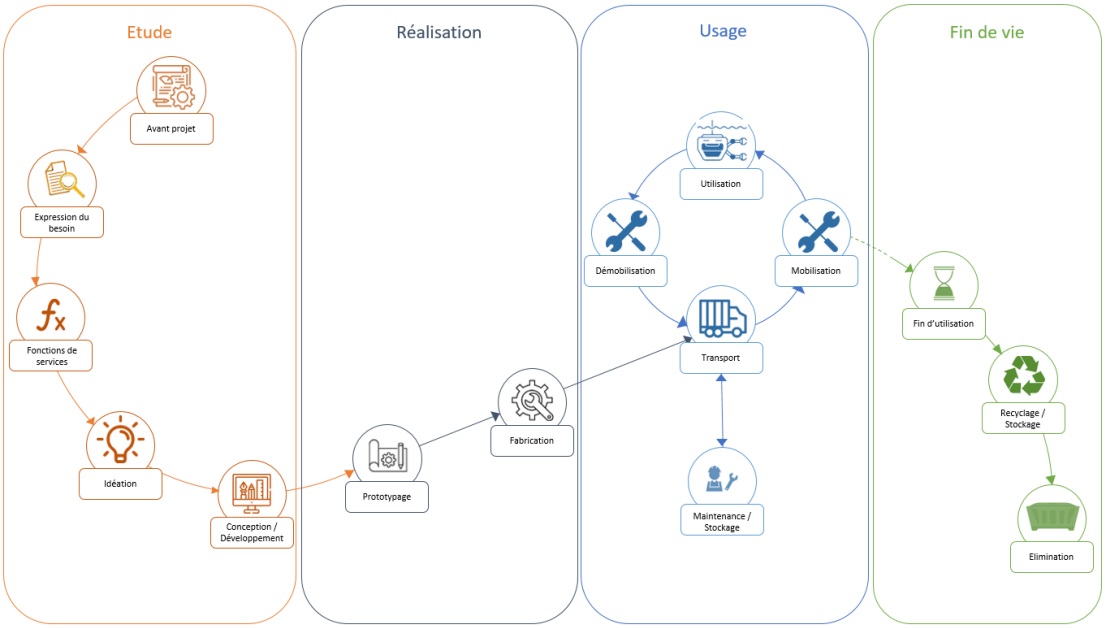


Figure 5. Cycle de vie de notre système

7.1.1 Etude

La phase d'étude regroupe les phases d'avant-projet, expression du besoin, fonctions de services, idéation et conception/développement. Ces trois premières étapes constituent la base de recherche de cette article. L'essentiel ici, est de proposer une nouvelle réflexion au sein du groupe en matière d'innovation et conception de nouveaux produits. En formant cette base, les phases d'idéations et de conception / développement découleront aisément.

7.1.2 Réalisation

La partie réalisation regroupe les phases de prototypage et de fabrication. Dans cette phase de prototypage, il sera intéressant de réaliser des maquettes fonctionnelles et d'aspect ou même de s'intéresser aux maquettages numériques par l'intermédiaire de réalité augmentée et de réalité virtuelle. En terme de fabrication, la stratégie de cette phase va directement découler des fonctions de services de notre système et de l'expression du besoin. En effet, ce système doit correspondre parfaitement avec les

envies du groupe VCMF et doit s'aligner avec ses forces. C'est pourquoi, à partir de cette phase de fabrication, le dispositif devra coïncider avec les ambitions exprimées.

7.1.3 Usage

La partie usage représente la majeure partie du cycle de vie de notre système. Dans cette partie, on retrouve la phase d'utilisation, mobilisation/démobilisation et stockage/maintenance. La phase de maintenance/stockage [1] aura pour but de garder aux normes le système et de lui ajouter des améliorations au fur et à mesure. Ces améliorations pourront correspondre aux chantiers à réaliser ou à de nouvelles prouesses technologiques. La phase de transport, mobilisation/démobilisation, intervient comme une composante nouvelle à diagnostiquer par rapport aux chantiers cibles. Cette phase influera directement sur la dimension de notre système sur l'aspect technique. L'utilisation de notre système fait émerger les caractéristiques principales recherchées par notre système [3]. Dans ces caractéristiques nous retrouvons les performances de dragage du système ainsi que l'ajout de la partie automatisation [4]. C'est de ce besoin même qu'est venu la démarche de concevoir ce type de système.

7.1.4 Fin de vie

La fin de vie, souvent négligé en conception, reste un point important au vu des enjeux actuels. En effet, l'environnement et l'écologie reste au cœur des sujets actuels et demeurent comme un moteur d'innovation pour la conception des systèmes. De plus, d'un point de vue technique et technologique, les connaissances produites tout au long de la phase d'usage permettront d'apporter des connaissances supplémentaires pour l'aboutissement d'un nouveau projet [5]. En effet, après avoir établi une durée de vie, le but final est de repartir sur un nouveau système plus performant que le précédent.

7.2 Caractérisation

Sur le cycle de vie de notre système, il en ressort 4 phases importantes où il est nécessaire d'étudier en détails. Sur ces phases, on peut ressortir des fonctions entre le milieu extérieur et le système. Ces fonctions sont soit principales : interaction entre 2 éléments extérieurs ; ou contraintes : interaction entre le système et un élément extérieur. Ces 4 phases importantes à étudier sont :

- Utilisation
- Transport et de Mobilisation/Démobilisation
- Stockage/Maintenance
- Fin de vie

Pour chaque fonction, il est intéressant d'établir des critères d'appréciation puis d'ajouter un niveau et une limite. Ces niveaux d'appréciation seront établis selon l'étude au préalable sur les marchés cibles et sur les envies du groupe. En hiérarchisant ces fonctions et en les regroupant par domaine, nous pourrons utiliser les forces du groupe en se renseignant directement aux experts internes en question. Cela nous permettra d'établir une base commune sur les performances de notre système.

8 CONCLUSION

Ce projet de recherche permettra de mettre en forme et d'appliquer une rigueur en matière d'innovation et conception dans le domaine du dragage au sein du groupe VCMF. Ce domaine niche, regroupe de nombreuses spécificités rendant le projet riche. Ce travail mêlent des travaux de recherches et des travaux en groupe permettant d'apporter une nouvelle fraicheur et une envie de renouveau pour les défis à venir. La finalisation de ces étapes marquera une grande avancée pour le groupe car les

fondements du projet seront bâtis ce qui permettra de se pencher par la suite sur la phase d'idéation. A la fin de cette phase d'idéation, une étude APS viendra clôturer ce projet de recherche de 6 mois.

REFERENCES

[1] Emmanuelle N'HAUX, *La Compagnie nationale du Rhône confortée dans son rôle d'aménageur du fleuve,* 2022

[2] Antoine DESPUJOLS, *Approche fonctionnelle de la maintenance,* Technique de l'ingénieur, 2015

[3] Jean-René RUAULT, Dominique LUZEAUX, *Ingénierie des systèmes de systèmes*, 2019

[4] Elie FADIER, *Automatisation et sécurité*, 2009

[5] Jorge MARTINEZ-LEAL., *Développement d'outils d'aide à la décision en conception pilotés par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie,* Thèse HEL, 2019

Contact principal : TAVERNIER Arthur
Coordonnées : arthur.tavernier@ensam.eu

CASSAGE DE MOTS DE PASSE : LES PHRASES DE PASSE COMME ALTERNATIVE

Antoine Tréfeu[1]
[1] CESI École d'Ingénieurs, Rouen

Résumé : La fuite de mots de passe est un problème récurrent, qui se manifeste sous forme d'échanges de listes sur Internet, incluant parfois les noms d'utilisateurs associés. Nous expliquons dans cet article comment ce genre de scénario peut arriver, notamment par l'utilisation d'algorithmes de hachage rapide côté administration et par la construction de mots de passe faibles côté utilisateurs. Nous passons en revue les méthodes employées par les attaquants pour deviner les mots de passe des utilisateurs à partir de leurs signatures (attaques par force brute, par dictionnaire, avec permutations), nous montrons que les politiques de sécurité encore utilisées aujourd'hui ne sont pas suffisantes. Nous défendons l'idée selon laquelle l'estimation de la force d'un mot de passe se fait dans un contexte d'attaque, c'est-à-dire en prenant en compte des facteurs comme la présence de substitutions, de mots communs, en plus du calcul de l'entropie. L'utilisation de phrases de passe comme méthode d'authentification est en augmentation depuis plusieurs années, nous montrons qu'elle a moins de chance d'être cassée lors d'une attaque, contrairement à un mot de passe conventionnel. Nous insistons sur les méthodes de création de mots de passe (qu'il s'agisse d'une phrase ou non), car si cette méthode est connue de l'attaquant, alors il est peu probable qu'elle protège l'utilisateur.

Mots clés : phrase de passe, algorithme de hachage, entropie

1 INTRODUCTION

Les mots de passe textuels sont le mécanisme le plus courant pour authentifier les utilisateurs humains de systèmes informatiques, en particulier sur Internet [1]. La sécurité des mots de passe est devenue un intérêt de recherche clé en raison de l'omniprésence des services web modernes et de leur nature de plus en plus critique. Les mots de passe constituent le fondement de la politique de sécurité d'un large éventail de services en ligne, protégeant les transactions financières, les dossiers médicaux et les communications personnelles des utilisateurs, et bloquant les intrusions dans les réseaux d'entreprise, les réseaux électriques et les réseaux militaires.

La sécurité peut être compromise si les mots de passe sont faciles à deviner et les recherches ont montré de manière constante que les utilisateurs ont tendance à choisir des mots de passe simples et faciles à retenir [2]. Pour contrer ce phénomène, les services en ligne utilisent souvent des politiques de composition des mots de passe (par exemple, "le mot de passe doit contenir un mélange de lettres majuscules et minuscules et au moins un chiffre"), ou des évaluateurs de mots de passe pour aider les utilisateurs à comprendre la force de leurs mots de passe. Des études ont montré que les politiques de composition de mots de passe ainsi que les évaluateurs de mots de passe (ou les notifications verbales) aident effectivement les utilisateurs à choisir des mots de passe plus forts. Cependant, elles ne permettent pas de créer des mots de passe utilisables en pratique, car ils sont plus compliqués à retenir [3]. À l'inverse, les mots de passe simples et mémorisables choisis par l'utilisateur résistent mal aux attaques par dictionnaire [4].

2 ÉTAT DE L'ART

Le cassage de mots de passe ("*password cracking*" en anglais) est le fait de retrouver un mot de passe à partir de sa somme de contrôle, que nous appellerons "*hash*" dans la suite de cet article. Que ce soit dans un but d'attaque réelle ou dans le cadre d'un audit, les acteurs ont recours à des logiciels dédiés : Hashcat et John The Riper.

2.1. Cassage avec Hashcat

Hashcat est un logiciel de récupération de mot de passe, open-source depuis 2015 et donc disponible sur la plupart des systèmes d'exploitation (Windows, macOS, GNU/Linux). Il tire profit de la carte graphique de la machine qui le fait tourner. Il fonctionnait aussi historiquement avec le processeur de la machine, on se réfère alors à cette version par le nom *hashcat-legacy*. Nous détaillerons ici l'utilisation du logiciel Hashcat, à titre d'exemple car il est très apprécié dans le domaine [5]. Son homologue John The Riper donne des performances similaires et ne diffère vraiment que sur la forme, que nous ne détaillerons pas ici.

2.1.1. Les règles de masque

Hashcat propose une méthode plus avancée que le simple "*bruteforce*" : l'utilisation de masques. Le but est de réduire l'espace de recherche du mot de passe ("*Password Search Space*", *PSS*) en indiquant une structure de caractères à suivre, plutôt que d'essayer une infinité de combinaisons sans réelle logique.

Par exemple, nous pouvons facilement cibler les mots de passe de la forme "*Prénom* + *Date*", comme "*Julia1984*" en utilisant le masque suivant : `?u?l?l?l?l?d?d?d?d`.

	Jeu de caractères (*"charset"*)
?l	abcdefghijklmnopqrstuvwxyz
?u	ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
?d	0123456789
?h	0123456789abcdef
?H	0123456789ABCDEF
?s	!"#$%&'()*+,-./:;<=>?@[\]^_`{}~
?a	?l?u?d?s
?b	0x00 - 0xff

Table 1. Les différents jeux de caractères (« charsets ») proposés par défaut dans Hashcat.

En effet, le mot de passe `Julia1984` commence par une lettre majuscule, suivie de minuscules puis de quatre chiffres. Ce genre de structure peut être identifié grâce à de large bases de mots de passe en clair. Une fois qu'on a choisi une ou plusieurs structures ("*pattern*", en anglais), on va utiliser hashcat pour compléter l'espace de recherche (*PSS*) et essayer chaque candidat contre une liste de hashes.

2.1.2. Les performances

Le cassage de mots de passe, notamment de ceux qui fuitent après une faille de sécurité est pour certaines personnes une activité lucrative. En effet, si on se réfère au site hashmob.net, on peut dresser une liste des algorithmes de hachage les plus prétendument utilisés, car les utilisateurs collaborent pour casser le plus de mots de passe possible à partir d'une liste publiée. Il est également possible d'être rémunéré au nombre de hashes trouvés pour certaines listes. Les logiciels dédiés au cassage de mots de passe, comme Hashcat, tirent avantage du processeur graphique pour fonctionner. Il est donc relativement aisé, avec le budget nécessaire, de monter sa propre machine de "*cracking*", à l'aide de plusieurs cartes graphiques modernes. À titre d'exemple, voyez en table 2 les performances obtenues

Algorithme	Code	4x Nvidia A100	8x Nvidia 3090
MD5	0	258.7 GH/s	471.8 GH/s
SHA1	100	87.4 GH/s	150.3 GH/s
NTLM	1000	480.3 GH/s	826.9 GH/s
SSHA-256	1411	37.3 GH/s	63.7 GH/s
SSHA-512	1711	12.9 GH/s	21.2 GH/s
sha256crypt	7400	3504.5 kH/s	6136.4 kH/s
sha512crypt	1800	1908.8 kH/s	2666.5 kH/s
descrypt	1500	10.1 GH/s	18.6 GH/s
vBulletin	2611	78.4 GH/s	130.1 GH/s
bcrypt	3200	533.4 kH/s	790.0 kH/s

lors d'un benchmark pour deux configurations : un cluster de 4 cartes Nvidia A100, et un autre cluster de 8 cartes Nvidia GTX 3090.

Table 2. Comparaison des performances de Hashcat sur différents algorithmes de hachage, exprimées en nombre de tentatives par seconde. Par exemple, 150.5 GH/s signifie qu'en une seconde, Hashcat peut tester 150 milliards de candidats contre un hash.

On constate rapidement que certains algorithmes sont beaucoup plus vulnérables au cassage avec Hashcat que d'autres. Cela est plus explicite en figure 1.

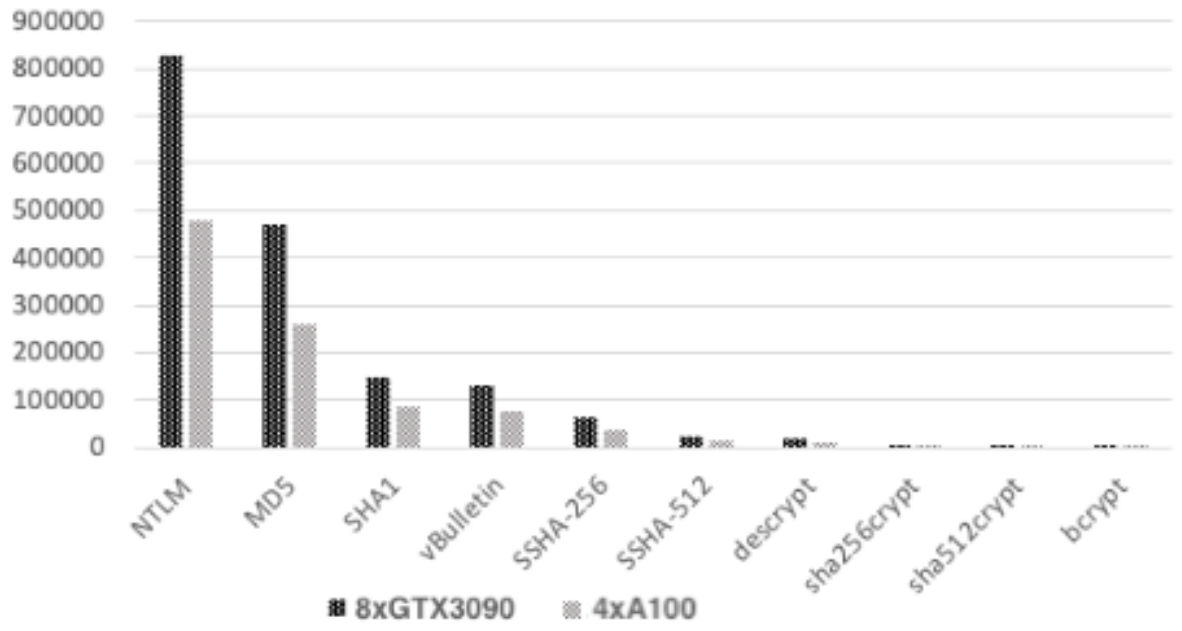


Fig. 1. Comparaison des performances de Hashcat sur différents algorithmes, avec deux configurations différentes. En ordonnées, le nombre de tentatives par seconde (en millions).

Les trois derniers algorithmes retiennent tout particulièrement notre attention : sha256crypt, sha512crypt et bcrypt. Leurs scores au test de performance sont nettement plus bas que les autres, de l'ordre du facteur 10^5.

2.2. Évaluer la force d'un mot de passe

Chaque logiciel, chaque formulaire a sa propre manière d'évaluer la qualité ou la force d'un mot de passe. Celle-ci peut varier en fonction du point de vue selon lequel on se place [6].

2.2.1. Contraintes

Une pratique commune pour les entreprises est d'imposer des politiques de mots de passe à leurs utilisateurs [7], comme la célèbre méthode LUDS [8]. Simple, cette méthode vérifie si un mot de passe entré contient au moins une lettre minuscule ("*Lower*"), une lettre majuscule ("*Upper*"), un chiffre ("*Digit*") et un caractère spécial ("*Special*"). Associée à une longueur minimale (généralement de 8 caractères), cette contrainte peut satisfaire bon nombre d'administrateurs système. Elle est en tout cas encore largement utilisée aujourd'hui [9].

2.2.2. Entropie de Shannon

L'idée derrière l'utilisation de la méthode LUDS est de contraindre l'utilisateur à produire un mot de passe *à forte entropie*.

On définit l'entropie de Shannon par la quantité d'information contenue ou délivrée par une source d'information. En ce qui concerne un mot de passe, il s'agit normalement de la manière *dont est générée le mot de passe*. Moins son résultat est prédictible, plus son entropie est grande. Mais du point de vue d'un attaquant, il est possible que la technique utilisée pour générer le mot de passe soit inconnue, son entropie "agnostique" sera donc basée uniquement sur sa longueur. L'entropie d'un mot de passe est généralement exprimée en bits, plus sa valeur est grande, plus le mot de passe est considéré fort [10]. Pour un mot de passe de n caractères, on peut écrire, pour tout caractère i :

$$H_{mot\,de\,passe} = \sum_{i=1}^{n} log_2(smallest\,charset(i))$$

Le calcul est simple et repose sur le logarithme binaire. Si on reprend notre exemple du mot de passe `Julia1984`, on pourra calculer son entropie de différents points de vue, du plus précis au plus approximatif.

	J	u	l	i	a	1	9	8	4
$pattern_1$	26	26	26	26	26	10	10	10	10
$pattern_2$	52	52	52	52	52	10	10	10	10
$pattern_3$	62	62	62	62	62	10	10	10	10
$alphanum$	62	62	62	62	62	62	62	62	62
$LUDS$	95	95	95	95	95	95	95	95	95

Table 3. Différents points de vue du mot de passe *Julia1984*, le premier étant le plus précis (majuscule suivie de minuscules puis de chiffres), le dernier étant totalement agnostique (chaque caractère peut être soit une majuscule, soit une minuscule, un chiffre ou un caractère spécial).

Nous avons différents cas de figure. Pour chacun, nous comptons le nombre de possibilités pour chaque caractère, plus ou moins précisément.

1. Le $pattern_1$ est le point de vue le plus précis. Une majuscule, suivie de 4 minuscules puis de 4 chiffres. Son entropie est donc la somme de l'entropie de Shannon de chaque caractère.

   $H = log_2(26) + log_2(26) + ... + log_2(10) \simeq 38.78$ bits

2. Le $pattern_2$ est agnostique concernant les majuscules et les minuscules, le nombre de possibilités pour les lettres passe donc de 26 à 52.

   $H = log_2(52) + log_2(52) + ... + log_2(10) \simeq 41.78$ bits

3. Le *pattern*$_3$ considère qu'il peut y avoir des chiffres dans la première partie du mot de passe. On passe donc de 52 à 62.

   $H = log_2(62) + log_2(62) + ... + log_2(10) \simeq 43.05$ *bits*

4. Pour le *alphanum*, on sait juste que le mot de passe contient des lettres et des chiffres, sur 9 caractères.

   $H = log_2(62) \times 9 = 53.58$ *bits*

5. Pour le dernier, *LUDS*, on ne connaît que la taille, et on part donc sur le jeu de caractère le plus large.

   $H = log_2(95) \times 9 = 59.12$ *bits*

En réalité, on considèrera toujours la valeur la plus faible, c'est-à-dire la méthode la plus précise pour quantifier la force de notre mot de passe [8]. Mais il est intéressant de faire le calcul d'un point de vue plus approximatif, puisque c'est de cette manière qu'un attaquant essaiera de casser votre mot de passe [6]. À moins que votre mot de passe soit réellement de la forme `Julia1984`, il est peu probable qu'un attaquant puisse deviner la structure (*le "pattern"*) de votre mot de passe [4].

Bits	Force
0 - 64	Très faible
64 - 80	Faible
80 - 112	Moyen
112 - 128	Fort
$\geq$ 128	Très fort

Table 4. Appréciation d'un mot de passe en fonction de son entropie en bits, selon le gestionnaire de mots de passe KeePass.

Un estimateur de force de mot de passe nous donnera donc un résultat proche de notre premier calcul : environ 38 bits. D'après les standards de KeePass, reportés en table 4, cela correspond à un mot de passe très faible.

2.2.3. Vérification par mots-clés

En plus du calcul "brut" de l'entropie, il peut être important de vérifier que le mot de passe entré ne contienne aucune séquence de mots connues ou prévisible. Car du point de vue d'un attaquant, un mot de passe est vulnérable à deux types d'attaques : celles par force brute ("*bruteforce*") et celles par dictionnaire [8]. Pour se protéger des premières, il faut bien sûr avoir une forte entropie. Pour se protéger des suivantes, il faut s'assurer que son mot de passe soit *unique*, dans le sens où personne d'autre ne peut avoir imaginé le même. Concrètement, il faut éviter d'utiliser des mots du langage courant, et si on souhaite lui donner un sens (car cela facilite la mémorisation [3], il faut que celui-ci n'en ai que pour celui qui l'invente. Il ne faut pas qu'un mot de passe imaginé par une personne A soit compréhensible pour une personne B.

Pour ce faire, on peut avoir recours à des listes de mots ("*wordlists*") [8] du côté de l'utilisateur, pour vérifier que son mot de passe ne contienne aucune séquence sensible. C'est ce qui a été mis au point par l'équipe de Dropbox, un outil appelé "zxcvbn", en référence au genre de mots de passe trop faible que peuvent utiliser certaines personnes (l'équivalent de notre "azerty") [1]. Le principe est d'analyser, pour tout mot de passe entré, le maximum de mots connus, de substitutions communes (les "O" par des "0", les "e" par des "3") et enfin d'estimer le temps nécessaire au cassage du hash, en fonction de son type ("rapide" ou "lent", voir la figure 1 pour référence). En procédant ainsi, on se place du côté de

l'attaquant pour estimer la qualité du mot de passe choisi. S'il est simple à casser, il est faible, sinon, il est fort. Plutôt que de donner une entropie en bits, zxcvbn se contente de donner un score sur 4 points : s'il résiste à une attaque en ligne limitée, illimitée, s'il résiste à une attaque hors-ligne sur hash rapide, sur hash lent. Ce simple programme, porté dans la plupart des langages (javascript, PHP, ruby) est destiné à servir de validateur dans un formulaire de création de compte. Comme on l'a vu au point 2.2.1, les politiques de mots de passe comme LUDS imposent des contraintes dans le but de maximiser l'entropie, mais sans la calculer directement. Zxcvbn va encore plus loin car en plus de calculer le temps nécessaire au cassage, il embarque plusieurs listes de mots à éviter (une très légère par défaut, une moyenne et une plus large, de l'ordre de quelques méga-octets au besoin).

Mot de passe	l	c	PSS	Entropie
`N$7hLhz+`	8	95	95^8	52.5
`7bJQ9aUap2`	10	62	62^10	59.2
`correcthorsebattery`	19	26	26^{19}	89.3

Table 5. Comparaison de l'entropie de différents mots de passe et de différentes phrases de passe.

Cette approche est très intéressante car comme vu en table 5, des mots de passe en apparence trop simples peuvent se révéler plus forts que des mots de passe conventionnels, de par leur longueur [6].

2.3. Phrases de passe

Un autre moyen de plus en plus mis en avant par les politiques de sécurité [11] est l'utilisation de phrases de passe. Plutôt que de retenir un mot de passe court mais compliqué, l'idée est de retenir une phrase longue mais courte. Concrètement, il s'agit d'augmenter l'entropie non pas par l'augmentation du jeu de caractère ("charset") mais par l'augmentation de la longueur du mot de passe.

On calcule :

$$PSS = c^l$$

Avec :

- *PSS* : *Password Search Space*, l'ensemble des combinaisons à énumérer pour trouver le mot de passe.
- *c* : La taille du jeu de caractère utilisé pour composer le mot de passe.
- *l* : Le nombre de caractères du mot de passe.

À titre de comparaison, voir en table 5 quelques mots de passe et quelques phrases de passe typiques [12]. Notez que dans ce tableau la phrase de passe `correcthorsebattery` est considérée comme un mot de passe, c'est-à-dire qu'on compte son entropie caractère par caractère, et non pas mot par mot, ce raisonnement est valide si l'attaquant ne sait pas que le mot de passe est une phrase. Comme vu au point 2.2.2, il vaut mieux sous-estimer son entropie et la calculer mot à mot, ce qui nous donnerait : $3 \times \log_2(7776) = 38.70$ bits. Nous expliquons le nombre 7776, qui remplace la taille du jeu de caractère dans la section 2.3.1.

2.3.1. Diceware

La méthode dite "*Diceware*" permet de générer des phrases de passe de manière hors-ligne et sécurisée. Il suffit de télécharger une liste de mots, chacun associé à un nombre. Le créateur de la méthode en propose une contenant les mots les plus courant de l'anglais, associé à des nombres de 5 chiffres, allant de 1 à 6. L'idée est de pouvoir imprimer cette liste, puis d'utiliser des lancements de dés

pour sélectionner ses mots. Par exemple, en lançant 5 dés (ou cinq fois un dé), un peut obtenir le résultat suivant : `[1,3,2,4,2]`. Dans la table Diceware en français, cela correspond au mot "*aimant*". On peut alors répéter l'opération autant de fois que nécessaire pour obtenir plus de mots. Comme la liste de base contient 7776 mots, l'entropie d'un mot peut être arrondie à 12,7 bits ($\log_2(7776)$) [10].

5	64.62	Se connecter à sa session
6	77.54	Signer et chiffrer des documents
7	90.47	Protéger un portefeuil électronique

Table 6. Nombre de mots recommandés par la méthode Diceware pour différentes utilisations. Alors qu'une taille de 5 est donnée comme le strict minimum, une taille de 7 est considérée comme suffisante pour les utilisations les plus critiques.

Selon le créateur de la méthode, cinq mots devrait être le minimum, ce qui correspond à environ 64 bits d'entropie. Voir la table 6 pour plus de détails.

2.3.1. Linguistique de corpus

La linguistique de corpus étudie la signification des mots à travers des exemples contenus dans des textes réels. Elle permet de déterminer à partir d'un corpus les connaissances linguistiques essentielles à l'élaboration des dictionnaires. Dans cette partie, nous allons nous aider de l'outil *CorpusCrawler* de Google. Il permet d'extraire d'un corpus (en l'occurrence de pages Web) les mots les plus utilisés, sous forme de liste. La liste en français proposée au téléchargement en contient 60975, dont un extrait est visible en table 7.

313753	de	ADP
222342	la	DET
160771	le	DET
127280	les	DET
108172	à	ADP
104530	des	DET
100534	et	CONJ

Table 7. Premiers mots du Google Corpus français. Ils sont triés par leur nombre d'occurrences dans les textes étudiés.

Couplé à un étiquetage morpho-syntaxique (*"Part-Of-Speech (POS) Tagging", en anglais*), comme celui de l'Université de Stanford [13] nous allons pouvoir créer des phrases grammaticalement correctes.

Un logiciel de *POS-Tagging* nous donnera pour une phrase donnée, la sortie suivante :

Nous avons mangé.
Nous/PRO:PER avons/VEB:pper mangé/VER:conj

Table 8. La phrase en français « Nous avons mangé » est correctement identifiée : chaque mot est associé à un type et un mode. Par exemple, « Nous » est un pronom personnel (« PRO :PER »).

En combinant la liste fournie par le CorpusCrawler de Google et le logiciel d'étiquetage de Stanford, nous pouvons facilement créer plusieurs listes par types simples, comme les pronoms (PRON), les verbes (VERB), les déterminants (DET) et les noms communs (NOUN). Avec ces quelques éléments de grammaire, nous pouvons déjà composer quelques phrases simples, grammaticalement correctes. Pour cela, nous devons définir une ou plusieurs syntaxes à utiliser [14]. La phrase "*Il mange du fromage*" est de la forme `PRON VERB DET NOUN`, par exemple. Avec nos 4 éléments de grammaire, on peut donc faire ces trois types de phrases :

- `PRON VERB DET NOUN`

  Exemple : "Nous maintenons votre navire."

  Entropie : 1 pronom, 1 verbe, 1 déterminant, 1 nom : 43.2 bits

- `DET NOUN VERB DET NOUN`

  Exemple : "Un ours boit une vache."

  Entropie : 2 déterminants, 2 noms, 1 verbe : 56.4 bits

- `DET NOUN DET NOUN VERB DET NOUN`

  Exemple : "Le cheval de plumes décale le mendiant."

  Entropie : 3 déterminants, 3 noms, 1 verbe : 77.6 bits

Il faut bien entendu faire tout le travail de conjugaison et d'accords, cela peut être automatisé en programmant les règles de la langue française en question. L'intérêt de générer ces phrases grammaticalement correctes est de les utiliser comme phrases de passe, car elles sont plus simples à retenir, sans pour autant compromettre sa sécurité [2]. On pourra à cet effet augmenter l'entropie de sa phrase de passe, soit en rajoutant des mots au corpus, soit en utilisant plus d'éléments de grammaire (comme des adverbes, des adjectifs) afin de faire des phrases plus complexes et plus longues.

3 STRUCTURE DES MOTS DE PASSE

Une analyse des listes de mots de passe ayant fuité sur Internet – comme rockyou, liste historique ou collection one, plus récemment – nous montre que les utilisateurs ont tendance à utiliser des structures similaires dans leurs mots de passe "forts", en dépit des contraintes comme LUDS [9]. En effet, en forçant les utilisateurs à adopter des caractères spéciaux, des majuscules et des chiffres, ils se mettent à reproduire des comportements prédictifs dans un dilemme entre mémorisation et sécurité [15]. On a ainsi pu observer 10 comportements récurrents quant au "renforcement" des mots de passe pour être conforme aux nouvelles politiques de mots de passe [4]. Ces 10 différents types de modifications sont rapportés en table 9.

Type	Base	Sortie
Ajout fin	god	god123
Ajout début	god	12god
Insertion		love4ever
Répétition	cat	catcatcat
Séquençage		azerty
Replacement	monkey	monk3y
Inversement	password	drowssap
Capitalisation	password	Password
Formattage	google	www.google.com
Multiple	monkey	Monk3y123

Table 9. La phrase en français « Nous avons mangé » est correctement identifiée : chaque mot est associé à un type et un mode. Par exemple, « Nous » est un pronom personnel (« PRO :PER »).

Comme évoqué au point 2.1.1, le mot de passe `Julia1984` correspond à un "*pattern*" (une structure) assez simple. Il s'agit en fait d'un type multiple : une capitalisation sur la première lettre et un ajout de 4 chiffres (en l'occurrence une date) à la fin. À partir du moment où on a identifié plusieurs formes de mots de passe (plusieurs "*patterns*"), il devient plus intéressant de créer un dictionnaire comportant toutes ces possibilités plutôt que d'essayer une attaque par force brute interminable. Il a été montré que procéder de cette manière permettait de casser significativement plus de hashes dans une même période donnée que par des méthodes plus conventionnelles [4] (dictionnaire ou force brute). On pourra utiliser des outils comme pydictor à cet effet.

4 STRUCTURE DES PHRASES DE PASSE

Concernant les phrases de passe, nous avons vu plusieurs méthodes pour en générer à forte entropie. La raison pour laquelle elles doivent rester parfaitement aléatoire peut sembler évidente : les phrases les plus susceptibles d'être utilisées (comme des dictons, des paroles, des titres de film) sont aussi très susceptibles d'être trouvées par un attaquant [2]. Il existe déjà des projets communautaires visant à créer de larges listes de phrases à partir de bases de données publiques (Wikipedia, Urban Dictionnary, IMDB), puis de leur appliquer des règles de transformation basiques comme vu au point 3. Une des difficultés que peut poser la phrase de passe est sa saisie par l'utilisateur à l'aveugle. En effet, un mot de passe "complexe" mais court reste plus simple à taper au clavier qu'une phrase de plusieurs dizaines de caractères. Il a été observé que les utilisateurs qui se familiarisaient avec les phrases de passe avaient plus tendance à faire des fautes de frappe que ceux qui utilisaient des mots de passe, résultant en un plus grand nombre d'échec de connexion [16].

5 RECOMMENDATIONS

Au vu des travaux présentés dans la section précédente, les recommandations vis-à-vis du sujet sont les suivantes.

5.1. Cassage des mots de passe

Le cassage des mots de passe est une opération qui se pratique hors-ligne, avec une configuration adéquate. L'objectif est quantitatif et non pas qualitatif, dans le sens où ce qui est attendu est d'obtenir d'une liste de hashes le plus de mots de passe possible, dans un laps de temps donné. À cet effet on utilisera des dictionnaires extraits de fuites de mots de passe réels, sur lesquels on effectuera des permutations multiples pour démultiplier sa taille. À moins de disposer d'une configuration très puissante et de travailler avec des algorithmes de hachages très rapides (MD5, NTLM), le recours à la méthode de force brute n'est pas recommandé. Comme de plus en plus d'utilisateurs ont recours aux phrases de passe [16], on pourra puiser dans des ressources en ligne ou générer ses propres listes de phrases courtes grâce aux méthodes grammaticales vues au point 4.

5.2. Protection des mots de passe

Comme vu au point précédent, un mot de passe est cassé dans le cadre d'une opération d'ordre quantitatif. Il faut donc penser la sécurité de son mot de passe de manière relative, c'est-à-dire par rapport aux autres. En effet, le but d'un attaquant est d'obtenir d'une liste le maximum de mots de passe, il va donc tenter les combinaisons les plus probables – donc les plus populaires – contre elle. Du côté de l'utilisateur, sa responsabilité est donc d'éviter d'avoir recours à des méthodes visant à simplifier la mémorisation du mot de passe au détriment de sa qualité : les permutations, les mots courants et les structures communes (les *patterns*). S'il choisit de créer un nouveau mot de passe, le strict minimum serait d'être conforme aux contraintes LUDS sur une longueur de 11 caractères [8]. Un bon exemple serait le suivant : `H8K9$vt_C+t`, un mauvais serait le suivant : `Juli@1984`. Du côté de l'administrateur, il lui incombe la responsabilité de hacher le mot de passe avec un algorithme de hachage lent. Il n'y a aujourd'hui aucune excuse pour continuer à utiliser des algorithmes comme MD5

ou SHA1, surtout quand de plus en plus d'algorithmes complexes sont mis au point et présentés lors de conférence comme la *Password Hashing Competition*. Deux candidats sérieux peuvent être bcrypt ou sha512crypt. De la même manière, il n'y a aucune raison pour ne pas *saler* ses hashes. La valeur prise par ce sel n'a pas d'importance, puisque pour rappel, l'intérêt est de ralentir le cassage afin de le rendre impraticable. L'effet qu'à un sel sur une hash est catastrophique pour un attaquant : elle augmente de manière exponentielle le nombre d'opérations à réaliser lors d'un cassage, puisque les mots candidats devront être hachés autant de fois qu'il y a de hashes, si chaque sel est différent (voir figure 2).

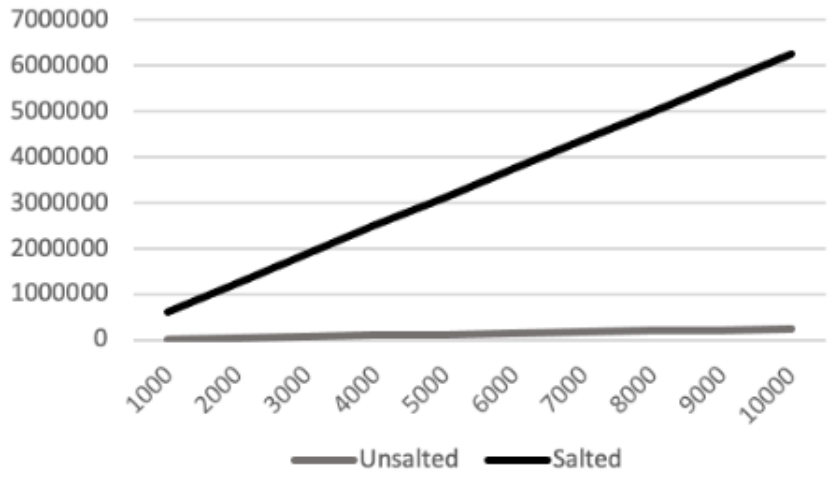


Fig. 2. Comparaison des performances de Hashcat sur différents algorithmes, avec deux configurations différentes. En ordonnées, le nombre de tentatives par seconde (en millions).

En mettant à disposition des utilisateurs des validateurs de mots de passe comme zxcvbn, l'administrateur agit aussi de manière préventive. Même haché avec un algorithme rapide, un mot de passe fort a peu de chance d'être trouvé. À l'inverse, un mot de passe faible, même haché avec un algorithme lent, a plus de chances d'être trouvé. De même, on peut considérer qu'il est de la responsabilité de l'administrateur de recommander – ou au moins d'introduire la notion – aux utilisateurs des phrases de passe.

6 CONCLUSION

Les phrases de passe constituent une méthode d'authentification prometteuse, sous réserve qu'elles soient acceptées par les formulaires, ce qui n'est pas toujours le cas. La priorité est désormais de familiariser le plus grand nombre – ce qui inclus les utilisateurs et les administrateurs – aux notions de base d'entropie, pour en finir avec les politiques de mots de passe comme LUDS qui se révèlent contre-productives sur le terrain. Si les mots de passe des utilisateurs continuent de fuir sur Internet, c'est d'une part parce que ceux-ci ne sont pas assez forts, en dépit des politiques de sécurité mises en place, d'autre part parce que les administrateurs ne font pas le travail nécessaire pour stocker de manière sécurisée leurs mots de passe, laissant les attaquants libres de performer des cassages à très haute fréquence.

La source du problème exposé ici étant le compromis « complexité / mémorabilité » des mots de passe, nous préconisons l'utilisation de phrases de passe générées de manière aléatoire mais respectant les règles de grammaire du français (ou de toute autre langue parlée par les utilisateurs) comme vu au point 2.3.1. Un outil adapté pourra être mis à disposition par l'administration des services en question.

RÉFÉRENCES

[1] Dinei Florencio and Cormac Herley. A large-scale study of web password habits. *16th International World Wide Web Conference, WWW2007*, pages 657–666, 01 2007. doi: 10.1145/1242572.1242661.

[2] Richard Shay, Patrick Gage Kelley, Saranga Kom, Michelle L. Mazurek, Blase Ur, Timothy Vidas, Lujo Bauer, Nicolas Christin, and Lorrie Faith Cranor. Correct horse battery staple: Exploring the usability of system-assigned passphrases," soups. 2012.

[3] J. Yan, A. Blackwell, R. Anderson, and A. Grant. Password memorability and security: empirical results. *IEEE Security Privacy*, 2(5):25–31, 2004. doi: 10.1109/MSP.2004.81.

[4] Emin ̇Islam Tatlı. Cracking more password hashes with patterns. *IEEE Transactions on Infor- mation Forensics and Security*, 10(8):1656–1665, 2015. doi: 10.1109/TIFS.2015.2422259.

[5] Radek Hranický, Lukáš Zobal, Ondˇrej Ryšavý, and Dušan Kolárˇ. Distributed password cracking with boinc and hashcat. *Digital Investigation*, 30:161–172, 2019. ISSN 1742-2876. doi: https://doi.org/10.1016/j.diin.2019.08.001.

[6] Pietro Michiardi and Yves Roudier. Password strength: An empirical analysis. 2010.

[7] Richard J K Shay, Abhilasha Bhargav-Spantzel, and Elisa Bertino. Password policy simula- tion and analysis". 2007.

[8] Daniel Lowe Wheeler. zxcvbn: Low-Budget password strength estimation. pages 157–173, August 2016.

[9] Saranga Kom, Richard Shay, Patrick Gage Kelley, Michelle L. Mazurek, Lujo Bauer, Nicolas Christin, Lorrie Faith Cranor, and Serge Egelman. Of passwords and people: Measuring the effect of password-composition policies.

[10] C. E. Shannon. Prediction and entropy of printed english. *The Bell System Technical Jour- nal*, 30(1):50–64, 1951. doi: 10.1002/j.1538-7305.1951.tb01366.x.

[11] Mark Keith, Benjamin Shao, and Paul Steinbart. A behavioral analysis of passphrase design and effectiveness. *Journal of the Association for Information Systems*, 10:63–89, 02 2009. doi: 10.17705/1jais.00184.

[12] Matt Weir, Sudhir Aggarwal, Breno de Medeiros, and Bill Glodek. Password cracking using probabilistic context-free grammars. pages 391–405, 2009. doi: 10.1109/SP.2009.8.

[13] Christopher D. Manning. Part-of-speech tagging from 97 % to 100%: Is it time for some linguistics?

[14] Ashwini Rao, Birendra Jha, and Gananand Kini. Effect of grammar on security of long pass- words. *CODASPY 2013 - Proceedings of the 3rd ACM Conference on Data and Application Security and Privacy*, pages 317–324, 02 2013. doi: 10.1145/2435349.2435395.

[15] Philip Inglesant and M Angela Sasse. The true cost of unusable password policies: pass- word use in the wild. 2010.

[16] Mark Keith, Benjamin Shao, and Paul John Steinbart. The usability of passphrases for authentication: An empirical field study. *International Journal of Human-Computer Stud- ies*, 65(1):17–28, 2007. ISSN 1071-5819. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2006.08.005. Information security in the knowledge economy.

Contact principal : Antoine Tréfeu

Coordonnées

antoine.trefeu@viacesi.fr

THE ROLE OF PROJECT MANAGERS EXPERIENCE IN SUCCESS OF INNOVATIVE COMPLEX PROJECT

Maliheh Vaez-Alaei[1, 2], Ioana Deniaud[1], François Marmier[3], Robin Cowan[1, 4], Didier Gourc[2]
[1] BETA, CNRS UMR 7522, Strasbourg University, Strasbourg, France
[2] IMT Mines Albi, Industrial Engineering Center, Toulouse University, Albi, France
[3] ICube, UMR 7357, Strasbourg University, Strasbourg, France
[4] UNU-MERIT, Maastricht University, Maastricht, Netherlands

Abstract: The most appealing concept in the project management literature is ``success''. However, achieving this success in projects comes with many challenges. Particularly in innovative complex projects managed with strategic alliances. Because in addition to the challenges and inherent uncertainties of the project, the risk of non-cooperation between the partners is inevitable. Moreover, work experience is a key noticeable productivity characteristic in project management. The purpose of this research is to take a deeper look into the success of complex projects, focusing on the role of project managers' experience in their opinion on some of the factors influencing the success of complex projects. A standard survey is designed and used to gather data from European project managers involved in complex projects with more than one partner. Then, the gathered data is used to perform Spearman's correlation coefficient analysis to investigate, first, the role of project managers' work experience on the project success, and second, the role of project managers' work experience on their perception of project success factors. Finally, we try to provide suggestions for less experienced project managers and decision-makers to increase the chance of success in strategic alliances.

Keywords: Project success, complexity, partnership, project managers, experience

1 INTRODUCTION

Work experience is a key noticeable productivity characteristic in project management. Since a lot of managers' learning occurs on the job, this informal learning on their job is of major importance in the development of managers in complex careers who have to deal with new and unanticipated challenges in the environment [1, 2]. Due to various reasons, this might mainly be verifiable for project managers, who often seem to ``learn by doing'' from their work experiences, rather than learn by their education. For instance, most project managers perform their project responsibilities besides another job; a more permanent career for which they have been educated. Moreover, even if being a project manager is their primary job, most project managers did not set out to work towards this role when they first entered the job market, but have been promoted at a later stage in their career [1]. Hence, past events play an important role in determining current strategic decisions. The influence of work experience on decision-makers' opinions has received a lot of attention, particularly within the domain of risky decision-making and financial markets [3, 4]. Considerable empirical studies found a connection between experience and improvement over time (i.e., learning-by-doing) through a wide variety of domain [5 - 8]. As time goes by, individuals' judgment and performance in their activity do not remain the same, because they are aging, and because they are gaining experience. The experience itself can be modified because of increased age since individuals gain a kind of self-knowledge, a more or less aware evaluation of their own evolving capacities, and faced working situations [9].

In this paper, we examine the correlation between project managers' work experience and their opinion about the success of a complex project conducted with partnerships. The objectives of this paper are: first to analyze the relationship between project managers' experience and success in their project. Second, to analyze if the experience of project managers has an influence on their judgment

about six dimensions of project success (cost, time, quality, reputation, team satisfaction, and stakeholder satisfaction). Third, to investigate the relationship between project managers' experience and their judgment about critical variables in complex project success. In particular, to investigate if the work experience of project managers will change their opinion about the importance of knowledge criteria between partners, complexity dimensions, trust, and project innovation. Finally, to provide some practical and academic implications in this domain.

2 THEORETICAL BACKGROUND

Research suggests that prior experience plays a significant role in learning and is an important noticeable characteristic of human performance. A growing number of learning-by-doing research investigates the role of multiple measurements of experience in work in different domains and organizations [10]. Such studies have provided empirical proof that various types of experience come up with different contributions to work performance (i.e. individual experience, organizational experience, team leader experience ...) [7].

Multiple research investigates the role of experience in the context of managers and projects. For instance, Buckenmaier et al. [11] examined the influence of positive and negative experiences on trust and cooperation. Their results revealed that the effect of prior experience depends on the similarity of tasks. Easton et al. [7] analyzed the role of individual experience, team leader experience, organizational experience, and experience of working together. They have used archived data generated by successful and unsuccessful six sigma improvement projects. The analysis showed that the most significant relationship is the positive effect of team leader experience on project success. In addition, the effect of organizational experience is positive on project success. However, they could not find any significant relationship between individual experience or team familiarity and project success.

Moreover, Matemilola et al. [12] applied trade-off theory to examine the managerial experience of top-level management as a determinant of capital structure. Their result revealed that top managers' experience could maximize the benefits and increase firm value, and the international work experience of decision-makers significantly contributes to better differentiation between the business models that they pursue.

Based on the above theoretical background and related studies, the current paper examines the relationship between project managers' work experience and complex project success and also the relationship between project managers' experience and their judgment about important factors influencing project success. To do so, project success dimensions has been considered. According to a comprehensive study by [13]; cost, time, and quality factors in the iron triangle which are objective and tangible can be considered as ``hard'' dimensions, but there are also ``soft'' dimensions which are subjective, intangible, and hard to evaluate, such as project reputation and beneficiary satisfaction. Customer satisfaction, stakeholder satisfaction, project reputation in its domain, and many other factors have been introduced by recent researchers as highlighting the critical role of human factors in project performance [14, 15].

Accordingly, considering the above arguments and the logical effect of project managers' experience on complex project success, the following hypothesis is proposed:

Hypothesis. The project managers' experience has a positive effect on complex project success.

In addition, as mentioned before, this study is a part of a larger study looking at a hypothesized conceptual model to investigate the relationship between different variables in complex projects. Our previous study revealed that based on the data we gathered from project managers, project innovation and coverage of knowledge have a significant positive direct effect on complex project success. In addition, technological complexity, organizational complexity, relational trust, trust capability, similarity, and complementarity have a significant indirect effect on complex project success. The previous study findings were based on the actual experience of project managers on their last project.

3 RESEARCH QUESTIONS

This paper is aimed at investigating the role of project managers' work experience on their opinion about project success factors. The following research questions guided this study:

1. Are projects managed by experienced managers more successful?
2. Considering the six dimensions of measuring project success (cost, time, quality, reputation, team satisfaction and stakeholder satisfaction), what is the impact of experience on project managers' opinion about the importance of each dimension?
3. Does project managers' work experience have an impact on their judgment about the importance of different variables (knowledge criteria between partners, complexity dimensions, trust and project innovation)?

We believe that answering the above questions can help especially less experienced project managers in their tough decisions regarding complex projects.

4 MATERIALS AND METHODS

A survey was created out of concepts that are drawn from the comprehensive literature review. Spearman rank-order correlation coefficient (Spearman's correlation, for short) was used in this paper to verify the mentioned relationships [16]. The importance of the characteristic of innovative complex projects and participants in these projects, in addition to the work experience of the respondents of the survey, are the units of our analysis. Moreover, the project managers who at least have participated in managing one innovative complex project with more than one partner are the unit of our observation.

4.1. Survey design and data collection

In order to examine the correlation between project managers' experience and their judgment on project success factors, a research survey was designed and adopted from \cite{wang2019relationship} to collect data from innovative project managers. The survey was first designed, then validated by expert opinion in project management and innovation, and finally pre-tested with a small sample before sending it to the final respondents.

The final survey[1] includes 43 questions categorized into 11 groups, out of which six questions belonged to Complex Project Success (CPS), four questions belonged to Project Innovation (PI), four questions belonged to Technological Complexity (TC), five questions belonged to Organizational Complexity (OC), four questions belonged to Social Complexity (SC), four questions belonged to Similarity (Sim), four questions belonged to Complementarity (Com), four questions belonged to Coverage (Cov), four questions belonged to Relational Trust (RT) and four questions belonged to Competence-Based Trust (CBT).

An ordinal scale is used in order to measure the degree of importance (High importance, medium importance, Low importance, Neutral or Undecided). Furthermore, to validate the questions in the survey, first, the expert opinion was taken into account, and second, a pilot test round was conducted with a small sample of 15 volunteers among colleagues. Some minor modifications were made to the survey to be reliable and valid for data collection. Figure 1 shows the first question in the survey as an example. To obtain the work experience of respondents, we asked them to choose between the work experience years interval as it is shown in Figure 2.

The data collection tool was a web survey, developed with the use of the ``SurveyMonkey'' website. It was addressed to the response of project managers mostly from European projects. First, we have selected European project managers from the ANR website and the survey link has been sent to them by email. Then we asked the receptions of email to send the survey to their related network, so it is not possible to know the exact response rate, but we estimate less than 10%. Finally, the total number of valid responses to the survey is 172 complete responses.

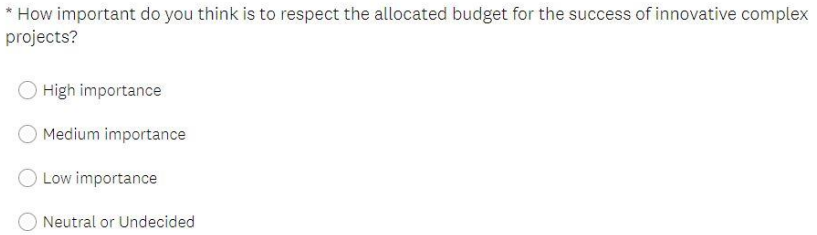


Figure 1. An example of questions related to the project managers opinion (degree of importance for respect the allocated budget)

[1] Survey is accessible in the following link: \url{https://www.surveymonkey.com/r/X6WMSPV

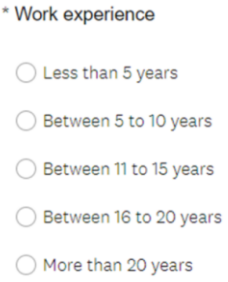


Figure 2. Work experience question in the survey

5 DATA ANALYSIS

As explained in the last section, Spearman's correlation is performed in this paper. The Spearman rank correlation coefficient (Spearman ρ) is a non-parametric measurement correlation. It is used to determine the relationship existing between two sets of data [16, 17]. This test is used for both ordinal variables and continuous data unlike the necessary assumptions for conducting the Pearson's product-moment correlation [18]. Accordingly, Spearman's correlation is the best statistical correlation method for this study. However, it is essential to apply prior data analysis tests to ensure the quality, reliability, and validity of the data.

In this study, we use SPSS 28.0 software to analyze the collected data including reliability analysis, validity analysis, and correlation analysis.

5.1. Validation of the collected data

Reliability in statistics refers to the overall consistency of a measure which means the integrity and consistency of the data [19]. This study chooses the most frequently used method that is Cronbach's Alpha testing to test the overall reliability of the statistics. In reliability tests, the total value of Cronbach's alpha for all 43 questions is 89.4%, which is admissible since the minimum acceptable number is 70% [20]. According to [21], for the factors that are measured with less than 10 questions, Cronbach's alpha above 0.5 is acceptable. Accordingly, the reliability test approves the reliability of all factors.

Validity in statistics refers to examining how a measure corresponds accurately to the real world. To test the validity of the collected data, it is most common to check if there is a significant difference between the responses of respondents [22]. To do so, an independent t-test is applied using the first 50 and last 50 responses to compare if there is any significant difference between the means of answering of these two groups. The results of these analyses have shown that there is no significant difference in 0.05 level[2] (all the p-values are above 0.05) between the means of the two groups. Hence, based on these findings, it is concluded that the collected data is reliable and validated.

5.2. Hypothesis assessment

In order to analyze the relationship in the hypothesis, bootstrapping is used and performed by SmartPLS version 3 [23]. Table 1 shows the result of this analysis. According to the result, increasing the work experience of project managers will increase complex project success.

Table 1. Path coefficients between work experience and complex project success

Path	β-value	ρ-value
Project managers' work experience ⇒ Complex project success	**0.320**	**0.001*****

Note: $^{***}P < 0.01$

Considering the significant positive effect of project managers' experience on the success of complex projects. In the following subsection, we investigate how this experience changes their opinion about different factors in the project.

[2] 95% confidence interval

5.3. Correlation analysis between variables

5.3.1. Project success measurement dimensions

To analyze the relationship between project managers' work experience and their judgment about the importance of project success dimensions, we proceeded to the analysis of the correlation. Since each item was evaluated with ordinal variables, Spearman's correlation coefficient was used to evaluate the relationships between single items from each variable.

Table 2 shows the correlation matrix between the work experience and the importance of each project's success dimension. The bolded values show a significant correlation. According to this result, by having more experience, project managers think that ``meeting organizational objectives, project team satisfaction, and stakeholder satisfaction'' are more important. In addition, these result shows that by having more experience, there is no significant difference in project managers' opinion about the importance of ``respecting allocated budget, achieving objectives on time and having a positive national impact''.

Table 2. Correlation between work experience and their judgement about project success dimensions

		CPS_1	CPS_2	CPS_3	CPS_4	CPS_5	CPS_6
WE	Spearman's Correlation	-0.090	**0.193****	0.070	0.068	**0.163****	**0.179****
	Sig. (2-tailed)	0.241	**0.011**	0.364	0.373	**0.033**	**0.019**

Note 1: $^{**}P < 0.05$
Note 2: WE = Work Experience

5.3.2. Factors influencing project success

In this paper, other factors influencing the project's success is also considered to analyze if project managers' opinion will change about them by having more work experience. These factors are project innovation, technological complexity, organizational complexity, social complexity, similarity, complementarity, coverage, relational trust, and competence-based trust. To do so, Partial Least Square (PLS) method is applied to identify the significant relationships between project managers' work experience and the factors affecting the project success [24].

Table 3 shows the result of the bootstrap in PLS to test the significance of estimated path coefficients in PLS. According to the result, increasing the work experience of project managers will increase the importance of coverage, relational trust, and competence-based trust in their opinion. Therefore, more experienced project managers think that trust and knowledge coverage plays an important role in project success. In addition, these result shows that by having more experience, there is no significant difference in project managers' opinion about other factors (project innovation, technological complexity, organizational complexity, social complexity, similarity, and complementarity).

Table 3. Path coefficients between work experience and judgment about importance of factors related to project success

Path	β-value	ρ-value
Work experience ⇒ Project innovation	0.141	0.344
Work experience ⇒ Technological complexity	0.027	0.453
Work experience ⇒ Organizational complexity	0.167	0.376
Work experience ⇒ Social complexity	0.006	0.343
Work experience ⇒ Similarity	0.034	0.610
Work experience ⇒ Complementarity	0.150	0.228
Work experience ⇒ Coverage	**0.339**	**0.000*****
Work experience ⇒ Relational trust	**0.254**	**0.006*****
Work experience ⇒ Competence-based trust	**0.334**	**0.000*****

Note: $^{***}P < 0.01$

6 CONCLUSION

In this paper, first, we analyzed the relationship between the project managers' work experience and complex project success, and then the effect of project managers' work experience on their judgment about the importance of variables in innovative complex projects.

For the analysis of this paper, we used the data gathered from a validated survey filled by project managers who were at least involved with one complex project with more than one partner. In the first part of the survey, we asked the project managers about the success of their previous projects (based on six dimensions of project success). To examine the effect of project managers' work experience on project success, we analyzed the data to see if we can find any significant effect. The result shows the significant positive effect of project managers' work experience on the success of their projects. Hence, the project that was managed by more experienced managers was more successful.

In the second part of the survey, we asked the respondents to indicate the importance of each factor in the success of the project. Furthermore, the reliability and validity of the data are checked. To examine the effect of work experience on project managers' opinions, we used Spearman's correlation analysis to check if there is any significant correlation between the work experience of respondents and their opinion about the importance of different variables.

This analysis is applied in three steps: To begin with, we performed Spearman's correlation analysis between work experience and project success in six measurement dimensions. The result of this analysis shows that increasing the work experience of project managers affects their judgment by increasing the importance level of meeting organizational objectives, team satisfaction, and stakeholders' satisfaction. Based on this analysis, there is no significant correlation between work experience and the importance of other dimensions of project success measurement (respecting allocated budget, achieving objectives on time, and having a positive national impact).

In addition, we examined the relationship between work experience and respondents' judgment about the importance of different variables in project success (Project innovation, technological complexity, organizational complexity, social complexity, relational trust, competence-based trust, similarity, complementarity, and coverage). The result of this analysis shows a significant positive relationship between the work experience of project managers and their opinion about the importance of knowledge coverage and both type of trust between partners in the project.

REFERENCES

[1] C.M. Savelsbergh, L.A. Havermans, P. Storm, “Development paths of project managers: What and how do project managers learn from their experiences?” International Journal of Project Management 34, 559–569, 2016.

[2] M. Eraut, “Informal learning in the workplace.” Studies in Continuing Education 26, 247–273, 2004

[3] C. Bartelink, E.J. Knorth, M.L. López, C. Koopmans, J. Ingrid, C.L Witteman, T.A. van Yperen, “Reasons for placement decisions in a case of suspected child abuse: The role of reasoning, work experience and attitudes in decision-making.” Child abuse & neglect 83, 129–141. 2018.

[4] R. Thaler, “Toward a positive theory of consumer choice.” Journal of Economic Behavior & Organization 1, 39–60, 1980.

[5] M. Lapre, L. Van Wassenhove, “Creating and transferring knowledge for productivity improvement in factories.” Management Science 47, 1311–1325, 2001.

[6] P. Thompson, Chapter 10 – “learning by doing”, in: Hall, B.H., Rosenberg, N. (Eds.), Handbook of The Economics of Innovation, Vol. 1. North-Holland. volume 1 of Handbook of the Economics of Innovation, pp. 429–476, 2010.

[7] G.S. Easton, E.D. Rosenzweig, “The role of experience in six sigma project success: An empirical analysis of improvement projects.” Journal of Operations Management 30, 481–493, 2012.

[8] J. Child, L. Hsieh, S. Elbanna, J. Karmowska, S. Marinova, P. Puthusserry, T. Tsai, R. Narooz, and Y. Zhang, “Sme international business models: The role of context and experience,” Journal of World Business, vol. 52, no. 5, pp. 664–679, 2017.

[9] V. Pueyo, C. Toupin, and S. Volkoff, “The role of experience in night work: Lessons from two ergonomic studies,” Applied Ergonomics, vol. 42, no. 2, pp. 251–255, 2011.

[10] S.G. Cohen, D.E. Bailey, “What makes teams work: Group effectiveness research from the shop floor to the executive suite.” Journal of Management 23, 239–290, 1997.

[11] J. Buckenmaier, E. Dimant, “The experience is (not) everything: Sequential outcomes and social decision-making.” Economics Letters , 109916, 2021.

[12] B. Matemilola, A. Bany-Ariffin, W. Azman-Saini, A.M. Nassir, “Does top managers’

experience affect firms' capital structure?" Research in International Business and Finance 45, 488–498, 2018.
[13] D. Baccarini, "The logical framework method for defining project success." Project management journal 30, 25–32, 1999.
[14] M. Gunduz, A.M.A Yahya, Analysis of project success factors in construction industry. Technological and Economic Development of Economy 24, 67–80, 2018.
[15] C. Unterhitzenberger, D.J. Bryde, "Organizational justice, project performance, and the mediating effects of key success factors." Project Management Journal 50, 57–70, 2019.
[16] D. Wayne W, Ed., Spearman Rank Correlation Coefficient. New York, NY: Springer New York, pp. 502–505, 2008.
[17] M. Baak, R. Koopman, H. Snoek, S. Klous, "A new correlation coefficient between categorical, ordinal and interval variables with pearson characteristics." Computational Statistics & Data Analysis 152, 107043, 2020.
[18] J.H. Zar, Spearman Rank Correlation: Overview. American Cancer Society, 2014.
[19] D.G. Bonett, T.A. Wright, "Cronbach's alpha reliability: Interval estimation, hypothesis testing, and sample size planning." Journal of organizational behavior 36, 3–15, 2015.
[20] J.R.A. Santos, "Cronbach's alpha: A tool for assessing the reliability of scales." Journal of extension 37, 1–5, 1999.
[21] J. Pallant, Spss survival manual: Mcgraw-hill education (uk), 2013.
[22] J.S. Armstrong, T.S. Overton, "Estimating nonresponse bias in mail surveys." Journal of marketing research 14, 396–402, 1977.
[23] P. Hall, S.R. Wilson, "Two guidelines for bootstrap hypothesis testing." Biometrics, 757–762, 1991.
[24] J.F. Hair Jr, G.T.M. Hult, C. Ringle, M. Sarstedt, "A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)." Sage publications, 2016.

Contact principal : Maliheh Vaez-Alaei

Coordonnées : vaezalaei@unistra.fr

IMPROVEMENT OF COLD SPRAY NOZZLE FOR AN OPTIMISED DEPOSITION EFFECIENCY

ZAIM-MOUNAJED Wassim[1], RAOELISON Rija Nirina[2], ZHANG Teng[1], PADAYODI Essolé[1], KHANDAR Shantan[2], VASHISHTHA Ashish[3], CALLAGHAN Dean[4], NOLAN Cathal[3], RAGHAVENDRA Ramesh[5], SAGOT Jean-Claude[1].

[1] Pôle ERCOS, ELLIADD (EA. 4661) – University of de Bourgogne Franche Comté, University of Technology of Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort, France.
[2] ICB, UMR 6303 CNRS, University of Bourgogne Franche Comté, University of Technology of Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort, France.
[3]Department of Aerospace & Mechanical Engineering, Institute of Technology Carlow, R93 V960, Ireland.
[4]The Centre for Research and Enterprise in Engineering (engCORE), Institute of Technology Carlow, R93 V960, Ireland.
[5]SEAM Research Centre, Department of Engineering Technology, Waterford Institute of Technology, Waterford, X91 TX03, Ireland.

The Cold Spray (CS) referred to as supersonic particle deposition. This process creates mechanical parts by a controlled powder metallic deposit. Despite its many advantages, this process is limited by deposit yields. The objective of the study is to improve the design of injection nozzle in order to get a high efficiency due to the high speed at the exit. For this purpose, the shape of the nozzle is defined to reach the supersonic velocity at the exit of the nozzle by reaching the speed of sound at its throat. Therefore, a CFD simulation on three types of nozzles with different geometric specifications is carried out in order to find the optimal design of an efficient cold spray nozzle. A provided state of art study is carried out to identify the most optimized models that will be compared with the developed CFD model.

Many parameters are analyzed, which are the gas velocity in the nozzle throat, the deviation of the axis of the gas flow and the axis of nozzle exit, the Mach number, the turbulence of the gas flow in relation to the nozzle geometry, the outlet gas pressure, etc.

Keywords: CFD simulation, nozzle, cold spray, sonic velocity, Mach number

Nomenclature

Abbreviation

CS	Cold Spray
AM	Additive Manufacturing
CD	Converging-Diverging
CFD	Computational Fluid Dynamics

Symbols

ε	Section area ratio between the nozzle throat and exit
A_e and A_t	Section area of nozzle exit and nozzle throat respectively
A	Section area at specific point in the nozzle
M	Mach number at specific point in the nozzle
γ	Ratio of gas specific heat
C_p	Specific heat of gas constant pressure
C_v	Specific heat of gas constant volume
T_0	Temperature at the inlet of the nozzle
T	Temperature at specific point of the nozzle
P_0	Pressure at the inlet of the nozzle
P	Pressure at specific point of the nozzle
L_d	Length of the diverging part of the nozzle
R_e	Radius of the nozzle exit
R_t	Radius of the nozzle throat
R_{ecl}	Radius of cowl lip
R_b	Radius of base
α	Diverging angle of conical nozzle
θ_e	Angle created at nozzle exit (end of parabola curve)
θ_n	Angle created at nozzle throat (begin of parabola curve)
υ	Prandtl-Meyer function
ρ	Density
ϑ_x and ϑ_r	Axial velocity and Radial velocity respectively
x and r	Axial coordinate and Radial coordinate respectively
μ	Dynamic viscosity
μ_t	Eddy viscosity
$(\tau_{ij})_{eff}$	Deviatoric stress tensor
u	Fluid flow velocity
E	Total energy
K_T	Thermal conductivity
k	Turbulence kinetic energy
ϵ	Dissipation rate
σ_k and σ_ϵ	Turbulence Prandtl number for k and ϵ respectively
G_k	generation of turbulence kinetic energy due to mean velocity gradients
G_b	Generation of turbulence kinetic energy due to buoyancy
Y_M	Contribution of the fluctuation dilatation turbulence to the overall dissipation rate
C_μ, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, and $C_{3\epsilon}$	Constan

1 INTRODUCTION

Cold Spray (CS) is a coating deposition method that has been developed in 20th century. This technique has experimented with vast improvement and development lately to be considered as a new additive manufacturing (AM) technique. The coating process in CS has the ability to deposit coating without having any change in chemical composition that give tremendous flexibility to create the coating composition, in addition to the benefit of the great process economy, and the short production time [1]–[3].

CS is a solid-state process, by which the material layers are added on the substrates due to the acceleration of the feedstock material in the form of micron-sized powder (5–112 mm). The acceleration of gas will reach supersonic speed by using a converging–diverging (CD) nozzle [4]. The convergent-divergent nozzle work by taking higher pressure gas than the atmospheric pressure and turn it into a high velocity flow in a specific direction. A converging nozzle is used to increase the velocity of the gas to reach the speed of sound at the smallest area called throat. then the velocity increases in the divergent part of the nozzle provide the flow to reach the supersonic speed. the flow in the nozzle is isentropic, meaning there is no change of entropy except at the phase of the shock waves that is caused by the difference in pressure inside or at the exit of the divergent nozzle and the atmosphere pressure. However, the CD nozzle may develop a diamond pattern occurs at the exit which results from the expansion and compression waves [5]. However, when the speed is less than the speed of sound, the density remains constant and once the flow velocity approaches the speed of sound, the flow begins to become a compressible flow.

This paper focus on the optimization of the gas flow in the cold spray nozzle by studying different types of nozzles in order to find the better performance by using the CFD software to simulate the flow velocity and temperature.

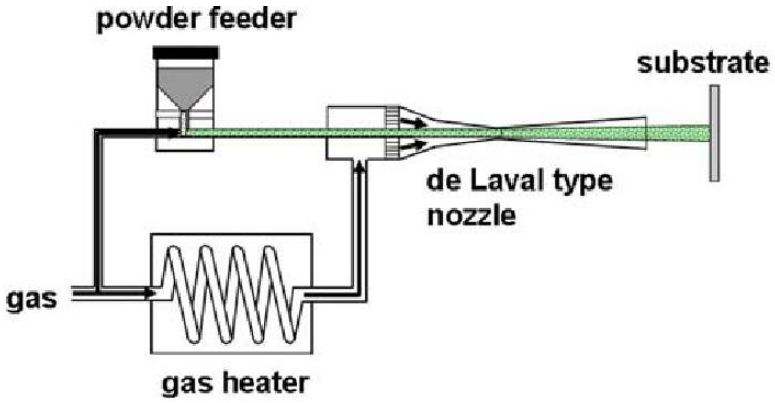


Figure 1. Schematic of CD Nozzle [6]

2 SIMULATION AND EXPERIMENTATION

2.1. Nozzle Types

The CS nozzle has the same concept as the rocket nozzle, where both of them aim to produce a supersonic velocity at the exit of the nozzle. As part of the optimization, it is important to study all types of nozzles that used in rocket nozzle for CS in order to find the most satisfying result. Here are the types of rocket nozzle:

a. Conical nozzle

This type of nozzle is already used for the CS nozzle. It is a simple and basic type of nozzle where its length depends on the divergence angle (α) as shown in the figure 2. A smaller divergence angle (α) produces greater axial thrust because they maximize the axial component of the exhaust exit velocity, producing a high specific impulse in the process. However, this results in longer and heavier diverging nozzle sections.

b. Bell nozzle

The bell nozzle is also used for the CS as a single bell but there is also the dual bell that's not used yet for the CS due to its functionality that's not required for the CS. Where the CS has only one attitude. The bell nozzle diverges at a relatively large angle (θ_n) near the throat and narrow further downstream. At the section near the nozzle exit, the divergence angle (θ_e) is very small, almost parallel to the jet-axis. This configuration allows maximization of performance while minimizing the weight compared to the conical.

c. Annular nozzle

This type of nozzle hasn't yet used for the CS. It consists of two types of the radial outflow nozzle (expansion deflection nozzle) and the radial inflow nozzle (aerospike).

- The radial outflow nozzle functions like the bell nozzle, and the flow is deflected by a central body (plug) which directs the gases away from the center of the nozzle and remains attached to the wall as shown in the figure 4. the flow is wedged between the wall and the central body, thus increasing the pressure. Due to the center body it's not feasible for the CS application because it will be difficult to throw the powder.
- The radial inflow nozzle has the same concept as the radial outflow nozzle that all expansion occurs internally. it allows the exhaust gases to expand by an isentropic. If the pointed tip is removed and replaced with a flat base as shown in the figure 5, it is called a truncated spike. The annular nozzle is smaller than the bell nozzle and gives better performance. It is feasible for CS application as the flow is directed in the center.

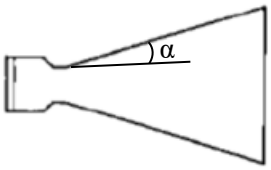


Figure 2. Conical Nozzle [7]

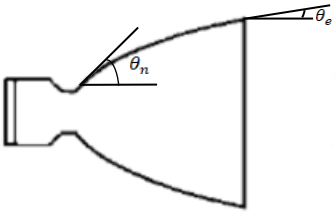


Figure 3. Bell Nozzle [7]

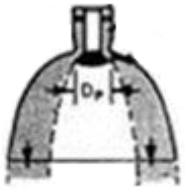


Figure 4. Radial Outflow Nozzle Shape [8]

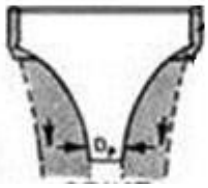


Figure 5. Radial inflow Nozzle [8]

2.2. Shock Waves

There is 2 type of shock waves that can be obtained when the atmospheric pressure is raised above the value against which the nozzle is designed to discharge, oblique or normal shock waves,

- Normal shock waves: this shock wave is perpendicular to the incoming supersonic flow and has very small regions in the gas where the properties of the gas change dramatically (the static pressure, temperature and density of the gas increase almost instantaneously and the Mach number and velocity of the flux also decrease instantaneously from supersonic to subsonic) equations are derived from conservation of mass, momentum and energy.
- Oblique shock waves: this shock wave is tilted the properties of the gas also change (the static pressure, temperature and density of the gas increase and the Mach number and velocity of the flow decrease) The equations are derived from the conservation of mass, of momentum and energy for a compressible gas while ignoring viscous effects For the Mach number change during an oblique impact there are two possible solutions one supersonic "weak shock" and one subsonic "strong shock", which develop a diamond pattern.

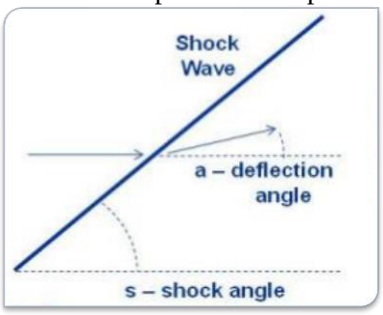


Figure 6. Shock Wave Angle [9]

2.3. Cooling Cycle

CS nozzle get high temperature due to the high velocity with respect to the decreasing of surface area where the throat has the highest temperature because it has the smallest surface area which can make some type of powder sting on the wall of the nozzle in order to solve this problem, the cooling cycle for the rocket is the significant solution due to its needs for the cooling cycle because the temperature in the rocket can melt any type of material. Therefore, some of the methods that are used for the rocket nozzle and can be apply for CS nozzle are, firstly the Ablative cooling, used by SpaceX's Merlin 1A®, this method is one of the simplest and most effective ways for cooling system as it uses a material that will vaporize and then be discarded, taking the heat with it. This is usually made from carbon composite which has an extremely high melting point. But there are some limitations as the material will vaporize and cannot be reused. And secondly the Regenerative cooling, used by Starship SN8, this method has a cooling channel in the nozzle wall and then uses a copper or nickel alloy as the inner wall of the chamber to transfer the heat from the wall into the coolant. the liquid fuel passes through the walls and the nozzle of the combustion chamber before reaching the injectors. Three types of liquid fuel can be used : RP 1, liquid methane and liquid hydrogen.

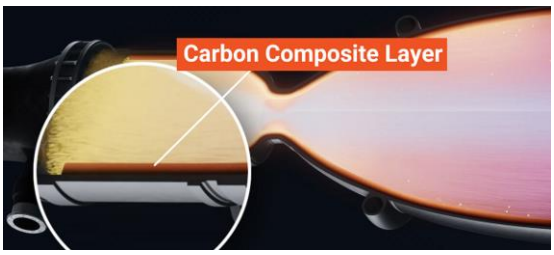


Figure 7. Carbon composite Layer [10]

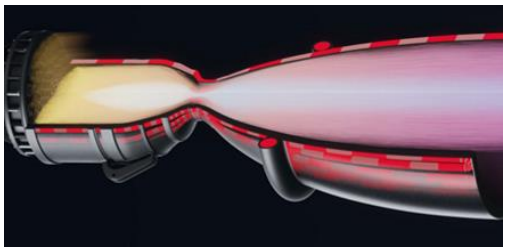


Figure 8. Regenerative Cooling Channel [10]

2.4. NOZZLE OPERATION

The nozzle operation depends on the ratio of the pressure at specific point and the ambient pressure (called pressure ratio) as shown in figure 9. Depending on the pressure ratio along the nozzle, different regimes can be distinguished.

For regimes (a) & (b) the pressure difference at the throat is not sufficient in order to get the speed of sound at the throat, which remained the speed of flow as subsonic thus can be solved by increasing the inlet pressure or decreasing the aera ratio between the inlet and the throat while for regime (c), (d), (e), (f), and (g), the pressure difference at the throat is sufficient in order to get the speed of sound at the throat, but in the diverging zone for regime (c) & (d) the flow reaches the supersonic speed until the normal shock waves appears due to the difference of pressure between a specific point and the ambient pressure that result in an instant drop of the speed to a subsonic speed thus can be solves by decreasing of diverging length, increasing the pressure inlet or by decreasing the area ratio between the throat and the exit.

For regime (e), (f), and (g) the flow leaves the nozzle at supersonic speed, for regime (e), this is the over-expansion phase as shown in figure 10; at the exit of the nozzle there is an oblique shock wave which decreases the speed because of the exit pressure is lower than the ambient pressure. For regime (f), it is the ideal phase as shown in figure 11; the exit pressure is equal to the ambient pressure. For regime (g), it is the under-expansion phase as shown in figure 12; at the exit of the nozzle there is an expansion oblique shock wave because of the pressure at the exit w is greater than the ambient pressure.

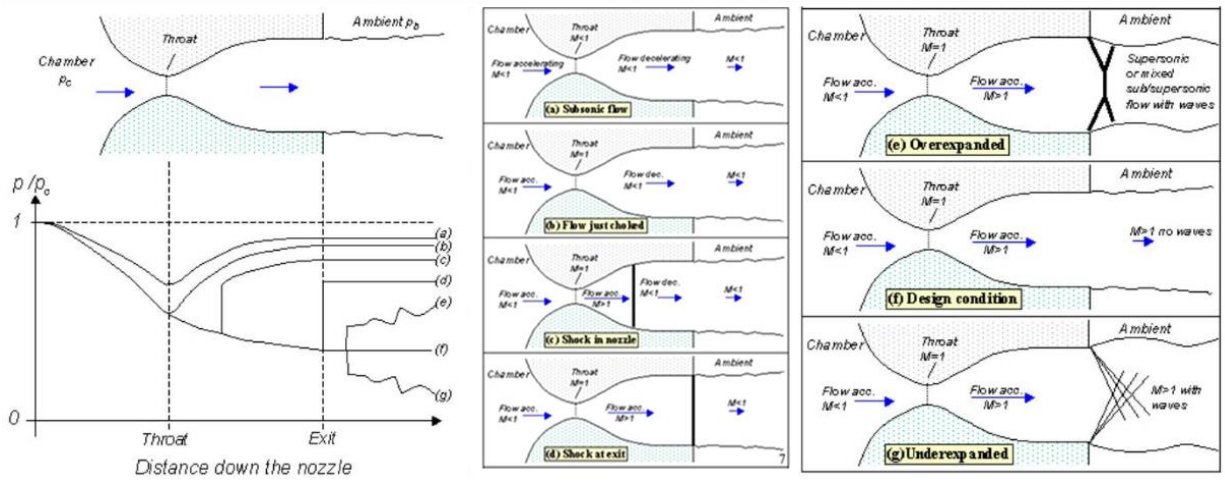


Figure 9. Operation of CD Nozzle with Different Pressure Ratio [11]

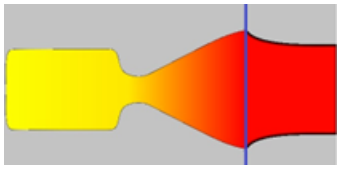


Figure 10. Over-Expanded Flow [12]

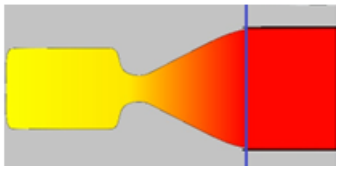


Figure 11. Ideal Expanded Flow [12]

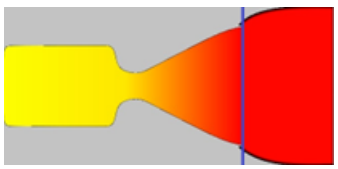


Figure 12. Under-expanded Flow [12]

2.5. Design Modular

To design a CS nozzle, it is important to study the area ratio in order to meet the requirements to reach the supersonic speed at the exit of the nozzle[13]. Considering the gas flow is isentropic the aera ratio is given by Eq. 2:

$$\varepsilon = \frac{A_e}{A_t} \tag{1}$$

Where ε is the area ratio between the nozzle throat and exit, Ae and At are the areas of the nozzle exit and throat.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{M_1}{M_2}\left[\frac{1+\left[{}^{(\gamma-1)}/_{2}\right]*M_1{}^2}{1+\left[{}^{(\gamma-1)}/_{2}\right]*M_1{}^2}\right]^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma+1)}} \tag{2}$$

Where A is the section area, M is the Mach number, and γ is the ratio of gas specific heat equal to $\{{}^{C_p}/_{C_v}\}$

At the initial point the flow is subsonic and initial (stagnation) values of pressure and temperature are assigned at the converging section of the nozzle[13]. The Mach number is then iteratively increased, while gas characteristics are calculated for each point through the isentropic relationships of Eqns. 3. and 4.

$$\frac{T_0}{T} = \left[{}^{(\gamma-1)}/_{2}\right] * M^2 \tag{3}$$

$$\frac{P_0}{P} = \left[\left[{}^{(\gamma-1)}/_{2}\right] * M^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{4}$$

Where T_0 is the temperature inlet, T is the temperature at a specific point, P_0 is the pressure inlet, and P is the pressure at a specific point.

The 3 types of the CD nozzle have different shapes, the conical nozzle is a simple cone contour as shown in figure 13, where The calculation is formed from the angle of diverging α (usually in interval 8 up 30°) and from the surface area at exit Ae. These two parameters are sufficient to a calculation of the length of the diverging section of de Laval nozzle.

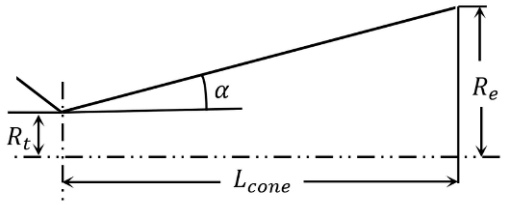


Figure 13. Conical Nozzle Design Feature and Variables [14]

$$L_d = \frac{(R_e - R_t)}{\tan\alpha} \tag{5}$$

Where L is the length of diverging section, R_e is the radius at the nozzle exit, R_t is the radius at the nozzle throat, and α is the diverging angle.

The bell nozzle is a parabolic based nozzle where The slope of the parabolic curve is tangent to the inflection point from which the parabolic diverging section begins (θn). At the throat, the radius of the circular converging section is 1.5 times the throat radius, another circle of radius 0.382 times the throat radius is designed at the diverging section as shown is the figure 14. The angle created at the end of the nozzle is termed as nozzle exit (θe) [15].

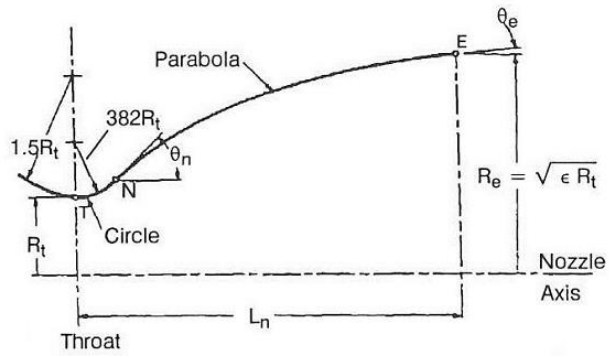


Figure 14. Bell Nozzle Design Feature and Variables [16]

The last type is the aerospike nozzle, the design of spike contour is the most critical measure in the overall design of the nozzle as shown in figure 15, which changes according to the operating conditions and application. However, the design of spike can be done using the following methods: Rao's method based on calculus of variation, Simple approximate method, and B-Spline Method.
The simple approximate is chosen to design the spike contour assumes a series of centred isentropic expansion waves occurring at cowl lip of the spike nozzle [17].

$$\theta t = \upsilon * Me \tag{6}$$

where θt is throat angle, υ is the Prandtl-Meyer function, Me is the Mach number

$$\upsilon = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} * \arctan\left(\sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}} * (M^2-1)\right) - \arctan(M^2-1) \tag{7}$$

Where γ is the ratio of specific heat

$$A_t = \frac{\pi(R_{ecl}^2 - R_b^2)}{\cos\theta_e} \tag{8}$$

$$A_e = \pi(R_{ecl}^2 - R_b^2) \tag{9}$$

Where R_{ecl} is the radius of cowl lip, R_t is the radius of the throat, and R_b is the radius of base, Ae and At are area at the exit and throat, and θe is lip angle

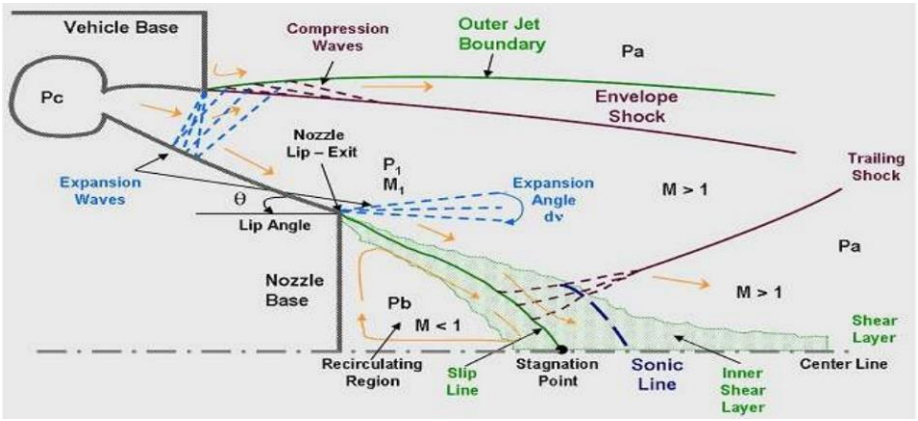


Figure 15. Aerospike Nozzle Design Feature and Variables [17]

2.6. COMPUTATIONAL METHOD

All types of nozzles were simulated by using ASNSYS Fluent on a 2D space with a double precision. The analysis is performed as a steady-state condition and the courant number was initially set as 0,1. The Navier-Stokes is set as density-based; the air density is set as an ideal-gas and the viscous of a standard K-epsilon model with the enable of the compressibility effect is used as turbulence model. Standard initialization has been set to obtain the initial solution and the reference value were computed from the inlet. The geometry used:

2.6.1. *Boundary conditions*

The nozzle wall is set as stationary wall with no slip condition, the CS stagnation pressure (900000Pa) and temperature (973K) were set as the inlet and at the exit is the atmospheric pressure (101325Pa) and ambient temperature (293K). Therefore, artificial far-field boundary conditions have been implemented with respect to static ground testing conditions.

2.6.2. *Governing equation*

- Mass conservation equation

For 2-dimensional axisymmetric geometry, the equation is given as:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho\vartheta_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho\vartheta_r) + \frac{\rho\vartheta_r}{r} = 0 \tag{10}$$

Where ρ is the density, ϑ_x is axial vilocity, ϑ_r is radial vilocity, x is the axial coordinate, and r is the radial coordinate.

- Axial momentum conservation equation

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho\vartheta_x\vartheta_x) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho\vartheta_r\vartheta_x) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial\vartheta_x}{\partial x} - \frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{\vartheta})\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(\frac{\partial\vartheta_x}{\partial r} + \frac{\partial\vartheta_r}{\partial x}\right)\right] \tag{11}$$

Where

$$\nabla\cdot\vec{\vartheta} = \frac{\partial\vartheta_x}{\partial x} + \frac{\partial\vartheta_r}{\partial r} + \frac{\vartheta_r}{r} \tag{12}$$

- Radial momentum conservation equation

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho\vartheta_x\vartheta_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho\vartheta_r\vartheta_r) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial\vartheta_r}{\partial x} - \frac{\partial\vartheta_x}{\partial r}\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial\vartheta_r}{\partial r} - \frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{\vartheta})\right)\right] - 2\mu\frac{\vartheta_r}{r^2} + \frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\nabla\cdot\vec{\vartheta}) \tag{13}$$

Where μ is dynamic viscosity

- Energy equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + \rho)] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(K_T + \frac{C_p\mu_t}{PR_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_j} + u_{i(\tau_{ij})_{eff}}\right] \tag{14}$$

Where u is the fluid flow velocity, E is total energy, K_T is thermal conductivity, μ_t is eddy viscosity, Cp is the specific heat of gas constant pressure r_t is the radius of throat nozzle, T is temperature, and $(\tau_{ij})_{eff}$ is the deviatoric stress tensor

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{15}$$

Where C_μ is constant

2.6.3. *Turbulence equation*

The standard k- ϵ model falls within this class of models and has become the workhorse of practical engineering flow calculations in the time since it was proposed by Launder and Spalding. Robustness, economy, and reasonable accuracy for a wide range of turbulent flows explain its popularity in industrial flow and heat transfer simulations. It is a semi-empirical model, and the derivation of the model equations relies on phenomenological considerations and empiricism [18].

The standard k- ϵ model is a semi-empirical model based on model transport equations for the turbulence kinetic energy (k) and its dissipation rate (ϵ) given by:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \tag{16}$$

And

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial\epsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}(G_k + C_{3\epsilon}G_b) - C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} + S_k \tag{17}$$

where σ_k and σ_ϵ are the turbulent Prandtl numbers for k and ϵ, G_k is the generation of turbulence kinetic energy due to the mean velocity gradients, G_b is generation is turbulence kinetic energy due to buoyancy, Y_M is the contribution of the fluctuating dilatation in compressible turbulence to the overall dissipation rate, and $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, and $C_{3\epsilon}$ are constants.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Temperature

The 3 types of nozzles have increased the temperature on the converging part and at the wall as shown is the figure 16, 17, and 18. The static temperature of conical nozzle has raised the most to 697K then the bell nozzle to 685K and the least for aerospike nozzle. This raise of temperature is due to the increasing of speed while decreasing of surface area. Furthermore, in the diverging zone the temperature starts to decrease due to the increasing of the surface area.

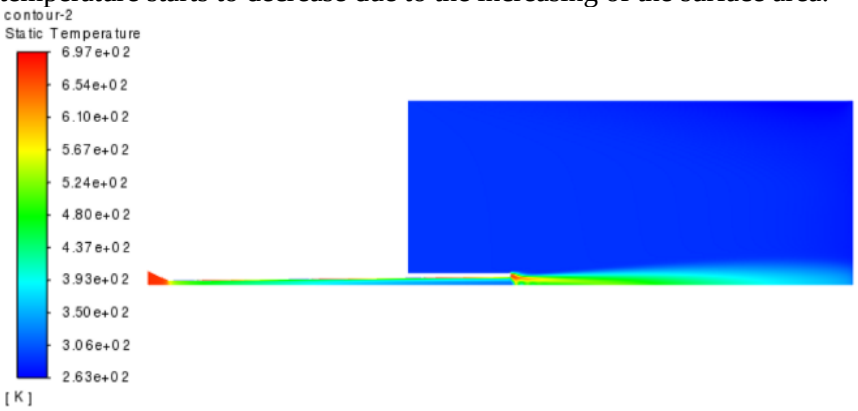


Figure 16. Static Temperature of half of Conical Nozzle

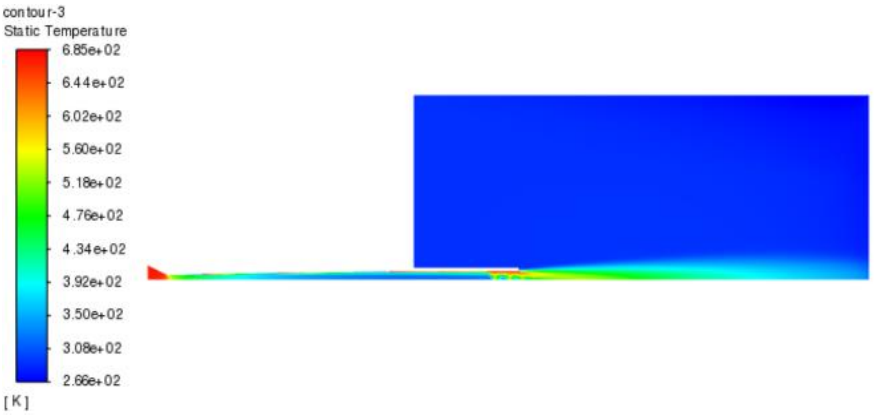


Figure 17. Static Temperature of half of Bell Nozzle

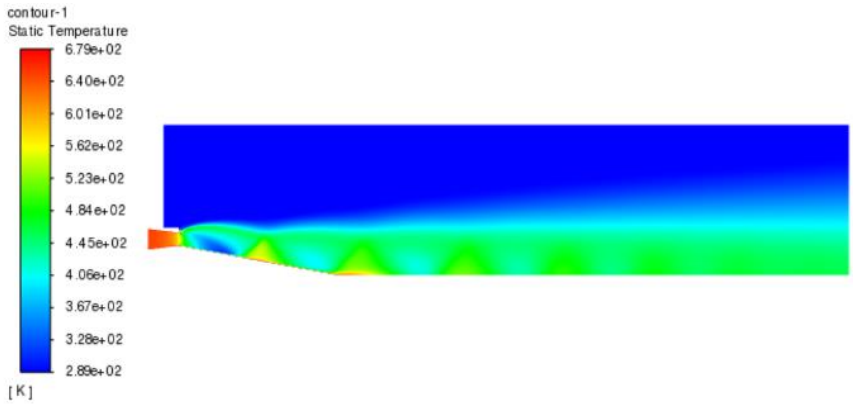


Figure 18. Static Temperature of half of Aerospike Nozzle

3.2. Velocity Magnitude

The 3 types of nozzles have successfully reached the supersonic velocity at the exit of the nozzle. However, the conical and the bell nozzle have faced the oblique shock wave as shown in the figure 19 and 20 whereas the aerospike nozzle has the wider and longer range of the supersonic speed as shown in the figure 21. For the conical, the highest velocity obtained is 845 m/s at the diverging zone of the nozzle then the oblique shock wave occurred at the exit of the nozzle to decrease the velocity of the flow to 676 m/s at the center and 254 m/s as the shear layer at the top. The Bell Nozzle

Produced higher velocity than both conical and aerospike nozzle at 847 m/s at the diverging zone of the nozzle the oblique shock wave also occurred but it appeared just before the exit of the nozzle to 762 m/s to leave the nozzle with 593 m/s at the center and 254 m/s as the shear layer at the top. Lastly, for the aerospike nozzle the velocity leaves the nozzle at 841 m/s, and it decreases slowly with some trailing shocks. The flow leaves the spike at the velocity of 757 at the center with a wide range, 252 m/s as the shear layer at top and 588 as inner shear layer that caused due to the trailing shock waves.

Figure 19. Velocity Magnitude of half of Conical Nozzle (A) Full View, (B) Focus View at Nozzle Exit

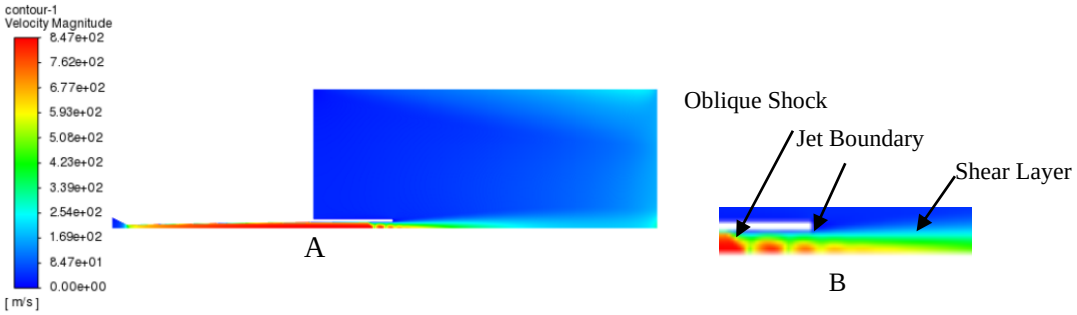


Figure 20. Velocity Magnitude of half of Bell Nozzle (A) Full View, (B) Focus View at Nozzle Exit

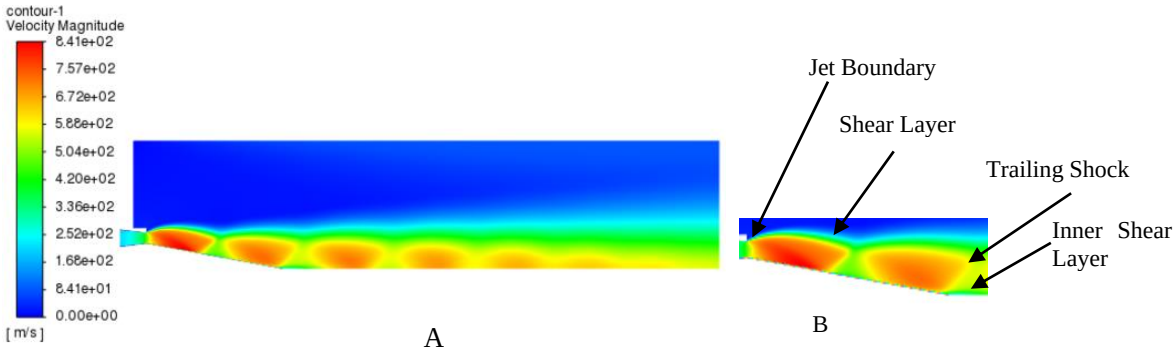


Figure 21. Velocity Magnitude of half of Aerospike Nozzle (A) Full View, (B) Focus View at Nozzle Exit

4 CONCLUSION

A CFD simulation have been carried out by the fluent software in order to accomplish the numerical analysis of flow through conical nozzle, bell nozzle and aerospike nozzle. The supersonic has been obtain at the exit of all types of nozzles. The aerospike nozzle reduces the size of the nozzle with a longer range of supersonic flow which give it the advantage of keeping the powder at higher speed after it gets thrown from the nozzle exit till it hits the substance. Therefore, the effect of the flow produced by aerospike nozzle can lead to a better performance due to the result of higher velocity at the exit that's greater than the required minimum velocity which is between 600 and 1000 m/s.

5 REFERENCES

[1] G. Prashar and H. Vasudev, "A comprehensive review on sustainable cold spray additive manufacturing: State of the art, challenges and future challenges," J. Clean. Prod., vol. 310, p. 127606, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127606.

[2] X.-T. Luo, C.-X. Li, F.-L. Shang, G.-J. Yang, Y.-Y. Wang, and C.-J. Li, “High velocity impact induced microstructure evolution during deposition of cold spray coatings: A review,” Surf. Coat. Technol., vol. 254, pp. 11–20, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.06.006.
[3] R. Singh et al., “Bulk-like ductility of cold spray additively manufactured copper in the as-sprayed state,” Addit. Manuf. Lett., vol. 3, p. 100052, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.addlet.2022.100052.
[4] R. Lupoi, “Cold Spray,” in CIRP Encyclopedia of Production Engineering, The International Academy for Production, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1007/978-3-642-35950-7_16809-2.
[5] A. Balabel, A. M. Hegab, M. Nasr, and S. M. El-Behery, “Assessment of turbulence modeling for gas flow in two-dimensional convergent–divergent rocket nozzle,” Appl. Math. Model., vol. 35, no. 7, pp. 3408–3422, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.apm.2011.01.013.
[6] T. Schmidt et al., “From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying,” J. Therm. Spray Technol., vol. 18, pp. 794–808, Dec. 2009, doi: 10.1007/s11666-009-9357-7.
[7] R. Baidya, A. Pesyridis, and M. Cooper, “Ramjet Nozzle Analysis for Transport Aircraft Configuration for Sustained Hypersonic Flight,” Appl. Sci., vol. 8, p. 574, Apr. 2018, doi: 10.3390/app8040574.
[8] B. L. Denton, “Design and analysis of rocket nozzle contours for launching Pico-Satellites,” undefined, 2008, Accessed: Jun. 24, 2022. [Online]. Available: https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-analysis-of-rocket-nozzle-contours-for-Denton/300175f5444d953b9a5a42d3a1710e33b416f50d
[9] “Oblique Shock Waves.” https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/oblique.html (accessed Jun. 24, 2022).
[10] “Engine Cooling - Why Rocket Engines Don’t Melt,” Everyday Astronaut, Jan. 13, 2022. https://everydayastronaut.com/engine-cooling-methodes/ (accessed Jun. 24, 2022).
[11] “Nozzles,” 22:29:59 UTC. Accessed: Jun. 24, 2022. [Online]. Available: https://www.slideshare.net/sabirahmed796/nozzles-45206272
[12] “Rocket engine nozzle,” Wikipedia. Jun. 07, 2022. Accessed: Jun. 24, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rocket_engine_nozzle&oldid=1092030650
[13] S. Dinavahi, V. K. Champagne, and D. J. Helfritch, “Comparison of Empirical and Theoretical Computations of Velocity for a Cold Spray Nozzle,” in 2009 DoD High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference, San Diego, CA, USA, Jun. 2009, pp. 27–31. doi: 10.1109/HPCMP-UGC.2009.10.
[14] T. Croteau, “MICRO-NOZZLE SIMULATION AND TEST FOR AN ELECTROTHERMAL PLASMA THRUSTER,” Dec. 2018.
[15] J. Singh, L. E. Zerpa, B. Partington, and J. Gamboa, “Effect of nozzle geometry on critical-subcritical flow transitions,” Heliyon, vol. 5, no. 2, p. e01273, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01273.
[16] “(PDF) Implications of Cycle Variants, Propellant Combinations and Operating Regimes on Fatigue Life Expectancies of Liquid Rocket Engines.” https://www.researchgate.net/publication/324983442_Implications_of_Cycle_Variants_Propellant_Combinations_and_Operating_Regimes_on_Fatigue_Life_Expectancies_of_Liquid_Rocket_Engines (accessed Jun. 24, 2022).
[17] K. N. Kumar, M. Gopalsamy, D. Antony, R. Krishnaraj, and C. B. V. Viswanadh, “Design and Optimization of Aerospike nozzle using CFD,” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 247, p. 012008, Oct. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/247/1/012008.
[18] “ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.4.1 Standard - Model.” https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node58.htm (accessed Jun. 22, 2022).
[19] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S, Xie X. High deposition efficiency and delamination issues during high-pressure cold spraying metallization of PEEK using spherical copper powders. Int J Adv Manuf Technol 2020. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05349-z.
[20] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S. Flow phenomenon of micron-sized particles during cold spray additive manufacturing: High-speed optic observation and characterization. Adv Powder Technol 2020;31:1060–79. https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.037.

[21] Raoelison RN. Analytical description of solid particles kinematics due to a fluid flow and application to the depiction of characteristic kinematics in cold spraying. Powder Technol 2017;319:191–203. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.029.
[22] Raoelison RN, Aubignat E, Planche M-P, Costil S, Langlade C, Liao H. Low pressure cold spraying under 6bar pressure deposition: Exploration of high deposition efficiency solutions using a mathematical modelling. Surf Coat Technol 2016;302:47–55. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.068.
[23] Raoelison RN, Koithara LL, Costil S, Langlade C. Turbulences of the supersonic gas flow during cold spraying and their negative effects: A DNS CFD analysis coupled with experimental observation and laser impulse high-speed shadowgraphs of the particles in-flight flow. Int J Heat Mass Transf 2020;147:118894. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118894.
[24] Raoelison RN, Verdy Ch, Liao H. Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications. Mater Des 2017;133:266–87. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.067.
[25] Raoelison RN, Xie Y, Sapanathan T, Planche MP, Kromer R, Costil S, et al. Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date. Addit Manuf 2018;19:134–59. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.001.
[26] Raoelison RN. Cold spray coating of PEEK surface by copper deposition: Interfacial adhesion at high deposition efficiency and bonding strength. CIRP J Manuf Sci Technol 2021:6.
[27] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S, Xiliang X. Capability of cold spraying to obtain high deposition efficiency for the metallization of PEEK. Proc. Int. Therm. Spray Conf., Japan: 2019, p. 557–62.
[28] Koithara LL, Raoelison RN, Costil S, Planche MP. Powder jet variations using Low Pressure Cold Spraying – for an improvement of the spraying yield. Proc. Conf. Therm. Spray. 2019, Japan: 2019, p. 9–14.

Contact principal : Rija N. RAOELISON *rija-nirina.raoelison@utbm.fr*, Wassim ZAIM-MOUNAJED *wassim.zaim-mounajed@utbm.fr*

Coordonnées : Université de Bourgogne Franche-Comté, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, 90010, France

INVESTIGATION OF THE VIABILITY OF COLD SPRAY COATING OF A SUBLAYER-BASED CFRP COMPOSITE

ZHANG Teng[1], PADAYODI Essolé[1], RAOELISON Rija Nirina[2], KHANDAR Shantan[2], ZAIM-MOUNAJED Wassim[1], SAGOT Jean-Claude[1]

[1] Pôle ERCOS, ELLIADD (EA. 4661) – University of de Bourgogne Franche Comté, University of Technology of Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort, France.
[2] ICB, UMR 6303 CNRS, University of Bourgogne Franche Comté, University of Technology of Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort, France.

Carbon fibre reinforced polymer (CFRP) materials are increasingly used as an alternative material to aluminum for aircraft structures due to the light-weighting, but the lack of electrical conductivity of such composites leads to a risk of lightning strike damage and limits the extension of their application. This study aims to investigate the viability of metallizing a CFRP structures provided with an adhesion sublayer consisted of epoxy resin and metallic particles using cold spray. Copper (Cu) or Aluminum (Al) particles embedded in the sublayer undergo a plastic crushing during the ballistic impacting of the deposition powders allowing the coating adhesion. For the coating, aluminum (Al) and tin (Sn) powders and those powders mixed with alumina (Al_2O_3) were selected as the feedstocks for the low-pressure cold spray system. Experimental results show that a successful deposition could be achieved in most cases, except for the quasi-symmetric configurations of Al or Al+Al_2O_3 powders sprayed on Al-based sublayer. But the continuous thick coating was only obtained for the mixed powders Sn+Al_2O_3 sprayed on the CFRPs with Cu-based sublayer, which could be explained by a combination of bonding mechanisms due to the very soft property of tin, the sufficient kinetic energy generated by alumina and the size advantage of copper particles in sublayer. These findings will provide the designers and engineers with functionalized CFRPs for innovative aircraft structures conception and value-added applications.

Keywords: cold spray, CFRP structure, sublayer, copper, aluminum, tin

1 INTRODUCTION

Due to their high specific strength and stiffness, carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites have attracted the interests in a large variety of advanced engineering structures, such as aircrafts, helicopters, space crafts and automobiles [1]–[3]. However, the development of CFRP composites is limited by their physical properties as the lack of thermal and electrical conductivities [4]. The metallisation of such CFRP composites by cold spray is a prospective surface modification method to overcome these limitations [5] without the need of high heat input and the risk of thermal-induced problems [6], [7].

Che et al. demonstrated the feasibility of the metallization of CFRP by cold spraying tin and revealed that erosion of the substrate was the key obstacle to developing continuous coatings of aluminum and copper [8]. R. Lupoi et al. [9] achieved the deposits of tin onto on a variety of plastic substrate materials, which exhibited coatings of dozens of micros in thickness. Ganesan et al. [10] investigated the deposition behaviours of Sn and Cu on CFRP during cold spraying and found that Cu coatings exhibited lower coating adhesion strength than did Sn coatings.

Zhang et al. [11] have investigated the viability of spraying aluminum powders on different substrates, the results showed that it was easier to achieve an initiation of aluminum deposition for the harder metallic substrates rather than nonmetallic or soft surfaces. D. Giraud et al. [12] focused on the realization of thick aluminum onto PA66 substrates through adjusting the processing parameters including carrier gas temperature, gas pressure and substrate temperature, the developed aluminum coatings were thick and showed an atypical multi-layered microstructure.

Up until recently, the cold spray process is well understood for depositing metallic powders onto metallic substrate surface, but not enough studies have been reported on cold spray on polymeric substrates, where the poor adhesion and mechanical degradation were usually experienced [13], [14]. Furthermore, it was found more difficult to obtain coatings on thermosets since they would go through a degradation at elevated temperature rather than local thermal softening of the substrates like for metals and thermoplastics [10], [15], [16].

The aim of this study is to investigate the feasibility of cold spray coatings on a thermosetting CFRP substrates provided with an adhesion sublayer consisted of epoxy resin and metallic particles. Cu or Al particles embedded in the sublayer are expected to undergo a plastic deformation and to allow a coating bonding upon the impacting of powders. The deposition efficiency and morphology at the interface were examined using the scanning electronic microscopy (SEM), which allows to obtain a comprehensive understanding of the metallization of CFRP structures by cold spraying.

2 EXPERIMENTAL PROCEDURES

2.1. POWDERS AND SUBSTRATES

In this study, the powders used for sublayers were commercially atomized aluminum powders and copper powders, respectively supplied by Toyal and Safina. Four configurations of impacting powders were prepared for cold spray, which are the single-component powders of Al and Sn, the mixed powders of Al+Al_2O_3 (namely AA) with a weight ratio 65: 35, and Sn+Al_2O_3 (namely SA) with a weight ratio 65: 35. As shown in Figure 1, the copper particles were perfectly spherical and have the biggest particle size, the others were irregular and of a similar dimension.

A hand lay-up method and pressure assisted moulding process are used to prepare the CFRP composite substrates provided with a biphasic metal/epoxy sublayer. Firstly, a well-mixed solution of Al or Cu powders and epoxy resin is applied on a glass mould with a release agent. Secondly, the twill weave carbon fabrics (CARBONE 203T, SF composites) are cut into 400 mm × 300 mm size, epoxy resin (EPO 1040, SF composites) and hardener with a mixture ratio of 100: 30 was used to impregnate each ply of $[0/90]_8$ stacking. To balance the structural integrity and interfacial adhesion of a sublayer, the eight plies of epoxy-impregnated CFs were stacked and compacted once the sublayer reaches a non-flow viscous state. The process was conducted under room temperature, with a pressure applied on the mould to help squeeze out the excessive resin and to enhance the mechanical performance.

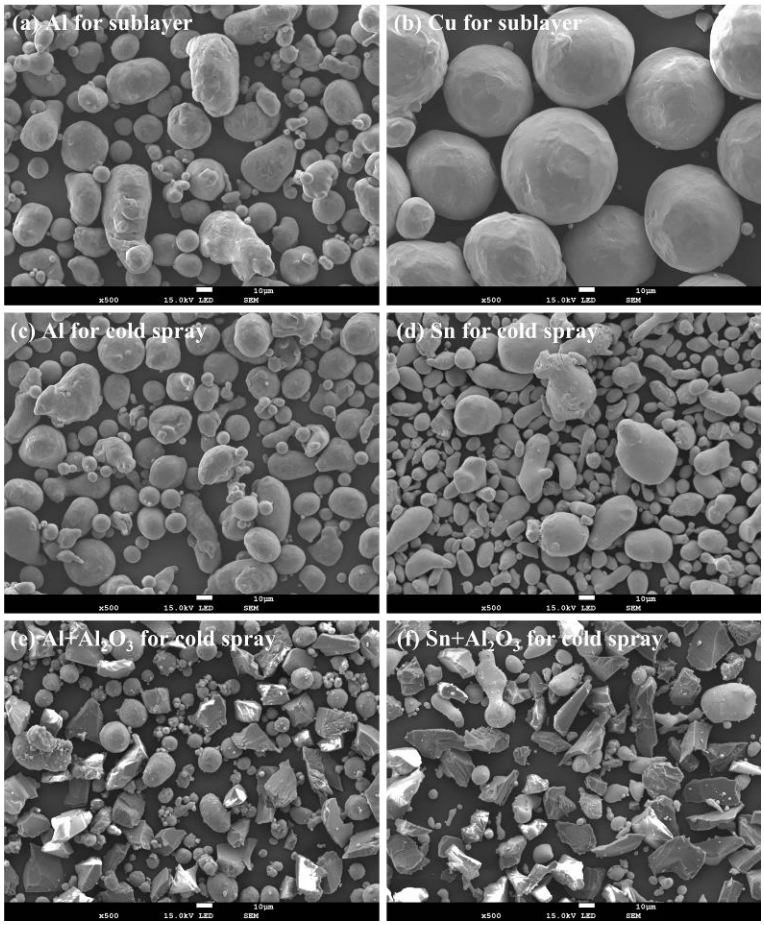


Figure 1. SEM morphologies of feedstock powders for (a-b) sublayers and (c-f) cold spray

2.2. COATING AND CHARACTERIZING PROCESS

The deposition of metallic powders is produced using the DYMET 423 low-pressure cold spray system equipped with a De-Laval nozzle, whose diverging part length is 130 mm and the expansion ratio is 1.275. Nitrogen is used as propellant gas. The standoff distance is set to 30 mm, and the gun travel speed is 100 mm/s. The powder feeder rate is 20 g/min. Three passes are sprayed with an increment of 1 mm in between two successive steps. The applied gas pressure and gas temperature are 9 bars and at room temperature (20°C). The substrate was cut (60 mm × 60 mm) from the CFRP composites provided with sublayers, and then sandblasted to promote a metal-to-metal collision. After the cold spray test, the samples are observed from the top surface view using an optical microscope (Nis-element, Nikon, France). Cross-sections are also prepared for observations by means of Scanning Electronic Microscope (JSM5800LV, JEOL, Japan), and energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis (EDS). To be simplified, we adopted the notation of Particle/Substrate to describe the different systems for cold spraying, for example, Al/Cu-Sub was used to represent the case of Al particles impacting on a Cu-Sub system.

3 RESULTS

3.1. CFRP COMPOSITES PROVIDED WITH A SUBLAYER

Table 1 lists the physical parameters for the processed CFRP samples precoated with an aluminum-based sublayer (namely Al-Sub) and with a copper-based sublayer (namely Cu-Sub). Figure 2 illustrates the optical observations of the substrate systems Cu-Sub and Al-Sub, that reveals a uniform distribution of the metal powders within the sublayer, with an extremely good surface finish. The sublayer and CFRP substrate exhibit good bonding, where no cracks and other defects are observed, indicating appropriate methodology for the sublayer processing. However, the visible porosity in CFRP composite should be further addressed, which could generally be optimized by a careful control to eliminate air bubbles. The Al-Sub system has a sublayer thicker than that of the system Cu-Sub in spite of a lower surficial density and metallic concentration, and a little higher

pressure, which indicated the dominant role of material properties of the metallic powders such as the specific weight on the ultimate formation of the sublayer.

Table 1. Physical parameters of CFRP composites provided with sublayers

Substrates	Metallic concentration	Pression	Surficial Density	Total thickness	Sublayer thickness
Al-Sub	57 wt%	1.80 $\times 10^{-3}$ MPa	1875 g/m^2	3.99 mm	1126 µm
	60 wt%	1.80 $\times 10^{-3}$ MPa	2027 g/m^2	3.89 mm	1270 µm
Cu-Sub	77 wt%	1.30 $\times 10^{-3}$ MPa	2540 g/m^2	3.11 mm	477 µm
	80 wt%	1.55 $\times 10^{-3}$ MPa	2771 g/m^2	3.15 mm	547 µm

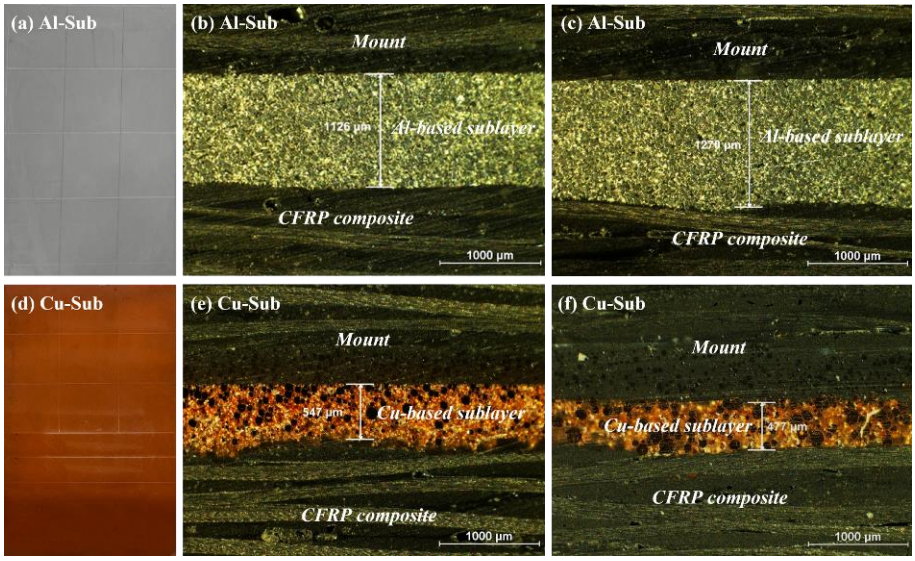


Figure 2. Optical observations of CFRP substrates provided with sublayers, where (a) and (d) are the overall surface view; (b-c) and (e-f) are the cross-section view.

3.2. COLD SPRAY COATINGS ON CFRP SUBSTRATES

Figure 3 presents the optical micrographs of the as-sprayed systems before and after CS process. The deposition is observed to yield a very thin, interrupted coating in all cases, which leaves a few traces of attach and rebound over the substrate surface as evidenced by the apparent colour change from the column I to column II. The mass of samples was all reduced slightly after CS, indicating that deposition was offset by erosion. After CS process, obvious craters formed due to the escape of copper particles were visible in all Cu-based substrates. System Sn/Cu-Sub and SA/Cu-Sub have presented a totally changed colour of their surfaces, which emphasized the possibility of an adhesion.

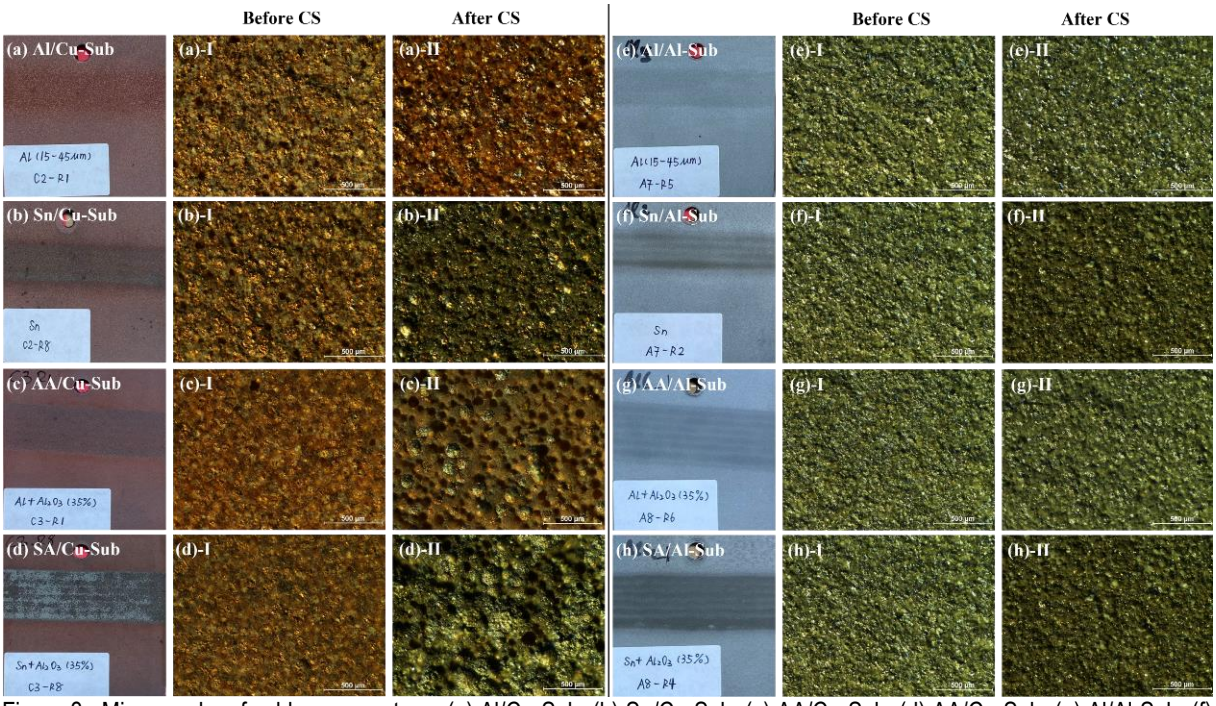


Figure 3. Micrographs of cold-spray systems (a) Al/Cu-Sub, (b) Sn/Cu-Sub, (c) AA/Cu-Sub, (d) AA/Cu-Sub, (e) Al/Al-Sub, (f) Sn/Al-Sub, (g) AA/Al-Sub and (h) SA/Al-Sub, where Column I represents the morphologies of substrates before cold spray, and Column II represents the morphologies of substrates after cold spray.

3.3. SEM MORPHOLOGIES

3.3.1. Deposition of Al or AA or Sn or SA powders onto the Al-Sub systems

Figure 4 gives the SEM images of Al-Sub systems after cold spray of aluminum powders. A significant number of craters were found from both a look at the top surface (Figure 4a-b) as well as the cross section (Figure 4d), which revealed that erosion of matrix and escaping of impact particles have prevented the deposition of a continuous coating. Similar phenomena have taken place for the mixed powders of aluminum and alumina sprayed on Al-Sub (Figure 5), epoxy erosion along with some visible craters was found once again. Worthily noted, the aluminum particles in sublayer have gone through the plastic deformation upon the hit of two aluminum involved powders, which could have been beneficial for the attachment of the upcoming particles. However, the kinetic impact energy of those particles in contact with a metal-polymer surface was far insufficient for them to adhere on the substrate, according to the deposition windows of various particles summarized in the study of [17]. Apart from the unreached critical velocity, the absence of softening effect and symmetric material configuration of coating/substrate were both undesirable for the coat formation.

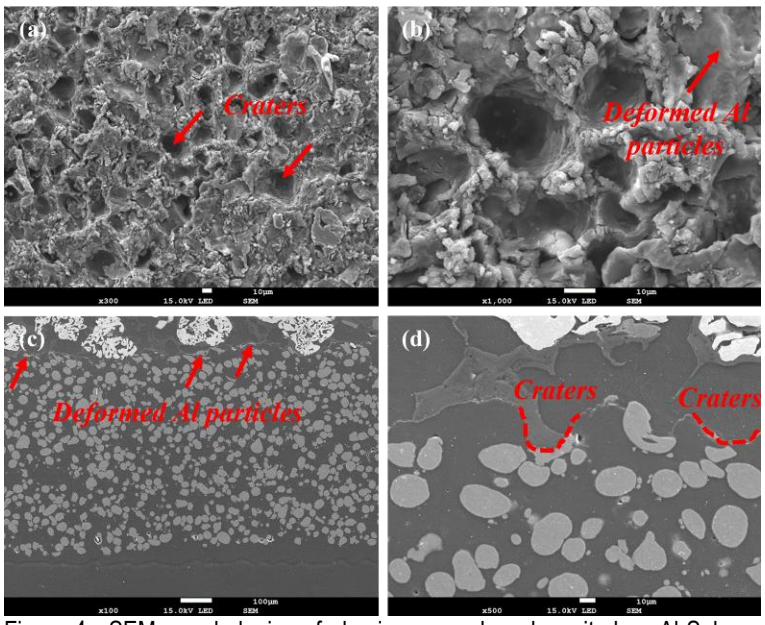


Figure 4. SEM morphologies of aluminum powders deposited on Al-Sub system, where (a-b) are the top views of the as-sprayed samples, (c-d) are the cross sections of the as-sprayed samples.

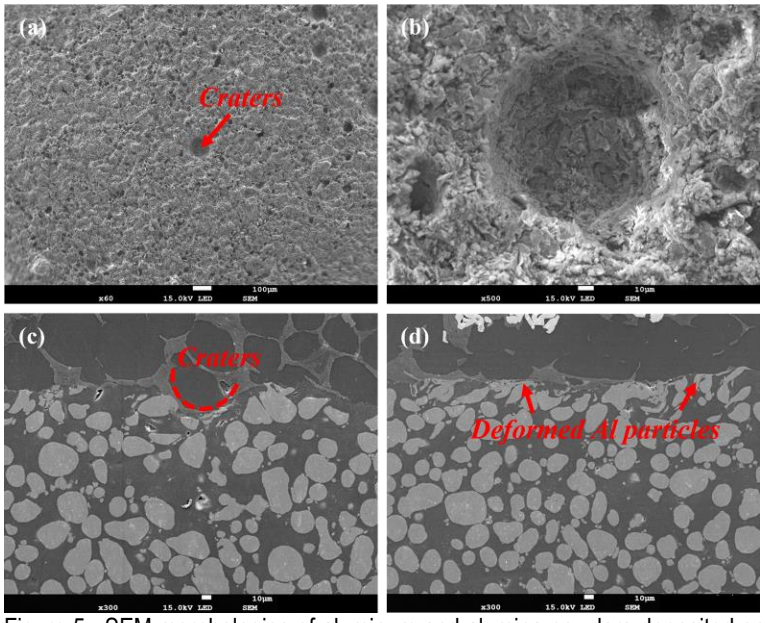


Figure 5. SEM morphologies of aluminum and alumina powders deposited on Al-Sub system, where (a-b) are the top views of the as-sprayed samples, (c-d) are the cross sections of the as-sprayed samples.

Tin powders are increasingly used in the domain of cold spray polymer substrates because their low density, low hardness and low melting point could ease the deposition initiation on non-metallic substrates [18], [19]. As shown in Figure 6 (Sn/Al-Sub) and Figure 7 ($Sn+Al_2O_3$/Al-Sub), the compatibility of tin powders for the aluminum sublayer-assisted CFRP composite substrates was well demonstrated in this present work. The EDS elementary analysis results (Figure 6d) shows that tin powders could penetrate in the epoxy without damage and adhere to Al particles by deformation. Owing to the excellent softness of tin powders, no significant removal of the epoxy occurred, and less craters were found on the top surface, indicating an ignorable issue of substrate erosion generated by the little energetic input of tin powders. The results of $Sn+Al_2O_3$ deposition also verified this compatibility, although the coating was not continuous, it could be clearly observed the particles of tin and alumina from the cross section of the examined samples (Figure 7b-d).

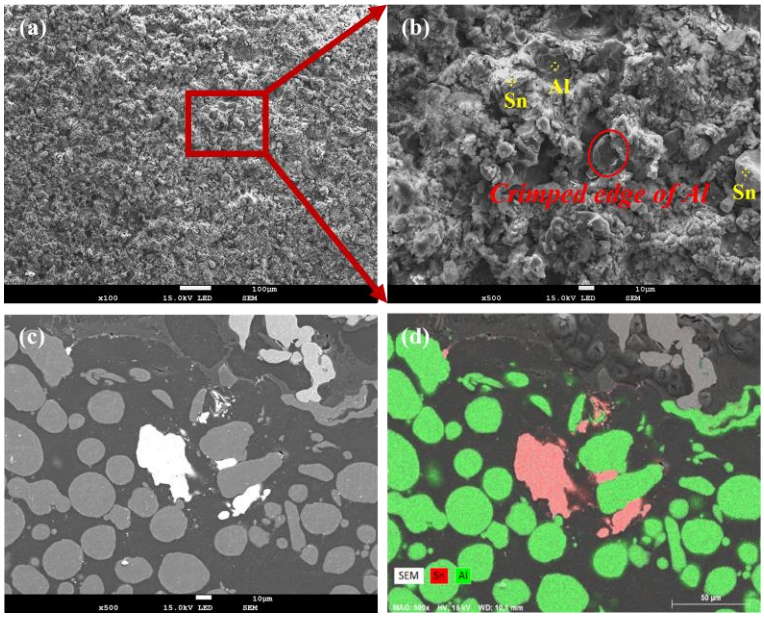


Figure 6. SEM morphologies of tin powders deposited on Al-Sub system, where (a-b) are the top views of the as-sprayed samples, (c-d) are the cross sections of the as-sprayed samples.

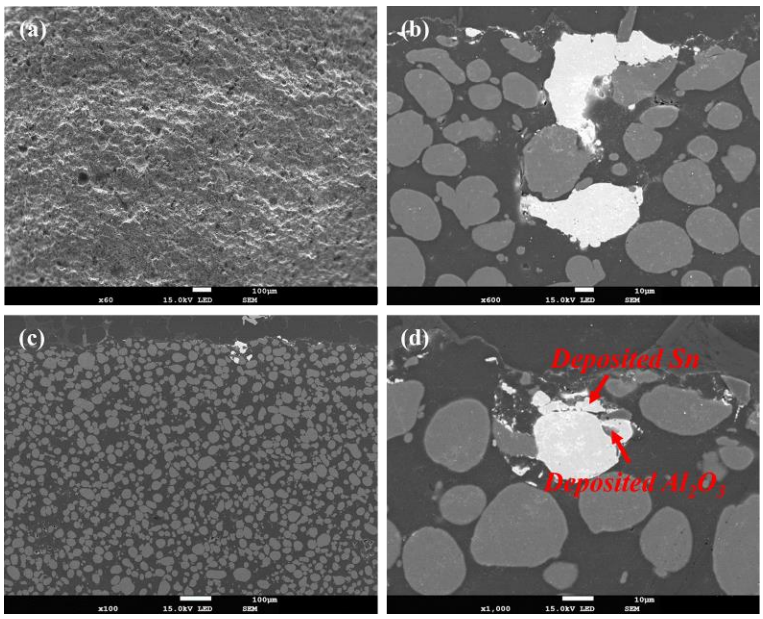


Figure 7. SEM morphologies of tin and alumina powders deposited on Al-Sub system, where (a) is the top view of the as-sprayed samples, (b-d) are the cross sections of the as-sprayed samples.

3.3.2. Deposition of Al or AA or Sn or SA powders onto the Cu-Sub systems

For the Cu-Sub systems, no successful deposition was obtained when cold spraying aluminum powders (Figure 8). Although it was observed a severe plastic deformation for the copper particles in sublayer probably caused by the peening effect, the important rebounding behaviors of the hard aluminum particles and the degradation of epoxy matrix have restrained the development of coating [20], [21]. Figure 9 presents the SEM morphologies of Cu-Sub system following cold spray of aluminum and alumina. Such mixed powders were successfully deposited on both the copper particles and the epoxy substrate. It was interesting to find the difference between these two cases, the former copper particles were deformed a lot and even destructed, whereas most of the latter ones had kept their spherical shape after CS. This revealed the positive function of the alumina particles, which might support to construct certain defenses to protect the substrate from the high-velocity impact, thus facilitated the coating deposition. Here, the difficulty of developing a thick coating of aluminum was also emphasized since the formed coating of $Al+Al_2O_3$ was quite thin, which could

be explained by the same reason as the cases of cold spray aluminum powders. Nevertheless, the craters existed on the top surface. Most of the deposition was on the copper particles, the protective film was easier to develop on the metallic particles instead of epoxy polymers.

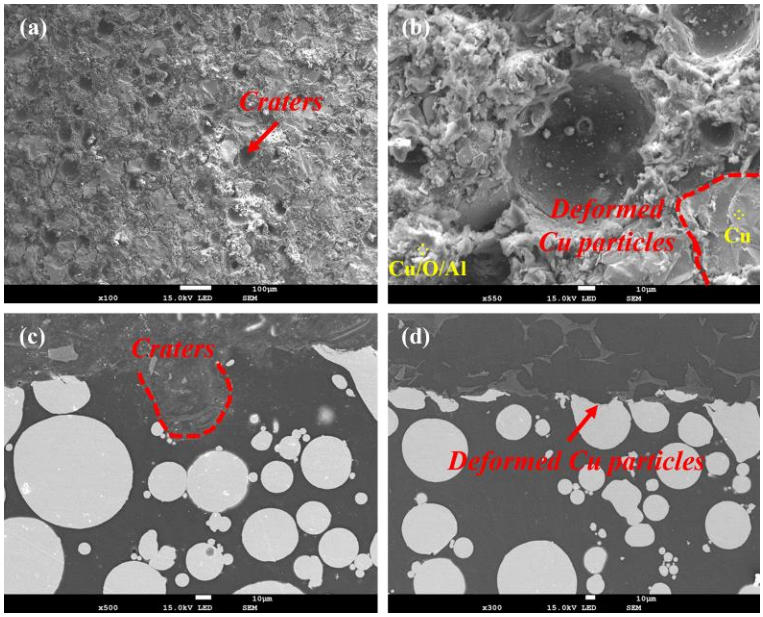


Figure 8. SEM morphologies of aluminum powders deposited on Cu-Sub system, where (a-b) are the top surface images of the as-sprayed samples, (c-d) are the cross-sectional images of the as-sprayed samples.

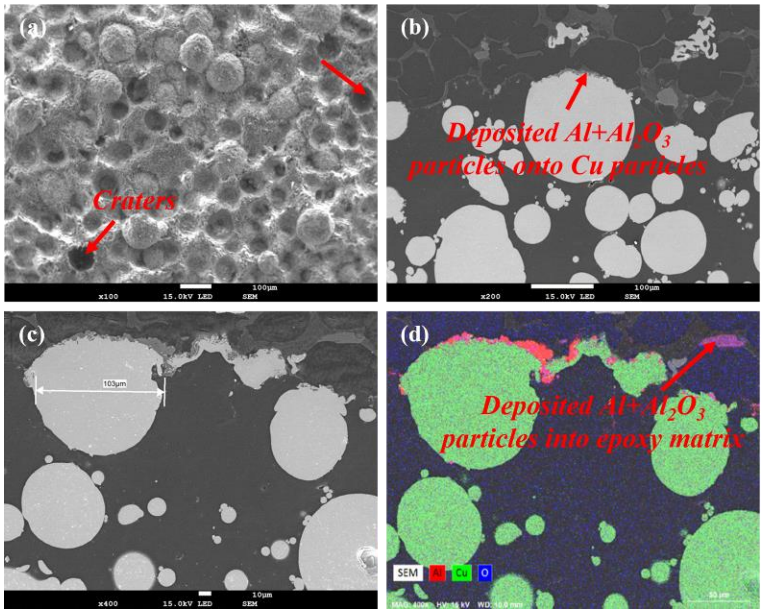


Figure 9. SEM morphologies of aluminum and alumina powders deposited on Cu-Sub system, where (a) is the top surface image of the as-sprayed samples, (b-d) are the cross-sectional images of the as-sprayed samples.

The SEM morphologies of Cu-Sub system following cold spraying of tin were presented in Figure 10. It could be found a large amount of deformed Sn particles surrounding the large Cu particles, which took place of the original epoxy matrix. This particulier morphology even filled with the gap between copper particles and explained for the totally changed colour of surface after process. Even though the erosion phenomenon wasn't avoided, provided by the craters in Figure 10a and 10c, the deposition of tin powders could be achieved by embedding into epoxy matrix (see Figure 10b) or adhering onto copper particles (see Figure 10d). A continuous layer has not been achieved as the heated particle attackers destructed and removed the most part of interlayer from the substrate, leaving the wreckage of tin and exposing the underlying Cu particles. It seemed not easy for pure Sn particles to accumulate on the surface of both copper particles and epoxy matrix in this

case. But with the help of alumina powders, a continuous and thick coating with dozens of micros thick was successfully developed on the Cu-Sub system, as shown in Figure 11. The erosion phenomenon was negligeable since very few craters were observed. Here, the softness of tin powders, the sufficient kinetic energy generated by alumina and the size advantage of copper particles in sublayer all contributed to the successful deposition of $Sn+Al_2O_3$/Cu-Sub.

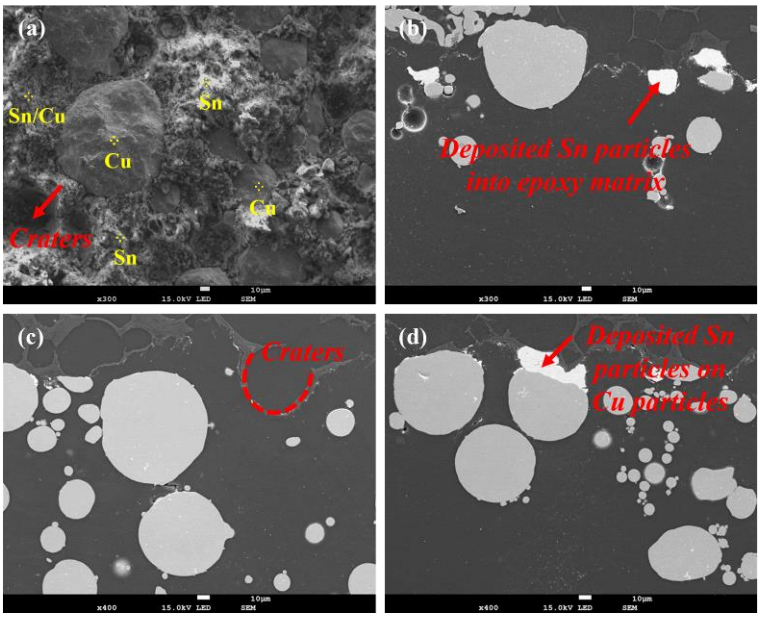


Figure 10. SEM morphologies of tin powders deposited on Cu-Sub system, where (a) is the top surface image of the as-sprayed samples, (b-d) are the cross-sectional images of the as-sprayed samples.

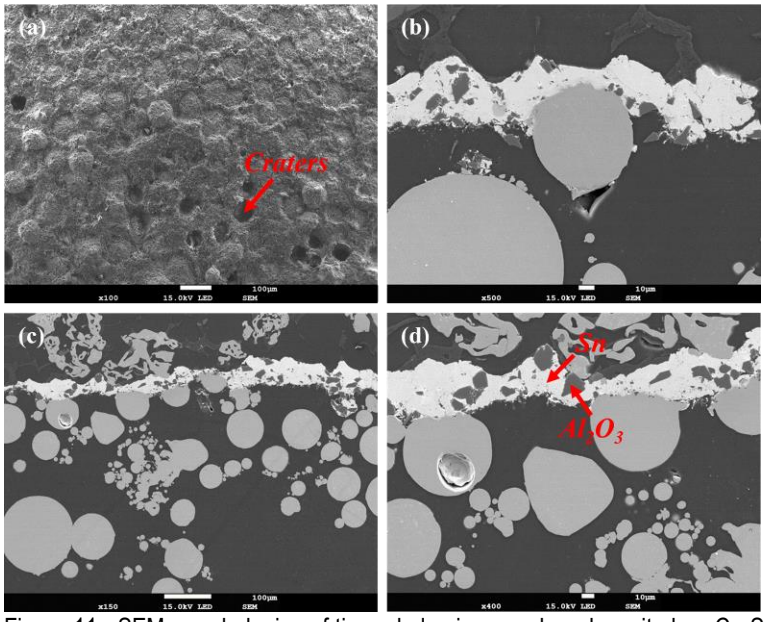


Figure 11. SEM morphologies of tin and alumina powders deposited on Cu-Sub system, where (a) is the top surface image of the as-sprayed samples, (b-d) are the cross-sectional images of the as-sprayed samples.

4 CONCLUSION

In this article, a new methodology for the preparation of composite laminates equipped with an intermediate biphasic sublayer (Al-Sub, Cu-Sub) and the subsequent metallization by low-pressure cold spraying of a series of metallic powders (Al, $Al+Al_2O_3$, Sn, $Sn+Al_2O_3$) was presented. Among these eight diverse configurations with SEM analysis, system Al/Al-Sub and $Al+Al_2O_3$/Al-Sub and Al/Cu-Sub failed to develop a deposition, due to the insufficient energetic impact of aluminum particles and the as-brought rebounding behaviors. The mixed alumina particles were found probably to serve as a protective layer for copper particles with a big size, provided with the

successful deposition of Al+Al_2O_3/Cu-Sub. For Sn and Sn+Al_2O_3 powders, they were suitable for both Al-Sub and Cu-Sub and the erosion issue was lightened a lot, which indicated the compatibility between tin and polymers. Again, the use of alumina was proved important since a continuous thick coating was obtained for system Sn+Al_2O_3/Cu-Sub. In conclusion, the feasibility of developing a coating on the sublayer-assisted CFRP composite substrate was demonstrated, especially for the Cu-Sub system, which performed better than Al-Sub because it can provide more contact metallic surface for the powders to be deposited.

REFERENCES

[1] A. Rezzoug, S. Abdi, A. Kaci, and M. Yandouzi, 'Thermal spray metallisation of carbon fibre reinforced polymer composites: Effect of top surface modification on coating adhesion and mechanical properties', *Surf. Coat. Technol.*, vol. 333, pp. 13–23, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.066.

[2] T. Zhang, E. Padayodi, R. N. Raoelison, J. C. Sagot, Metallization of Fiber-Reinforced Polymer Composites Via an in-situ Sublayer and a Cold Spray Deposition, *CONFERE'21*, Saint-Malo, 2021.

[3] T. Zhang, E. Padayodi, R. N. Raoelison, J. C. Sagot, Sublayer-Assisted Cold Spray Metallization of Carbon Fiber Reinforced Composites, International Thermal Spray Conference, *ITSC2022*, pp. 314-326, Vienna, 2022.

[4] H. Ashrafizadeh, P. Mertiny, and A. McDonald, 'Determination of temperature distribution within polyurethane substrates during deposition of flame-sprayed aluminum–12silicon coatings using Green's function modeling and experiments', *Surf. Coat. Technol.*, vol. 259, pp. 625–636, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.10.020.

[5] J. Sun, K. Yamanaka, A. Chiba, Y. Ichikawa, H. Saito, and K. Ogawa, 'Cold Spray Sn Coating on the Carbon Fiber Reinforced Polymer', Virtual, Jun. 2021, pp. 75–78. doi: 10.31399/asm.cp.itsc2021p0075.

[6] L. L. Koithara, R. N. Raoelison, S. Costil, and X. Xie, 'High deposition efficiency and delamination issues during high-pressure cold spraying metallization of PEEK using spherical copper powders', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 107, no. 11–12, pp. 4427–4436, Apr. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05349-z.

[7] R. N. Raoelison, E. Aubignat, M.-P. Planche, S. Costil, C. Langlade, and H. Liao, 'Low pressure cold spraying under 6 bar pressure deposition: Exploration of high deposition efficiency solutions using a mathematical modelling', *Surf. Coat. Technol.*, vol. 302, pp. 47–55, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.068.

[8] H. Che, P. Vo, and S. Yue, 'Metallization of carbon fibre reinforced polymers by cold spray', *Surf. Coat. Technol.*, vol. 313, pp. 236–247, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.083.

[9] R. Lupoi and W. O'Neill, 'Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray', *Surf. Coat. Technol.*, vol. 205, no. 7, pp. 2167–2173, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.128.

[10] A. Ganesan, M. Yamada, and M. Fukumoto, '14-Cold Spray Coating Deposition Mechanism on the Thermoplastic and Thermosetting Polymer Substrates', *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 22, no. 8, pp. 1275–1282, Dec. 2013, doi: 10.1007/s11666-013-9984-x.

[11] D. Zhang, P. H. Shipway, and D. G. McCartney, 'Cold Gas Dynamic Spraying of Aluminum: The Role of Substrate Characteristics in Deposit Formation', *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 109–116, Mar. 2005, doi: 10.1361/10599630522666.

[12] D. Giraud, F. Borit, V. Guipont, M. Jeandin, and J. M. Malhaire, 'Metallization of a Polymer Using Cold Spray: Application to Aluminum Coating of Polyamide 66', pp. 7.

[13] R. N. Raoelison *et al.*, 'Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to

date', *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 134–159, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.07.001.
[14] R. N. Raoelison, L. Lalu Koithara, and S. Costil, 'Cold spray coating of PEEK surface by copper deposition: Interfacial adhesion at high deposition efficiency and bonding strength', *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 35, pp. 63–68, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cirpj.2021.05.008.
[15] L. L. Koithara, R. N. Raoelison, and S. Costil, 'Flow phenomenon of micron-sized particles during cold spray additive manufacturing: High-speed optic observation and characterization', *Adv. Powder Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 1060–1079, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apt.2019.12.037.
[16] R. N. Raoelison, Ch. Verdy, and H. Liao, 'Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications', *Mater. Des.*, vol. 133, pp. 266–287, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.07.067.
[17] R. Melentiev, N. Yu, and G. Lubineau, 'Polymer metallization via cold spray additive manufacturing: A review of process control, coating qualities, and prospective applications', *Addit. Manuf.*, vol. 48, pp. 102459, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102459.
[18] R. N. Raoelison, L. L. Koithara, S. Costil, and C. Langlade, 'Turbulences of the supersonic gas flow during cold spraying and their negative effects: A DNS CFD analysis coupled with experimental observation and laser impulse high-speed shadowgraphs of the particles in-flight flow', *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 147, pp. 118894, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118894.
[19] R. N. Raoelison, 'Capability of cold spraying to obtain high deposition efficiency for the metallization of PEEK', *Proc. Int. Therm. Spray Conf.*, Japan: 2019, pp. 557–62.
[20] L. L. Koithara, 'Powder Jet Variations Using Low Pressure Cold Spraying — For an Improvement of the Spraying Yield'. *Proc. Conf. Therm. Spray.*, Japan: 2019, pp. 9–14.
[21] R. N. Raoelison, 'Analytical description of solid particles kinematics due to a fluid flow and application to the depiction of characteristic kinematics in cold spraying', *Powder Technol.*, vol. 319, pp. 191–203, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2017.06.029.

Contact principal: ZHANG Teng, teng.zhang@utbm.fr, PADAYODI Essolé, essole.padayodi@utbm.fr, RAOELISON Rija-Nirina, rija-nirina.raoelison@utbm.fr

Coordonnées: Université de Bourgogne Franche-Comté, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, 90010, France