



HAL
open science

**Des données captées aux créations de valeurs :
Proposition d'une méthode outillée pour structurer la
conception amont des produits intelligents et connectés**

Tristan Briard

► **To cite this version:**

Tristan Briard. Des données captées aux créations de valeurs : Proposition d'une méthode outillée pour structurer la conception amont des produits intelligents et connectés. Automatique / Robotique. HESAM Université, 2023. Français. NNT : 2023HESAE095 . tel-04496023

HAL Id: tel-04496023

<https://pastel.hal.science/tel-04496023v1>

Submitted on 8 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
Laboratoire de Conception de Produits et Innovation – Campus de Paris

THÈSE

présentée par : **Tristan BRIARD**

soutenue le : **20 décembre 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie Industriel (Science de la Conception)**

**Des données captées aux créations de valeurs :
proposition d'une méthode outillée pour
structurer la conception amont des produits
intelligents et connectés**

THÈSE co-dirigée par :

Pr. AOUSSAT Améziane & Pr. VERON Philippe

et encadrée par :

Dr. JEAN Camille

Jury

M. Bernard YANNOU, Professeur des Universités, LGI, CentraleSupélec

M. Jean-François BOUJUT, Professeur des Universités, G-SCOP, Grenoble INP

Mme. Nadine COUTURE, Professeure, ESTIA-Recherche, ESTIA

M. Benjamin DEGUILHEM, Docteur, Capgemini Engineering

M. Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers

M. Philippe VERON, Professeur des Universités, LISPEN, Arts et Métiers

M. Camille JEAN, Maître de Conférences, LCPI, Arts et Métiers

Président

Rapporteur

Rapporteuse

Examinateur

Examinateur

Examinateur

Examinateur

**T
H
È
S
E**

À mes parents.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier tout d'abord les membres du jury. J'estime vos travaux et je suis fier que vous ayez évalué ma thèse. Merci à Nadine Couture et Jean-François Boujut d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci à Bernard Yannou de m'avoir fait l'honneur de présider le jury et merci à Benjamin Deguilhem d'avoir participé à l'examen des travaux.

Je remercie mes directeurs de thèse, Améziane Aoussat et Philippe Véron. Votre expérience et votre pragmatisme ont contribué à la réalisation de ma thèse. Je remercie chaleureusement Camille Jean pour son encadrement. Merci d'avoir toujours été disponible, à l'écoute, pertinent et de m'avoir accordé une grande autonomie dans la conduite de mes recherches. Merci également de m'avoir introduit avec bienveillance dans le monde de la recherche scientifique.

Je souhaite ensuite remercier l'ensemble des membres du LCPI. Chacun à votre façon vous avez su m'aider durant ma thèse. Merci aussi pour tous ces moments conviviaux au quotidien. Par ailleurs, je remercie mes camarades doctorants avec lesquels je me suis lié d'amitié. Quelle chance d'avoir partagé avec vous nombre de discussions intéressantes ainsi qu'une entraide altruiste et réciproque. Je garde de bons souvenirs de nos moments informels et joyeux. J'espère continuer à vous voir.

Puis, merci à tous mes proches et amis de plus longues dates qui m'ont aidé peut-être sans même le savoir. Nos moments ensemble m'ont aidé à retrouver des instants de quiétude et d'insouciance. Merci Clémence, ta douce et radieuse présence m'a été précieuse tout au long de ma thèse.

Enfin, je tiens à remercier ma famille à laquelle je dédie mes travaux de thèse. Merci à ma mère Annick dont je mesure l'immense dévotion pour notre bonheur familial. Merci à mon frère Gauthier, à mon père Jean-Michel et à mes grands-parents, Marie-Luise et Michel, Evelynn et Ukrit. Merci à tous pour votre soutien sans faille et votre affection sans limite depuis toujours. Je vous porte dans mon cœur avec fierté.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	7
Chapitre 1 : CONTEXTE.....	12
1.1. Contexte industriel.....	14
1.1.1 L'avènement des systèmes embarqués.....	14
1.1.2 Vers un nouveau paradigme industriel.....	17
1.1.3 Question de recherche	21
1.2. Contexte scientifique	22
1.2.1 La conception de produits	23
1.2.2 Les technologies de l'information et de la communication	28
1.2.3 Les sciences des données	31
1.3. Contexte du laboratoire de recherche	34
1.3.1 Contexte de la thèse.....	34
1.3.2 Contexte national.....	36
1.3.3 Contexte international	37
1.4. Conclusion sur le contexte.....	38
Chapitre 2 : ÉTAT DE L'ART	39
2.1. La conception de produits et les données captées	41
2.1.1 La conception de produits avec les données captées.....	42
2.1.2 La conception de produits pour les données captées.....	46
2.1.3 Les enjeux des données captées dans la conception de produits.....	49
2.2. Perspectives académiques des enjeux.....	52
2.2.1 Structure du workshop	53
2.2.2 Participants	54
2.2.3 Déroulement et analyse	54
2.2.4 Résultats	55
2.3. Perspectives industrielles des enjeux.....	56
2.3.1 Structure des entretiens	57
2.3.2 Participants	58
2.3.3 Déroulement et analyse	59
2.3.4 Résultats	60
2.4. Synthèse des enjeux.....	65

2.5.	Conclusion sur l'état de l'art	69
CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSE ET PROPOSITION D'UNE		
MÉTHODE OUTILLÉE		70
3.1.	Problématique	72
3.2.	Proposition d'une méthode et hypothèse	72
3.2.1	Construction générale de la méthode	72
3.2.2	Hypothèse de résolution	74
3.3.	Construction de la phase d'exploration	75
3.3.1	Créativité dans la conception amont de produits	75
3.3.2	Construction de l'outil d'exploration	76
3.3.3	Déroulement de la phase d'exploration.....	81
3.4.	Construction de la phase de sélection.....	83
3.4.1	Aide à la décision dans la conception amont de produits	83
3.4.2	Construction d'un outil de sélection.....	86
3.4.3	Déroulement de la phase de sélection	93
3.5.	Conclusion sur la proposition méthodologique	95
CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATIONS.....		96
4.1.	Expérimentation de la phase d'exploration	98
4.1.1	Contexte de validation.....	98
4.1.2	Protocole expérimental.....	99
4.1.3	Déroulement	102
4.1.4	Résultats	105
4.1.5	Discussions.....	111
4.1.6	Conclusion.....	114
4.2.	Expérimentation de la phase de sélection.....	114
4.2.1	Contexte de validation.....	114
4.2.2	Protocole expérimental.....	115
4.2.3	Déroulement	121
4.2.4	Résultats	124
4.2.5	Discussions.....	127
4.2.6	Conclusion.....	129
4.3.	Expérimentation du potentiel pédagogique	130
4.3.1	Contexte	130

4.3.2	Protocole expérimental.....	132
4.3.3	Déroulement.....	136
4.3.4	Résultats.....	138
4.3.5	Discussions.....	142
4.3.6	Conclusion.....	144
4.4.	Conclusion sur les expérimentations.....	145
CHAPITRE 5 : APPORTS ET LIMITES.....		146
5.1.	Apports d'investigations.....	148
5.1.1	Apports.....	148
5.1.2	Limites.....	149
5.2.	Apports méthodologiques.....	150
5.2.1	Apports.....	150
5.2.2	Limites.....	152
5.3.	Apports pédagogiques.....	154
5.3.1	Apports.....	154
5.3.2	Limites.....	155
5.4.	Conclusion sur les apports.....	156
CHAPITRE 6 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		157
6.1.	Conclusion.....	158
6.2.	Perspectives.....	162
6.2.1	Court terme.....	162
6.2.2	Moyen terme.....	163
6.2.3	Long terme.....	164
6.3.	Productions scientifiques.....	167
RÉFÉRENCES.....		168
LISTE DES FIGURES.....		180
LISTES DES TABLEAUX.....		183
ANNEXES.....		184

INTRODUCTION

Objectifs des travaux

Les composants électroniques comme les capteurs, microprocesseurs, actionneurs ou émetteurs sont des éléments essentiels aux systèmes électroniques embarqués. Ces derniers lorsqu'ils sont intégrés dans des produits physiques permettent de les doter de capacités informatiques et communicationnelles. De tels produits sont alors capables de mettre en œuvre des fonctionnalités irréalisables par les produits classiques. Ils peuvent surveiller et enregistrer les données relatives à leurs fonctionnements, leurs usages ou leurs environnements. Ils peuvent réagir automatiquement à ces données ou être contrôlés à distance. Ils peuvent également adapter leur fonctionnement pour l'optimiser ou même être autonomes dans leurs fonctionnalités. Ces capacités inédites ouvrent à de nouvelles opportunités de création de valeurs pour les industriels. De plus, les composants électroniques, fondamentaux aux systèmes embarqués, se sont largement développés au cours de ces dernières années et ils continuent de s'améliorer rapidement. Ils sont notamment devenus moins coûteux, moins énergivores et moins encombrants. Les capacités inédites qu'ils offrent par leur intégration ont ainsi été rendues accessibles à une large gamme de produits et par extension d'industries. Cependant, la mise en œuvre des créations de valeurs propres aux produits dotés de capacités informatiques et communicationnelles est complexe. La nature hybride, à la fois physique et numérique, de ces produits requiert des organisations et structures dédiées lors de l'ensemble de leur cycle de vie. Au cours de ce cycle, la phase de conception du produit apparaît essentielle car elle définit les composants électroniques embarqués et donc intrinsèquement les futures créations de valeurs possibles. Cependant, il ne semble pas exister de méthode commune pour guider au mieux cet aspect essentiel de la conception. Cela est attribuable à l'introduction nouvelle des composants électroniques complexes à une large gamme de produits ainsi que la nouveauté des créations de valeurs qu'elles permettent. Pour pallier le manque de soutien méthodologique, les travaux de cette thèse visent à construire et expérimenter une proposition de méthode outillée pour structurer une partie de la conception des produits dotés de systèmes électroniques embarqués.

Méthode de recherche

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre de la recherche en conception. Ils suivent alors le cadre proposé par la méthode de recherche en conception proposée par Blessing et Chakrabarti (2009) : la *Design Research Method* (DRM). Il s'agit d'une méthode générique proposant une structure commune et rigoureuse à la recherche dans le domaine de la conception. La DRM est illustrée sur la figure 1.

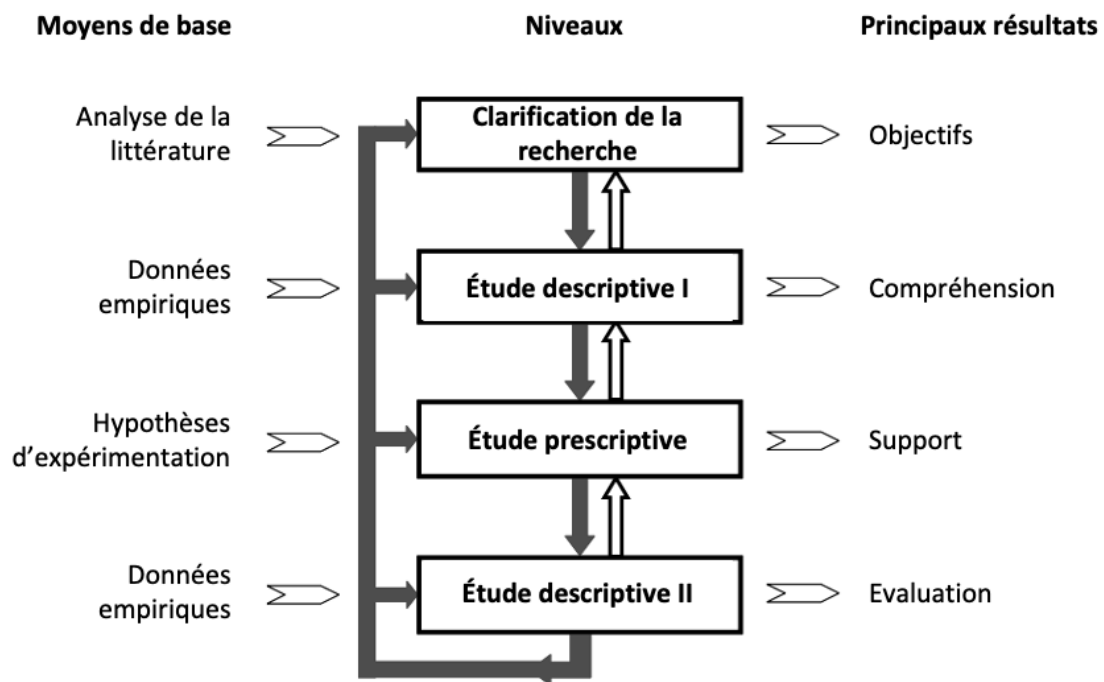


Figure 1 Processus de la *Design Research Method* (adaptée de Blessing et Chakrabarti, 2009)

La DRM comprend les quatre étapes suivantes :

- La première étape de *clarification de la recherche* a pour objectif de confirmer un postulat de recherche initial au travers d'une investigation, puis de fixer un objectif de recherche clair. Dans le contexte de ces travaux de thèse, cette investigation est réalisée au travers d'une analyse de la littérature scientifique.
- L'objectif de la deuxième étape d'*étude descriptive I* est de comprendre la situation actuelle de la recherche menée et ses enjeux. Ainsi, les résultats de cette étape mettent en évidence les facteurs que la recherche doit aborder afin d'améliorer la situation. Pour faire état de la situation actuelle, il est possible de s'appuyer sur la recherche scientifique

disponible en science de la conception. Mais dans le cas où elle viendrait à manquer, il est alors nécessaire d'observer et d'interroger les concepteurs concernés pour avoir un aperçu approfondi de la situation. En ce sens, dans ces travaux, une étude de la littérature scientifique est complétée par un workshop avec des chercheurs ainsi que des entretiens avec des industriels.

- L'*étude prescriptive* se base sur la compréhension de la situation actuelle et de ses enjeux définis lors de l'étape précédente afin de développer une solution appropriée. Pour cette thèse, une proposition méthodologique outillée est construite.
- La dernière étape de la DRM est une seconde *étude descriptive II*. L'objectif est d'appliquer et d'évaluer la mise en œuvre de la solution développée précédemment. Dans le cadre de ces travaux de recherche, la proposition méthodologique outillée a été expérimentée auprès d'industriels et de chercheurs. Il a été possible d'évaluer notamment l'utilité et l'utilisabilité de la méthode proposée.

Structure de la thèse

Ces travaux de thèse sont présentés en six chapitres s'ajoutant à la présente introduction. Les quatre premiers chapitres traitent respectivement des quatre étapes de la DRM, tandis que les chapitres restants résument et concluent les travaux. La structure de la thèse et son lien avec la DRM sont illustrés sur la figure 2.

Le premier chapitre présente le contexte industriel actuel et ses enjeux dans lesquels s'inscrivent ces travaux de thèse. Il en émerge une question de recherche. Ce chapitre positionne alors la recherche menée dans le cadre des domaines scientifiques connexes à la question. En ce sens, ce chapitre traite de l'étape de *clarification de la recherche* de la DRM. Il présente ensuite les thématiques de recherche des laboratoires impliqués ainsi que certains laboratoires nationaux et internationaux pertinents.

Le deuxième chapitre propose un état de l'art relatif aux données captées dans la conception de produits. Il présente les approches en conception s'appuyant sur les créations de valeurs offertes par les données captées mais aussi les approches de conception pour mettre en œuvre des créations de valeurs basées sur les données captées. Il présente ensuite les enjeux liés aux

données captées dans le processus de conception. L'étude des enjeux de la littérature scientifique est complétée par les perspectives des enjeux de chercheurs et d'industriels récoltées respectivement au travers d'un workshop et d'entretiens. L'ensemble des enjeux est finalement synthétisé. Ce chapitre traite ainsi l'*étude descriptive I* de la DRM.

Le troisième chapitre se base sur la synthèse des enjeux issus de la partie précédente pour amener à la problématique de recherche de cette thèse de doctorat. Une approche méthodologique est proposée pour y répondre et une hypothèse de résolution est formulée en ce sens. L'approche est scindée en deux parties successives, chacune des parties est soutenue par un outil dédié. La construction des deux outils accompagnant la méthode est présentée. Ce chapitre traite ainsi l'*étude prescriptive* de la DRM.

Le quatrième chapitre présente les expérimentations mises en œuvre pour valider l'hypothèse, et donc la proposition méthodologique outillée. La méthode proposée étant scindée en deux parties successives, une expérimentation pour chacune des parties est proposée. Les résultats et leurs analyses sont ensuite présentés dans ce chapitre. De plus, le potentiel didactique des outils développés en support à la méthode est également éprouvé. Ce chapitre présente les expérimentations et résultats de cette étude pédagogique. Ce chapitre traite ainsi l'*étude descriptive II* de la DRM.

Le cinquième chapitre résume les apports d'investigations, méthodologiques et pédagogiques de ces travaux de recherches. Les limites de ces travaux sont également évoquées dans cette partie pour chacune des domaines mentionnés.

Enfin le sixième chapitre conclut les travaux de thèse et présente les perspectives de recherche à court, moyen et long terme.

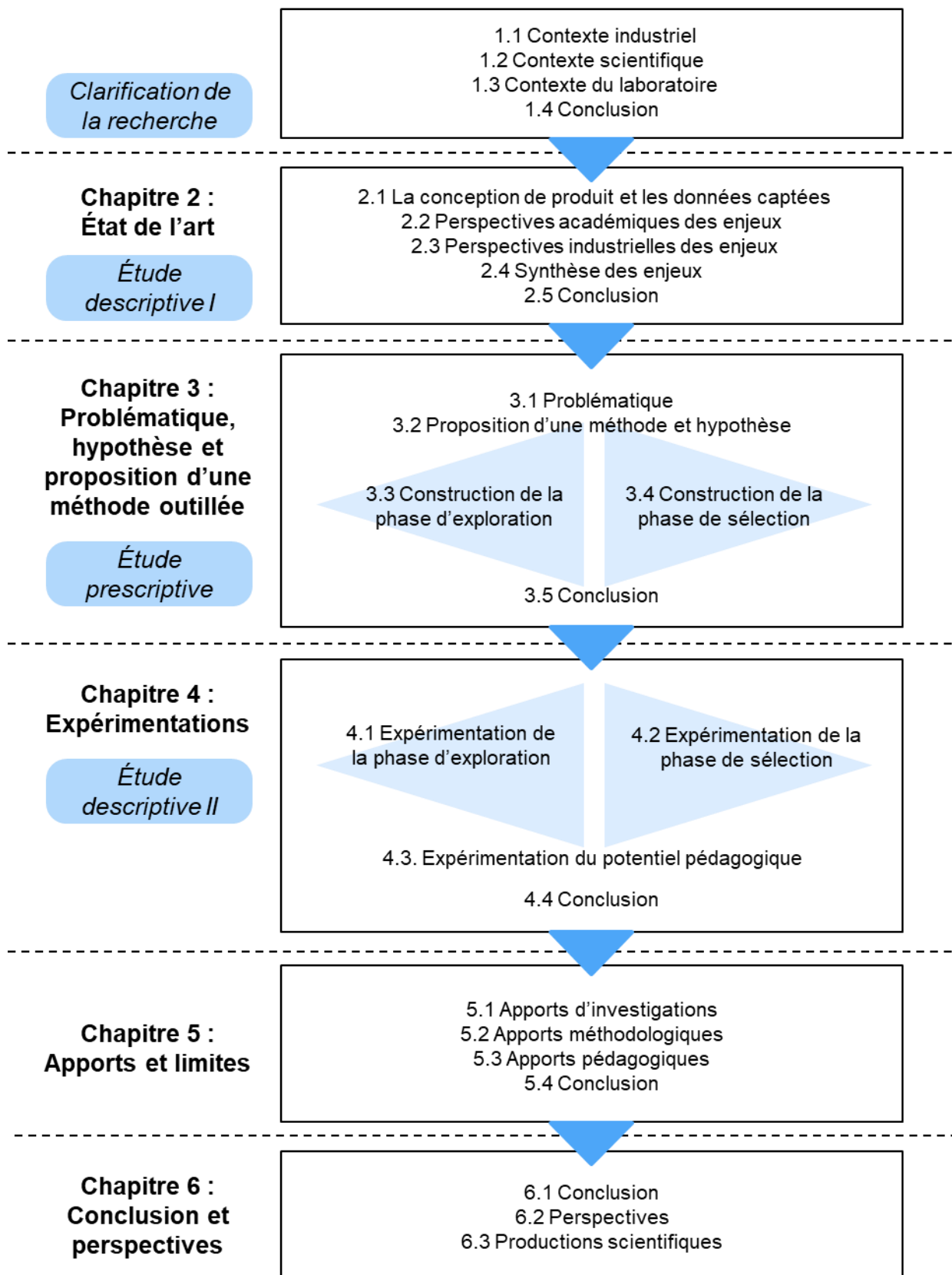


Figure 2 Vue globale de la structure de la thèse

Chapitre 1 : CONTEXTE

Le premier chapitre de *clarification de la recherche* présente le contexte fondamental de ces travaux de thèse. Tout d'abord la section 1.1 présente le contexte industriel, elle décrit les enjeux de l'intégration de composants électroniques complexes dans les produits physiques, les nouvelles créations de valeurs qui en émergent mais également les prérequis à leurs mises en œuvre efficaces. La section se conclut par l'émergence d'une question de recherche. La section 1.2 pose le contexte scientifique dans lequel s'inscrivent les travaux pour répondre à cette question. Elle présente les domaines de recherche scientifiques connexes et leurs principales notions impliquées. Les sciences de la conception de produits, des technologies de l'information et de la communication, de l'analyse des données sont ainsi introduites. La section 1.3 présente le cadre académique des travaux de recherche. Elle décrit les recherches des laboratoires impliqués dans ces travaux et mentionne les laboratoires nationaux et internationaux aux thématiques de recherche analogues. Enfin la section 1.4 synthétise l'ensemble des éléments clefs du chapitre pour conclure. La structure du chapitre est illustrée sur la figure 3.

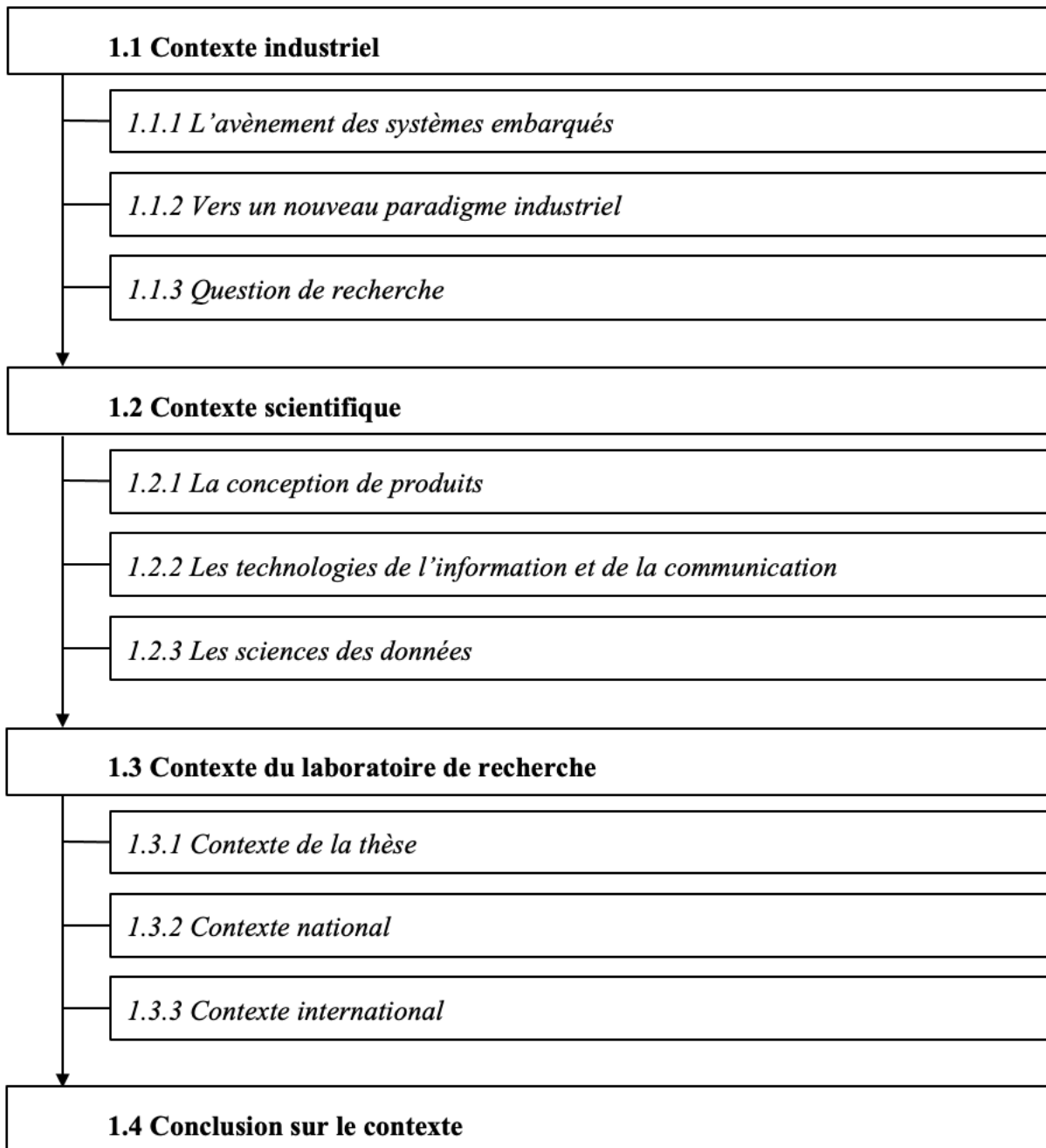


Figure 3 Plan du chapitre « Contexte »

1.1. Contexte industriel

1.1.1 L'avènement des systèmes embarqués

Les récents progrès des technologies de l'information et de la communication (TIC) ont permis la miniaturisation et la diminution des coûts de composants électroniques complexes tels que les microprocesseurs, capteurs, actionneurs, émetteurs, récepteurs. Dans le même temps, leurs performances ont été grandement améliorées (Yoo, 2010). Par conséquent, les produits physiques sont de plus en plus dotés de composants électroniques embarqués, donc d'une puissance informatique les pourvoyant d'intelligence et de connectivité (Marwedel, 2018). L'intelligence d'un produit d'une part est définie par son degré d'aptitude à assurer une ou plusieurs des fonctionnalités suivantes : « autonomie, adaptabilité, réactivité, multifonctionnalité, capacité à coopérer, interaction avec l'humain et personnalité » (Rijsdijk et Hultink, 2009) (traduit par l'auteur). La connectivité d'autre part est définie par sa capacité à communiquer, transmettre et recevoir des données, avec d'autres produits, son fabricant ou son utilisateur. L'intégration de l'intelligence et de la connectivité dans les produits permet la mise en œuvre de très nombreuses nouvelles fonctionnalités, irréalisables pour les produits qui ne sont pas dotés d'électroniques embarquées. Ces nouvelles créations de valeurs reposent en effet sur des capacités exclusives aux produits intelligents et connectés. Ces capacités ont été définies et classifiées par Porter et Heppelmann (2014). Chacune des capacités s'appuie sur celles qui la précèdent. Les différentes capacités permises par l'intégration de l'intelligence et de la connectivité sont résumées et illustrées sur la figure 4.

Les capacités sont bâties les unes sur les autres :

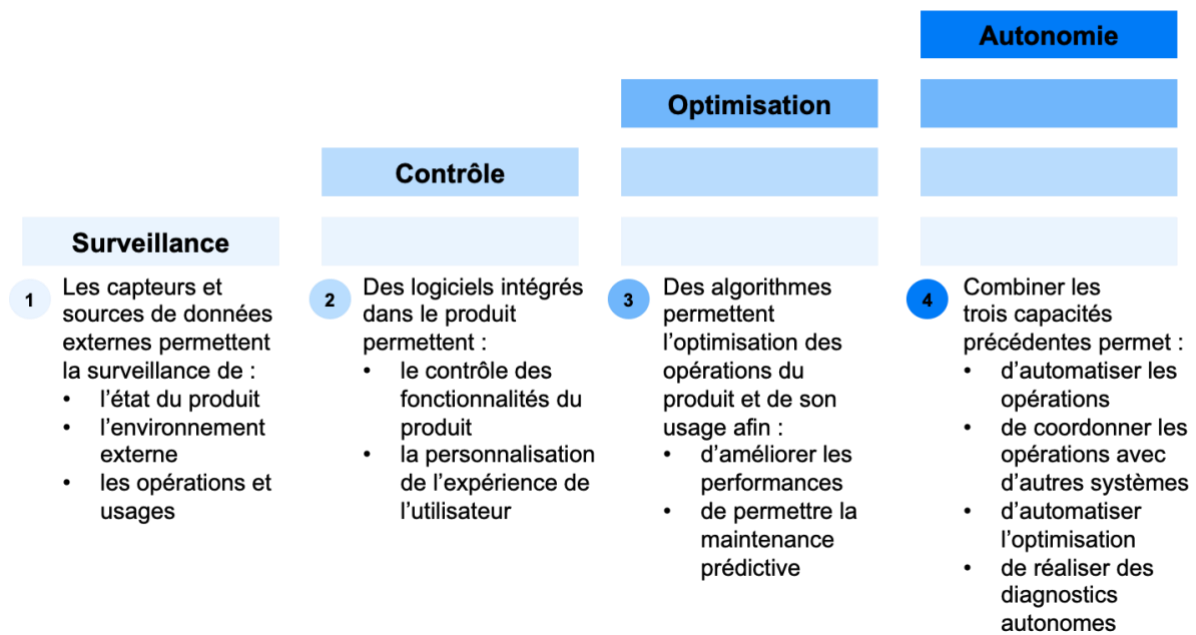


Figure 4 Capacités des produits intelligents et connectés (adaptée de Porter et Heppelmann, 2014)

À la base se trouve la capacité de surveillance. Elle décrit la faculté des produits intelligents et connectés à capter des données informant sur leurs états, leurs fonctionnements ou leurs environnements extérieurs. Les produits de santé portables connectés comme des bracelets par exemple utilisent des capteurs embarqués pour collecter des informations sur la santé de l'utilisateur. Dans le domaine du sport, des systèmes similaires existent pour permettre à l'utilisateur un suivi de ses performances physiques au travers par exemple de montres connectées. Les données peuvent aussi s'avérer utiles pour les utilisateurs des produits afin de les assister dans la bonne utilisation du produit. Ces données d'usage sont également précieuses pour les fabricants qui peuvent ainsi accéder aux conditions d'usages réels de leurs produits. Ils peuvent s'appuyer sur ces données pour mieux concevoir les nouvelles générations de produits afin qu'elles soient plus robustes et plus durables (Abramovici et Lindner, 2011 ; Klein et al., 2019). Par exemple, les données relatives à l'usage de réfrigérateurs connectés ont été utilisées afin de concevoir une nouvelle génération moins consommatrice d'énergie (Vegte et al., 2019). L'examen des données d'usage permet également d'identifier les usages incorrects ou détournés du produit et d'en informer les fabricants (Bogers et al., 2016). Enfin, lors du recyclage d'un produit, les données d'usages peuvent également être utiles pour évaluer l'état

de ces différents composants afin de récupérer ceux qui sont encore en bon état fonctionnel (Joshi et Gupta, 2019).

Basée sur la surveillance, la capacité de contrôle permet au produit d'agir automatiquement en suivant des algorithmes programmés ou au travers d'un contrôle à distance. Les algorithmes analysent les données captées par le produit et, dans certaines circonstances, peuvent induire une action du produit. Le contrôle à distance permet de transmettre une instruction induisant une action du produit par la connectivité. La capacité de contrôle est cruciale par exemple dans les produits du domaine de l'automatisation des bâtiments, les produits domotiques. En effet, les éclairages, le chauffage et les ventilations peuvent être contrôlés automatiquement en fonction de données captées comme la température, l'occupation des pièces et de données externes comme les horaires. De plus, des systèmes de sécurité peuvent également être activés automatiquement en cas de détection de dangers ou d'intrusion. Tous ces systèmes peuvent également être opérés manuellement à distance.

Ensuite, sur la base des capacités de surveillance et de contrôle repose celle d'optimisation. En effet, l'analyse des données captées par le produit en fonctionnement offre, via le contrôle, la possibilité d'optimiser ses performances à distance. Ainsi, au travers notamment de mises à jour des logiciels embarqués, les produits peuvent être reconfigurés à distance pour proposer des améliorations (Abramovici et al., 2017). Par exemple, dans le cas de véhicules électriques intelligents et connectés, les mises à jour logicielles du véhicule permettent d'améliorer la gestion de la batterie et le contrôle des moteurs électriques (Lyyra et Koskinen, 2016). En plus d'optimiser le produit et son fonctionnement, les entreprises peuvent également optimiser les services associés au produit. La maintenance prédictive est un exemple de service fondé sur les données qui est souvent évoqué (van der Vegte, 2016). L'analyse des données d'usage captées peut en effet révéler des données anormales ou des signes d'usure des composants. Il est ainsi possible d'anticiper les défaillances et de réaliser une maintenance du produit avant qu'elles ne se produisent (Dalzochio et al., 2020). C'est une pratique que l'on peut trouver dans des produits complexes comme les moteurs d'avion (Peppard et Ward, 2016).

Enfin, la combinaison des trois capacités précédentes de surveillance, contrôle et d'optimisation permet de mettre en œuvre la capacité la plus complexe pour les produits intelligents et connectés, la capacité d'autonomie. Les produits autonomes sont capables, sans intervention

humaine, d'effectuer des opérations, communiquer avec d'autres systèmes, s'adapter aux conditions qu'ils rencontrent et s'auto-diagnostiquer. À des niveaux de complexité simple, certains produits peuvent être considérés comme autonomes, par exemple les aspirateurs robots. À des niveaux plus complexes, de nombreux domaines cherchent à mettre en œuvre la capacité d'autonomie. C'est un des objectifs de l'industrie 4.0 qui tend vers l'automatisation de la production industrielle afin de la rendre plus efficace. Ainsi, dans le paradigme théorique de l'industrie 4.0, au sein d'une usine, les machines de production sont toutes intelligentes et connectées. Elles opèrent, se régulent et se coordonnent entre elles sans activité humaine grâce à la capacité d'autonomie (Klingenberg et al., 2019). On peut également mentionner le domaine du transport avec le développement des véhicules autonomes. En effet, de nombreuses recherches concernent les véhicules de transports personnels et collectifs afin de permettre leurs fonctionnements en autonomie. Ils seraient capables de suivre des itinéraires, s'adapter au trafic, à leurs environnements pour transporter sans risque et sans intervention humaine des personnes ou des biens.

1.1.2 Vers un nouveau paradigme industriel

Les progrès technologiques des TIC rendent plus accessibles les composants électroniques complexes. Par extension, les capacités des produits intelligents et connectés sont également accessibles à une plus large gamme de produits (Brynjolfsson et McAfee, 2014). Cet accès récent à de très nombreuses nouvelles fonctionnalités créatrices de valeurs entraîne un changement de paradigme majeur impactant les produits physiques mais également les industriels et leurs pratiques.

D'abord, selon la perspective des utilisateurs des produits intelligents et connectés, cette nouvelle tendance contribue à améliorer leur expérience en simplifiant par exemple leur accès à l'information, en leur offrant des fonctionnalités innovantes ou des services supplémentaires. Les industriels peuvent également proposer une expérience plus personnalisable car basée sur les données et prenant ainsi en compte le contexte de l'utilisateur. Les nouvelles possibilités d'échange de données et de communication des produits modifient par ailleurs la relation entre l'utilisateur et le fabricant, renforçant leur lien. En ce sens, les responsabilités des entreprises proposant des produits intelligents et connectés sont plus importantes (Troilo et al., 2017). Par

exemple, il est dorénavant attendu qu'elles proposent un suivi du produit lors de sa phase d'utilisation au travers de mises à jour pour corriger ou améliorer son fonctionnement. De plus, les entreprises se doivent de garantir la sécurité informatique des produits intelligents et connectés ainsi que de leurs données captées et transmises contre de potentielles entités malveillantes. Les risques liés aux piratages informatiques de ces produits peuvent s'avérer critiques pour les utilisateurs et le fabricant.

Selon une perspective industrielle, l'intelligence et la connectivité des produits renforce le lien entre l'utilisateur et le fabricant impliquant de nouvelles responsabilités pour ce dernier mais elles offrent également des nouvelles opportunités. Elles peuvent permettre de se différencier et d'obtenir des avantages concurrentiels au travers des créations de valeurs induites (Allmendinger et Lombreglia, 2005). En ce sens, les données captées issues de la phase d'utilisation des produits intelligents et connectés sont une ressource précieuse pour les entreprises. Par leur intermédiaire, les entreprises peuvent avoir une meilleure compréhension des conditions d'usages du produit et des besoins réels des utilisateurs. Ces données captées, inaccessibles sans intelligence et connectivité du produit, soutiennent ainsi la phase de conception du produit. Elles permettent de mieux concevoir la prochaine génération de produits en se basant sur les données captées par celle en service (Abramovici et Lindner, 2011 ; Klein et al., 2019). Par ailleurs, elles permettent également de l'accélérer et de diminuer ses coûts. En outre, l'intelligence et la connectivité des produits permettent aussi aux entreprises l'accès à de nouveaux modèles commerciaux (Chowdhury et al. 2018). En effet, en s'appuyant sur la capacité de contrôle à distance, les industriels peuvent vendre une combinaison de produit et de services appelée système produit-services (Baines et al., 2007). Les industriels peuvent vendre le produit physique et proposer des services additionnels supplémentaires payant. Les industriels peuvent également louer l'usage du produit et ses services pour une durée limitée et non plus vendre le produit lui-même. L'entreprise reste ainsi alors propriétaire du produit physique. Enfin, il est à noter que les données peuvent également être vendues par les entreprises à d'autres entreprises tierces pouvant ainsi bénéficier des informations sous-jacentes.

Cependant, pour bénéficier des opportunités offertes par le nouveau paradigme des produits intelligents et connectés, les entreprises industrielles doivent mettre en place des changements profonds au sein de leurs organisations (Porter et Heppelmann, 2015). En effet, le nouveau

paradigme repose sur plusieurs technologies complexes et en continuel développement. Les produits intelligents et connectés nécessitent l'intégration de composants électroniques embarqués dans le produit mais également l'intégration de logiciels numériques. Ainsi il faut pouvoir intégrer ses nouvelles dimensions dans le processus de conception du produit. Le bon déroulement de ce processus peut nécessiter de nouvelles infrastructures, méthodes et parties prenantes dédiées. En outre, la conception seule d'un produit intelligent et connecté n'est pas suffisante pour apporter de la valeur à l'utilisateur et à l'entreprise. Tout au long de la phase d'utilisation du produit, les entreprises doivent pouvoir collecter et analyser les données afin d'en extraire de la valeur. Le bon déroulement de ce processus peut également nécessiter de nouvelles infrastructures, méthodes et parties prenantes dédiées. De plus, l'échange de données ainsi que la partie numérique du produit implique des responsabilités à assurer aussi tout au long du cycle de vie du produit. Les industriels doivent pouvoir sécuriser les données sensibles récoltées par leur produit. Ils doivent aussi garantir la sécurité informatique de leurs produits et des échanges de données contre de potentielles cyberattaques. Ces responsabilités induisent l'intégration de nouvelles ressources dédiées dans les organisations.

Ainsi, au vu de l'ensemble de ces considérations, il apparaît difficile à une organisation sans structure organisationnelle ni ressource adaptée de pouvoir correctement mettre en œuvre et exploiter les créations de valeurs des produits intelligents et connectés. La tendance au développement des produits intelligents et connectés est prévue à la hausse. En effet, selon le rapport de la Design Society (Isaksson et Eckert, 2020) qui anticipe l'avenir du développement des produits en 2040, la connectivité des futurs produits continuera de croître et avec elle, la collecte et l'utilisation des données générées. Corroborant ces prévisions, le nombre de produits intégrant des technologies embarquées va continuer à croître passant de près de 10 milliards en 2020 à plus de 30 milliards en 2030 d'après certaines prévisions illustrées figure 5 (Transforma Insights, 2023). Il semble donc essentiel pour les industriels concernés de mettre en place les structures organisationnelles nécessaires.

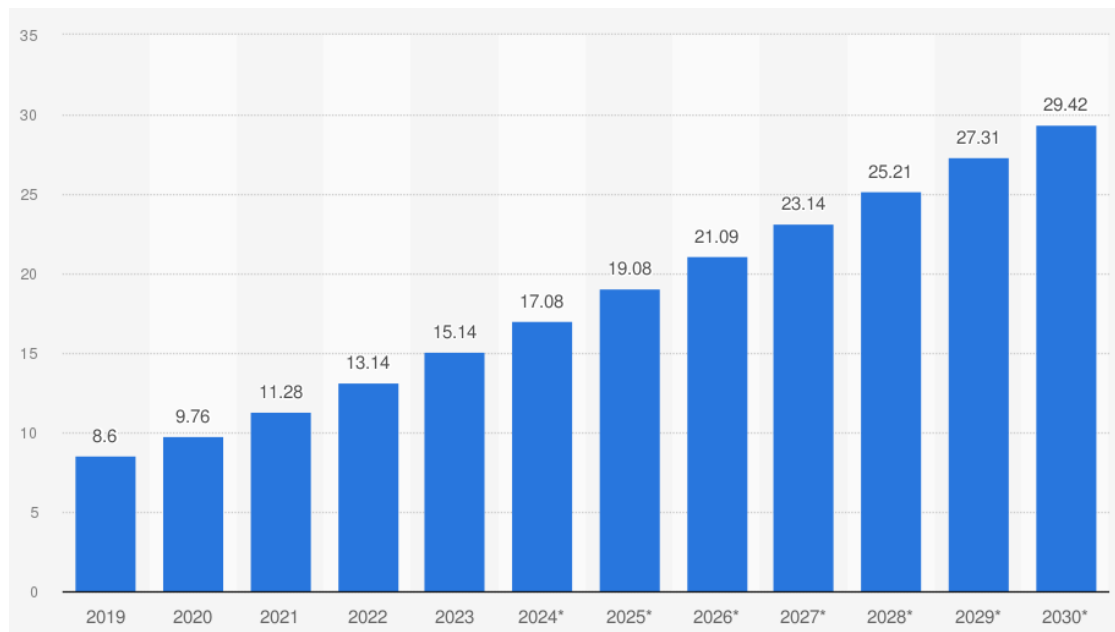


Figure 5 Nombre d'appareils connectés dans le monde de 2019 à 2023 et prévisions de 2024 à 2030 (en milliards) (Transforma Insights, 2023)

L'essor et le développement des données numériques dans les produits physiques et leurs utilisations sont associés à différents champs de recherches et de technologies qui sont encore en pleine expansion. D'abord au domaine des technologies de communications pour recevoir et transmettre les données, des nouvelles technologies émergentes comme le réseau 6G devrait avoir un impact sur les produits intelligents et connectés au travers de l'amélioration de la connectivité. Ensuite au domaine des technologies de l'informatique, la loi de Moore prévoit des puissances de calculs toujours plus importantes qui pourraient être embarquées dans les produits physiques. Enfin dans le domaine des sciences des données, les avancées récentes liées à l'intelligence artificielle pourraient impacter les produits intelligents et connectés et ouvrir la voie à de nouvelles créations de valeurs supplémentaires. Ainsi il est attendu que les produits intelligents et connectés continuent à se développer avec les technologies innovantes et les avancées scientifiques.

Cependant cet essor des produits intelligents et connectés n'est pas sans limites. Les ressources matérielles rares nécessaires à la fabrication des composants électroniques essentiels sont physiquement restreintes et géographiquement localisées. Certains matériaux sont même déjà sujets à des tensions économiques et politiques à l'image des terres rares, matériaux essentiels à la fabrication de hautes technologies. De plus la fabrication et l'usage des composants

électriques dans les produits physiques induisent un impact environnemental plus important en comparaison à des produits classiques. En ce sens, un retour à un usage nécessaire et raisonné de ces technologies est invoqué afin de ne conserver que les applications essentielles (Nižetić et al., 2020). En effet, certaines créations de valeurs des produits intelligents et connectés peuvent participer positivement au développement durable malgré leurs surcoûts environnementaux inhérents (Pagoropoulos et al., 2017).

1.1.3 Question de recherche

L'avènement de l'électronique embarqué a permis le développement et la démocratisation des produits intelligents et connectés. Ils induisent un nouveau paradigme au travers de la mise en œuvre de très nombreuses créations de valeurs à la fois pour les utilisateurs et les industriels. Ces créations de valeurs reposent sur les nouvelles capacités propres aux produits intelligents et connectés (Porter et Heppelmann, 2014). Pour rappel, les capacités ont été décrites dans la sous-section 1.1.1 et sont les suivantes : surveillance, contrôle, optimisation et autonomie. Chacune des capacités repose par définition sur celles qui la précèdent pour être mises en œuvre. À la base des capacités, et donc par extension à la base des créations de valeurs, se trouve la capacité de surveillance. Elle est décrite comme la capacité du produit à informer sur son état, son utilisation ou son environnement extérieur via les données des capteurs embarqués et les sources de données externes. En ce sens, les données sont l'essence des capacités et donc des créations de valeurs propres aux produits intelligents et connectés.

Si les sources de données externes sont en dehors du champ d'action des entreprises, ce sont ces dernières qui définissent les données pouvant être captées par leurs produits intelligents et connectés. En effet, le choix des données captées est défini intrinsèquement par le choix des capteurs embarqués dans le produit. Par conséquent, le choix des données pouvant être captées est réalisé au moment de la conception du produit. En ce sens, avant même la matérialisation du produit, ses concepteurs doivent anticiper les données pertinentes à capter afin de proposer des créations de valeurs pour les utilisateurs ou leur entreprise. En d'autres termes, les industriels, dans un contexte de conception à la fois physique et numérique, se doivent d'anticiper en amont les données à capter pertinentes pour tout le reste de la vie du produit. Dans ce contexte, le choix des données captées générant des créations de valeurs apparaît

critique et complexe. Au regard de ce constat, la question de recherche industrielle abordée par ces travaux de thèse est la suivante :

Comment concevoir des produits intelligents et connectés exploitant au mieux les données captées pour générer des créations de valeurs ?

La partie suivante de contexte scientifique définit les domaines de recherches scientifiques connexes à cette question.

1.2. Contexte scientifique

Pour répondre à la question de recherche industrielle, il convient d'abord de délimiter le contexte scientifique. Le contexte scientifique définit les objets d'étude ainsi que les domaines de recherche scientifiques associés. Ainsi, il pose un cadre essentiel à la recherche menée par ces travaux de thèse. L'exploitation des données numériques et plus particulièrement celle des données captées par les produits intelligents et connectés semble offrir de nombreuses nouvelles créations de valeurs. Cependant, pour en tirer le plus grand potentiel, il est nécessaire d'anticiper les données captées qui seront pertinentes à analyser dès la conception des produits afin d'intégrer le système électronique embarqué adéquat. Ainsi, trois domaines d'étude principaux sont concernés par la question de recherche. Les sciences de la conception de produits sont essentielles pour organiser la réalisation des produits intelligents et connectés permettant la mise en œuvre efficace des créations de valeurs. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont essentielles aux produits pour collecter, traiter et transmettre les données. Enfin les sciences des données sont essentielles à l'extraction d'informations des données captées et donc aux créations de valeurs. Le positionnement de la recherche est résumé dans la figure 6.

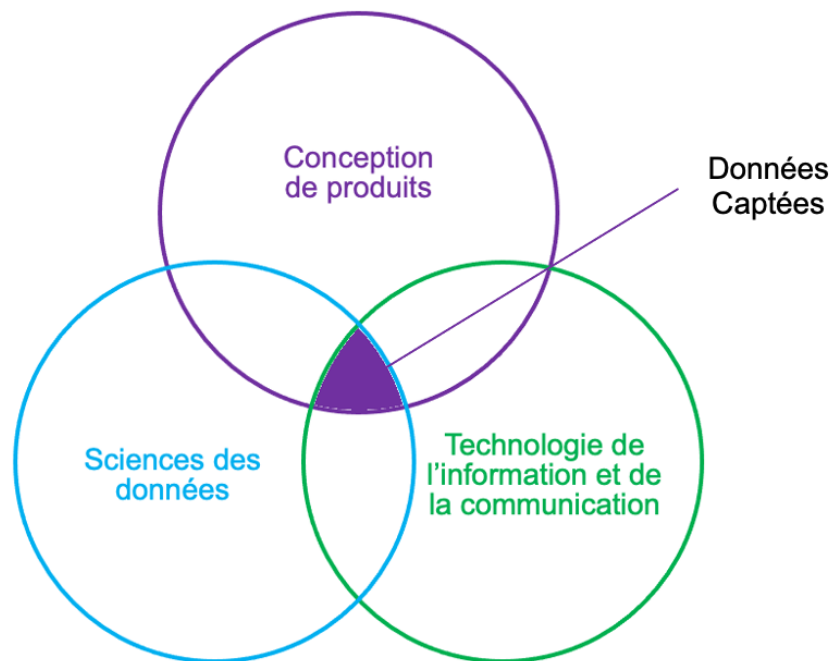


Figure 6 Périmètre des travaux de thèse

1.2.1 La conception de produits

Une définition commune de la conception de produits la présente comme « la succession des étapes nécessaires à l’obtention d’un produit répondant à des besoins identifiés » (Ullman, 1992). Les sciences de la conception ont pour objectif de comprendre et d’améliorer ce processus notamment au travers de proposition de méthodes et d’outils. Il existe en ce sens de très nombreuses propositions pour guider le processus de conception de produits. Certaines méthodes proposant des processus génériques sont établies comme référence dans les sciences de la conception.

C’est le cas de l’approche systématique de la conception de produits proposée par Pahl et Beitz (2007). Il s’agit d’une approche généraliste de la conception centrée sur le produit. La figure 7 illustre la méthode systématique de conception de produits dans son ensemble.

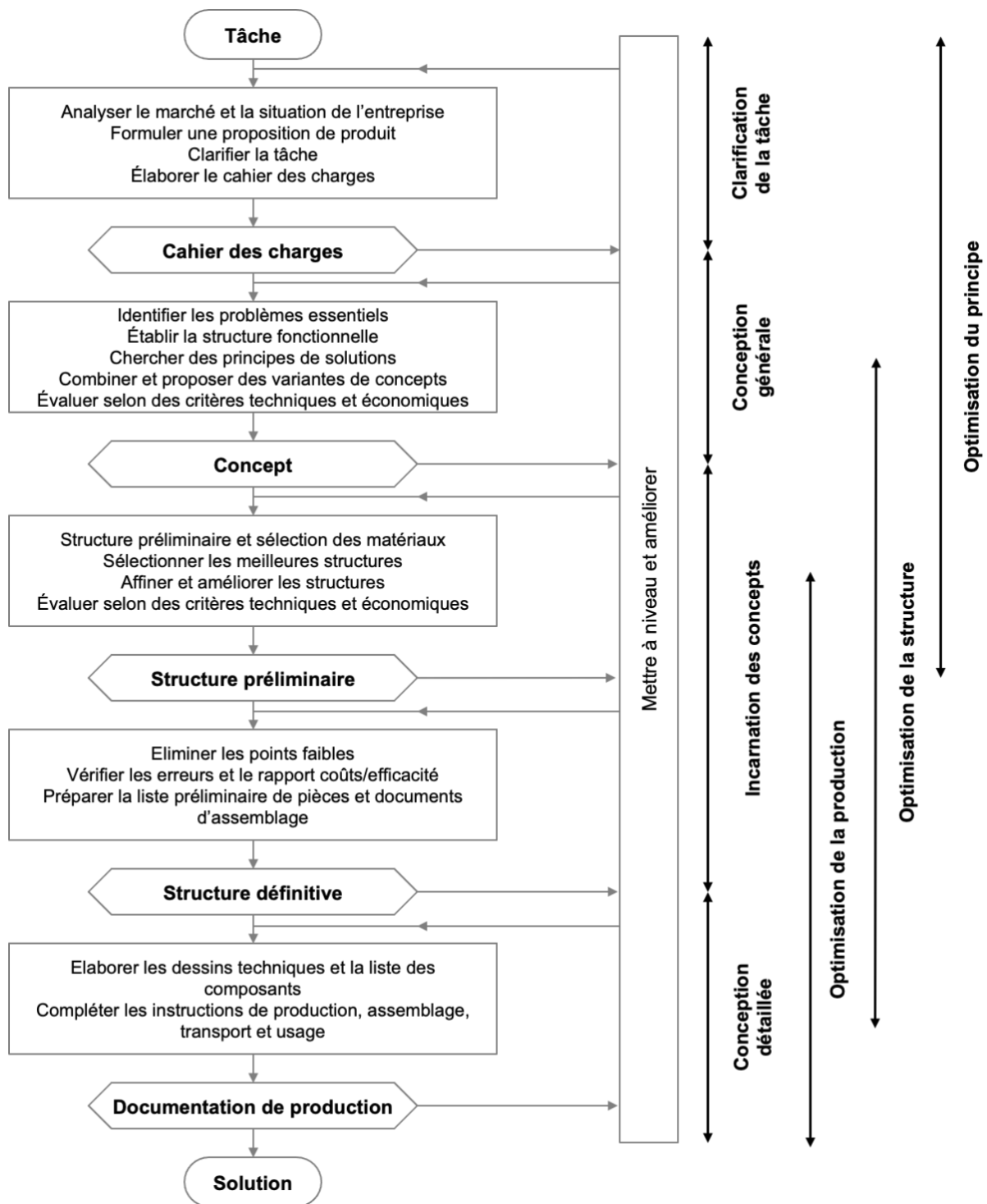


Figure 7 Processus de *Systematic Design* (adaptée de Pahl et Beitz, 2007)

L'approche systématique se déroule en quatre grandes étapes :

- La première phase *clarification de la tâche* durant laquelle les concepteurs analysent le marché, cherchent des idées, formulent des propositions de produit et élaborent un cahier des charges.

- Ensuite, dans la phase de *conception générale*, il s'agit d'établir les principaux problèmes et structures fonctionnelles de la proposition retenue afin de formuler des principes de fonctionnement et de proposer des variantes de concepts à évaluer selon des critères techniques et économiques.
- Dans la phase *incarnation du concept*, le concept sélectionné est mis en forme. Les concepteurs font et raffinent le choix de ses formes, de ses matériaux, etc. au travers de simulations numériques et physiques et d'une évaluation selon des critères techniques et économiques.
- Enfin dans la phase de *conception détaillée*, les concepteurs définissent sa mise en production de la solution au travers de la mise en plan, la liste des composants requis, etc.

Une autre approche de référence mais centrée sur l'utilisateur plutôt que le produit est l'approche du *Design Thinking*. Elle a été introduite par Rowe (1987) et adaptée par Brown (2008). C'est une approche en quatre grandes étapes se déroulant en deux phases successives de divergence puis convergence :

- La première étape *découvrir* du processus est divergente. Il s'agit d'une étape d'étude empathique des utilisateurs pour comprendre leurs différents usages et attentes du produit.
- La phase suivante, convergente, *définir* permet de traduire ces précédentes observations pour définir les besoins réels des utilisateurs et ainsi cadrer le problème.
- Une nouvelle phase divergente commence alors, la phase *développer*. C'est une phase de créativité dans laquelle les concepteurs imaginent des solutions pour répondre aux besoins réels précédemment définis.
- À l'issue de cette phase, les différents concepts de solutions sont testés et évalués pendant la dernière phase *délivrer* afin de garder la solution qui convient le mieux aux futurs utilisateurs.

Le processus du *Design Thinking* est souvent représenté par un double diamant illustrant les deux phases de divergence/convergence (Design Council UK, 2005). Il est représenté et résumé sur la figure 8.

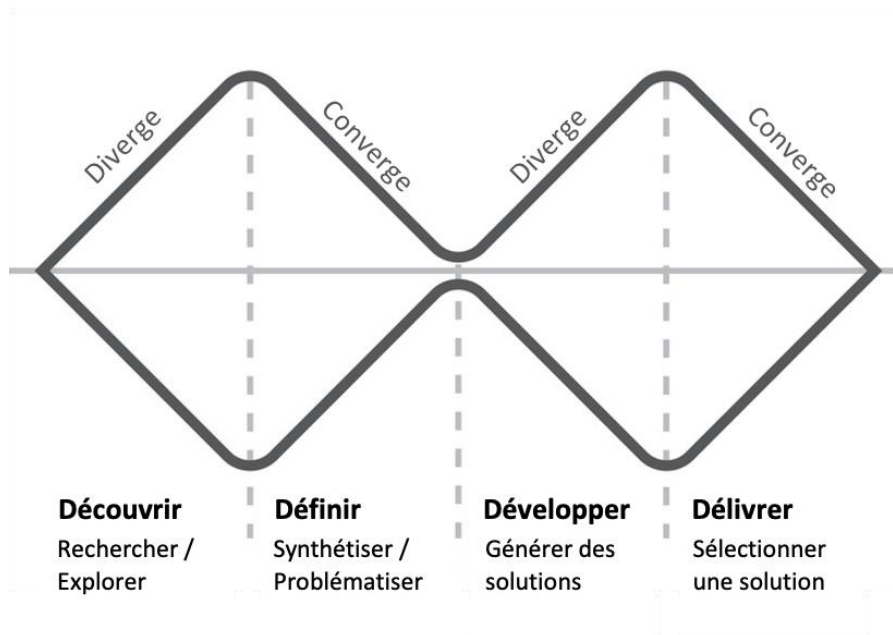


Figure 8 Processus de *Design Thinking* (adaptée de Design Council UK, 2005)

D'autres théories ou méthodes de conception génériques plus complexes peuvent être également mentionnées comme la théorie TRIZ (Altshuller, 1984), la théorie FBS (Gero, 1990), la méthode de New Product Design (Aoussat et al., 2000), la théorie CK (Hatchuel et al., 2003) ou encore la méthode Radical Innovation Design (Yannou, 2015). Tandis qu'une partie des méthodes proposées par les sciences de la conception se veulent holistiques, d'autres se concentrent sur des spécificités ou des objectifs lors de la conception. C'est le cas par exemple de l'ensemble des méthodes issues du « *Design for X* » (DfX). Dans ces approches, le X peut se décliner sous de nombreuses formes et représente un objectif précis pour le processus de conception (Huang, 1996). On peut noter, de façon non exhaustive, le X comme spécificité lors d'une phase du cycle de vie produit « Design for Additive Manufacturing », comme propriété du produit « Design for Reliability », comme concept général « Design for Sustainability ». Ces méthodes guident les concepteurs lors de la conception afin d'optimiser la spécificité X choisie au plus tôt dans la conception de produits. Certaines de ces méthodes peuvent être utilisées seules tandis que d'autres peuvent être intégrées suivant les besoins des concepteurs dans un processus de conception holistique.

Toutefois, la conception de produits est confrontée à une difficulté intrinsèque à son processus. Plus on est en amont de la conception, moins il y a d'informations établies pour appuyer des décisions (Ullman, 1992). Les connaissances spécifiques du produit s'accroissent à mesure que

son cycle de vie avance. Pourtant, c'est sur la base des choix effectués lors des phases amont de la conception qu'une grande partie des coûts financiers (Ullman, 2009) ainsi qu'une partie aussi considérable de l'impact environnemental (Diaz et al., 2021) du produit sont engagées. Les concepteurs ont donc, lors des phases amont, la tâche complexe de faire des choix qui engagent de larges impacts avec peu d'informations. À cela s'ajoute une complexité supplémentaire, les modifications sur le produit sont également de plus en plus difficiles à réaliser à mesure que le cycle de vie avance. Ces enjeux sont illustrés sur la figure 9.

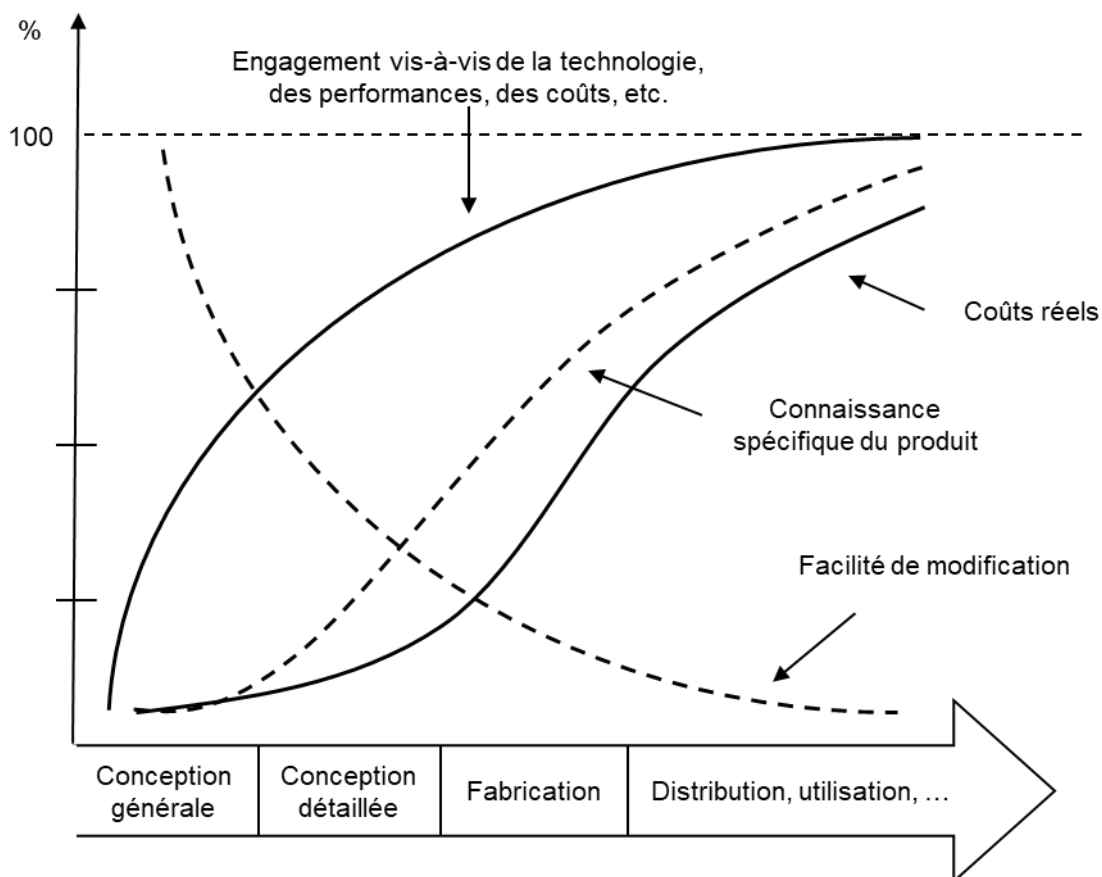


Figure 9 Enjeux de la conception amont de produits (adaptée de Blanchard et Fabrycky, 2006)

En ce sens, dans l'ensemble des méthodes proposées par les sciences de la conception, les concepteurs doivent pouvoir sélectionner la ou les méthodes pour les guider au mieux selon leurs besoins. En appliquant ce principe à la conception de produits intelligents et connectés, il apparaît donc essentiel d'intégrer dès les phases amont des réflexions sur les créations de valeurs et donc sur les éventuels composants électroniques nécessaires à leurs mises en œuvre.

1.2.2 Les technologies de l'information et de la communication

Les composants électroniques embarqués nécessaires aux créations de valeurs – car ils assurent la collecte, le traitement et la transmission de données – sont des éléments des technologies de l'information et de la communication (TIC). En effet, les TIC sont l'association des Technologies de l'Information avec celles de la Communication. Les TIC sont définies par Peppard et Ward (2016) comme les technologies, matérielles ou logicielles, qui permettent l'acquisition, le traitement, le stockage, la transmission et le partage de données ou d'informations sous différents formats.

Afin de contextualiser les travaux de recherche dans ce domaine d'étude, il est nécessaire d'y situer l'objet d'étude fondamental de la question de recherche : les données captées. La définition de « donnée captée » qui sera utilisée et fera référence dans le reste des travaux est la suivante : une donnée captée correspond à une donnée numérique produite par un capteur intégré à un produit lors de son fonctionnement. En effet, par définition, un capteur transcrit un phénomène physique en un ensemble de données numériques (Rachinger et al., 2018). Les données captées sont en ce sens intrinsèquement liées aux capteurs dont elles sont issues. Les capteurs sont des composants électroniques appartenant aux TIC. Ils peuvent être intégrés aux côtés de microprocesseurs, actionneurs, émetteurs ou autres composants électroniques des TIC dans des ensembles de composants électroniques appelés systèmes électroniques embarqués. Les systèmes électroniques embarqués sont eux-mêmes intégrés dans les produits physiques pour les doter de capacités informatiques. Pour assurer ces capacités, les systèmes électroniques embarqués sont constitués de deux parties essentielles et interdépendantes, la partie *hardware* et la partie *software*. La partie *hardware* correspond à l'ensemble des composants électroniques intégrés aux produits qui assurent physiquement les capacités informatiques et communicationnelles du produit. La partie *software* quant à elle définit la partie numérique de logiciels intégrée dans la partie *hardware* nécessaire à son fonctionnement.

Certaines créations de valeurs basées sur les données captées peuvent être déployées sans connexion nécessaire avec l'extérieur, en système fermé. Cependant, la partie précédente de contexte industriel a mis en avant les nombreuses opportunités de création de valeurs liées à l'intégration de la connectivité en plus de l'intelligence dans le produit. La communication d'un produit avec son utilisateur, son environnement ou encore son fabricant s'appuie sur

l'infrastructure de l'Internet des Objets (*Internet of Things* (IoT)). L'IoT est en effet défini comme « une infrastructure globale pour la société de l'information, permettant la mise en œuvre de services avancés en interconnectant des objets physiques ou virtuels et basée sur des technologies de l'information et de la communication existantes ou en cours d'évolution » (ISO/IEC 21823-1, 2019).

L'architecture de l'IoT est souvent modélisée par cinq couches structurelles pluridisciplinaires reposant les unes sur les autres (Khan et al., 2012). La modélisation est illustrée sur la figure 10.

- La *couche de détection* permet au travers du produit et de ses capteurs d'enregistrer les mesures du monde réel sous forme de données numériques pour permettre leurs exploitations ultérieures.
- La *couche de réseau* permet ensuite de transmettre de façon sécurisée par une connexion filaire ou sans fil les données collectées.
- La *couche de logiciels* permet de traiter les données entrantes, c'est-à-dire stocker, analyser et organiser les données reçues.
- La *couche d'application* permet de déployer le service spécifique, la création de valeurs, qui repose sur les couches précédentes.
- Enfin, la *couche commerciale* permet de gérer les services, les modèles commerciaux et les profits liés au déploiement de l'architecture IoT.

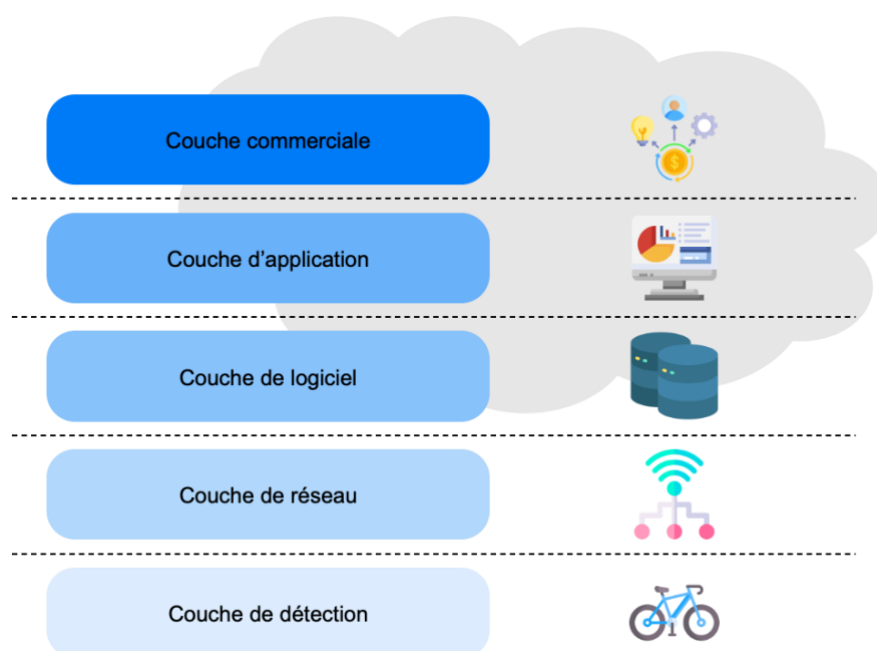


Figure 10 Modélisation de l'architecture IoT (adaptée de Khan et al., 2012)

Il ne semble pas exister de consensus sur une modélisation de l'architecture IoT commune (Sethi et Sarangi, 2017). Weinberger et al. (2016) ont proposé une modélisation légèrement différente de la précédente, plus centrée sur le produit et ses créations de valeurs. Elle repose également sur cinq couches successives et communicantes. Les différentes couches sont explicites. Elles représentent *l'objet physique* qui grâce à des *capteurs/actuateurs* offre une création de valeurs dans le monde physique. La *connectivité* permet les échanges de données et fait ainsi le pont entre le monde physique et le monde numérique. *L'analyse* des données permet de les valoriser et permet de déployer le *service numérique* offrant des créations de valeurs dans le monde numérique. L'approche est illustrée figure 11.

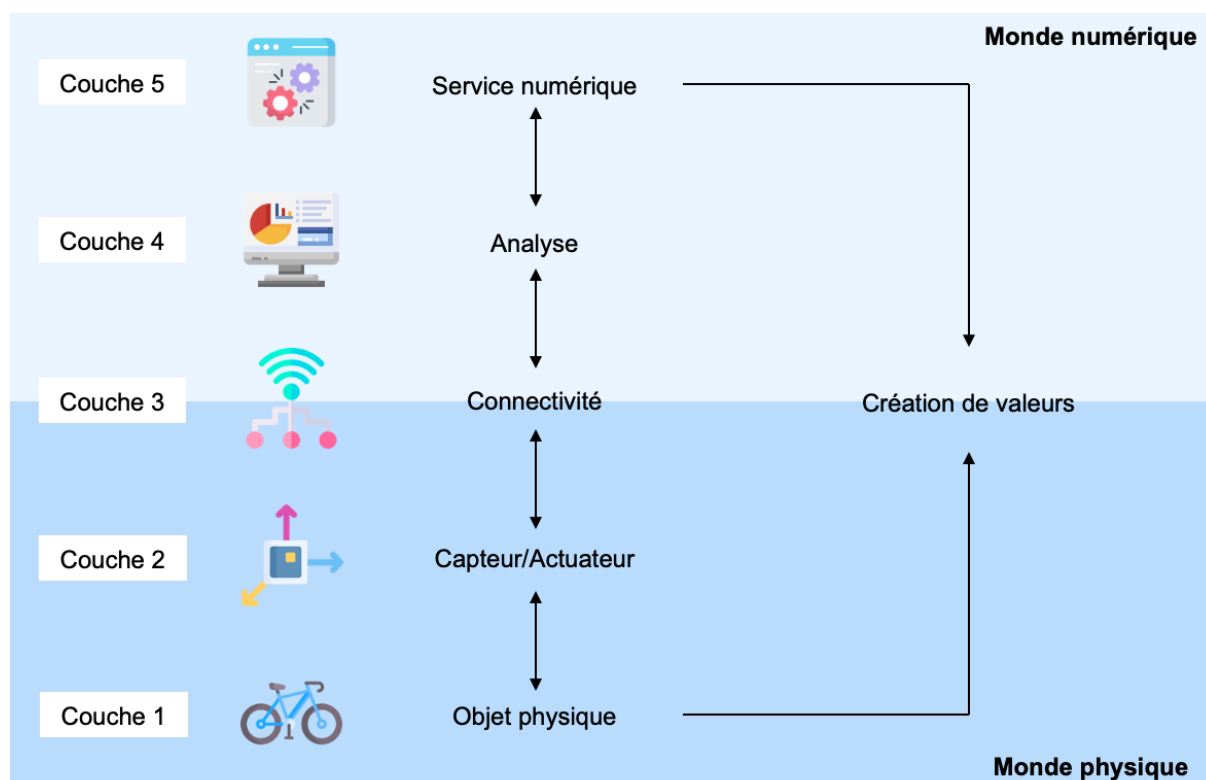


Figure 11 Modélisation de l'architecture IoT et des créations de valeurs induites (adaptée de Weinberger et al., 2016)

C'est l'accès aux données captées au travers de la connectivité qui permet leurs exploitations. L'exploitation des données est essentielle à l'extraction d'informations et donc à la mise en œuvre des créations de valeurs basées sur les données captées. Elle est réalisée au travers de l'analyse des données, une couche essentielle de l'IoT.

1.2.3 Les sciences des données

Grâce aux TIC, les données captées sont rendues accessibles. Mais la collecte de données n'apporte pas automatiquement de la valeur. En effet, une donnée est un élément brut sans sens ni valeur (Stafford, 2009). Afin d'être transformé en information, la donnée doit être interprétée. La science des données (*Data Science*) est définie comme est l'étude de l'extraction d'informations à partir de grands ensembles de données (Cleveland 2001).

Les données numériques sont devenues des ressources essentielles pour les industriels. Face à la très grande variété de données numériques différentes pouvant apporter de la valeur, différentes classifications des données ont été proposées. Elles sont basées sur des propriétés des données comme leurs sources ou leurs types. Par exemple, Zheng et al. (2018) ont proposé une classification selon les sources en deux catégories : les données générées par l'humain et les données générées par les systèmes. Les données générées par l'humain englobent toutes les informations provenant de sources comme les avis en ligne, les vidéos ou les textes tandis que les données générées par des systèmes proviennent par exemple des produits ou des machines de production. Une classification usuelle selon le type divise aussi les données en deux catégories : les données structurées et données non structurées. Les données structurées suivent un format standard et organisé par exemple les mesures de capteurs. Par opposition, les données non structurées ne suivent pas de format ou d'organisation standard, par exemple les avis en lignes ou les images.

Afin de contextualiser les travaux de recherche dans ce domaine d'étude, il est nécessaire d'y situer l'objet d'étude fondamental de la question de recherche : les données captées. Pour rappel, la « donnée captée » est définie comme une donnée numérique produite par un capteur intégré à un produit lors de son fonctionnement. Ainsi, les données captées appartiennent aux données générées par les systèmes selon la classification de Zheng et al. (2018), plus spécifiquement à celles générées par le produit. En ce sens, pour le reste de ces travaux, la classification suivante en deux catégories est proposée et fera référence. Elle divise les données en deux ensembles disjoints basés sur leurs sources : les données captées et les données externes. La classification proposée est illustrée sur la figure 12.

- Les données captées font référence à l'ensemble des données enregistrées par le produit lui-même et transmises par le biais de sa connectivité pour une analyse ultérieure. Les

sources de ces données sont donc principalement les capteurs embarqués, par exemple les données issues des mesures d'accéléromètres, de gyroscopes, thermomètres, etc. Mais on considère également les enregistrements de ses actions et interactions captées lors de l'usage par son système ou son interface.

- À l'inverse, les données externes font référence aux données qui ne proviennent pas du produit lui-même, mais plutôt de toutes les autres sources externes qui peuvent fournir des informations sur le produit. Il est possible de sous-diviser encore cette catégorie en deux ensembles disjoints selon les sources : d'une part, des données publiques comme les données récoltées sur les réseaux sociaux, les avis en ligne, les brevets, etc. et d'autre part des données privées, exclusives aux entreprises, comme les rapports de maintenance, les tests clients, les enquêtes, les données historiques, etc.

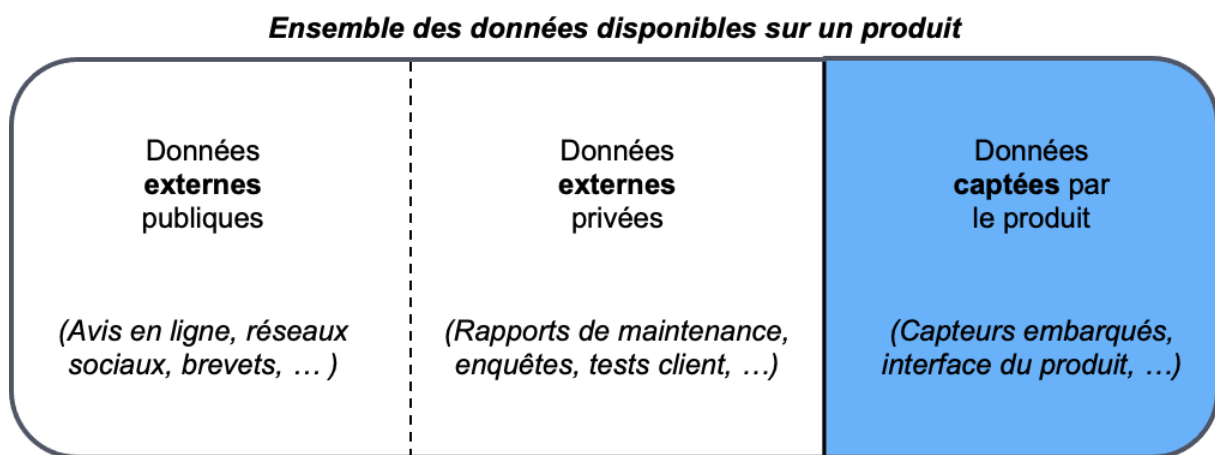


Figure 12 Sources des données pouvant informer la conception

L'essor des sciences des données est lié à l'avènement des données massives (*Big Data*). Le terme *Big Data* est apparu pour faire référence à l'augmentation sans précédent du volume de données échangées dans nos sociétés, à l'hétérogénéité de leurs natures et de leurs sources. Laney (2001) a proposé une définition par leurs caractéristiques des *Big Data*. Sont considérées comme des *Big Data*, les ressources partageant simultanément les trois caractéristiques de volume, vitesse et variété, les « 3V ». Le volume représente la quantité de données, la variété représente l'hétérogénéité des types et sources de données et la vitesse représente la vitesse de génération des données. Des évolutions de cette définition proposent l'ajout de nouvelles caractéristiques en « V », on parle alors des « 4V » ou des « 5V ». Par exemple, la caractéristique de valeur qui représente la valeur ajoutée intrinsèque aux données ou la véracité

qui représente la fiabilité des données. En ce sens les données captées peuvent éventuellement être considérées comme *Big Data*.

Pour extraire de la valeur des ensembles de données, des approches d'exploration des données (*data mining*) sont mises en œuvre. Il existe des concepts communs utiles à l'extraction d'informations des données (Fayyad et al., 1996). Ils sont illustrés sur la figure 13.

- Le regroupement permet de mettre en évidence des groupes de données similaires dans un ensemble des données.
- La détection des anomalies permet de mettre en évidence des données inhabituelles, susceptibles d'être intéressantes, dans l'ensemble des données.
- La classification permet d'attribuer une catégorie déjà existante à de nouvelles données.
- La régression permet de mettre en évidence une fonction qui modélise les données avec le moins d'erreurs possible. Cela permet de définir des relations entre les données.
- Les règles d'association permettent la recherche de relations entre les données et leurs corrélations.

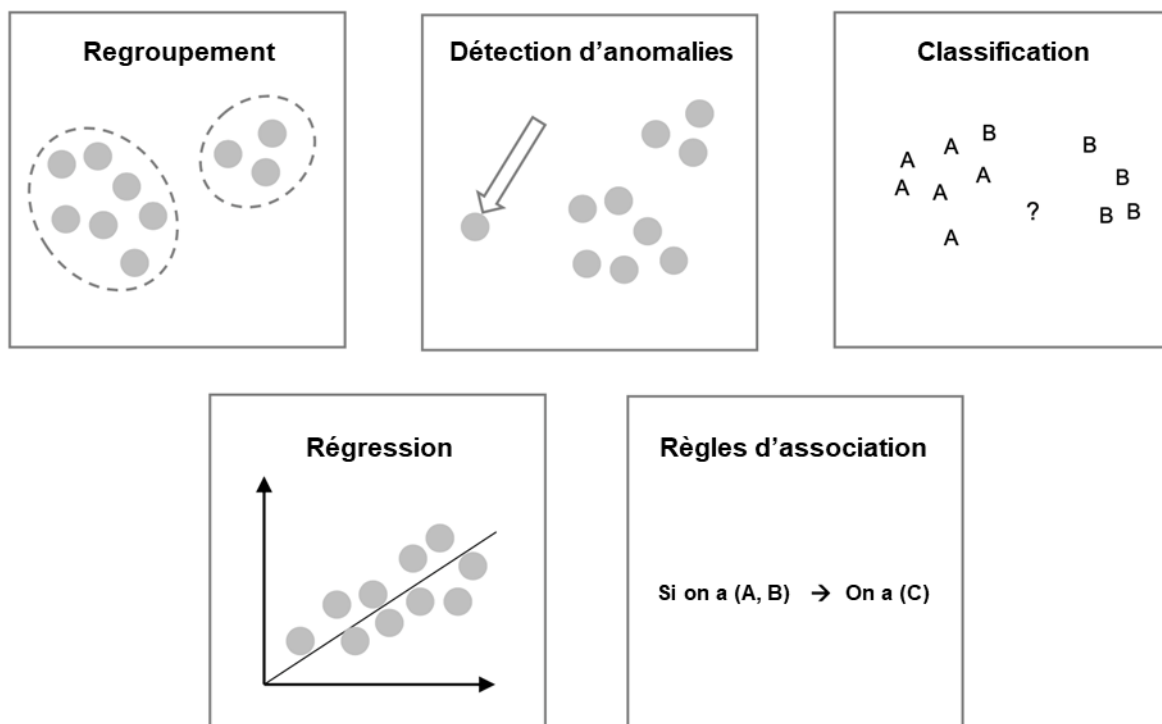


Figure 13 Concepts d'exploration des données (adaptée de Muller et Lenz, 2013)

Les concepts présentés ci-dessus ne sont pas exhaustifs. Ils sont appliqués par des algorithmes de complexités variées. Les algorithmes peuvent être classés en deux familles distinctes selon leurs objectifs. Les approches descriptives qui permettent d'organiser des ensembles importants de données afin d'en extraire des informations sous-jacentes. Les approches prédictives qui cherchent à expliquer un phénomène observé dans un ensemble de données dans le but de pouvoir le prévoir ultérieurement. La mise en œuvre de ces algorithmes sur des ensembles de données captées est à l'origine de nombreuses créations de valeurs.

1.3. Contexte du laboratoire de recherche

1.3.1 Contexte de la thèse

Ces travaux de thèse ont été financés par un abondement de l'institut public Carnot ARTS (Actions de Recherche pour la Technologie et la Société). Ils ont été réalisés au sein du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI) et du Laboratoire de l'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques (LISPEN). Ces deux laboratoires appartiennent à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) et plus largement aux Hautes Écoles Sorbonne Arts et Métiers Université (HESAM Université).

Les travaux du LCPI ont pour objectif l'optimisation des processus de conception et d'innovation et s'inscrivent dans le domaine du génie industriel. La recherche du laboratoire se décompose en deux axes :

- L'axe métiers vise à enrichir le processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et outils métiers (design, ergonomie, ingénierie...).
- L'axe processus ambitionne la formalisation globale du processus de conception pour mieux le comprendre et l'optimiser.

Ces travaux de thèse visent à optimiser la conception des produits intelligents et connectés. Ils renforcent plusieurs axes de recherche du laboratoire, celui de conception centrée utilisateur, de créativité, d'aide à la décision et d'éducation à la conception. La figure 14 représente l'ensemble des axes et domaines d'activité du LCPI et met en évidence ceux abordés par ces travaux de thèse.

OBJECTIF : OPTIMISATION DU PROCESSUS DE CONCEPTION ET D'INNOVATION

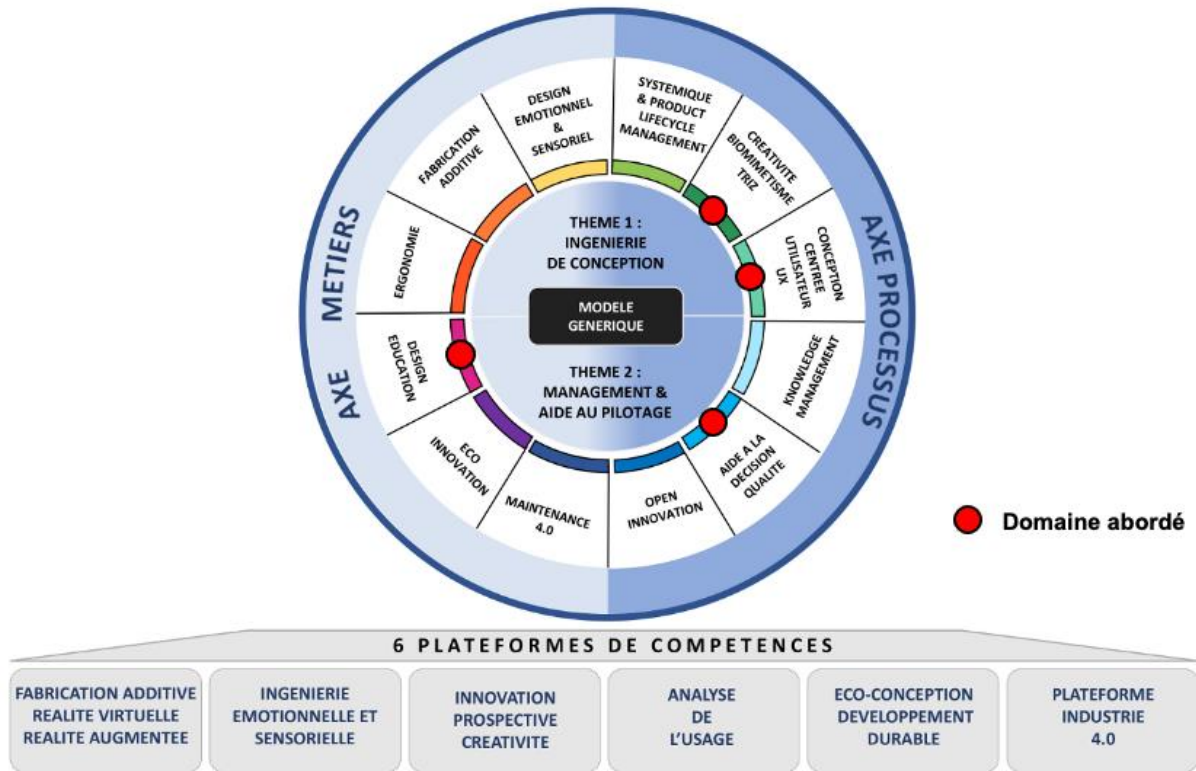


Figure 14 Axes de recherche du LCPI et positionnement de la thèse

Les travaux de recherche du LISPEN s'articulent autour des quatre thématiques suivantes : ingénierie système & maquette numérique, simulation et contrôle des systèmes, interaction humain-système et l'aide à la décision. Ces travaux renforcent les axes de recherche du laboratoire LISPEN en interaction humain-système et aide à la décision.

1.3.2 Contexte national

À l'échelle nationale, les laboratoires de recherche identifiés travaillant à l'élaboration de méthodes de conception sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 Acteurs académiques nationaux

Établissement	Laboratoire	Axe de Recherche concernée
<i>Arts et Métiers ParisTech</i>	LCPI : Laboratoire de Conception Produit et Innovation	Optimisation du processus de conception
<i>Arts et Métiers ParisTech</i>	LISPEN : Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques Et Numériques	Systèmes dynamiques multiphysiques et virtuels
<i>CentraleSupélec</i>	LGI : Laboratoire de Génie Industriel	Méthodes d'aide à la décision et d'optimisation de la conception
<i>École Supérieure Des Technologies Industrielles Avancées</i>	ESTIA – Recherche	Étude, conception et mise en œuvre de d'interfaces durables et encapacitatives pour l'ingénierie
<i>Grenoble INP</i>	G-SCOP : Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production	Management industriel de l'innovation et outils de mise à disposition de la connaissance
<i>Mines ParisTech</i>	CGS : Centre de Gestion Scientifique	Activités de conception et capacités d'innovation dans les entreprises
<i>Université de Strasbourg</i>	ICUBE : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie	Modélisation du processus de conception en y intégrant son amélioration continue, sa robustesse
<i>Université de Technologie Belfort Montbéliard</i>	ERCOS : Ergonomie et Conception Système	Conception et le développement de produit et système innovant favorisant la valeur du produit pour l'Homme
<i>Université de Technologie de Compiègne</i>	Laboratoire Roberval	Méthodes et modèles pour une approche intégrée du couple produit-process et la maîtrise de leur robustesse

1.3.3 Contexte international

À l'échelle internationale, les institutions identifiées menant des recherches méthodologiques à l'intersection entre la conception et les données ou les TIC sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 Acteurs académiques internationaux

Pays	Université	Thématiques de recherche pertinentes (traduit par l'auteur)
<i>Allemagne</i>	Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nuremberg	Systèmes d'assistance au développement de produits basée sur l'exploration de données
<i>Angleterre</i>	Cambridge	Conception, construction et études des systèmes interactifs intelligents
<i>Danemark</i>	Technical University of Denmark	Technologies numériques, systèmes produits-services et économie circulaire
<i>États-Unis</i>	University of Michigan	Informatique omniprésente, détection intelligente, intelligence ambiante et internet des objets
<i>Italie</i>	Turin Polytechnic	Numérisation des produits et conception basée sur les données
<i>Japon</i>	Japan Advanced Institute of Science and Technology	Principes fondamentaux et applications des technologies de l'information et de la communication
<i>Pays-Bas</i>	Delft University	Conception assistée par les données et l'intelligence artificielle
<i>Singapour</i>	Singapore University of Technology and Design	Développement de systèmes intelligents, intégrant des technologies de pointe
<i>Suède</i>	Blekinge Institute of Technology	Soutien de la prise de décision lors de la conception grâce aux technologies des données

1.4. Conclusion sur le contexte

Le premier chapitre de contexte donne le cadre au sein duquel se positionnent les travaux de thèse. La première section de contexte industriel décrit les enjeux nouveaux liés au récent développement des TIC et à leurs intégrations dans les produits physiques. Elle présente les créations de valeurs qui en résultent à la fois pour le produit, ses utilisateurs et son fabricant. Il en émane la question de recherche suivante : **Comment concevoir des produits intelligents et connectés exploitant au mieux les données captées pour générer des créations de valeurs ?**

La deuxième section de contexte scientifique décrit les concepts généraux impliqués par la question de recherche. Ainsi, les notions connexes du domaine de la conception de produits, des TIC et des sciences de données sont abordées. L'intersection de ces trois domaines délimite le périmètre de ces travaux de recherche. Enfin, la troisième section du chapitre explicite le contexte académique dans lequel est réalisée la thèse et achève ainsi de présenter son cadre.

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART

Le deuxième chapitre d'*étude descriptive I* a pour objectif d'identifier les enjeux auxquels doit répondre la recherche. Elle propose en ce sens un état des connaissances actuelles répondant à la question de recherche identifiée dans la partie précédente : **Comment concevoir des produits intelligents et connectés exploitant au mieux les données captées pour générer des créations de valeurs ?** La section 2.1 détaille au travers d'une revue de la littérature scientifique les pratiques existantes liant la conception de produits et les créations de valeurs basées sur les données captées ainsi que les enjeux associés. En raison de la nouveauté du sujet, il a semblé approprié de compléter cette étude bibliographique par une étude exploratoire qualitative des enjeux (Gil et al., 2008). Ainsi, la section 2.2 présente l'organisation, le déroulement et les résultats d'un groupe de travail sur les enjeux relatifs au lien entre la conception de produits et les données captées. Il a été mené avec des chercheurs lors d'une conférence scientifique internationale. La perspective scientifique des enjeux a été complétée avec une perspective industrielle. La section 2.3 présente l'organisation, le déroulement et les résultats d'une campagne d'entretiens sur ces enjeux menée auprès de fabricants de produits intelligents et connectés. L'ensemble des enjeux identifiés dans les trois précédentes sections est ainsi synthétisé dans la section 2.4. Enfin la section 2.5 conclut le chapitre en résumant les éléments clefs abordés. La structure du chapitre est illustrée sur la figure 15.

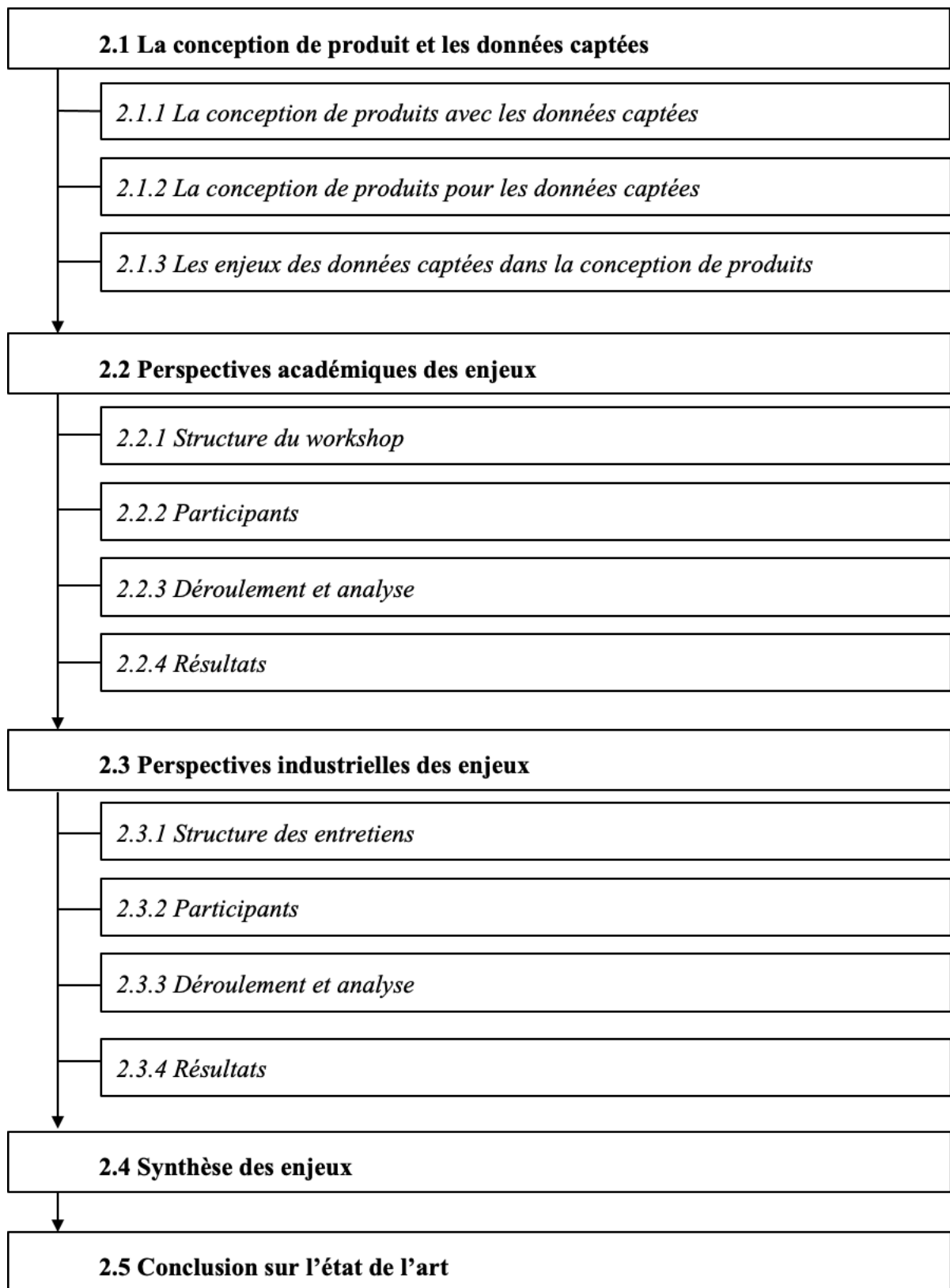


Figure 15 Plan du chapitre « État de l'art »

2.1. La conception de produits et les données captées

Les produits physiques suivent généralement un cycle de vie en trois phases successives incorporant chacune les différentes étapes de l'existence d'un produit (Terzi et al., 2010). La première phase de *début de vie* comprend la conception et la fabrication du produit. La deuxième phase de *milieu de vie* comprend sa distribution, son utilisation et sa maintenance. La troisième et dernière phase de *fin de vie* comprend le retrait du produit via sa destruction ou le recyclage du produit. La section 1.1 a exposé les créations de valeurs permises par l'intégration de capteurs dans les produits à la fois pour les utilisateurs et les fabricants. Ces créations de valeurs peuvent concerner toutes les différentes sous-phases du cycle de vie du produit (Li et al., 2015). L'objectif de cette section est donc d'investiguer le lien entre la conception de produits et les créations de valeurs basées sur les données captées. Ainsi, dans le cadre du contexte scientifique défini préalablement, cette section recense les articles et papiers scientifiques d'intérêt pour l'*étude descriptive I* de ces travaux de thèse. La sous-section 2.1.1 présentera d'abord les approches de conception de produits s'appuyant sur les données captées pour créer de la valeur, en d'autres termes la conception avec les données captées (*design with*). La section 1.1 a également mis en évidence la nécessité lors de la phase de conception de choisir les bonnes données à capter pour garantir les créations de valeurs dans le reste des sous-phases du cycle de vie du produit. Ainsi la sous-section 2.1.2 présentera les approches de conception définissant les capteurs à intégrer dans les produits pour mettre en œuvre des créations de valeurs, en d'autres termes la conception pour les données captées (*design for*). Pour le reste de ces travaux, les termes « d'intégration des données captées dans la conception de produits » feront référence à l'ensemble des approches mentionnées précédemment de *design for* et de *design with*. La section 2.1.3 présentera alors les enjeux relatifs à l'intégration des données captées dans la conception de produits. La figure 16 illustre la structure de cette section.

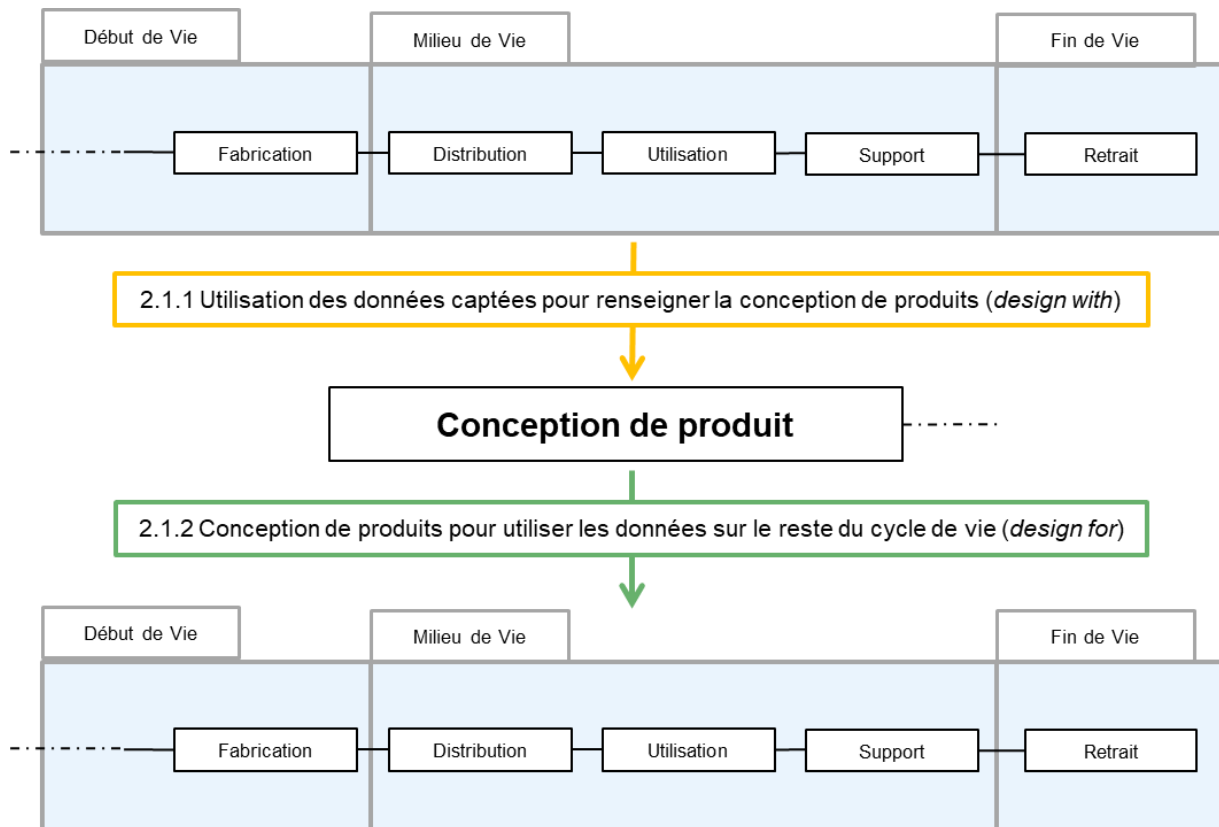


Figure 16 Illustration de la structure de la section 2.1

2.1.1 La conception de produits avec les données captées

Cette sous-section s'intéresse aux approches s'appuyant sur les données captées pour créer de la valeur lors de la phase de conception (*design with*).

Suivant l'essor récent des *Big Data*, les données se sont imposées comme un outil d'aide à la décision essentiel lors de la conception de produits. Dans ce contexte, on assiste à l'émergence d'approches basées sur la collecte et l'analyse de données en tant qu'outil de prise de décision pour l'optimisation du processus de conception. Ces approches sont dites de conception informée par les données (*Data Informed Design*). Si la part des données utilisées dans la conception du produit est majoritaire en comparaison aux autres ressources, on peut également préciser qu'il s'agit de conception guidée par les données (*Data Driven Design*). Elles sont reconnues comme des approches d'avenir pour la conception de produits (Kim et al., 2017). On s'intéresse alors dans cette sous-section aux approches de conception informées ou guidées par les données ayant spécifiquement comme source les données captées. Il est à noter qu'en raison

de la récente démocratisation de la connectivité dans les produits physiques, les approches de conception de produits informée ou guidée par les données captées sont encore peu répandues (Yu et Zhu, 2016 ; Deng et al. 2019).

Les données captées peuvent informer les différentes phases du processus de conception. On peut donc classer les différentes approches proposées dans la littérature scientifique selon la phase du processus qu'elles renseignent. Comme les données captées émanent du produit et renseignent les concepteurs principalement sur ce dernier, la méthode de conception systématique centrée produit (Pahl et Beitz, 2007) est prise comme référence pour le classement.

La première phase *clarification de la tâche* est celle durant laquelle les concepteurs analysent le marché, cherchent des idées et formulent des propositions de produit. Les données captées y sont particulièrement utiles pour fournir des indications sur les besoins réels des utilisateurs (Klein et al. 2019). Les travaux de Bogers et al. (2016) s'inscrivent cette phase. Ils ont développé une sonde intégrant différents capteurs s'attachant à la base d'un biberon. Ils l'ont distribuée à un panel de testeurs volontaires afin d'enregistrer les données liées à l'usage du biberon en conditions réelles. Les chercheurs ont d'autre part récolté des retours qualitatifs sur les usages du biberon lors d'entretien. En corrélant les données numériques des capteurs avec les retours qualitatifs des testeurs, ils ont pu accéder à une compréhension plus profonde des usages et des besoins des utilisateurs. Ces informations s'avèrent essentielles pour formuler une proposition de produit pertinente sur le marché. De la même manière, dans leurs travaux de recherche, Van Eck et al. (2016) ont également fourni des biberons équipés de capteurs à des utilisateurs volontaires. En l'occurrence, ces travaux ne se basent que sur l'exploitation des données numériques récoltées. Elles sont analysées par des algorithmes à la recherche de similarités, de répétitions, anomalies ou autres éléments pertinents afin de traduire les données numériques en information sur l'utilisation du produit. Au travers de l'analyse des données numériques, les concepteurs peuvent par exemple accéder aux différentes utilisations du produit et à leurs fréquences. Ils peuvent également identifier les mauvaises utilisations du produit et même potentiellement découvrir des utilisations inattendues. Ces informations s'avèrent essentielles pour la formulation de proposition de produit.

Ensuite, dans la phase de *conception générale*, il s'agit d'établir les principaux problèmes et la structure fonctionnelle de la proposition retenue afin de formuler des principes de fonctionnement et de proposer des variantes de concepts à évaluer selon des critères techniques et économiques. Les données issues de capteurs comme sources d'information sont donc particulièrement importantes lors de cette phase. Elles peuvent fournir des indications sur les usages réels essentielles pour mieux définir le cahier des charges (Zheng et al., 2020). En effet, Lützenberger et al. (2016) ont proposé une étude de cas sur les roulements d'un lave-linge équipé de capteurs. Les données d'utilisations réelles collectées sont intégrées dans des équations mathématiques afin de définir les caractéristiques des roulements les plus adaptés pour la prochaine génération de machine à laver. De la même manière, Vegte et al. (2019) proposent une étude de cas sur les données d'utilisations réelles de réfrigérateurs connectés. Les données captées informant sur les ouvertures et fermetures des réfrigérateurs sont intégrées dans des simulations virtuelles pour tester différents concepts de réfrigérateur. Le concept minimisant la consommation d'énergie peut être sélectionné pour la prochaine génération de produits.

Dans la phase d'*incarnation des concepts*, le concept sélectionné est mis en forme. Les concepteurs font et raffinent le choix de ses formes, de ses matériaux, etc. au travers de simulations numériques et physiques. Il est courant d'utiliser des données issues de capteurs pendant la phase de prototypage. En effet, des capteurs sont souvent ajoutés temporairement aux produits lors de tests sur le terrain afin de les améliorer de manière itérative (Camburn et al., 2017). Certains travaux dépassent cette utilisation traditionnelle des données axée sur une boucle itérative d'amélioration. Ghosh et al. (2017) ont intégré différents capteurs (accéléromètre, température, flexions et force) dans des chaussures afin d'enregistrer les données liées à la marche de participants. Ces données ont été corrélées à des questionnaires quantifiant les ressentis des participants lors de la marche. Ainsi, des données numériques liées à la marche peuvent ensuite être traduites en confort perçu. Ces retours empathiques extraits des données peuvent être utilisés ensuite pour améliorer le produit pendant la phase de prototypage. Van Eck et al. (2019) proposent d'analyser les données captées lors de l'utilisation d'un appareil d'imagerie médicale sur le terrain. Une identification automatique des activités est réalisée, elle permet aux concepteurs d'identifier les différentes utilisations du produit et leurs fréquences associées. Ainsi, sur la base de ces connaissances, les concepteurs peuvent

alors créer des scénarios de tests utilisateurs en phase avec les usages réels lors des phases de prototypage de la prochaine génération de produits.

Enfin dans la phase de *conception détaillée*, les concepteurs définissent la mise en production de la solution au travers de la mise en plan, la liste des composants requis, etc. Lors de cette phase, les données captées n'informent donc plus la conception du produit mais potentiellement sa fabrication. Elle est en dehors du champ de l'étude de la littérature scientifique et n'est donc pas considérée.

La figure 17 illustre le positionnement dans l'approche de conception systématique des cas d'étude présenté dans cette sous-section.

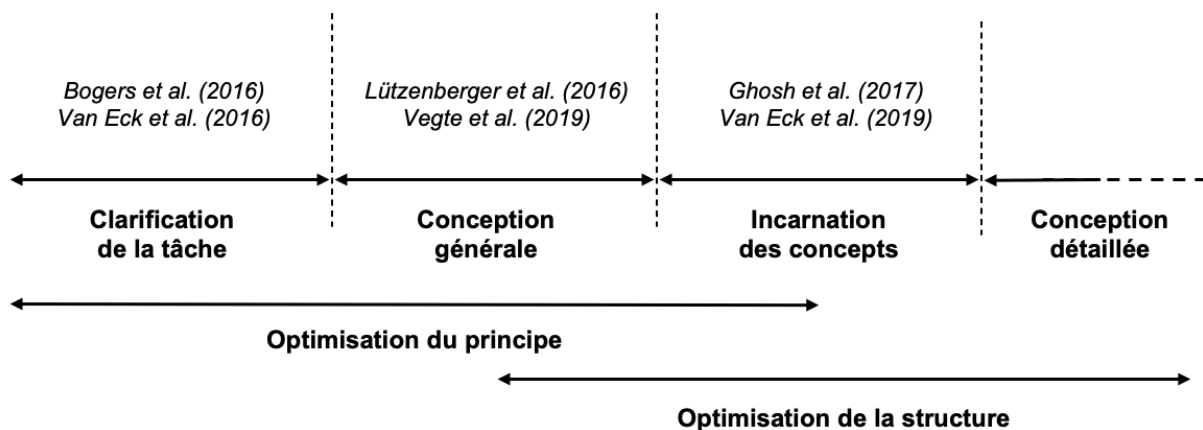


Figure 17 Cas d'étude sur l'usage des données captées pour renseigner la conception de produits positionnés selon l'approche systématique de Pahl et Beitz (2007)

Les différentes approches présentées dans cette sous-section illustrent des utilisations possibles de données captées pour créer de la valeur dans la conception de produits (*design with*). Afin de créer de la valeur avec les données captées dans les autres phases du cycle de vie ou pour la prochaine conception, il est nécessaire d'intégrer des réflexions sur leurs usages lors de la conception de produits (*design for*).

2.1.2 La conception de produits pour les données captées

Cette sous-section s'intéresse aux approches de conception organisant l'intégration de capteurs dans le produit pour générer des créations de valeurs lors des autres étapes de son cycle de vie (*design for*).

Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs approches pour le choix et la sélection des capteurs à intégrer dans le produit. La partie choix traite de l'exploration des potentielles mesures physiques à capter. La partie sélection traite de l'exploration des potentielles solutions techniques de captation. Plusieurs travaux ont proposé un cadre spécifique au choix et à la sélection des capteurs. Ces approches sont basées sur la définition de quantités d'intérêt à mesurer. Schmidt et van Laerhoven (2001) proposent aux concepteurs d'identifier les variables informationnelles, quantités d'intérêt, distinguant les différentes situations d'utilisation du produit. Il s'agit ensuite de sélectionner les capteurs pouvant mesurer ces variables sur des critères de coûts et de précision de mesure. Regtien (2005) propose de lister de façon exhaustive les phénomènes physiques mesurables lors de l'utilisation du produit pour définir des quantités d'intérêt. Il s'agit alors de choisir des moyens de mesurer ces quantités et d'identifier les avantages et inconvénients de chaque moyen potentiel pour sélectionner celui convenant à intégrer. Czichos (2018) propose une approche similaire où l'environnement du produit est défini explicitement pour identifier des potentielles quantités d'intérêt à y capter. Tous les capteurs potentiels pour ces mesures sont listés et la meilleure option est sélectionnée sur des critères de coûts, de performances et de contraintes de l'environnement. Dans les travaux de Jones et al. (2018), une analyse du système et de ses fonctionnalités requises définit directement les quantités à mesurer. Les capteurs sont ensuite sélectionnés au travers d'une analyse multicritère comparative, sur des critères techniques et financiers. Hausmann et al. (2022) proposent aussi sur la base d'une analyse du système, une identification des variables potentielles à capter pour définir celles d'intérêts. Sur cette base, les principes de mesures sont définis et les capteurs répondant le mieux aux besoins sont sélectionnés.

On peut retrouver aussi dans la littérature scientifique des approches encadrant exclusivement les parties de choix. Comme les capteurs embarqués appartiennent à la *couche de détection* de l'architecture de l'IoT, ils sont souvent intégrés dans des outils d'idéation pour soutenir la conception des produits IoT. En effet, pendant le processus de recherche d'idées, les

concepteurs peuvent envisager les potentielles utilisations des capteurs pour les produits lors de son cycle de vie. Dans les outils de génération d'idées pour l'IoT, les capteurs peuvent être présentés physiquement ou conceptuellement aux concepteurs.

Lorsqu'ils sont présentés physiquement, les capteurs peuvent être manipulés lors d'ateliers afin de générer des idées. Ambe et al. (2019) fournissent aux futurs utilisateurs des capteurs physiques ainsi que des actionneurs et d'autres supports pour la co-conception d'applications IoT personnalisées. De la même manière, Lefeuvre et al. (2016) ont présenté un dé intégrant des capteurs et un autre dé intégrant des actionneurs. Ces dés servent de base à la co-conception de technologies IoT avec les utilisateurs. Dans ces études, ce sont donc les futurs utilisateurs qui expérimentent manuellement avec les capteurs et les choisissent pour créer des solutions IoT les intégrant.

Lorsqu'ils sont présentés sous forme conceptuelle, les capteurs peuvent être présentés au travers de jeux de cartes utilisés pour la génération d'idées. Les cartes représentent aux concepteurs plusieurs éléments liés aux technologies de l'IoT dont les capteurs, mais aussi au produit, à son environnement ou à ses utilisateurs. Ainsi, les cartes, lorsqu'elles sont combinées entre elles, servent de support à la génération d'idées. Angelini et al. (2018), Aranda Muñoz et al. (2020, 2021) et Vitali et al. (2016) ont développé des jeux de cartes pour la conception de solutions techniques basées sur l'IoT. Huang et al. (2021) ont également mis au point un jeu de cartes, mais pour la conception de jeux interactifs basés sur l'IoT. Dans les trois travaux de recherche précédemment mentionnés, les capteurs sont présentés en tant que tels dans le jeu de cartes par le biais d'une classe spécifique de cartes « capteurs » mélangées à d'autres classes représentant les différents éléments de l'IoT. Mora et al (2017) et Dibitonto et al (2018) ont également proposé des jeux de cartes pour soutenir la conception de solutions IoT, mais ils ne présentent pas les capteurs en tant que tels. Les capteurs sont en fait sous-jacents à la catégorie « entrée utilisateur » des cartes fournies, au travers par exemple des cartes « vibration », « touché », etc. Enfin, Cila et al. (2017) présentent une approche créative différente des jeux de cartes, proposant une métaphore où les produits IoT sont imaginés comme un ensemble de plusieurs classes d'agents. L'approche suggère aux concepteurs le rôle d'agent « collecteur » pour générer des idées liées à la capture de données.

De même que pour la partie choix, des approches dans la littérature scientifique encadrent exclusivement la partie de sélection des capteurs. Il s'agit d'approches proposant un support rationnel à la sélection des concepteurs des capteurs à intégrer dans le produit. Elles peuvent prendre diverses formes. Shieh et al. (2001) proposent une sélection sur la base de graphiques illustrant les différentes performances des capteurs. Les concepteurs font alors correspondre les besoins requis par le cahier des charges avec les caractéristiques d'opération des capteurs sur des abaques pour sélectionner les plus adaptés. Sowers (2012) propose un cadre pour une sélection systématique des capteurs à intégrer. La sélection se fonde sur la base de connaissances relatives au produit et aux capteurs. Les capteurs potentiels suivent une sélection itérative basée sur la modélisation du produit et sur des algorithmes afin de déterminer un ensemble de capteurs optimal à intégrer.

La figure 18 illustre le positionnement de l'ensemble des approches mentionnée dans cette sous-section.



Figure 18 Approches de choix et de sélection des capteurs identifiées

Bien qu'il existe des méthodes proposant un cadre ou des outils pour le choix et la sélection de capteurs. Il est important de noter que le choix et la sélection des capteurs restent régulièrement effectués de façon empirique par les concepteurs (Kirchner et al., 2018). Il est aussi important de noter que les cadres des approches de choix des capteurs abordées n'adoptent pas une perspective holistique pour la création de valeurs basée sur les données captées. Elles se focalisent sur des solutions répondant à des problèmes techniques ou à des besoins des utilisateurs. De la même manière, les approches de sélection sont focalisées sur les caractéristiques des capteurs (performances, coûts, intégration dans le produit...) mais n'adoptent pas un point de vue holistique évaluant leurs rôles sur l'ensemble du système.

2.1.3 Les enjeux des données captées dans la conception de produits

L'intégration des données captées dans la conception de produits repose sur des approches encore émergentes. Ainsi, bien qu'elles soient reconnues comme essentielles dans le futur des sciences de la conception (Kim et al., 2017), ces pratiques ne sont pas encore matures et se confrontent à plusieurs enjeux. Cette sous-section décrit les enjeux de ces pratiques répertoriés dans la littérature scientifique.

D'abord, le manque de méthode pour assister l'intégration des données captées dans la conception de produits apparaît comme un des enjeux principaux. Une analyse de la littérature scientifique sur la conception informée par les données a en effet été réalisée par Bertoni (2020). Elle permet d'appréhender les différentes sources des données utilisées dans les approches actuelles. Elle met en évidence un déséquilibre dans les sources de données considérées. Seul un nombre limité de recherches tente d'intégrer les données captées lors des phases amont de la conception du produit. Cela est expliqué par un manque de propositions méthodologiques robustes et d'outils dédiés à cet effet. Ce constat est corroboré par les recherches de Gorkovenko et al. (2020). Ils ont organisé plusieurs workshops avec des experts pour explorer les perspectives de la conception de produits informée par les données captées. Lors des discussions, un manque de soutien pour accompagner l'intégration réussie des données dans la conception de produits a été identifié. Les recherches menées auprès d'industriels par Meyer et al. (2022) témoignent aussi de ce manque. En effet, des entretiens ont été menés avec des acteurs industriels pour rendre compte de leur intégration des données d'usages captées lors des phases amont de la conception des produits. Les industriels ont fait état d'un besoin de méthode et de structure pour mieux guider leur intégration.

Ensuite, en plus du manque de méthodes, un manque d'expérience des concepteurs a aussi été identifié. Les industriels interrogés par Meyer et al. (2022) ont aussi témoigné d'un manque de connaissances dans le domaine des données captées dans la conception qui freine son développement. En effet, l'émergence des données dans le processus de conception de produits mêle les sciences de la conception aux sciences des données, moins maîtrisées dans les entreprises de produits physiques. En ce sens, Cantamessa et al. (2020) identifient l'essor du numérique comme un changement de paradigme important pour les pratiques de conception de produits. Ils prévoient des répercussions jusqu'à l'enseignement même de la conception de

produits. En effet, ils s'attendent à ce que les compétences relatives aux données deviennent essentielles dans l'avenir de la conception de produits. Ce constat est également exprimé par Chiarello et al. (2021) dans leur étude sur les pratiques actuelles et futures à l'intersection des sciences de la conception et des sciences des données. De plus, Isaksson et Eckert (2020), dans leur rapport sur le futur de la conception produit, dressent aussi le même constat et préconisent d'intégrer dans les formations des futurs concepteurs des compétences relatives aux données et à leurs exploitations.

Ensuite, les coûts liés à l'intégration des capteurs et l'usage des données captées représentent un frein à leur développement. Les entreprises ont en effet tendance à opter pour des données externes car elles représentent des opportunités accessibles et souvent moins coûteuses en temps et en argent (Bertoni, 2020). Les experts lors des workshops de réflexion de Gorkovenko et al. (2020) pointent les coûts financiers importants qui accompagnent l'intégration des données captées : les coûts d'intégration des capteurs dans les produits, le coût de l'infrastructure de stockage des données, le coût du traitement et de l'analyse des données. Dans leurs travaux, Holler et al. (2016) ont mené une campagne d'entretien au sein de trois entreprises de tailles différentes et aux activités variées. La campagne portait sur le rôle des données captées pendant la phase d'utilisation pour informer la conception de produits. Les industriels estiment difficile d'identifier les retours sur investissement liés à l'intégration des capteurs et de leurs données. À ces coûts financiers s'ajoutent aussi des impacts environnementaux liés aux données et aux capteurs. Les impacts environnementaux des capteurs sont principalement liés à leurs fabrications, notamment à l'extraction des matériaux bruts et à l'énergie nécessaire pour leurs fabrications (Bonvoisin et al., 2014). Les données numériques ont un impact environnemental lié aux impacts énergétiques de transmission, de stockage et de calcul importants impliqués par leurs usages (Arshad et al., 2017). En outre, le potentiel impact social de l'intégration des données dans les produits est aussi à prendre en compte. Il est apparu nécessaire lors de la conception de mettre en place des pratiques éthiques, respectueuses des utilisateurs vis-à-vis des données captées (Gorkovenko et al., 2020).

Enfin, la collecte et l'analyse des données forment un processus complexe pouvant freiner l'intégration des données captées dans la conception de produits. Dans leurs travaux, Labrinidis et Jagadish (2012) présentent des défis liés à l'exploitation des données d'un point de vue global, sans distinction de produits ou de sources. Certains défis s'appliquent à l'intégration des

données de capteurs pour la conception. Notamment, les données captées par le produit doivent être fiables pour être traduites en connaissances utiles. Les données brutes doivent donc être collectées, transmises et structurées sans erreurs afin d'être convenablement analysées. De plus, l'interprétation des données se doit également d'être impartiale. En effet, Bertoni (2018) a identifié ce défi au travers d'une étude de la littérature scientifique. La conception de produits est un processus pluridisciplinaire impliquant différentes parties prenantes, leurs professions et leurs expériences personnelles peuvent influencer l'interprétation des données collectées. De même, le choix des données à collecter peut aussi être biaisé. Hou et Jiao (2020) ont aussi effectué une étude de la littérature scientifique sur les pratiques de conception informée par les données. Ils abordent dans leurs recherches les défis liés à l'exploitation des données d'usages et ont mis en évidence un autre défi à l'interprétation des données. Il peut également être difficile pour les concepteurs d'extraire des informations pertinentes des données d'utilisation, car elles sont parfois associées à des contextes complexes à analyser. Ce défi a aussi été exprimé par les industriels interrogés dans les travaux de Holler et al. (2016) et ainsi que de Meyer et al. (2022). Holler et al. (2016) ont également ajouté que la nature parfois très individuelle des produits fait que les informations captées ne sont pas toujours transférables à la conception d'autres produits similaires.

La littérature scientifique fait ainsi apparaître quatre grands enjeux à l'intégration des données captées dans la conception de produits : le manque de méthodes, le manque d'expertise des concepteurs, les coûts associés et les enjeux liés à l'interprétation des données. L'intégration des données captées sont des approches récentes dans les sciences de la conception. L'ensemble de ses enjeux n'est pas nécessairement encore répertorié dans la littérature scientifique. Il est par conséquent pertinent de réaliser une exploration qualitative complémentaire des enjeux auprès de parties prenantes du domaine.

Le tableau 3 récapitule les différents enjeux de l'intégration des données captées dans la conception et les références scientifiques les mentionnant.

Tableau 3 Enjeux identifiés et références bibliographiques associées

Enjeux		Références
Manque de méthodes		<i>Bertoni (2020), Gorkovenko et al. (2020), Meyer et al. (2022)</i>
Manque d'expertise		<i>Cantamessa et al. (2020), Chiarello et al. (2021), Meyer et al. (2022)</i>
Impacts des données	Financiers	<i>Bertoni, (2020), Gorkovenko et al. (2020), Holler et al. (2016)</i>
	Environnementaux	<i>Arshad et al. (2017), Bonvoisin et al. (2014)</i>
	Sociaux	<i>Gorkovenko et al. (2020)</i>
Interprétation des données		<i>Bertoni (2018), Holler et al. (2016), Hou et Jiao (2020), Labrinidis et Jagadish (2012), Meyer et al. (2022)</i>

2.2. Perspectives académiques des enjeux

L'étude de la littérature scientifique a permis de montrer que l'intégration des données captées dans la conception de produits était confrontée à plusieurs enjeux majeurs et n'était donc pas encore mature. Ainsi, pour compléter la revue de la littérature des enjeux proposée et enrichir la perspective scientifique, un workshop a été organisé lors de la conférence scientifique internationale DESIGN2020. Dans leurs recherches, Bstieler et al. (2018) et Gorkovenko et al. (2020) ont également organisé des ateliers pour explorer les enjeux de la conception informée par les données. La spécificité du workshop proposé est qu'il se focalise sur les données captées comme source de données. Le format d'un workshop permet de proposer un cadre commun de réflexions et d'échanges aux participants pour explorer une question. La question de recherche abordée dans ce workshop était la suivante : « Quels sont les enjeux de l'intégration des données captées dans la conception de produits ? ». Il permet ainsi de générer des données qualitatives pertinentes pour ces travaux de thèse.

2.2.1 Structure du workshop

L'objectif du workshop était d'amener les participants à échanger et réfléchir sur les enjeux de l'intégration des données captées dans la conception amont de produits. En ce sens, une structure semi-directive a été choisie. Au cours du workshop, les participants ont pu échanger librement sur une suite de question ouverte définie par avance. Cet atelier a été divisé en trois parties distinctes, illustrées sur la figure 19.

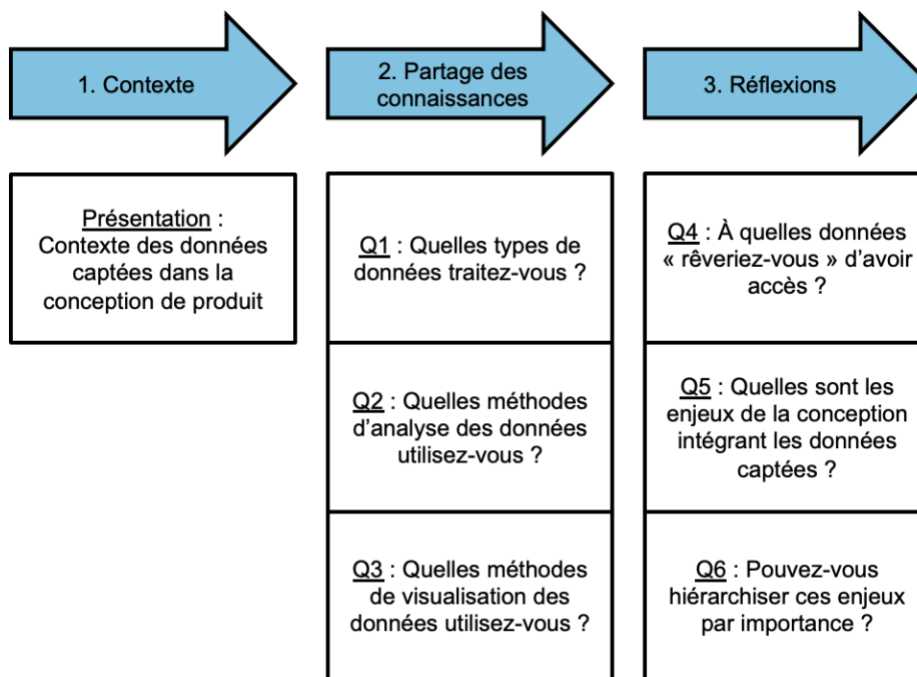


Figure 19 Structure du workshop académique

L'objectif de la première partie « contexte » de l'atelier était d'établir le cadre de l'atelier ainsi qu'une base de connaissances communes aux participants. Ainsi les approches de conceptions intégrant les données captées (partie 2.1.1 et 2.1.2) ont été présentées. Ensuite, la partie « partage des connaissances » a encouragé les participants à échanger leurs expériences personnelles sur les données captées dans la conception de produits. Cette partie de restitution a également permis d'établir un contexte d'échanges entre les participants à l'atelier avant d'aborder la troisième partie exploratoire, la partie « réflexions ». Cette dernière visait à répondre directement à la question de recherche du workshop.

2.2.2 Participants

Tous les participants à l'atelier étaient des volontaires inscrits à la conférence scientifique DESIGN2020. Pour participer à l'atelier, les participants ont été invités à rejoindre un canal vidéo et vocal en ligne pour communiquer entre eux. Ils ont également été invités à participer à un tableau blanc interactif en ligne. Dix chercheurs ont pris part activement à l'atelier proposé dont quatre doctorants, trois professeurs, deux associés de recherche et un analyste de données. Bien qu'ils travaillent dans des institutions différentes, chaque participant possède une expertise dans au moins un des domaines suivants : la conception de produits, les systèmes produits-services ou la science des données. La diversité des profils des participants est une source de variété pertinente dans les réponses proposées.

2.2.3 Déroulement et analyse

L'ensemble de l'atelier s'est déroulé selon la structure exposée précédemment. Après une brève présentation du contexte, les participants ont abordé la série de questions détaillée dans la figure 19. Les questions ont été discutées une à une de la même façon de la première à la cinquième. Pour une question donnée, les participants, dans un premier temps, ont proposé individuellement plusieurs réponses à la question posée au moyen de post-it virtuels sur le tableau blanc interactif. Ensuite, une phase de discussions a lieu au cours de laquelle les participants ont été invités à partager, élaborer et discuter leurs réponses les uns avec les autres. La sixième et dernière question a donné lieu à un débat ouvert au cours duquel les participants se sont mis d'accord sur un classement des enjeux liés à l'intégration des données captées dans la conception. Finalement, le workshop a engendré un tableau virtuel rempli de post-it répondant aux différentes questions ainsi qu'un classement des enjeux liés aux données captées dans le processus de conception. De plus, les échanges pertinents des phases de discussions de chaque question ont été retranscrits de manière anonyme.

Il est à noter que l'approche choisie du workshop semi-directif n'est pas exempte de certaines limitations. D'une part son déroulement et sa structure étant prédéfinis, une construction différente de l'atelier aurait peut-être pu générer des données qualitatives différentes. D'autre

part, le workshop ayant eu lieu en ligne, ce contexte particulier peut avoir entravé l'engagement des participants et donc les réflexions lors de l'atelier.

2.2.4 Résultats

Les contributions du workshop ont été analysées afin de mettre en évidence la perspective académique des enjeux liée à l'intégration des données captées dans la conception de produits. Au travers des questions Q5 et Q6, les participants ont mis en évidence et hiérarchisés cinq enjeux principaux. Le tableau 4 présente les enjeux classés par ordre de priorité.

Tableau 4 Enjeux identifiés lors du workshop et leur priorité

Enjeux	Priorité
Développement des méthodes et outils	Élevée
Proposition des cas d'usage pertinents	Élevée
Choix des bonnes données à capter	Moyenne
Aspects éthiques des données captées	Moyenne
Synergies de l'intégration des données captées	Faible

Le premier enjeu unanimement choisi par les participants comme hautement prioritaire est la nécessité de développer des méthodes et outils dédiés. Il s'agit d'une conséquence directe au manque de structure pour l'intégration des données captées dans le processus de conception des produits physiques. Au cours des discussions, les participants ont formulé de nombreuses questions auxquelles les méthodes ou outils futurs devraient répondre, notamment les suivantes : « En fonction du type de produit, quelles données captées doivent être privilégiées ? », « Comment peut-on juger en amont de la valeur des données captées ? » ou « Quel niveau de granularité choisir pour exploiter des données captées ? » (traduit par l'auteur). En outre, les participants ont également ajouté un second enjeu prioritaire : celui d'identifier des cas d'usage pertinents. Les participants espéraient gagner en qualité et en temps dans leurs recherches grâce à ces solutions déjà expérimentées. Cependant, l'intégration de données captées dans la conception étant un domaine encore récent, il semble qu'il y ait peu d'études de cas existantes. De plus, les contextes très spécifiques de chaque cas d'usage rendent le transfert de connaissances difficile. À cet égard, un participant a mentionné le catalogue de cas d'usages de l'IoT de Wilberg et al. (2018) comme source d'inspiration potentielle.

Ensuite, deux enjeux différents ont été classés comme des priorités à moyen terme par les participants. Le premier concerne le choix des capteurs à intégrer pour capter les données. Les participants ont souligné les difficultés à traduire les données captées en informations fiables sur le produit. Ils ont exprimé un manque d'approches pour faire ce lien. Au cours des discussions, un participant a suggéré comme solution à ce problème une « bibliothèque de capteurs ». Un outil qui proposerait, en fonction des besoins en données des concepteurs, les capteurs associés, leurs avantages, leurs inconvénients et des cas d'application illustratifs. Le second enjeu soulevé comme priorité à moyen terme concerne l'éthique des données captées. Les participants se sont dits préoccupés par l'accès aux données d'utilisation des produits et ont soulevé un besoin de protection des données des utilisateurs et de leur vie privée. Ils craignent que certaines mauvaises pratiques déjà présentes sur Internet ne soient reproduites sur les produits physiques au travers de leur connectivité croissante. Les discussions entre les participants ont porté sur la nécessité d'un « code de conduite » à suivre lors de la conception de produits intelligents et connectés afin de « tirer le meilleur parti des données sans porter atteinte à la vie privée des utilisateurs » (traduction par l'auteur).

Le dernier enjeu de recherche soulevé concerne l'exploration des forces et des faiblesses des futures méthodes de conception de produits intégrant les données captées. Cet enjeu implique une connaissance plus mûre de l'intégration des données captées et a donc été classé avec une faible priorité. Pour les participants, il semblait intéressant de pouvoir explorer de potentielles synergies entre les méthodes de conception actuelles et celles futures, spécifiques aux données captées.

Les enjeux mentionnés dans le workshop complètent ceux identifiés par la littérature scientifique. Il représente une perspective scientifique de la conception intégrant les données captées. Il est pertinent de la compléter avec une perspective industrielle.

2.3. Perspectives industrielles des enjeux

L'étude de la littérature scientifique a permis de montrer que l'intégration des données captées dans la conception de produits n'était pas encore maîtrisée. Ainsi, pour compléter la revue de la littérature des enjeux proposée et enrichir la perspective scientifique, une campagne

d'entretiens avec des entreprises de produits intelligents et connectés a été menée. Dans leurs recherches, Holler et al. (2016) et Meier et al. (2022) ont également interrogé des acteurs industriels pour explorer les défis de la conception informée par les données. La spécificité des entretiens proposés est qu'ils se focalisent sur les capteurs comme source de données. Le format des entretiens permet de donner un cadre commun à l'exploration des pratiques de différentes entreprises. Il s'agit d'identifier les enjeux de l'intégration des données captées dans la conception de produits. Les entretiens permettent ainsi de générer des données qualitatives pertinentes pour ces travaux de thèse.

2.3.1 Structure des entretiens

Pour chaque entreprise, les objectifs des entretiens étaient de comprendre les pratiques actuelles concernant les données captées dans le processus de conception, puis d'explorer les obstacles à leur meilleure intégration. Pour ces raisons, une approche semi-structurée a été choisie pour la campagne d'entretiens. Ainsi, le guide d'entretien semi-structuré a été conçu pour laisser les personnes interrogées s'exprimer librement sur plusieurs questions prédéfinies. Il a été construit sur la base de l'état de l'art scientifique et des recommandations de Schultze et Avital (2011). Le guide d'entretien est illustré sur la figure 20.

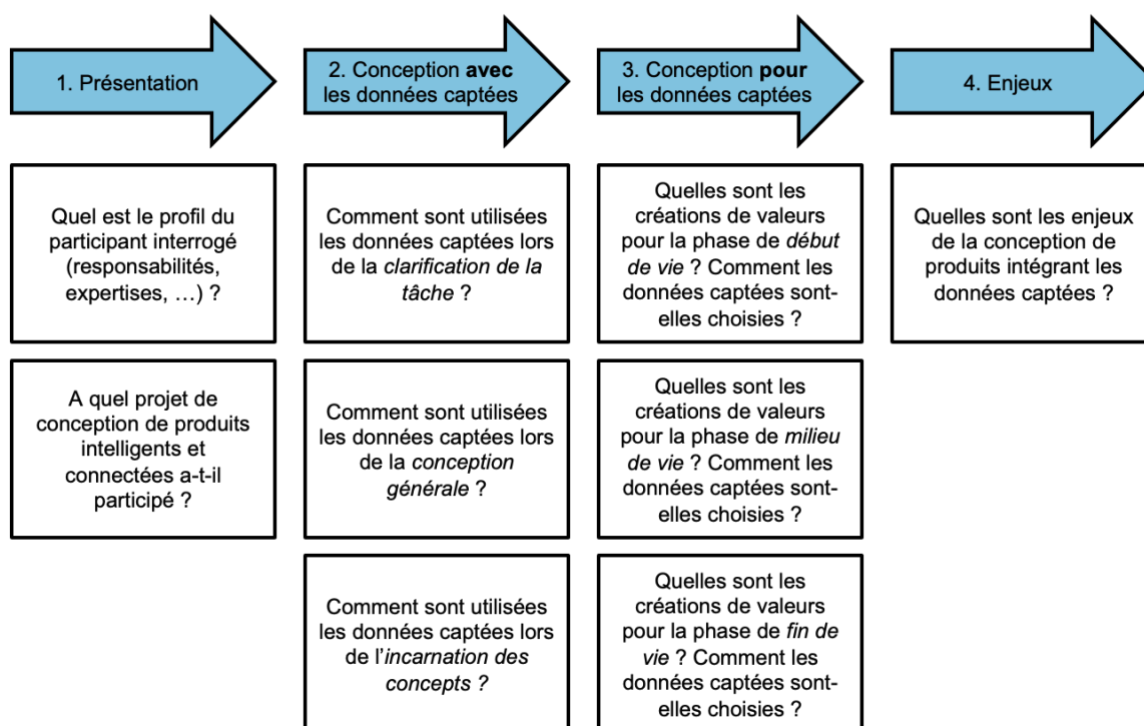


Figure 20 Structure des entretiens industriels

Le guide d'entretien est divisé en quatre parties. Tout d'abord, une partie introductive dans laquelle les participants se présentent, ainsi que leurs expertises et leurs projets actuels ou passés liés aux produits intelligents et connectés. Ensuite, dans la deuxième phase du guide d'entretien, l'accent est mis sur l'utilisation des données captées lors de la conception de produits. Ainsi, les participants sont interrogés sur l'utilisation qu'ils font des données captées dans les différentes phases du processus de conception. Après, dans la troisième partie du guide d'entretien, les participants sont interrogés sur les créations de valeurs basées sur les données captées et comment ils choisissent les données captées associées au moment de la conception. Les créations de valeurs pour les différentes phases du cycle de vie sont passées en revue. Enfin, dans la dernière phase du guide d'entretien, les participants sont invités à s'exprimer sur les enjeux relatifs aux données captées.

2.3.2 Participants

Pour garantir la pertinence de cette recherche, il était nécessaire d'interroger des entreprises et des parties prenantes ayant de l'expérience dans le domaine des données captées par les produits physiques. À cet égard, des entreprises proposant des produits de consommation intelligents et connectés ont donc été sélectionnées. Des entreprises fabriquant des produits intelligents et connectés dans les domaines du sport, de la médecine, de loisirs, de la mobilité ainsi que de l'électroménager ont été contactées. Parmi les entreprises, différents profils ont été interrogés : des entreprises de différentes tailles (start-ups, moyennes et multinationales) ainsi que de différentes maturités (de celles qui produisent des produits intelligents et connectés depuis plusieurs années à celles qui débutent). De même, plusieurs profils de participants (ingénieurs R&D, chefs de projet, designers, etc.) ont été interrogés. Ils avaient tous une forte expertise en matière de données et/ou de capteurs, et la grande majorité des participants avaient au moins cinq années d'expérience.

Le travail de sélection des entreprises et des participants a permis d'obtenir un spectre expert, large et varié pour l'exploration des enjeux liés à l'intégration des capteurs et de leurs données dans la conception. Finalement, 12 entretiens ont été menés avec 15 industriels différents et cela dans 9 entreprises différentes. Pour des raisons de confidentialité, les entreprises ne sont

pas explicitement nommées. Le tableau 5 résume les profils des entreprises et des participants à la campagne d'entretien.

Tableau 5 Profils des entreprises et des répondants à la campagne d'entretiens

Entreprise	Industrie	Chiffre d'affaires (en euros)	Nb d'employés	Profils des participants	
				Entretien 1	Entretien 2
1	Automobile	20 Mrd	100 000	Ingénieur R&D IoT	
2	Mobilité	10 Mio	25	CEO	Ingénieur Data
3	Mobilité	35 Mio	100	Chef de la R&D	
4	Loisirs	200 Mio	1000	Ingénieur Test & Directeur Technique	
5	Loisirs	30 Mio	50	Ingénieur R&D IoT & Ingénieur Test	
6	Sports	3 Mrd	15 000	Chef de projet Data & Chef de projet IoT	
7	Sports	100 Mio	200	Ingénieur R&D IoT	
8	Électroménager	7 Mrd	30 000	Designer IoT	Chef de la R&D
9	Médical	50 Mio	200	Chef du Design	Ingénieur R&D IoT

2.3.3 Déroulement et analyse

L'ensemble des participants a répondu aux questions du guide d'entretien. Tous les entretiens ont été réalisés en ligne via un logiciel de partage de voix et de vidéos. Ils ont été réalisés entre avril 2021 et juin 2021 avec une durée minimale de 36 minutes, une durée maximale de 73 minutes et une moyenne de 51 minutes. Les entretiens ont été anonymisés et retranscrits en

plus de 16 500 mots. Afin d'extraire les enjeux liés à l'intégration des données captées dans les entretiens, une analyse thématique a été appliquée à leurs transcriptions. Une approche de codage déductive (Boyatzis, 1998) a été mise en œuvre. Les codes sont des étiquettes utilisées pour décrire le contenu d'un extrait de texte. Les trois codes suivants ont été choisis pour l'analyse : « enjeux liés aux méthodes et à l'expertise », « enjeux liés aux coûts » et « enjeux liés à l'interprétation ». Ils sont dérivés de l'étude de la littérature scientifique sur les enjeux présentés dans la sous-section 2.1.3. Ainsi, une analyse individuelle de chaque transcription a tout d'abord été effectuée afin d'affecter les différents codes aux extraits de texte correspondants. Ensuite, pour chaque code, une analyse comparative des extraits de texte associés a été réalisée afin de mettre en évidence les enjeux similaires dans les différentes transcriptions.

Il est à noter que l'approche choisie des entretiens semi-directifs n'est pas exempte de certaines limitations. D'une part, son déroulement et sa structure prédéfinie constituent une première limite. Une construction différente du guide d'entretien pourrait peut-être générer des données qualitatives différentes. D'autre part, la nature confidentielle de certains projets menés sur les données captées par les entreprises peut avoir bridé les discussions avec certains participants.

2.3.4 Résultats

Les contributions des entretiens ont été analysées afin de mettre en évidence la perspective industrielle des enjeux liés à l'intégration des données captées. Les enjeux communs, c'est-à-dire mis en évidence par au moins deux des neuf entreprises interrogées, sont présentés dans cette section. Ils sont présentés en fonction des codes qui leur ont été attribués pour l'analyse.

Tout d'abord, les enjeux identifiés relatifs au manque de méthode sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 Enjeux relatifs aux méthodes et à l'expertise

Enjeux	Occurrence
Manque de méthodes	5
Manque de cas d'usage	5
Manque de lignes directrices	4
Manque d'organisation dans les équipes	2

L'absence de structures, à savoir de méthodes, de bonnes pratiques, d'organisations internes, etc. pour réussir l'intégration des données captées s'est révélé être un enjeu récurrent lors des entretiens industriels. Toutes les entreprises interrogées ont convenu qu'une approche structurée était nécessaire pour intégrer avec succès les données captées et maximiser leur potentiel sur l'ensemble du cycle de vie. Certaines entreprises ont admis qu'elles manquaient d'expérience dans l'intégration des données captées au cours de la conception. En effet, bien que les données captées soient une partie intégrante de leurs produits intelligents et connectés, elles sont peu collectées et encore moins exploitées. Ces entreprises n'ont pas de vision à long terme avec les données. Elles les utilisaient pour répondre à des besoins fonctionnels du produit mais elles n'anticipaient pas d'autres usages lors de la conception. Au vu de la tendance à la numérisation des produits physiques, elles ont pris conscience de la valeur des données captées et ont exprimé le besoin de méthodes pour les intégrer au mieux. Il est intéressant de noter que quelques entreprises ont indiqué être en train de restructurer leur organisation interne pour s'orienter vers un processus de conception intégrant davantage les données. Les entreprises les moins expérimentées n'ont pas été les seules à exprimer un besoin de structure, les entreprises plus expérimentées en matière d'intégration de données l'ont également exprimé. En effet, étant donné la nouveauté du sujet, elles souhaitaient s'appuyer sur un support éprouvé et fiable pour guider leur intégration de données captées, accélérer la conception, ses coûts et sa qualité. En effet, malgré une expérience plus importante, leur processus d'intégration des données captées n'est pas structuré et reste heuristique. À cet égard, un participant a déclaré : « Pour identifier les données pertinentes à collecter et les capteurs associés, nous devons beaucoup expérimenter. Parfois, nous avons de bons résultats, parfois non. »

Ensuite, un autre enjeu relatif au manque d'expérience parmi les entreprises est le manque de cas d'usage. Plusieurs entreprises ont mentionné leur besoin de cas d'usage au cours des entretiens. La plupart des entreprises souhaitaient les utiliser comme des moyens de communication. Les principes et les possibilités de l'intégration des données captées dans la conception des produits physiques seraient présentés aux décideurs au moyen de cas d'usage pertinents. L'idée est ainsi de les convaincre de débloquer des investissements dans la conception basée sur les données au sein de l'entreprise. Les cas d'usage de données captées sont également intéressants lorsqu'ils sont présentés aux parties prenantes non expertes de la conception de produits. Ils peuvent les inciter à réfléchir à l'intégration des données appliquées

à leurs propres spécialités. « Il est nécessaire de prêcher le potentiel des données au sein des entreprises », a en ce sens remarqué un participant.

Ensuite, les enjeux identifiés relatifs aux coûts induits par les données captées sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7 Enjeux relatifs aux coûts des données captées

Enjeux	Occurrence
Prix des données captées	8
Retour sur investissement flou	4
Justification la connectivité	4
Modélisation des coûts de l'IoT	3
Sécurité des données	3
Éthique et vie privée	2
Impacts environnementaux	2

Pour la majorité des concepteurs interrogés, les coûts financiers induits par les capteurs et les données ont été identifiés comme le principal obstacle à l'intégration des données captées dans la conception de produits physiques. Presque toutes les entreprises ont mentionné cet enjeu au cours de la campagne d'entretiens industriels. L'investissement dans les capteurs et les données est considéré comme trop coûteux. « Mettre des capteurs dans les produits, collecter des données et les stocker dans un *data lake* n'est pas bon marché. Faire l'évaluation de tous ces coûts refrène les projets. En plus, il est difficile de quantifier les gains potentiels apportés par cette connectivité des produits ». En effet, outre le coût de l'intégration des données dans les produits physiques, il semble difficile d'évaluer le retour sur investissement de l'intégration des capteurs et de leurs données dans la conception. Par conséquent, le budget des services associés dans l'entreprise est limité par manque de « preuves de leurs potentiels ». Tous les participants se sont pourtant déclarés confiants dans l'intégration des données captées. Ils regrettent cependant que la politique de l'entreprise ait souvent tendance à s'en tenir à l'investissement minimum. Un participant résume ainsi la situation : « Il est en effet perçu comme intéressant de récupérer des informations via des capteurs et des données. Mais pour l'instant, l'objectif est de faire quelque chose de plus concret avec un retour économique plus rapide. Notre budget R&D n'est pas infini. » En outre, certaines entreprises ont mentionné le besoin d'une

modélisation standardisée des coûts impliqués par les données captées afin de mieux les représenter et les comparer.

Aux coûts financiers s'ajoutent les coûts environnementaux associés à l'infrastructure IoT sur laquelle reposent les données captées. « L'IoT [dans les produits physiques] représente un coût environnemental, temporel et financier énorme », a ainsi déclaré un participant. Certains industriels ont jugé que dans le contexte actuel de ressources se raréfiant et d'économie d'énergie, il était nécessaire de justifier d'un intérêt réel pour la connectivité dans le produit. Les concepteurs estiment en effet qu'elle doit profiter aux utilisateurs et/ou constituer une solution utile et durable. Un industriel s'exprimait au sujet d'un casque de vélo intégrant de la connectivité : "La production de masse de ces produits n'est pas réaliste. Sur une machine à laver, pourquoi pas, mais ici ça n'apporte pas suffisamment de valeur".

Enfin, certains participants ont évoqué le défi éthique lié à l'introduction de la connectivité des produits physiques. Ces industriels ont conscience des enjeux de protection des données et de la vie privée ainsi que des responsabilités associées. En outre, certains participants ont également exprimé le besoin de respecter un cadre éthique commun lors de la conception de produits intelligents et connectés. Ils estiment qu'il faut fixer en amont des limites à la collecte et l'analyse des données captées.

Enfin, les enjeux identifiés relatifs à l'interprétation des données captées sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 8 Enjeux relatifs à l'interprétation des données captées

Enjeux	Occurrence
Accès aux usages avec les données	5
Accès à des informations sur l'utilisateur	3
Limitation physique du produit	3
Transfert des acquis et corrélations	2

Les enjeux identifiés concernent principalement l'accès au contexte d'utilisation via les données captées, c'est-à-dire l'identification des interactions complexes entre le produit, son utilisateur et son environnement. Les industriels ont fait part de difficultés à traduire les données d'utilisation captées par les produits en informations pertinentes. Il faut en effet disposer de

suffisamment de données pour établir des corrélations fiables et en extraire des connaissances robustes sur le produit. La complexité d'un produit physique dans un environnement réel limite les conclusions basées sur les données. Des participants ont par exemple déclaré : « souvent, le contexte manque pour tirer des conclusions intéressantes à partir des données captées » ou aussi « les produits avec leurs capteurs intégrés manquent d'un lien supplémentaire à l'environnement pour bien comprendre le contexte d'usage ».

Certaines entreprises ont également exprimé le défi spécifique que représente l'accès à des informations sur l'expérience de l'utilisateur du produit. Toujours dans le but d'obtenir des informations précieuses pour la conception, il s'agit d'accéder à des ressentis émotionnels des utilisateurs au travers de données captées. La corrélation de données pour accéder à l'expérience de l'utilisateur est un sujet de recherche très complexe. Un participant a illustré ce défi par son expérience : « Le même environnement et le même utilisateur peuvent générer des résultats très différents d'un jour à l'autre parce que les conditions et le contexte seront toujours différents. » Un autre participant a aussi déclaré pour résumer : « Les êtres humains sont complexes et évoluent dans un monde complexe. »

Enfin, certains industriels ont estimé que l'intégration dans le produit physique de certains éléments électroniques était parfois un facteur limitant. En effet, l'offre technologique actuelle ne pouvait pas toujours satisfaire les besoins des concepteurs. Certains éléments électroniques s'avèrent trop coûteux ou aux caractéristiques techniques insuffisantes pour mettre en œuvre la création de valeurs souhaitée. Un participant a partagé un exemple relatif à un de ses produits : « Si un moteur surchauffe, nous y plaçons un capteur de température pour des raisons de sécurité afin de l'arrêter en cas d'urgence, mais nous ne pouvons malheureusement pas ajouter de mémoire pour suivre les changements de température et essayer ainsi de comprendre les conditions défectueuses. »

Les enjeux mentionnés dans les entretiens complètent ceux identifiés par la littérature scientifique et le workshop académique. Il représente une perspective industrielle de la conception basée sur les données captées. Il est pertinent de synthétiser l'ensemble de ces différentes perspectives pour donner une vue d'ensemble des enjeux majeurs liés à l'intégration des données captées dans la conception.

2.4. Synthèse des enjeux

Les enjeux évoqués dans les parties précédentes combinent une perspective à la fois scientifique et industrielle car ils sont issus de l'étude bibliographique, du workshop avec des chercheurs et de la campagne d'entretiens. Bien que les chercheurs et les acteurs industriels reconnaissent tous les potentiels et les perspectives prometteuses de l'intégration des données captées dans la conception de produits physiques, plusieurs enjeux ont été identifiés dans le cadre des recherches de ces travaux de thèse. Cette section vise à synthétiser l'ensemble des enjeux relatifs à la conception de produits, domaine d'étude principal de ces travaux de thèse. Les enjeux mis en avant dans cette section sont ceux qui, dans le cadre de ces travaux, sont apparus comme les plus importants dans la littérature scientifique, pour les chercheurs du workshop et pour les acteurs industriels interrogés. Un résumé des principaux enjeux synthétisés en plusieurs constats est présenté dans la figure 21.

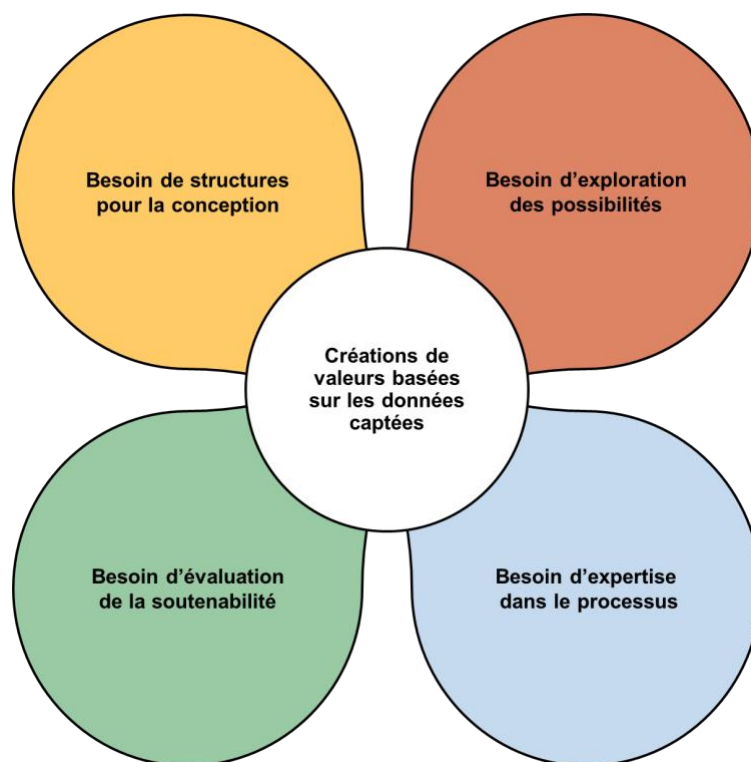


Figure 21 Constats relatifs aux enjeux de la conception et des données captées

L'absence de structure pour encadrer la conception de produits intégrant les données captées est apparue comme une évidence dans ces recherches. Il s'agit d'une préoccupation majeure

exprimée simultanément dans la littérature scientifique, le workshop académique et les entretiens avec les acteurs industriels. Ce manque peut être attribué à la nouveauté de l'intégration des données captées dans la conception de produits physiques. À ce jour, les données ne sont pas considérées comme un élément essentiel de la conception des produits, mais seulement comme un outil secondaire pour aider les concepteurs (Cantamessa et al., 2020). Un changement de paradigme semble s'opérer dans la conception des produits physiques. Pour progresser vers ce nouveau paradigme, des structures formelles sont nécessaires afin de proposer des bases communes pour la recherche et l'industrie. À cet égard, c'est l'absence de méthodologie sur le sujet qui semble faire d'abord défaut. Au moment de la rédaction de ces travaux, l'intégration des données captées dans la conception semble réalisée d'une façon heuristique et au cas par cas, il n'existe pas d'approches systématiques partagées par les concepteurs. La proposition de telles méthodes permettrait de donner un cadre commun et d'établir les bonnes pratiques afin que les approches de conception intégrant les données captées soient plus rapides, pertinentes et efficaces. Cela qui constituerait une première avancée dans le changement de paradigme. Ensuite, l'étude des méthodes proposées permettrait de continuer à avancer vers le nouveau paradigme en améliorant davantage la conception. De plus, pour assister les concepteurs, des outils spécifiques à l'intégration des données captées peuvent être développés en complément des méthodes proposées. Ils participeraient également à répondre au manque de structure et à l'amélioration de la qualité, du temps et des coûts du processus de conception. En synthèse de ces éléments, on tire un premier constat des enjeux : le besoin de structures pour l'intégration des données captées dans la conception.

Un deuxième enjeu important mis en évidence au travers de l'étude exploratoire des enjeux est le manque de cas d'usage. Dans cette recherche, les cas d'usage sont en effet apparus comme un élément introductif essentiel à l'intégration des données captées dans la conception des produits physiques. Tout d'abord, d'un point de vue à la fois industriel et scientifique, les cas d'usage ont un potentiel de représentation important. Bien qu'ils soient des cas particuliers, ils contribuent à illustrer les opportunités et les limites des données captées de façon empirique. D'un point de vue scientifique, ils sont essentiels aux recherches méthodologiques. Les cas d'usage permettent d'élaborer et de tester différentes propositions de méthodes afin d'évaluer leurs potentiels. D'un point de vue industriel, les cas d'usage sont aussi des sources de communication et d'inspiration pour les concepteurs. En effet, ils permettent d'illustrer des créations de valeurs basées sur les données captées aux décisionnaires et sont, en ce sens,

considérés comme un levier pour encourager l'investissement dans la recherche sur l'intégration des données au sein des entreprises. Ils permettent également d'illustrer des créations de valeurs basées sur les données captées aux parties prenantes de la conception pour inspirer ou appliquer celles déjà éprouvées à leurs produits. En synthèse de ces éléments, on tire un deuxième constat des enjeux de la conception intégrant des données captées : le besoin d'exploration des créations de valeurs basée sur les données captées.

Ensuite, un troisième enjeu relatif à la conception de produits soulevé par les recherches concerne les coûts impliqués par les données captées. Les coûts financiers relatifs à la connectivité dans les produits ont été souvent exprimés à la fois dans la littérature scientifique et dans les entretiens avec les industriels. Pour pouvoir exploiter les potentiels des données captées, il est nécessaire de mettre en place une infrastructure IoT aux coûts financiers importants. En effet, il faut pourvoir les produits des composants électroniques requis pour la connectivité mais aussi déployer des ressources pour récolter, stocker et analyser les données. De plus, les retours sur ces investissements sont aussi difficiles à évaluer. En outre, les coûts induits par les données captées ne sont pas seulement financiers mais aussi environnementaux. La mise en place de l'infrastructure IoT nécessaire à la connectivité ajoute aussi à l'impact environnemental du produit. La fabrication de l'électronique embarquée et l'énergie consommée pour la récolte, le transfert et l'analyse s'ajoute au bilan environnemental du produit. De la même manière que pour l'investissement financier, il est apparu nécessaire de pouvoir évaluer l'intérêt de la connectivité avant de mettre en œuvre les solutions technologiques nécessaires à l'exploitation des données. Par ailleurs, l'investigation des enjeux à l'intégration des données captées dans la conception a aussi mis en évidence les enjeux éthiques associés. Il est nécessaire de pouvoir juger de la dimension éthique des informations potentiellement accessibles par les produits intelligents et connectés ou par l'interprétation de leurs données captées. La protection de la vie privée des utilisateurs est à anticiper dès la conception. En synthèse de ces éléments, il apparaît donc essentiel de pouvoir évaluer les impacts de l'intégration des données captées respectivement sur le capital économique de l'entreprise, sur la préservation de l'environnement et sur la qualité de vie des individus. L'évaluation des trois notions précédemment mentionnées correspond à l'évaluation de critères issus des trois piliers – économique, environnemental et social – de la soutenabilité. En effet, la soutenabilité, appliquée à la conception, correspond à la considération conjointe des impacts économiques, environnementaux et sociaux des produits lors du processus de conception. De

nombreux critères peuvent être proposés pour définir chacun des trois piliers et donc définir par extension la soutenabilité. Au vu des enjeux d'évaluations mentionnés précédemment, on considèrera les piliers de la soutenabilité tels qu'ils sont définis par la triple performance (*Triple Bottom Line*) de Elkington (1998). Ainsi, le pilier économique correspond au capital économique de l'entreprise, le pilier environnemental à la protection de l'environnement et ses ressources et le pilier social à la qualité de vie de la société et de ses individus. On tire donc un troisième constat des enjeux de la conception intégrant des données captées : le besoin d'évaluation selon les trois piliers de la soutenabilité des créations de valeurs apportées par les données captées.

Enfin, un dernier enjeu majeur a été identifié. Il est relativement transverse et inhérent aux enjeux majeurs précédents, c'est le manque d'expertise des concepteurs vis-à-vis de l'intégration des données captées dans la conception de produits. Il s'agit en effet d'une expertise pluridisciplinaire mêlant la conception de produits physiques, les sciences des données et les TIC. Le manque d'expertise lié à la réunion nouvelle et spécifique de ces trois domaines participe en ce sens au manque de structure méthodologique identifié. De la même manière, il participe à brider l'exploration des potentielles créations de valeurs offertes par les données captées ainsi que leurs évaluations selon les trois piliers de la soutenabilité. À cet égard, un quatrième et dernier constat est tiré : le besoin d'expertise pour guider de l'intégration des données captées.

Cette synthèse conclut l'étude exploratoire des enjeux de l'intégration des données captées dans la conception de produits. Elle a permis de synthétiser les enjeux issus de la littérature scientifique ainsi que d'un workshop académique et une campagne d'entretiens industriels. L'association d'une perspective à la fois scientifique et industrielle donne une vue d'ensemble des enjeux à l'intégration des données captées dans la conception de produits. Quatre grands constats sont tirés de la synthèse des enjeux. Le premier fait état d'un besoin de structure pour mener l'intégration des données captées dans la conception de produits. Le deuxième dénote un besoin d'exploration des potentielles créations de valeurs basées sur les données captées dans les produits intelligents et connectés. Le troisième souligne le besoin d'évaluation des impacts des créations de valeurs basées sur les données captées selon les trois piliers de la soutenabilité. Le quatrième et dernier constat fait état d'un besoin d'expertise pour guider l'intégration des données captées.

2.5. Conclusion sur l'état de l'art

Afin de répondre à la question de recherche, le deuxième chapitre d'état de l'art présente un état des connaissances relatives au lien entre la conception de produits et les données captées. La première section du chapitre présente les travaux d'intérêts issus de la littérature scientifique. L'intégration des données dans la conception de produits est présentée de la façon suivante : d'abord au travers des approches intégrant les données captées pour créer de la valeur lors du processus de conception, ensuite au travers des approches de conception pour créer de la valeur avec les données captées dans le reste du cycle de vie du produit. La revue de ces approches basées sur les données captées ne permet pas d'apporter une réponse à la question de recherche précédemment soulevée. En effet, la conception basée sur les données captées pour la création de valeurs apparaît confrontée à plusieurs enjeux freinant son développement. Ainsi, la première section s'achève sur une investigation de ces enjeux dans la littérature scientifique. La deuxième et troisième section complètent cette investigation avec respectivement les perspectives de chercheurs et d'industriels. En ce sens, la deuxième section décrit la mise en œuvre et les résultats d'un workshop avec des chercheurs pour investiguer les enjeux relatifs à l'intégration des données captées dans la conception de produits. La troisième section décrit la mise en œuvre et les résultats d'une campagne d'entretien avec des industriels pour investiguer les mêmes enjeux. La quatrième section propose une synthèse de l'ensemble des enjeux identifiés dans les trois sections précédentes. Elle identifie ainsi les principaux enjeux à l'intégration des données captées dans la conception de produits, enjeux auxquels la thèse proposera une solution.

CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSE ET PROPOSITION D'UNE MÉTHODE OUTILLÉE

Le troisième chapitre d'étude prescriptive a pour objectif de proposer une réponse aux enjeux identifiés dans le chapitre précédent. La section 3.1 reprend ainsi la synthèse des enjeux pour formuler une problématique de recherche. La section 3.2 propose une méthode de conception ainsi qu'une hypothèse de résolution pour répondre à la problématique énoncée. La méthode proposée comprend deux phases consécutives qui sont décrites successivement dans les sections 3.3 et 3.4. Enfin la section 3.5 conclut le chapitre en résumant les éléments clefs abordés. La structure du chapitre est illustrée sur la figure 22.

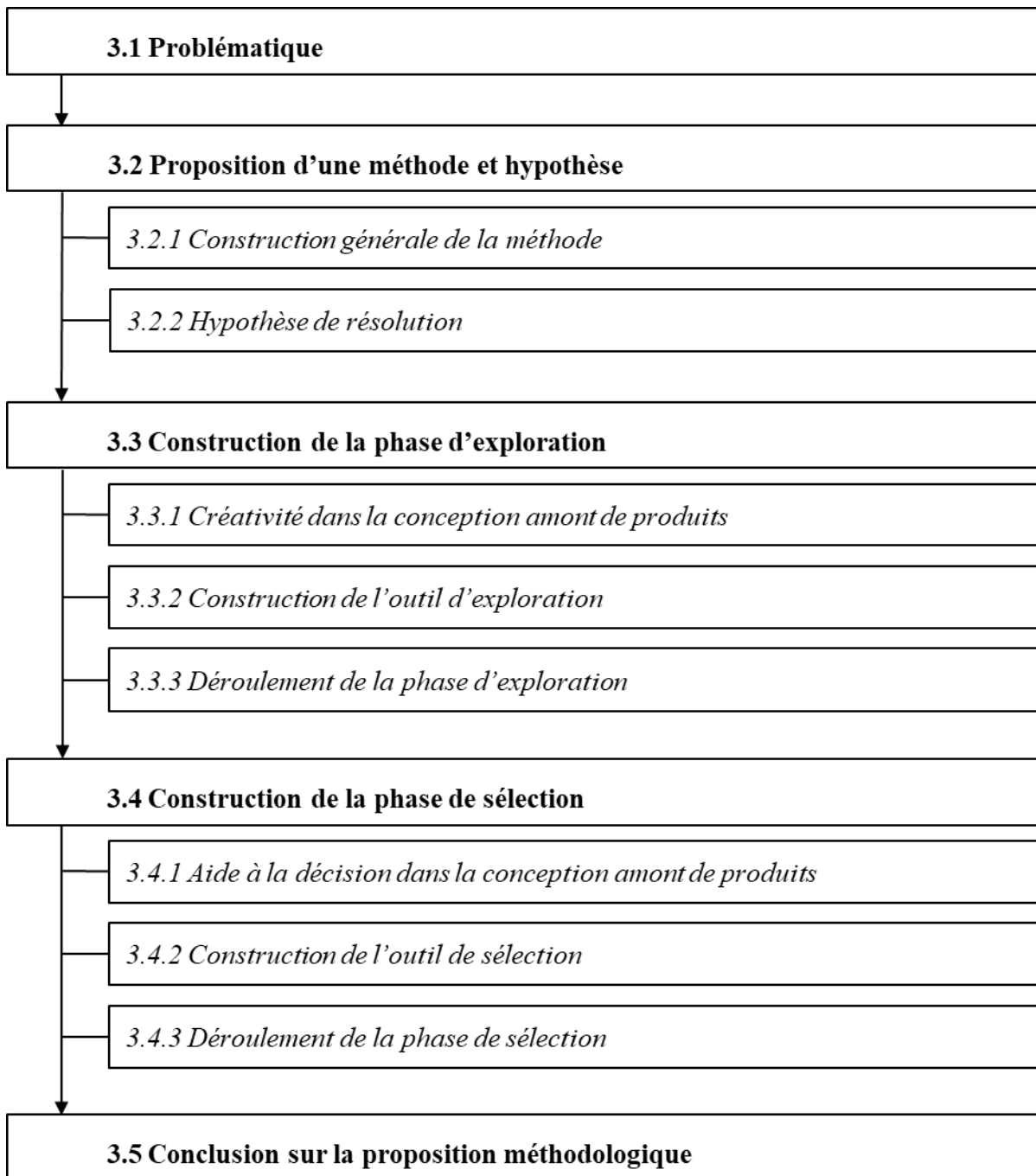


Figure 22 Plan du chapitre « Problématique, hypothèse et proposition d'une méthode outillée »

3.1. Problématique

L'investigation réalisée dans le chapitre précédent a permis de synthétiser les travaux issus de la littérature scientifique avec des perspectives académiques et industrielles. Elle a mis en évidence, sous forme de constats, les principaux enjeux liés à l'intégration des données captées dans la conception de produits. Parmi ces constats, il est apparu un besoin fondamental : le besoin de structure pour l'intégration des données captées dans la conception de produits. C'est pourquoi la problématique abordée dans ces travaux de thèse est la suivante :

Comment structurer l'intégration des données captées dans la conception amont du produit pour générer des créations de valeurs ?

Les données captées sont un élément d'un ensemble plus large les technologies numériques. Leur avènement récent induit un changement de paradigme dans la conception de produits physiques. La proposition d'une structure pour l'intégration des données captées dans la conception de produits est en ce sens une priorité pour les sciences de la conception. En effet, la formalisation d'une structure est une étape nécessaire vers la maîtrise des données captées en conception. Elle a un intérêt double. Du côté industriel, elle devrait permettre de rendre le processus de conception plus rapide, plus efficace et moins coûteux. Tandis que du côté scientifique, elle devrait permettre d'alimenter les recherches dans le domaine pour le faire progresser. D'autres recherches pourraient s'appuyer sur cette structure pour l'améliorer ou l'adapter à certaines spécificités.

3.2. Proposition d'une méthode et hypothèse

3.2.1 Construction générale de la méthode

Pour répondre à la problématique, ces travaux de thèse proposent sous la forme d'une nouvelle méthode pour la conception de produits. Afin de focaliser l'objectif sur les spécificités des données captées, l'approche proposée est une nouvelle méthode de *Design for X* où X

représente l'intégration des données captées. Ainsi, la proposition de méthode est nommée : **Design for Sensor Data Integration (DfSDI)**.

L'état de l'art sur la conception de produits a mis en évidence que les choix de conception dans les phases amont engagent une grande partie des impacts environnementaux et des coûts du produit. Les enjeux de l'intégration des données captées ont mis en évidence les importants impacts financiers, environnementaux et sociaux qu'elles peuvent impliquer. Ainsi afin d'avoir une incidence pertinente sur la conception des produits intelligents et connectés, la proposition de méthode s'intègre donc dans les phases amont du processus de conception. La phase de *conception générale* de l'approche systématique de la conception de produits proposée par Pahl et Beitz (2007) semble alors la plus appropriée. C'est lors de cette phase que sont définis les principes de fonctionnement et que les concepts du produit sont évalués. Il est important de noter que la méthode n'est pas restreinte à l'approche systématique mais qu'elle s'applique aussi aux autres méthodes de conception, dans les phases aux objectifs similaires à ceux de la *conception générale*.

Afin d'être la plus pertinente, la méthode proposée s'appuie sur les constats issus de la synthèse des enjeux car ils traduisent les besoins des concepteurs de produits intelligents et connectés. Sa construction donnera ainsi une structure proposant des solutions aux constats identifiés limitant l'intégration des données captées dans la conception de produits.

Un des constats soulevés par l'investigation des enjeux portait sur le besoin d'exploration des créations de valeurs basées sur les données captées. En ce sens, lors de la conception d'un produit, la méthode DfSDI doit pouvoir proposer une exploration des potentielles créations de valeurs basées sur les données captées spécifiques à ce produit. Pour donner une structure à cette exploration générique, la méthode proposera un cadre guidant une phase de créativité.

Un autre constat soulevé par l'investigation des enjeux portait sur le besoin d'évaluer la soutenabilité des créations de valeurs liées à l'intégration des données captées, c'est-à-dire des impacts économiques, environnementaux et sociaux relatifs à cette intégration. En ce sens, lors de la conception d'un produit, la méthode DfSDI doit proposer une évaluation de la soutenabilité des potentielles créations de valeurs basées sur les données captées spécifiques à

ce produit. Pour donner une structure à cette évaluation générique, la méthode proposera un cadre guidant une phase d'aide à la décision.

Enfin, un constat soulevé par l'investigation des enjeux portait sur le besoin d'expertise pour guider l'intégration des données captées dans la conception de produits. En ce sens, les deux phases proposées par la méthode – de créativité et d'aide à la décision – adopteront des approches systématiques pour guider au mieux les concepteurs. De plus, chacune des deux phases sera accompagnée d'un outil dédié construit pour y inclure l'expertise relative à l'intégration des données captées. Les outils dédiés permettront ainsi de faciliter les phases de la méthode. L'intention est que la méthode reste accessible à des concepteurs de tous les domaines et de tous niveaux d'expertise dans les données captées. En outre, constatant le besoin d'expertise, certains travaux scientifiques ont mentionné un besoin de formation des futurs concepteurs aux données. En ce sens, le potentiel didactique des outils construits pour soutenir la méthode sera évalué auprès de concepteurs en formation. Il s'agira d'évaluer si leurs usages permettent de développer des connaissances sur les données captées.

3.2.2 Hypothèse de résolution

En résumé, pour proposer une approche structurée intégrant des données captées, la méthode DfSDI doit proposer deux phases successives, systématiques et outillées, respectivement d'exploration et d'évaluation des créations de valeurs potentielles offertes par les données captées. De plus, elle doit s'intégrer lors des phases amont de la conception. Afin de valider la pertinence de la méthode DfSDI, l'hypothèse de résolution est la suivante :

La méthode DfSDI permet de structurer l'intégration des données captées pour générer des créations de valeurs lors de la conception amont de produits via :

- a. une exploration systématique des créations de valeurs potentielles ;**
- b. une sélection systématique des créations de valeurs potentielles.**

Les sections suivantes présenteront dans l'ordre la construction des deux phases de la méthode DfSDI, correspondant chacune à une partie de l'hypothèse de résolution.

3.3. Construction de la phase d'exploration

L'objectif de la première phase de la méthode DfSDI est l'exploration systématique des possibilités offertes par l'intégration des données captées. Il s'agit d'une phase de créativité durant laquelle les concepteurs doivent pouvoir identifier de potentielles créations de valeurs découlant de l'intégration des données captées.

3.3.1 Créativité dans la conception amont de produits

La première partie de la méthode DfSDI a pour objectif de guider les concepteurs dans la génération d'idées de créations de valeurs. Le processus de réflexion conduisant à la génération d'une idée nouvelle est complexe. Il est étudié par les sciences cognitives comme processus de créativité. Cette première phase se situe donc à l'intersection entre les sciences de la conception de produits et de la créativité. La créativité appliquée dans le cadre de la conception amont de produits a été définie par Sarkar et Chakrabarti (2007) comme suit : « la créativité est un processus par lequel un acteur utilise ses compétences pour générer des idées, des solutions ou des produits qui sont nouveaux et utiles » (traduction de l'auteur). En ce sens, ce sont les méthodes de créativité appliquées à la conception de produits qui sont considérées pour appuyer la première phase de la méthode. En effet, une bonne structuration du processus de créativité permet de générer des idées plus innovantes et de meilleure qualité. Il existe une très grande variété d'outils et de méthodes de créativité aux spécificités et complexités différentes.

Parmi les méthodes génériques les plus utilisées lors de la génération de concepts (Leopoldino et al., 2016), on trouve :

- Le brainstorming (Grossman, 1984) qui consiste à générer sans inhibition et jugement le plus de solutions possibles à un problème donné dans un temps imparti.
- L'inversion (Osborn, 1963) qui consiste à inverser intentionnellement des éléments d'un problème donné afin de changer le point de vue habituel pour stimuler la génération d'idée et l'innovation
- La méthode des six chapeaux (Bono, 1971) qui consiste aborder un problème en adoptant successivement différents points de vue prédéfinis. Les points de vue sont matérialisés par différents chapeaux.

- La matrice de découverte s'appuie sur la méthode synectique de Gordon (1961). Sous la forme d'un tableau, elle met en parallèle des concepts différents afin de générer systématiquement des idées à partir des associations proposées.

Il existe de très nombreuses autres techniques permettant de stimuler la créativité, Van Gundy (2005) en décrit un grand nombre dans son ouvrage.

Avec l'intégration croissante de la connectivité dans les produits, De Roecks et al. (2014) ont identifié une complexité nouvelle lors du processus de génération d'idées. Il faut pouvoir considérer conjointement les éléments numériques et physiques du produit. Ils ont préconisé en ce sens de développer des outils de support à la créativité spécifique aux solutions basées sur l'IoT. L'étude de la littérature scientifique dans la sous-section 2.1.2 a mis en évidence différents outils support à la créativité pour les solutions IoT. Les approches proposées sont axées sur l'idéation des solutions IoT répondant à des problèmes techniques ou à des besoins des utilisateurs. Cependant, elles n'adoptent pas une perspective holistique pour la création de valeurs basée sur les données captées.

Un manque est ainsi identifié parmi les approches de créativité liées à l'exploration des créations de valeurs permises par les données captées lors de la conception amont. En ce sens, la construction d'un outil pour guider les concepteurs dans cette tâche apparaît essentielle pour soutenir la première phase d'exploration de la méthode DfSDI.

3.3.2 Construction de l'outil d'exploration

Dans le but d'identifier des créations de valeurs potentielles apportées par l'intégration des données captées, la méthode DfSDI propose de mener des réflexions créatives. D'après le constat sur le besoin d'exploration, les possibilités offertes par les données captées ne sont pas suffisamment connues par les concepteurs non-experts. Il est donc nécessaire de développer un outil capable de représenter les principales données pouvant être récoltées par des capteurs embarqués. Les concepteurs pourront utiliser comme support ces capacités pour imaginer des créations de valeurs qui les intègrent dans leurs produits. En représentant ainsi les capacités de détection des capteurs embarqués plutôt que les capteurs eux-mêmes, l'outil laisse de côté les aspects techniques des capteurs embarqués. L'expertise n'est alors pas un facteur inhibant. Cela

permet à tous les concepteurs de participer aux réflexions créatives sur les potentielles créations de valeurs liées aux données captées pour le produit.

Pour construire un tel outil, il est tout d'abord nécessaire d'identifier les principales capacités de détection des capteurs embarqués disponibles. Ainsi, cinq grandes entreprises du marché mondial des capteurs intégrés ont été sélectionnées. Ces entreprises ont toutes des recettes supérieures à 200 millions de dollars. En outre, ces entreprises couvrent ensemble les principaux marchés des capteurs intégrés, à savoir les marchés des consommateurs, de l'industrie, de la médecine, de la mobilité et des bâtiments. On peut donc s'attendre à ce que leurs capteurs embarqués couvrent la majorité des applications conventionnelles. Enfin, ces entreprises proposent des fiches techniques de leurs capteurs librement accessibles en ligne et présentant un intérêt pour la construction ultérieure de l'outil. Les données des entreprises considérées sont spécifiées dans le tableau 9.

Tableau 9 Profils des entreprises prises en compte pour la conception de l'outil

Entreprise	Recette (en dollars) (2019)	Nb d'employés (2019)
Bosch Sensortec	1 400 Mio	400 000
Infineon Technologies	600 Mio	50 000
NXP Semiconductors	410 Mio	30 000
STMicroelectronics	300 Mio	40 000
Murata Manufacturing	240 Mio	80 000

Les fiches techniques disponibles de tous les différents types et modèles de capteurs produits par ces cinq entreprises ont été examinées pour identifier les principales capacités de détection. Elles comportaient pour la grande majorité une section « applications » dans laquelle les capacités de détection sont parfois explicites ou parfois sous-jacentes à des exemples d'applications. La figure 23 illustre un exemple d'une section « applications » pour un capteur donné.

BME280

Digital humidity, pressure and temperature sensor



Typical application

- Context awareness, e.g. skin detection, room change detection
- Fitness monitoring / well-being
 - Warning regarding dryness or high temperatures
 - Measurement of volume and air flow
- Home automation control
 - control heating, venting, air conditioning (HVAC)
- Internet of things
- GPS enhancement (e.g. time-to-first-fix improvement, dead reckoning, slope detection)
- Indoor navigation (change of floor detection, elevator detection)
- Outdoor navigation, leisure and sports applications
- Weather forecast
- Vertical velocity indication (rise/sink speed)

Figure 23 Illustration de la partie « applications » d'une fiche technique d'un capteur embarqué (adaptée de Bosch Sensortec, 2022)

Pour commencer, 221 fiches techniques pour les cinq entreprises considérées ont été analysées afin d'en extraire le contenu de la section « applications ». Ainsi, 763 applications dites « brutes » car n'ayant encore subi aucun traitement ont été regroupées au sein d'une même liste. Un filtrage systématique de cette liste a alors été effectué afin d'en éliminer les applications redondantes et sans intérêt. En ce sens, le filtrage observait les règles suivantes :

- Si l'application examinée est similaire à une application précédemment examinée, elle est supprimée.
- Si l'application examinée ne reflète pas une capacité de détection des capteurs, elle est supprimée.

Après ce filtrage, il restait 252 applications de capteurs. Afin de regrouper les applications similaires, cette nouvelle liste est à nouveau passée en revue selon les règles suivantes :

- Si l'application examinée dénote d'une capacité de détection similaire à des applications précédemment examinées, elle est groupée avec ces dernières.
- Sinon, elle forme un nouveau groupe potentiel d'application.

Parmi les groupes formés à l'issue de cette étape, ceux comptant moins de cinq applications différentes ont été écartés. Ce choix permet de ne conserver que les groupes présentant des capacités de détection usuelles. Ensuite, une étiquette retranscrivant la capacité de détection commune partagée par les applications groupées ensemble a été attribuée à chacun des groupes restants. Au total, 14 étiquettes ont été assignées. Les étiquettes mettent en évidence les principales capacités de détection des capteurs : luminosité, contact, élévation, image, position, pression, gaz, humidité, orientation, proximité, son, température, vitesse et vibration. La figure 24 résume et illustre le processus mis en œuvre, à titre d'exemple les applications rayées sont celles supprimées. De plus, le tableau 10 présente des exemples d'applications pour chacun des groupes. Les exemples d'applications au sein des groupes sont soit associés à un domaine d'application spécifique, soit multisectoriels lorsqu'ils concernent plusieurs domaines à la fois.

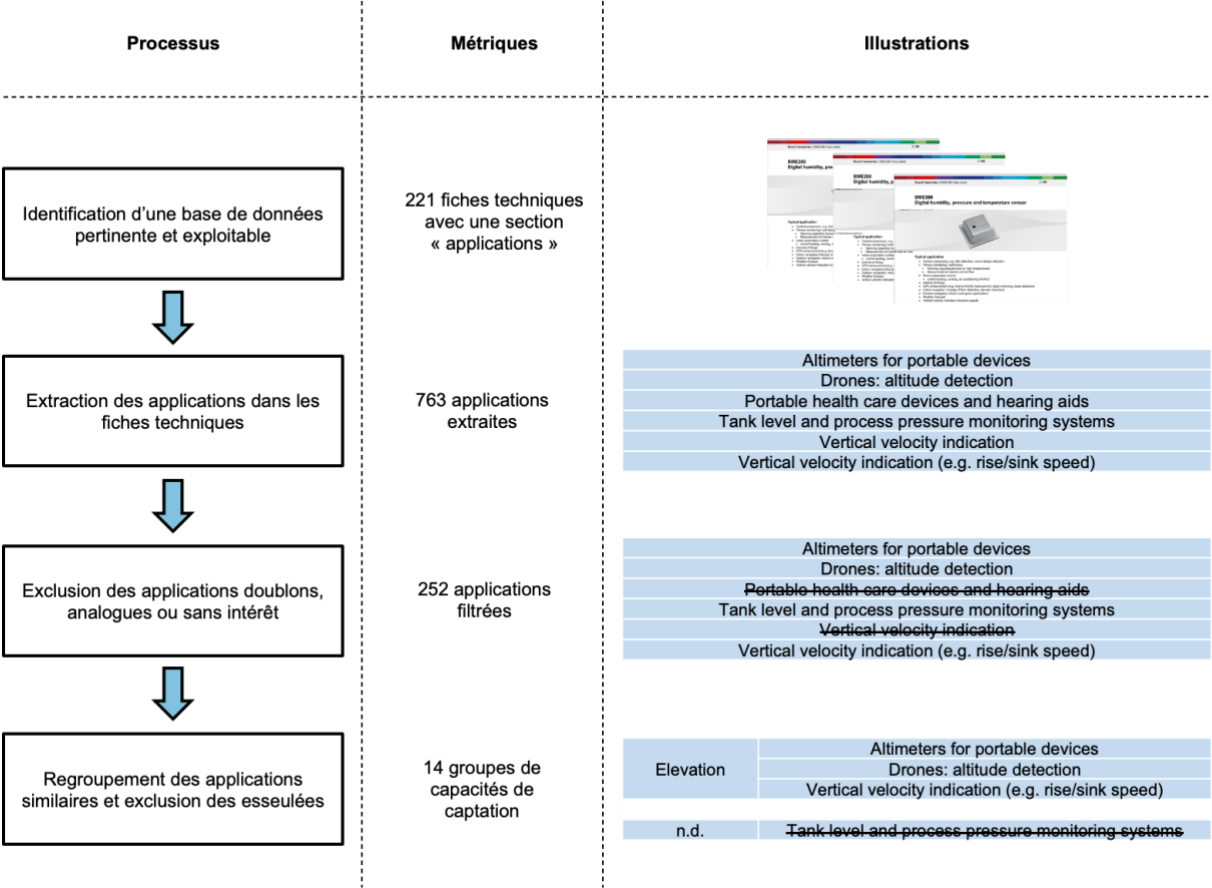


Figure 24 Processus illustré de construction de l'outil d'exploration

Tableau 10 Exemples d'applications tirés des fiches techniques des capteurs, regroupés en fonction des capacités de détection communes

Contact	
Multi-Sectoral	Open/close detection; Menu scrolling; Taps sensing
Consumer	Smart power saving for electronic devices (on-off notebook)
Industrial	Open/close detection for security or safety applications
Medical	Concussion detection
Mobility	Collision/Crash Detection
Buildings	Open/Close Doors

Elevation	
Multi-Sectoral	High-accuracy altimetry
Consumer	Wearable devices activity monitoring
Industrial	Drones altitude detection and height stability
Medical	Elevation gain and stair counting for health wearables
Mobility	Vertical movement indication (e.g. rise/sink)
Buildings	Indoor navigation (floor detection, elevator detection)

Pressure	
Multi-Sectoral	Absolute pressure; Measurement of volume and flow
Consumer	Appliances pressure measurement
Industrial	Tank level measurement
Medical	Blood, brain or abdominal pressure measurement
Mobility	Electric vehicle battery over-pressure warning
Buildings	Smart ventilation

Gas	
Multi-Sectoral	Gas meter;
Consumer	Personal air quality monitoring assistants
Industrial	Detection of unusual gases
Medical	Oxygen concentrators
Mobility	Air quality inside cars & public transport
Buildings	Air purifiers appliances

Humidity	
Multi-Sectoral	Liquid metering; Humidity control
Consumer	Diaper state detection, e.g. for baby care
Industrial	Detections of leaks
Medical	Respiratory devices in health care
Mobility	Detecting liquid levels in fuel tanks
Buildings	Smart air-conditioning

Orientation	
Multi-Sectoral	Real-time orientation detection; Stabilisation
Consumer	Electronic Image Stabilisation for smart phones
Industrial	Dynamic levelling of platforms
Medical	High precision positioning of medical equipment
Mobility	Dynamic head light levelling
Buildings	Levelling for construction equipments

Position	
Multi-Sectoral	Indoor/Outdoor navigation; Position measurement
Consumer	Emergency caller location
Industrial	Accurate navigation for tractor autosteering in agriculture
Medical	Medical equipments locations
Mobility	Outdoor Navigation: GPS
Buildings	Assets Tracking

Proximity	
Multi-Sectoral	Presence Detection
Consumer	Smart home applications : door opening
Industrial	Inventory management and logistics
Medical	Patient monitoring and logging
Mobility	Vehicle-to-everything (V2X)
Buildings	Building security and occupancy sensing

Sound	
Multi-Sectoral	Audio-activated functions; Audio-pattern detection
Consumer	Voice user interface: e.g. smart speaker
Industrial	Predictive maintenance of machining equipment
Medical	Hearing Aids
Mobility	Sound detection for vehicles automation
Buildings	Sound detection for alarm systems

Speed	
Multi-Sectoral	Motion Recognition, Linear movement measurement
Consumer	Fitness activity identification and calorie counting
Industrial	Inertial Measurement Units (IMUs) for heavy machine
Medical	Patients fall detection
Mobility	Inertial navigation for dead reckoning
Buildings	Motions of the occupants

Temperature	
Multi-Sectoral	Temperature detection; Weather Monitoring
Consumer	Fitness applications, activity tracking (temperature)
Industrial	System thermal management and overheat detection
Medical	Skin temperature detection
Mobility	Seat heating for comfort
Buildings	Rooms temperature control

Vibration	
Multi-Sectoral	Vibration monitoring and compensation
Consumer	Whitegoods: vibration and shake detection
Industrial	Equipment Monitoring: Vibration Analysis Machine Health
Medical	Patient monitoring, sleep tracking
Mobility	Active Suspension Vibration Monitoring
Buildings	HVAC system health monitoring

Image	
Multi-Sectoral	Imaging radar; Long range radar
Consumer	3D Reconstruction, AR/VR
Industrial	3D Machine Vision: Robotics, Quality Control
Medical	3D Reconstruction, Dental Scanner
Mobility	Traffic monitoring camera
Buildings	3D Reconstruction, Indoor mapping

Brightness	
Multi-Sectoral	Lighting control systems
Consumer	Display backlight controls for smartwatch
Industrial	Automatic screen brightness for outdoor equipments
Medical	Pulse oximetry
Mobility	Automotive automatic lighting
Buildings	Smart indoor lighting

Il est important de noter que cette liste de capacités de détection établie ne peut être considérée comme exhaustive. Toutefois, étant donné sa construction systématique, on peut s'attendre à ce qu'elle représente la majorité des capacités à la date de l'étude (mai 2022). La figure 25 propose une représentation visuelle des 14 capacités de détection identifiées. Elle associe un logo illustratif et une couleur propre à chacune des capacités identifiées.



Figure 25 Proposition d'une illustration des capacités de détection

3.3.3 Déroulement de la phase d'exploration

La méthode DfSDI s'intègre dans la phase de *conception générale* du produit. La première phase de la méthode s'intègre plus précisément lors des réflexions sur les principes de fonctionnement du produit. À ce stade, le contexte du produit est défini pour l'ensemble des phases de son cycle de vie, c'est-à-dire ses fonctions, ses environnements, ses parties prenantes, etc. Afin de proposer une approche systématique d'exploration, la méthode propose de prendre individuellement chacune des phases du cycle de vie du produit pour initier dans chaque cas des réflexions créatives sur l'apport potentiel des données captées par le produit dans la phase étudiée. L'outil de créativité représentant les capacités de détection des capteurs sert alors de support aux concepteurs pour générer des potentielles créations de valeurs. Ainsi, pour chaque phase du cycle de vie, les concepteurs explorent une à une les capacités de détection représentées par l'outil et génèrent des potentielles créations de valeurs les intégrant. Il est aussi possible de réfléchir aux créations de valeurs générées par la combinaison de plusieurs capacités différentes. La phase d'exploration est illustrée sur la figure 26.

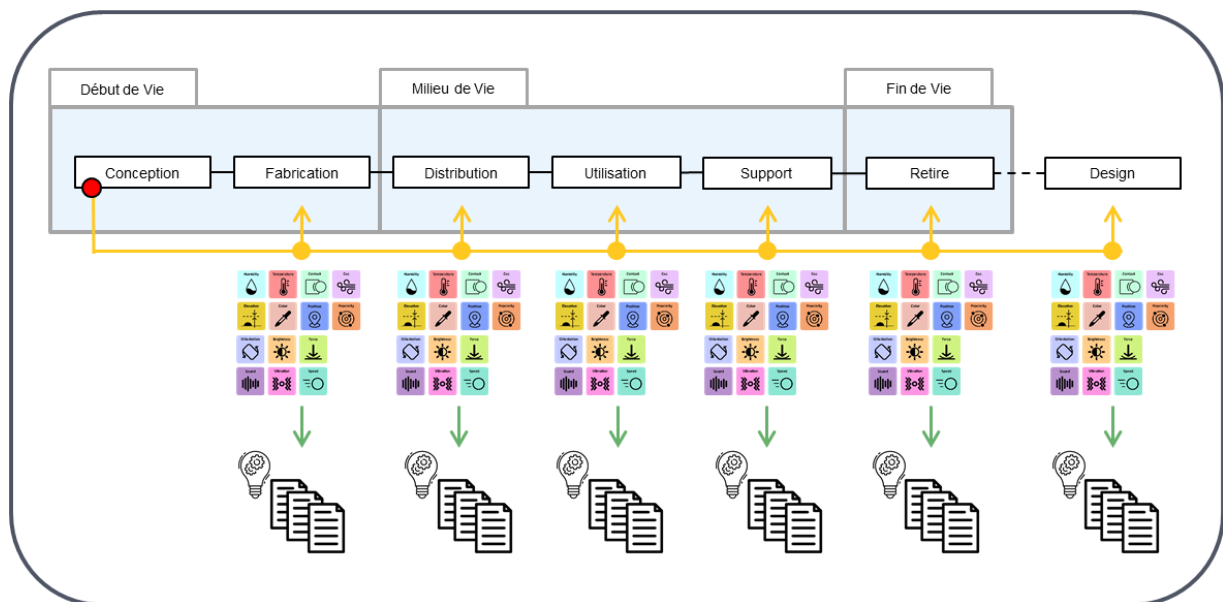


Figure 26 Illustration du processus de la phase d'exploration

Ainsi, l'outil est le support aux réflexions créatives qui peuvent être menées au travers de différentes techniques à définir préalablement à la convenance des concepteurs. En effet, l'outil construit est la représentation de 14 capacités de détection des capteurs embarqués. Explorer l'ensemble des capacités de détection pour l'ensemble des phases du cycle de vie produit peut s'avérer laborieux. Par conséquent, le choix de l'approche créative à utiliser avec l'outil est laissé libre aux concepteurs. Si les concepteurs disposent de peu de temps, une approche de créativité simple comme un brainstorming pourrait s'avérer plus appropriée. Ainsi, pour une phase du cycle de vie donnée, chaque capacité peut être explorée indépendamment au travers d'un brainstorming pour générer des créations de valeurs l'intégrant. Ce processus pourrait ainsi être répété plusieurs fois pour couvrir toutes les phases du cycle de vie du produit. Par ailleurs, si les concepteurs disposent de plus de temps, d'autres approches de créativité plus complexes pourraient s'avérer plus appropriées. Par exemple, pour une phase du cycle de vie donnée, les concepteurs pourraient utiliser des matrices de découverte pour combiner les différentes capacités de détection avec les paramètres de leur choix en fonction des créations de valeurs souhaités. De la même manière ce processus pourrait ainsi être répété plusieurs fois pour couvrir toutes les phases du cycle de vie du produit.

Pour ce qui est des conditions requises à la phase d'exploration de la méthode DfSDI, il n'y a pas de profil, ni de nombre de participants fixé. Ainsi la phase d'exploration s'adapte aux ressources disponibles. En effet, un concepteur seul peut aussi bien générer des créations de

valeurs avec l'outil qu'un groupe de concepteurs. Cependant, la littérature scientifique semble suggérer qu'un groupe génère plus d'idées et de meilleures idées qu'un individu seul (Paulus et Yang, 2000).

Ainsi, la première phase de la méthode DfSDI permet de générer un ensemble de potentielles créations de valeurs pour le produit basé sur l'intégration des données captées. Il s'agit ensuite d'évaluer ces créations de valeurs afin de déterminer sur la base de critères rationnels celles qui sont pertinentes pour la suite du processus de conception. C'est l'objectif de la seconde phase de sélection de la méthode proposée.

3.4. Construction de la phase de sélection

L'objectif de la seconde phase de la méthode DfSDI est la sélection systématique des créations de valeurs apportées par l'intégration des données captées. Il s'agit d'une phase d'aide à la décision durant laquelle les concepteurs doivent évaluer ces potentielles créations de valeurs selon les trois piliers économique, environnemental et social de la soutenabilité. La phase proposée permet de rationaliser la sélection des solutions à développer dans la suite du processus de conception.

3.4.1 Aide à la décision dans la conception amont de produits

La seconde partie de la méthode DfSDI a pour objectif de guider les concepteurs dans la sélection des créations de valeurs basées sur les données captées. Le processus de réflexion suivi pour décider parmi un ensemble d'alternatives peut être plus ou moins rationnel. Il est étudié par les sciences cognitives comme processus de décision. Cette seconde phase se situe donc à l'intersection entre les sciences de la conception de produits et d'aide à la décision. De très nombreuses méthodes ont en effet été développées pour donner un cadre rationnel aux prises de décision complexes lors du processus de conception. Lors de la phase de sélection de la méthode DfSDI, le choix des créations de valeurs doit se faire selon la notion de soutenabilité. Cette dernière se fonde sur des critères issus de ses trois piliers, à savoir les piliers économique, environnemental et social. Ces critères peuvent être conflictuels et dans ce cas, il n'existe pas toujours un choix optimal unique. Il est alors nécessaire d'intégrer les préférences des

concepteurs pour différencier les solutions. En ce sens, ce sont les méthodes d'aide à la décision multicritères qui sont considérées pour appuyer la seconde partie de sélection de la méthode. Il existe une grande variété d'outils et de méthodes d'aide à la décision aux spécificités et complexités différentes.

Parmi les méthodes d'aide à la décision multicritères génériques les plus utilisées lors de la sélection de concept (Okudan et al., 2008), on trouve les suivantes :

- Le Weighted Sum Model (WSM) (Fishburn, 1967) est, par sa simplicité, l'approche la plus couramment utilisée d'aide à la décision pour la sélection de concepts. Les différentes alternatives sont évaluées par les concepteurs selon des critères préalablement fixés et pondérés. La note d'une alternative est alors obtenue par la somme de toutes les notes multipliées par leurs pondérations respectives. Les alternatives peuvent ainsi être classées et sélectionnées.
- La matrice de Pugh (Pugh, 1981) est une méthode simple, rapide et graphique qui se base sur une matrice avec en ligne et colonnes les alternatives et les critères de décision. L'une des alternatives de concepts est choisie comme référence. Les concepteurs évaluent alors les autres alternatives par comparaison. Les concepts moins bien notés sont éliminés et la même procédure est répétée de manière itérative jusqu'à ce qu'une sélection soit faite.
- L'Analytic Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1990) est une méthode plus complexe, moins rapide mais largement utilisée pour l'aide à la décision multicritère. Les concepteurs décomposent si besoin les critères à évaluer en une hiérarchie de sous-critères pouvant être évalués indépendamment. Une fois la hiérarchie construite, les concepteurs évaluent comparativement deux par deux les sous-critères selon leur incidence sur le critère dont ils sont issus dans la hiérarchie. Ainsi, une pondération est établie pour chaque sous-critère de la hiérarchie. Ensuite, pour chacun des sous-critères pouvant être évalué indépendamment, les alternatives sont notées comparativement deux à deux en fonction leur incidence sur le sous-critère considéré. Un calcul basé sur les notes comparatives et les pondérations des critères établies précédemment permet de prioriser les différentes alternatives entre elles.

Il existe de nombreuses autres méthodes d'aide à la décision multicritères pouvant être appliquée à la sélection de concepts. Triantaphyllou (2000) présente et étudie les plus populaires

dans son ouvrage. Il mentionne notamment, en plus des précédentes, les méthodes suivantes : *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) et Élimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE).

La seconde phase de la méthode proposée DfSDI doit permettre une évaluation des impacts sur des critères de soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées. Sur la base de cette évaluation, les concepteurs pourront sélectionner les concepts pertinents à considérer pour la suite du processus de conception. Cependant, l'évaluation selon les piliers de la soutenabilité de solutions intelligentes et connectées est complexe. En effet, la composition à la fois physique et numérique de ces solutions complexifie leurs évaluations selon les piliers de la soutenabilité. En ce sens, Li et al. (2021) ont mis en évidence que les évaluations de soutenabilité des produits intelligents et connectés n'adoptaient que rarement un point de vue holistique. Il faut pouvoir considérer l'ensemble à la fois physique et numérique qui constitue le produit intelligent et connecté pour réaliser son évaluation correctement. Ce constat apparaît également dans les travaux de Bonvoisin et al. (2012) sur les impacts de l'intégration d'un réseau de capteurs. En outre, la diversité des composants électroniques intégrés aux produits et leurs usages influent grandement sur les résultats de l'évaluation. Pirson et Bol (2022) ont par exemple mis en évidence que l'impact environnemental de produits intelligents et connectés pouvait varier très significativement selon le type de produit considéré.

La seconde phase de la méthode proposée DfSDI doit également permettre une évaluation des concepts lors des phases amont de la conception. Ainsi, en plus de la complexité intrinsèque à la nature physique et numérique des produits intelligents et connectés, s'ajoute la difficulté d'évaluer les concepts lors des phases amont de la conception. Blanchard et Fabrycky (2006) ont mis en évidence les enjeux liés à la conception amont. Au cours de cette phase, très peu d'informations quantitatives sont disponibles pour appuyer les évaluations de la soutenabilité. Les évaluations des solutions connectées sont en effet généralement réalisées dans les phases finales du processus de conception de produits afin de disposer d'informations techniques et quantitatives. En outre, l'état de l'art a mis en évidence que les approches de sélections des capteurs sont basées principalement sur les performances techniques ou les aspects économiques seuls. Elles ne prennent pas en compte la perspective holistique de l'intégration des données captées dans leur ensemble à la fois physique et numérique et sur l'ensemble des piliers de la soutenabilité.

Ainsi un manque est identifié pour soutenir les approches d'évaluation des concepts de création de valeurs basée sur l'intégration des données captées lors de la conception amont. En ce sens, la construction d'un outil pour appuyer les concepteurs durant cette tâche complexe d'évaluation apparaît essentielle pour soutenir la deuxième phase de la méthode DfSDI.

3.4.2 Construction d'un outil de sélection

Dans le but de sélectionner parmi les potentielles créations de valeurs basées sur les données captées celles à développer, la méthode DfSDI propose de les évaluer et les classer. Un besoin d'outil pour guider les concepteurs dans cette évaluation amont selon des critères de soutenabilité a été identifié dans la sous-section précédente. Afin de permettre la sélection, l'outil doit pouvoir présenter aux concepteurs les impacts sur la soutenabilité des différentes créations de valeurs basée sur les données captées. Pour rappel, la soutenabilité a été définie par ses trois piliers économique, environnemental et social. Le pilier économique correspond au capital économique de l'entreprise, le pilier environnemental à la protection de l'environnement et ses ressources et le pilier social à la qualité de vie de la société et de ses individus. La sous-section précédente a mis en avant la difficulté de proposer une évaluation exhaustive de la soutenabilité lors des phases amont. Elle a également mis en avant la complexité des évaluations liée à la nature hybride, physique et numérique, des créations de valeurs basées sur les données captées. Au regard de ces difficultés, il apparaît pertinent d'évaluer les principaux facteurs impactant la soutenabilité associés aux données captées. La représentation de ces facteurs principaux aux concepteurs permet de limiter la complexité de l'outil tout en garantissant des évaluations pertinentes. La première partie de cette sous-section présente l'investigation des principaux facteurs impactant la soutenabilité liés aux créations de valeurs basées sur les données captées. La seconde partie de cette sous-section présente l'outil construit en résultant.

a) Investigation des impacts sur la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées

Pour construire l'outil, il faut donc d'abord identifier les principaux facteurs liés aux données captées et impactant la soutenabilité. En ce sens, une investigation des principaux impacts sur chacun des trois piliers de la soutenabilité est réalisée. Il convient avant tout de préciser le cadre de l'évaluation qui sera réalisée selon les piliers de la soutenabilité. Les impacts sur la soutenabilité peuvent être directs, conséquences directement liées aux créations de valeurs étudiées, ou indirects, conséquences indirectement liées aux créations de valeurs. Les effets secondaires sont par nature plus imprévisibles et difficilement évaluables. Par conséquent, l'outil ne considérera que les impacts directs. Les impacts étudiés englobent donc les contributions directes positives et négatives des créations de valeurs basées sur les données captées. Pour rappel, ces dernières sont caractérisées par l'utilisation de données issues du produit pour permettre la mise en œuvre de nouvelles fonctionnalités ou nouveaux services lors des différentes phases de son cycle de vie. Ainsi, les contributions positives de l'intégration des données captées sont intrinsèques aux créations de valeurs permises par leurs intégrations. Elles sont en ce sens spécifiques à chaque concept généré lors de la phase précédente. L'outil fera donc transparaître les contributions positives des concepts basés sur les données captées aux concepteurs. À l'inverse, les contributions négatives des impacts liés à l'intégration des données captées peuvent être imputées à des facteurs génériques. Elles dépendent en effet des capteurs nécessaires à intégrer et de leurs usages. La suite de cette sous-section identifie les principaux facteurs aux contributions négatives des données captées pour chacun des piliers de la soutenabilité afin de définir les critères génériques à représenter aux concepteurs.

Les contributions négatives directes des données captées sur la préservation de l'environnement et de ses ressources sont d'abord étudiées. L'évaluation du pilier environnemental de la soutenabilité est généralement réalisée lors des phases avancées du processus de conception de produits. En effet, plus le processus de conception est avancé, plus les concepteurs disposent d'informations précises sur le futur produit. C'est pourquoi, l'évaluation environnementale se fait alors de façon quantitative, complète et robuste lors des phases finales de conception. La méthode la plus reconnue pour réaliser cette évaluation est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) (ISO 14040, 2006). Cette méthode normalisée permet de réaliser un bilan des impacts environnementaux d'un produit selon de multiples critères pertinents et sur l'entièreté de son

cycle de vie. Elle permet ainsi de mettre en évidence les contributions les plus importantes aux impacts environnementaux d'un produit. Différentes analyses du cycle de vie ont été réalisées sur les capteurs et ont identifié leurs principales contributions négatives des impacts environnementaux. Les travaux de Bonvoisin et al. (2014), au travers de l'ACV d'un réseau de capteurs, ont identifié trois facteurs principaux : l'exploitation des ressources brutes nécessaires à leur fabrication, l'énergie nécessaire pour leur fabrication ainsi qu'à leur utilisation. Ces constats sont confirmés par les recherches de Pirson et Bol (2022) présentant les ACV de l'électronique embarquée de divers produits intelligents et connectés. Les principales contributions négatives identifiées sur le pilier environnemental des données captées sont donc scindées entre celles inhérentes à la partie physique liées sa fabrication et celles inhérentes à la partie numérique liées à l'utilisation (Freitag et al., 2021). En ce sens, les principaux facteurs retenus pour représenter les contributions négatives sur le pilier environnemental de la soutenabilité sont : le nombre de composants électroniques additionnels nécessaires à la mise en œuvre du service ainsi que l'intensité de leurs utilisations.

Ensuite, les contributions négatives directes des données captées sur le capital économique des entreprises fabricantes sont étudiées. De la même manière que pour les contributions environnementales, il s'agit d'évaluations généralement réalisées lors des étapes finales de la conception lorsque l'ensemble des informations sur le produit et son cycle de vie ont pu être définies. Il existe des analyses des coûts du cycle de vie produit, qui sur le même principe que les ACV propose une évaluation des impacts économiques d'un produit lors de l'ensemble des phases du cycle de vie (Asiedu et Gu, 1998). Dans le contexte de l'intégration des données captées, on s'intéresse aux coûts de l'électronique supplémentaire à intégrer, la partie physique, ainsi qu'à ceux liés à leur exploitation pour assurer la création de valeurs, la partie numérique. L'investigation des enjeux lors de l'état de l'art (sous-section 2.1.3) et auprès des fabricants de produits intelligents et connectés (sous-section 2.3.4) ont mis en évidence les principales contributions négatives des données captées sur le pilier économique. Les coûts liés à l'intégration des composants électroniques dans les produits ont été identifiés pour la partie physique. Les coûts de l'infrastructure de transmission, stockage, traitement et analyse des données captées ont été identifiés pour la partie numérique (Bertoni, 2020 ; Gorkovenko et al., 2020 ; Holler et al., 2016). En ce sens, les principaux facteurs retenus pour représenter les contributions négatives sur le pilier économique de la soutenabilité sont : le nombre de

composants électroniques additionnels nécessaires à la mise en œuvre du service ainsi que le volume de données à transmettre et par extension, stocker et traiter.

Enfin, les contributions négatives directes des données captées sur la qualité de vie de la société et de ses individus sont étudiées. Encore une fois, il s'agit d'évaluations généralement réalisées lors des phases finales du processus de conception de produits. En effet, lors des phases de conception détaillée, une fois le produit et ses utilisateurs bien définis, les concepteurs peuvent appliquer des méthodes d'analyse des impacts sociaux (Becker, 2001). Dans le contexte des données captées, on s'intéresse aux contributions négatives sur le pilier social directement lié à l'intégration des données captées. La partie physique intégrée définit les capteurs et donc les données potentiellement accessibles tandis que la partie numérique intégrée définit les usages des données. L'investigation des enjeux lors de l'état de l'art (sous-section 2.1.3), auprès des concepteurs (sous-section 2.2.4) et auprès des fabricants de produits intelligents et connectés (sous-section 2.3.4) ont mis en évidence les principales contributions négatives des données captées sur le pilier social. La confidentialité apparaît comme un enjeu majeur au regard des informations personnelles potentiellement accessibles via les capteurs, leurs données et leur interprétation. La sécurité des informations apparaît aussi comme un enjeu majeur, la transmission de données sensibles et leur stockage doivent être protégés contre les attaques malveillantes (Allhoff et Henschke, 2018 ; Atlam et Wills, 2020 ; Baldini et al., 2018). En ce sens, les principaux facteurs retenus pour représenter les contributions négatives sur le pilier social de la soutenabilité sont : la nature des données captées par extension de celles transmises, stockées et interprétées.

L'étude des impacts sur la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées a mis en évidence les facteurs principaux à représenter pour permettre leur évaluation lors de la conception amont. Concernant les contributions positives des impacts sur la soutenabilité, il faut faire apparaître les créations de valeurs engendrées par l'usage des données captées sur les piliers de la soutenabilité. Concernant les contributions négatives, pour chacun des trois piliers de la soutenabilité, les principaux facteurs impactant à représenter ont été identifiés précédemment. Ces derniers sont synthétisés en quatre critères pour permettre une évaluation simplifiée et pertinente de la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées. Les quatre critères sont les suivants : le type des données captées, la fréquence de captation, le type des données transmises, la fréquence de transmission. Chacun de ses critères

permet donc de rendre compte implicitement des principaux facteurs impactant les piliers de la soutenabilité. Le lien de chaque critère aux facteurs impactant identifiés est décrit ci-après :

- Le critère de type des données captées représente implicitement le nombre de capteurs à intégrer pour la création de valeurs et rend compte à la fois de l'impact environnemental et économique. Ce critère rend aussi compte de l'impact social au travers de la nature potentiellement sensible des données captées.
- Le critère de fréquence de captation représente implicitement l'intensité de l'utilisation des capteurs et rend ainsi compte de l'impact environnemental.
- Le critère de type des données transmises représente la nature potentiellement sensible des données à transmettre et stocker. Il rend compte en ce sens de la sécurité à garantir pour les données et donc de l'impact social.
- Le critère de fréquence de transmission représente implicitement l'intensité de l'utilisation de l'électronique embarquée et rend ainsi compte de l'impact environnemental. Il représente aussi le volume de données à transmettre, stocker, analyser et interpréter. Il rend compte ainsi également de l'impact économique.

b) Proposition d'un outil pour soutenir l'évaluation des impacts sur la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées

Le second outil doit soutenir l'évaluation des impacts sur la soutenabilité des potentielles créations de valeurs générées lors de la première phase d'exploration afin que les concepteurs puissent ensuite les classer. Il doit donc retranscrire les impacts directs identifiés, c'est-à-dire les contributions directes positives et négatives, des potentielles créations de valeurs. C'est pourquoi l'outil proposé pour soutenir la phase d'évaluation est une modélisation holistique des créations de valeurs basées sur les données captées faisant apparaître ces impacts. Ainsi, elle permet aux concepteurs de transcrire les créations de valeurs basées sur les données captées dans un langage homogène. Le langage homogène est essentiel pour les évaluations comparatives a posteriori. La modélisation proposée est illustrée sur la figure 27.

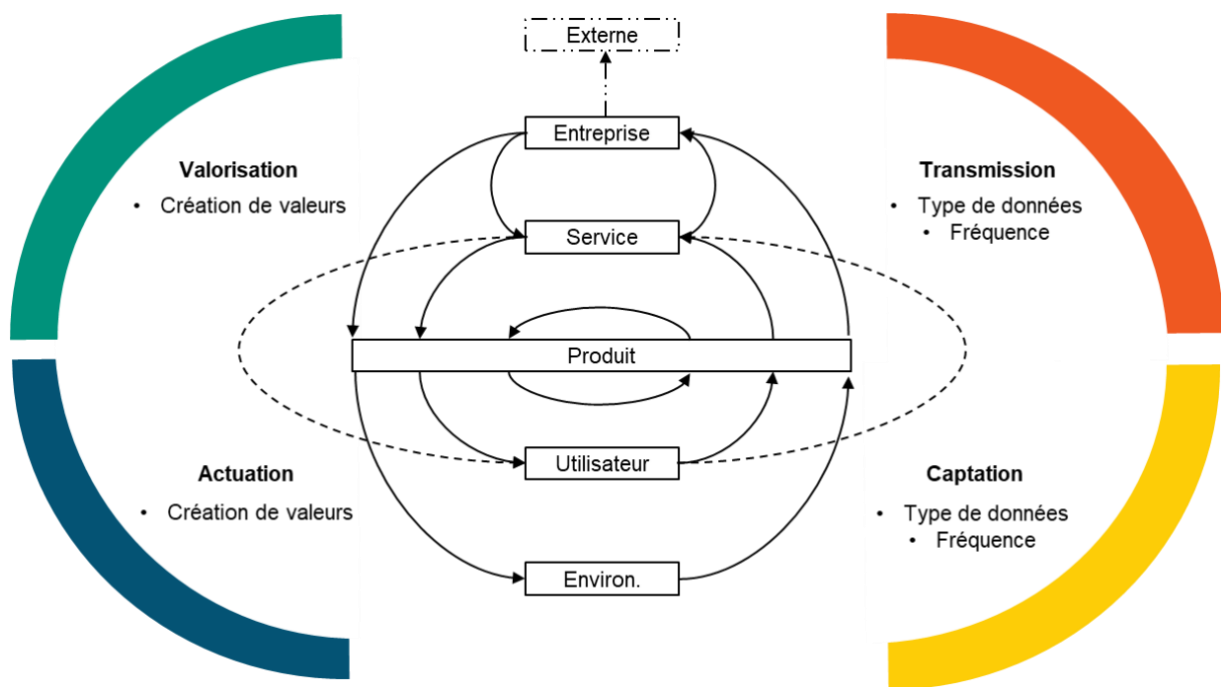


Figure 27 Modélisation proposée pour la phase de sélection

Afin de transcrire une création de valeurs basée sur les données captées dans la modélisation, il est nécessaire de renseigner les différents éléments la constituant et leurs liens dans le modèle. Les éléments et les liens sont représentés respectivement par des cases et des flèches. On définit d'abord les différents éléments impliqués, modélisés par des cases à renseigner :

- Au centre du modèle se trouve la case « produit ». Il s'agit de renseigner dans cette case l'ensemble physique au sein duquel sont intégrés les composants électroniques embarqués nécessaires au déploiement de la création de valeurs considérée. La case « produit » occupe la place centrale de la modélisation car elle est l'interface essentielle entre les dimensions physique et numérique des créations de valeurs.
- Sous la case « produit », on trouve les cases « utilisateur » et « environnement ». Cette partie inférieure de la modélisation met en évidence les interactions entre le monde réel et le « produit ». Il s'agit des entités physiques avec lesquels le produit peut interagir dans la création de valeurs. Plus spécifiquement, dans la case « utilisateur », il s'agit de renseigner l'ensemble des êtres humains concernés par la création de valeurs ajoutées et en interaction directe avec le « produit ». Pour la case « environnement », il s'agit de renseigner les entités physiques concernées aussi par la création de valeurs mais qui ne sont pas en interaction directe avec le « produit ».

- Au-dessus de la case « produit », à l'inverse, sont représentées les interactions avec les entités immatérielles impliquées par la création de valeurs. On y trouve les trois différentes cases suivantes : « service », « entreprise » et « externalité ». Plus spécifiquement, dans la case « service », il s'agit de renseigner la potentielle structure numérique intermédiaire au « produit » et à « l'entreprise » mais participante à la création de valeurs. Ensuite dans la case « entreprise », il s'agit de renseigner l'entité responsable du produit, de son développement et de la création de valeurs. Enfin la case « externalité » renseigne des potentielles parties prenantes extérieures en lien avec la création de valeurs.

Ensuite, on définit les liens entre les éléments induits par la création de valeurs à transcrire. Les liens sont modélisés sous forme de flèches pouvant traduire de différentes actions entre les éléments. La case à la base de la flèche représente l'élément à l'origine de l'action tandis que la case pointée par la flèche représente l'élément impliqué par l'action. La modélisation comporte quatre catégories de liens différents à renseigner. Les liens à remplir font apparaître les impacts sur la soutenabilité au travers des critères génériques identifiés dans la partie précédente.

- Le lien de « captation » rend compte des données issues du monde réel enregistrées par les capteurs embarqués dans le « produit » nécessaires à la mise en place de la création de valeurs. Pour cette catégorie de lien, il s'agit de renseigner le type des données captées et la fréquence de captation. Les flèches modélisant la « captation » peuvent relier « l'utilisateur » avec le « produit », « l'environnement » avec le « produit », le « produit » et lui-même.
- Le lien de « transmission » rend compte des échanges de données numériques nécessaires à la mise en place de la création de valeurs. Pour cette catégorie de lien, il s'agit de renseigner le type des données échangées et la fréquence des transmissions. Les flèches modélisant les « transmissions » peuvent relier le « produit » et le « service », le « service » et « l'entreprise », le « produit » et « l'entreprise », « l'utilisateur » et le « service ».
- Le lien de « valorisation » rend compte des contributions positives directes liées à l'exploitation des données captées et transmises. Pour cette catégorie de lien, il s'agit de renseigner une description de la création de valeurs permises par l'exploitation des données captées. Les flèches modélisant la « valorisation » peuvent relier

« l'entreprise » et le « service », le « service » et les « produits », « l'entreprise » et le « produit », le « service » et « l'utilisateur », « l'entreprise » et « l'externalité ».

- Le lien « d'actuation » rend compte des rétroactions du « produit » liées à l'exploitation des données captées. Pour cette catégorie de lien, il s'agit de renseigner une description de la création de valeurs permises par l'exploitation des données captées. Les flèches modélisant « l'actuation » peuvent relier le « produit » et « l'utilisateur », le « produit » et « l'environnement », le « produit » et lui-même.

À titre d'exemple, l'annexe 1 propose la transcription de deux créations de valeurs différentes dans la modélisation proposée.

3.4.3 Déroulement de la phase de sélection

La seconde phase de sélection de la méthode fait logiquement suite à la première d'exploration. Elle se base donc sur les fiches idées résultantes de l'exploration et décrivant chacune une création de valeurs basées sur les données captées. La seconde phase a pour objectif d'évaluer comparativement ces créations de valeurs afin de sélectionner celles à développer dans la suite du processus de conception de produit. La phase de sélection se déroule en trois étapes comme suit :

- La première étape consiste pour les concepteurs à transcrire les différentes fiches idées au sein de la modélisation proposée. Ils renseignent une modélisation par fiche idée en spécifiant les différents éléments et liens propres à chacune des créations de valeurs associées. Une fois la transcription de l'ensemble des fiches idées réalisée, les concepteurs peuvent si besoin combiner entre elles des modélisations partageant les mêmes types de données captées. En effet, les mêmes données captées peuvent être à l'origine de plusieurs créations de valeurs. Il s'agit alors de fusionner dans une nouvelle modélisation les modélisations concernées et de spécifier à nouveau les éléments et liens en résultant.
- Ensuite, les concepteurs peuvent alors évaluer qualitativement les impacts des différentes créations de valeurs selon les trois piliers de la soutenabilité en s'appuyant sur leurs modélisations car offrant un langage homogène. Pour ce faire, les concepteurs sont libres d'appliquer la méthode d'aide à la décision multicritère de leurs choix.

- Enfin, une fois les modélisations évaluées, la comparaison des notes permet aux concepteurs de classer les créations de valeurs et donc de sélectionner celles à prioriser pour la suite du processus de conception du produit.

La phase de sélection est illustrée sur la figure 28.

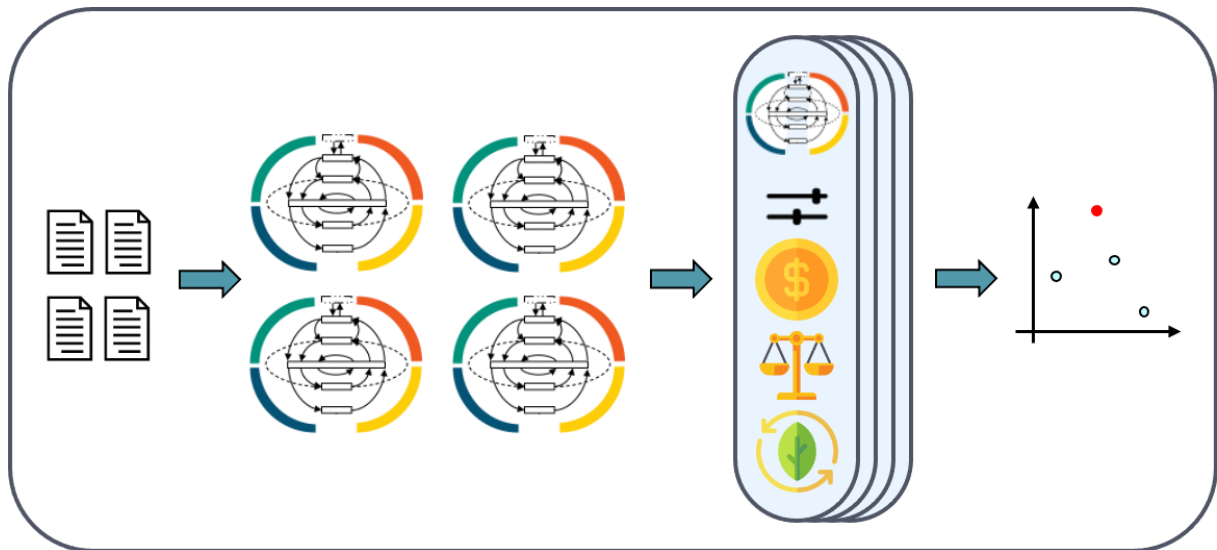


Figure 28 Illustration du processus de la phase d'exploration

Évaluer l'impact de l'ensemble des créations de valeurs peut éventuellement s'avérer laborieux. À cet égard, le choix de l'approche d'aide à la décision multicritère à adopter a été laissé libre aux concepteurs. Si les concepteurs disposent de peu de temps, une approche d'aide à la décision simple et rapide comme l'approche de WSM pourrait s'avérer plus appropriée. Dans ce cas, pour chaque modèle transcrivant une création de valeurs, les concepteurs évaluent ses contributions positives sur chacun des piliers économique, environnemental et social. Ils réalisent ensuite l'évaluation des contributions négatives selon ces mêmes trois piliers. Les concepteurs définissent ensuite ensemble les pondérations associées à chaque pilier de la soutenabilité. Ils amalgament alors les précédentes notes en deux notes de contributions positives et négatives globales sur la soutenabilité pour chaque modélisation. Par ailleurs, si les concepteurs disposent de plus de temps ou souhaitent des évaluations plus approfondies, d'autres approches d'aide à la décision plus complexes pourraient s'avérer davantage appropriées. Par exemple, les concepteurs pourraient appliquer la méthode AHP. Le principe reste le même, attribuer des notes aux contributions positives et négatives selon chacun des trois piliers de la soutenabilité et pour chacune des modélisations de création de valeurs basées sur les données captées.

Concernant les conditions requises à la phase de sélection de la méthode DfSDI, il n'y a pas de profil, ni de nombre de participants fixé. Ainsi la phase de sélection s'adapte aux ressources disponibles. En effet, un concepteur seul peut aussi bien sélectionner les créations de valeurs avec l'aide de la modélisation qu'un groupe de plusieurs concepteurs. Cependant, la littérature scientifique semble suggérer qu'un groupe génère des évaluations plus rationnelles au travers de l'échange et de la confrontation de point de vue (Kugler et al., 2012).

3.5. Conclusion sur la proposition méthodologique

Le troisième chapitre de proposition méthodologique constitue le cœur de ces travaux de thèse. Il présente à la fois la problématique de ces travaux de recherche ainsi que la proposition de résolution de cette dernière. La première section s'appuie sur les constats issus du chapitre précédent pour définir la problématique suivante : **Comment structurer l'intégration des données captées dans la conception amont du produit pour générer des créations de valeurs ?** La deuxième section propose une hypothèse de résolution à cette problématique sous la forme d'une méthode de conception en deux phases successives. Ainsi, la méthode DfSDI propose de structurer l'intégration des données captées pour la création de valeurs lors de la conception amont de produits via **une exploration systématique des créations de valeurs potentielles** (*hypothèse 1.a*) et **une sélection systématique des créations de valeurs potentielles** (*hypothèse 1.b*). La troisième section traite de l'*hypothèse 1.a*. Elle décrit le contexte scientifique de la première phase de la méthode DfSDI. Elle explicite la construction d'un outil d'exploration dédié à cette phase ainsi que son déroulement. La quatrième section traite de l'*hypothèse 1.b*. De la même manière, elle décrit le contexte scientifique de la seconde phase de la méthode DfSDI. Elle explicite la construction d'un outil de sélection dédié à cette phase ainsi que son déroulement.

CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATIONS

Le quatrième chapitre d'*étude descriptive II* étudie les résultats de la mise en œuvre de la proposition de solution établie lors du chapitre précédent. Ce chapitre présente donc le protocole, le déroulement, les résultats et leurs interprétations de l'ensemble des expérimentations réalisées pour éprouver la méthode proposée. Comme elle est construite en deux phases successives, chaque phase de la méthode est expérimentée individuellement. Ainsi la section 4.1 présente l'expérimentation de la phase d'exploration de la méthode tandis que la section 4.2 présente l'expérimentation de la phase de sélection de la méthode. La méthode est accompagnée d'outils dédiés dont la construction a été décrite dans le chapitre précédent. La section 4.3 présente l'expérimentation de ces outils dans un contexte pédagogique afin d'évaluer leurs potentiels didactiques. Enfin la section 4.5 conclut le chapitre en résumant les éléments clefs abordés. La structure du chapitre est illustrée sur la figure 29.

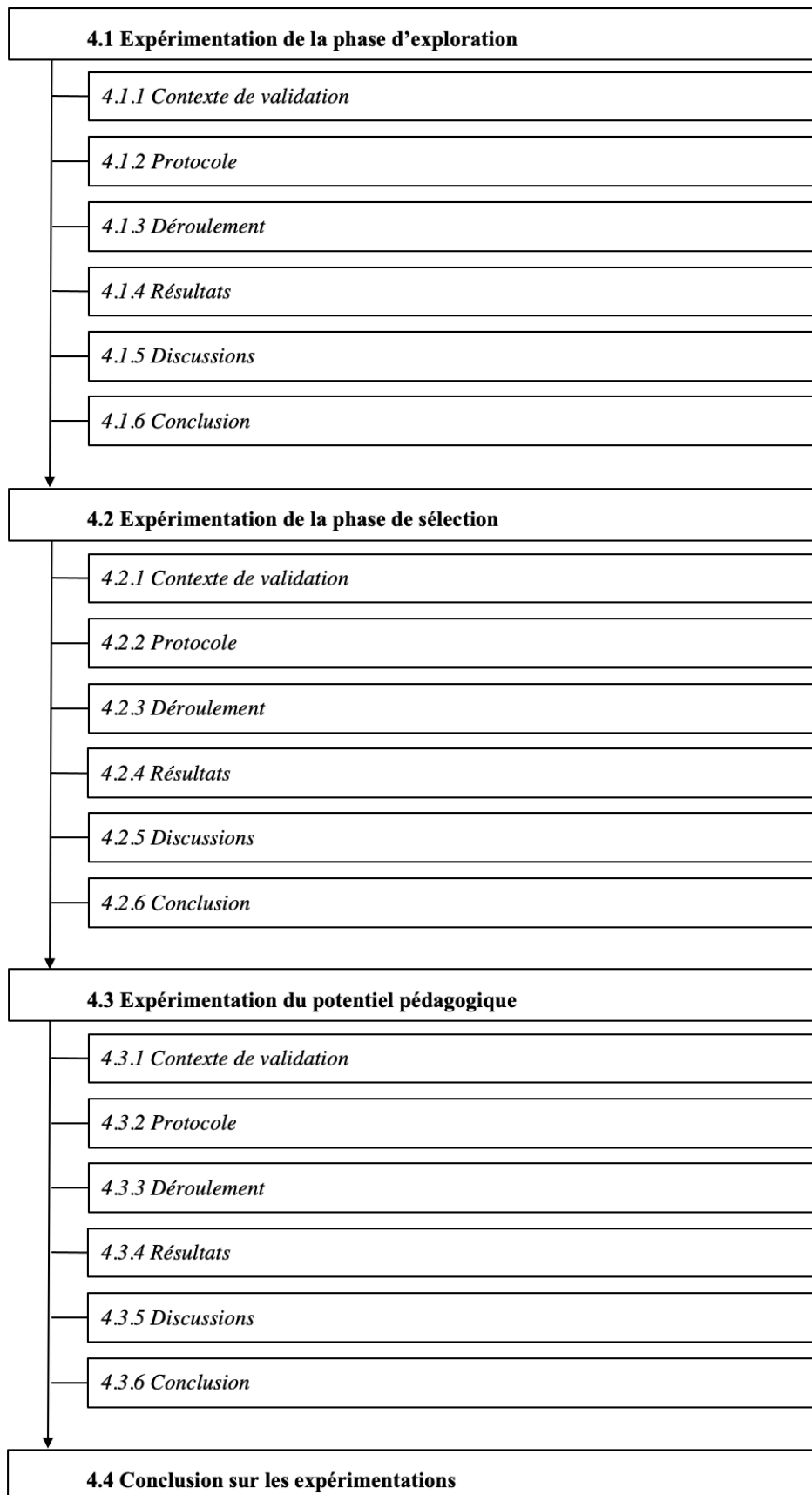


Figure 29 Plan du chapitre « Expérimentations »

4.1. Expérimentation de la phase d'exploration

4.1.1 Contexte de validation

La phase d'exploration de la méthode DfSDI est une phase de créativité. Elle a pour objectif la génération de potentielles créations de valeurs basées sur l'intégration des données captées. Afin de valider son intérêt, il est nécessaire de démontrer que la phase d'exploration proposée permet de générer de meilleurs concepts qu'en l'absence de structure. Shah et al. (2003) ont proposé quatre critères pour évaluer les résultats d'une phase d'idéation : quantité, variété, nouveauté et qualité. Ces critères ont été repris par de nombreux travaux de recherches scientifiques et font ainsi référence. L'évaluation des critères se déroule de la façon suivante :

- La quantité évalue le nombre de concepts générés lors de la phase d'idéation est mesuré.
- La variété évalue l'idéation, la différenciation entre les concepts générés est mesurée.
- La nouveauté évalue le caractère inattendu ou rare des concepts générés par l'idéation.

Ce caractère peut être évalué par un jury de concepteurs experts.

- La qualité évalue le réalisme technique des concepts générés par l'idéation. De la même manière, il peut être évalué par un jury de concepteurs experts.

Ainsi, pour éprouver la pertinence de la première phase de la méthode proposée, il convient de comparer les quatre critères précédents pour une session d'idéation sur les données captées avec et sans la méthode outillée.

En plus de l'évaluation des performances de la méthode outillée proposée, il convient également d'évaluer son utilisabilité. L'utilisabilité est définie comme « le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficacité et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié » (ISO 9241-11, 2018). Pour l'évaluer, on se base sur des critères issus du questionnaire *Creativity Support Index* (CSI) (Carroll et al., 2009 ; Cherry et Latulipe, 2014). Il s'agit d'un questionnaire standardisé pour l'évaluation des approches de soutiens à la créativité. Les critères retenus pour évaluer l'utilisabilité de la méthode outillée sont les suivants :

- L'appréciation qui évalue dans quelle mesure le participant a apprécié l'approche proposée.

- La collaboration évaluée dans quelle mesure l'approche proposée permet de réfléchir avec les autres participants.
- L'exploration évaluée dans quelle mesure l'approche proposée permet d'investiguer de possibles solutions.
- L'expressivité évaluée dans quelle mesure l'approche proposée permet d'être créatif.
- L'immersion évaluée dans quelle mesure l'approche proposée permet de se focaliser sur la tâche à accomplir.

4.1.2 Protocole expérimental

Une approche intragroupe a été choisie pour l'expérimentation. Ainsi, deux sujets d'idéation différents basés sur les données captées sont assignés à deux groupes de participants différents. Chaque groupe aborde les deux sujets consécutivement et de la même manière, mais pas dans le même ordre. En effet, ils échangent de sujets lors de l'expérimentation. Ils ont d'abord utilisé des approches de créativité classiques pour traiter leur premier sujet d'idéation, puis ils ont mis en œuvre la phase d'exploration de la méthode DfSDI pour traiter le second. Le même temps est alloué pour traiter les deux sujets. Les groupes de participants sont isolés l'un de l'autre pendant tout le déroulement de l'expérimentation. La figure 30 illustre le déroulement du protocole expérimental.

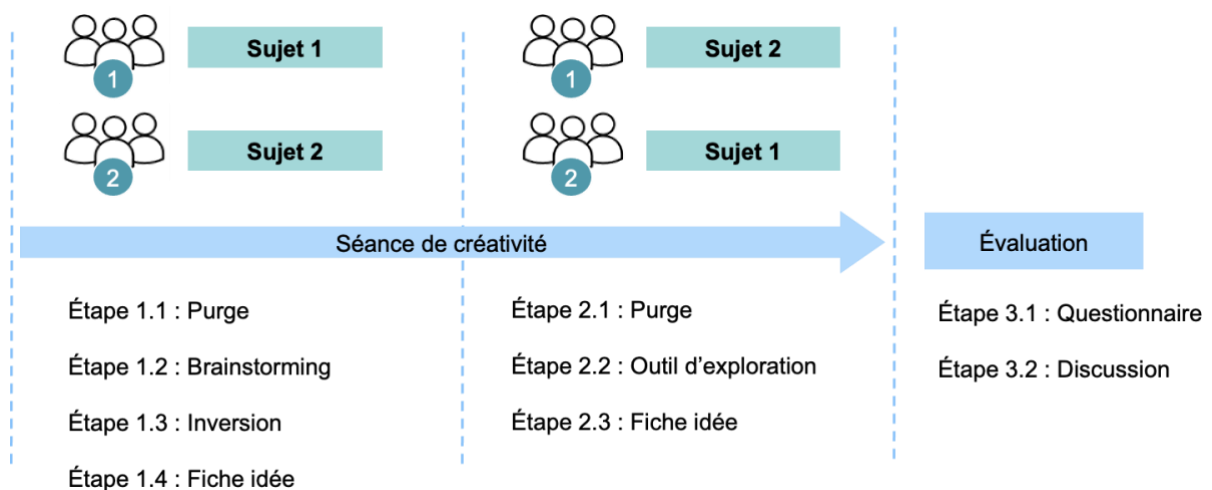


Figure 30 Protocole expérimental pour évaluer l'approche d'exploration de la méthode DfSDI

Les deux groupes de participants commencent donc par traiter un premier sujet en utilisant des techniques de créativité classiques comme suit :

- Étape 1.1 : Les participants commencent par effectuer une purge (Van Gundy, 2005) en rapport avec le sujet traité. L'approche de la purge consiste à écrire toutes les idées qu'ils ont sur le sujet sur des post-it. Ils procèdent indépendamment et dans un court laps de temps. Lorsque le temps imparti est écoulé, les participants sont invités à partager leurs idées avec les autres. Cette approche sert d'échauffement à la créativité et permet de se débarrasser des idées conventionnelles immédiates.
- Étape 1.2 : Les participants entrent ensuite dans une phase classique de brainstorming (Grossman, 1984), au cours de laquelle ils essaient librement, oralement et collectivement de générer des solutions au problème dans un temps limité.
- Étape 1.3 : Les participants utilisent ensuite une approche d'idéation inversée (Osborn, 1963). Ils ont échangé oralement et réfléchi collectivement aux pires solutions possibles pour répondre au sujet traité. Ils peuvent ensuite se baser sur les inversions de ces solutions comme stimuli pour générer des concepts.
- Étape 1.4 : Les participants doivent alors synthétiser les concepts les plus intéressants issus des étapes précédentes dans des fiches idées. Les fiches idées ont été distribuées afin de disposer d'un document standardisé pour chaque concept généré. Elle comprend quatre paramètres à remplir par les participants : le titre du concept, l'explication du concept avec au moins une illustration, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Ainsi, le premier sujet est ainsi traité avec des approches de créativité classiques. Ces approches d'idéation ont été choisies comme références car elles sont les plus répandues dans la conception de produits (Leopoldino et al., 2016). Après cette première étape, les participants échangent de sujets. Lors de cette deuxième étape, ils traitent un nouveau sujet d'idéation mais cette fois en suivant la phase d'exploration proposée par la méthode DfSDI. La session se poursuit comme suit :

- Étape 2.1 : Les participants commencent à nouveau par une approche de purge afin de s'échauffer sur le nouveau sujet et d'éliminer toute solution conventionnelle.
- Étape 2.2 : L'outil d'exploration est ensuite présenté et mis à disposition des participants. Pour la phase du cycle de vie considérée, les participants réalisent de courts brainstormings pour chacune des capacités de détection proposées. Si besoin, ils

peuvent également considérer conjointement différentes capacités de détection afin de réaliser des brainstormings sur des combinaisons de capacités de leurs choix.

- Étape 2.3 : Les participants doivent alors synthétiser les concepts les plus intéressants issus des étapes précédentes dans des fiches idées.

Le deuxième sujet est donc abordé selon la phase d'exploration de la méthode DfSDI pour générer des concepts. Cette approche intragroupe permet une comparaison valide des résultats d'une idéation avec et sans la méthode outillée. La fin de l'expérimentation est structurée comme suit :

- Étape 3.1 : Les participants sont invités à remplir individuellement un questionnaire, basé sur le questionnaire CSI, évaluant l'approche mise en œuvre pour le deuxième sujet. Il repose sur l'autoévaluation de cinq affirmations notant chacun des cinq critères retenus pour évaluer l'utilisabilité, à savoir appréciation, collaboration, exploration, expressivité et immersion. Les notes se font sur une échelle de Likert allant de « Pas du tout d'accord » (1) à « Tout à fait d'accord » (7). Un questionnaire est remis à tous les participants. Le questionnaire fourni est présenté figure 31.
- Étape 3.2 : Les participants sont ensuite invités à discuter de l'approche proposée pour partager librement leurs réflexions sur ses avantages, ses inconvénients et de potentielles améliorations.

Cette dernière étape permet d'avoir un retour qualitatif sur l'utilisabilité de la méthode outillée par les participants. Les données sont à la fois structurées au travers du questionnaire et non structurées avec la phase de discussion. Cette dernière permet cependant de contribuer à l'interprétation des résultats.

Q1: J'ai apprécié l'approche proposée						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q2: L'approche proposée a facilité la collaboration avec les autres participants						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q3: L'approche proposée m'a permis d'explorer différentes possibilités et résultats						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q4: L'approche proposée m'a permis d'être créatif pendant le workshop						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q5: J'étais concentré sur la tâche et j'ai oublié l'approche proposée						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure 31 Questionnaire évaluant d'utilisabilité de la phase d'exploration, d'après Cherry et Latulipe (2014)

4.1.3 Déroulement

Pour obtenir des résultats pertinents sur la première phase d'exploration proposée, il est nécessaire de l'expérimenter auprès de concepteurs experts et idéalement avec des connaissances dans les données captées. L'expérimentation a donc été menée dans un contexte industriel en partenariat avec une entreprise française leader dans la fabrication de vélos de ville connectés et partagés. L'entreprise est considérée comme experte car en activité depuis plus de 15 ans. Elle met l'accent sur les données captées depuis sa création comme moyen d'améliorer à la fois ses produits et ses services.

Au total, 9 employés ont participé à l'expérimentation, 2 femmes et 7 hommes. Le profil des participants était très multidisciplinaire, puisque tous les managers des différentes branches liés aux produits étaient présents. Ils avaient une expérience variant de 2 à 16 ans. En somme, cela permet de garantir un haut niveau de connaissance des produits intelligents et connectés ainsi

qu'un spectre d'expertise large et varié. Ces facteurs devraient être bénéfiques aux phases créatives. En effet, l'expertise implique une meilleure qualité des idées générées et, dans le même temps, les différentes perspectives de chaque participant permettent de « sortir des sentiers battus » (Briggs et Reinig, 2010). Les profils des participants sont résumés dans le tableau 11.

Tableau 11 Profils des participants à l'expérimentation

Groupe	Métiers	Années d'expérience
1	Responsable <i>Back-end</i>	10
	Responsable conception mécanique	6
	Chef de Projet	6
	Responsable produit	6
	Responsable recherche et données	3
2	Responsable chaîne de production	16
	Responsable <i>Full Stack</i>	5
	Responsable logiciels embarqués	4
	Responsable produit	2

L'expérience s'est déroulée dans une petite maison chaleureuse offrant aux participants un environnement plus détendu et plus familier. Ce type d'environnement diffère de celui de l'environnement professionnel habituel des participants et devrait ainsi permettre une réflexion plus créative (McCoy et Evans, 2002). En ce qui concerne le matériel, les participants disposaient d'un nombre suffisant de stylos, de marqueurs, de post-it, de grands tableaux blancs en papier et de fiches idées vierges.

Pour rendre tangible l'outil de représentation des capacités de détection, la forme d'un jeu de cartes a été choisie. Ce choix devrait renforcer la créativité grâce à l'ajout d'une dimension ludique au processus d'idéation (Roy et Warren, 2019). Les 14 cartes ont été réalisées à partir d'une impression papier collé sur les faces recto et verso de blocs de bois carrés aux dimensions 60*60*3 mm. Pour des raisons de différenciation, une carte se compose du nom de la capacité de détection et d'un logo représentatif associé. En outre, les cartes ont toutes une couleur de fond neutre et différente. La figure 32 représente les cartes de capacités de détection telles qu'elles ont été proposées aux concepteurs.



Figure 32 Détails des 14 capacités de détection sous forme de cartes en bois

La session d'expérimentation a débuté par la présentation de ses modalités aux participants. Un effort a été porté à éviter le biais de cadrage selon lequel la façon de présenter une proposition influe sur la réponse obtenue (Tversky et Kahneman, 1974). L'objectif de la séance de créativité a été le développement de nouvelles idées pour les vélos de ville connectés et partagés. Les approches d'idéation ont été présentées comme seulement des moyens de générer des concepts innovants. De plus, l'outil d'exploration n'a été dévoilé qu'au début de l'étape 2.2. Les participants ont ensuite été divisés en deux groupes et ont suivi le protocole défini. Les deux sujets abordés traitaient de l'exploitation de données captées par les vélos partagés connectés mais à des fins différentes. L'un concernait l'amélioration de l'expérience utilisateur et l'autre l'amélioration des services proposés aux collectivités. L'expérimentation s'est bien déroulée et les temps impartis de chaque étape ont été bien respectés. L'expérimentation a duré 4 heures. Les participants ont passé 1 heure et 45 minutes sur chaque sujet. Ils ont fait une pause de 10 minutes avant de changer de sujet. Ils ont répondu au questionnaire d'évaluation sur l'utilisabilité en 5 minutes et ont eu une discussion ouverte de 15 minutes sur la méthode outillée. La figure 33 illustre un groupe de participants utilisant l'outil d'exploration.



Figure 33 Participants utilisant l'outil d'exploration pour générer des concepts de solutions

4.1.4 Résultats

Les phases d'idéations et leurs concepts associés sont évalués selon les quatre critères définis par Shah et al. (2003) à savoir quantité, variété, nouveauté et qualité. Cette sous-section détaille les résultats numériques issus de l'analyse des données d'idéation et des questionnaires sur l'utilisabilité. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de Pingouin (Vallat, 2018), une ressource d'analyse statistique open source pour le langage de programmation Python. Les chiffres relatifs à cette analyse sont présentés sous forme de boîtes à moustaches à l'aide de Matplotlib graphs pour Python (Hunter, 2007). Les résultats des évaluations de la créativité sont d'abord présentés, puis les données des questionnaires d'utilisabilité.

a) Résultats des phases d'idéation

Le nombre de concepts générés pour le premier sujet est de 5 concepts sans l'outil d'exploration et de 7 avec, tandis que pour le second, les résultats sont de 4 sans l'outil et de 5 avec. Il n'y a donc pas de différence significative observée entre la quantité d'idées générées avec et sans la méthode outillée.

Pour la variété, c'est-à-dire la diversité des idées générées, les résultats sont d'abord classés sur un arbre généalogique dont les branches représentent les différents niveaux de différenciation entre les concepts. Il y a quatre niveaux de différenciation successifs pour classer les concepts. Dans l'ordre de la différenciation la plus marquée à la plus spécifique, il y a d'abord la différence de principe physique (PP) puis la différence de principe de fonctionnement (PF) puis la différence d'incarnation (I) et enfin la différence de détails (D). Ainsi, plus l'arbre s'étend, plus les idées d'une même branche diffèrent légèrement. Un calcul mathématique fonction du nombre de branche à chaque niveau de différenciation permet de définir une note de variété pour une idéation donnée. Le tableau 12 présente les arbres généalogiques des concepts pour les deux sujets différents, avec et sans la méthode outillée.

Tableau 12 Arbre représentant la variété des concepts générés pour les deux sujets avec et sans l'outil d'exploration (la racine de l'arbre correspond au nombre de concepts générés)

		Sujet 1		Sujet 2	
Sans outil	PP				
	PF				
	I				
Avec outil	PP				
	PF				
	I				
	D				

Pour calculer la valeur numérique de la variété d'une phase d'idéation, le nombre de branches différentes à chaque niveau de différenciation est multiplié par un coefficient dépendant de ce niveau, les produits sont ensuite sommés ensemble puis divisés par le nombre total de concepts pour normaliser et ainsi définir la note de variété. Les corrections apportées au calcul de la variété par Nelson et al. (2009) sont prises en compte. Ainsi, le nombre d'idées différentes à chaque niveau de différenciation sera déterminé comme le nombre de branches à ce niveau moins un, et les coefficients utilisés pour les niveaux PP, PF, I et D seront respectivement 10, 5, 2 et 1. De plus, pour homogénéiser les résultats, Nelson et al. (2009) indiquent que les résultats des évaluations doivent être divisés par (n-1), où n est le nombre maximum de concepts obtenus.

Par exemple, le score de diversité des concepts générés avec le sujet 1 et sans l'outil est :

$$V_{S1wo} = \frac{(N_{PP} - 1) \times C_{PP} + (N_{PF} - 1) \times C_{PF} + (N_I - 1) \times C_I}{n - 1}$$

$$= \frac{(3 - 1) \times 10 + (2 - 1) \times 5 + (2 - 1) \times 2}{5 - 1} = 6,75.$$

Tandis qu'avec l'outil d'exploration, le score est :

$$V_{S1w} = \frac{((N_{PP} - 1) \times C_{PP} + (N_{PF} - 1) \times C_{PF} + (N_I - 1) \times C_I + (N_D - 1) \times C_D)}{n - 1}$$

$$= \frac{((2 - 1) \times 10 + (3 - 1) \times 5 + (5 - 1) \times 2 + (2 - 1) \times 1)}{7 - 1} = 4,8.$$

Les résultats numériques des calculs de variété donnent donc pour le premier sujet 6,75 sans l'outil d'exploration et 4,8 avec, pour le deuxième sujet 7,33 sans l'outil et 2,5 avec. Il y a donc une différence de variété significative, les phases idéation sans la méthode outillée proposent des concepts plus diversifiés. L'ensemble des résultats numériques relatifs à la quantité et à la variété des différentes idéations sont regroupés dans le tableau 13.

Tableau 13 Évaluation de la quantité et de la variété des concepts générés au cours de l'expérimentation

Quantité	Sujet 1	Sujet 2	Variété	Sujet 1	Sujet 2
Sans outil	5	4	Sans outil	6,75	7,33
Avec outil	7	5	Avec outil	4,8	2,5

Les facteurs de nouveauté et de qualité sont évalués par les notes d'un panel de juges. Ainsi, les concepts de solutions développés avec et sans outil et pour les deux sujets ont été mélangés et soumis à un jury d'experts pour évaluation. Les membres du jury ont été sélectionnés sur la base de leur solide expérience en matière de conception de produits. Les quatre juges sont tous des chercheurs avec différentes spécialités et ont entre 15 et 40 ans d'expérience dans la conception et le développement de produits. Ils sont en outre déjà familiarisés avec le processus d'évaluation de concepts de solutions. Les profils des juges sont résumés dans le tableau 14.

Tableau 14 Profils des juges qui ont évalué les concepts générés

Juge	Spécialités	Années d'expérience
1	Méthodologie TRIZ / Stratégie d'innovation	40
2	Cycle de vie produit / Conception innovante	20
3	Créativité et innovation / Conception émotionnelle	20
4	Management de l'innovation / Système produit-services	15

Le jury d'experts a noté la nouveauté et la qualité de l'ensemble des concepts générés lors des différentes phases d'idéation sur une échelle de Likert. Le jury d'experts a ainsi évalué sur une échelle de 1 à 5 la nouveauté de chaque concept généré. Une note de 1 indique une solution « peu originale » tandis qu'une note de 5 indique une « excellente originalité » du concept proposé. Le jury d'experts a également évalué sur une échelle de 1 à 5 la qualité de chaque concept généré. Une note de 1 indique une solution « peu réalisable » tandis qu'une note de 5 indique un « excellent réalisme » technique.

Avant d'analyser les résultats, il est nécessaire d'évaluer le degré de consensus entre les juges, l'accord interjuges. Étant donné que les quatre mêmes juges ont tous évalué l'ensemble des concepts et que les notes sont basées sur la moyenne de ces évaluations La concordance entre les évaluateurs a été évaluée par le biais du coefficient intraclass (ICC). Plus particulièrement, l'ICC (3,k) a été calculé pour estimer la concordance entre les juges. Sa valeur est de 0,89, ce qui correspond à une bonne cohérence puisqu'elle se situe entre 0,75 et 0,9 (Koo et Li, 2016). La figure 34 montre les notes de nouveauté et de qualité avec et sans l'outil d'exploration. Les notes sont présentées sous forme de diagrammes en boîte et en moustache. Pour chaque résultat, ces diagrammes permettent de représenter la médiane, la moyenne, les différents quartiles et les valeurs minimum/maximum.

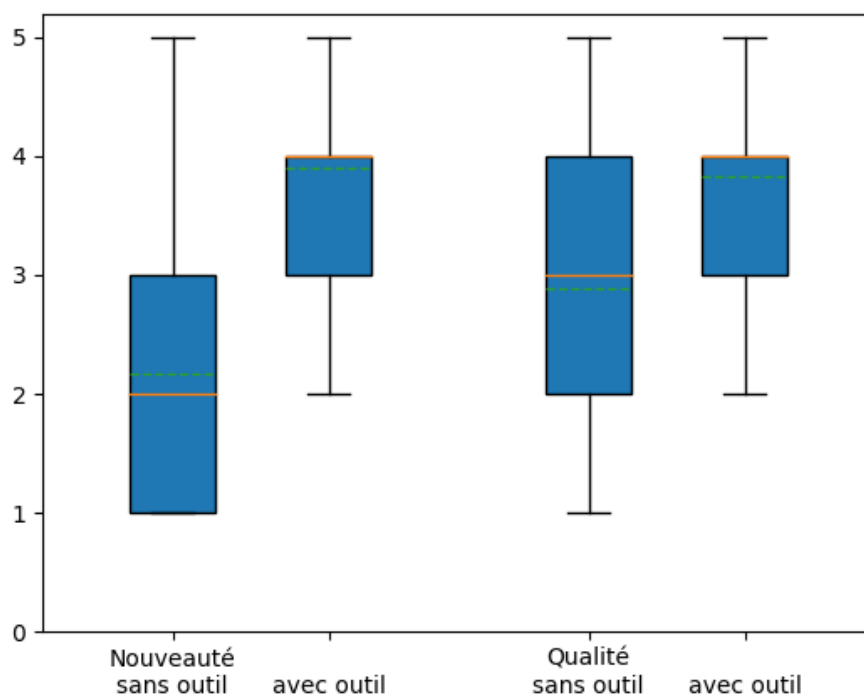


Figure 34 Notes attribuées par les juges à la nouveauté et à la qualité des concepts générés avec et sans l'outil d'exploration

Un test de distribution d'Anderson-Darling (Anderson et Darling, 1952) a montré que les évaluations des juges ne suivaient pas une distribution normale pour les évaluations de la nouveauté et de la qualité avec et sans l'outil. Par conséquent, dans ce contexte, les tests statistiques effectués sont des tests U de Mann-Whitney, homologue non paramétrique du t-test de Student. Ils permettent d'évaluer l'hypothèse nulle suivante : aucune différence dans les médianes d'évaluation avec et sans l'utilisation de la méthode outillée. La valeur de p pour la nouveauté et la qualité étant inférieure à 0,05, l'hypothèse nulle peut être rejetée et ainsi les groupes observés avec et sans la méthode outillée peuvent être considérés comme significativement différents. Les résultats numériques des tests statistiques pour la nouveauté et la qualité sont présentés dans le tableau 15.

Tableau 15 Résultats des tests statistiques pour les notes de nouveauté et de qualité

	Critère	Moyenne	P
Nouveauté	Sans outil	2,17	p<0,0001
	Avec outil	3,90	
Qualité	Sans outil	2,89	0,0002
	Avec outil	3,83	

En ce qui concerne les notes de nouveauté des concepts de solution, ceux générés avec la méthode outillée ont des notes largement supérieures à ceux générés sans. Pour les notes de qualité, la différence est moins importante mais également significative en faveur de l'utilisation de la méthode outillée. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle la mise en œuvre de la phase d'exploration a permis de générer des concepts plus novateurs et de meilleure qualité qu'avec des approches d'idéation traditionnelles.

b) Résultats du questionnaire

Pour les questionnaires d'utilisabilité basés sur le CSI, les données à analyser sont une autoévaluation qualitative sur des échelles de Likert par les neuf participants à l'expérimentation. Ils ont répondu aux cinq mêmes questions pour évaluer l'utilisabilité perçue de la méthode outillée. Il est donc également nécessaire d'évaluer la cohérence des réponses entre elles avant de pouvoir en tirer des conclusions. L'ensemble des participants ont évalué l'ensemble des critères d'utilisabilité et les résultats se basent sur la moyenne des notes accordées. La concordance entre les évaluateurs a été évaluée par le biais du coefficient ICC (3,k). Sa valeur est de 0,81 ce qui correspond à une bonne cohérence puisqu'elle se situe entre 0,75 et 0,9 (Koo et Li, 2016).

Des moyennes élevées et une faible dispersion des évaluations des participants sont observées pour les trois critères évaluant l'appréciation, la collaboration et l'exploration relative à la méthode outillée. Ces notes semblent ainsi refléter un consensus parmi les participants. En revanche, pour les critères d'expressivité et d'immersion, les notes sont plus dispersées et les moyennes sont légèrement inférieures, tout en restant très correctes. Les avis des participants sont donc plus divergents. Ces résultats rendent plus difficile l'interprétation des aspects concernés. Les résultats issus du questionnaire sont présentés sous forme de diagramme en boîte à moustaches dans la figure 35.

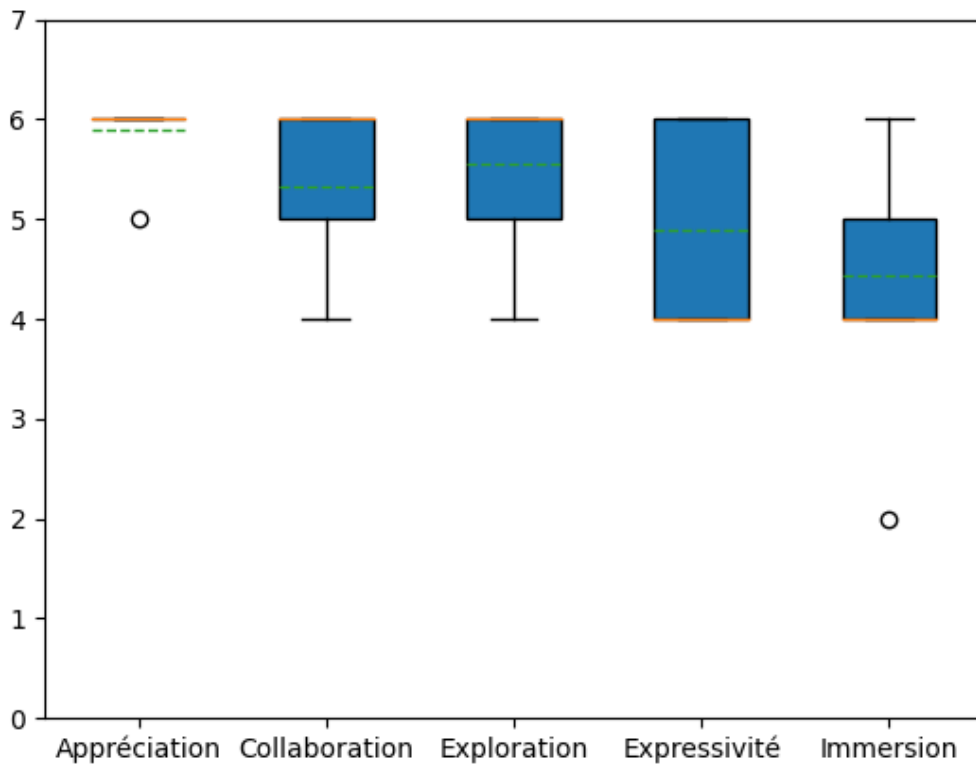


Figure 35 Notes attribuées à l'utilisabilité de la phase d'exploration par les participants

4.1.5 Discussions

Cette section analyse l'expérimentation de la première partie de la méthode DfSDI au travers de l'interprétation des résultats des différentes sessions de créativité, des questionnaires d'utilisabilité et de l'échange avec les participants. Enfin, elle souligne aussi les limites de l'expérimentation.

Tout d'abord l'impact sur la créativité de la première partie de la méthode DfSDI est étudié selon les quatre critères définis par Shah et al. (2002) : quantité, diversité, qualité et nouveauté. D'abord, le critère de quantité ne semble pas être influencé par la méthode. En effet, elle ne semble pas apporter plus d'idées que les méthodes traditionnelles dans le contexte de cette expérimentation. Ensuite, si le nombre d'idées générées n'est pas affecté, la diversité des idées a par contre été réduite avec la méthode outillée. C'est un résultat qui pouvait être attendu au regard des travaux de Smith et al. (1993). Ils ont en effet montré que la proposition d'exemples dans la phase d'idéation focalise les idées générées autour des éléments introduits. Ainsi, le fait

de proposer les capacités de détection des capteurs au travers de cartes oriente manifestement les concepteurs vers des solutions de capteurs embarqués, ce qui réduit donc la diversité des idées générées. Cependant, le fait de représenter les capacités de détection des capteurs semble entraîner une augmentation de la qualité des idées générées. L'introduction d'éléments précis permet la génération d'idées plus détaillées et réalisables. La qualité des concepts générés est en ce sens supérieure à ceux issus des approches d'idéation classiques. Ce compromis entre la diversité et la qualité des idées n'est pas considéré comme un problème. Un participant a fait remarquer que : « Les cartes ont aidé à explorer le sujet traité car elles permettent d'imaginer des scénarios concrets. » Enfin, le facteur de nouveauté est également renforcé par l'association entre les capacités de détection des capteurs avec le sujet traité. Selon le principe de synectique (Gordon, 1961), l'association de concepts divers peut stimuler la génération d'idées plus originales. La nouveauté des idées générées est ainsi accrue. Un participant a apprécié cette approche : « L'approche nous a poussés à générer des concepts divergents. »

Les résultats des questionnaires d'utilisabilité permettent également plusieurs retours sur la première phase de la méthode DfSDI. Dans ce questionnaire, les participants ont évalué cinq critères différents : appréciation, collaboration, exploration, expressivité et immersion.

Tout d'abord, l'exploration des possibilités offertes par la méthode a été très appréciée et reconnue par les participants. Cela confirme en plus la pertinence de la construction de l'outil d'exploration. En effet, l'outil semble avoir offert aux concepteurs participants un panel pertinent de capteurs pour leurs produits. Un participant a déclaré : « L'outil nous a permis de mettre en évidence des données encore peu explorées à ce jour par nos produits, par exemple les données d'altitude. » Certains participants ont indiqué qu'ils étaient revenus sur des solutions qu'ils avaient déjà intégrées ou imaginées pour leurs produits grâce à la méthode proposée. Un participant a ajouté en ce sens : « Il serait intéressant d'appliquer cette approche à la conception d'un nouveau produit afin de générer les idées plus rapidement. » Afin de maximiser, le potentiel d'exploration offert par la méthode outillée, des participants ont exprimé l'idée de former des équipes créatives éclectiques pour utiliser l'outil, par exemple avec « les équipes de vente » ou « les récentes recrues » afin de générer des idées potentiellement nouvelles. Ces déclarations confirment, outre l'exploration permise, l'aspect universel et accessible de l'outil. Certains participants se sont par ailleurs interrogés sur l'application de la méthode proposée à d'autres de leurs projets. Enfin, au cours de cette session contrainte par le

temps, les cartes ont été utilisées comme support à de court brainstorming pour générer des idées. Certains participants ont exprimé le besoin d'une exploration plus structurée des potentiels confirmant le choix de laisser libre l'approche de créativité à utiliser avec l'outil d'exploration. Ensuite, les notes d'utilisabilité montrent que les participants ont beaucoup apprécié l'approche. Ceci peut en partie s'expliquer par l'approche de jeu sérieux proposée pour l'idéation avec la représentation sous forme de cartes des capacités des capteurs. En effet, Agogué et al. (2015) ont montré que l'introduction d'une dimension ludique lors de la créativité a le potentiel d'offrir une approche plus engageante stimulant la créativité collective. La première partie de la méthode proposée est donc positivement perçue par les industriels. De plus, la collaboration autour de l'outil d'exploration a également été bien notée. Les participants se sont sentis capables de présenter des idées à leurs collègues et d'interagir entre eux de manière efficace et rapide. L'aspect tangible des cartes et la complexité réduite de la méthode ont en effet contribué à renforcer l'aspect collaboratif car il dépendait moins de l'expertise (Peters et al., 2021). Les notes élevées de collaboration confirment également en ce sens l'accessibilité de l'outil. Il est intéressant de noter que l'utilisation de l'outil a aussi permis le partage d'informations et l'apprentissage. « Je ne savais pas que l'on pouvait détecter cela » a déclaré un participant non expert après avoir découvert une capacité de détection. Cette remarque dénote d'un potentiel pédagogique à l'outil. Enfin, les notes sont plus dispersées pour les deux autres paramètres du questionnaire, à savoir l'expressivité et l'immersion. En l'absence d'un consensus entre les participants, il est plus difficile de tirer des interprétations de ces critères.

Les premières limites de cette étude résident dans les facteurs qualitatifs inhérents à l'expérimentation et par conséquent à ses résultats. Tout d'abord concernant le protocole expérimental, le choix des outils d'idéation à comparer avec l'outil d'exploration a été porté sur des outils usuels d'idéation. Il est possible que les résultats diffèrent avec d'autres approches d'idéation plus complexes. Ensuite, concernant les participants à l'expérimentation, bien qu'ils aient des profils variés, ils fixent un cadre à l'expérimentation. Une expérimentation avec une autre entreprise, d'un autre secteur ou sur un produit différent pourrait conduire à des résultats différents, tant dans les concepts générés que dans les réponses au questionnaire d'utilisabilité.

4.1.6 Conclusion

En conclusion, l'expérimentation de la première partie d'exploration de la méthode DfSDI a mis en évidence les résultats suivants. Concernant la créativité, le critère de quantité n'est pas impacté par la méthode outillée par rapport aux méthodes d'idéation traditionnelles. Cependant, au détriment de la variété des idées, elle permet de générer des idées plus qualitatives et plus innovantes. De plus, les industriels participants ont apprécié la méthode outillée, la collaboration qu'elle permet et ont reconnu ses qualités d'exploration des potentiels. Au regard de l'ensemble des résultats, la première phase d'exploration de la méthode DfSDI démontre sa pertinence. Ainsi, la première sous-hypothèse (1.a) : « la méthode DfSDI permet de structurer l'intégration des données captées lors de la conception amont de produits via une exploration systématique de leurs potentiels » est validée.

4.2. Expérimentation de la phase de sélection

4.2.1 Contexte de validation

La phase de sélection de la méthode DfSDI est une phase d'aide à la décision. Elle a pour objectif la sélection selon des critères de soutenabilité des potentielles créations de valeurs basées sur les données captées. Afin de valider son intérêt, il est nécessaire de démontrer que la phase de sélection est pertinente et qu'elle offre une structure efficace aux concepteurs. Pour étudier les approches d'évaluation basée sur les piliers de la soutenabilité, Bockstaller et al. (2009) proposent d'évaluer les aspects de solidité scientifique, d'utilité et d'utilisabilité au travers d'une sélection de critères spécifique à chacun des aspects. Les travaux de Cinelli et al. (2014) ainsi que de Sala et al. (2015) définissent des critères pertinents pour évaluer les aspects de solidité scientifique et d'utilité des propositions d'évaluation basées sur la soutenabilité.

- Les critères proposés pour l'évaluation de la solidité scientifique sont les suivants :
 - La consistance évalue dans quelle mesure la proposition intègre l'ensemble des aspects de la soutenabilité.
 - L'exhaustivité évalue dans quelle mesure la proposition intègre l'ensemble des aspects du cycle de vie.

- La précision évalue dans quelle mesure les résultats issus de la proposition sont corrects.
 - L'extensivité évalue dans quelle mesure la proposition est applicable au sein de son domaine.
 - La généralité évalue dans quelle mesure la proposition est applicable à d'autres domaines.
- Les critères proposés pour l'évaluation de l'utilité sont les suivants :
 - La pertinence évalue dans quelle mesure la proposition est intéressante.
 - La transparence évalue dans quelle mesure le processus de proposition est compréhensible
 - La clarté évalue dans quelle mesure les résultats issus de la proposition sont compréhensibles.

En plus de la solidité scientifique et l'utilité de la proposition d'évaluation, il s'agit également d'évaluer son utilisabilité. Les critères définis dans les travaux de Cinelli et al. (2014) ainsi que ceux du CSI (Cherry et Latulipe, 2014) sont utilisés pour évaluer l'utilisabilité. Parmi les critères proposés, le critère d'expressivité du CSI, propre aux approches créatives, n'est pas pertinent et il est donc remplacé par un autre, le critère de résultats. Ce critère transcrit la satisfaction des concepteurs avec les résultats obtenus à l'issue de la proposition d'évaluation. Le reste des critères issus du CSI, définis dans la sous-section 4.1.1, demeurent pertinents pour évaluer l'utilisabilité. Ainsi les critères d'évaluation retenus sont donc : appréciation, collaboration, exploration, résultats et immersion.

4.2.2 Protocole expérimental

Ainsi, l'évaluation de la phase de sélection est basée sur les critères définis précédemment. Elle se déroulera en deux expérimentations indépendantes. Lors de la première, des experts en soutenabilité et conception de produits évalueront la solidité scientifique et l'utilité de la méthode proposée. Lors de la seconde, des concepteurs de produits évalueront l'utilisabilité de la méthode proposée après sa mise en œuvre lors d'un workshop.

a) Protocole d'évaluation de la solidité scientifique et de l'utilité par les experts en soutenabilité

Pour permettre l'évaluation de la solidité scientifique et de l'utilité de la modélisation proposée par des experts, une approche d'entretiens a été choisie. C'est au cours de l'entretien que les experts en soutenabilité et conception de produits seront amenés à noter les critères choisis précédemment afin d'évaluer quantitativement la méthode outillée. L'approche d'entretien a été choisie pour garantir la meilleure compréhension possible de la méthode et de sa modélisation afin de les évaluer au mieux. Les entretiens sont semi-directifs et comprennent trois parties successives. Ils sont illustrés sur la figure 36.

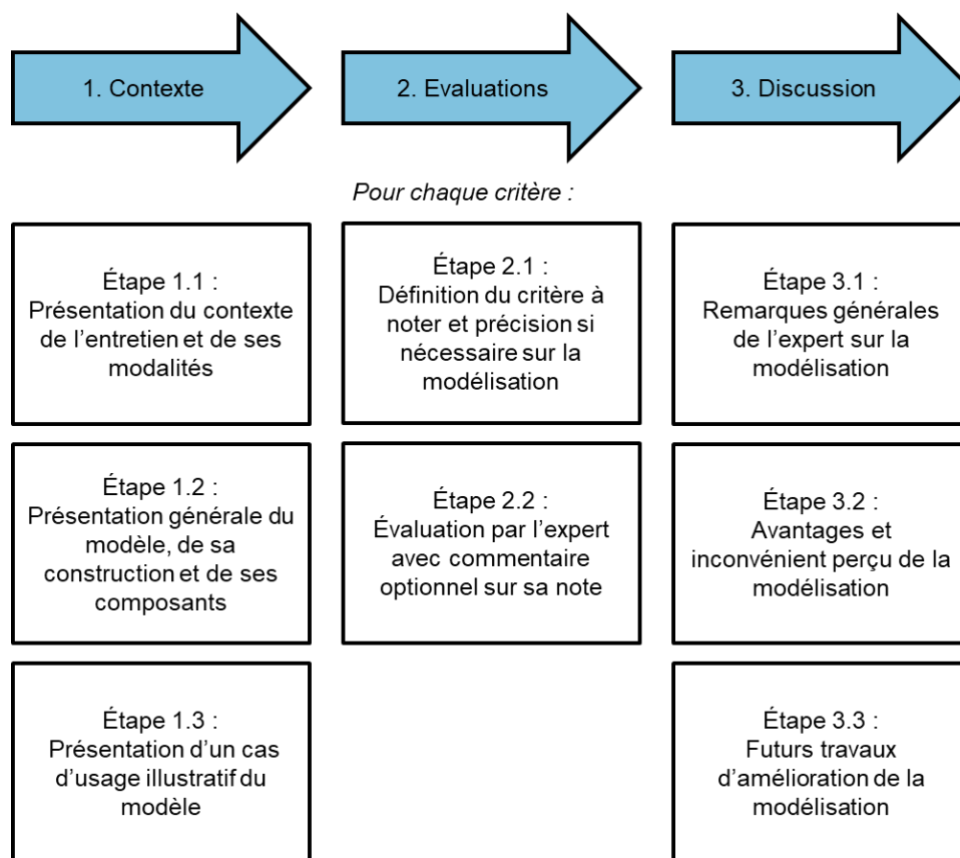


Figure 36 Illustration du protocole d'expérimentation de la solidité scientifique et de l'utilité de la phase de sélection de la méthode DfSDI

La première partie d'introduction a pour objectif de fixer le cadre de l'entretien :

- Étape 1.1 : Dans un premier temps, le contexte de l'entretien et ses modalités sont présentés à l'expert interrogé.

- Étape 1.2 : Ensuite une présentation générale de la seconde phase de la méthode DfSDI est faite. Elle présente le contenu de la section 3.4 donc le contexte de la méthode, la construction de l'outil de modélisation et son déroulement.
- Étape 1.3 : Pour compléter la présentation théorique de la méthode, une présentation d'un cas d'usage est réalisée afin d'illustrer son utilisation pratique.

La deuxième partie de l'entretien est la partie permettant l'évaluation de la solidité scientifique et de l'utilité de la modélisation. L'ensemble des critères d'évaluation (précision, consistance, exhaustivité, extensivité, généralité, transparence et clarté) est systématiquement passé en revue de la façon suivante :

- Étape 2.1 : D'abord le critère d'évaluation à noter est défini. L'expert interrogé est ensuite invité à poser si besoin toute question qui pourrait permettre d'éclairer son jugement.
- Étape 2.2 : L'expert est ensuite invité à évaluer le critère sur une échelle de Likert de 1 à 7. Une note de 1 signifie que le critère évalué n'est « pas du tout » pris en compte par l'approche tandis qu'à l'inverse, une note de 7 indique qu'il l'est « tout à fait ». La note fournit un indicateur quantitatif pour l'évaluation de la méthode outillée. L'expert est aussi invité, s'il le souhaite, à commenter sa note. Les potentiels commentaires peuvent être utiles à l'interprétation ultérieure des notes.

Enfin, dans la troisième et dernière partie de l'entretien, l'expert interrogé pouvait faire part de son point de vue sur la méthode outillée. Il s'agit de données qualitatives aussi potentiellement utiles pour l'interprétation des résultats et le futur développement de la méthode :

- Étape 3.1 : L'expert interrogé est invité à partager ses remarques générales sur l'approche proposée.
- Étape 3.2 : L'expert interrogé est invité à partager ses remarques sur les avantages et inconvénient de l'approche proposée.
- Étape 3.3 : L'expert interrogé est invité à partager ses suggestions de futurs travaux pour l'approche proposée.

b) Protocole d'évaluation de l'utilisabilité par les concepteurs de produits

Une fois la solidité scientifique et l'utilité de la modélisation évaluées par des experts en soutenabilité, c'est son utilisabilité qui doit être évaluée par des concepteurs de produits. Une approche de workshop est choisie à cet effet. Le format d'un workshop permet de réunir des concepteurs de spécialités différentes pour mettre en œuvre la proposition de méthode. Il permet également de leur proposer un cadre commun de réflexions et d'échanges. Le workshop se déroule en plusieurs phases et est illustré figure 37.

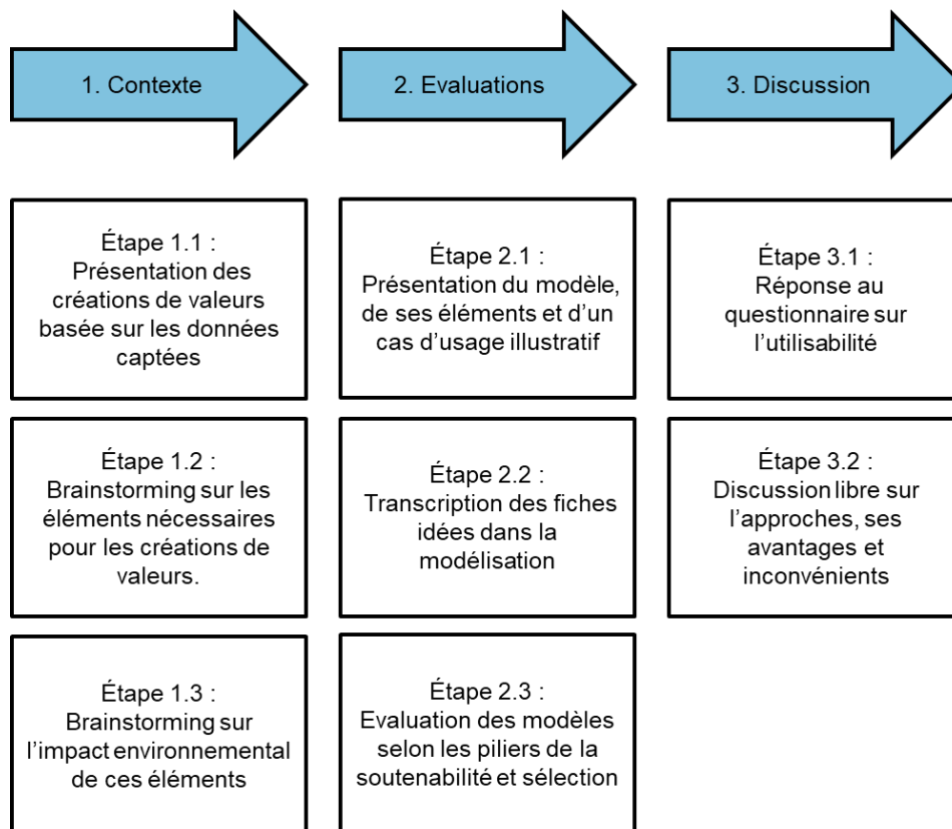


Figure 37 Illustration du protocole d'expérimentation de l'utilisabilité de la phase de sélection de la méthode DfSDI

Lors de la première phase du workshop, les concepteurs participants sont introduits à l'évaluation des créations de valeurs basées sur la connectivité. L'objectif de cette première partie est de présenter le contexte de l'étude ainsi que de fixer le cadre et la portée des évaluations à réaliser. Cette partie est essentielle afin que les participants comprennent et travaillent dans un cadre commun.

- Étape 1.1 : Une présentation est d'abord faite aux participants. La présentation définit les créations de valeurs basées sur les données captées. Les enjeux et le contexte de leurs sélections en amont de la conception sont abordés. Enfin, les piliers de la soutenabilité, tels qu'ils sont abordés dans ces travaux, sont présentés aux participants.
- Étape 1.2 : Les participants réfléchissent ensuite collectivement au travers d'un court brainstorming aux éléments physiques et numériques nécessaires à la création de valeurs basées sur les données captées. Cette étape, en plus de fixer le cadre du workshop, fait office d'échauffement pour les travaux collectifs à venir.
- Étape 1.3 : Les participants ont ainsi mis en évidence des éléments nécessaires à la mise en œuvre des créations de valeurs basées sur les données. Ils évaluent au cours d'un second court brainstorming leurs impacts potentiels sur les piliers de la soutenabilité. Cette étape achève de poser le cadre du workshop.

Ensuite lors de la deuxième partie du workshop, la seconde phase de la méthode DfSDI est mise en œuvre pour être évaluée. Les participants la suivent au travers d'un cas d'étude de sélections de concepts de création de valeurs basées sur les données captées. Une approche d'aide à la décision simple, la WSM, est adoptée pour tester l'approche.

- Étape 2.1 : La modélisation accompagnant l'approche de sélection est d'abord introduite au travers de sa présentation théorique et d'un cas d'usage illustratif. Plusieurs concepts de création de valeurs sont ensuite présentés aux participants qui sont alors invités à les transcrire indépendamment dans la modélisation proposée.
- Étape 2.2 : Une fois que chacun des concepts a été transcrit dans la modélisation proposée, les participants sont invités à s'appuyer sur ces modèles pour évaluer les différents concepts. Les participants sont invités à évaluer les contributions positives économiques, environnementaux et sociaux ainsi que les contributions négatives selon ces mêmes trois critères pour chacun des concepts étudiés.
- Étape 2.3 : Enfin, les participants s'accordent pour pondérer les trois piliers de la soutenabilité et synthétisent ainsi les évaluations données lors de la partie précédente afin de créer une note unique pour les contributions positives et pour les contributions négatives. Les notes des différents concepts étudiés sont comparées et les participants choisissent alors parmi les concepts proposés ceux à considérer en priorité.

Enfin, après avoir mis en œuvre l'approche proposée, les participants l'évaluent dans la dernière phase du workshop de la façon suivante :

- Étape 3.1 : Les participants sont invités à remplir individuellement le questionnaire d'évaluation de l'utilisabilité de la modélisation. Ce questionnaire permet d'obtenir des résultats quantitatifs à analyser pour évaluer l'approche proposée. Le questionnaire est illustré figure 38.
- Étape 3.2 : Les participants sont invités à discuter de l'outil pour partager librement leurs réflexions sur les forces, les faiblesses de la méthode outillée ainsi que les points à améliorer. Ces discussions permettent un retour qualitatif potentiellement utile lors de l'interprétation ultérieure des résultats quantitatifs.

Q1: J'ai apprécié l'approche proposée						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q2: L'approche proposée a facilité la collaboration avec les autres participants						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q3: L'approche proposée m'a permis d'explorer différentes possibilités et résultats						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q4: Je suis satisfait des résultats que l'approche proposée m'a permis d'obtenir						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Q5: J'étais concentré sur la tâche et j'ai oublié l'approche proposée						
Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Neutre	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure 38 Questionnaire évaluant l'utilisabilité de la seconde partie de la méthode DfSDI d'après Cherry et Latulipe (2014) et Cinelli et al. (2014)

4.2.3 Déroulement

a) Déroulement de l'évaluation de la solidité scientifique et de l'utilité par les experts en soutenabilité

Pour garantir la pertinence de l'évaluation de la solidité scientifique et de l'utilité de l'approche proposée, il était nécessaire d'interroger des chercheurs ayant une expérience dans le domaine de la soutenabilité et de la conception de produits. À cet égard, 4 chercheurs travaillant dans le domaine de la soutenabilité au sein de 3 grandes entreprises multinationales différentes ont été contactés pour évaluer la proposition. Deux chercheurs travaillent au sein de la même entreprise de service numérique, un au sein d'une entreprise fabriquant des produits pour les industries automobile et aérospatiale et un au sein d'une entreprise de produits et dispositifs médicaux. Pour des raisons de confidentialité, les entreprises ne sont pas explicitement nommées. En plus, de travailler dans des entités variées, les chercheurs interrogés possèdent des expertises différentes dans le domaine de la soutenabilité. La proposition de modélisation est construite pour être générique. Il est en ce sens pertinent d'avoir des perspectives diverses pour évaluer la proposition à la fois en termes de domaine et d'expertise. Le tableau 16 résume les profils des entreprises et des experts participants à l'évaluation de la proposition.

Tableau 16 Profils des experts interrogés pour l'évaluation de l'approche d'aide à la décision

Expert	Industrie	Chiffre d'affaires (en euros)	Nb employés	Profil de l'expert	
				Expertise	Année dans l'expertise
1	Service numérique	22 Mrd	300 k	Informatique soutenable	2
2	Service numérique	22 Mrd	300 k	Fabrication soutenable	3
3	Fabricant pour l'automobile et l'aérospatiale	3,9 Mrd	38 k	Conception soutenable	4
4	Produits et dispositif médicaux	43 Mrd	95 k	Économie circulaire et soutenable	2

L'ensemble des entretiens avec les experts en soutenabilité s'est déroulé selon le protocole expérimental proposé. Tous les entretiens ont été réalisés en ligne via un logiciel de partage de voix et de vidéos. Ils ont été réalisés en août 2023 avec une durée minimale de 68 minutes, une durée maximale de 75 minutes et une moyenne de 72 minutes.

b) Déroulement de l'évaluation de l'utilisabilité par les concepteurs de produits

Pour obtenir des résultats pertinents sur la seconde phase de sélection proposée, il est pertinent de l'expérimenter auprès de concepteurs de produits de domaines variés et sans expérience particulière dans le domaine de la soutenabilité. La méthode DfSDI a en effet pour objectif d'être accessible aux concepteurs de tous niveaux. L'expérimentation a été menée dans un contexte mixte à la fois académique et industriel. En effet, des chercheurs en conception de produits issus de domaines industriels ou académiques variés ont participé à l'expérimentation.

Au total, 21 personnes ont participé à l'expérimentation, 7 femmes et 14 hommes. Le profil des participants était multidisciplinaire puisque les chercheurs participants avaient des spécialisations très diverses dans le domaine de la conception de produits. Parmi eux, 6 participants menaient des recherches dans le domaine de l'Industrie 4.0, 5 dans les services numériques, 3 dans la mobilité, 2 dans l'aérospatial, 2 dans l'énergie, 2 dans le médical et 1 dans le luxe. En somme, cela permet de garantir un haut niveau de connaissance en conception de produits ainsi qu'un spectre d'expertise large et varié. Ces facteurs sont bénéfiques pour l'évaluation de la phase expérimentée. En effet, l'expertise en conception des participants implique une bonne connaissance des pratiques et méthodes existantes et donc une meilleure évaluation de l'outil. De plus, les spécialisations variées des participants permettent d'adopter une diversité des points de vue sur l'évaluation de la méthode outillée et donc une évaluation plus générale.

Le workshop s'est tenu à deux occasions, une première fois lors d'un évènement scientifique sur les données organisé par le laboratoire LCPI et une seconde fois lors de la conférence scientifique internationale ICED23. 14 et 7 participants distincts ont respectivement participé à ces workshops. Dans les deux cas, le workshop s'est déroulé dans une salle de classe, un environnement neutre, propice au travail et à la concentration. En ce qui concerne le matériel,

les participants disposaient d'un nombre suffisant de stylos, de marqueurs, de post-it, de grandes feuilles blanches en papier. Au début de la deuxième étape de l'expérimentation, les fiches idées des concepts de création de valeurs basée sur les données captées à sélectionner étaient distribuées au format papier aux participants. Les fiches idées à sélectionner, au nombre de quatre, sont issues de la première expérimentation réalisée. En ce sens, elles portaient sur des créations de valeurs potentielles apportées par créations de valeurs basées sur les données captées pour des vélos de ville connectés et partagés. Cela permet d'expérimenter la phase de sélection sur un cas d'étude industriel réel, qui plus est la suite de la première phase de la méthode. Les fiches idées sont présentées dans l'annexe 2. Accompagnant les fiches idées, des feuilles guidant le processus d'évaluation étaient distribuées. Ces feuilles contenaient en effet la proposition de modélisation vierge avec les espaces à remplir suggérés aux participants. Ces feuilles incluait également, en dessous de la modélisation, des espaces vierges à compléter pour l'évaluer selon les trois piliers de la soutenabilité à la fois pour les contributions positives et négatives. Elles sont également présentées dans l'annexe 3.

Un effort a été fait pour éviter le biais de cadrage selon lequel la façon de présenter une proposition influe sur la réponse obtenue (Tversky et Kahneman, 1974). L'objectif du workshop a été la sélection parmi les créations de valeurs proposées pour les vélos de ville connectés. L'approche proposée a été présentée aux participants comme un moyen pour y arriver. De plus, la modélisation développée n'a été dévoilée qu'au début de l'étape 2. Les participants ont ensuite été divisés en sous-groupes et ont suivi le protocole défini. L'expérimentation des deux workshops s'est déroulée conformément au protocole et les temps impartis pour chaque étape ont été bien respectés. L'expérimentation a duré 2 heures. La première étape introductive a duré 30 minutes, les participants ont passé 1 heure et 15 minutes sur l'évaluation et la sélection des fiches idées à l'aide de la modélisation. Ils ont ensuite répondu au questionnaire d'évaluation de l'outil en 5 minutes et ont eu une discussion ouverte de 10 minutes sur la modélisation. La figure 39 illustre un groupe de participants utilisant l'outil développé.



Figure 39 Participants pendant le workshop de sélection des concepts

4.2.4 Résultats

Cette section détaille les résultats numériques issus de l'analyse statistique des données d'évaluation par les experts et par les chercheurs de la seconde phase de la méthode DfSDI. Comme pour l'analyse des résultats de la phase d'exploration présentée dans la sous-section 4.1.4, les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de la ressource Pingouin (Vallat, 2018). Et de la même manière, les boîtes à moustaches présentées sont issues de l'outil Matplotlib graphs (Hunter, 2007). Les résultats des évaluations des experts sont d'abord présentés, puis les données issues des questionnaires « d'utilisabilité ».

a) Résultats de l'évaluation de la solidité scientifique et de l'utilité par les experts en soutenabilité

Avant d'analyser les résultats de l'évaluation par les experts de l'approche proposée, il est nécessaire d'évaluer l'accord interjuges. Étant donné que quatre juges fixes ont tous évalué les mêmes concepts et que les notes sont basées sur la moyenne de ces évaluations, l'ICC (3,k) est calculé pour estimer la concordance entre les évaluateurs. Sa valeur est de 0,94, ce qui correspond à une excellente cohérence puisqu'elle se situe au-dessus de 0,9 (Koo et Li, 2016). La figure 40 présente les évaluations des huit différents critères par les quatre experts sous forme de diagrammes en boîte et en moustache. Pour chaque résultat, ces diagrammes permettent de représenter la médiane, la moyenne, les différents quartiles et les valeurs minimum/maximum.

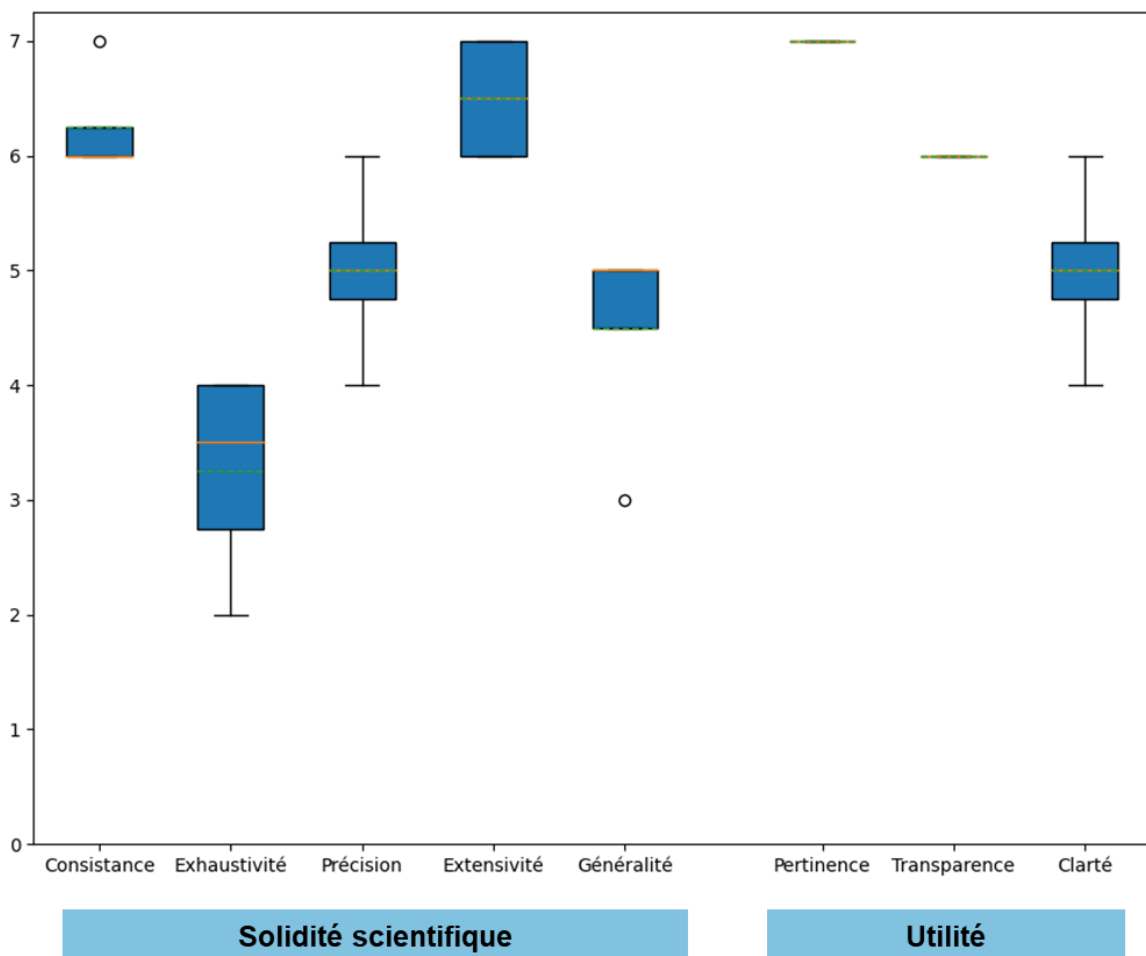


Figure 40 Notes attribuées à la solidité scientifique et à l'utilité de la phase de sélection par les experts

Des moyennes très élevées et d'une faible dispersion des évaluations des experts sont observées pour les quatre critères évaluant la consistance, l'extensivité, la pertinence et la transparence de l'approche proposée. Ces notes semblent ainsi refléter un consensus parmi les experts. Les évaluations de la précision, généralité et clarté dénotent de moyennes correctes et d'une légère dispersion. En revanche le critère d'exhaustivité a une moyenne faible et une légère dispersion.

b) Résultats de l'évaluation de l'utilisabilité par les concepteurs de produits

Pour les questionnaires d'utilisabilité, les données à analyser sont une évaluation qualitative sur des échelles de Likert par les 21 participants à l'expérimentation. Ils ont répondu aux cinq mêmes questions pour évaluer l'utilisabilité perçue de l'outil. Il est donc également nécessaire d'évaluer la cohérence des réponses entre elles avant de pouvoir tirer des conclusions des notes. Étant donné que 21 participants fixes ont tous évalué les mêmes concepts et que les notes sont basées sur la moyenne de ces évaluations, l'ICC (3,k) est calculé pour estimer la concordance entre les évaluateurs. Sa valeur est de 0,77, ce qui correspond à une bonne cohérence puisqu'elle se situe entre 0,75 et 0,9 (Koo et Li, 2016). La figure 41 présente les évaluations des différents critères d'utilisabilité par les 21 concepteurs sous forme de diagrammes en boîte et en moustache.

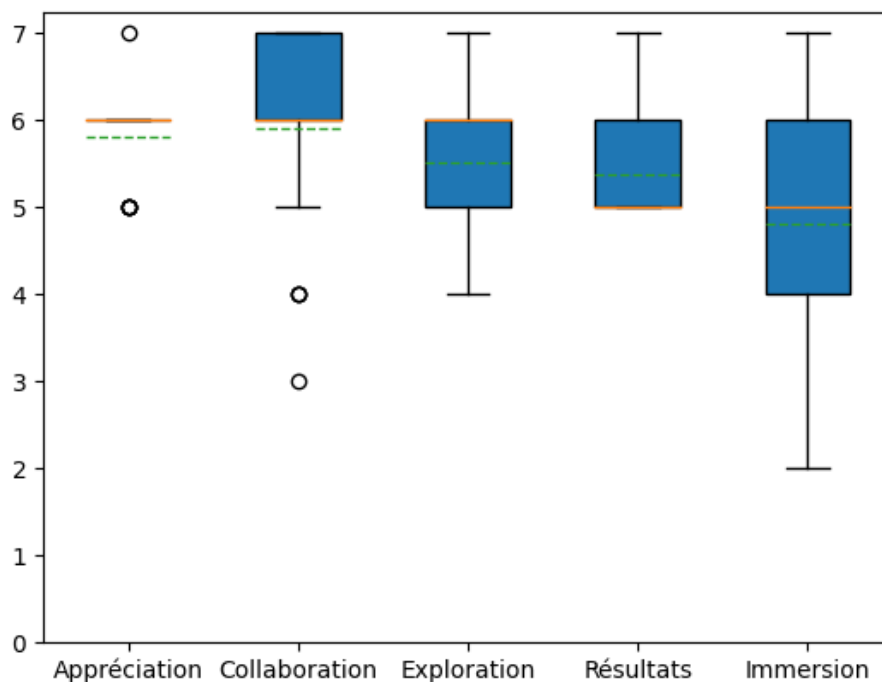


Figure 41 Notes attribuées à l'utilisabilité de la phase de sélection par les participants

Des moyennes élevées et une faible dispersion des évaluations des participants sont observées pour les trois critères évaluant l'appréciation, les résultats, la collaboration. Ces notes semblent ainsi refléter un consensus parmi les participants. Le critère d'exploration a aussi une moyenne élevée mais une plus grande dispersion. En revanche, pour le critère d'immersion, les notes sont plus dispersées et la moyenne correcte. Les avis des participants sont donc plus divergents. Ces résultats rendent plus difficile l'interprétation de l'aspect d'immersion.

4.2.5 Discussions

Cette sous-section analyse l'expérimentation de la seconde partie de la méthode DfSDI au travers de l'interprétation des résultats des évaluations des experts, des questionnaires d'utilisabilité et des échanges ayant eu lieu avec les parties prenantes. Enfin, elle souligne aussi les limites de l'expérimentation.

Tout d'abord les entretiens avec les experts en soutenabilité ont permis d'évaluer la solidité scientifique de l'approche proposée et son utilité. En ce qui concerne la solidité scientifique de l'approche, elle a été appréhendée par les critères de méta-évaluation suivants : consistance, exhaustivité, précision, extensivité et généralité (Cinelli et al., 2014 ; Sala et al., 2015). L'évaluation des experts souligne une très bonne consistance de l'approche proposée. L'ensemble des experts s'est accordé sur la bonne intégration des impacts majeurs liés aux données captées sur les trois piliers de la soutenabilité dans l'approche. En revanche, les faibles évaluations relatives à son exhaustivité indiquent que l'approche ne prend pas suffisamment en compte l'ensemble des phases du cycle de vie du produit. L'ensemble des experts a par exemple relevé l'absence de prise en compte de la phase de fin de vie dans la modélisation proposée. Ils ont également fait remarquer que la phase d'usage du cycle de vie semble prédominante vis-à-vis des autres dans la modélisation. Même si la modélisation n'est pas exhaustive, l'intention a cependant bien été comprise par les experts. En effet, la modélisation repose sur un compromis du fait de sa construction. Elle ne représente que les impacts majeurs des données captées sur la soutenabilité afin de rester suffisamment simple et accessible. Les impacts sur la soutenabilité du produit représentés par le modèle se situent d'après la construction (sous-section 3.3.2) lors de la phase de fabrication et d'usage du produit. Ainsi un expert lors de l'évaluation notait :

« Les points sensibles apparaissent bien mais dans ce cas ils ne sont pas exhaustifs. » Le critère de précision de l'approche a été évalué comme correct par les experts. Cette note s'explique également par la nature accessible et simplifiée intrinsèque à l'approche proposée qui, de surcroît, se base sur une évaluation qualitative pour la soutenabilité. En ce sens un expert notait « on ne peut jamais être cent pour cent précis avec un outil qualitatif » ou un autre « il est impossible de donner la note maximale de précision à une évaluation qualitative ». Ensuite, le critère d'extensivité qui évalue dans quelle mesure l'approche était applicable à l'ensemble des créations de valeurs basées sur les données captées a été très bien noté. Les experts ont unanimement considéré qu'il était suffisamment générique pour couvrir l'ensemble des applications des données captées. Enfin, pour clore l'évaluation de la solidité scientifique de l'outil, le critère de généralité de l'outil était évalué et ses notes sont correctes. L'outil a été construit pour être applicable au domaine des produits intelligents et connectés donc par essence il est difficilement transposable à d'autre domaine. Cependant sa structure a paru néanmoins pertinente, un expert notait : « en changeant certains éléments et certains liens de la modélisation, elle pourrait peut-être être utile dans des domaines voisins aux produits intelligents et connectés ».

En ce qui concerne l'utilité de l'approche, elle a été appréhendée au travers des trois critères suivants : pertinence, transparence et clarté (Cinelli et al., 2014 ; Sala et al., 2015). Les experts ont été unanimes sur la pertinence de la proposition et lui ont tous accordé la note maximale. Ils ont également reconnu la nécessité de prendre en compte les enjeux de soutenabilité au plus tôt dans le processus de conception et également de façon générale dans le domaine numérique. La clarté a été évaluée comme correcte par les experts. Ces notes s'expliquent de la même manière que pour le critère de précision. L'aspect qualitatif de la proposition en raison de ces évaluations subjectives nuit à la clarté de l'outil. Les choix faits lors des évaluations et de la classification dans la phase d'aide à la décision peuvent rendre les résultats « flous » pour des parties prenantes extérieures. Cependant, un expert a pertinemment relevé que « la clarté peut dépendre de l'entreprise et de son effort de documentation lors de la mise en œuvre de l'approche ». Enfin, les experts ont attribué une bonne note au critère de transparence, estimant que l'approche proposée était facile à suivre et à comprendre.

Enfin, concernant l'utilisabilité de l'approche proposée, elle a été évaluée au travers de questionnaires remplis par 21 chercheurs en conception. Ils ont rempli les questionnaires à

l'issue de la mise en œuvre de l'approche dans le cadre de workshop. Pour appréhender l'utilisabilité, les critères suivants ont été évalués : appréciation, résultats, collaboration, exploration et immersion (Cinelli et al., 2014 ; Cherry et Latulipe, 2014). Tout d'abord l'approche semble avoir été largement appréciée par les participants. Il en est de même pour l'exploration et la collaboration permise par l'approche. Le critère de résultats est également bien noté. L'ensemble de ces quatre critères ayant été évalué positivement par les participants dénote d'une bonne utilisabilité de la seconde phase de la méthode DfSDI. Cependant, les notes sont plus dispersées pour le critère d'immersion. En l'absence d'un consensus clair entre les participants, il est plus difficile de tirer des interprétations de ce critère.

Les limites de cette étude résident dans les facteurs qualitatifs inhérents à l'expérimentation et par conséquent à ses résultats. Concernant, l'évaluation par les experts de l'approche de sélection, l'approche choisie des entretiens semi-directifs n'est pas exempte de certaines limitations. Sa structure prédéfinie constitue en effet une limite. Bien que tous les efforts aient été faits pour garantir la bonne compréhension et illustration de l'approche proposée lors de l'entretien, les experts n'ont pas eu l'occasion de la mettre en œuvre. Il en est de même concernant le workshop avec les concepteurs, son déroulement et sa structure prédéfinis constitue une limite. En effet, la mise en œuvre de l'approche de sélection s'est faite sur le cas d'étude du vélo en libre-service. Une expérimentation sur un cas d'étude différent pourrait peut-être conduire à des résultats différents dans les réponses au questionnaire d'utilisabilité.

4.2.6 Conclusion

En conclusion, l'expérimentation de la seconde partie d'exploration de la méthode DfSDI a mis en évidence les résultats suivants. L'évaluation de solidité scientifique de l'outil permet de dresser un profil pour la phase de sélection de la méthode DfSDI. Les experts ont mis en évidence une très bonne consistance et extensivité de l'outil. La précision a semblé bonne aux experts. Cependant son exhaustivité et sa généralité ont été perçues comme faibles par les experts. Ces notes sont inhérentes à la construction de l'approche et à son objectif de proposer des évaluations dès les phases amont. L'approche a par ailleurs été considérée comme très transparente et très pertinente par les experts. De plus, les concepteurs ayant mis en œuvre l'approche de sélection ont évalué positivement son utilisabilité au travers des critères

d'appréciation, de satisfaction avec les résultats, de collaboration et d'exploration. Au regard de l'ensemble des résultats, la seconde phase de sélection de la méthode DfSDI démontre sa pertinence. Ainsi, la seconde sous-hypothèse (1.b) : « La méthode DfSDI permet de structurer la sélection des données captées lors de la conception amont de produits via une exploration systématique de leurs potentiels » est validée.

4.3. Expérimentation du potentiel pédagogique

Parmi les constats identifiés lors de l'étude de la littérature scientifique est apparu celui du manque d'expertise des concepteurs sur les données captées. Plusieurs travaux scientifiques ont avancé que les données allaient devenir essentielles dans le futur de la conception de produits et que par conséquent, elles devraient être intégrées dans les formations des futurs concepteurs. Cette section propose en ce sens des expérimentations pédagogiques pour évaluer le potentiel didactique des outils développés pour guider l'intégration des données captées.

4.3.1 Contexte

Comme explicité dans la sous-section 1.2.2 sur les TIC, les données captées sont issues des capteurs embarqués dans les produits. Ces capteurs appartiennent à la *couche de détection*, l'une des quatre couches essentielles de l'architecture de l'Internet des objets (IoT) (Chen et Jin, 2012). Ainsi, les cadres d'enseignement de l'IoT requièrent une formation sur les capteurs embarqués (Raikar et al., 2018). Abichandani et al. (2022) ont réalisé une revue de la littérature sur l'enseignement de l'IoT. Il apparaît que les approches pédagogiques relatives aux capteurs embarqués reposent principalement sur le prototypage de solutions IoT. Des cartes électroniques open source et à faible coût sont communément utilisées à cet effet, notamment les cartes Arduino ou Raspberry Pi (El-Abd, 2017). Il s'agit en effet de moyens techniques simples et accessibles pour enseigner la rétroaction associée à la mesure de données captées renseignant sur le produit, son environnement et son utilisateur (Teikari et al., 2012).

En ce sens, les approches pédagogiques usuelles relatives aux données captées enseignent les aspects techniques et fonctionnels des capteurs embarqués. Cependant, elles ne traitent pas des créations de valeurs potentielles ni des impacts induits au niveau économique, environnemental

et social de ces technologies. Or, d'après la synthèse de l'état de l'art, il s'agit de défis pourtant primordiaux à l'intégration des données captées. Il semble nécessaire d'aborder ces aspects auprès des futurs concepteurs de produits. L'objectif des expérimentations pédagogiques est donc de proposer et tester de nouvelles approches didactiques pour compléter l'enseignement traditionnel sur la conception intégrant les technologies de l'IoT.

Pour répondre aux manques pédagogiques mentionnés, les approches pédagogiques proposées seront basées sur les deux outils développés pour soutenir la méthode DfSDI. L'objectif étant d'évaluer distinctement les apports de chacun des outils auprès d'étudiants en science de la conception. Afin d'être efficace et engageante pour les étudiants, les approches pédagogiques proposées s'appuient sur les normes éducatives prescrites par le cadre *Conceive Design Implement Operate* (CDIO) (Malmqvist et al., 2020a). Ainsi, une approche d'apprentissage actif est choisie comme approche pédagogique. Elle permet l'acquisition de connaissances par la simulation de la pratique professionnelle de la conception. En outre, elle permet également aux étudiants de développer des compétences personnelles au travers du travail en groupe. Par ailleurs, les étudiants participants aborderont des études de cas réelles afin de développer également des compétences professionnelles utiles et avancées (Tovey, 2015).

Le premier outil est une représentation des capacités de détection des capteurs embarqués pour soutenir des réflexions créatives. Les étudiants formeront des groupes de travail et utiliseront l'outil pour générer des créations de valeurs répondant à un cas d'étude industriel réel. L'objectif pédagogique attendu est une amélioration des connaissances sur les usages des données captées dans la conception de produits.

Le second outil est un modèle commun pour représenter les impacts environnementaux, économiques et sociétaux de créations de valeurs basées sur les données captées. De la même manière, les étudiants formeront des groupes de travail et utiliseront l'outil pour évaluer différentes créations de valeurs issues d'un cas d'étude industriel réel. L'objectif pédagogique attendu est une amélioration des connaissances sur l'évaluation des piliers de la soutenabilité liées aux données captées. On peut d'ailleurs noter que le cadre éducatif du CDIO (Malmqvist et al., 2020b) recommande d'intégrer la notion de soutenabilité dans l'enseignement de la conception.

4.3.2 Protocole expérimental

L'objectif des expérimentations pédagogiques est de mesurer un potentiel accroissement des connaissances des étudiants participants. Ainsi, pour évaluer les connaissances acquises au travers de l'utilisation des outils développés, des questionnaires basés sur la taxonomie de Bloom des connaissances ont été développés (Krathwohl, 2002). Pour un domaine donné, cette taxonomie classe les connaissances sur une échelle de compétences de réflexion. Les six niveaux distincts de compétences de réflexion sont, du plus faible au plus élevé : se souvenir, comprendre, appliquer, analyser, évaluer et créer. Plus les compétences de réflexion maîtrisées sont d'un niveau élevé, plus les connaissances du sujet sont importantes. Deux questionnaires d'évaluation des connaissances, un par outil proposé, sont développés. Leur structure est similaire, ils se différencient par les formulations des questions posées. Les deux questionnaires comportent six questions basées sur les six compétences de réflexion pour évaluer les connaissances apportées par l'utilisation des outils. Ainsi, chacune des questions posées est une autoévaluation d'une catégorie de compétences de réflexion. L'évaluation est basée sur une échelle de Likert de 1 à 7, où 1 signifie que la compétence de réflexion n'est pas du tout maîtrisée, 4 que la compétence est partiellement maîtrisée et 7 que la compétence de réflexion est maîtrisée. L'évaluation des six questions de l'enquête permet de mesurer les connaissances d'un étudiant soit sur les usages des données captées, soit sur la soutenabilité des données captées, en fonction du questionnaire. Les figures 42 et 43 présentent les questions d'autoévaluation des connaissances basées sur la taxonomie des connaissances de Bloom accompagnant respectivement les deux approches pédagogiques.

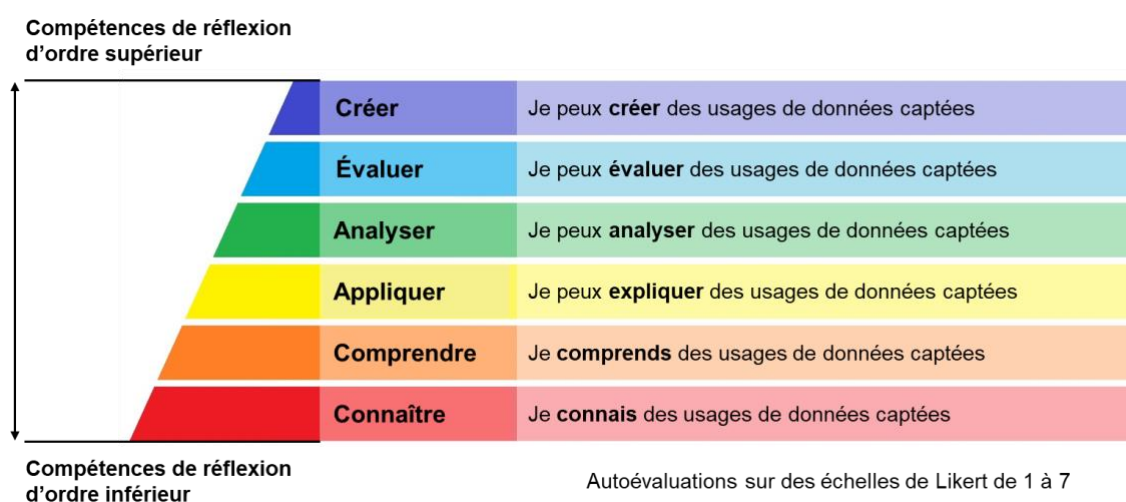


Figure 42 Évaluation des connaissances sur les usages des données captées basée sur la taxonomie de Bloom

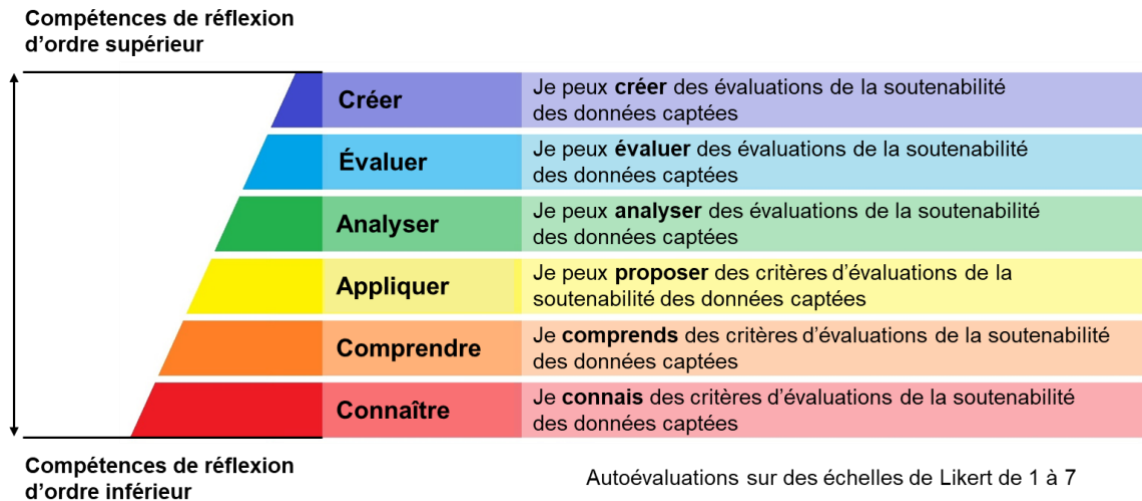


Figure 43 Évaluation des connaissances sur la soutenabilité des données captées basée sur la taxonomie de Bloom

Le déroulement des expérimentations diffère cependant entre les deux approches pédagogiques proposées.

a) Protocole de l'approche d'exploration

L'outil d'exploration soutient une phase de créativité, l'approche pédagogique proposée est donc une simulation de session de créativité sur un cas d'étude réel. L'outil est introduit au cours de la session sous la même forme que lors de l'expérimentation industrielle (sous-section 4.1.3), c'est-à-dire sous forme de carte. Tous les groupes d'étudiants ont suivi le processus illustré figure 44.

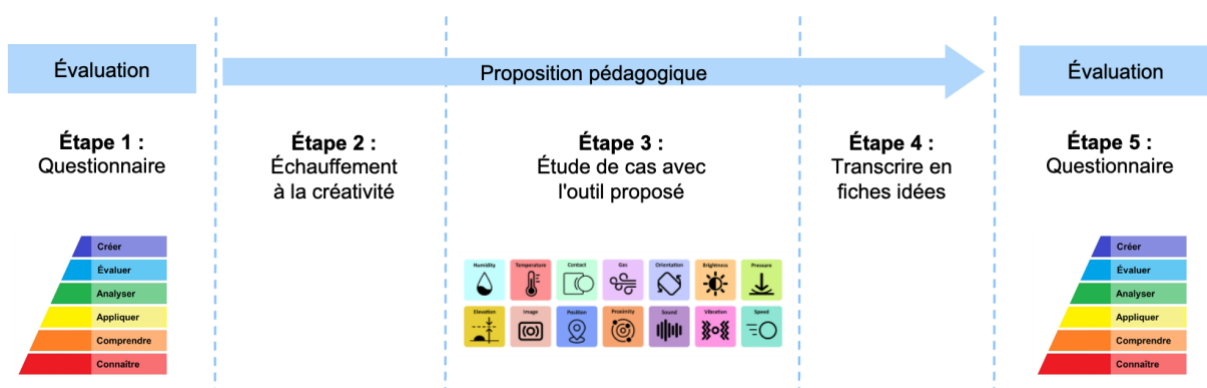


Figure 44 Protocole d'expérimentation de l'approche pédagogique d'exploration

- Étape 1 : Chaque étudiant du groupe remplit individuellement le questionnaire d'évaluation des connaissances sur les usages des données captées.
- Étape 2 : Les étudiants commencent la séance de créativité en effectuant une purge (Van Gundy, 2005) en rapport avec le cas d'étude traité. Les étudiants participants sont invités à écrire les idées qu'ils ont sur le sujet sur des post-it de manière indépendante et silencieuse pendant un court laps de temps. Cette approche sert d'échauffement à la créativité et permet d'écarter les idées conventionnelles. Lorsque le temps imparti est écoulé, les étudiants d'un même groupe sont invités à partager entre eux ces premières idées.
- Étape 3 : L'outil d'exploration est ensuite présenté aux étudiants. Il est présenté comme une représentation des principales capacités de détection des capteurs actuels sous forme de cartes. En utilisant les cartes comme support de brainstorming, les étudiants sont invités, durant le temps imparti, à générer collectivement des concepts intégrant les données captées pour répondre au besoin du cas d'étude abordé.
- Étape 4 : Les étudiants sont ensuite invités à synthétiser leurs concepts les plus intéressants dans des fiches idées. Il s'agit d'une fiche standard comportant plusieurs cases de tailles différentes à remplir : une case pour le nom de la solution, une autre pour un croquis et/ou une explication écrite de la solution et, enfin, des cases pour les avantages et les inconvénients.
- Étape 5 : Enfin, chaque élève du groupe répond de nouveau individuellement au questionnaire d'évaluation des connaissances.

b) Protocole de l'approche d'évaluation

L'outil de sélection soutient une phase d'aide à la décision, l'approche pédagogique proposée est donc une simulation de phase d'aide à la décision sur un cas d'étude réel. Tous les groupes d'étudiants ont suivi le processus illustré figure 45.

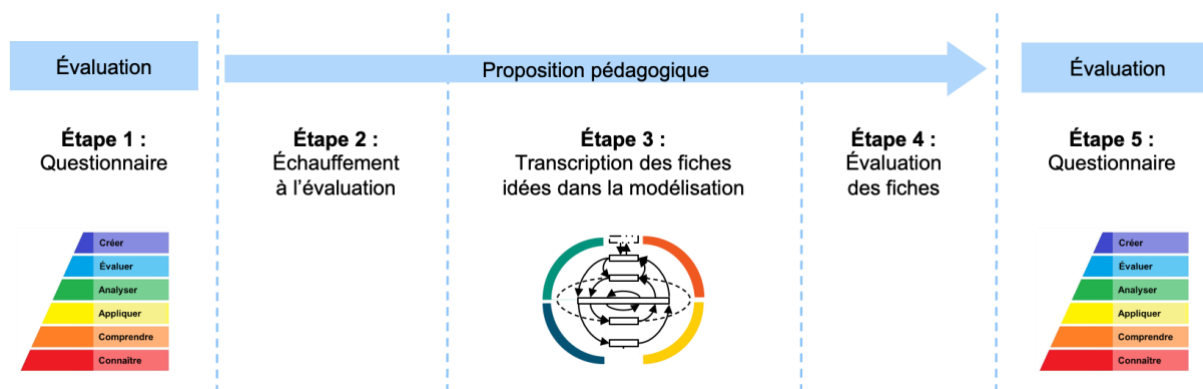


Figure 45 Protocole d'expérimentation de l'approche pédagogique de sélection

- **Étape 1 :** Chaque étudiant du groupe remplit individuellement le questionnaire d'évaluation des connaissances sur l'évaluation de la soutenabilité des données captées.
- **Étape 2 :** Les étudiants commencent la séance de créativité en effectuant deux courts brainstormings successifs (Grossman, 1984). Lors du premier, les étudiants proposent collectivement des éléments physiques et numériques nécessaires à la création de valeurs basées sur les données captées. Ensuite lors du second, ils proposent des impacts de ces éléments sur les trois piliers de la soutenabilité. Cette étape fait office d'échauffement pour le travail collectif. Il introduit également les enjeux et le cadre des évaluations à venir aux étudiants.
- **Étape 3 :** L'outil de modélisation est alors présenté théoriquement et son usage est illustré au travers d'un cas d'étude. Ensuite les différentes fiches idées à évaluer et sélectionner sont présentées aux étudiants. Elles sont présentées sous forme de fiche standardisée décrivant une création de valeurs basée sur l'usage des données captées. Elle comporte plusieurs cases spécifiant : le nom de la création de valeurs, une explication écrite et schématisée de celle-ci et ses avantages et les inconvénients. Les étudiants sont alors invités à transcrire collectivement chacune des fiches idées proposées dans la modélisation fournie.
- **Étape 4 :** Ensuite, à l'aide de leurs modélisations, les étudiants sont invités à évaluer les contributions positives et négatives sur les piliers économique, environnemental et social ainsi que les bénéfices selon ces mêmes trois piliers pour chacune des modélisations. Après s'être accordés sur les pondérations des trois piliers de la soutenabilité, ils calculent une note unique de contributions positives et de contributions

négligentes globales. Les notes des différents concepts étudiés sont alors comparées et les étudiants sélectionnent la création de valeurs à développer.

- Étape 5 : Chaque élève du groupe répond de nouveau individuellement au questionnaire d'évaluation des connaissances.

4.3.3 Déroulement

Pour s'assurer de la pertinence de l'évaluation des approches pédagogiques, il était nécessaire de les tester auprès de futurs concepteurs, dans ce cas des étudiants en conception. Une expérience a donc été menée auprès d'étudiants en master 2 de conception de produits au sein de l'ENSAM. Les deux approches pédagogiques se sont déroulées différemment et sont donc présentées indépendamment.

a) Déroulement de l'approche d'exploration

Au total, 30 étudiants ont participé à l'expérimentation de l'approche d'exploration, 10 femmes et 20 hommes, parmi lesquels 23 avaient une formation d'ingénieur, 5 une formation de designer et 2 une formation d'ergonome. Pour l'expérimentation, les étudiants ont été divisés en groupes de 4 ou 5 avec un designer ou un ergonome dans chaque groupe de travail afin d'introduire de la pluridisciplinarité. Les étudiants, du fait de leur spécialisation en conception de produits, sont familiers des séances de créativité, de leur processus et de leurs modalités.

L'étude de cas de la session de créativité portait sur un système de vélos urbains partagés et connectés. L'objectif était de générer des concepts de création de valeurs basée sur l'exploitation de données captées par les vélos afin d'améliorer l'expérience des utilisateurs de ce système. L'expérimentation s'est déroulée dans une salle de classe, un environnement familier aux étudiants et associé à l'apprentissage. En ce qui concerne le matériel, les étudiants ont reçu des stylos, des marqueurs, des post-it, de grands tableaux blancs et des fiches idées vierges.

Deux sessions différentes ont eu lieu avec respectivement 21 étudiants (5 groupes distincts) dans la première et 9 étudiants (2 groupes distincts) dans la seconde. Les deux sessions ont duré

1 heure et 45 minutes, dont 20 minutes pour les étapes 1 et 2, 1 heure pour l'étape 3 et 25 minutes pour les étapes 4 et 5. La figure 46 illustre l'organisation d'un groupe d'étudiant pendant l'expérimentation.



Figure 46 Table de travail d'un groupe d'étudiants pendant l'expérimentation pédagogique d'exploration

b) Déroulement de l'approche d'évaluation

Au total, 30 étudiants ont participé à l'expérimentation de l'approche d'évaluation, 9 femmes et 21 hommes, parmi lesquels 22 avaient une formation d'ingénieur, 8 une formation de designer. Pour l'expérimentation, les étudiants ont été divisés en groupes de 4 ou 5 avec au moins un designer dans chaque groupe de travail afin d'introduire de la pluridisciplinarité. Les étudiants, du fait de leur spécialisation en conception de produits, sont familiers avec l'évaluation des fiches idées, son processus et de ses modalités.

L'étude de cas de la session d'évaluation portait sur un système de vélos urbains partagés et connectés. L'objectif était de choisir parmi quatre concepts proposés de création de valeurs basée sur l'exploitation de données captées par les vélos afin d'améliorer le produit ou ses services. Il s'agit des mêmes fiches idées issues d'un cas d'étude réel que lors de l'expérimentation de la phase de sélection. L'expérimentation s'est déroulée dans une salle de classe, un environnement familier aux étudiants et associé à l'apprentissage. En ce qui concerne le matériel, les étudiants ont reçu des stylos, des marqueurs, des post-it, de grands tableaux

blancs, les mêmes quatre fiches idées illustrées (annexe 2) et les mêmes feuilles avec le modèle vierge (annexe 3) que dans la sous-section 4.2.3. Pour rappel, ces feuilles contenaient la proposition de modélisation vierge avec les espaces à remplir suggérés. Elles incluaient également, en dessous de la modélisation, des espaces vierges à compléter pour l'évaluer les contributions positives et négatives sur les trois piliers de la soutenabilité.

Deux sessions différentes ont eu lieu avec respectivement 9 étudiants (2 groupes distincts) dans la première et 21 étudiants (5 groupes distincts) dans la seconde. Les deux sessions ont duré 1 heure et 45 minutes, dont 20 minutes pour les étapes 1 et 2, 85 minutes pour les étapes 3 et 4, 5 minutes pour l'étape 5. La figure 47 illustre les réflexions d'un groupe d'étudiant pendant l'expérimentation.

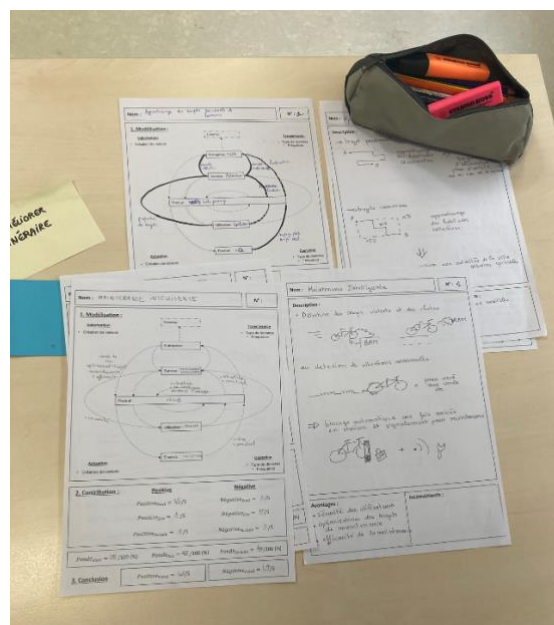


Figure 47 Table de travail d'un groupe d'étudiants pendant l'expérimentation pédagogique de sélection

4.3.4 Résultats

Pour chacune des approches pédagogiques expérimentées, les étudiants participants ont répondu deux fois au même questionnaire, avant et après l'utilisation de l'outil associé. Cette sous-section détaille les résultats numériques issus de l'analyse des questionnaires pour les deux approches expérimentées. Les analyses statistiques des données ont aussi été réalisées à l'aide

de Pingouin (Vallat, 2018) et les représentations graphiques sous forme de boîtes à moustaches à l'aide de la ressource Matplotlib Graphics pour Python (Hunter, 2007).

Pour les questionnaires de connaissance, les données à analyser sont une évaluation qualitative sur des échelles de Likert par les 30 étudiants ayant suivi l'approche basée sur l'outil d'exploration et les 30 étudiants ayant suivi l'approche basée sur l'outil de sélection. Ils ont répondu aux six mêmes questions avant et après les approches pédagogiques respectives. Il est nécessaire d'évaluer la cohérence des réponses entre elles avant de pouvoir tirer des conclusions des notes. Étant donné, que dans les deux expérimentations, les mêmes étudiants ont tous évalué les mêmes critères et que les notes sont basées sur la moyenne de ces évaluations, l'ICC (3,k) est calculé pour estimer la concordance entre les évaluateurs avant et après les approches. Sa valeur est de 0,92 avant et 0,93 après pour l'approche d'exploration ce qui correspond dans les deux cas à une excellente cohérence d'après Koo et Li (2016). Sa valeur est de 0,78 avant et 0,72 après pour l'approche de sélection, ce qui correspond respectivement à une bonne cohérence et une cohérence modérée d'après Koo et Li (2016).

Un test de distribution d'Anderson-Darling (Anderson et Darling, 1952) a confirmé que les données ne suivaient pas une distribution normale pour l'ensemble des réponses aux questions, avant et après l'utilisation de l'outil. Comme il s'agit de réponses avant-après, les échantillons sont appariés, les tests statistiques réalisés sont des tests des rangs signés de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945), homologues non paramétriques des t-test appariés de Student. Ils permettent d'évaluer l'hypothèse nulle suivante : pas de différence de connaissance après l'utilisation de l'outil.

Les résultats spécifiques aux deux approches sont présentés indépendamment.

a) Résultats de l'approche d'exploration

La figure 48 présente les données de l'expérience sous forme de boîtes à moustaches. Pour chaque résultat, ces diagrammes permettent de représenter la médiane, la moyenne, les différents quartiles et les valeurs minimum/maximum. Les résultats numériques des tests statistiques de Wilcoxon sont présentés dans le tableau 17.

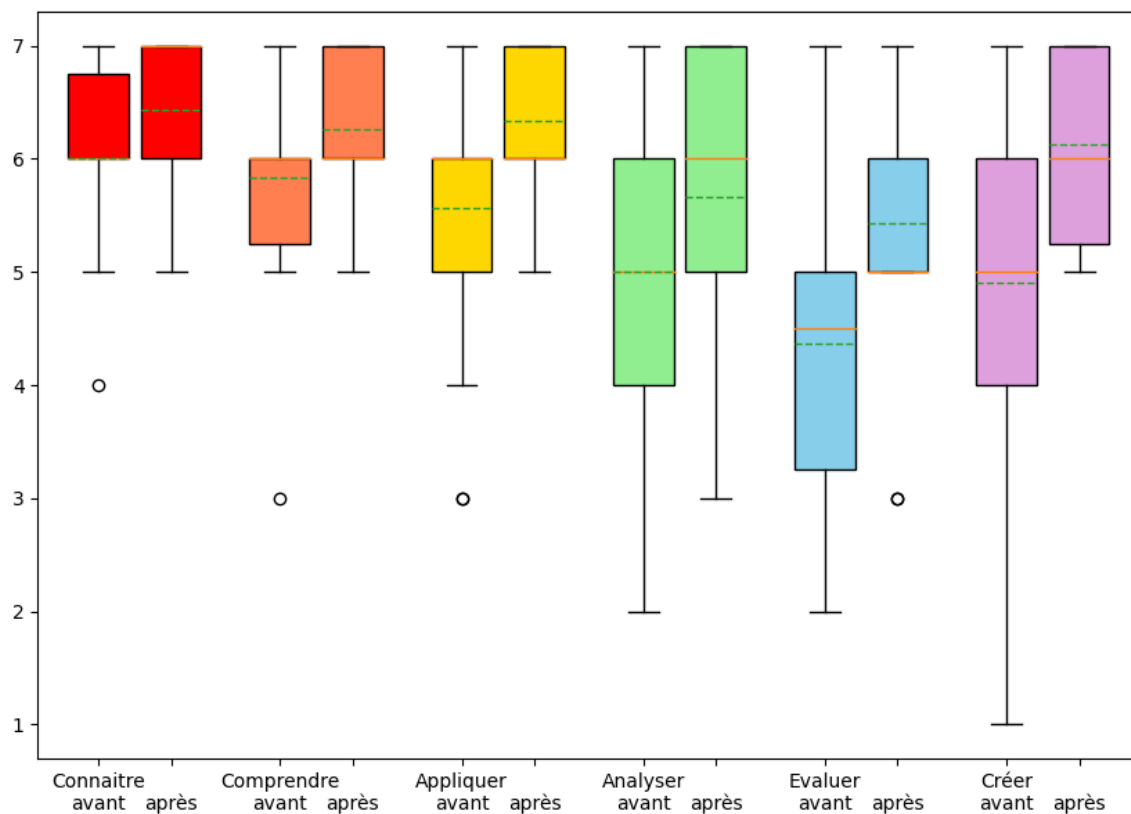


Figure 48 Résultats témoignant de l'évolution de chacune des compétences de réflexion avant et après la mise en place du protocole pédagogique d'exploration

Tableau 17 Résultats des tests statistiques de l'expérimentation de l'approche d'exploration

Compétences de réflexion	Moyennes		Différence de Moyennes (%)	p
	Avant	Après		
Connaître	Avant	6	7	0,0021
	Après	6,43		
Comprendre	Avant	5,83	8	0,0102
	Après	6,27		
Appliquer	Avant	5,27	14	0,0007
	Après	6,33		
Analyser	Avant	5	13	0,0107
	Après	5,67		
Évaluer	Avant	4,37	24	p<0,0001
	Après	5,43		
Créer	Avant	4,9	25	0,0007
	Après	6,13		

La valeur p pour chaque compétence de réflexion étant inférieure à 0,05, l'hypothèse nulle peut être rejetée et les groupes observés avant et après peuvent être considérés comme significativement différents. Pour chaque compétence de réflexion telle que définie par Bloom,

une moyenne plus élevée est observée dans les réponses au questionnaire après l'utilisation de l'outil. De plus, l'augmentation entre les moyennes avant et après l'utilisation de l'outil est importante pour les compétences d'ordre les plus élevées. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'approche pédagogique basée sur l'outil d'exploration a permis aux étudiants de développer leurs connaissances sur les usages des données captées.

b) Résultats de l'approche de sélection

La figure 49 présente les données de l'expérience sous forme de boîtes à moustaches. Les résultats numériques des tests statistiques de Wilcoxon sont présentés dans le tableau 18.

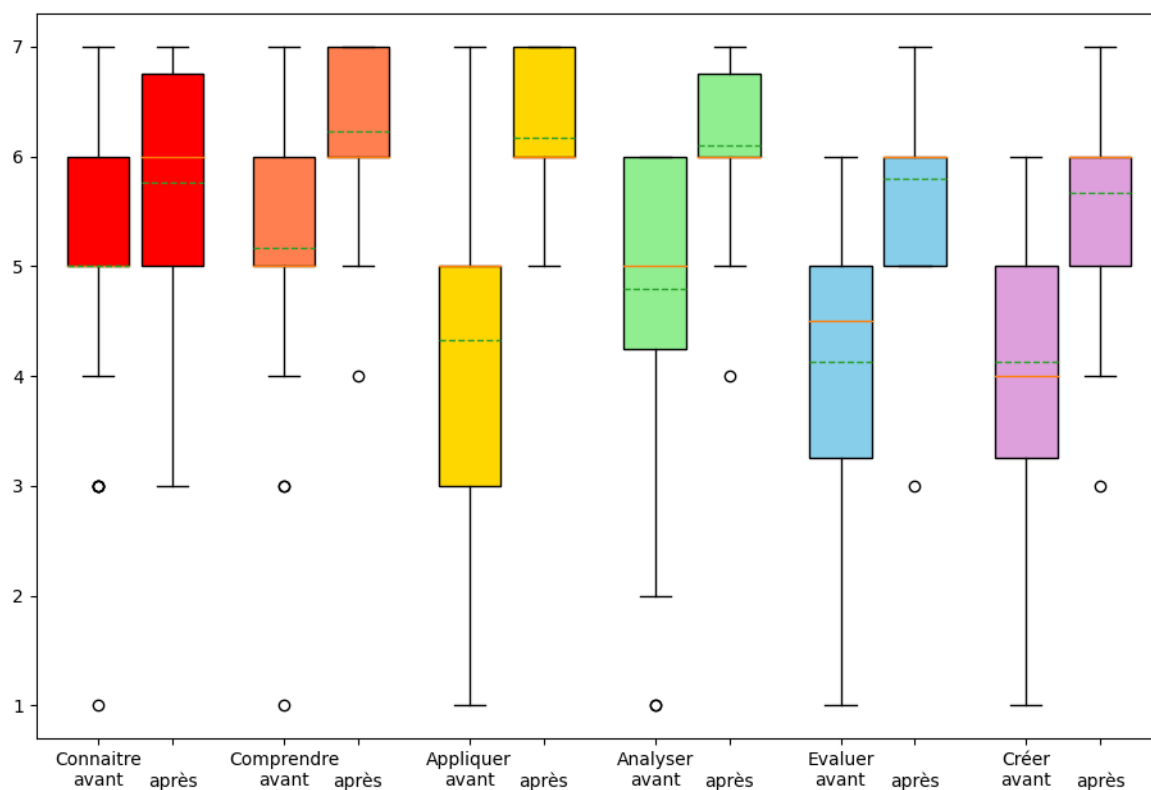


Figure 49 Résultats témoignant de l'évolution de chacune des compétences de réflexion avant et après la mise en place du protocole pédagogique de sélection

Tableau 18 Résultats des tests statistiques de l'expérimentation de l'approche de sélection

Compétences de réflexion	Moyennes	Différence de Moyennes (%)	p	
Connaître	Avant	5	15	0.0481
	Après	5.77		
Comprendre	Avant	5.17	21	0.0015
	Après	6.23		
Appliquer	Avant	4.33	42	0.0001
	Après	6.17		
Analyser	Avant	4.80	27	0.0007
	Après	5.80		
Évaluer	Avant	4.13	40	0.0001
	Après	5.80		
Créer	Avant	4.13	37	0.0001
	Après	5.67		

La valeur p pour chaque compétence de réflexion étant inférieure à 0,05, l'hypothèse nulle peut être rejetée et les groupes observés avant et après peuvent être considérés comme significativement différents. Pour chaque compétence de réflexion telle que définie par Bloom, une moyenne plus élevée est observée dans les réponses au questionnaire après l'utilisation de l'outil. De plus, l'augmentation entre les moyennes avant et après l'utilisation de l'outil est importante pour l'ensemble des compétences. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'approche pédagogique basée sur l'outil de sélection a permis aux étudiants de développer leurs connaissances sur les évaluations de soutenabilité des données captées.

4.3.5 Discussions

Cette sous-section présente l'interprétation des résultats numériques des deux expérimentations pédagogiques. On s'intéresse aux différences des moyennes entre avant et après les approches expérimentées pour chacune des compétences de réflexions afin d'analyser l'évolution des connaissances des étudiants. Les résultats des expériences sont présentés indépendamment.

a) Discussions sur l'approche d'exploration

Plusieurs observations peuvent être tirées des résultats numériques de l'expérimentation de l'approche pédagogique basée sur l'outil d'exploration. Tout d'abord, en ce qui concerne les trois premières compétences d'ordre inférieur : « connaître », « comprendre » et « appliquer ».

L'augmentation des moyennes entre avant et après l'approche pédagogique pour ces compétences est faible. En outre, les moyennes avant l'utilisation de l'outil étaient élevées, ce qui montre que les étudiants étaient déjà familiarisés avec les capteurs embarqués. La grande majorité d'entre eux sont en effet des étudiants en ingénierie avec une formation très similaire puisqu'ils sont issus de la même école d'ingénieurs. Il est probable qu'ils aient été confrontés à des capteurs embarqués au cours de leurs formations universitaires ou de leurs expériences personnelles. Il y a une plus grande dispersion et des moyennes plus basses pour les trois compétences de raisonnement les plus avancées avant l'expérience : « analyser », « évaluer » et « créer ». L'augmentation considérable des moyennes après l'utilisation de l'outil pour les compétences « évaluer » et « créer » dénote du succès de l'approche proposée, car elle contribue à la maîtrise de compétences de raisonnement d'ordre supérieur. L'augmentation de la compétence de réflexion « créer » peut s'expliquer par l'approche créative adoptée par la pédagogie. Les élèves ont en effet proposé de nombreuses solutions en créant leurs propres scénarios de conception avec des capteurs intégrés. Quant à l'augmentation des compétences de réflexion « analyser » et « évaluer », elle peut s'expliquer par l'approche collaborative de la pédagogie. Les étudiants ont activement interagi en groupes autour de leurs idées, ce qui leur a permis de les analyser et de les évaluer naturellement.

b) Discussions sur l'approche d'évaluation

Plusieurs observations peuvent être tirées des résultats numériques de l'expérimentation l'approche pédagogique basée sur l'outil de sélection. Les notes plus élevées pour les compétences de réflexions d'ordre inférieur « connaître » et « comprendre » ainsi que la plus faible dispersion des réponses en comparaison aux autres capacités indiquent que ces compétences étaient déjà préalablement maîtrisées par la plupart des étudiants participants. Il est probable qu'ils aient assimilé des connaissances connexes à la soutenabilité appliquée aux données captées dans leurs cursus de formation ou au cours de leurs expériences personnelles. La soutenabilité est en effet un enjeu émergent majeur et omniprésent dans nos sociétés. L'augmentation observée des moyennes pour les compétences « connaître » et « comprendre » peut-être alors interprétée comme une fortification de ces connaissances. Les quatre compétences de réflexions d'ordre supérieur « appliquer », « analyser », « évaluer » et « créer » montrent à l'inverse d'importantes dispersions des notes ainsi que des moyennes plus faibles avant l'approche témoignant d'une moins bonne maîtrise par les étudiants. Ce résultat confirme

le manque de formation relatif à la soutenabilité et aux produits intelligents et connectés dans le cursus de formation actuel. Les fortes augmentations des moyennes pour les compétences de réflexions d'ordre supérieur après l'approche de sélection dénotent de son succès didactique et donc de son intérêt pédagogique. Les plus fortes augmentations de moyenne concernent spécifiquement les compétences « appliquer », « évaluer » et « créer ». Pour la compétence « appliquer », l'interprétation est simple. En effet, l'approche de sélection proposée aux étudiants est basée sur l'application de critères de soutenabilité sur différentes fiches idées. Pour les compétences « évaluer » et « créer », on peut estimer que l'apprentissage actif proposé a permis aux étudiants participants de comprendre et s'approprier les évaluations de soutenabilité au travers de la mise en œuvre de l'outil et de l'approche de sélection. Ils se sentent alors plus capables d'« analyser », « évaluer » et « créer » les évaluations de soutenabilité appliquée aux données captées.

Néanmoins, il faut noter que les deux expérimentations pédagogiques proposées partagent des limitations communes. Elles sont relatives aux facteurs qualitatifs des expérimentations et de l'interprétation de ses résultats. Tout d'abord concernant l'approche choisie pour évaluer les connaissances, elle se base sur la taxonomie de Bloom et sur l'autoévaluation. Une approche d'évaluation des compétences des étudiants différentes pourrait apporter des résultats différents. De plus l'acquisition de connaissance a été vérifiée juste après l'utilisation des outils. Il faudrait également vérifier l'acquisition de connaissances à long terme chez les étudiants qui ont suivi l'approche. Pour cela, il faudrait contacter à nouveau les étudiants quelques mois plus tard et leur faire remplir un nouvelle fois le questionnaire. Ensuite, une limite concernant les participants est que la majorité des étudiants en master 2 de conception de produits, étaient principalement des étudiants issus de la même école d'ingénieurs. Ils sont potentiellement plus familiers avec les solutions connectées embarquées grâce à leur formation. Une expérience avec une autre population d'étudiants ayant une formation universitaire différente pourrait produire des résultats différents.

4.3.6 Conclusion

En conclusion, les expérimentations respectives des deux outils développés dans un cadre pédagogique pour soutenir la méthode DfSDI ont permis de démontrer leurs intérêts

didactiques. D'une part, l'apport éducationnel d'une approche basée sur l'outil d'exploration dans l'apprentissage des usages de données captées a été expérimenté. D'autre part, l'apport éducationnel d'une approche basée sur l'outil de sélection dans l'apprentissage de la soutenabilité des données captées a été expérimenté. En se basant sur la taxonomie de Bloom, l'évolution perçue par les étudiants des différentes compétences de réflexions a été évaluée pour chacune des deux approches. Les étudiants participants, élèves en master 2 de conception de produits, ont montré un fort accroissement des compétences de réflexions d'ordre supérieur grâce à la mise en œuvre de ces deux approches. En ce sens, les propositions pédagogiques basées sur les outils, en plus de répondre à certains manques dans les cursus pédagogiques sur les produits intelligents et connectés, ont démontré un intérêt didactique.

4.4. Conclusion sur les expérimentations

Le quatrième chapitre présente la mise en œuvre et les résultats des expérimentations relatives à la proposition méthodologique outillée de ces travaux de thèse. La première section décrit l'expérimentation de la première partie de la méthode DfSDI. L'approche d'exploration systématique des créations de valeurs (*hypothèse 1.a*) a été mise en œuvre auprès d'industriels concevant des produits intelligents et connectés. Les résultats obtenus ont permis de valider l'*hypothèse 1.a*. La seconde section décrit l'expérimentation de la seconde partie de la méthode. L'approche systématique de sélection des créations de valeurs (*hypothèse 1.b*) a d'abord été évaluée par des experts en soutenabilité. Puis elle a ensuite été mise en œuvre auprès de chercheurs en conception de produits. Les résultats obtenus ont permis de valider l'*hypothèse 1.b*. La troisième section présente l'expérimentation des potentiels pédagogiques des deux outils dédiés à la méthode proposée. Ils ont été respectivement intégrés dans deux approches didactiques mises en œuvre auprès d'étudiants en master de conception de produits. Les résultats ont validé l'intérêt pédagogique des approches proposées.

CHAPITRE 5 : APPORTS ET LIMITES

Le cinquième chapitre synthétise les contributions de ces travaux de thèse sous différentes perspectives et propose également une réflexion sur leurs limites. La section 5.1 expose les apports et limites d'un point de vue d'investigations, la section 5.2 d'un point de vue méthodologique et enfin la section 5.3 d'un point de vue pédagogique. Enfin la section 5.4 conclut le chapitre en résumant les éléments clefs abordés. Le tableau 19 présente les apports abordés et la figure 50 illustre le plan du chapitre.

Tableau 19 Apports abordés dans le chapitre « Apports et limites »

Apports	
Investigations (5.1)	Identification, formalisation et synthèse des enjeux relatifs à l'intégration des données captées dans la conception de produits combinant des perspectives scientifiques et industrielles
Méthodologiques (5.2)	Proposition et expérimentation de la méthode outillée <i>Design for Sensor Data Integration</i> structurant le processus de conception amont intégrant les données captées via deux phases successives
	La phase d'exploration et son outil générique dédié représentant les capacités de détection des capteurs pour soutenir l'idéation de créations de valeurs basées sur les données captées
	La phase de sélection et son outil générique dédié modélisant les créations de valeurs basées sur les données captées pour permettre l'évaluation comparative de leur soutenabilité et soutenir l'aide à la décision
Pédagogiques (5.3)	Proposition et expérimentation de deux approches pédagogiques soutenues respectivement par les outils dédiés pour développer les connaissances relatives aux données captées de concepteurs novices

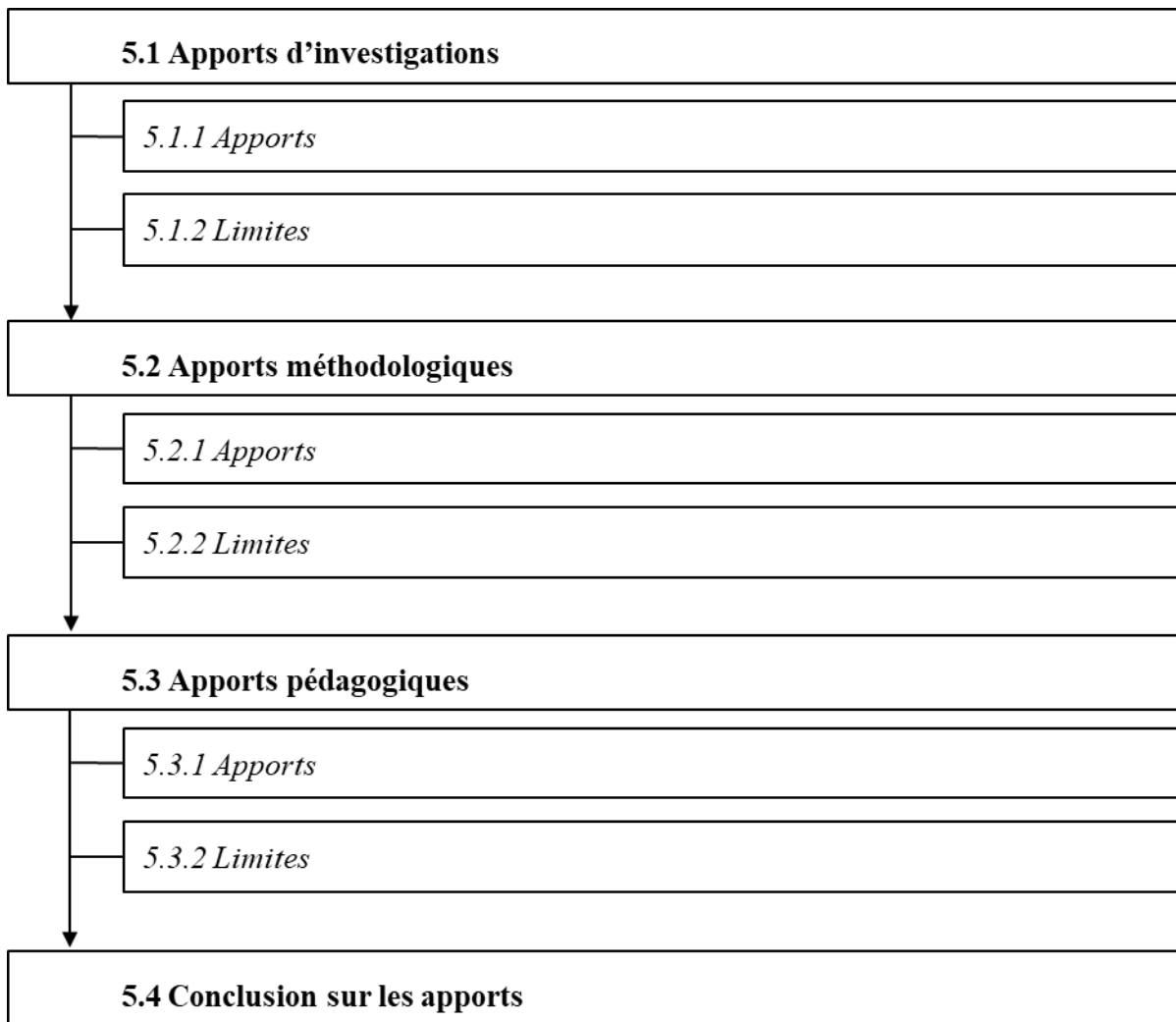


Figure 50 Plan du chapitre « Apports et limites »

5.1. Apports d'investigations

5.1.1 Apports

L'investigation des enjeux liés à l'intégration des données captées dans la conception de produits constitue le premier apport de ces travaux de thèse. Afin de proposer une réponse pertinente à la question de recherche, il était nécessaire d'explorer les enjeux liés aux données captées et à la conception de produits. Il est apparu que peu de travaux se concentraient spécifiquement sur les enjeux de l'intégration des données captées dans la conception des produits physiques. À cet égard, le travail de recherche mené a permis dans un premier temps de rassembler les enjeux de la littérature scientifique liés aux données captées et à la conception. Ensuite, en raison de la nouveauté du sujet, une étude exploratoire pour compléter ces enjeux a été menée. Elle a adopté une perspective double, explorant à la fois les perspectives académiques et industrielles. Ces perspectives ont été explorées respectivement au cours d'un workshop lors d'une conférence internationale et d'une campagne d'entretiens. Enfin, une synthèse mettant en évidence les principaux enjeux identifiés a été proposée.

En résumé, le premier enjeu majeur identifié était l'absence de structure pour encadrer la conception de produits intégrant les données captées. Il ne semble pas exister d'approche générique et systématique ou d'outils dédiés permettant d'intégrer dans les produits des créations de valeurs basées sur l'exploitation des données captées. L'intégration des données captées dans la conception semble réalisée par les concepteurs de façon heuristique et au cas par cas. Un deuxième enjeu important mis en évidence au travers de l'investigation était le manque de cas d'usage. Bien qu'ils soient des cas particuliers, ils contribuent à illustrer les opportunités et les limites des données captées de façon empirique. Ils forment ainsi un élément introductif à l'intégration des données captées dans la conception des produits physiques et sont donc essentiels dans le développement du domaine. Un troisième enjeu majeur est l'évaluation des impacts des créations de valeurs basées sur les données captées selon les trois piliers de la soutenabilité. Les coûts économiques induits par la mise en œuvre des solutions techniques nécessaires à l'exploitation des données captées sont importants tandis que les retours sur investissement apparaissent flous. De la même manière, les contributions environnementales négatives relatives aux technologies impliquées semblent importantes et les contributions positives dépendantes des applications. Enfin, sur le pilier social, les données captées peuvent

potentiellement présenter des risques éthiques notamment au travers de la collecte et interprétation de données sensibles. Un dernier enjeu majeur à l'intégration des données captées identifié était le manque d'expertise relatif aux données captées dans la conception de produits. Ces enjeux participent conjointement à brider la recherche et les investissements industriels dans le développement de l'exploitation des données captées.

En conclusion, ce travail d'investigation des enjeux, nécessaire dans ces travaux de thèse, constitue un apport à la fois scientifique et industriel. D'un point de vue scientifique, le regroupement et la formalisation des enjeux peuvent participer à l'avancée des travaux de recherche dans le domaine. En effet, l'investigation des enjeux offre des pistes de réflexions primordiales à la proposition de nouvelles méthodes ou outils pertinents. Ces propositions de méthodes et d'outils, si elles sont efficaces, permettraient d'améliorer la qualité, le temps et les coûts du processus de conception. Elles contribueraient ainsi au changement de paradigme vers l'intégration des données dans les produits physiques. Du point de vue industriel, l'investigation des enjeux peut également permettre aux acteurs industriels d'avoir une vision globale des écueils liés à l'intégration des données captées afin de s'organiser et adapter leurs pratiques de conception.

5.1.2 Limites

Une limite inhérente au travail d'investigation des enjeux tient dans l'approche qualitative du workshop et des entretiens. Certaines limites liées au protocole ont déjà été mentionnées dans les sous-sections 2.2.3 et 2.3.3. Outre ces limites, les participants au workshop académique ont partagé leurs réflexions personnelles sur les enjeux de l'intégration des données. Cela signifie que d'autres enjeux pourraient potentiellement être mentionnés par d'autres participants. Il en va de même pour les industriels interrogés lors de la campagne d'entretiens, leurs points de vue sur les enjeux sont liés à leurs expériences et expertises personnelles. Malgré les efforts déployés pour rassembler différents domaines académiques et industriels, l'ensemble d'enjeux établis ne peut être considéré comme exhaustif. Il pourrait être intéressant d'interroger un plus grand nombre de parties prenantes encore afin de consolider l'investigation des enjeux.

Une autre limite à ce travail tient dans la perspective opérationnelle adoptée pour la recherche des enjeux. En effet, l'investigation s'est focalisée sur les enjeux relatifs à l'organisation du travail de conception. Mais les enjeux d'organisation structurelle des entreprises n'ont pas été investigués. Ils peuvent pourtant influencer sur le processus de conception. Par exemple, au moment de la campagne d'entretiens, plusieurs industriels ont indiqué être en train de procéder à des changements structurels internes afin de rapprocher les professions liées aux données, celles liées à l'électronique embarquée et celles de la conception. L'intégration nouvelle de ces métiers spécialisés permettrait d'inclure dans le processus de développement du produit leur expertise, leurs méthodes et leurs outils spécifiques. À cet égard, il est important d'organiser un flux de travail efficace entre les différentes parties prenantes afin d'assurer la meilleure intégration possible des nouvelles compétences. La collaboration efficace liée à l'intégration de nouveaux métiers pour soutenir les phases de conception représente en ce sens un domaine d'étude à explorer également.

Enfin une limite plus générale à cet apport tient dans sa pérennité. Certains des enjeux identifiés peuvent être amenés à évoluer avec le développement des technologies du numérique. Des altérations des enjeux identifiés ou de nouveaux enjeux peuvent en effet apparaître avec le développement de nouvelle technologie disruptive comme l'intelligence artificielle.

5.2. Apports méthodologiques

5.2.1 Apports

La méthode *Design for Sensor Data Integration* (DfSDI) et ses outils dédiés constituent le principal apport de ces travaux de thèse. La méthode DfSDI participe à la transition vers un nouveau paradigme de conception intégrant les spécificités des produits intelligents et connectés. En effet, elle a été développée sur la base des enjeux identifiés relatifs à l'intégration des données captées dans la conception. Elle répond au manque fondamental identifié de structure pour la conception de produits. La méthode DfSDI est constituée de deux phases consécutives, chacune soutenue par un outil dédié. Les deux phases et leurs outils respectifs constituent également des apports en soi car elles répondent à des enjeux ou des manques précédemment identifiés et elles proposent des résultats notables pour le domaine de la conception.

Plus spécifiquement, la première phase d'exploration de la méthode DfSDI permet l'exploration systématique des créations de valeurs liées à l'intégration des données captées. Elle s'appuie pour cela sur un outil d'idéation représentant les principales capacités de détection des capteurs. Lors de la phase d'exploration de la méthode DfSDI, les concepteurs génèrent, pour chacune des phases du cycle de vie du produit, des concepts de créations de valeurs basées sur les capacités de détection proposées. Ils sont libres d'utiliser les techniques de créativité les plus appropriées à leurs besoins. La phase d'exploration de la méthode DfSDI répond ainsi au besoin identifié d'exploration des potentiels offerts par les données captées. De plus, l'état de l'art avait mis en évidence le manque d'approches basées sur les créations de valeurs des capteurs auquel la première phase de la méthode répond également. Ces apports ont été validés scientifiquement grâce à une expérimentation menée avec des concepteurs de produits experts appartenant à une entreprise de vélo en libre-service. Les résultats de cette expérimentation constituent également un apport notable pour le domaine de la conception de produits. L'approche d'exploration a permis, par rapport aux approches traditionnelles d'idéation, de proposer de générer des concepts plus originaux et de meilleure qualité au détriment de la variété des concepts générés. Les concepteurs experts ayant mis en œuvre la phase d'exploration ont fait état d'une grande appréciation de l'approche. Ils ont également noté que l'approche permettait une bonne exploration créative ainsi qu'une bonne collaboration entre les concepteurs. Enfin, l'outil d'exploration constitue aussi un apport notable de cette thèse. Grâce à sa construction générique et systématique, il forme un outil polyvalent et universel. Il est conçu pour soutenir le développement de solutions de capteurs intégrés dans des produits ou des prototypes, quel que soit le domaine d'application.

Concernant la seconde phase de sélection de la méthode DfSDI, elle permet la sélection systématique sur des critères de soutenabilité de création de valeurs basée sur les données captées. Elle s'appuie pour cela sur une modélisation holistique. Cette dernière représente les principaux impacts sur la soutenabilité des créations de valeurs basées sur l'intégration des données captées. Elle offre un langage homogène pour permettre leur évaluation comparative. Lors de la phase de sélection de la méthode DfSDI, les concepteurs transcrivent d'abord les créations de valeurs dans la modélisation proposée. Ils sont ensuite libres d'utiliser les techniques de prise de décision les plus appropriées à leurs besoins pour évaluer les différentes modélisations selon les trois piliers de la soutenabilité (économique, environnemental et social).

Les concepteurs sélectionnent ainsi les concepts pertinents à développer dans la suite du processus de conception. La phase de sélection de la méthode DfSDI répond au besoin identifié d'évaluation des impacts des données captées sur la soutenabilité. De plus, l'état de l'art avait également mis en évidence le manque d'approche de sélection considérant la soutenabilité lors de la conception amont auquel la seconde phase de la méthode répond également. Ces apports ont été validés scientifiquement grâce à deux expérimentations complémentaires. Les résultats de ces expérimentations constituent également un apport notable pour le domaine de la conception de produits. Une première expérimentation était basée sur l'évaluation de l'approche de sélection par des experts en soutenabilité. Concernant sa solidité scientifique, les experts ont considéré que l'approche prenait bien en compte les piliers de la soutenabilité et que cette dernière était générique dans le domaine des produits intelligents et connectés. Cependant, ils ont souligné que l'approche prenait que partiellement en compte le cycle de vie du produit. Concernant l'utilité de l'approche, ils ont évalué sa pertinence et sa transparence comme excellente. La seconde expérimentation était basée sur la mise en œuvre de la seconde partie de la méthode par des groupes pluridisciplinaires de chercheurs en concepteurs. Ils ont fait état d'une très bonne appréciation de l'approche. Ils ont également fait état d'une bonne satisfaction vis-à-vis des résultats obtenus et de la collaboration permise par l'approche. Enfin, la modélisation permettant la sélection constitue en elle-même aussi un apport notable de cette recherche. Grâce à sa construction basée sur l'identification des impacts majeurs liés aux données captées sur la soutenabilité, elle forme un outil polyvalent et universel. Elle permet de représenter dans un langage homogène les créations de valeurs basées sur les données captées de produits ou de prototypes, quel que soit le domaine d'application.

5.2.2 Limites

Une première limitation à la méthode DfSDI proposée est qu'elle n'a pas été éprouvée d'une façon continue. Bien que le cas d'application ait été le même pour lier les deux expérimentations conduites, les deux phases de la méthode n'ont pas été mises en œuvre lors du même processus de conception avec les mêmes parties prenantes. Et bien que les deux phases puissent être conduites indépendamment l'une de l'autre, il aurait été intéressant de suivre et évaluer l'ensemble de son déroulement, lors d'une seule et même conception.

La deuxième et principale limitation à la méthode proposée est que sa fiabilité n'a pas été évaluée. La fiabilité de la méthode est sa capacité à produire des résultats similaires à chacune de ses mises en œuvre. Dans le cadre de ses travaux, il s'agirait d'éprouver différents cas d'étude avec différents groupes de concepteurs afin de prouver que les résultats sont indépendants du produit concerné et des parties prenantes. Si les résultats obtenus dans ces autres expérimentations s'accordent ensemble et avec ceux de cette thèse, la méthode proposée aura démontré sa fiabilité.

Des limites sont aussi intrinsèques aux apports des phases d'exploration et de sélection de la méthode DfSDI. Les limites relatives aux aspects qualitatifs des expérimentations des deux phases ont été évoquées respectivement dans les sous-sections 4.1.5 et 4.2.5.

Tout d'abord les limites de la première phase d'exploration résident dans son outil dédié et sont inhérentes aux choix faits lors de sa construction. La construction s'appuie en effet sur les fiches techniques de capteurs existants, plus spécifiquement sur les applications qui y sont recensées. C'est sur la base des applications les plus communes que sont proposées les 14 principales capacités de détection formant l'outil. Pour cette raison, la liste des capacités proposées n'est pas exhaustive. Un compromis a été fait pour garder l'outil simple et accessible dans son usage en écartant les capacités de détection jugées trop spécifiques. Dans le cadre de la conception de certains produits, des capacités manquantes à l'outil d'exploration pourraient s'avérer créatrices de valeurs. Ce manque constitue une première limite. La seconde limite réside dans la pérennité de l'outil d'exploration comme il est construit sur les fiches techniques de capteurs existants. L'évolution des TIC et des sciences des données pourrait amener à l'apparition de nouvelles capacités de détection ou même au développement de nouveaux capteurs. C'est pourquoi il est nécessaire de garder l'outil à jour pour qu'il reste pertinent. Des veilles technologiques périodiques permettraient d'intégrer dans les capacités de l'outil tout nouveau développement dans le domaine des TIC.

De la même manière, les limites à la seconde phase de sélection résident dans son outil dédié et sont inhérentes aux choix faits lors de sa construction. Afin que la modélisation reste accessible, sa construction s'est basée sur l'identification des principaux facteurs impactant la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées. La modélisation ne permet donc que de représenter que les principaux impacts économiques, environnementaux et sociaux.

Elle n'est pas exhaustive et ce manque constitue une première limite. La non-exhaustivité induite par ce compromis pour garder l'outil simple et accessible a par ailleurs été relevé par les experts lors de leurs évaluations. Une seconde limite réside comme pour l'outil précédent, dans la pérennité de la modélisation proposée. Le développement des TIC et des sciences des données pourrait induire des modifications des impacts sur la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées. En ce sens, la structure et les éléments composants la modélisation pourraient être amenés à changer pour intégrer de potentiels nouveaux impacts majeurs.

5.3. Apports pédagogiques

5.3.1 Apports

Le dernier apport majeur de ces travaux de thèse concerne la dimension éducative explorée. Les outils développés pour soutenir les phases d'exploration et de sélection de la méthode DfSDI ont également été expérimentés dans un cadre pédagogique afin d'évaluer leurs potentiels didactiques. Ces travaux constituent ainsi un apport original au domaine de l'éducation. Cette initiative a été motivée par l'enjeu identifié de manque d'expertise et par plusieurs travaux faisant état de la nécessité d'intégrer les données et les technologies connexes dans les formations des futurs concepteurs. En ce sens, deux approches pédagogiques s'appuyant respectivement sur chacun des deux outils ont été proposées et expérimentées. Elles se basent sur les recommandations pédagogiques d'entités référentes dans le domaine de la conception de produits. Chacune des approches propose aux étudiants un cas d'étude réel à traiter avec l'outil dédié en autonomie. Le premier outil illustre aux étudiants les principales capacités de détection des capteurs. Le second met en évidence les principaux impacts sur la soutenabilité liés à l'intégration des capteurs, de leurs données et de leurs services. Les approches couvrent des aspects non abordés dans les enseignements traditionnels de l'IoT. En effet, ces enseignements sont souvent axés sur les aspects techniques et l'expérimentation des technologies IoT mais ne semblent pas inclure de réflexions sur la création de valeurs ni sur la soutenabilité de ces dernières. En synthèse de ces éléments, elles constituent donc des apports pédagogiques pertinents. De plus, les expérimentations de ces approches et leurs résultats font également partie des apports de cette thèse. Les résultats montrent que les approches proposées contribuent au développement des compétences de réflexion, en particulier celles d'ordre

supérieur. Ces résultats confirment l'intérêt didactique des approches pédagogique basées sur les outils développés. Enfin, les approches proposées sont également faciles à mettre en œuvre et requièrent peu de matériel afin d'être accessibles au plus grand nombre d'étudiants.

5.3.2 Limites

Les limitations liées aux protocoles expérimentaux ont déjà été explicitées dans la sous-section 4.3.5. Outre ces limites, les approches pédagogiques ont été mises en œuvre seulement dans le cadre de formations d'ingénieurs en conception de produits. Bien que les résultats se soient avérés probants, ils pourraient s'avérer différents si les approches proposées étaient mises en œuvre avec des étudiants d'autres spécialisations. De plus les approches pédagogiques ont été mises en œuvre seulement sur le cas d'étude du vélo en libre-service. Bien que les résultats des expérimentations sur ce cas d'étude aient été probants, l'application d'un autre cas d'étude aux approches proposées permettrait peut-être d'améliorer plus encore les compétences acquises.

Par ailleurs, l'apport éducatif étant basé sur les outils construits pour soutenir les deux phases de la méthode DfSDI, les limites relatives aux outils décrites dans la section précédente s'appliquent également dans ce cadre. Tout d'abord les outils d'exploration et de sélection ont été construits pour être simples et accessibles. À cet égard, ils reposent sur des compromis. L'outil d'exploration ne rend pas compte de l'ensemble des capacités de détection des capteurs mais seulement des plus répandues. De la même manière, la modélisation soutenant la sélection ne représente que les principaux facteurs impactant la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées. Les outils ne sont pas exhaustifs par nature et en ce sens, cela peut créer un manque dans les connaissances transmises aux étudiants. Ainsi, la non-exhaustivité doit être mentionnée aux étudiants lors des approches pédagogiques et les éléments manquants peuvent être introduits à l'issue des approches pédagogiques proposées en complément. De plus, la limite de pérennité des outils identifiée précédemment est également une limite dans le cadre pédagogique. Il est nécessaire de garder à jour les deux outils afin de transmettre les connaissances les plus récentes aux élèves.

5.4. Conclusion sur les apports

Le cinquième chapitre d'apports synthétise les différentes contributions de ces travaux de thèse et explicite les limites qui y sont associées. La première section présente les apports liés à l'investigation des enjeux relatifs à la conception de produits et aux données captées. Ils résident dans l'identification, la formalisation et la synthèse de ces enjeux issus d'une investigation de la littérature scientifique ainsi que des perspectives de chercheurs et d'industriels. La deuxième section présente les apports méthodologiques qui sont le cœur de ces travaux de thèse. Ils résident dans la proposition d'une méthode nouvelle, la méthode DfSDI, structurant l'intégration des données captées pour la création de valeurs lors de la conception amont. Les deux outils nouveaux dédiés respectivement aux deux phases successives de la méthode DfSDI font également partie de cette contribution majeure. La troisième section présente les apports pédagogiques de ces travaux. Ils résident dans la proposition de deux approches didactiques d'intérêt basées respectivement sur les deux outils de la méthode DfSDI.

CHAPITRE 6 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le sixième et ultime chapitre conclut ces travaux de thèse. Il propose également une réflexion sur leurs perspectives à court, moyen et long terme. La section 6.1 propose une conclusion des travaux, la section 6.2 souligne les perspectives et enfin la section 6.3 répertorie les productions scientifiques internationales issues de la recherche présentée. La figure 51 illustre le plan du chapitre.

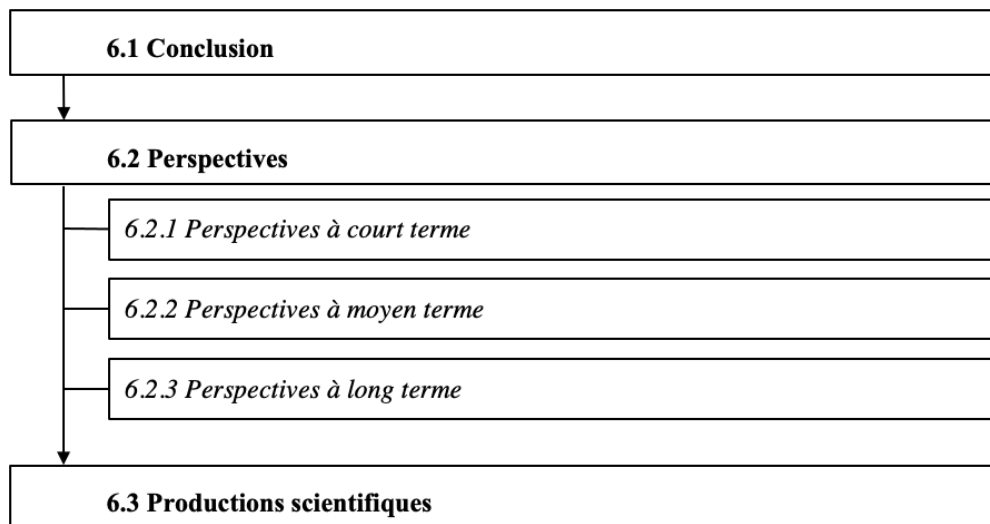


Figure 51 Plan du chapitre « Conclusion et perspectives »

6.1. Conclusion

Ces travaux de thèse se sont appuyés sur le cadre méthodologique donné par la DRM (Blessing et Chakrabarti, 2009). La présentation du contexte industriel et scientifique correspond à la première étape de *clarification de la recherche* de la DRM. Le contexte industriel des travaux de thèse a d'abord mis en avant des enjeux émergents liés à la conception de produits. En effet, le développement continu des TIC rend les composants électroniques embarqués complexes accessibles à une plus large gamme de produits et d'industries. Intégrés dans les produits physiques, ils permettent de les doter de capacités informatiques et communicationnelles inédites. Ces capacités sont créatrices de valeurs à la fois pour les utilisateurs et les fabricants. Cependant, pour intégrer pleinement les nouveaux potentiels de ces produits intelligents et connectés, les industriels doivent adopter de nouveaux processus, en particulier lors de leurs conceptions. Le choix des données pouvant être captées par le produit lors de sa conception apparaît particulièrement important car il définit les créations de valeurs potentielles pour le reste de son cycle de vie. La recherche de ces travaux de thèse s'est portée à cet égard sur les approches de conception des produits intelligents et connectés permettant l'exploitation des données captées pour générer des créations de valeurs. Ainsi, les travaux se situent à l'intersection de trois domaines de recherche formant son contexte scientifique : la conception de produits, les TIC et les sciences des données. Les sciences de la conception de produits sont essentielles pour organiser la réalisation des produits intelligents et connectés et permettre la mise en œuvre efficace de créations de valeurs. Les TIC sont essentielles aux produits pour collecter, traiter et transmettre les données captées d'intérêts. Enfin, les sciences des données sont essentielles à l'exploitation numérique des données captées et donc aux déploiements des créations de valeurs.

Une fois le cadre de la recherche précisé, la deuxième étape d'*étude descriptive I* de la DRM est abordée par ces travaux de thèse. Elle a pour objectif de comprendre la situation actuelle de la recherche menée ainsi que ses enjeux. C'est pourquoi un état de l'art basé sur la littérature scientifique des approches de conception intégrant les données captées a été réalisé. Il présente d'abord les approches qui se basent sur les données captées comme création de valeurs pour la phase de conception d'un produit (*design with*). Puis il présente les approches de conception pour générer de créations de valeurs avec les données captées lors du reste du cycle de vie du

produit (*design for*). Cette étude rend compte des pratiques actuelles d'intégration des données captées dans la conception de produits. Leurs enjeux décrits dans la littérature scientifique sont ensuite mis en évidence. Pour faire état des enjeux relatifs à la recherche menée, la DRM préconise aussi d'interroger des parties prenantes concernées pour avoir un aperçu approfondi de la situation. À cet égard, des chercheurs ont été consultés sur les enjeux au cours d'un workshop lors d'une conférence internationale en science de la conception. De plus, différents industriels, fabricants de produits intelligents et connectés, ont également été consultés sur les enjeux au cours d'entretiens semi-dirigés. L'ensemble des enjeux identifiés a été synthétisé en quatre constats majeurs : le besoin de structure pour mener l'intégration des données captées dans la conception de produits, le besoin d'exploration des potentielles créations de valeurs basées sur les données captées, le besoin d'évaluation des impacts associés selon les trois piliers de la soutenabilité et enfin le besoin d'expertise pour guider l'intégration des données captées.

La recherche menée se propose donc de développer une solution appropriée aux enjeux identifiés conformément à la troisième étape d'*étude prescriptive* de la DRM. La problématique abordée par les travaux de cette thèse résulte du principal constat identifié : le besoin de structure. Elle est donc la suivante : **Comment structurer l'intégration des données captées dans la conception amont du produit pour générer des créations de valeurs ?** L'hypothèse est faite que la proposition d'une nouvelle méthode de conception : *Design for Sensor Data Integration* (DfSDI) permet de résoudre la problématique. La méthode DfSDI est issue des méthodes de *Design for X* où le X correspond à l'intégration des données captées pour la création de valeurs. Elle formalise ainsi une structure méthodologique pour guider lors de la conception amont d'un produit le développement de créations de valeurs basées sur les données captées. Elle est divisée en deux phases chacune répondant chacune respectivement à un constat identifié. La première phase est une phase de créativité permettant de générer systématiquement de potentielles créations de valeurs basées sur les données captées. Elle répond au besoin d'exploration des potentiels offerts par les données captées. La seconde est une phase d'aide à la décision permettant de sélectionner systématiquement, selon leurs impacts sur la soutenabilité, les créations de valeurs précédemment générées. Elle répond au besoin d'évaluation selon les piliers de la soutenabilité. Enfin pour répondre au constat de manque d'expertise, chacune des deux phases est soutenue par un outil dédié. Les outils dédiés sont construits pour incorporer une partie de l'expertise nécessaire. Ils facilitent ainsi la mise en œuvre de la méthode DfSDI et garantissent son accessibilité à des concepteurs de tous niveaux.

L'outil soutenant la première phase d'exploration est construit sur la base d'un grand nombre de fiches techniques des principaux capteurs embarqués sur le marché. Les applications préconisées dans les fiches ont été synthétisées pour représenter les principales capacités de détection des capteurs embarqués actuels. Une liste de 14 capacités formant l'outil peut être utilisée comme inspiration pour la génération de création de valeurs basée sur les données captées. L'outil soutenant la seconde phase de sélection est construit sur l'identification des principaux impacts sur la soutenabilité des créations de valeurs basées sur les données captées. Les contributions directes positives et négatives sur les piliers économiques, environnementaux et sociaux sont représentées dans une modélisation. Chaque création de valeurs basée sur les données captées peut être transcrite dans un modèle. Le modèle donne un langage homogène et permet la comparaison des évaluations sur la base du modèle.

La dernière étape de la DRM est une seconde *étude descriptive II*. Son objectif est d'évaluer la mise en œuvre de la solution développée précédemment. Les deux phases formant la méthode DfSDI ont été évaluées séparément. La phase d'exploration a été expérimentée avec une entreprise française leader dans la fabrication de vélos de ville connectés et partagés. Dans le cadre du développement d'un vélo connecté et partagé, les participants ont appliqué à la fois un processus d'idéation classique et celui proposé par la première phase de la méthode DfSDI. La comparaison des résultats des idéations a montré que les concepts générés issus de la méthode DfSDI étaient plus innovants, plus qualitatifs mais moins variés. Des questionnaires sur l'utilisabilité de l'approche auprès des participants ont montré qu'ils ont apprécié la méthode, l'exploration des solutions et la collaboration qu'elle permet. La phase de sélection a été expérimentée au travers de deux expérimentations aux objectifs distincts. Une première expérimentation sous la forme d'entretiens avec des experts en soutenabilité a été menée pour évaluer la solidité scientifique ainsi que l'utilité de la seconde phase de la méthode. Les experts interrogés ont mis en évidence que l'approche était générique aux produits intelligents et connectés et qu'elle considérait bien l'ensemble des trois piliers de la soutenabilité. Cependant, ils ont noté que, par sa construction, elle ne prenait pas en compte l'ensemble du cycle de vie du produit et qu'elle ne pouvait que difficilement être généralisée à des produits n'intégrant pas d'électronique embarquée. En outre, l'approche a été considérée comme très transparente et très pertinente par les experts. Une seconde expérimentation sous la forme de workshop avec des chercheurs en conception a été menée pour évaluer l'utilisabilité de l'approche. Les participants ont travaillé en groupes pluridisciplinaires à la sélection de concepts générés lors

de l'expérimentation de la première phase d'exploration. Ainsi, plusieurs créations de valeurs basées sur les données captées pour des vélos en libre-service connectés ont été proposées à l'évaluation. Les participants ont mis en œuvre la méthode proposée avec son outil et l'ont évaluée via un questionnaire. Les concepteurs participants ont apprécié la méthode, l'exploration des solutions et la collaboration qu'elle permet. Ils étaient également satisfaits des résultats obtenus. Au vu des résultats des expérimentations, l'hypothèse de résolution est vérifiée. La méthode DfSDI donne une structure pertinente de l'intégration des données captées dans la conception amont du produit pour générer des créations de valeurs. En complément des expérimentations de la méthode DfSDI, des expérimentations dans un cadre pédagogique ont également été menées. Le constat de manque d'expertise des concepteurs et des travaux scientifiques sur la nécessité de dispenser des formations sur les données aux futurs concepteurs ont incité à tester le potentiel didactique des deux outils dédiés. Deux approches pédagogiques respectivement basées sur les deux outils ont été expérimentées auprès d'étudiants en master 2 de conception de produits. Les connaissances relatives aux usages des données captées et à l'évaluation de leurs impacts ont montré des évolutions positives à la suite de la mise en œuvre des approches pédagogiques. En particulier, les compétences de réflexions de niveau supérieur dénotaient de fortes améliorations.

En conclusion, ces travaux de thèse apportent plusieurs contributions notables. Tout d'abord, l'investigation et la formalisation des enjeux liés à l'intégration des données captées dans la conception forment une première contribution à la recherche en conception de produits. Ces travaux peuvent en effet alimenter d'autres travaux de recherche et participer ainsi au développement de la conception intégrant les données captées. Ensuite la proposition méthodologique DfSDI et ses outils forment la principale contribution de cette thèse à la recherche en conception de produits. Ils proposent des réponses à plusieurs enjeux identifiés et participent ainsi au changement de paradigme dans la conception induit par les technologies numériques. Enfin, l'expérimentation et les résultats des approches pédagogiques basées sur les outils de la méthode DfSDI forment une contribution au domaine de l'éducation en conception. Ils proposent des approches novatrices et efficaces pour former les futurs concepteurs en vue du changement de paradigme. Ces diverses contributions ne sont pas exemptes de limites, elles ont été mentionnées dans le chapitre précédent. Les premières perspectives pour la suite de ces travaux de thèse consisteraient à dépasser ces limites pour en renforcer les contributions.

6.2. Perspectives

Ces travaux de thèse sont une contribution au changement de paradigme dans la conception de produits induit par le récent développement des TIC et des sciences des données. Cette section explore les perspectives à investiguer pour continuer le développement des travaux présentés et par extension contribuer au changement de paradigme. Les perspectives à court, moyen et long terme sont présentées successivement.

6.2.1 *Court terme*

La première perspective à envisager pour la suite des travaux est de palier aux limites qualitatives identifiées dans le chapitre précédent. À cet égard, il est nécessaire de confirmer la solidité de la méthode DfSDI en la testant dans de multiples contextes différents : dans différents domaines industriels et avec différents profils de parties prenantes. De plus, les approches d'exploration et de sélection proposées laissaient des choix à la convenance des concepteurs. Ainsi, la phase d'exploration laissait libre le choix de la méthode d'idéation à utiliser de pair avec l'outil proposé. De la même manière, la phase de sélection laissait libre le choix de la méthode d'aide à la décision à utiliser de pair avec la modélisation proposée. Pour approfondir les travaux, il serait pertinent de déterminer quelles sont les approches d'idéation et d'aide à la décision les plus appropriées au travers d'expérimentations comparatives. En éprouvant ainsi la méthode, il sera possible de l'améliorer itérativement et de la rendre plus efficace.

On retrouve des perspectives analogues concernant les propositions pédagogiques basées sur les outils de la méthode DfSDI. La pertinence de l'approche a été démontrée par les expérimentations dans un cadre fixé. Une perspective à court terme serait d'expérimenter en œuvre les approches proposées avec différents profils d'étudiants. Les approches proposées pourraient avoir une efficacité variable en fonction des étudiants les suivant. D'autre part, il serait également intéressant de pouvoir expérimenter différents cas d'étude appliqués aux approches afin de comparer les résultats sur les connaissances. En effet, de la même manière, les approches proposées pourraient avoir une efficacité variable en fonction des cas d'étude abordés.

6.2.2 Moyen terme

Une fois la méthode DfSDI éprouvée et son processus optimisé, une perspective de travail à moyen terme consisterait également à améliorer les outils dédiés l'accompagnant. Dans ces travaux de thèse, des formes analogiques des outils ont été proposées et expérimentées, respectivement des cartes en bois et des modélisations à remplir sur papier pour la phase d'exploration et la phase de sélection. Le choix de ses formes a été délibéré et basé sur leur accessibilité et facilité à produire. Cependant, au détriment de ces aspects, il pourrait être intéressant de développer des formes plus complexes pour les outils. En particulier, leurs formes pourraient être numériques plutôt qu'analogiques. Cela permettrait d'ouvrir de nouveaux potentiels aux outils et par extension à la méthode.

Pour illustrer ces hypothétiques versions numériques, une ébauche d'outil numérique pour la phase d'expérimentation a été conçue au LCPI. Le projet avait comme objectif de proposer l'outil d'exploration sous la forme d'une application pour téléphone mobile. L'application permet l'automatisation d'une partie des étapes de la phase d'exploration. Elle facilitait ainsi la mise en œuvre de la phase d'exploration. De plus, l'application permet aussi l'utilisation des capteurs embarqués du téléphone ou d'une sonde externe intégrant des capteurs pour afficher en temps réel les données que les capteurs enregistrent. L'application fournit ainsi une illustration dynamique et concrète des 14 potentiels de détection formant l'outil. Ce potentiel intrinsèque au format numérique pourrait être un support additionnel à l'idéation autour des créations de valeurs basée sur les données captées. Par exemple, grâce à cette fonctionnalité, les concepteurs peuvent simuler ou illustrer physiquement des scénarios de création de valeurs basées les données captées en attachant le téléphone ou la sonde à des objets. Cette possibilité pourrait peut-être améliorer les résultats issus de l'outil d'exploration.

De la même manière, il est également possible de numériser l'outil dédié à la seconde phase de sélection. En ce sens, le développement d'un logiciel numérique est également envisagé comme une perspective à moyen terme. De la même manière que pour l'outil précédent, l'outil sous forme numérique permettrait d'automatiser et simplifier certaines étapes liées à la phase de sélection. Et il permettrait aussi d'augmenter le potentiel de l'outil en se basant sur des

fonctionnalités exclusives au numérique. Les concepteurs rempliraient les différentes modélisations et leurs évaluations directement dans le logiciel de support. Il serait alors possible d'automatiser différentes tâches de traitement de données par exemple : détecter les fiches idées pouvant être combinées car partageant les mêmes données captées, automatiser les calculs des évaluations, automatiser les classements, appliquer des filtres dynamiques sur les modélisations ou les évaluations, etc.

Enfin, concernant les travaux pédagogiques, les approches proposées reposent également sur les outils dédiés. Ainsi une perspective à moyen terme pourrait aussi être de développer des formes analogiques plus complexes, comme un jeu de société, ou même des formes numériques, comme une application mobile. Une forme plus complexe pourrait permettre d'intégrer des notions complémentaires à celle déjà présentées. Elle pourrait par exemple permettre de créer un lien avec d'autres enseignements sur IoT. Au moment de la rédaction du présent manuscrit, des travaux de recherche sont menés au LCPI pour évaluer le potentiel pédagogique de l'outil d'exploration dans un espace de réalité virtuelle. La figure 52 illustre une de ces expérimentations.



Figure 52 Travaux en cours : utilisation de l'outil comme support à une expérimentation en réalité virtuelle

6.2.3 Long terme

Les perspectives à long terme de ces travaux de thèse dépassent le cadre de recherche présenté pour l'étendre à d'autres sujets ou domaines pertinents. Tout d'abord, les ébauches d'une

première perspective à long terme sont apparues lors de la phase d'investigation des enjeux de la conception de produits intégrant les données captées. En effet, les travaux de cette thèse se sont concentrés sur le développement d'une structure pour le processus de conception produit mais les aspects organisationnels n'ont pas été abordés. Des enjeux organisationnels ont été mentionnés lors des entretiens avec les industriels fabricants de produits intelligents et connectés. Afin d'améliorer la qualité du processus de conception et ses résultats, il est aussi nécessaire de structurer son organisation interne et la collaboration des diverses parties prenantes, leurs rôles et leurs interactions (Villasalero, 2018). La conception basée sur les données captées en intégrant les domaines des TIC et des sciences des données intègre également les nouveaux métiers qui y sont associés. En ce sens, une première perspective à long terme de ces travaux de thèse serait de se focaliser non plus sur le processus mais sur les différents métiers impliqués en proposant une structure organisationnelle nouvelle et des outils de collaboration. Ces moyens favorisent les synergies interdivisions et les résultats issus des projets collaboratifs (Grote et al., 2012). Mener ces travaux de recherche participerait au changement de paradigme induit par les technologies numériques.

Les présents travaux de recherche se veulent génériques et applicables à l'ensemble des potentiels produits intelligents et connectés. Une perspective à long terme pourrait aussi être de les spécialiser pour des cadres de recherche pertinents en y intégrant leurs spécificités associées. En ce sens, le cadre de l'économie circulaire semble approprié. En effet, les capteurs et leurs données peuvent jouer un rôle dans l'implémentation de stratégie circulaire (Bressanelli et al., 2022) et de pratiques circulaires créatrices de valeurs sur l'ensemble du cycle de vie des produits (Alcayaga et al., 2019). Entre autres, ils participent au développement de l'excellence opérationnelle lors de la phase de fabrication minimisant ses impacts. Ils participent au développement de modèles commerciaux circulaires des produits en tant que services (systèmes produits-services). En effet, ils facilitent le déploiement et l'organisation des produits-services système, y compris pour les phases de réparations et d'entretiens. Ils participent aussi au développement d'une meilleure gestion de la fin de vie car ils permettent de suivre les flux de produits ou de recueillir des informations sur la qualité et l'état des produits ou de ses composants. En ce sens, des travaux de recherche similaires à ceux présentés mais investiguant les créations de valeurs liées aux données captées pour l'économie circulaire semblent intéressants. D'autant plus que l'économie circulaire apparaît comme un modèle économique

alternatif pertinent face aux enjeux du développement durable. Ces travaux permettraient de participer à la transition de modèle économique en tirant parti des technologies numériques.

Enfin, une autre perspective à long terme serait d'intégrer des domaines connexes et pertinents à ceux abordés dans ces travaux de thèse. En particulier, le domaine émergent et prometteur de l'intelligence artificielle. L'intelligence artificielle apparaît comme créatrice de valeurs pour la phase de conception des produits. En effet, elle peut assister les concepteurs dans la résolution de problèmes mais aussi guider le processus de conception. Son fonctionnement pour accomplir ces tâches peut être réactif, invoquée par les concepteurs, ou pro-actif, agir de façon autonome (McComb et al., 2023). De plus, via les TIC, il est aussi possible d'intégrer dans les produits physiques un lien à l'intelligence artificielle. Ce lien permettrait entre autres d'augmenter d'autant plus l'intelligence des produits et leurs capacités d'adaptation (Vermesan et al., 2022). Ainsi, l'intelligence artificielle pourrait s'avérer également créatrice de valeur pour l'utilisateur lors de la phase d'utilisation ou plus largement pour les fabricants sur l'ensemble du cycle de vie du produit. De la même manière que dans ces travaux de thèse, il faut pouvoir organiser la meilleure conception de produits avec l'intelligence artificielle (*design with*) mais aussi la conception pour la meilleure intégration de l'intelligence artificielle dans les produits (*design for*). Comme pour les données captées, l'essor récent du domaine de l'intelligence artificielle dans la conception de produits résulte en un manque de structures adaptées. Ainsi, des travaux de recherches traitant des créations de valeurs liées à l'intégration de l'intelligence artificielle dans la conception semblent particulièrement pertinents. Ils complémenteraient par ailleurs les travaux menés dans cette thèse vis-à-vis des technologies numériques induisant un changement de paradigme.

6.3. Productions scientifiques

Les productions scientifiques publiées au moment de la rédaction de ce manuscrit de thèse sont résumées ci-dessous :

Articles scientifiques de revues internationales :



Briard, T., Jean, C., Aoussat, A., Véron, P., 2023.
Challenges For Data-Driven Design in Early Physical Product Design: A Scientific and Industrial Perspective.
Computers in Industry 145, 103814.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103814>

Participations et papiers scientifiques dans des conférences internationales :



Briard, T., Jean, C., Aoussat, A., Véron, P.,
Le Cardinal, J., Wartzack, S., 2021.
Data-Driven Design Challenges in the Early Stages
of the Product Development Process.
Proc. Des. Soc. 1, 851–860.
<https://doi.org/10.1017/pds.2021.85>



Briard, T., Jean, C., Aoussat, A., Véron, P., 2023.
Integrating Sensors In Products:
A New Tool For Design Education.
Proc. Des. Soc. 3, 2345–2354.
<https://doi.org/10.1017/pds.2023.235>

RÉFÉRENCES

- Abichandani, P., Sivakumar, V., Lobo, D., Iaboni, C., Shekhar, P., 2022. Internet-of-Things Curriculum, Pedagogy, and Assessment for STEM Education: A Review of Literature. *IEEE Access* 10, 38351–38369. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3164709>
- Abramovici, M., Göbel, J.C., Savarino, P., 2017. Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins. *CIRP Annals* 66, 165–168. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.042>
- Abramovici, M., Lindner, A., 2011. Providing product use knowledge for the design of improved product generations. *CIRP Annals* 60, 211–214. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.103>
- Agogu , M., Levillain, K., Hooge, S., 2015. Gamification of Creativity: Exploring the Usefulness of Serious Games for Ideation: Gamification of Creativity. *Creativity and Innovation Management* 24, 415–429. <https://doi.org/10.1111/caim.12138>
- Alcayaga, A., Wiener, M., Hansen, E.G., 2019. Towards a framework of smart-circular systems: An integrative literature review. *Journal of Cleaner Production* 221, 622–634. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.085>
- Allhoff, F., Henschke, A., 2018. The Internet of Things: Foundational ethical issues. *Internet of Things* 1–2, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2018.08.005>
- Allmendinger, G., and Lombreglia, R., 2005. Four strategies for the age of smart services. *Harvard Business Review*, 83(10), pp. 131–145.
- Ambe, A.H., Brereton, M., Soro, A., Chai, M.Z., Buys, L., Roe, P., 2019. Older People Inventing their Personal Internet of Things with the IoT Un-Kit Experience, in: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300552>
- Anderson, T. W., Darling, D. A., 1952. Asymptotic theory of certain “goodness of fit” criteria based on stochastic processes. *The Annals of Mathematical Statistics* 23 (2), 193–212.
- Angelini, L., Mugellini, E., Couture, N., Abou Khaled, O., 2018. Designing the interaction with the internet of tangible things: A card set. In *Proceedings of the twelfth international conference on tangible, embedded, and embodied interaction*, 299–306. <http://dx.doi.org/10.1145/3173225.3173288>
- Aoussat, A., Christofol, H., Le Coq, M., 2000. The new product design - a transverse approach. *Journal of Engineering Design* 11, 399–417. <https://doi.org/10.1080/09544820010000971>
- Aranda Muñoz,  ., Eriksson, Y., Yamamoto, Y., Florin, U., Sandström, K., 2021. To Support IoT Collaborative Expressiveness On The Shop Floor. *Proc. Des. Soc.* 1, 3149–3158. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.576>

- Aranda Muñoz, Á., Florin, U., Eriksson, Y., Yamamoto, Y., Sandström, K., 2020. The Karakuri Card Deck: Co-Designing Industrial IoT Conceptual Solutions. *Proc. Des. Soc.: Des. Conf.* 1, 807–816. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.127>
- Arshad, R., Zahoor, S., Shah, M.A., Wahid, A., Yu, H., 2017. Green IoT: An Investigation on Energy Saving Practices for 2020 and Beyond. *IEEE Access* 5, 15667–15681. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2686092>
- Altshuller, G. S., 1984. *Creativity as an exact science: the theory of the solution of inventive problems.* Gordon and Breach Science Publishers.
- Asiedu, Y., Gu, P., 1998. Product life cycle cost analysis: State of the art review. *International Journal of Production Research* 36, 883–908. <https://doi.org/10.1080/002075498193444>
- Atlam, H.F., Wills, G.B., 2020. IoT Security, Privacy, Safety and Ethics, in: Farsi, M., Daneshkhah, A., Hosseinian-Far, A., Jahankhani, H. (Eds.), *Digital Twin Technologies and Smart Cities, Internet of Things.* Springer International Publishing, Cham, pp. 123–149. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3_8
- Baines, T.S., Lightfoot, H.W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., Peppard, J., Roy, R., Shehab, E., Braganza, A., Tiwari, A., Alcock, J.R., Angus, J.P., Bastl, M., Cousens, A., Irving, P., Johnson, M., Kingston, J., Lockett, H., Martinez, V., Michele, P., Tranfield, D., Walton, I.M., Wilson, H., 2007. State-of-the-art in product-service systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221, 1543–1552. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM858>
- Baldini, G., Botterman, M., Neisse, R., Tallacchini, M., 2018. Ethical Design in the Internet of Things. *Sci Eng Ethics* 24, 905–925. <https://doi.org/10.1007/s11948-016-9754-5>
- Becker, H.A., 2001. Social impact assessment. *European Journal of Operational Research* 128, 311–321. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00074-6)
- Bertoni, A., 2020. Data-Driven Design in Concept Development: Systematic Review and Missed Opportunities. *Proc. Des. Soc.: Des. Conf.* 1, 101–110. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.4>
- Bertoni, A., 2018. Role and Challenges of Data-Driven Design in the Product Innovation Process. *IFAC-PapersOnLine* 51, 1107–1112. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.455>
- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J., 2006. *Systems engineering and analysis (4th Edition).* EnglewoodCliffs, NJ: Pearson
- Blessing, L.T.M., Chakrabarti, A., 2009. *DRM, a Design Research Methodology.* Springer London, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M.-B., Gaillard, G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 223–235. <https://doi.org/10.1051/agro:2008058>

- Bogers, S., Frens, J., van Kollenburg, J., Deckers, E., Hummels, C., 2016. Connected Baby Bottle: A Design Case Study Towards a Framework for Data-Enabled Design, in: Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems. pp. 301–311.
<https://doi.org/10.1145/2901790.2901855>
- de Bono Edward 1971. Lateral Thinking for Management: A Handbook Of Creativity. American Management Association, New York. pp. 116
- Bonvoisin, J., Lelah, A., Mathieux, F., Brissaud, D., 2014. An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services. Journal of Cleaner Production 68, 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.003>
- Bonvoisin, J., Lelah, A., Mathieux, F., Brissaud, D., 2012. An environmental assessment method for wireless sensor networks. Journal of Cleaner Production 33, 145–154.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.016>
- Bosch Sensortec, 2022. “Humidity sensor BME280” Available at: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/> [Accessed October 2023].
- Boyatzis, R. E., 1998. Transforming qualitative information: Thematic analysis and code development. Sage Publications, Inc.
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Pigosso, D.C.A., Parida, V., 2022. Towards the Smart Circular Economy Paradigm: A Definition, Conceptualization, and Research Agenda. Sustainability 14, 4960.
<https://doi.org/10.3390/su14094960>
- Briggs, R.O., Reinig, B.A., 2010. Bounded Ideation Theory. Journal of Management Information Systems 27, 123–144. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222270106>
- Brown, T., 2008. Design thinking, Harvard Business Review, n° 86, p. 84-92.
- Brynjolfsson, E., and McAfee, A., 2014. The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. New York: W.W. Norton & Company
- Bstieler, L., Gruen, T., Akdeniz, B., Brick, D., Du, S., Guo, L., Khanlari, M., McIllroy, J., O’Hern, M., Yalcinkaya, G., 2018. Emerging Research Themes in Innovation and New Product Development: Insights from the 2017 PDMA-UNH Doctoral Consortium. J Prod Innov Manag 35, 300–307.
<https://doi.org/10.1111/jpim.12447>
- Camburn, B., Viswanathan, V., Linsey, J., Anderson, D., Jensen, D., Crawford, R., Otto, K., Wood, K., 2017. Design prototyping methods: state of the art in strategies, techniques, and guidelines. Des. Sci. 3, e13. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.10>
- Cantamessa, M., Montagna, F., Altavilla, S., Casagrande-Seretti, A., 2020. Data-driven design: the new challenges of digitalization on product design and development. Des. Sci. 6, e27.
<https://doi.org/10.1017/dsj.2020.25>

- Carroll, E.A., Latulipe, C., Fung, R., Terry, M., 2009. Creativity factor evaluation: towards a standardized survey metric for creativity support, in: Proceeding of the Seventh ACM Conference on Creativity and Cognition - C&C '09. p. 127. <https://doi.org/10.1145/1640233.1640255>
- Chen, X.-Y., Jin, Z.-G., 2012. Research on Key Technology and Applications for Internet of Things. *Physics Procedia* 33, 561–566. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.05.104>
- Cherry, E., Latulipe, C., 2014. Quantifying the Creativity Support of Digital Tools through the Creativity Support Index. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 21, 1–25. <https://doi.org/10.1145/2617588>
- Chiarello, F., Belingheri, P., Fantoni, G., 2021. Data science for engineering design: State of the art and future directions. *Computers in Industry* 129, 103447. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103447>
- Chowdhury, S., Haftor, D., Pashkevich, N., 2018. Smart Product-Service Systems (Smart PSS) in Industrial Firms: A Literature Review. *Procedia CIRP* 73, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.333>
- Cila, N., Smit, I., Giaccardi, E., Kröse, B., 2017. Products as Agents: Metaphors for Designing the Products of the IoT Age, in: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 448–459. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025797>
- Cinelli, M., Coles, S.R., Kirwan, K., 2014. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators* 46, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>
- Cleveland, W.S., 2001. Data Science: An Action Plan for Expanding the Technical Areas of the Field of Statistics. *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique* 69, 21. <https://doi.org/10.2307/1403527>
- Czichos, H., 2018. Sensor Technology, in: Measurement, Testing and Sensor Technology. Springer International Publishing, Cham, pp. 43–89. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76385-9_3
- Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., Barbosa, J., 2020. Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in Industry* 123, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103298>
- De Roeck, D., Stappers, P.J., Standaert, A., 2014. Gearing up!: a designer-focused evaluation of ideation tools for connected products, in: Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational. pp. 521–530. <https://doi.org/10.1145/2639189.2639204>
- Deng, Q., Wellsandt, S., Hribernik, K.A., Thoben, K.-D., 2019. Towards Understanding the Role of Product Usage Information in Product Design Improvement, in: Fortin, C., Rivest, L., Bernard, A., Bouras, A. (Eds.), *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era*. Springer International Publishing, Cham, pp. 369–378. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42250-9_35
- Design Council UK. 2005. *The Design Process*.

- Diaz, A., Schöggel, J.-P., Reyes, T., Baumgartner, R.J., 2021. Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. *Sustainable Production and Consumption* 26, 1031–1045.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.044>
- Dibitonto, M., Tazzi, F., Leszczynska, K., Medaglia, C.M., 2018. The IoT Design Deck: A Tool for the Co-design of Connected Products, in: Ahram, T., Falcão, C. (Eds.), *Advances in Usability and User Experience*. Springer International Publishing, Cham, pp. 217–227.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-60492-3_21
- El-Abd, M., 2017. A Review of Embedded Systems Education in the Arduino Age: Lessons Learned and Future Directions. *Int. J. Eng. Ped.* 7, 79. <https://doi.org/10.3991/ijep.v7i2.6845>
- Elkington, J., 1998. Accounting for the Triple Bottom Line. *Measuring Business Excellence* 2, 18–22.
<https://doi.org/10.1108/eb025539>
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P., 1996. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases.
- Fishburn, P.C., 1967. Letter to the Editor—Additive Utilities with Incomplete Product Sets: Application to Priorities and Assignments. *Operations Research* 15, 537–542.
<https://doi.org/10.1287/opre.15.3.537>
- Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G.S., Friday, A., 2021. The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns* 2, 100340. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>
- Gero, J.S., 1990. Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design.
- Ghosh, D., Olewnik, A., Lewis, K., Kim, J., Lakshmanan, A., 2017. Cyber-Empathic Design: A Data-Driven Framework for Product Design. *Journal of Mechanical Design* 139, 091401.
<https://doi.org/10.1115/1.4036780>
- Gill, P., Stewart, K., Treasure, E., Chadwick, B., 2008. Methods of data collection in qualitative research: interviews and focus groups. *Br Dent J* 204, 291–295.
<https://doi.org/10.1038/bdj.2008.192>
- Gordon, W. J. J., 1961. *Synergetics: The development of creative capacity*.
- Gorkovenko, K., Burnett, D.J., Thorp, J.K., Richards, D., Murray-Rust, D., 2020. Exploring The Future of Data-Driven Product Design, in: *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. pp. 1–14. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376560>
- Grossman, S. R., 1984. Brainstorming updated. *Training and Development Journal*, 38, 84-87
- Grote, M., Herstatt, C., Gemünden, H.G., 2012. Cross-Divisional Innovation in the Large Corporation: Thoughts and Evidence on Its Value and the Role of the Early Stages of Innovation: Cross-Divisional Innovation in the Large Corporation. *Creativity and Innovation Management* 21, 361–375. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2012.00652.x>

- Hatchuel, A., Weil, B., 2003. A New Approach of Innovative Design:
- Hausmann, M., Häfner, L., Kirchner, E., 2022. A Procedure Model for the Systematic Sensor Selection and Integration into Technical Systems. *Proc. Des. Soc.* 2, 445–454.
<https://doi.org/10.1017/pds.2022.46>
- Holler, M., Stoeckli, E., Uebernickel, F., Brenner, W., 2016. Towards Understanding closed-loop PLM: The Role of Product Usage Data for Product Development enabled by intelligent Properties 14.
- Hou, L., Jiao, R.J., 2020. Data-informed inverse design by product usage information: a review, framework and outlook. *J Intell Manuf* 31, 529–552. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01463-2>
- Huang, G.Q. (1996). Design for X : concurrent engineering imperatives.
- Huang, H., Ng, K.H., Bedwell, B., Benford, S., 2021. A card-based internet of things game ideation tool for museum context. *J Ambient Intell Human Comput* 12, 9229–9240.
<https://doi.org/10.1007/s12652-020-02627-2>
- Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Comput. Sci. Eng.* 9, 90–95.
<https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Isaksson, O., Eckert, C., 2020. Product Development 2040. The Design Society.
<https://doi.org/10.35199/report.pd2040>
- ISO 14040, 2006. Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre.
- ISO 9241-11, 2018. Ergonomie de l'interaction Homme-système — Partie 11 : Utilisabilité — Définitions et concepts.
- ISO/IEC 21823-1, 2019. Internet des objets (IoT) — Interopérabilité des systèmes IoT — Partie 1 : Cadre méthodologique.
- Internet des objets (IoT) — Interopérabilité des systèmes IoT — Partie 1: Cadre méthodologique.
- Jones, P.M., Lonne, Q., Talaia, P., Leighton, G.J.T., Botte, G.G., Mutnuri, S., Williams, L., 2018. A Straightforward Route to Sensor Selection for IoT Systems. *Research-Technology Management* 61, 41–50. <https://doi.org/10.1080/08956308.2018.1495965>
- Joshi, A.D., Gupta, S.M., 2019. Evaluation of design alternatives of End-Of-Life products using internet of things. *International Journal of Production Economics* 208, 281–293.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.12.010>
- Khan, R., Khan, S.U., Zaheer, R., Khan, S., 2012. Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges, in: 2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology. pp. 257–260. <https://doi.org/10.1109/FIT.2012.53>
- Kim, H. H. M., Liu, Y., Wang, C. C., and Wang, Y., 2017. Special Issue: Data-Driven Design (D3), *Journal of Mechanical Design* 139, 11. <https://doi.org/10.1115/1.4037943>
- Kirchner, E., Martin, G. and Vogel, S., 2018. Sensor Integrating Machine Elements. Key to In-Situ Measurements in Mechanical Engineering, in Schützer, K. (Ed.)

- Klein, P., van der Vegte, W.F., Hribernik, K., Klaus-Dieter, T., 2019. Towards an Approach Integrating Various Levels of Data Analytics to Exploit Product-Usage Information in Product Development. *Proc. Int. Conf. Eng. Des.* 1, 2627–2636. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.269>
- Klingenberg, C.O., Borges, M.A.V., Antunes Jr, J.A.V., 2019. Industry 4.0 as a data-driven paradigm: a systematic literature review on technologies. *JMTM* 32, 570–592. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0325>
- Koo, T.K., Li, M.Y., 2016. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine* 15, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Krathwohl, D.R., 2002. A Revision of Bloom’s Taxonomy: An Overview. *Theory Into Practice* 41, 212–218. https://doi.org/10.1207/s15430421tip4104_2
- Kugler, T., Kausel, E. E., & Kocher, M. G., 2012. Are groups more rational than individuals? A review of interactive decision making in groups. *Wiley interdisciplinary reviews: Cognitive science*, 3(4), 471-482. <https://doi.org/10.1002/wcs.1184>
- Labrinidis, A., Jagadish, H.V., 2012. Challenges and opportunities with big data. *Proc. VLDB Endow.* 5, 2032–2033. <https://doi.org/10.14778/2367502.2367572>
- Laney, D., 2001. 3-d data management: controlling data volume, velocity and variety. META Group Research Note.
- Lefevre, K., Totzauer, S., Bischof, A., Kurze, A., Storz, M., Ullmann, L., Berger, A., 2016. Loaded Dice: Exploring the Design Space of Connected Devices with Blind and Visually Impaired People, in: *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*. pp. 1–10. <https://doi.org/10.1145/2971485.2971524>
- Leopoldino, K.D.M., González, M.O.A., Ferreira, P. de O., Pereira, J.R., Souto, M.E.C., 2016. Creativity techniques: a systematic literature review. *Product (São Carlos, Online)* 14, 95–100. <https://doi.org/10.4322/pmd.2016.015>
- Li, J., Tao, F., Cheng, Y., Zhao, L., 2015. Big Data in product lifecycle management. *Int J Adv Manuf Technol* 81, 667–684. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7151-x>
- Li, X., Wang, Z., Chen, C.-H., Zheng, P., 2021. A data-driven reversible framework for achieving Sustainable Smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production* 279, 123618. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123618>
- Lützenberger, J., Klein, P., Hribernik, K., Thoben, K.-D., 2016. Improving Product-Service Systems by Exploiting Information From The Usage Phase. A Case Study. *Procedia CIRP* 47, 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.064>
- Lyra, A.K., Koskinen, K.M., 2016. The Ambivalent Characteristics of Connected, Digitised Products: Case Tesla Model S, in: *Lundh Snis, U. (Ed.), Nordic Contributions in IS Research*. Springer International Publishing, Cham, pp. 57–69. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43597-8_5

- Malmqvist, J., Edström, K., Rosén, A., 2020a. CDIO Standards 3.0 – Updates to the Core CDIOStandards.
- Malmqvist, J., Edström, K., Rosén, A., Hugo, R., Campbell, D., 2020b. Optional CDIO Standards: Sustainable Development, Simulation-Based Mathematics, Engineering Entrepreneurship, Internationalisation & Mobility.
- Marwedel, P., 2021. Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things, Embedded Systems. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60910-8>
- McComb, C., Boatwright, P., Cagan, J., 2023. Focus And Modality: Defining A Roadmap to Future Ai-Human Teaming In Design. Proc. Des. Soc. 3, 1905–1914. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.191>
- McCoy, J.M., Evans, G.W., 2002. The Potential Role of the Physical Environment in Fostering Creativity. Creativity Research Journal 14, 409–426. https://doi.org/10.1207/S15326934CRJ1434_11
- Meyer, M., Fichtler, T., Koldewey, C., Dumitrescu, R., 2022. Potentials and challenges of analyzing use phase data in product planning of manufacturing companies. AIEDAM 36, e14. <https://doi.org/10.1017/S0890060421000408>
- Mora, S., Gianni, F., Divitini, M., 2017. Tiles: A Card-based Ideation Toolkit for the Internet of Things, in: Proceedings of the 2017 Conference on Designing Interactive Systems. pp. 587–598. <https://doi.org/10.1145/3064663.3064699>
- Müller, R.M., Lenz, H.-J., 2013. Business Intelligence, eXamen.press. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35560-8>
- Nelson, B.A., Wilson, J.O., Rosen, D., Yen, J., 2009. Refined metrics for measuring ideation effectiveness. Design Studies 30, 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.07.002>
- Nižetić, S., Šolić, P., López-de-Ipiña González-de-Artaza, D., Patrono, L., 2020. Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. Journal of Cleaner Production 274, 122877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
- Okudan, G.E., Tauhid, S., 2008. Concept selection methods; a literature review from 1980 to 2008. IJDE 1, 243. <https://doi.org/10.1504/IJDE.2008.023764>
- Osborn, A. F., 1963. Applied imagination (2nd ed.). New York: Scribner
- Pagoropoulos, A., Pigosso, D.C.A., McAlloone, T.C., 2017. The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review. Procedia CIRP 64, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>
- Pahl, G., Wallace, K., Blessing, L., Pahl, G. (Eds.), 2007. Engineering design: a systematic approach, 3rd ed. ed. Springer, London.

- Paulus, P.B., Yang, H.-C., 2000. Idea Generation in Groups: A Basis for Creativity in Organizations. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 82, 76–87. <https://doi.org/10.1006/obhd.2000.2888>
- Peppard, J., and Ward, J., 2016. *The Strategic Management of Information Systems: Building a Digital Strategy*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Peters, D., Loke, L., Ahmadpour, N., 2021. Toolkits, cards and games – a review of analogue tools for collaborative ideation. *CoDesign* 17, 410–434. <https://doi.org/10.1080/15710882.2020.1715444>
- Pirson, T., Bol, D., 2021. Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production* 322, 128966. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128966>
- Porter, M. E., and Heppelmann, J. E., 2014. How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, 92(11), pp. 64–88.
- Porter, M. E., and Heppelmann, J. E., 2015. How smart, connected products are transforming companies. *Harvard Business Review*, 93(10), pp. 53–71.
- Pugh S., 1981. Concept selection: a method that works. In: Hubka, V. (ed.), *Review of design methodology*. Proceedings international conference on engineering design, March 1981, Rome. Zürich: Heurista, 1981, blz. 497 – 506.
- Rachinger, M., Rauter, R., Müller, C., Vorraber, W., Schirgi, E., 2019. Digitalization and its influence on business model innovation. *JMTM* 30, 1143–1160. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2018-0020>
- Raikar, M.M., Desai, P., Vijayalakshmi, M., Narayankar, P., 2018. Upsurge of IoT (Internet of Things) in engineering education: A case study, in: *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. pp. 191–197. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2018.8554546>
- Regtien, P.P., 2005. Selection of Sensors, in Sydenham, P.H. and Thorn, R. (Eds.), *Handbook of Measuring System Design*, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 778–780.
- Rijsdijk, S.A., Hultink, E.J., 2009. How Today's Consumers Perceive Tomorrow's Smart Products *. *Journal of Product Innovation Management* 26, 24–42. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2009.00332.x>
- Roy, R., Warren, J.P., 2019. Card-based design tools: a review and analysis of 155 card decks for designers and designing. *Design Studies* 63, 125–154. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2019.04.002>
- Rowe, P.G., 1987. *Design thinking*, Cambridge, MIT press
- Saaty, T.L., 1990. *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*.
- Sala, S., Ciuffo, B., Nijkamp, P., 2015. A systemic framework for sustainability assessment. *Ecological Economics* 119, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.015>

- Sarkar, P., Chakrabarti, A., 2007. Development of a Method For Assessing Design Creativity.
- Schmidt, A., van Laerhoven, K., 2001. How to build smart appliances? *IEEE Pers. Commun.* 8, 66–71. <https://doi.org/10.1109/98.944006>
- Schultze, U., Avital, M., 2011. “Designing Interviews to Generate Rich Data for Information Systems Research” *Information and Organization* 21 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.infoandorg.2010.11.001>
- Sethi, P., Sarangi, S.R., 2017. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2017, 1–25. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
- Shah, J.J., Smith, S.M., Vargas-Hernandez, N., 2003. Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies* 24, 111–134. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(02\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(02)00034-0)
- Shieh, J., Huber, J.E., Fleck, N.A., Ashby, M.F., 2001. The selection of sensors. *Progress in Materials Science* 46, 461–504. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00011-6)
- Smith, S.M., Ward, T.B., Schumacher, J.S., 1993. Constraining effects of examples in a creative generation task. *Mem Cogn* 21, 837–845. <https://doi.org/10.3758/BF03202751>
- Sowers, T.S., 2012. Systematic Sensor Selection Strategy (S4) User Guide.
- Stafford, S. P., 2009. Data, information, knowledge, and wisdom. In L. D. Kiel (Ed.), *Knowledge Management, Organizational Intelligence And Learning, And Complexity - Volume III* (pp. 179–203). Oxford: Eolss.
- Teikari, P., Najjar, R.P., Malkki, H., Knoblauch, K., Dumortier, D., Gronfier, C., Cooper, H.M., 2012. An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research. *Journal of Neuroscience Methods* 211, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2012.09.012>
- Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., Kiritsis, D., 2010. Product lifecycle management – from its history to its new role. *IJPLM* 4, 360. <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2010.036489>
- Tovey, M., 2015. *Developments In Design Pedagogy*.
- Transforma Insights, 2023. “ Current IoT Forecast Highlights ”. Available at: <https://transformainsights.com/research/forecast/highlights> [Accessed October 2023].
- Triantaphyllou, E., 2000. *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study, Applied Optimization*. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>
- Troilo, G., De Luca, L.M., Guenzi, P., 2017. Linking Data-Rich Environments with Service Innovation in Incumbent Firms: A Conceptual Framework and Research Propositions: *Service Innovation In Data-Rich Environments*. *J Prod Innov Manag* 34, 617–639. <https://doi.org/10.1111/jpim.12395>
- Tversky, A., Kahneman, D., 1974. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124–1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- Ullman, D. G., 1992. *The mechanical design process*, Vol. 2. New York: McGraw-Hill.
- Ullman, D.G., 2010. *The mechanical design process*, 4th ed. ed, McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill Higher Education, Boston.

- Vallat, R., 2018. Pingouin: statistics in Python. *JOSS* 3, 1026. <https://doi.org/10.21105/joss.01026>
- van der Vegte, W.F., Kurt, F., Şengöz, O.K., 2019. Simulations Based on Product-Usage Information From Connected Products to Support Redesign for Improved Performance: Exploration of Practical Application to Domestic Fridge-Freezers. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 19, 031003. <https://doi.org/10.1115/1.4042537>
- van Eck, M.L., Markslag, E., Sidorova, N., Brosens-Kessels, A., van der Aalst, W.M.P., 2019. Data-Driven Usability Test Scenario Creation, in: Bogdan, C., Kuusinen, K., Lárusdóttir, M.K., Palanque, P., Winckler, M. (Eds.), *Human-Centered Software Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp. 88–108. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05909-5_6
- van Eck, M.L., Sidorova, N., van der Aalst, W.M.P., 2016. Enabling process mining on sensor data from smart products, in: 2016 IEEE Tenth International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS). pp. 1–12. <https://doi.org/10.1109/RCIS.2016.7549355>
- Van Gundy, A.B., 2005. 101 activities for teaching creativity and problem solving. San Francisco, CA: John Wiley & Sons.
- Vermesan, O., Eisenhauer, M., Serrano, M., Guillemin, P., Sundmaeker, H., Tragos, E.Z., Valiño, J., Copigneaux, B., Presser, M., Aagaard, A., Bahr, R., Darmois, E.C., 2022. The Next Generation Internet of Things – Hyperconnectivity and Embedded Intelligence at the Edge, in: *Next Generation Internet of Things – Distributed Intelligence at the Edge and Human-Machine Interactions*. River Publishers, New York, pp. 19–102. <https://doi.org/10.1201/9781003338963-3>
- Villasalero, M., 2018. Multi-Business Firms, Knowledge Flows and Intra-Network Open Innovations. *J Knowl Econ* 9, 162–179. <https://doi.org/10.1007/s13132-015-0330-z>
- Vitali, I., Rognoli, V., Arquilla, V., 2016. Mapping the IoT: Co-design, Test and Refine a Design Framework for IoT Products, in: *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*. pp. 1–3. <https://doi.org/10.1145/2971485.2987681>
- Weinberger, M., Bilgeri, D., Fleisch, E., 2016. IoT business models in an industrial context. *at - Automatisierungstechnik* 64, 699–706. <https://doi.org/10.1515/auto-2016-0054>
- Wilberg, J., Lau, K., Nützel, T., Hollauer, C., Omer, M., 2018. Development of a Catalogue Supporting Idea Generation for Internet of Things Use Cases. pp. 1453–1464. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0215>
- Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods.
- Yannou, B., 2015. Supporting need seeker innovation: the Radical Innovation Design methodology. Presented at the International Conference on Engineering Design (ICED), Milano, Italy, p. 10.
- Yoo, Y., Henfridsson, O., Lyytinen, K., 2010. The New Organizing Logic of Digital Innovation: An Agenda for Information Systems Research. *Information Systems Research* 21, 724–735. <https://doi.org/10.1287/isre.1100.0322>

- Yu, C., Zhu, L., 2016. Product design pattern based on big data-driven scenario. *Advances in Mechanical Engineering* 8, 168781401665680. <https://doi.org/10.1177/1687814016656805>
- Zheng, P., Lin, T.-J., Chen, C.-H., Xu, X., 2018. A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production* 201, 657–667. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.101>
- Zheng, P., Xu, X., Chen, C.-H., 2020. A data-driven cyber-physical approach for personalised smart, connected product co-development in a cloud-based environment. *J Intell Manuf* 31, 3–18. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1430-y>

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Processus de la <i>Design Research Method</i> (adaptée de Blessing et Chakrabarti, 2009)	8
Figure 2 Vue globale de la structure de la thèse	11
Figure 3 Plan du chapitre « Contexte »	13
Figure 4 Capacités des produits intelligents et connectés (adaptée de Porter et Heppelmann, 2014).....	15
Figure 5 Nombre d'appareils connectés dans le monde de 2019 à 2023 et prévisions de 2024 à 2030 (en milliards) (Transforma Insights, 2023)	20
Figure 6 Périmètre des travaux de thèse.....	23
Figure 7 Processus de <i>Systematic Design</i> (adaptée de Pahl et Beitz, 2007)	24
Figure 8 Processus de <i>Design Thinking</i> (adaptée de Design Council UK, 2005).....	26
Figure 9 Enjeux de la conception amont de produits (adaptée de Blanchard et Fabrycky, 2006)	27
Figure 10 Modélisation de l'architecture IoT (adaptée de Khan et al., 2012)	29
Figure 11 Modélisation de l'architecture IoT et des créations de valeurs induites (adaptée de Weinberger et al., 2016).....	30
Figure 12 Sources des données pouvant informer la conception	32
Figure 13 Concepts d'exploration des données (adaptée de Muller et Lenz, 2013)	33
Figure 14 Axes de recherche du LCPI et positionnement de la thèse.....	35
Figure 15 Plan du chapitre « État de l'art ».....	40
Figure 16 Illustration de la structure de la section 2.1	42
Figure 17 Cas d'étude sur l'usage des données captées pour renseigner la conception de produits positionnés selon l'approche systématique de Pahl et Beitz (2007)	45
Figure 18 Approches de choix et de sélection des capteurs identifiées	48
Figure 19 Structure du workshop académique	53
Figure 20 Structure des entretiens industriels	57
Figure 21 Constats relatifs aux enjeux de la conception et des données captées.....	65
Figure 22 Plan du chapitre « Problématique, hypothèse et proposition d'une méthode outillée »	71
Figure 23 Illustration de la partie « applications » d'une fiche technique d'un capteur embarqué (adaptée de Bosch Sensortec, 2022).....	78

Figure 24 Processus illustré de construction de l’outil d’exploration	79
Figure 25 Proposition d’une illustration des capacités de détection	81
Figure 26 Illustration du processus de la phase d’exploration	82
Figure 27 Modélisation proposée pour la phase de sélection.....	91
Figure 28 Illustration du processus de la phase d’exploration	94
Figure 29 Plan du chapitre « Expérimentations »	97
Figure 30 Protocole expérimental pour évaluer l’approche d’exploration de la méthode DfSDI	99
Figure 31 Questionnaire évaluant d’utilisabilité de la phase d’exploration, d’après Cherry et Latulipe (2014).....	102
Figure 32 Détails des 14 capacités de détection sous forme de cartes en bois	104
Figure 33 Participants utilisant l’outil d’exploration pour générer des concepts de solutions	105
Figure 34 Notes attribuées par les juges à la nouveauté et à la qualité des concepts générés avec et sans l’outil d’exploration.....	109
Figure 35 Notes attribuées à l’utilisabilité de la phase d’exploration par les participants	111
Figure 36 Illustration du protocole d’expérimentation de la solidité scientifique et de l’utilité de la phase de sélection de la méthode DfSDI.....	116
Figure 37 Illustration du protocole d’expérimentation de l’utilisabilité de la phase de sélection de la méthode DfSDI.....	118
Figure 38 Questionnaire évaluant l’utilisabilité de la seconde partie de la méthode DfSDI .	120
Figure 39 Participants pendant le workshop de sélection des concepts	124
Figure 40 Notes attribuées à la solidité scientifique et à l’utilité de la phase de sélection par les experts	125
Figure 41 Notes attribuées à l’utilisabilité de la phase de sélection par les participants	126
Figure 42 Évaluation des connaissances sur les usages des données captées basée sur la taxonomie de Bloom	132
Figure 43 Évaluation des connaissances sur la soutenabilité des données captées basée sur la taxonomie de Bloom	133
Figure 44 Protocole d’expérimentation de l’approche pédagogique d’exploration	133
Figure 45 Protocole d’expérimentation de l’approche pédagogique de sélection	135
Figure 46 Table de travail d’un groupe d’étudiants pendant l’expérimentation pédagogique d’exploration	137

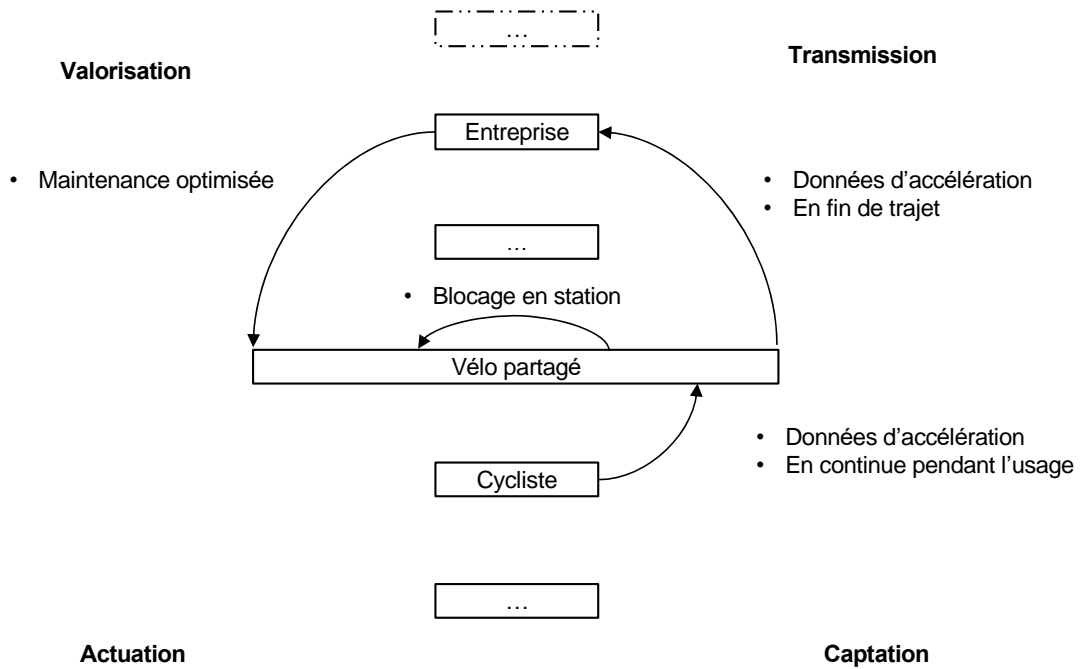
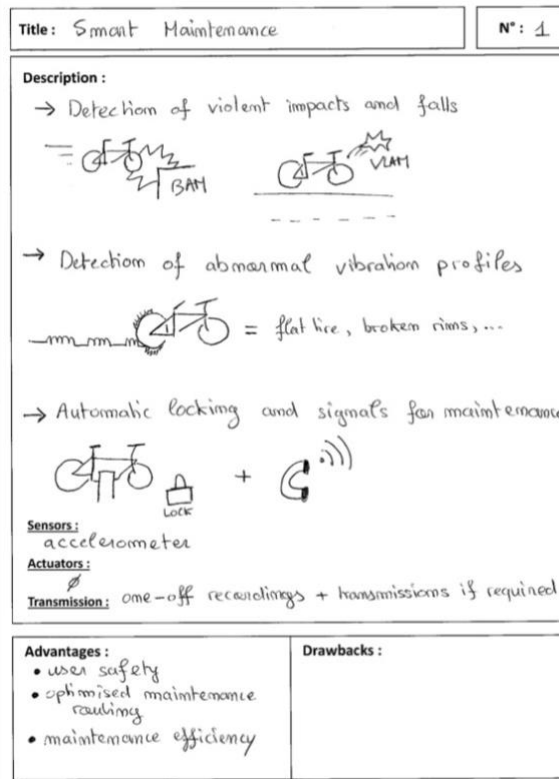
Figure 47 Table de travail d'un groupe d'étudiants pendant l'expérimentation pédagogique de sélection.....	138
Figure 48 Résultats témoignant de l'évolution de chacune des compétences de réflexion avant et après la mise en place du protocole pédagogique d'exploration.....	140
Figure 49 Résultats témoignant de l'évolution de chacune des compétences de réflexion avant et après la mise en place du protocole pédagogique de sélection	141
Figure 50 Plan du chapitre « Apports et limites ».....	147
Figure 51 Plan du chapitre « Conclusion et perspectives ».....	157
Figure 52 Travaux en cours : utilisation de l'outil comme support à une expérimentation en réalité virtuelle.....	164

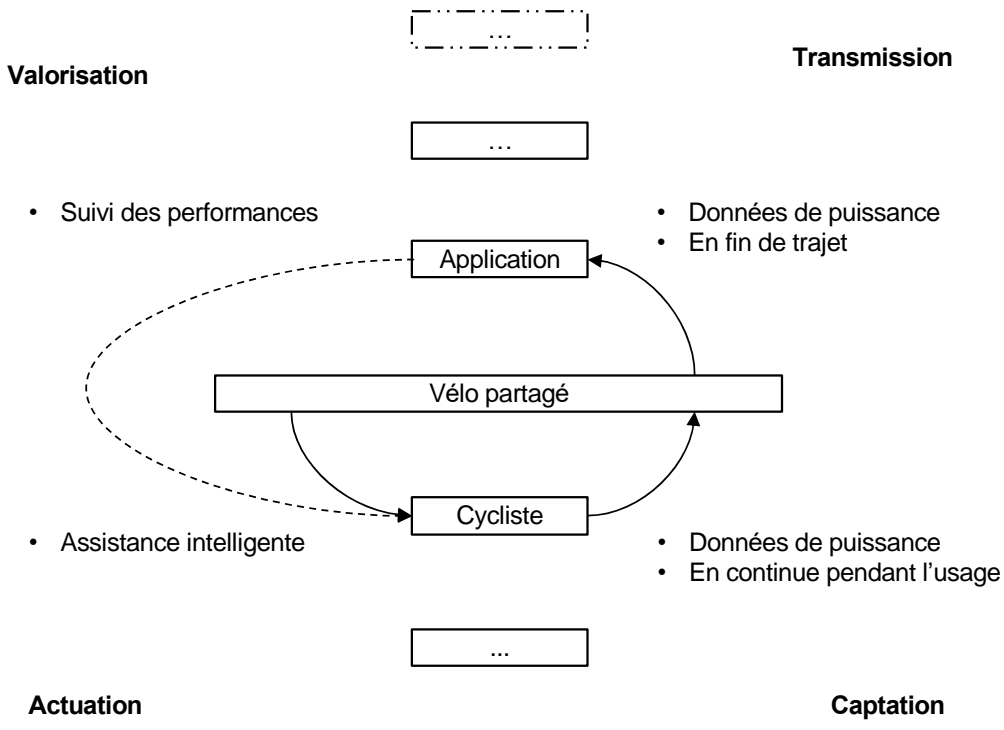
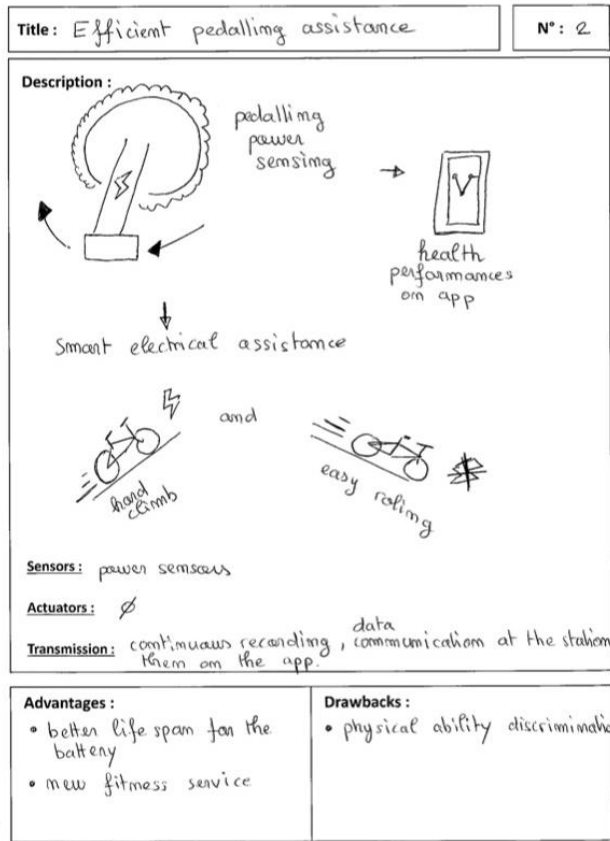
LISTES DES TABLEAUX

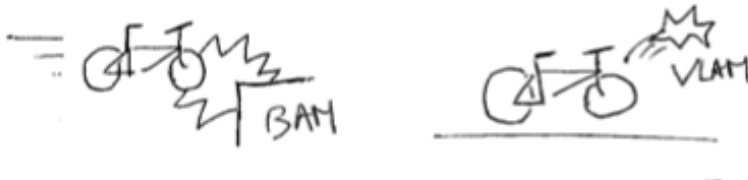
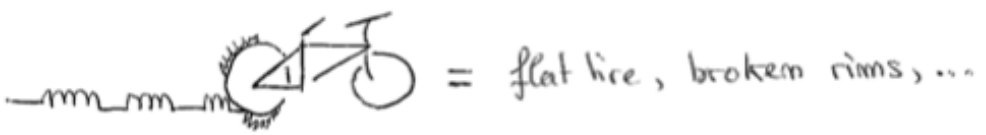

Tableau 1 Acteurs académiques nationaux	36
Tableau 2 Acteurs académiques internationaux	37
Tableau 3 Enjeux identifiés et références bibliographiques associées	52
Tableau 4 Enjeux identifiés lors du workshop et leur priorité	55
Tableau 5 Profils des entreprises et des répondants à la campagne d'entretiens	59
Tableau 6 Enjeux relatifs aux méthodes et à l'expertise	60
Tableau 7 Enjeux relatifs aux coûts des données captées	62
Tableau 8 Enjeux relatifs à l'interprétation des données captées	63
Tableau 9 Profils des entreprises prises en compte pour la conception de l'outil	77
Tableau 10 Exemples d'applications tirés des fiches techniques des capteurs, regroupés en fonction des capacités de détection communes	80
Tableau 11 Profils des participants à l'expérimentation	103
Tableau 12 Arbre représentant la variété des concepts générés pour les deux sujets avec et sans l'outil d'exploration.....	106
Tableau 13 Évaluation de la quantité et de la variété des concepts générés au cours de l'expérimentation	107
Tableau 14 Profils des juges qui ont évalué les concepts générés	108
Tableau 15 Résultats des tests statistiques pour les notes de nouveauté et de qualité	109
Tableau 16 Profils des experts interrogés pour l'évaluation de l'approche d'aide à la décision	121
Tableau 17 Résultats des tests statistiques de l'expérimentation de l'approche d'exploration	140
Tableau 18 Résultats des tests statistiques de l'expérimentation de l'approche de sélection	142
Tableau 19 Apports abordés dans le chapitre « Apports et limites »	146

ANNEXES

Annexe 1 Deux exemples d'usage de la modélisation proposée par la phase de sélection



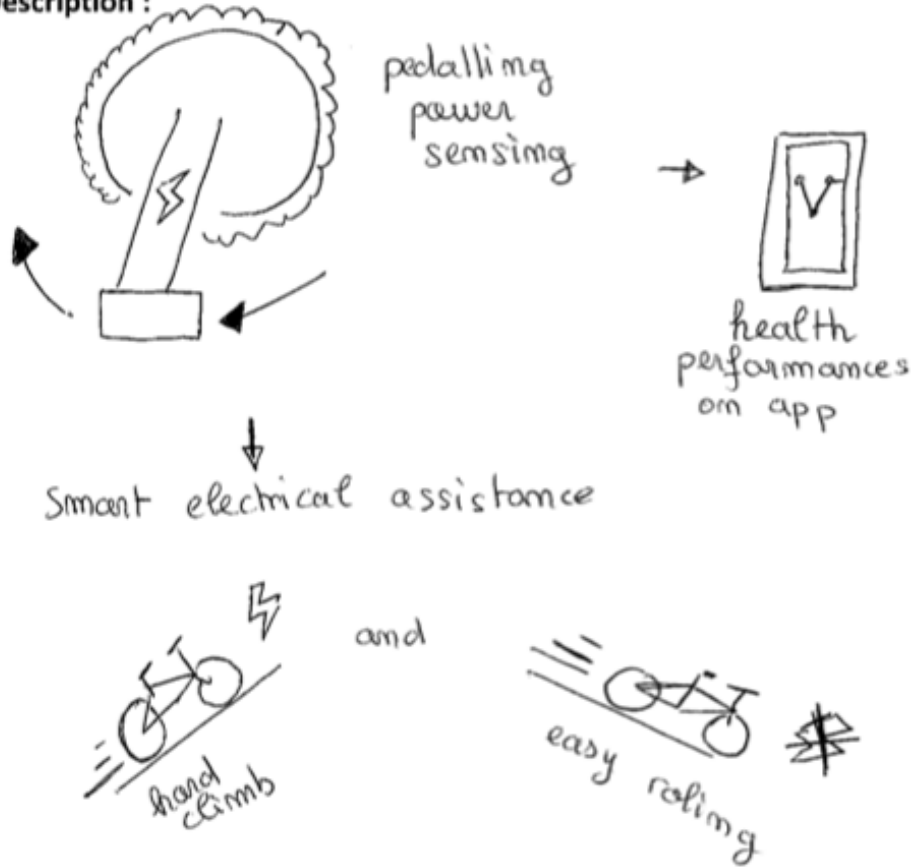


<p>Title: Smart Maintenance</p>	<p>N°: 1</p>
<p>Description :</p> <p>→ Detection of violent impacts and falls</p>  <p>→ Detection of abnormal vibration profiles</p>  <p>→ Automatic locking and signals for maintenance</p>  <p>Sensors: accelerometer</p> <p>Actuators: ∅</p> <p>Transmission: one-off recordings + transmissions if required</p>	
<p>Advantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • user safety • optimised maintenance routing • maintenance efficiency 	<p>Drawbacks :</p>

Title: Efficient pedalling assistance

N°: 2

Description:



Sensors: power sensors

Actuators: ∅

Transmission: continuous recording, data communication at the station them on the app.

Advantages:

- better life span for the battery
- new fitness service

Drawbacks:

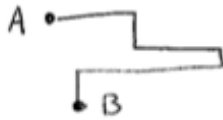
- physical ability discrimination

Title: Learning individual / collective routing

N°: 3

Description :

→ individual routes



learning about recurring habits

=

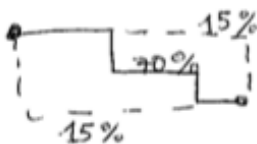


suggest alternatives via app if road works or traffic jam



weather warning via app

→ collective routes



learning about popular routes

↓

urban development proposals to city authorities

Sensors: GPS

Actuators: ∅

Transmission: continuous recording, data communication at the station

Advantages :

- user security and comfort
- developing cycling in cities

Drawbacks :

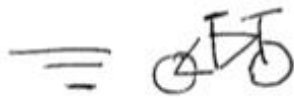
- sensitive data for privacy

Title: Prevention and user safety

N°: 4

Description :

→ dangerous riding style detection



excessive speed



inappropriate usage



sharp turning

and other...

=



warnings and prevention about risks

Sensors: Accelerometers

Actuators: ∅

Transmission: one-off recordings, data communication at the station then on the app

Advantages :

- safety prevention
- peaceful cycling
- bicycle lifespan

Drawbacks :

- user surveillance feeling

Annexe 3 Modélisation et évaluation à remplir lors de l'expérimentation de la phase de sélection

Title:	N°:
---------------	------------

1. Model:

Valorisation

- Value creation

Transmission

- Data type
- Frequency

Actuation

- Value creation

Captation

- Data type
- Frequency

2. Contribution:	<p>Positive</p> <p><i>Financial = ... /5</i></p> <p><i>Environmental = ... /5</i></p> <p><i>Social = ... /5</i></p>	<p>Negative</p> <p><i>Financial = ... /5</i></p> <p><i>Environmental = ... /5</i></p> <p><i>Social = ... /5</i></p>
-------------------------	--	--

3. Conclusion	<p style="text-align: center;"><i>Apply the weighting you have chosen for the three sustainability criteria</i></p> <p><i>Global_{positive} = ... /5</i> <i>Global_{negative} = ... /5</i></p>
----------------------	---

TRISTAN BRIARD

Des données captées aux créations de valeurs : proposition d'une méthode outillée pour structurer la conception amont des produits intelligents et connectés

Résumé : Les récentes avancées des technologies de l'information et de la communication ainsi que celles des sciences des données ont permis le développement des produits intelligents et connectés. Ils sont dotés de capacités nouvelles et créatrices de valeurs à la fois pour l'utilisateur et le fabricant. Ces évolutions induisent un important changement de paradigme. Pour intégrer pleinement les potentiels des produits intelligents et connectés, les industriels doivent adopter de nouveaux processus, en particulier lors de leurs conceptions. En effet, les choix des données pouvant être captées par le produit lors de sa conception définissent les créations de valeurs potentielles pour le reste de son cycle de vie. L'objectif de ces travaux de thèse est donc de formaliser une structure méthodologique pour guider les concepteurs dans l'intégration des créations de valeurs basées sur les données captées. Afin de proposer une méthode pertinente et efficace, une exploration des enjeux relatifs à la conception et aux données captées est d'abord réalisée. Sur la base des enjeux identifiés, une méthode est ensuite construite. Elle est structurée en deux phases chacune soutenue par un outil dédié. La première phase est une phase de créativité permettant de générer systématiquement des potentielles créations de valeurs basées sur les données captées. La seconde est une phase de prise de décision permettant de classer systématiquement, sur des critères de soutenabilité, les créations de valeurs précédemment générées. Plusieurs expérimentations ont permis de valider la pertinence et l'efficacité de la proposition méthodologique. Au travers de la méthode et de ses outils, ces travaux de thèse participent à la recherche scientifique et industrielle accompagnant le changement de paradigme induit par les technologies du numérique dans la conception de produit.

Mots-clés : Conception pour les données, Conception amont, Produit connecté, Produit intelligent, Créativité, Aide à la décision

Abstract: Recent advances in information and communication technologies and data science have led to the development of smart connected products. These products have new capabilities that create value for both the user and the manufacturer. These developments are leading to a major paradigm shift. To take full advantage of the potential of smart and connected products, manufacturers need to adopt new processes, especially in the design phase. Indeed, the choice of data that can be captured by the product at the design stage defines the potential value creation for the rest of its life cycle. The aim of this thesis is therefore to formalise a methodological structure to guide designers in the integration of value creation based on captured data. To propose a relevant and effective method, the author first explore the challenges related to product design and captured data. Based on the challenges identified, a method is then constructed. It is structured in two phases, each supported by a dedicated tool. The first phase is a creativity phase that systematically generates potential value creation based on captured data. The second phase is a decision-making phase in which the previously generated value creations are systematically ranked according to sustainability criteria. Experiments have validated the relevance and effectiveness of the proposed methodology. Through the method and its tools, this thesis work contributes to scientific and industrial research supporting the paradigm shift brought by digital technologies in product design.

Keywords: Design for Data; Early Design; Connected Product; Smart Product; Creativity; Decision-Making