

2019-ENAM-0025

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Conception "

présentée et soutenue publiquement par

Kévin Audoux

2 Juillet 2019

**PROPOSITION D'UN PROCESSUS D'ÉVALUATION
MULTIDOMAINNE POUR AMÉLIORER
LA CONCEPTION DE PRODUIT**

Directeur de thèse : **Améziane AOUSSAT**

Co-encadrement de la thèse : **Olivier KERBRAT & Frédéric SEGONDS**

Jury

M. Pierre LAGARRIGUE , Professeur des Universités, ICA, Université Champollion, Albi	Rapporteur
M. Bertrand ROSE , Professeur des Universités, Icube, Université de Strasbourg, Strasbourg	Rapporteur
Mme. Stéphanie BUISINE , Professeur, École d'Ingénieurs du CESI, Nanterre	Examineur
M. Philippe VERON , Professeur des Universités, LISPEN, Arts et Métiers ParisTech, Aix en Provence	Examineur
M. Améziane AOUSSAT , Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers ParisTech, Paris	Examineur
M. Olivier KERBRAT , Maître de Conférences, GeM, ENS Rennes, Rennes	Examineur
M. Frédéric SEGONDS , Maître de Conférences HDR, LCPI, Arts et Métiers ParisTech, Paris	Examineur

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux membres de mon jury de thèse. Merci, à Messieurs Pierre LAGARRIGUE et Bertrand ROSE d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ces travaux. Merci ensuite à Monsieur Philippe VERON de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Enfin je remercie Madame Stéphanie BUISINE d'avoir accepté d'être l'examineur de cette thèse.

Je tiens ensuite à remercier mon directeur de thèse Améziane AOUSSAT pour ses conseils avisés et pour la confiance qu'il m'a accordé durant ces 3 années. Je n'oublie pas mes encadrant Frédéric SEGONDS et Olivier KERBRAT. Merci à vous d'avoir permis cette collaboration entre Paris et Rennes, mais surtout d'avoir réussi à me pousser à réaliser ce travail de thèse malgré des hauts et des bas.

Je n'oublie pas non plus les membres du LCPI avec qui les discussions ont été constructives notamment lors de ces fameuses réunions de travail de GTT et plus particulièrement mon fidèle acolyte Oussama qui a suivi la même route en même temps. Sans Oublier Paolo Chiabert et Gianluca D'Antonio pour leur accueil à Turin lors de ces deux séjours de travail. Merci également à tous les étudiants qui ont pris le temps de participer aux différents projets qui ont permis d'expérimenter lors de ce travail de thèse.

Pour terminer, merci à toute ma famille et à tous les amis de m'avoir soutenu dans ce long projet et plus en particulier à toi Estelle de m'avoir soutenu tous les jours et d'avoir été mon coach au quotidien malgré une motivation en dents de scie et certains passages à vide.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	2
1. Introduction	7
1.1 Objectif des travaux	7
1.2 Structure du document	8
1.2.1 Chapitre 2 : Contexte, verrous et positionnement scientifiques	8
1.2.2 Chapitre 3 : État de l'art	8
1.2.3 Chapitre 4 : Problématique et hypothèses	9
1.2.4 Chapitre 5 : Méthodologie proposée	9
1.2.5 Chapitre 6 : Contexte d'application et expérimentations	9
1.2.6 Chapitre 7 : Conclusion et perspectives	10
2. Contexte, verrous et positionnement scientifiques	11
2.1 Contexte général	11
2.1.1 Génie industriel	11
2.1.2 Sciences de la conception	12
2.1.3 Nouveau domaine dans la conception	15
2.1.4 Conception amont	16
2.1.5 Évaluation des performances	17
2.2 Synthèse et verrou scientifique	17
2.3 Positionnement scientifique	19
2.3.1 Le laboratoire LCPI	19
2.3.2 Le laboratoire GeM	20
2.3.3 Positionnement national et international	21
3. État de l'art	24
3.1 La diversité des processus de conception	25
3.1.1 Exemple de processus de conception	26
3.1.2 Des représentations intermédiaires à un processus de conception simplifié	34
3.2 La complexité des étapes d'évaluation	37
3.3 L'intégration de multiples domaines de compétence dans le processus de conception ..	40
3.3.1 DfX	40

3.3.2	Design for additive manufacturing (DFAM).....	41
3.3.3	Design with Additive manufacturing (DWAM)	42
3.3.4	Design for Sustainability (DfS)-Environment (DfE)	43
3.4	La performance, une notion aux multiples définitions.....	45
3.4.1	Définition de la performance en innovation	46
3.4.2	Définition de la performance en développement durable.....	50
3.4.3	Définition de la performance en fabrication additive	52
3.4.4	Définition d'une performance d'un produit et d'une représentation intermédiaire	54
3.5	Synthèse de l'état de l'art	55
4.	<i>Problématique et hypothèses</i>	<i>57</i>
4.1	Définition de la problématique	57
4.2	Proposition méthodologique et hypothèses.....	58
4.2.1	Hypothèse 1 : Le processus proposé permet d'évaluer et d'améliorer la performance multidomaine	61
4.2.2	Hypothèse 2 : L'outil d'évaluation multidomaine permet d'obtenir une évaluation proche des experts 61	
4.2.3	Hypothèse 3 : Les informations lors des phases d'évaluation permettent d'utiliser des méthodes de recommandation	61
5.	<i>Méthodologie proposée</i>	<i>63</i>
5.1	Création de l'outil d'évaluation « MDET »	65
5.1.1	Étape 0.1 : Recherche d'outils	67
5.1.2	Étape 0.2 : Évaluation des outils.....	67
5.1.3	Étape 0.3 : Sélection des outils.....	70
5.1.4	Étape 0.4 : Création du MultiDisciplinary Evaluation Tool	71
5.2	Étape 1 : Évaluation des outils.....	75
5.2.1	Déroulement de l'évaluation.....	75
5.2.2	Résultats de l'évaluation	77
5.3	Étape 2 : Analyse.....	78
5.4	Étape 3 : DfX	82
5.5	Étape 4 : Amélioration	84
5.6	Étape 5 : Réévaluation	84
5.7	Étape 6 : Comparaison	84

5.8	Positionnement de la méthodologie proposée	86
6.	Contexte d'application et expérimentations	89
6.1	Contexte de l'application	90
6.1.1	L'innovation	90
6.1.2	L'impact environnemental.....	91
6.1.3	La fabrication additive	96
6.2	Expérimentation 0 : validation du besoin d'outil multidomaine	101
6.2.1	Objectif	101
6.2.2	Protocole	101
6.2.3	Critères de validation	102
6.2.4	Résultats	103
6.2.5	Analyse et conclusion de l'expérimentation 0.....	105
6.3	Expérimentation 1 : validation de la méthode de sélection des outils permettant la création de l'outil MDET.....	106
6.3.1	Objectif	106
6.3.2	Protocole	107
6.4	Création de l'outil d'évaluation	110
6.4.1	Identification du panel d'outils.....	111
6.4.2	Évaluation des outils.....	112
6.4.3	Sélection des outils.....	113
6.4.4	Description de l'outil d'évaluation	125
6.5	Évaluation.....	126
6.6	Expérimentation 2 : validation de l'outil d'évaluation multidomaine	129
6.6.1	Objectif	129
6.6.2	Protocole	129
6.6.3	Critères de validation	130
6.6.4	Résultats :	130
6.6.5	Conclusion de l'expérimentation.....	134
6.7	Analyse	136
6.8	DfX : recommandation de conception	138
6.9	Amélioration.....	145
6.10	Réévaluation.....	146
6.11	Comparaison.....	147

6.12	Synthèse du cas d'application	148
6.13	Expérimentation 3 : validation du déroulement de la méthodologie proposée.....	149
6.13.1	Objectif	149
6.13.2	Protocole	149
6.13.3	Critères de validation.....	150
6.13.4	Résultat.....	151
6.13.5	Conclusion de l'expérimentation	152
6.14	Conclusion générale des expérimentations	153
7.	<i>Conclusion et perspectives.....</i>	<i>155</i>
7.1	Synthèse des apports scientifiques.....	155
7.2	Perspectives.....	158
7.2.1	Perspectives de développement	158
7.2.2	Perspectives de recherche.....	159
	<i>Production scientifique</i>	<i>161</i>
	Conférence nationale	161
	Conférence internationale.....	161
	Revue scientifique internationale.....	161
	<i>Bibliographie</i>	<i>163</i>
	<i>Table des figures.....</i>	<i>170</i>
	<i>Table des tableaux.....</i>	<i>172</i>
	<i>Liste des abréviations et des acronymes.....</i>	<i>173</i>
	<i>Annexes.....</i>	<i>175</i>

1. Introduction

Ce mémoire constitue la synthèse des travaux de thèse réalisées à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, au sein du Laboratoire de Conception Produits et Innovation sous la direction du professeur Améziane Aoussat (LCPI) et co-encadrée par Frédéric Segonds (LCPI) et Olivier Kerbrat (ENS Rennes, laboratoire GeM).

1.1 Objectif des travaux

Ce travail de thèse s'intéresse aux méthodes d'évaluation dans le processus de conception, c'est-à-dire aux phases s'intéressant à la sélection des représentations intermédiaires du produit. Ces phases d'évaluation sont de plus en plus difficiles. En effet, la concurrence industrielle incite les entreprises à développer de nouveaux produits. Ces dernières sont soumises à de plus en plus de contraintes issues de différents acteurs du processus de conception (consommateurs, fabricants), mais aussi liées aux diverses évolutions (réglementations, technologies). Ces contraintes se traduisent par l'intégration de nouveaux domaines ou l'évolution de domaines existants dans le processus de conception. L'objectif de ces travaux est donc de formaliser une méthode permettant l'évaluation multidomaine (c'est-à-dire s'intéressant à plusieurs domaines simultanément) dans le processus de conception.

Cette intégration nécessite une approche méthodologique afin de s'assurer de la bonne compréhension et la bonne interprétation de ces multiples domaines. En effet, les différents domaines, qu'ils soient issus de l'évolution de la conception ou des acteurs du processus, nécessitent des connaissances qui ne sont pas forcément adaptées aux processus de conception (c'est le cas notamment de la fabrication additive ou des considérations environnementales, qui sont deux domaines pour lesquels les connaissances associées sont encore en cours de maturation scientifiques et sont encore difficilement intégrées dans les processus de conception).

Cette thèse aura comme objectif de répondre à la problématique suivante : comment les phases d'évaluation dans un processus de conception multidomaine peuvent-elles permettre d'accroître les performances du produit à partir des représentations intermédiaires ? Les apports de ce travail de thèse sont la formalisation, sous forme méthodologique, de l'intégration de méthode d'évaluation dans le processus de conception. Cette méthodologie s'appuie sur deux apports distincts :

- Une méthodologie permettant de formaliser et d'améliorer le processus créatif ;
- Une méthodologie permettant de créer un outil d'évaluation adaptée à l'étape du processus de conception concerné et aux domaines étudiés.

Ces apports sont formalisés via la création de la méthodologie et sont démontrés via l'application de cette méthodologie aux domaines de l'environnement, l'innovation et la fabrication additive.

1.2 Structure du document

Ce manuscrit de thèse s'articule autour de six chapitres s'ajoutant à la présente introduction.

1.2.1 Chapitre 2 : Contexte, verrous et positionnement scientifiques

Nous verrons dans ce chapitre le positionnement de ce travail vis-à-vis de la communauté scientifique du génie industriel, ainsi que la position de ces travaux dans les sciences de la conception. Ainsi nous aborderons l'intégration de nouveaux domaines dans le processus de conception et plus particulièrement comment sont assimilés les principes de considération environnementale, d'innovation et de fabrication additive.

De ce contexte nous identifierons ainsi les verrous scientifiques de notre travail ainsi que son positionnement dans les domaines d'expertise des laboratoires qui encadrent cette thèse.

1.2.2 Chapitre 3 : État de l'art

L'état de l'art de ce travail est décomposé en quatre sections :

La première section présente les caractéristiques permettant de définir et distinguer les méthodologies et méthodes de conception. Ainsi nous pourrions proposer une classification des acteurs méthodologiques du processus de conception utilisés au cours de ce manuscrit. À l'issue de cette classification, nous nous concentrerons sur les méthodologies et méthodes de conception. Cette étude des méthodologies de conception permet de définir la notion de représentation intermédiaire dans le processus de conception. En effet l'étude des processus de conception montre une très grande diversité dans la structure et la définition des étapes. L'étude de la littérature définit un modèle de processus de conception. La définition des représentations intermédiaires clés nous permet d'identifier les étapes du processus de conception défini dans ce manuscrit.

Une fois le processus de conception défini, l'intégration du processus créatif est discutée dans la troisième section. En effet, la création des représentations intermédiaires suit différentes étapes dans le processus créatif. La définition du modèle de ce processus nous permet de positionner la phase d'évaluation, qui sera centrale dans ce travail.

La troisième section s'intéresse à l'apport de nouveaux domaines d'expertise dans le processus de conception et plus particulièrement aux méthodes dérivées de la méthodologie du *design for X*. Cette méthode permet d'intégrer des connaissances nouvelles dans le processus de conception.

La quatrième section de l'état de l'art s'intéresse à la notion de performance. En effet, ce travail nécessite une évaluation de performance multidomaine, mais la notion de performance est très connectée au domaine dans lequel elle est étudiée. Nous définissons ainsi les termes de performances pour les trois domaines qui nous intéressent dans ce travail et discutons des méthodes disponibles dans la littérature pour les évaluer dans le processus de conception.

Enfin la dernière section est consacrée à l'établissement des constats qui vont formaliser la problématique.

1.2.3 Chapitre 4 : Problématique et hypothèses

Ce chapitre est consacré à l'établissement de la problématique de ce travail de thèse. La problématique « Comment les phases d'évaluation dans un processus de conception multidomaine peuvent-elles permettre d'accroître les performances du produit à partir des représentations intermédiaires ? » est énoncée et décryptée. Une méthodologie est alors proposée et des hypothèses sont énoncées, qui mèneront à l'élaboration des expérimentations qui viendront les valider ou en préciser les limites.

1.2.4 Chapitre 5 : Méthodologie proposée

Ce chapitre présente la structure de la méthodologie proposée pour les phases d'évaluation du processus de conception ainsi que les différentes méthodes de conception développées pour chaque étape de la méthodologie. Elle a pour caractéristique d'être générique, c'est-à-dire applicable pour l'intégration de n'importe quel domaine dans le processus de conception. Les sept étapes de la méthodologie sont décrites une par une dans ce chapitre.

1.2.5 Chapitre 6 : Contexte d'application et expérimentations

Une fois la méthodologie développée, des expérimentations ont été réalisées afin de valider les différentes étapes intermédiaires de la méthodologie. Une fois les étapes intermédiaires

validées, nous avons appliqué la méthodologie à un contexte particulier, c'est-à-dire l'application à l'innovation, l'impact environnemental et la fabrication additive pour les phases amont de conception. Une dernière expérimentation est réalisée afin de valider la méthodologie complète. Ce cinquième chapitre présente ces expérimentations et les analyses qui en découlent.

1.2.6 Chapitre 7 : Conclusion et perspectives

Dans ce dernier chapitre, nous énonçons les apports de ce travail, c'est-à-dire que nous dressons la synthèse des résultats scientifiques de ce travail de thèse. Les perspectives de ce travail sont également mentionnées.

2. Contexte, verrous et positionnement scientifiques

Dans ce chapitre nous allons positionner nos travaux de thèse par rapport à la communauté scientifique du génie industriel d'une part, et par rapport aux axes des laboratoires qui encadrent cette thèse c'est-à-dire les laboratoires LCPI et GeM d'autre part et les laboratoires nationaux et internationaux.

Nous nous concentrerons sur l'identification des verrous scientifiques de notre travail tout au long de ce contexte.

2.1 Contexte général

2.1.1 Génie industriel

La définition communément admise de « génie industriel » (industrial engineering ou engineering management) est proposée par l'Institute of Industrial Engineers (IIE) comme concernant « la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés mettant en jeu des hommes, des matériaux, des équipements et de l'énergie. Il s'appuie tant sur les connaissances spécialisées et les aptitudes dans le domaine des mathématiques, de la physique et des sciences sociales que sur les principes et méthodes des sciences de l'ingénieur, ceci pour spécifier, prédire et évaluer les résultats de ce type de système. »

Cette définition positionne le génie industriel comme l'élément liant les sciences humaines, économiques et sociales et les sciences exactes et naturelles dans le but de les intégrer dans les systèmes afin d'en extraire des améliorations. Le génie industriel s'intéresse ainsi à trois disciplines : conception de système ; amélioration de système ; installation de système.

Ce travail de thèse relève du génie industriel dans la mesure où nous nous intéresserons au champ de la conception. Plus particulièrement, nous nous concentrerons sur la conception de produit et les méthodes d'évaluation de ce dernier lors du processus de conception.

Nous verrons dans la suite de cette section l'évolution du processus de conception et les verrous scientifiques en résultat.

2.1.2 Sciences de la conception

La conception est la démarche mise en œuvre pour élaborer une solution à un problème [1]. De tout temps, les individus ont cherché à solutionner des problèmes par la conception sans même penser que cela puisse être une science, comme un comportement naturel. Ils ont conçu des ponts pour traverser des rivières par exemple. Ce caractère « inné » de la conception explique qu'elle n'a pas toujours été considérée comme une activité noble au sens d'être considérée comme une science. Pendant longtemps, elle a été rabaissée à sa fonction primaire, la résolution de problème. Cross [2] nous rappelle que l'évolution vers ce qu'on appelle sciences de conception s'est déroulée en deux étapes majeures :

- Une première étape dans les années 1920, venant d'artistes souhaitant réaliser des produits plus scientifiques.
- Une seconde étape dans les années 1960, avec l'émergence de ce qui sera appelé le processus de conception.

Il prédisait en 2000 un nouvel élan des sciences de la conception pour ce nouveau millénaire. Cependant, l'évolution de la production scientifique mondiale augmente également dans le même temps comme en attestent les résultats publiés par l'Hcéres¹. En effet, l'Hcéres s'appuie sur l'Observatoire des Sciences et Techniques (OST) pour réaliser cette étude. L'OST a recensé l'ensemble des publications des vingt pays les plus publiant (La France est 7^{ème} en 2015). Dans ce rapport, l'OST montre tout d'accord qu'à périmètre fixe (un panel fixe de revue) la production scientifique a augmenté de 25 % sur cette période de 15 ans. Cependant l'évolution a plus que doublé sur cette même période lorsque sont intégrées les nouvelles revues. Pour vérifier cette prédiction, nous proposons de regarder l'évolution du nombre de publications réalisées sur la base de données ScienceDirect afin de comparer cette évolution mondiale vis-à-vis du *Design*. Nous avons donc pris en compte l'évolution de « Design »² au cours des années (2000-2018). Nous proposons sur la Figure 1, l'évolution des publications sur la base de données Sciendirect avec le mot clé « Design » en comparaison de l'ensemble des publications établies par l'Hcéres. L'évolution du nombre de publications scientifiques est pratiquement linéaire en 15 ans, elle est passée d'un peu plus de 800 000 publications en 2000 à un peu moins 1 800 000 en 2015. D'un autre côté, le nombre de publications traitant de

¹ Hcéres, « La position scientifique de la France dans le monde 2000 – 2015 », mars 2018, disponible à l'adresse suivante :

https://www.hceres.fr/sites/default/files/media/downloads/Hcéres_Position_Scientifique_France_dans_monde_2000_2015.pdf [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019].

² La recherche a été effectuée au 30 mars 2019.

conception en 2000 était inférieur à 100 000, alors qu'en 2018 il a dépassé le seuil de 300 000. Il est ainsi possible de constater en moins de vingt ans une multiplication par 3 du nombre d'articles évoquant la conception. Ainsi pour interpréter si l'évolution des publications traitant de la conception est due à l'évolution mondiale ou à la reconnaissance de la conception, nous proposons de regarder le rapport entre ces deux nombres. On peut ainsi observer que l'évolution de la conception est plus prononcée que celle de la production mondiale.

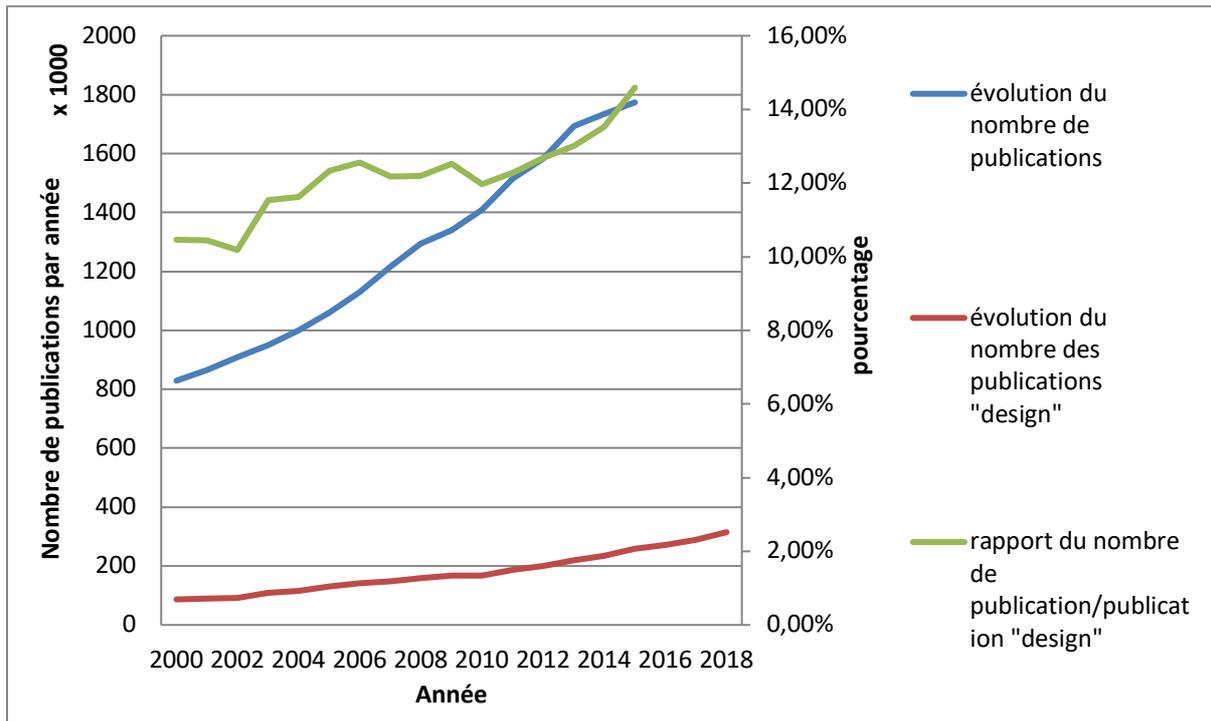


Figure 1 : Évolution des publications mondiales et traitant de conception entre 2000 et 2018

Cette évolution est observable également chez un autre éditeur, les résultats de cette recherche sont proposés en Annexe.

Cette évolution est explicable par le rayonnement et la démocratisation des différents processus de conception. En effet, comme le montre Tomiyama [3], les processus de conception sont maintenant intégrés dans les programmes d'enseignement. Or l'enseignement des sciences de conception contribue à leur démocratisation, mais aussi à leur acceptation comme une science.

Scientifiquement, les sciences de conception sont définies par les auteurs comme étant un groupement de connaissances aussi bien théorique qu'empirique autour du processus de conception [4].

Hubka et Eder [5] identifient les quatre centres d'intérêt des sciences de la conception :

- La théorie des systèmes techniques ;
- Les théories de la conception ;
- Les méthodologies de conception ;
- Les méthodes de conception.

L'objectif de ce travail de thèse est d'apporter des outils d'évaluation adéquats au cours du processus de conception et plus particulièrement lors de la considération de plusieurs domaines. En ce sens, le positionnement de notre travail se place à l'intersection des méthodologies de conception (processus de conception) et des méthodes de conception (outils d'évaluation) comme le montre le point rouge sur la Figure 2.

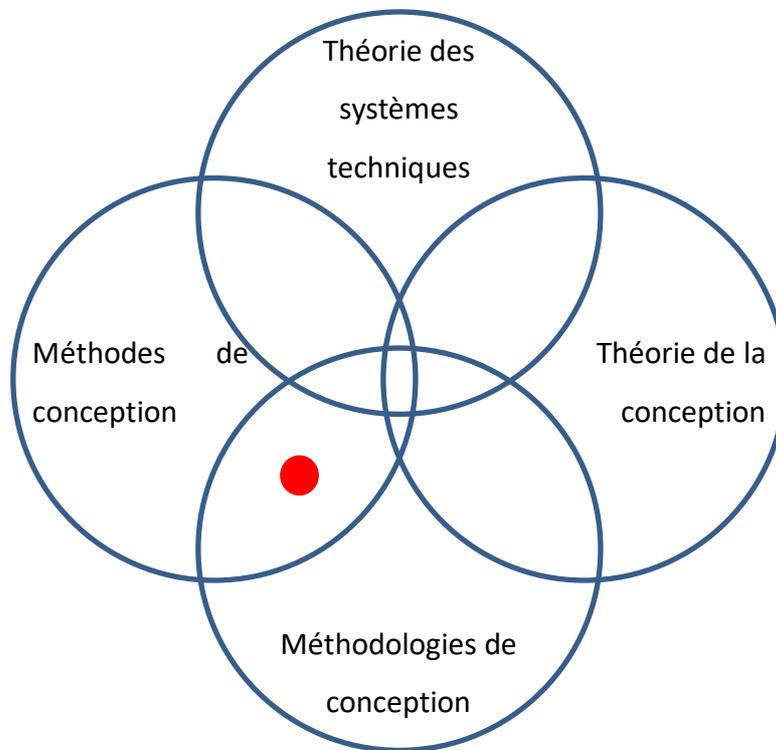


Figure 2 : Position de la thèse dans les sciences de la conception

Ce positionnement au sein des sciences de la conception autour des méthodologies et méthodes de conception se justifie par les apports prévus par cette thèse et le positionnement des laboratoires encadrant ce travail que nous détaillerons par la suite.

2.1.3 Nouveau domaine dans la conception

L'intégration de nouveaux domaines dans le processus de conception a été dictée par l'idée d'améliorer continuellement ce processus. Or cette évolution s'est faite au gré des contraintes imposées par les parties prenantes :

- par les **consommateurs** (coût, fonctionnalité, environnement d'utilisation)
- par le **législateur** : par exemple, interdiction de l'amiante par le décret n° 96-1133 du 24 décembre 1996, obligations liées au recyclage des déchets électroniques (reprise obligatoire par exemple) par la directive 2012/19/UE du 4 juillet 2012)
- par **l'amélioration ou la découverte de nouvelle technologie** (objets connectés, impression 3D). Tous ces facteurs de possibles améliorations doivent ainsi être intégrés dans le processus de conception.

La prise en compte de ces nouvelles contraintes nécessite des méthodologies ou méthodes afin d'intégrer ces connaissances au moment opportun dans le processus de conception.

Historiquement, les premières améliorations du processus de conception se sont chargées de prendre en compte deux phases du cycle de vie du produit, à savoir la phase de fabrication et la phase d'assemblage. En effet, ces deux phases représentaient la majeure partie du coût du produit [6]. Boothroyd montre que l'intégration de recommandations de fabrication et d'assemblage lors des étapes de conception permet, à l'époque, de réduire le coût de production de plus de 50 % en moyenne sur une quarantaine de cas d'étude.

Pour que les concepteurs puissent prendre en compte ces contraintes pendant le processus de conception, il est nécessaire de leur apporter des méthodes leur permettant de faire des choix, une aide à la décision. Ces recommandations sont nécessairement formalisées par des experts du domaine, qui viennent guider les concepteurs lors des étapes stratégiques. Il est nécessaire d'identifier ces étapes stratégiques et la nature des recommandations à proposer aux concepteurs. Ces recommandations peuvent avoir plusieurs formes : des critères liés au produit par exemple la comparaison du nombre de composants ou d'éléments d'assemblage [7] ou tout simplement des règles à respecter [8].

L'intégration, dans le processus de conception, des recommandations des experts permet d'améliorer ce processus en continu. Ces recommandations sont issues d'un savoir-faire, d'une expérience et d'une connaissance des domaines spécifiques. Leur accès n'est pas possible pour l'ensemble des concepteurs. Il est nécessaire de transformer ces recommandations en méthodes

et en outils pour permettre aux concepteurs de faire les bons choix durant le processus de conception.

La disponibilité de ces méthodes et outils dépend du domaine que l'on souhaite intégrer dans le processus de conception. Le caractère innovant d'un produit est généralement identifié dans les premières étapes du processus de conception [9] alors que l'étude de la fabrication est réservée par les phases aval [10].

2.1.4 Conception amont

Les phases amont de conception sont les phases les plus importantes lors de la définition du produit et qui permettent une meilleure anticipation de la performance finale. Les phases amont sont définies par Segonds [11] comme étant les « phases de définition et planification du projet, la phase de recherche et validation du concept et les premières étapes de la conception architecturale, jusqu'à la génération d'un tracé préliminaire du produit ». Bien que ces phases ne représentent que 5 % des coûts finaux du projet, les décisions prises à ce moment ont un impact allant jusqu'à 80 % des coûts finaux [12]. La Figure 3 montre l'évolution des coûts d'un projet de conception et le positionnement des phases amont.

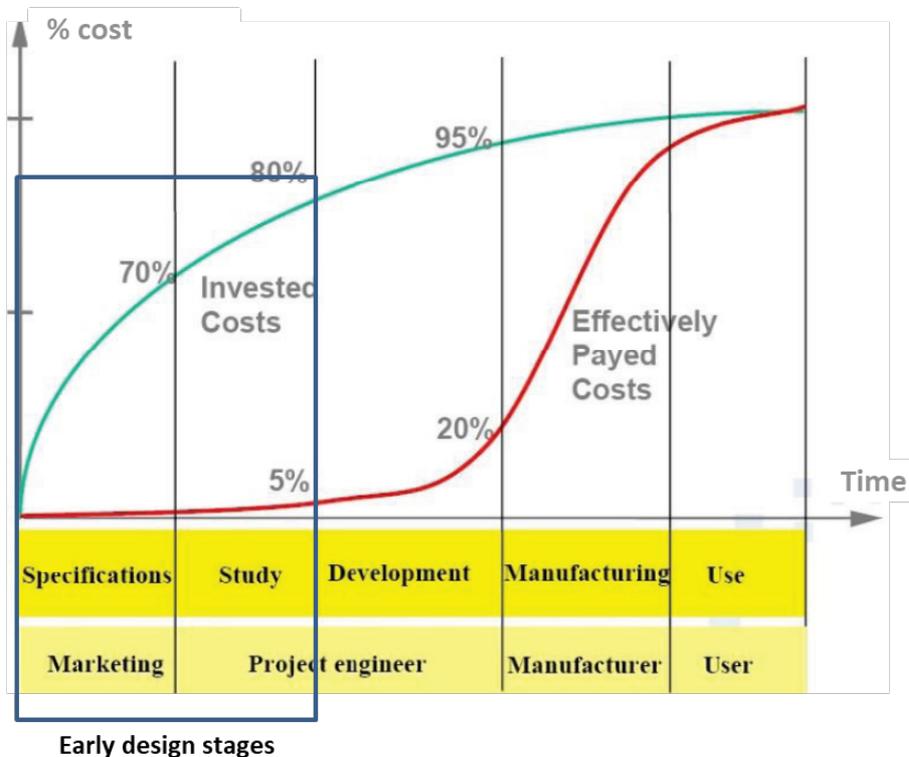


Figure 3 : Évolution des coûts engagés par le projet [12] et positionnement des phases amont [11]

Le problème des phases amont de conception est donc de concentrer la majorité des coûts engagés alors qu'il ne représente qu'une partie infime des investissements du projet. Cette opposition entre coût engagé et coût réel montre l'enjeu scientifique des phases amont qui est d'améliorer les prises de décision lors de ces phases amont en apportant des méthodologies et des méthodes permettant d'identifier le peu d'information présent lors de ces phases sur le futur produit et de le traduire pour le concepteur afin qu'il réalise les bons choix.

2.1.5 Évaluation des performances

L'évaluation des performances lors du processus de conception est essentielle pour s'assurer du bon fonctionnement et du bon respect des exigences du produit. La performance évaluée est celle supposée du futur produit en considérant ce qu'on appelle les représentations intermédiaires du produit. Elles sont toutes les formalisations que prend le produit au cours du processus de conception. La performance a pour définition usuelle comme étant « la mesure quantitative de l'efficacité et de l'efficience » [13].

Cependant, la nature des données qui sont extractibles des représentations intermédiaires dépend de ces dernières. Il est donc nécessaire que les méthodes d'évaluation des performances s'adaptent à la nature de la représentation intermédiaire. L'enjeu scientifique dans l'évaluation des performances du produit au cours du processus de conception est la définition de performance qui doit donc être adaptée pour chacun des moments où l'évaluation va être réalisée, c'est-à-dire pour chaque représentation intermédiaire.

2.2 Synthèse et verrou scientifique

L'objectif de ce travail de recherche est d'apporter les outils d'évaluation adéquats aux processus de conception lors de la prise en compte de plusieurs domaines. De cet objectif, il est apparu indispensable d'étudier comment étaient construits les outils d'évaluation domaine par domaine. Or cette étude nous a permis de dégager un verrou principal : le manque de méthode pour l'évaluation multidomaine. Ce verrou peut être précisé en quatre sous-verrous.

Dès lors, le premier sous-verrou scientifique est bel et bien ce manque de méthodes permettant aux concepteurs d'évaluer la performance de leur concept de produit. Ce verrou est commun à de multiples domaines.

Le deuxième sous-verrou scientifique identifié est la difficulté à caractériser les performances des nouveaux domaines intégrés au processus de conception. Il est ainsi difficile d'identifier, à l'heure actuelle, les indicateurs permettant de rendre compte de cette efficacité.

Le troisième sous-verrou scientifique est qu'il est nécessaire d'apporter des méthodes aux phases amont de conception afin de faciliter la prise de décision dans le processus de conception.

Enfin le dernier sous-verrou scientifique est qu'il est nécessaire de définir la performance du produit attendu pour chacune des étapes du processus de conception, en effet, les informations disponibles n'ont pas la même nature et la même précision il convient donc de déterminer les critères d'évaluation pour chacune des étapes.

Ces quatre verrous sont synthétisés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Synthèse des sous-verrous scientifiques

Sous-verrous	
Sous-verrou 1	Le manque de méthodes d'évaluation utilisables par les concepteurs pour évaluer la performance de leur concept
Sous-verrou 2	La difficulté à évaluer la performance de nouveaux domaines intégrés dans le processus de conception
Sous-verrou 3	Les méthodologies et les méthodes permettent d'identifier le peu d'information présent lors de ces phases sur le futur produit et de le traduire pour que le concepteur puisse réaliser les bons choix
Sous-verrou 4	La définition de performance qui doit donc être adaptée pour chacun des moments où l'évaluation va être réalisée, c'est-à-dire pour chaque représentation intermédiaire

Ces verrous scientifiques nous permettent de dégager l'importance des méthodes et des critères définis dans le processus de conception pour chacun des domaines, mais aussi l'importance de regarder à quel moment, au sein du processus de conception, il est le plus opportun de les étudier.

2.3 Positionnement scientifique

Dans cette section sera réalisée la présentation des laboratoires qui encadrent ce travail de thèse à savoir le LCP et le GeM. Après cela, il sera présenté les autres structures nationales et internationales travaillant sur le génie industriel et plus particulièrement de la conception.

2.3.1 Le laboratoire LCPI

Cette thèse est réalisée au laboratoire de conception de produits et innovation (LCPI) d'Arts et Métiers Paristech³, qui depuis sa création en 1973 oriente ses recherches sur les méthodes industrielles. Il est actuellement dirigé par le professeur Améziane Aoussat qui dirige cette thèse. La recherche au sein de ce laboratoire porte plus précisément sur l'optimisation du processus de conception et d'innovation. Il s'intéresse aux méthodologies et méthodes qui permettent le passage qu'un état immatériel du produit (idée, concept, fonction) à l'état matériel (plan, maquette, prototype) et disponible sur le marché.

L'objectif de recherche du laboratoire est de proposer et modéliser le processus de conception et d'innovation sur l'ensemble des phases du cycle de vie du produit. Le point fort du laboratoire est son travail sur les phases amont du processus de conception.

La recherche du laboratoire se décompose suivant deux axes :

- L'axe **métier** : 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.

Ce travail de thèse se positionne suivant les deux axes sur la Figure 4, la méthodologie issue de ce travail a pour objectif d'aider à la décision le concepteur dans sa conception multidomaine (couleur rouge). Ce travail apporte une **amélioration** des connaissances du **processus de conception** (partie droite) et de **l'aide au pilotage de projet** (partie basse).

³ Recherche effectuée le 31 mars sur le site <http://lcp.ensam.eu/cpi-page-accueil-112719.kjsp>

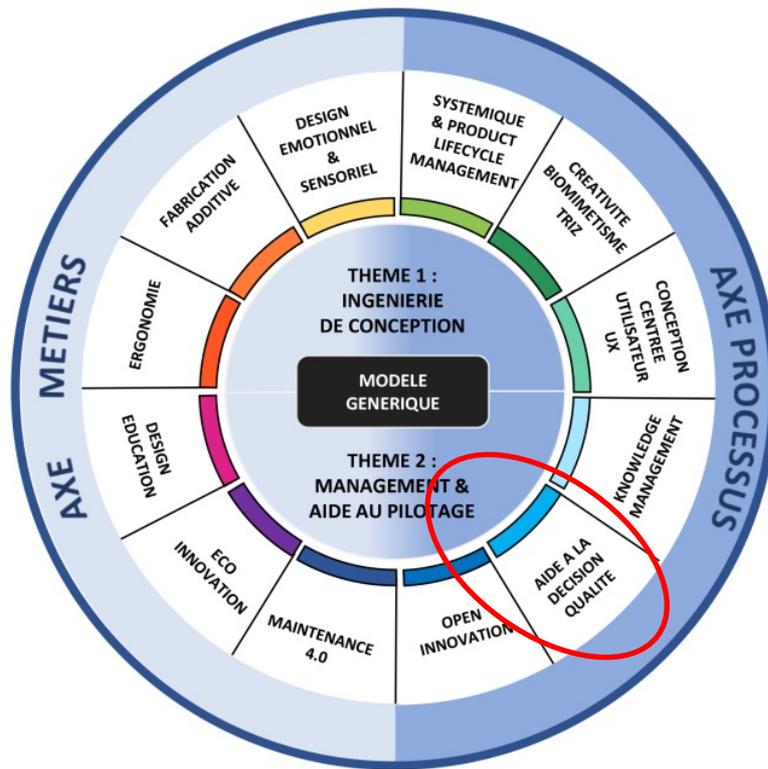


Figure 4 : Axe de recherche du laboratoire LCPI et positionnement du travail de thèse

2.3.2 Le laboratoire GeM

Ce travail est également co-encadré par le GeM, une unité mixte de recherche de Centrale Nantes, l'Université de Nantes et du CNRS et dirigé par le professeur Patrice Cartraud. Il a été fondé en 2004 à partir de regroupement de laboratoires existants dans les structures.

L'objectif de ce laboratoire est de proposer :

- Des procédés de fabrication innovants ;
- Des outils de simulation adaptés pour le dimensionnement et la maîtrise du cycle de vie des produits ;
- Des structures et des ouvrages, en prenant en compte l'influence de sollicitations sévères et d'actions environnementales.

Cette collaboration entre les deux laboratoires permet de mutualiser les compétences. Le laboratoire LCPI offre une appréhension de la modélisation du processus de conception et du processus d'innovation. Le GeM apporte l'expertise des procédés de fabrication et des méthodes de prise en compte de l'impact environnemental. Les deux laboratoires s'accordent sur une vision de la fabrication additive comme procédé de fabrication innovant.

2.3.3 Positionnement national et international

La thématique du génie industriel et plus particulièrement de la conception de produit est un sujet étudié en France et dans le monde entier. Afin de comptabiliser le nombre de laboratoires traitant le sujet de la conception, une recherche sur la base de données de la DGRI⁴ (Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation) et permet de comptabiliser le nombre d'unités de recherche qui travail autour du mot clé « conception ». Ce recensement des équipes d'accueil (EA) et des unités mixtes de recherche (UMR) travaillant sur le sujet de la conception de produit. Dans le Tableau 2 sont présentés les différents laboratoires.

Tableau 2 : Laboratoires traitant de conception

Unité de recherche	Structure d'accueil
Laboratoire Conception de Produits et Innovation	ENSAM
Laboratoire Conception Fabrication Commande	ENSAM
Laboratoire de Conception et d'intégration Des Systèmes	Grenoble INP
Laboratoire d'optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement	Chambéry
LCOMS —Laboratoire de Conception, Optimisation et Modélisation des Systèmes	Lorraine
Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble	Grenoble INP
Laboratoire Génie Industriel	CENTRALESUPELEC

⁴ Direction générale de la recherche et de l'innovation, Annuaire des formations doctorales et des unités de recherche, disponible à l'adresse suivante : <https://appliweb.dgri.education.fr/annuaire/selectUr.jsp> [consulté pour la dernière fois le 24 avril 2019].

Le sujet de la conception est également traité à l'international. Lahonde [14] a montré dans sa thèse les différents établissements mondiaux traitant de la conception. Sur la Figure 5 est repérée la localisation des établissements présentés sur le Tableau 3.



Figure 5 : Localisation des établissements traitant de conception

Tableau 3 : Liste des établissements traitant de conception

Établissements mondiaux	
Darmstadt University of Technology	Technical University of Braunschweig
University of Southampton	Worcester Polytechnic Institute
University of Bremen	George Washington University
Royal College of Art	Osaka University
Technical Research Centre of Finland	University of Oklahoma
Glasgow School of Art	Universidade federal de Santa Catarina
Loughborough University	The Open University
Surrey Institute of Art and Design	Delft University of Technology
Universität Karlsruhe	University of Cambridge
Université Paul Verlaine	Université technique du Danemark
Technical University Munich	University of Kaiserslautern
Luleå University of Technology	Brisbane University of Technology

Cette liste ne se veut pas exhaustive, mais regroupe les établissements des principaux acteurs de la communauté scientifique.

Maintenant que le positionnement de ce travail est réalisé vis-à-vis des établissements nationaux et internationaux, le chapitre de l'état de l'art sera présenté afin de positionner l'avancée de la recherche en regard avec les verrous scientifiques que nous avons pu évoquer précédemment. L'état de l'art sera donc composé de quatre sections qui permettront d'élaborer des constats formalisant ainsi la problématique de recherche de ce travail de thèse.

3. État de l’art

Les méthodes de conception se démocratisent dans la sphère industrielle du fait de la complexification des produits à réaliser. Or le besoin méthodologique nécessite une transition vers de nouvelles méthodologies de conception qui ne peut s’opérer dans l’immédiat. En effet, la transition de la sphère académique vers la sphère industrielle n’est pas aisée [15–17], elle nécessite des ressources et du temps pour l’accepter. La première difficulté pour les industriels est de réussir à sélectionner la (les) « bonne(s) » méthodologie(s) parmi la multitude de méthodologies disponibles dans la littérature [16]. L’objectif de ce travail de thèse est ainsi de proposer aux industriels une méthode permettant à ces derniers de sélectionner les méthodes de conception s’adaptant à leurs besoins.

Les différentes parties de l’état de l’art se succéderont de la plus générale à la plus précise comme cela est formulé sur la Figure 6. Il nous fallait débiter la démarche scientifique par l’identification dans la littérature de la définition du processus de conception et des différentes caractérisations existantes (3.1), ce premier travail nous a permis d’identifier les étapes les plus importantes du processus de conception, étapes sur lesquelles nécessairement nous nous concentrerons pour construire notre méthodologie (3.1.2). Une fois ce travail opéré, il était nécessaire d’étudier, parmi les étapes les plus importantes du processus de conception, celles qui devaient faire l’objet d’une attention encore plus particulière, car débouchant sur les représentations intermédiaires du produit les plus importantes. Pour cela, il nous faut étudier les différentes modalités d’évaluations des représentations intermédiaires (3.2). Cette première partie dans notre état de l’art, si elle est fondamentale, doit naturellement être complétée par une seconde partie. En effet, l’objectif de la thèse étant de proposer une méthodologie d’évaluation dans les processus de conception destinés à intégrer de multiples domaines, il s’agira de présenter les travaux existants sur l’intérêt d’intégrer différents domaines d’expertise au processus de conception (3.3). Enfin, nous étudierons ce qu’est une performance multidomaine et comment l’évaluer afin de nous permettre *in fine* de sélectionner les bonnes représentations intermédiaires (3.4).

Nous tirerons ensuite des constats nécessaires à la formalisation de la problématique de recherche.

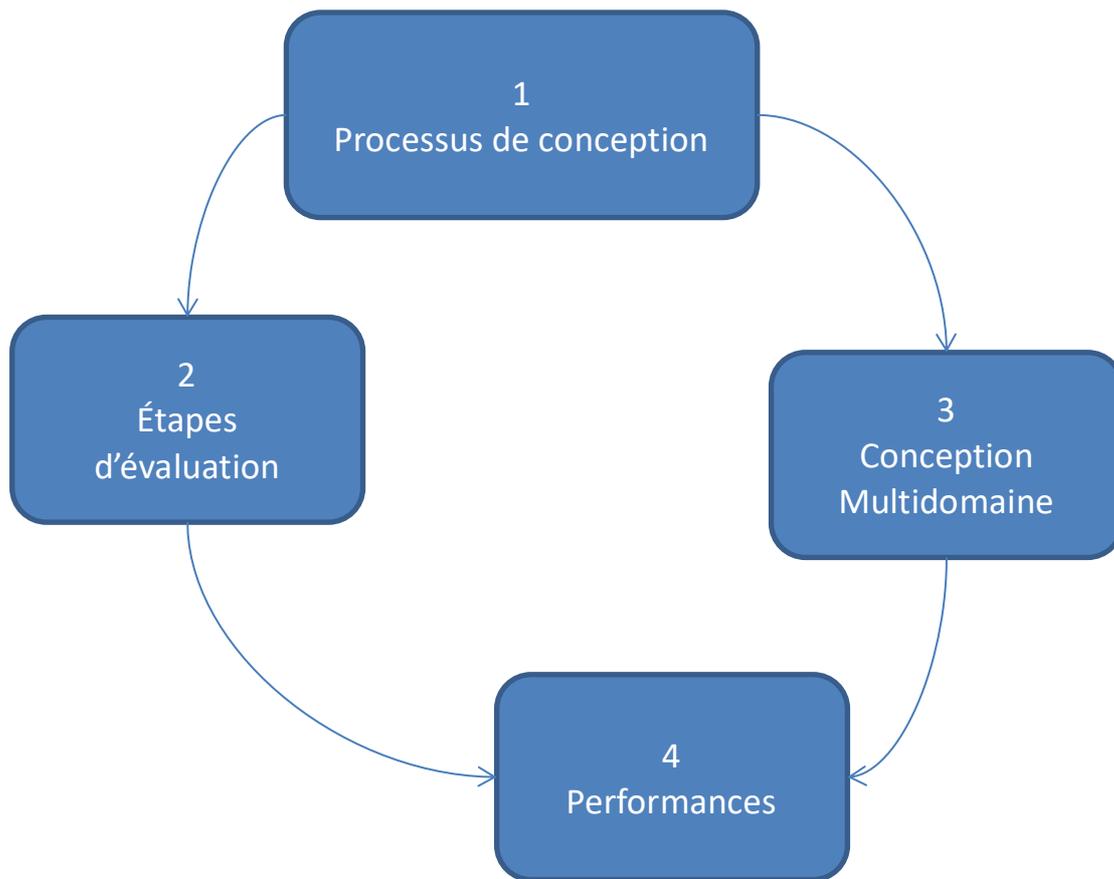


Figure 6 : Progression de l'état de l'art

3.1 La diversité des processus de conception

Un processus de conception de produit est défini comme étant la succession d'étapes nécessaires pour obtenir le produit final qui répond aux problèmes identifiés [1]. Cette définition abstraite entraîne l'élaboration de différents processus de conception qui sont créés afin de répondre à différents besoins. En effet, pour chaque approche, pour chaque domaine, un processus pourrait être défini. Nous allons commencer par exposer quelques exemples de processus de conception et par la suite la caractérisation des théories et méthodologies de la conception. Cette analyse nous permettra de définir ce qu'est un processus de conception. En effet, les méthodologies et méthodes qui sont adaptées de nos travaux nécessitent la caractérisation du processus de conception afin de le généraliser.

3.1.1 Exemple de processus de conception

Nous allons voir dans cette partie plusieurs exemples de processus de conception. Cela permettra de montrer un petit échantillon de méthodologies de conception permettant de montrer leurs points communs. Nous avons choisi d'exposer les méthodologies Axiomatic design, d'Ullmann et de Pahl and Beitz car elles montrent trois processus différents en termes d'architecture.

3.1.1.1 Axiomatic design

La méthodologie Axiomatic design a été élaborée par Suh [18] et est présentée en Figure 7. Cette méthodologie s'appuie sur deux concepts :

- Les domaines : l'environnement de la conception est fondé sur quatre domaines :
 - Le domaine du **consommateur** est caractérisé par les besoins du consommateur ou les attributs qu'il recherche dans un produit, un processus, un système ou des matériaux
 - Le domaine des **fonctions** transforme les besoins du client spécifiés en termes d'exigences fonctionnelles et de contraintes.
 - Le domaine du **physique** traduit les exigences fonctionnelles spécifiées en paramètres de conception.
 - Le domaine du **process** correspond aux paramètres du process qui sont alors déterminés en fonction des paramètres de conception.

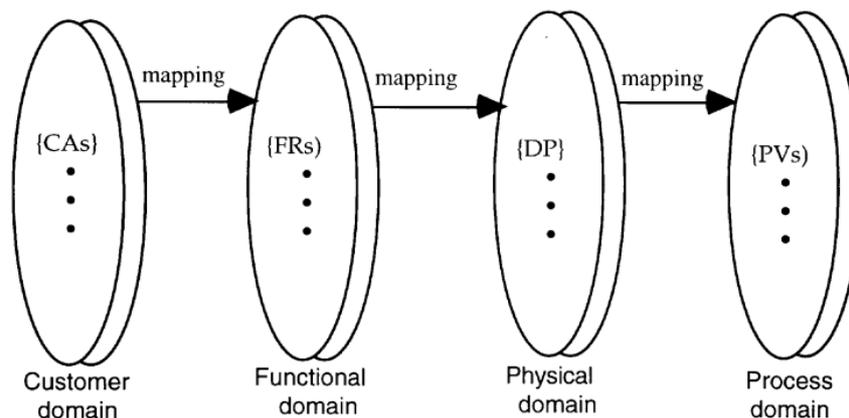


Figure 7 : Domaines de la théorie Axiomatic design [18]

- Les axiomes :
 - Axiome 1 : Maintenir l'indépendance des exigences fonctionnelles
 - Axiome 2 : Minimiser le contenu informationnel de la conception

Le processus de conception résulte des itérations successives entre les différents domaines. Une conception acceptable est validée dès lors que les deux axiomes sont toujours vérifiés.

3.1.1.2 Ullmann

Dans son ouvrage « *The mechanical design process* », Ullman [1] définit les objectifs et les aboutissements de la conception et plus particulièrement de la conception mécanique. Pour Ullman, le processus de conception est composé de 6 étapes comme présentées sur la Figure 8.

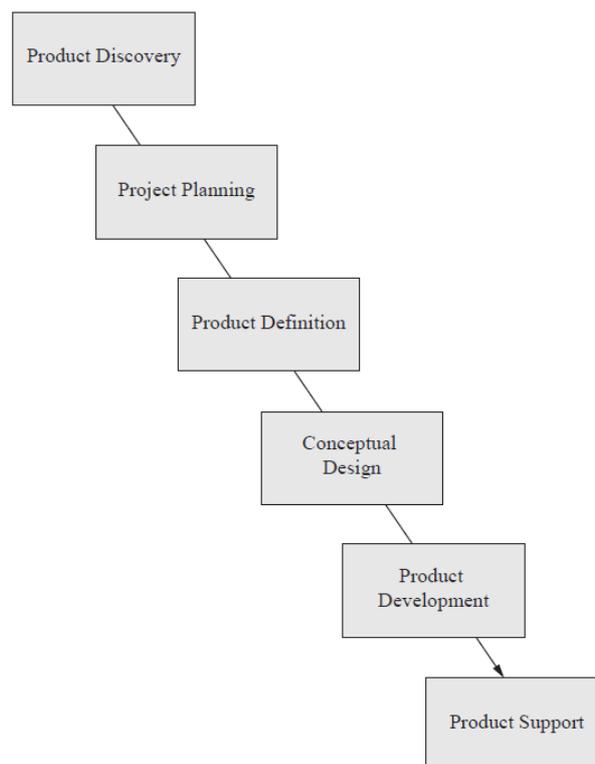


Figure 8 : Processus de conception de Ullman [1]

Pour chacune des étapes, il définit l'objectif et les différentes sous-étapes à réaliser :

- **Product discovery** est l'étape de sélection des projets, en effet, Ullman souligne qu'un projet de conception doit être guidé par un changement du produit, une nouvelle technologie ou un besoin du consommateur.
- **Project planning** est l'étape de planification des ressources pour chaque étape de conception, cependant, comme c'est le cas pour beaucoup d'étapes de conception, il faut pour cela spéculer sur les besoins futurs.
- **Product definition** a pour objectif de comprendre le problème posé par le projet et de définir les exigences du consommateur.
- **Conceptual design** est l'étape de génération et d'évaluation du nouveau produit ou de la reconception.
- **Product development** permet de définir plus précisément le concept sélectionné lors de la précédente étape c'est-à-dire définir l'architecture du produit, mais aussi les documents nécessaires à sa fabrication.
- **Product support** est une étape optionnelle, elle consiste à développer la documentation pour assister la vente, les consommateurs, la fabrication et la maintenance du produit.

3.1.1.3 Pahl and Beitz

La méthodologie « *Systematic design* » développée par Pahl et Beitz [19] a pour objectif de définir un processus de conception dit systématique, c'est-à-dire applicable pour n'importe quel type de produit, système ou organisation. Cette proposition s'appuie sur quatre phases comme montrées sur la Figure 9.

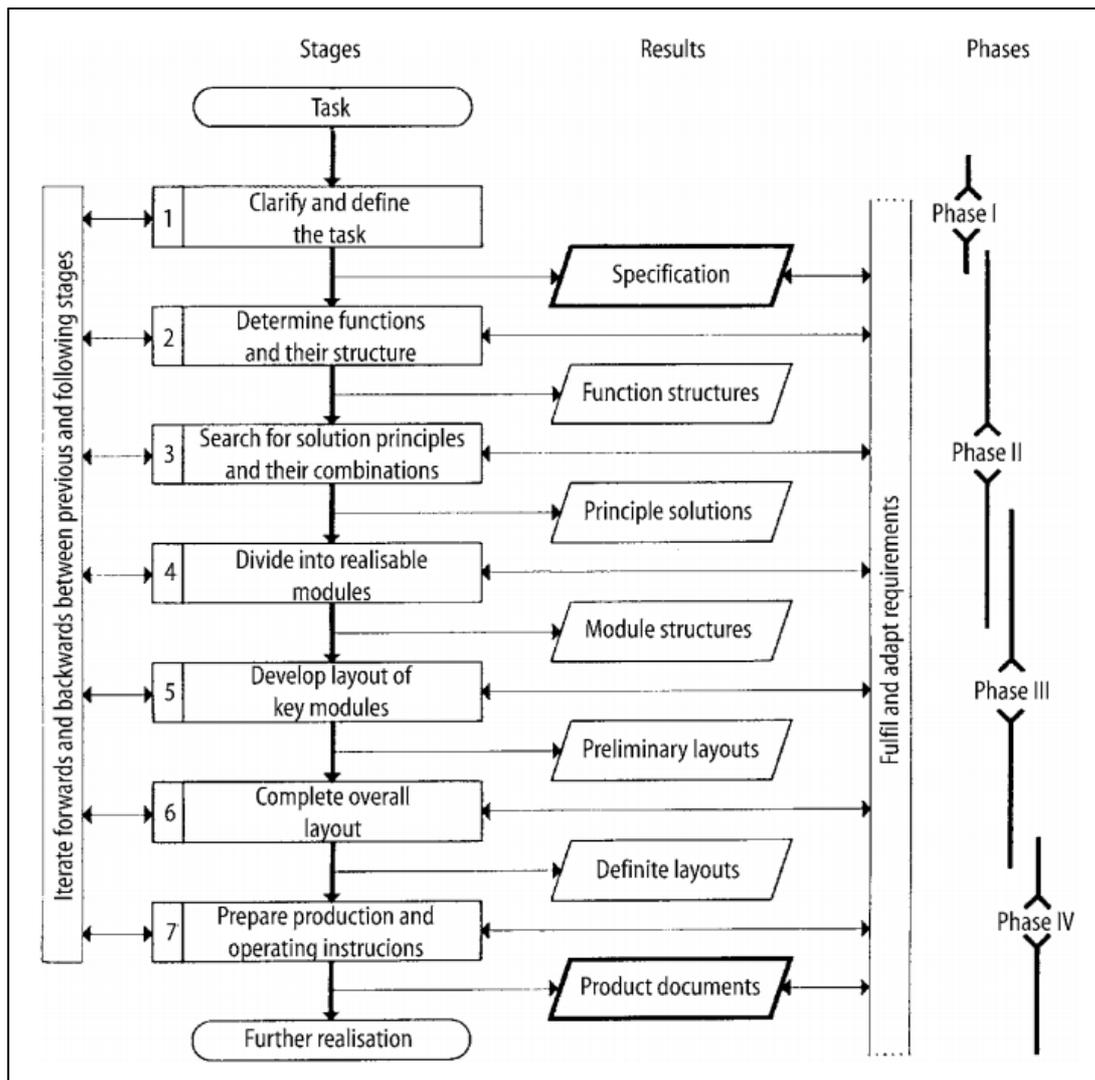


Figure 9 : Processus de conception systématique de Pahl et Beitz [19]

- **Phase 1** : elle correspond à la phase de planification et clarification du projet. L'objectif est de définir les exigences du projet.
- **Phase 2** : elle correspond aux premières étapes de conception. Il faut alors déterminer les principes de solution qui répondront aux exigences formulées précédemment. Cette phase comprend la génération des fonctions attendues, des principes de solutions (idées) et de concept.
- **Phase 3** : elle correspond à la phase de développement du concept sélectionné afin de proposer une architecture préliminaire puis définitive.
- **Phase 4** : elle correspond à la phase permettant la transition entre la conception et la fabrication, la réalisation de la documentation pour la fabrication à partir de l'architecture définitive.

Le processus de conception proposée par Pahl et Beitz est le plus répandu et le plus enseigné au niveau académique [3], mais aussi d'un pont de vue industriel, il a notamment servi de base à la définition des normes allemandes.

À travers ces trois méthodologies de conception, nous avons pu voir qu'il existait des étapes ou phases qui étaient semblables dans chacun des processus de conception : une étape permettant d'identifier le besoin du consommateur, les fonctions ou exigences, l'élaboration de concept et la réalisation de l'architecture. De ces ressemblances, des méthodes de classification des méthodologies et théories en conception ont été proposées nous allons nous intéresser plus particulièrement à celle proposée par Tomiyama dans la prochaine section.

3.1.1.4 Classification des méthodologies et théories de conception

Tomiyama [3], en étudiant les méthodologies et les théories de conception (*Design Theory and methodology* ; DTM) les plus utilisées, souhaitait parvenir à l'identification de la distinction entre une méthodologie et une théorie. Il a proposé à une caractérisation de ces DTM en deux axes : un axe général/individuel et un axe abstrait/concret.

- **L'axe général/individuel** permet d'identifier la cible de la DTM : est-elle destinée à une population ciblée (par exemple : mécanicien, biologiste) ? S'adresse-t-elle à l'ensemble des domaines qui s'intéressent à la conception ?
- **L'axe abstrait/concret** permet d'identifier à quoi sert la DTM : est-elle destinée à une application formelle ou relève-t-elle de la théorie ?

Cette caractérisation a permis de classifier les DTM en **quatre** catégories visibles dans le Tableau 4 :

Tableau 4 : Caractérisation des DTM adaptée de Tomiyama et al. [3]

	General	Individual
Abstract	<i>Design theory</i>	<i>Math-based methods</i>
Concrete	<i>Design methodology</i>	<i>Design methods</i>

- **Design theory** : elles sont générales et abstraites et elles s'adressent au monde de la recherche, elles sont destinées à modéliser le processus de conception.
- **Design methods** : elles sont individuelles et concrètes c'est-à-dire focalisées sur un domaine en particulier, et applicables par les concepteurs du domaine.
- **Math-based methods** : elles sont individuelles et abstraites, c'est-à-dire qu'elles s'adressent à une étape du processus de conception, mais doivent être adaptées pour être utilisées.
- **Design methodology** : elles sont générales et concrètes, c'est-à-dire que le domaine d'utilisation n'est pas restreint par la méthodologie et elles s'intéressent uniquement à une étape du processus de conception ou à une phase du cycle de vie.

Grâce à cette distinction, nous pouvons à présent distinguer les DTM suivant leur positionnement en fonction de deux axes. Nous nous intéresserons dans ce travail aux méthodologies de conception qui permettent d'avoir une vision transversale de la conception et ainsi permettre une généricité de la solution proposée. Nous regarderons dans la section sur les méthodes d'évaluation (3.4) comment celles-ci sont présentées dans les méthodes de conception et les méthodes métiers.

Plus récemment, Benabid [20] dans sa thèse a cherché à caractériser les processus de conception de produit. En étudiant plus de 60 processus de conception, il a pu mettre en évidence que tous les processus de conception, bien qu'ils soient différents en forme et en nombre d'étapes, peuvent être synthétisés en 6 grandes phases. Ce travail vient compléter les conclusions qu'Howard et al. [21] ont formulé en 2008. D'après eux, un processus de conception est

synthétisable en 4 à 6 phases. Le modèle de processus de conception de Howard et al. est présenté sur la Figure 10 ainsi que son étude comparative de la littérature en Tableau 6.

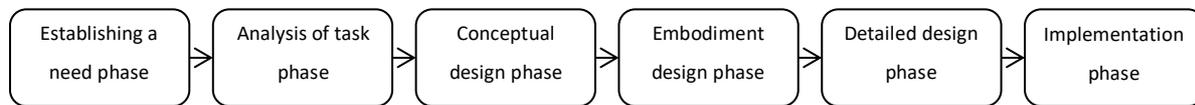


Figure 10 : Modèle de processus de conception de Howard et al. [21]

Dès lors, les 6 grandes étapes du processus de conception modélisées par Howard et présentées sur la Figure 10 sont :

- **Establishing a need phase** : cette étape a pour objectif de comprendre le problème posé et les besoins exprimés par le consommateur ou le marché. Un cahier des charges est rédigé à la suite de l'étude des données récoltées à cette étape.
- **Analysis of task phase** : il s'agit durant cette étape de planifier les attendus du projet au long du processus : quelles sont les ressources nécessaires (économiques, humaines, matérielles...) pour chaque étape ? Elle correspond à l'étape organisationnelle du projet.
- **Conceptuel design phase** : durant la conception générale, les concepteurs explorent les pistes de solution qui permettront de résoudre le problème de conception. Cette étape est généralement réalisée à l'aide de méthodologie créative qui permet d'apporter de la créativité dans la génération des idées, concepts et principes de solution réalisés par les concepteurs.
- **Embodiment design phase** : cette étape doit permettre aux concepteurs d'agencer les principes de solutions retenus lors de l'étape précédente. Au cours de cette phase, le concepteur agence les principes de solutions retenus. Cet agencement doit mener à l'élaboration de l'architecture du produit.
- **Detailed design phase** : cette étape sert à caractériser le produit à l'échelle du composant (formes, dimensions, tolérances, matériau, agencement...).
- **Implémentation phase** : cette étape annonce la fin de la phase de conception, elle doit permettre de développer l'ensemble des documents nécessaires pour débiter la phase de fabrication.

Howard et al. propose la comparaison de ce modèle de conception à différents processus de conception comme Pahl et Beitz ou Ullmann [1], [19]

Tableau 4 : Comparaison des processus de conception d'Howard et al. [21]

Models	Establishing a need phase	Analysis of task phase	Conceptual design phase		Embodiment design phase		Detailed design phase		Implementation phase
			Analysis	Synthesis	Business analysis	Development	Development	Testing	
Booz et al. (1967)	X	Programming & data collection	Analysis	Synthesis	Business analysis	Development	Development	Testing	Commercialisation
Archer (1968)	X	Programming & formalize	Concepts	Synthesis	Verification	Decisions	Development	Communication	X
Svensson (1974)	Need	Recognize & formalize	Ideate and create		Analyze and/or test		Decisions	X	Manufacture
Wilson (1980)	Societal need	FR's & constraints							X
Urban and Hauser (1980)	Opportunity identification		Design						Introduction (launch) ; Life cycle management
VDI-2222 (1982)	X	Planning	Conceptual design		Embodiment design			Detail design	X
Hubka and Eder (1982)	X	X	Conceptual design		Lay-out design			Detail design	X
Crawford (1984)	X	Strategic planning	Concept generation		Pre-technical evaluation			Technical development	Commercialisation
Pahl and Beitz (1984)	Task	Clarification of task	Conceptual design		Embodiment design			Detailed design	X
Pfennig (1985)	Need	Analysis of problem	Conceptual design		Embodiment or schemes			Detailing	X
Ray (1985)	Recognise problem	Exploration of problem	Search for alternative proposals		Predict outcome	Test for feasible alternatives	Judge feasible alternatives	Specify solution	Implement
Cooper (1986)	Ideation	Preliminary investigation	Detailed investigation		Development	Validation		X	Plan production & market launch
Andreasen and Hein (1987)	Recognition of need	Investigation of need	Product principle		Product design			Production preparation	Execution
Pugh (1991)	Market	Specification	Concept design		Concept design			Detail design	Manufacture ; Sell
Hales (1993)	Idea, need, proposal, brief	Task clarification	Conceptual design		Embodiment design			Detail design	X
Baxter (1995)	Assess innovation opportunity	Possible products	Possible concepts		Possible embodiments			Possible details	New product
Ulrich and Eppinger (1995)	X	Strategic planning	Concept development		System-level design			Detail design	Testing & refinement ; Production ramp-up
Ullman (1997)	Identify needs	Develop engineering specifications	Develop concept		Develop product				X
BS7000 (1997)	Concept	Feasibility			Implementation (or realisation)				Termination
Black (1999)	Brief/concept	Review of 'state of the art'	Synthesis	Inspiration	Experimentation	Analysis / reflect	Synthesis	Decisions to constraints	Output
Cross (2000)	X	Exploration	Generator		Evaluation			Communication	X
Design Council (2006)	Discover	Define	Develop		Deliver				X
Industrial Innovation Process 2006	Mission statement	Market research	Ideas phase		Concept phase			Feasibility Phase	Pre production

Cette comparaison entre 23 méthodologies du processus de conception montre qu'il n'existe pas de processus de conception universel. En effet, on peut observer que chaque processus a son nombre d'étapes propre à lui-même (entre 4 pour Design Council [22] et 9 pour Ray [23] encadrés en bleu). Cependant, Howard et al. propose de regrouper les étapes en fonction des

objectifs de conception, il définit alors un modèle de processus de conception en 6 étapes (encadré en rouge). Afin de déterminer une méthode plus générale pour décrire l'ensemble des processus de conception, il faut chercher directement dans les activités de conception vues précédemment pour obtenir des similitudes dans les processus.

Ce modèle de processus de conception mêle des activités différentes, mais nécessaires pour réaliser le processus de conception. À ce stade, nous allons garder cette approche généraliste du processus afin d'être le plus proches de l'ensemble des différents processus qui ont pu être développés jusqu'ici. Nous pouvons d'ores et déjà voir un intérêt commun à l'ensemble des processus. En effet, ils permettent la réalisation de formes dégradées du produit au cours du projet. Ces formes sont appelées objets ou représentations intermédiaires.

Nous avons constaté que le grand nombre de processus de conception a forcé les chercheurs à les modéliser. Ce travail a permis d'identifier un modèle de processus de conception. De ce modèle, il est ressorti l'importance des représentations intermédiaires. Il est donc possible de déterminer l'évolution de la conception en fonction des représentations intermédiaires. Nous dressons le constat suivant : la multitude de processus de conception ne permet pas de positionner une méthode de conception par rapport à une étape, il faut donc se rapprocher des représentations intermédiaires pour positionner l'évolution du processus de conception.

Nous allons étudier maintenant comment ces représentations intermédiaires permettent de suivre l'avancement du processus de conception, mais aussi de faciliter la communication entre concepteurs.

3.1.2 Des représentations intermédiaires à un processus de conception simplifié

L'étude des différents processus de conception montre qu'il existe une multitude de descriptions du travail à réaliser par les concepteurs, le point commun de tous ces processus est la création de représentations intermédiaires, qui permettent ainsi d'être une référence d'avancement du processus de conception.

La création des représentations intermédiaires représente la majeure partie des activités de la conception [24]. En effet, elles permettent de décrire le processus cognitif individuel du concepteur, mais aussi de lui permettre de le communiquer aux autres participants du projet de conception [25]. La définition de représentation intermédiaire (RI) qui sera choisie dans ce travail est celle de Bouchard et al. [24] comme étant « toute représentation qui apparaît durant le processus de conception, de son commencement à sa fin ». Les RI ont trois caractéristiques distinctes [26] :

- **La médiation** : la RI permet la communication entre acteurs du processus de conception ;
- **La transformation** : La RI peut passer d'une forme à une autre suivant les connaissances des concepteurs ;
- **La représentation** : La RI transmet la dimension symbolique et cognitive de son créateur.

La RI est un outil permettant de relier chacun des concepteurs au processus de conception. Son évolution au cours du processus de conception, c'est-à-dire le passage de l'espace des besoins à l'espace des solutions [27], en fait un indicateur d'avancement.

Dans sa thèse, Laverne [28] définit le concept de RI clé comme étant les RI concluant une étape du processus de conception. Elle met en lumière trois RI clés des phases amonts du processus de conception : le cahier des charges ; le concept ; l'architecture préliminaire. Nous rajoutons une quatrième RI clé qui est la documentation afin de compléter l'ensemble du processus de conception de la Figure 10.

- **Le cahier des charges** : il correspond avant tout à une représentation du produit en termes d'exigences à respecter.
- **Le concept** : il est produit à l'issue de la phase de conception générale et est destiné à donner une description générale du produit à la fois sous une forme visuelle à l'aide de schémas (forme, couleur...) et, mais aussi textuelle grâce à des descriptifs du principe de fonctionnement, un listing des avantages ou inconvénients...
- **L'architecture préliminaire** : elle permet de traduire l'organisation des différentes entités constituant le concept et intègre les premières notions de fabricabilité et de rendu réaliste. Toutefois des modifications sont encore possibles par la suite.
- **La documentation** : l'ensemble des documents nécessaires à la fabrication du produit (plan, CAO)

À partir de la définition de ces RI clés, nous pouvons définir les étapes durant lesquelles elles sont conçues, c'est-à-dire les étapes qui définissent notre processus de conception simplifié. La représentation du processus de conception comme proposé sur la Figure 11.

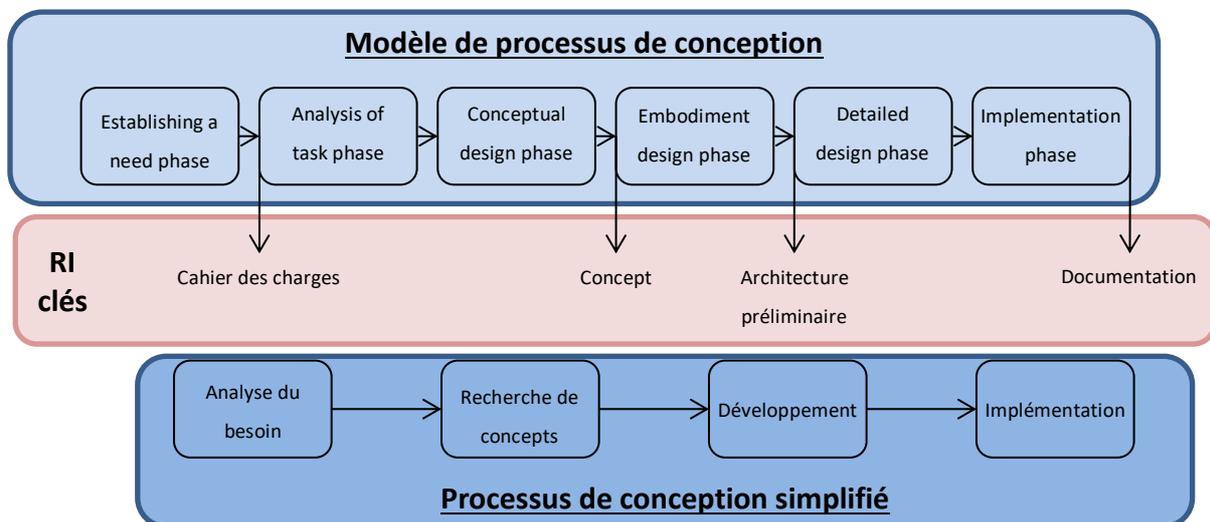


Figure 11 : Représentation intermédiaire clé et processus de conception simplifié

Ce choix de définir un processus de conception simplifié autour des représentations intermédiaires clés permet de mieux définir les étapes importantes du processus de conception. De plus, cette modélisation simplifiée, les méthodologies et méthodes qui seront développées par la suite dans ce manuscrit seront adaptables à n'importe quel processus de conception que nous avons pu voir précédemment, car chacun des processus précédents a comme point commun les représentations intermédiaires clés.

De ces travaux de synthétisation, nous décrivons le processus de conception comme étant composé de quatre étapes qui correspondent aux représentations intermédiaires, comme formulé sur la Figure 11.

Dès lors, cette section nous a permis de voir que l'étude des représentations intermédiaires peut se limiter aux représentations intermédiaires clés pour évaluer le projet de conception. En effet, les représentations intermédiaires sont réalisées pour confronter l'évolution du produit vis-à-vis des objectifs de conception.

Nous allons étudier maintenant **les étapes d'évaluation des représentations intermédiaires** dans le processus de conception ainsi que les méthodes possibles pour les réaliser afin de définir les méthodes d'évaluation les plus adaptées.

3.2 La complexité des étapes d'évaluation

Pour s'assurer du bon déroulement du processus de conception, il est nécessaire d'avoir des étapes qui valident que la conception tende à répondre aux objectifs du projet. Ces étapes sont les étapes d'évaluation. Elles ont pour rôle de vérifier les performances du produit à travers l'évaluation des représentations intermédiaires. Elles doivent donc se dérouler fréquemment. Une fois l'évaluation réalisée, la performance des représentations intermédiaires est comparée à l'objectif, s'il est rempli, alors le projet peut passer à l'étape suivante.

Pour Howard et al. [21], il est nécessaire de différencier le processus de conception du processus créatif. Les deux processus sont complémentaires et permettent si l'association est bien réalisée d'obtenir des produits plus créatifs. La comparaison entre les deux types de processus le conduit à associer ses deux processus : pour chaque étape de conception qui demande aux concepteurs de produire des représentations intermédiaires créatives, il est conseillé de réaliser un processus créatif. Dès lors, les phases du processus créatif qui sont intégrées au processus de conception sont aux nombres de trois :

- **La phase d'analyse** : cette phase sert à déterminer les points les objectifs de l'étape de conception et les points de difficulté à surmonter lors des phases suivantes
- **La phase de génération** : cette phase est lieu de création, les concepteurs vont produire les représentations intermédiaires en tenant compte de l'analyse réalisée. Cette phase va pouvoir utiliser les méthodologies de créativité afin d'améliorer la qualité de la génération.
- **La phase d'évaluation** : cette phase permet de comparer les représentations intermédiaires réalisées et de sélectionner celle qui pourra poursuivre le processus. Les méthodes d'évaluation vont dépendre de la forme de la représentation intermédiaire.

Cette analyse nous permet ainsi de mettre en exergue que les deux types de processus (processus de conception et processus créatif) ne sont donc pas opposés, mais orthogonaux. Il faut donc associer ces deux processus pour obtenir un processus de conception performant. Ainsi, nous pouvons proposer un modèle de processus de conception créatif en Figure 12, qui intègre les

3 phases du processus créatif aux 4 étapes du processus de conception simplifié vu en Figure 11.

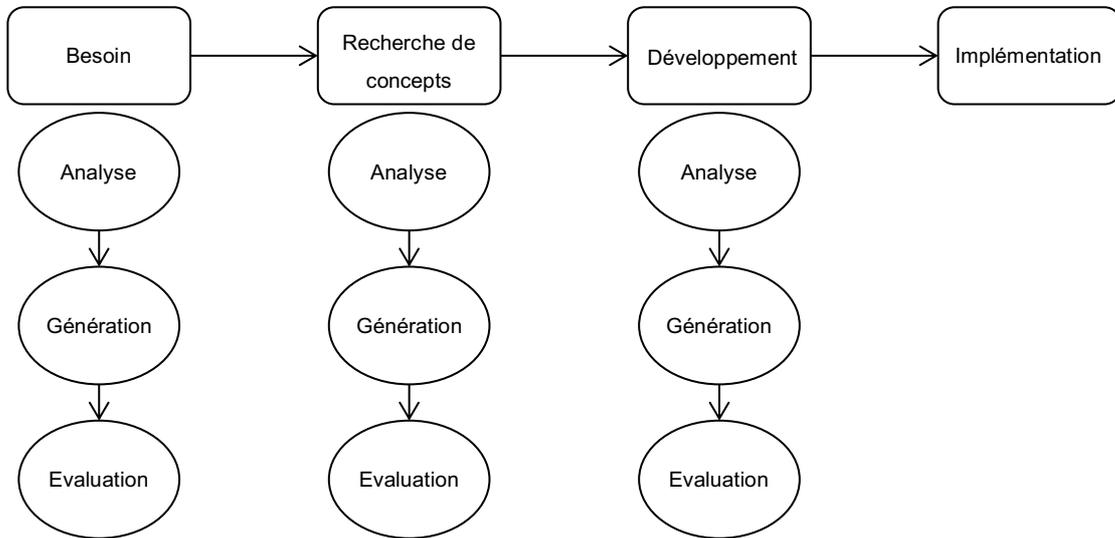


Figure 12 : Modèle de conception créatif proposé à partir du modèle de Howard et al. [21]

Le modèle proposé en Figure 12 montre qu'il existe au moins trois phases d'évaluation dans un processus de conception. Pour réaliser ces phases, les concepteurs vont devoir définir les méthodes ou les critères qui vont permettre de mesurer la performance comparer les représentations intermédiaires et de les comparer.

Une méthode d'évaluation va s'appuyer sur la définition de critères. Selon Blessing [29], les critères « sont utilisés pour pouvoir centrer l'enquête sur la situation existante, évaluer la contribution des résultats de ces enquêtes à l'objectif de la recherche, concentrer le développement du soutien sur les facteurs les plus pertinents, planifier l'évaluation appropriée, concentrer la réalisation du soutien sur cette évaluation et évaluer les résultats de l'évaluation ».

Deux types de critères sont définis :

- Les critères de succès représentant **le bénéfice** généré par la mise sur le marché du produit.

- Les critères de succès mesurables représentant **le succès** potentiel du produit, des indicateurs sont utilisés pour mesurer la performance du produit.

Pour tenter de quantifier ces critères de réussite mesurables, une méthode d'évaluation spécifique est nécessaire. La littérature distingue **deux types d'évaluation** :

- **L'évaluation basée sur les connaissances de l'expert dans le domaine.** Ce type d'évaluation utilise une grille d'évaluation [30] et repose sur l'évaluation de critères subjectifs, c'est-à-dire non quantifiables par des données tangibles.
- **L'évaluation basée sur la quantification de critères de succès.** Ce type d'évaluation accepte différentes formes d'évaluation : par exemple sondage [31] ou matrice [32]. Elle repose sur la mesure de critères objectifs et tangibles.

Pour réduire les ressources consacrées à l'étape de l'évaluation et s'appuyer sur des indicateurs objectifs, les outils sont le meilleur compromis.

La phase d'évaluation étant réalisée dès lors que se produit une phase de génération, il existe donc dans le processus de conception simplifié 3 phases d'évaluation différentes. La nature de la représentation intermédiaire étant changeante, les critères d'évaluation vont eux aussi devoir s'adapter. Plus le produit sera défini, plus les représentations intermédiaires seront complexes et la quantité de données sera plus importante, dès lors l'évaluation sera plus performante, c'est-à-dire précise, mais d'autant plus longue à réaliser.

Nous avons constaté dans cette section qu'il est nécessaire de réaliser plusieurs évaluations au cours du processus de conception, trois plus précisément, et qu'il existe plusieurs méthodes d'évaluation des représentations intermédiaires. Une méthode d'évaluation utilisant des critères objectifs et tangibles limite les ressources du processus de conception.

Nous allons maintenant étudier quelles sont les méthodologies permettant d'intégrer de nouveaux domaines dans le processus de conception afin d'identifier les méthodologies qui ont le plus d'impact sur les phases d'évaluation du produit.

3.3 L'intégration de multiples domaines de compétence dans le processus de conception

Le processus de conception se complexifie de plus en plus :

- L'évolution de la régulation comme l'impact environnemental des produits impose l'intégration de nouveaux domaines d'expertise
- Le temps de conception est réduit pour être toujours au plus près des besoins du consommateur

Pour répondre à ces contraintes, le processus de conception doit lui aussi évoluer en ajoutant des méthodes d'autres domaines dans le processus de conception. Il est nécessaire que le processus de conception puisse utiliser de nouvelles méthodologies permettant l'intégration de ces nouveaux domaines. Les méthodologies issues du Design for X (DfX) permettent d'ajouter de nouveaux domaines (X pour le domaine) dans le processus de conception.

3.3.1 DfX

La méthodologie DfX permet d'améliorer la conception par l'intégration de connaissances du nouveau domaine d'étude X dans le processus de conception. Elle s'appuie en réalité sur le regroupement de plusieurs méthodes qui ont la même base : améliorer la conception dans la perspective X. Tichem [33] définit deux types de X :

- Une propriété spécifique (le coût, la qualité, l'efficacité, la flexibilité, le risque d'impact environnemental)
- Une adaptation à une phase du cycle de vie spécifique (la fabrication, l'assemblage, la distribution, la fin de vie)

Les premières méthodes à avoir vu le jour sont le **design for manufacturing** [34] [35] et le **design for assembly** [7], [36]. Cependant, cela a mis en lumière le fait que chacune de ces méthodes augmentait le coût d'une autre phase [6] et a permis de développer la méthode DFMA (design for manufacturing and assembly).

Les méthodologies issues du DfX permettent d'identifier les critères d'évaluation, ce sont les axes d'amélioration ciblés par la méthode. Nous allons donc étudier les méthodes qui s'intéressent à la fabrication additive et au développement durable.

3.3.2 Design for additive manufacturing (DFAM)

Gibson et al [37] ont développé les adaptations de la conception aux nouvelles possibilités offertes par les procédés de fabrication additive, plus spécifiquement sur les phases « define/develop the construction structure » de Pahl and Beitz [19] qui correspondent à l'étape de **développement** du processus simplifié :

- Utilisation d'un matériau support pour la construction de pièces complexes
- Réalisation de pièces multimatériaux
- Réalisation d'assemblages

Ces procédés de fabrication additive ont simplifié le travail de conception : il « suffit » de réaliser un(e) pièce/assemblage sur un logiciel 3D et de l'importer dans la machine. Gibson et al. anticipent sur l'évolution de ces technologies et n'oublie pas de montrer tous les champs qui seront concernés par cette révolution comme son intégration dans la médecine et sur le développement de nouvelle technologie permettant de réaliser des pièces toujours plus grandes.

Ponche et al [38] ont développé une méthodologie de conception pour la fabrication additive présentée en Figure 13 afin de tenir compte des spécificités du procédé. Elle s'appuie sur une optimisation topologique puis paramétrique, c'est-à-dire que les dimensions de la pièce sont modifiables afin de s'adapter aux paramètres du procédé. La modélisation du procédé permet ainsi de lier les paramètres du procédé à la géométrie du produit et ainsi d'appliquer les règles de conception. Ces règles proviennent d'une connaissance des procédés et peuvent être réalisées pour chacun d'entre eux. Cette méthodologie est complétée par chaque réalisation de pièce et sera optimisée au fur et à mesure. Ce principe utilise la chaîne numérique du procédé afin de comparer et d'identifier les déviations lors de la fabrication. Un post-traitement permet de limiter ces déviations et de modéliser au mieux le procédé.

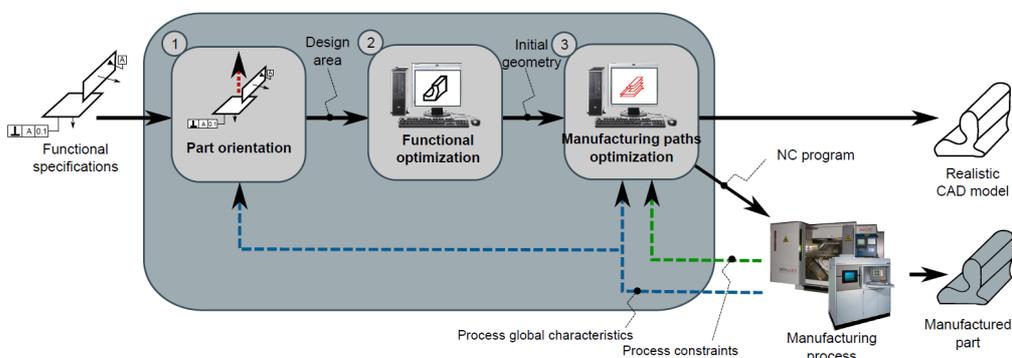


Figure 13 : DFAM par Ponche et al. [38]

Cette méthodologie permet d'obtenir une répétabilité dans la conception de produit grâce aux connaissances du procédé. Il est cependant nécessaire de concevoir des produits adaptés à la fabrication additive, c'est-à-dire qui exploitent tout le potentiel de cette dernière, c'est pourquoi de nouvelles méthodologies de DFAM sont proposées pour adapter le produit aux nouveaux procédés de fabrication [39], [40]. Une autre voie permettant l'intégration de la fabrication additive dans le processus de conception est le Design with additive manufacturing.

3.3.3 Design with Additive manufacturing (DWAM)

Cette méthodologie de conception, proposée par Laverne et al [41], est l'adaptation du DWX, qui reprend le standard DfX, dans le but d'apporter les connaissances dans le domaine X aux concepteurs lors des étapes de conception et plus particulièrement les phases amont. Les étapes du processus de conception n'ont pas le même impact sur les performances du futur produit et l'utilisation la plus bénéfique pour obtenir un produit utilisant le potentiel de la FA est lors des phases amont.

La méthodologie DWAM permet au concepteur de tenir compte des possibilités de la fabrication additive en phase amont de conception et ainsi de développer des concepts qui ne seraient pas jugés viables sans l'apport de connaissances liées au procédé. Elle se différencie de l'approche DFAM qui propose une conception aval optimisée par rapport au procédé de fabrication. Cette méthodologie est de plus compatible et favorable à une utilisation combinée avec le DWAM. En effet, le DWAM présenté en Figure 14 est une méthodologie qui permet d'enrichir les phases de recherche de concepts et est donc utilisée en phase amont de conception, afin de proposer de nouvelles connaissances au concepteur. Ces connaissances nouvelles sont adaptées et proposées au juste besoin du concepteur. Elles sont sélectionnées en amont par la méthodologie suivant le cas d'étude du projet de conception. La sélection de ces connaissances permet d'identifier les caractéristiques de la représentation intermédiaire à évaluer.

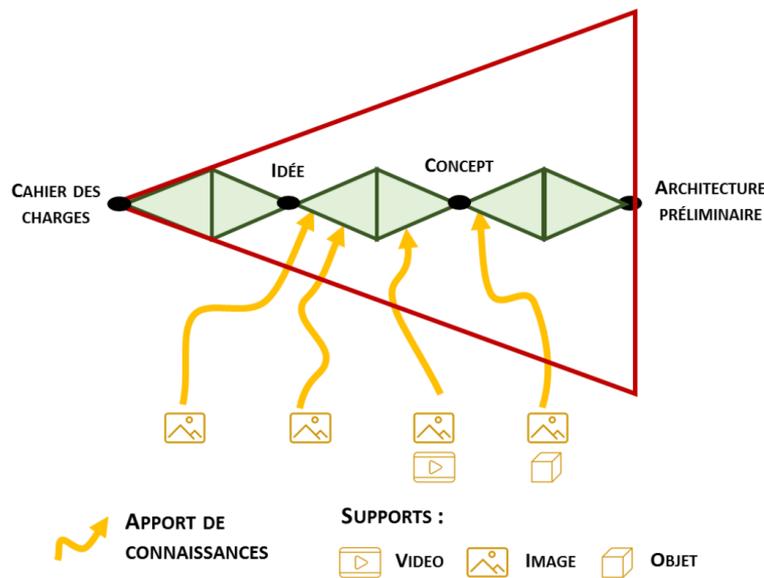


Figure 14 : Processus de conception enrichi par le DWAM de Laverne [28]

Les méthodologies DFAM permettent d'identifier les paramètres de fabrication qui ont une influence sur les caractéristiques du produit. La méthodologie DWAM permet de relier les caractéristiques des représentations intermédiaires à des caractéristiques de produit utilisant le potentiel de la fabrication additive.

3.3.4 Design for Sustainability (DfS)-Environment (DfE)

L'intégration du développement durable dans le processus de conception s'inscrit dans une démarche appelée le « *design for sustainability* » [42] qui reprend le standard du « *design for X* » [33]. On peut voir que Jawahir décrit le *design for sustainability* sous la forme de 6 familles de méthodologie différentes qui font chacune le lien avec le triptyque « économie, environnement, social ». Ces méthodologies sont représentées sur la Figure 15.

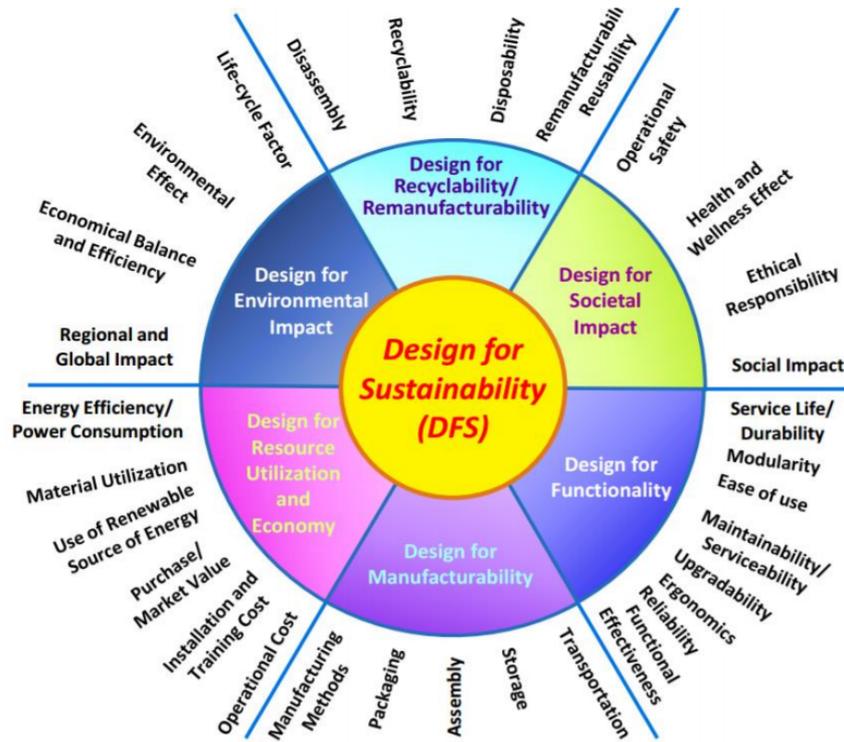


Figure 15 : Design for sustainability [42]

Ces familles de méthodologies ont notamment été étudiées par :

- **Design for Recyclability** [43]
- **Design for societal impact** [44]
- **Design for functionality** [45]
- **Design for manufacturability** [10]
- **Design for resources utilization and economy** [46]
- **Design for environmental impact** [47]

Contrairement à la fabrication additive, le développement durable et l'environnement sont des domaines qui sont étudiables plus facilement dans le processus de conception. Il est de plus en plus fréquent que l'impact environnemental soit directement intégré dans le cahier des charges. Cluzel [48] montre dans sa thèse que l'élaboration du cahier des charges a une importance sur l'impact environnemental du produit. La méthodologie *design for X*, est une méthodologie qui cherche à mettre en place ou à adapter des méthodes de conception pour un objectif particulier. Le DfS est l'union de différentes méthodologies qui s'intéresse à toutes les composantes du développement durable dans la conception comme le « design for environmental impact » ou « design for recyclability » visibles sur la Figure 15.

Comme pour la fabrication additive, il existe plusieurs formes de DfS. Par exemple, Mayyas et al. [49] proposent une méthode d'optimisation de l'impact environnemental dans l'industrie automobile. À partir du cycle de vie, ils proposent de regarder les paramètres qui dimensionnent une voiture vis-à-vis de son impact environnemental. Cette étude lui permet de modéliser les paramètres qui dimensionnent la voiture afin d'estimer l'impact environnemental. De ce fait, il lui est ainsi possible d'estimer les performances de chaque représentation intermédiaire, qui est définie par un ensemble de paramètres.

Les méthodologies DfS identifient les paramètres du produit qui ont une influence sur l'empreinte environnementale du produit et ainsi permettent de déterminer les critères d'évaluations des représentations intermédiaires.

Nous avons constaté dans cette section que les méthodologies DfX permettent d'identifier les critères d'évaluation du produit. Afin de pouvoir comparer ces critères d'évaluation, il est nécessaire de confronter ces derniers à la performance attendue du produit. Nous allons voir dans la prochaine section les différentes définitions de la performance qui permettront de définir les critères d'évaluation de la performance des représentations intermédiaires du produit.

3.4 La performance, une notion aux multiples définitions

Nous allons voir que la définition de la performance dépend de deux facteurs : le domaine à l'étude et la phase du processus de conception à l'étude.

Une définition générique, universellement acceptée est la mesure quantitative de l'efficacité et de l'efficience [13].

Cependant, chaque domaine a sa propre définition de la performance. Pour l'innovation, Shah [9] a défini la performance comme étant la mesure de la qualité, de la quantité, de la nouveauté et de la variété des idées avancées lors de la conception. Pour la performance durable, c'est une combinaison de performances économiques, environnementales et sociétales [50]. Chenhall [51] a, quant à lui, défini la performance comme étant la qualité du produit par rapport aux coûts de production.

Pour concevoir un produit qui réponde à toutes les exigences définies dans le cahier des charges, les performances doivent être évaluées tout au long du processus de conception. Le principal problème de l'évaluation est le manque de données et de ressources. Comme indiqué précédemment, le produit n'est pas suffisamment défini au tout début de la conception, ce qui

signifie que les évaluations nécessitent des méthodes spécifiques pour être précises et utilisables à bon escient. Puisque la définition de performance est différente d'un domaine à l'autre, les méthodes d'évaluation de cette dernière le sont aussi. Dès lors dans les trois prochaines sous-sections, nous nous concentrerons sur les outils d'évaluation dans trois domaines différents : l'innovation, la durabilité et la fabrication additive.

3.4.1 Définition de la performance en innovation

L'aspect innovant d'un produit est créé au cours des premières phases de conception [9]. Nous pouvons distinguer deux types d'innovation : l'innovation incrémentale, qui améliore un produit existant [52], et l'innovation de rupture, qui permet de créer de nouveaux produits pour répondre aux nouveaux besoins [53], [54].

L'innovation peut être évaluée au cours du processus de conception de deux manières différentes :

- L'évaluation du **potentiel organisationnel**, c'est-à-dire évaluation de la capacité de la société à mener à bien le projet de conception. Les outils d'évaluation sont économiques et examinent le succès potentiel du projet sans étudier les données relatives au processus de conception [55], [56].
- L'évaluation du **potentiel du processus de conception**, qui peut être définie comme l'évaluation de différentes représentations intermédiaires du produit au cours des premières phases de conception [57].

Compte tenu de sa position dans le processus de conception, l'innovation doit être évaluée au cours des trois premières étapes : *l'analyse du besoin*, *la recherche de concepts*, et *développement*. Or, encore une fois (2.1.4), le principal problème est le manque de données au cours de ces premières étapes. En effet, l'innovation est produite lors des étapes amont de conception. Elles sont définies comme étant les étapes avant l'architecture préliminaire [11]. Elles concentrent 80 % de la définition du produit final [58] pour seulement 20 % du temps de conception totale.

Dans la phase d'*analyse du besoin*, la conception est réduite à la définition des spécifications, ce qui complique la tâche des concepteurs pour identifier les opportunités et orienter le processus de conception dans la bonne direction. Cependant, cette étape permet de définir les indicateurs de performance pour les étapes suivantes, comme l'ont noté Binz et Reichle lors de l'évaluation du concept de produit [32].

Au stade de la *recherche de concepts*, des outils créatifs sont utilisés pour mener le processus de recherche. Il est crucial d'évaluer les idées afin de sélectionner les meilleures. Cela peut être effectué *via* deux types d'évaluations :

- L'évaluation par des **experts** : les concepteurs s'appuient sur des experts pour définir les objectifs de conception. D'après Zimmer et al. [54], la sélection précoce d'idées de conception par des experts est cruciale pour réduire le temps de conception et obtenir le meilleur produit à la fin du processus de conception. Les experts identifient le potentiel du projet de conception selon quatre caractéristiques (utilité, innovation, rentabilité et concept). La répartition des experts est présentée en Figure 16, on peut voir qu'il est fait référence à un total de 20 experts pour estimer le potentiel innovant de projet de conception. Cette méthode demande donc beaucoup de ressources ;

Procedure stage	Type of expert	Number
Problem setting	Public support structure for innovation project creation	2
	Expert in industrial and legal protection	2
Problem setting and solving	Health professional	2
	Competitive intelligence expert	2
	Scientist specializing in gerontechnology	1
	Health insurer	1
	Sol'iage cluster innovation consultant	2
Problem solving	Venture capitalist	1
	CEO of leading company in the gerontechnology market	2
	Public support structure for start-up creation	3
	Pubic investor in innovation	2

Figure 16 : Répartition des experts pour l'évaluation de l'innovation [54]

- L'évaluation par **des outils** : les concepteurs peuvent évaluer eux-mêmes les représentations intermédiaires de leur produit, à l'aide d'outils spécifiques. Il est essentiel d'utiliser des critères objectifs. Pour Saunders et al. [52], les produits innovants présentent des similitudes, de sorte qu'une étude approfondie des produits performants permet d'extraire des caractéristiques pour évaluer de nouvelles idées.

La phase de *développement* est la dernière où l'évaluation de l'innovation est possible et utile. Les données sont plus significatives et, surtout, l'évaluation peut s'appuyer sur des méthodes classiques telles que la matrice de fonctions pour comparer les concepts avec les objectifs des fonctions ou les caractéristiques cibles. Selon Binz et Reichle [32], l'évaluation des fonctions par les futurs utilisateurs permet de tester l'acceptabilité du futur produit, et contribue donc à améliorer son aspect innovant. Leur méthode est présentée en Figure 17, elle est constituée de 5 étapes :

- **Étape 1** : Les besoins client sont saisis verticalement, les besoins produits sont saisis horizontalement.
- **Étape 2** : Les besoins des clients sont pondérés en fonction de leur importance.
- **Étape 3** : Détermination de l'importance de la nouveauté des exigences du client et du produit en utilisant une échelle de 0 à 10 points.
- **Étape 4** : Détermination du degré de satisfaction des exigences du client par l'identification quantitative des valeurs par rapport aux produits concurrents (bench marking).
- **Étape 5** : Corrélation entre les exigences du client et celles du produit.

Evaluation of Innovative Ideas and Products					Product Requirements												
Company: Metabo, Nuertingen					F = function, W = working principle, E = embodiment design A = assembly, R = recycling												
Object: Cordless drill "Power Grip"					F	F	F	F	F	W	W	E	S	S	S	M	
Programme Version: 05.02.01					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
importance of novelty of customer requirements max. points					6	0	6	5	7	8	0	10	4	0	0	4	
Customer Requirements	F 1	0	turn screws in and out	10	9	8	9	8	9	9	6	3	9	3	0	9	
	F 2	1	high torque, limit	4	10	3	0	9	6	3	6	0	3	3	6	0	
	F 3	2	pos.	5	10	9	3	0	0	0	9	3	6	6	0	6	
	U 4	8	mat.	0	3	0	0	0	0	0	0	9	9	0	0	3	
	U 5	8	use in very tight spaces	9	9	0	0	6	3	3	9	3	3	0	0	9	
	D 6	8	extremely compact lightweight construction	9	0	6	6	0	0	0	9	9	0	0	0	3	
	D 7	0	independent of power supply	9	7	0	0	9	9	0	0	0	0	0	9	0	
	D 8	3	very robust design	4	10	6	0	0	0	0	3	0	3	0	0	3	
	D 9	10	favourable price-performance ratio	8	6	6	3	6	5	6	3	0	3	0	3	3	
	R 10	7	extremely long life	6	6	9	3	9	3	6	6	3	0	0	0	0	
	S 11	6	exchangeable accumulator pack	8	10	0	0	9	9	0	0	0	9	6	0	9	
	E 12	3	professional waste disposal	2	10	3	0	3	3	0	0	3	0	0	0	3	
Target values					1 = 1:100	1.5 N	4.8 V	15000 1/min	1.25 Ah	3 switch stages	20 Nm torque	1/4" size	150 mm length	0.7 N switch point	4.8 V	30 degree	
Influencing Variables	I) market comparison index			max. points	100	0	0	0	80	90	80	0	80	80	0	0	80
	II) producibility index			max. points	100	80	100	90	80	70	90	100	80	80	90	100	70
	III) fulfillment index			max. points	100	90	80	80	70	90	100	100	100	100	50	100	100
	IV) economic efficiency index			max. points	100	50	70	30	60	40	100	100	100	100	30	70	100
	V) ideality index			max. points	100	80	100	70	60	30	100	100	80	90	20	90	50

Figure 17 : Méthode d'évaluation par analyse fonctionnelle [32]

Il devient facile pour les concepteurs lorsque de tels outils sont développés et disponibles pour leur projet d'évaluer leurs représentations intermédiaires. Cependant le développement d'une telle matrice demande un travail d'adaptation au projet de conception en cours, en effet des paramètres sont à renseigner en fonction du type de produit ciblé.

Dans cette section, nous avons indiqué la position des différentes méthodes et outils d'évaluation de l'innovation dans le processus de conception. Chaque méthode a des besoins et des objectifs différents, en fonction de sa position dans le processus. Cet examen n'est pas exhaustif, mais permet d'explorer comment et quand l'innovation est évaluée dans le processus de conception.

3.4.2 Définition de la performance en développement durable

La durabilité signifie qu'il faut tenir compte de trois aspects : le social, l'environnemental et l'économique. Les performances dans ces trois domaines peuvent être évaluées tout au long du processus de conception, en utilisant Design for Sustainability, DfS [42], [59]. Les méthodes d'évaluation dépendent de la quantité et de la qualité des données et sont donc liées à l'étape du processus de conception. Comme pour la performance en matière d'innovation (voir section précédente), l'évaluation de la performance durable peut être analysée selon les différentes étapes du processus de conception.

Au stade de l'*analyse du besoin*, la considération de l'impact environnemental est liée aux objectifs de conception. Ici, les méthodes sont utilisées soit pour fournir des connaissances de base, telles que résumées dans les 10 règles d'or [8], soit pour établir les objectifs de la refonte des produits afin de les rendre plus respectueux de l'environnement, comme l'ont mentionné Cluzel et al. [60].

Au stade de la *recherche de concepts*, les méthodes d'évaluation sont similaires à celles utilisées pour évaluer l'innovation et sont basées sur l'aspect créatif du produit. Certaines méthodes adaptent les outils de créativité pour qu'ils intègrent une dimension environnementale [61], ou pour interroger les concepteurs sur les indicateurs d'impact environnemental [31].

Au stade du *développement*, des méthodes d'évaluation sont utilisées pour évaluer l'architecture du produit. Cette évaluation peut être utilisée pour comparer les sous-produits afin de sélectionner les meilleurs en termes de performance durable [62] ou comparer les architectures vis-à-vis d'indicateurs de durabilité [63], la méthode est présentée en Figure 18.

Elle s'appuie sur la méthode d'évaluation Analytic Hierarchical process (AHP), et se déroule en 5 étapes :

- **Analyser** le facteur d'influence de la durabilité du produit sur les produits générés
- **Calculer** les poids du facteur d'influence
- **Calculer** l'indice de durabilité du produit
- **Identifier** des éléments de conception et des facteurs influençant la durabilité du produit permet d'établir la relation entre eux
- **Choisir** l'architecture la plus performante

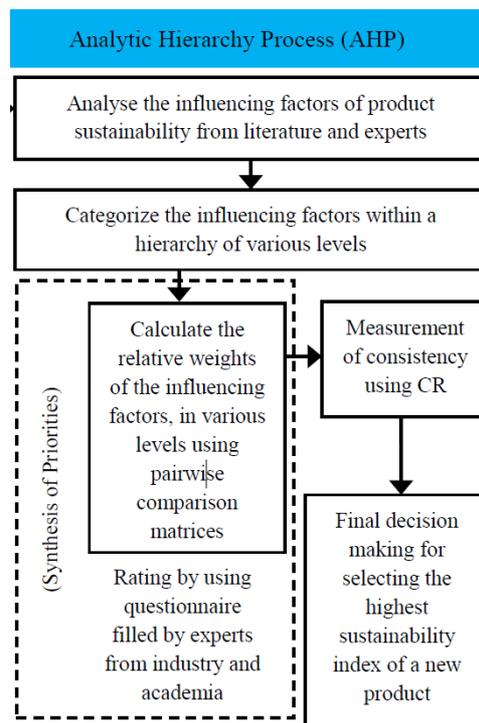


Figure 18 : Méthode d'évaluation AHP [63]

Dans la phase d'*implémentation*, l'ACV est la méthode commune et standardisée. Elle est cependant complexe, en raison du temps et des données nécessaires. Certaines méthodes ont été développées pour simplifier l'évaluation des produits au cours de cette phase, en recommandant différents indicateurs ou en décomposant l'ACV en différentes phases du cycle de vie (par exemple, la fabrication [64]), et en suggérant que les processus soient évalués, afin de les comparer [65].

Les méthodes d'évaluation de la durabilité sont présentes sur tout le processus de conception et permettent ainsi de le suivre au fur et à mesure. Le problème est que l'évaluation n'est pas continue et nécessite autant de méthodes que d'étapes de conception. De plus les méthodes comme l'ACV demandent beaucoup de temps et de données pour être exploitées. Beaucoup de méthodes ont vu le jour afin d'anticiper les résultats de l'ACV [66], le risque étant de faire de trop simplifier le modèle et ainsi obtenir de très écart d'évaluation des impacts environnementaux [67]. Cet état des lieux n'est là encore pas exhaustif, mais permet de voir comment la question de l'évaluation de la durabilité s'intègre dans le processus de conception.

3.4.3 Définition de la performance en fabrication additive

L'évaluation de la performance de fabrication est définie comme l'évaluation du produit ou de sa représentation en fonction de sa capacité à être fabriqué selon le procédé proposé [13]. Elle consiste à déterminer si le produit est correctement conçu pour un procédé de fabrication spécifique et si les règles de conception sont respectées. Elle s'effectue lors des étapes ultérieures de conception, afin de valider le processus et le produit CAO.

Mis en œuvre lors de la phase de *recherche de concepts*, l'outil Design With Additive Manufacturing (DWAM) développé par Laverne [41] a pour objectif d'intégrer la connaissance en fabrication additive dès les premières étapes, afin d'accroître la créativité du produit et le niveau d'innovation des représentations intermédiaires, puis d'évaluer son potentiel. Comme le souligne la proposition de Rias [68], lors de la phase de *recherche de concepts*, il n'y a pas suffisamment de données sur le produit pour analyser la possibilité de fabrication du produit, et il faudra peut-être faire appel à des experts pour analyser son potentiel. Les idées peuvent être évaluées à l'aide d'outils adaptés, comme ceux développés par Booth [69], sous la forme d'une matrice où les règles de conception sont formulées graphiquement pour évaluer le potentiel FA. Cette matrice est présentée en Figure 19, elle s'appuie sur la reconnaissance de situation de fabrication. Les concepteurs qui utilisent cet outil d'évaluation doivent mettre en situation le produit dans l'environnement de fabrication. Les images associées à chaque niveau d'évaluation permettent de rendre cet exercice plus facile.

Design for Additive Manufacturing

A quick method for reducing the number of printing and prototyping failures, by Joran Booth
Instructions: Mark one for each category for the part you plan to print. Check daggers and stars first, then scores

Mark One	Complexity	Mark One	Functionality	Mark One	Material Removal	Mark One	Unsupported Features	Sum Across Rows	Totals
<input checked="" type="radio"/>	Simple parts are inefficient for AM. The part is the same shape as common stock materials, or is completely 2D. 	<input checked="" type="radio"/>	AM parts are light and medium duty. Mating surfaces are bearing surfaces, or are expected to endure for 1000+ of cycles. 	<input type="radio"/>	Support structures run surface finish. The part is smaller than or the same size as the required support structure. 	<input type="radio"/>	Unsupported features will droop. There are long, unsupported features. 	x5 =	
<input checked="" type="radio"/>	The part is mostly 2D and can be made in a mill or lathe without repositioning it in the clamp. 	<input checked="" type="radio"/>	Mating surfaces move significantly, experience large forces, or must endure 100-1000 cycles. 	<input type="radio"/>	There are small gaps that will require support structures. 	<input type="radio"/>	There are short, unsupported features. 	x4 =	
<input type="radio"/>	The part can be made in a mill or lathe, but only after repositioning it in the clamp at least once. 	<input type="radio"/>	Mating surfaces move somewhat, experience moderate forces, or are expected to last 10-100 cycles. 	<input type="radio"/>	Internal cavities, channels, or holes do not have openings for removing materials. 	<input type="radio"/>	Overhang features have a sloped support. 	x3 =	
<input type="radio"/>	The part curvature is complex (splines or arcs) for a machining operation such as a mill or lathe. 	<input type="radio"/>	Mating surfaces will move minimally, experience low forces, or are intended to endure 2-10 cycles. 	<input type="radio"/>	Material can be easily removed from internal cavities, channels, or holes. 	<input type="radio"/>	Overhanging features have a minimum of 45deg support. 	x2 =	
<input type="radio"/>	There are interior features or surface curvature is too complex to be machined. 	<input type="radio"/>	Surfaces are purely non-functional or experience virtually no cycles. 	<input type="radio"/>	There are no internal cavities, channels, or holes. 	<input type="radio"/>	Part is oriented so there are no overhanging features. 	x1 =	
Mark One	Thin Features	Mark One	Stress Concentration	Mark One	Tolerances	Mark One	Geometric Exactness		+
<input type="radio"/>	Thin features will almost always break. Some walls are less than 1/16" (1.5mm) thick. 	<input type="radio"/>	Interior corners must transition gradually. Interior corners have no chamfer, fillet, or rib. 	<input type="radio"/>	Mating parts should not be the same size. Hole or length dimensions are nominal. 	<input type="radio"/>	Large, flat areas tend to warp. The part has large, flat surfaces or has a form that is important to be exact. 	x5 =	
<input type="radio"/>	Walls are between 1/16" (1.5mm) and 1/8" (3mm) thick. 	<input type="radio"/>	Interior corners have chamfers, fillets, and/or ribs. 	<input type="radio"/>	Hole or length tolerances are adjusted for shrinkage or fit. 	<input type="radio"/>	The part has medium-sized, flat surfaces, or forms that are should be close to exact. 	x3 =	
<input type="radio"/>	Walls are more than 1/8" (3mm) thick. 	<input type="radio"/>	Interior corners have generous chamfers, fillets, and/or ribs. 	<input type="radio"/>	Hole and length tolerances are considered or are not important. 	<input type="radio"/>	The part has small or no flat surfaces, or forms that need to be exact. 	x1 =	
					Starred Ratings				
					* Consider a different manufacturing process	33-40 Needs redesign			
					† Strongly consider a different manufacturing process	24-32 Consider redesign			
						16-23 Moderate likelihood of success			
						8-15 Higher likelihood of success			
						Total Score			
							Overall Total		

Research in Engineering and Interdisciplinary Design

Figure 19 : Additive manufacturing Worksheet evaluation [69]

Au stade du *développement*, la quantité de données définissant le produit augmente et de nombreuses méthodes d'évaluation de la FA se trouvent dans la documentation. L'architecture du produit peut être évaluée en vue de sa fabrication par des procédés FA. La méthodologie de conception par fabrication additive (DBAM) [70] utilise le potentiel du paradigme FA comme critère d'évaluation et suggère un outil d'optimisation afin de répondre aux exigences du processus FA. Des méthodologies sont disponibles pour évaluer les pièces CAO, afin d'analyser si la géométrie convient aux caractéristiques du processus (par exemple : couches de construction, orientation des pièces ou épaisseur de coque).

Pendant la phase d'*implémentation*, la performance de la FA est incluse dans une méthodologie globale de conception pour la fabrication additive [DFAM] [38], [71]. Les méthodes DFAM visent en effet comme nous l'avons vu précédemment à optimiser le produit afin qu'il puisse être facilement fabriqué par le procédé FA. Ce type de méthodes est appliqué lors des étapes ultérieures de conception pour valider le projet d'industrialisation. Laverne et al [72] distinguent deux types de méthodes DFAM : l'optimisation orientée pièce [73] et l'optimisation orientée assemblage [74]. Les deux types analysent le modèle CAO afin d'identifier sa géométrie et de l'opposer aux règles de conception et aux objectifs de conception. La DFAM

est généralement utilisée pour réduire la masse ou le volume du matériau utilisé [75], l’évaluation de la performance peut donc prendre la forme d’un résultat d’optimisation.

La littérature ne contient aucune méthode d’évaluation de la FA pour l’analyse du besoin. Les procédés de fabrication sont considérés comme un moyen de répondre aux exigences plutôt que comme une opportunité. En effet, Bourell et al. [76], explique pour que l’évolution de la fabrication additive se poursuive, il faudrait que des critères liés à la FA soient intégrés aux besoins des produits.

L’intégration des contraintes et possibilités de la fabrication additive dans le processus de conception est de plus en plus étudiée en France (par exemple : Nantes [77] ; Bordeaux [78] ou Grenoble [79]). Ces études permettent ainsi le développement de la fabrication additive, mais aussi aux méthodes intégrées au processus de conception.

La performance en fabrication est surtout évaluée dans les dernières étapes du processus de conception. Cependant, l’évaluation de la performance dès les premières étapes de la conception permettrait de sélectionner des représentations intermédiaires qui tirent pleinement profit des possibilités offertes par la FA. Les concepteurs doivent donc changer radicalement leurs méthodes d’évaluation s’ils veulent adapter leurs produits à ce nouveau processus. Cet examen soulève la question du moment exact où la fabrication, en particulier la FA, devrait être évaluée au cours du processus de conception.

3.4.4 Définition d’une performance d’un produit et d’une représentation intermédiaire

Nous avons pu voir dans les trois dernières sections qu’il n’existait pas de performance unique et que la performance dépend des domaines que l’on souhaite étudier. Le choix se fera alors en fonction des domaines pris en compte lors du processus de conception. Si l’on revient à la définition générale exprimée au début de cette section qui était « la mesure quantitative de l’efficacité et de l’efficience » de Neely et al. [13]. Il convient alors d’identifier dans la littérature quelle est la mesure de l’efficacité et de l’efficience dans chacun des domaines que le concepteur souhaite intégrer dans le processus de conception.

Nous avons identifié de ce fait le problème majeur d’un processus de conception multidomaine, il est nécessaire de créer, d’ajouter des méthodes permettant de **relier les domaines** pour que les phases de convergence se réalisent d’une seule et même façon quels que soient les domaines intégrés au processus de conception.

3.5 Synthèse de l'état de l'art

La définition et l'analyse des processus de conception nous ont amenés à étudier les paramètres génériques et communs à l'ensemble des processus de conception, les représentations intermédiaires. De celles-ci nous avons dégagé la définition des représentations intermédiaires clés qui permettent de définir le processus de conception complet en se détachant des activités de conception. En effet, les différents processus de conception ne préconisaient pas les mêmes activités de conception pour obtenir à la fin les mêmes résultats. Il devient ainsi plus pertinent **d'étudier l'évolution de ces représentations intermédiaires afin de valider le processus de conception (constat 1)**. La formulation des activités à réaliser lors du processus créatif met en avant les phases d'évaluation qui deviennent centrales dans la validation du processus de conception simplifié. Elles deviennent de plus en plus **complexes au fur et à mesure de l'évolution des objectifs de conception** et nécessitent **la définition de critères d'évaluation (constat 2)**.

L'apport de nouveaux domaines dans le processus demande de nouvelles méthodologies. Les méthodologies tels que les **DfX permettent d'identifier les critères d'évaluation du produit et d'améliorer ses points faibles (constat 3)**.

L'étape d'évaluation peut ainsi être réalisée à une dernière condition : avoir une définition unique de performance. Nous avons pu voir qu'il existait une définition pour chaque domaine, il est donc nécessaire pour chaque étape d'évaluation de formuler de façon précise **la performance pour chaque domaine et pour chaque représentation intermédiaire (Constat 4)**.

Les constats établis dans l'état de l'art sont listés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Constat de l'état de l'art

Constats	
Constat 1 (Section 3.1)	L'étude des représentations intermédiaires peut se limiter aux représentations intermédiaires clés pour évaluer le projet de conception.
Constat 2 (Section 3.2)	Il est nécessaire de réaliser plusieurs étapes d'évaluation au cours du processus de conception et qu'il existe plusieurs méthodes d'évaluation des représentations intermédiaires. Une méthode d'évaluation utilisant des critères objectifs et tangibles limite les ressources du processus de conception.
Constat 3 (Section 3.3)	Les DfX permettent d'identifier les critères d'évaluation du produit et d'améliorer les points faibles des représentations intermédiaires.
Constat 4 (Section 3.4)	Il est nécessaire pour chaque phase d'évaluation de formuler de façon précise la performance pour chaque domaine et pour chaque représentation intermédiaire.

A partir des constats que nous avons pu exprimer au long de cet état de l'art, nous allons dans le chapitre suivant exprimer la problématique de ce travail ainsi que les hypothèses et la méthodologie de résolution.

4. Problématique et hypothèses

L'état de l'art nous a permis d'énoncer des constats. Nous allons dans ce chapitre formuler la problématique de recherche et les hypothèses permettant de valider notre démarche de résolution.

4.1 Définition de la problématique

Pour formuler la problématique de notre travail de thèse, nous regardons les constats que nous avons pu énoncer dans le chapitre précédent. Ils sont énumérés dans le Tableau 5. Ces constats sont formulés de sorte à identifier les caractéristiques à améliorer dans le processus de conception.

Les constats font apparaître que les phases d'évaluation des représentations intermédiaires lors d'un processus de conception multidomaine sont très **sensibles**, c'est-à-dire qu'il est nécessaire d'apporter des méthodes qui permettront aux concepteurs d'avoir des critères de choix précis en fonction de leurs objectifs de conception. De plus, nous avons pu faire apparaître que **les méthodes permettant d'identifier les critères d'évaluation sont également utilisées pour améliorer les représentations intermédiaires**. Ces différents éléments nous amènent désormais à formuler notre problématique de recherche de la façon suivante :

Comment les phases d'évaluation dans un processus de conception multidomaine peuvent-elles permettre d'accroître les performances du produit à partir des représentations intermédiaires ?

Cette problématique implique une transformation des phases d'évaluation. Cette transformation ne doit pas être une contrainte pour les concepteurs dans le processus de conception, mais doit leur apporter les connaissances manquantes qui auront pu être identifiées grâce à l'évaluation. Ces connaissances permettront ainsi aux concepteurs d'améliorer les performances des représentations intermédiaires.

Nous allons proposer des hypothèses pour répondre à cette problématique. Ces hypothèses mèneront à la formalisation d'expérimentations.

4.2 Proposition méthodologique et hypothèses

Pour répondre à cette problématique, nous proposons une méthodologie de conception composée de 7 étapes adaptée aux phases d'évaluation permettant aux concepteurs d'évaluer et améliorer les représentations intermédiaires présentées en Figure 20 :

- **Étape 0** : Création de l'outil sur mesure, en utilisant la méthode MDET (MultiDomain Evaluation Tool)
- **Étape 1** : Évaluation des représentations intermédiaires
- **Étape 2** : Analyses
- **Étape 3** : DfX
- **Étape 4** : Amélioration
- **Étape 5** : Réévaluation
- **Étape 6** : Comparaison

Les étapes 0 et 1 permettent de créer et d'évaluer la représentation intermédiaire pour établir un bilan. Les étapes 2 à 5 suivent le processus créatif formulé précédemment (Figure 12), enfin l'étape 6 permet aux concepteurs de valider ou de recommencer le processus en fonction des résultats de l'évaluation de l'amélioration.

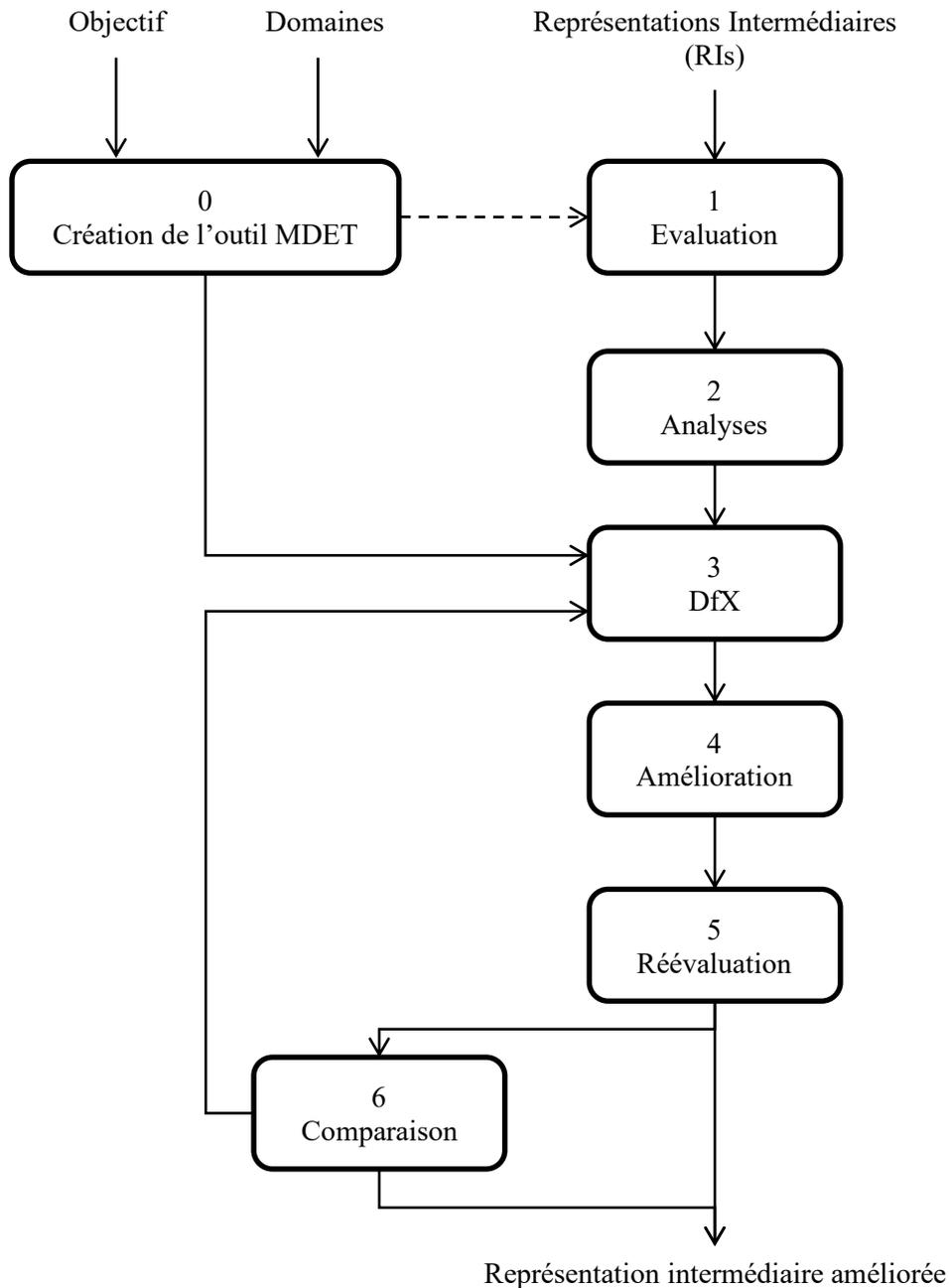


Figure 20 : Méthodologie d'amélioration des RI multidomaines

Cette méthodologie sera expliquée et développée dans le prochain chapitre.

La résolution de la problématique peut être découpée en deux questions différentes :

- Comment rendre l'évaluation multidomaine possible ?
- Comment l'évaluation peut-elle améliorer les représentations intermédiaires ?

Ces deux questions viennent directement de la dualité des constats établis dans l'état de l'art. En effet, nous avons constaté un manque de méthodologie dans les phases d'évaluation. L'opportunité d'ajouter une fonction à cette étape nous pousse à formuler cette deuxième question.

Ces questions nous amènent donc à formaliser des hypothèses décrites dans la Figure 21.

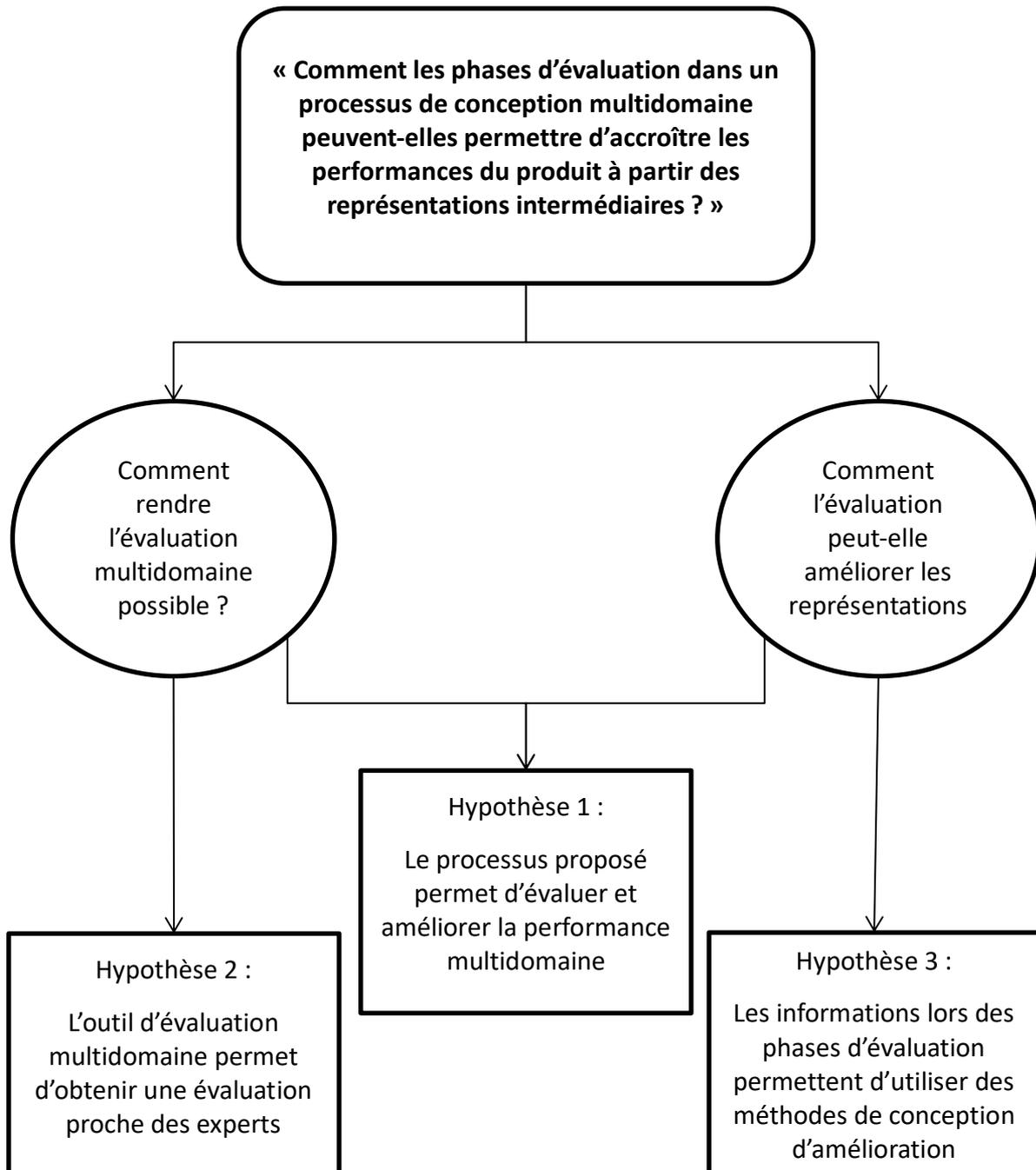


Figure 21 : Problématique et hypothèses

4.2.1 Hypothèse 1 : Le processus proposé permet d'évaluer et d'améliorer la performance multidomaine

L'état de l'art nous a permis d'établir que la phase d'évaluation était nécessaire dans un processus créatif pour s'assurer de la création de valeur lors du processus de conception. Ainsi, un processus d'évaluation multidomaine est proposé afin de rendre l'évaluation multidomaine possible et d'améliorer à terme le produit.

4.2.2 Hypothèse 2 : L'outil d'évaluation multidomaine permet d'obtenir une évaluation proche des experts

L'état de l'art montre l'existence de deux méthodes d'évaluation dans le processus de conception : par des experts et à l'aide de méthode outillée. Une condition pour valider la méthodologie proposée sera de vérifier les résultats produits par la méthode outillée vis-à-vis des résultats d'experts.

4.2.3 Hypothèse 3 : Les informations lors des phases d'évaluation permettent d'utiliser des méthodes de recommandation

La définition de performance étant dépendante des domaines, une méthode d'évaluation multidomaine permet d'identifier pour chaque domaine les points faibles et ainsi proposer les stratégies adaptées pour améliorer les lacunes. La méthodologie doit permettre aux concepteurs d'améliorer les représentations intermédiaires à l'aide de recommandations ciblées sur les points faibles identifiés par la méthode d'évaluation. L'expérience 3 aura pour but de valider l'apport de la méthodologie au travers d'un cas d'application à la fabrication additive et à l'innovation.

Quatre expérimentations vont être réalisées afin de discuter les hypothèses précédemment énoncées. Les expérimentations ont chacune pour objectif de valider en tout ou partie une hypothèse, ces liens sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Lien hypothèses et expérimentations

	Expérimentation 0	Expérimentation 1	Expérimentation 2	Expérimentation 3
Hypothèse 1				
Hypothèse 2				
Hypothèse 3				

Dans le prochain chapitre sera présentée la méthodologie proposée afin de répondre à la problématique énoncée précédemment. Les expérimentations qui découlent des hypothèses formulées seront détaillées par la suite.

5. Méthodologie proposée

La méthodologie proposée est constituée de sept étapes comme présentées sur la Figure 22. Chaque étape sera développée dans une section de ce chapitre. Dès lors, nous présenterons la méthodologie de création de l'outil d'évaluation multidomaine (5.1) : la méthodologie MDET (MultiDomain Evaluation Tool), puis de son utilisation (5.2), pour suivre avec l'analyse des résultats issus de l'utilisation (5.3), de cette analyse, nous nous intéresserons aux recommandations de modifications de la conception (5.4). Les phases d'améliorations (5.5), de réévaluations (5.6) et de comparaisons de cette nouvelle conception seront pour finir étudiées (5.7).

Cette méthodologie permet aux concepteurs d'obtenir :

- un **outil d'évaluation multidomaine** adapté à leurs besoins ;
- une **évaluation de leurs RI** ;
- une **démarche d'amélioration** en ciblant les plus forts potentiels.

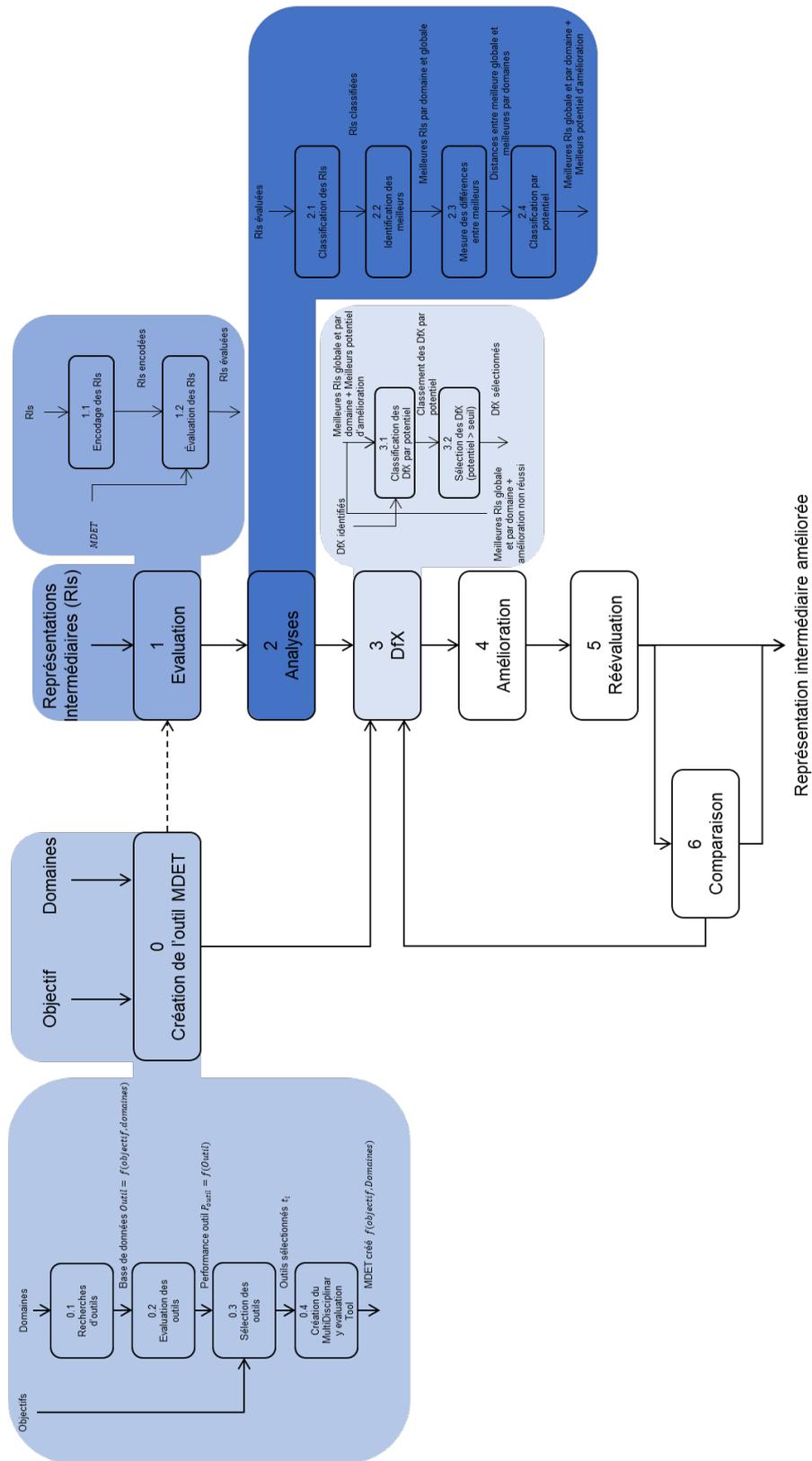


Figure 22 : Méthodologie d'amélioration des RIs multidomaines

5.1 Création de l'outil d'évaluation « MDET »

L'évaluation d'un produit lors des phases du processus de conception demande une quantité considérable de ressources de par l'interaction de plusieurs domaines d'expertises. L'étape 0 de création de l'outil de notre méthodologie a pour objectif de fournir un outil d'évaluation dédié à la résolution de ce problème. Cette étape a pour objectif de réaliser la méthode appelée MDET (MultiDomain Evaluation Tool). Cette méthode en quatre étapes permet de créer un outil d'évaluation multidomaine qui sera adapté à la phase du processus de conception voulu et aux domaines intégrés. Ces quatre étapes sont développées sur la Figure 23. Cette étape est numérotée 0, car elle peut être réalisée en amont du processus de conception.

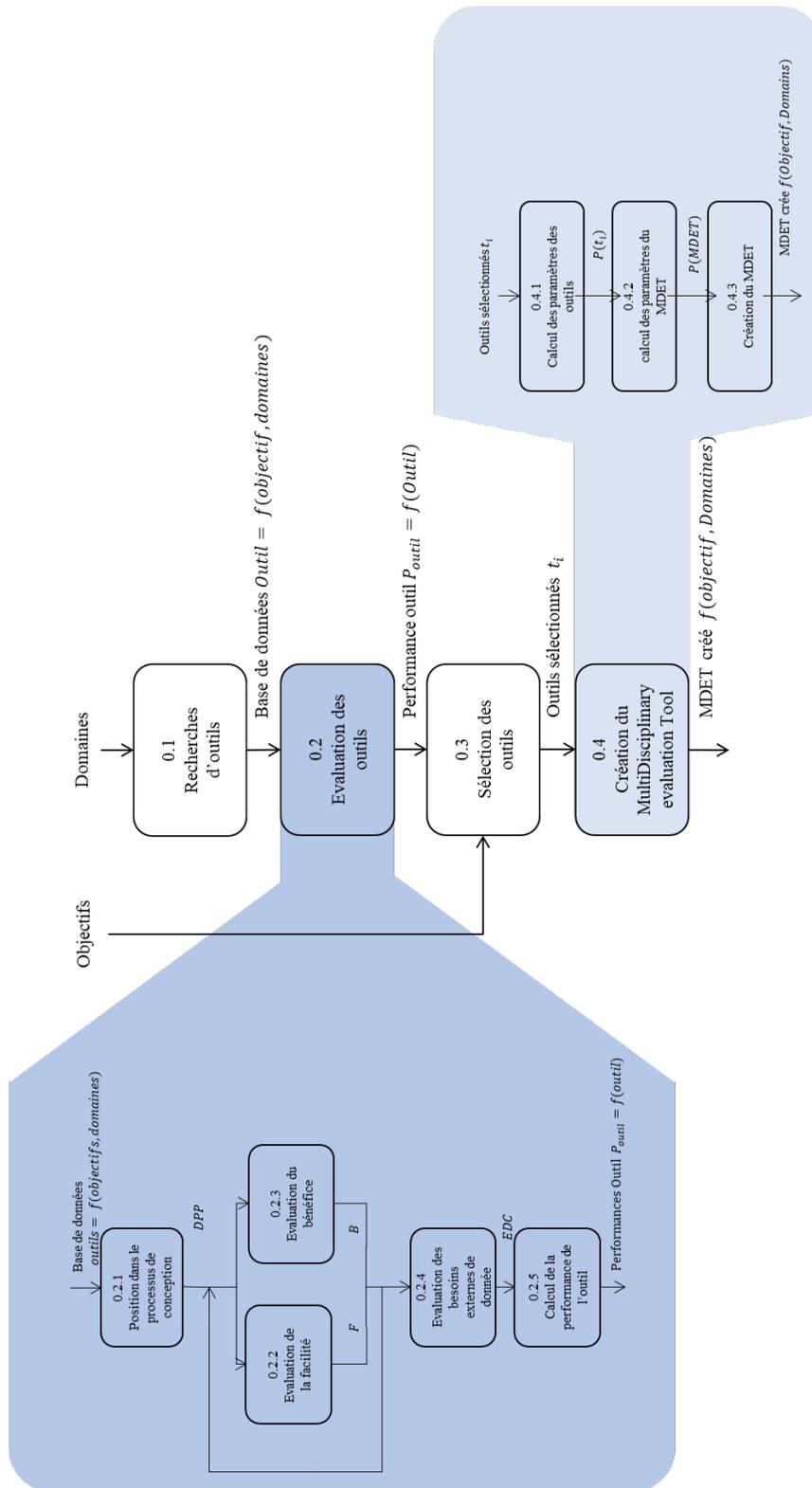


Figure 23 : Création de l'outil d'évaluation multidomaine

5.1.1 Étape 0.1 : Recherche d'outils

Nous avons pu voir lors de l'état de l'art (3.4) qu'il existait un grand nombre d'outils d'évaluation disponibles dans la littérature. L'analyse des outils existants permet de sélectionner ceux qui conviennent le mieux au projet de conception. Nous présenterons une méthode rendant possible l'extraction des informations nécessaires à la création d'un outil d'évaluation multidomaine. C'est pourquoi la première étape de la méthodologie concerne la recherche des outils d'évaluation existants dans la littérature en fonction des domaines que le concepteur souhaite évaluer (par exemple : innovation, durabilité, fabricabilité, maintenance, recyclage, évaluation du cycle de vie, coûts, *etc.*).

Une base de données est ensuite créée, dans laquelle les outils sont identifiés en fonction des domaines du projet de conception et de l'étape correspondante du processus de conception.

5.1.2 Étape 0.2 : Évaluation des outils

Une fois les outils sélectionnés disponibles dans la base de données, il faut proposer aux concepteurs une méthode permettant d'identifier lesquels retenir. Pour cela, nous avons proposé des critères d'évaluation des outils que nous développons dans la sous-section suivante.

5.1.2.1 Critères d'évaluation des outils

Après la sélection des outils issus de la littérature, le but est de sélectionner objectivement ceux qui répondent le mieux aux besoins du concepteur. Cette méthode d'évaluation repose sur quatre critères :

- la position dans le processus de conception (*design process position*, DPP)
- la facilité d'utilisation de l'outil (*facility*, F)
- le bénéfice de l'outil (*benefit*, B)
- la contrainte de données externes (*external data constraint*, EDC)

Ces critères ont été choisis, car ils sont non spécifiques à un domaine et peuvent donc être utilisés pour les différents domaines du projet de conception. DPP aide à déterminer quelle phase de conception est concernée par l'outil. F permet d'évaluer le besoin d'expertise pour utiliser l'outil. B est utilisé pour classifier les différents types d'outils, comme proposé par Bovea et Pérez-Belis [47]. EDC indique la quantité de données nécessaire pour créer les indicateurs de performance.

Les outils sont évalués en cinq étapes suivant le processus illustré à la Figure 24.

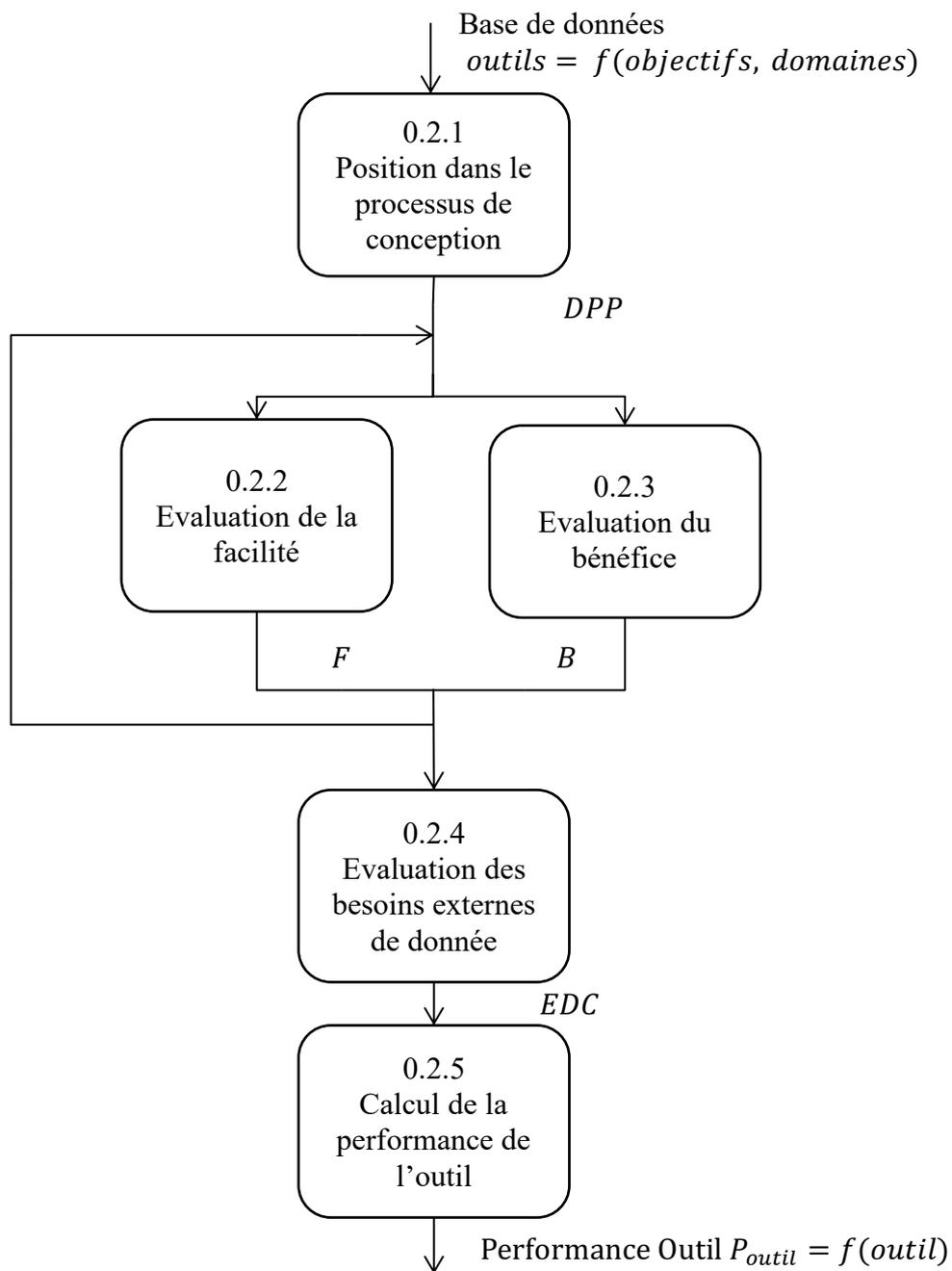


Figure 24 : Méthode d'évaluation des outils de l'état de l'art

5.1.2.2 Étape 0.2.1 : Position dans le processus de conception

Dans cette étape, les outils sont classés en fonction de l'étape du processus de conception dans laquelle ils ont vocation à être utilisés. Les critères DPP sont ensuite affectés à l'outil. Si l'outil est utile pour plus d'une étape de conception, les étapes 0.2.1 à 0.2.5 sont complétées pour chaque étape, c'est-à-dire pour chaque DPP.

5.1.2.3 Étapes 0.2.2 et 0.2.3 : Facilité et bénéfice des outils

Ici, les critères F et B sont appliqués à l'outil pour la phase de conception pertinente, comme indiqué dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Critère d'évaluation de la facilité et du bénéfice

Note	Évaluation de la Facilité	Évaluation du Bénéfice
0	L'outil n'est pas utilisé à cette étape.	L'outil n'est pas utilisé à cette étape.
1	Une expertise et un long temps de qualification sont nécessaires.	Les avantages et les inconvénients sont identifiés par l'outil.
2	Une expertise ou un long temps de qualification sont nécessaires.	Les indicateurs de performance sont fournis par l'outil.
3	La connaissance du domaine est requise et/ou le temps de qualification est nécessaire.	Les lignes directrices pour l'amélioration sont fournies par l'outil.
4	Aucune expertise/connaissance n'est nécessaire ou seulement un temps de qualification court.	Des améliorations potentielles sont proposées par l'outil.
5	Aucune expertise/connaissance n'est nécessaire et seulement un temps de qualification court.	L'outil fournit une solution plus performante.

5.1.2.4 Étape 0.2.4 : Évaluation des besoins externes de donnée

Dans cette étape, l'EDC de l'outil est évalué conformément au Tableau 8. Le calcul de l'EDC permet d'identifier les outils qui nécessitent une grande quantité de données externes (par exemple la définition complète d'un produit précédent lorsque l'outil est basé sur des comparaisons entre différents produits).

Tableau 8 : Critères d'évaluation du besoin externe de données

Note	Évaluation du besoin externe de données
0,5	Reconception: besoin de données sur le produit précédent
1	Besoin de données sur l'option de l'étape précédente
2	Indépendant des données externes

5.1.2.5 Étape 0.2.5 : Évaluations des outils

Le calcul des performances de l'outil (P_{outil}) est effectué conformément à l'équation 1.

$$P_{outil} = (F + B) \times EDC \quad (1)$$

Cette équation est utilisée pour distinguer les outils en définissant leurs qualités intrinsèques d'installation et leur avantage par rapport à leur besoin de données externes, ce qui est un défaut. L'outil le plus adapté est celui avec la valeur P_{outil} la plus élevée.

5.1.3 Étape 0.3 : Sélection des outils

Une fois que tous les outils évalués, les meilleurs peuvent être sélectionnés. Le but de cette étape est dès lors d'établir le seuil de sélection et d'identifier le DPP du futur MDET. Ce seuil peut être défini de deux manières :

- Un seuil permettant de sélectionner X % d'outils
- Un seuil permettant de sélectionner les outils supérieurs à $P_{outil} > X$
- Un seuil mobile permettant de sélectionner les outils supérieurs à $P_{outil} > P_{max} \times (1 - X)$

Un exemple est donné dans la section consacrée à l'étude de cas (6.4.3).

5.1.4 Étape 0.4 : Création du MultiDisciplinary Evaluation Tool

Le MDET est créé en trois étapes distinctes comme illustrées à la Figure 25.

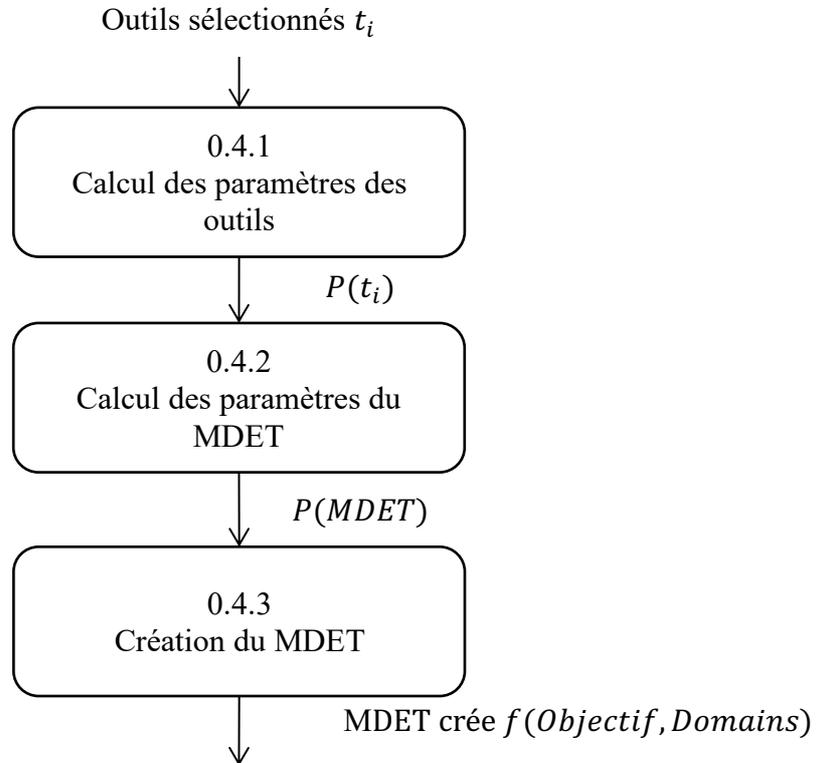


Figure 25 : Processus de création de l'outil multidomaine

5.1.4.1 Étape 0.4.1 : Calcul des paramètres des outils

Une fois les N meilleurs outils sélectionnés (noté t_i avec $i \in [1..N]$) à l'étape 0.3, l'étape 0.4 de la méthodologie correspond à la création du MDET. Il convient alors de « combiner » les meilleurs outils des différents domaines d'évaluation pour aboutir à un outil d'évaluation multidomaine. Afin de limiter la subjectivité dans la détermination de l'outil global, une caractérisation plus précise des outils à fusionner est nécessaire.

Chaque outil sélectionné est donc divisé en six paramètres permettant de décrire les données utilisées et leur utilisation. Ces paramètres décrivent l'outil de la prise en compte des données d'entrée (P_1 et P_4 internes et externes), de trois étapes internes (identification du critère P_2 , établissement des règles de conception P_3 et de l'évaluation proposée P_5) ainsi que celle des données de sortie (P_6). Chaque paramètre est associé à son propre modèle de calcul.

Sur la Figure 26, chaque outil t_i est défini par six paramètres $P_1(t_i)$ à $P_6(t_i)$. En conséquence, le MDET est également caractérisé par ces six paramètres $P_1(MDET)$ à $P_6(MDET)$.

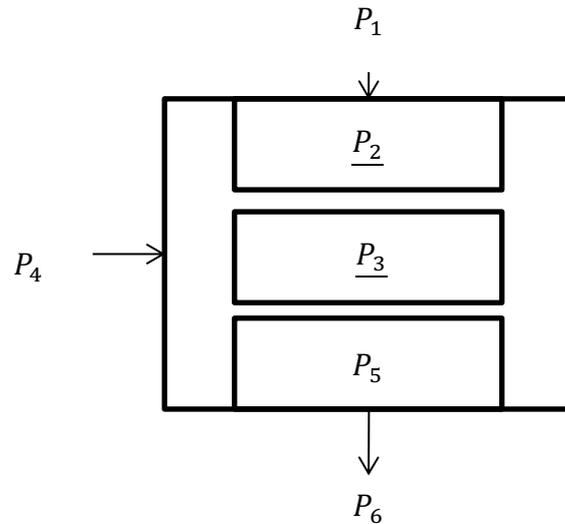


Figure 26 : Paramètres des outils d'évaluation

Le paramètre $P_1(t_i)$ définit la nature des données disponibles au cours de l'étape correspondante du processus de conception. Ce paramètre dépend donc directement du DPP :

- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est *l'analyse du besoin*, alors

$$P_1(t_i) = 1$$
- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est la *recherche de concepts*, alors

$$P_1(t_i) = 2$$
- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est en *développement*, alors

$$P_1(t_i) = 3$$
- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est *l'implémentation*, alors

$$P_1(t_i) = 4$$

Le paramètre $P_2(t_i)$ est utilisé pour décrire la manière dont l'outil analyse et sélectionne les critères d'évaluation. Il sera représenté comme étant une liste composée de D lignes, où D est le nombre de domaines concernés par l'évaluation globale.

- Si l'outil t_i n'évalue que le premier domaine sur trois et utilise un seul critère à cet effet, alors $P_2(t_i) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ et on le note $p_{2,1}(t_i) = 1, p_{2,2}(t_i) = 0, p_{2,3}(t_i) = 0$

Le paramètre $P_3(t_i)$ sert à décrire comment l'outil traduit les critères sélectionnés en règle de conception. Par exemple, si l'outil t_i n'évalue la durabilité que selon la règle de conception « Utiliser uniquement des matériaux recyclables », alors, et on le note $p_{3,durabilité}(t_i) = 1$

Le paramètre $P_4(t_i)$ quantifie les données externes nécessaires à l'évaluation et est basé sur le critère EDC. Par exemple, si l'outil t_i nécessite quatre éléments de données externes pour l'évaluation, alors $P_4(t_i) = 4$.

Le paramètre $P_5(t_i)$ décrit comment les règles de conception sont transformées en un outil d'évaluation, qu'il s'agisse d'un questionnaire, d'une matrice ou d'une comparaison.

Par exemple :

- Si l'outil est un questionnaire, alors $P_5(t_i) = 1$
- Si l'outil est une matrice, alors $P_5(t_i) = 2$
- Si l'outil est un outil de comparaison, alors $P_5(t_i) = 3$

Le paramètre $P_6(t_i)$ définit la nature des données à l'issue de la phase de conception à l'étude.

Les différentes valeurs sont :

- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est *l'analyse du besoin*, alors
 $P_6(t_i) = 1$
- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est la *recherche de concepts*, alors
 $P_6(t_i) = 2$
- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est en *développement*, alors
 $P_6(t_i) = 3$
- Si l'étape de conception concernée par l'outil t_i est *l'implémentation*, alors
 $P_6(t_i) = 4$

5.1.4.2 Étape 0.4.2 : Calcul des paramètres du MDET

Une fois que ces six paramètres ont été définis pour chacun des outils sélectionnés, les parties pertinentes de chaque outil sont sélectionnées pour créer le MDET. Cet outil est donc caractérisé par six paramètres calculés selon les équations 2 à 7 ci-dessous.

Le MDET étant créé pour une seule étape de conception, les outils sélectionnés ont tous le même DPP. Ainsi, tous les $P_1(t_i)$ et tous les $P_6(t_i)$ sont égaux pour les outils sélectionnés.

$$P_1(MDET) = P_1(t_i) \quad (2)$$

$$P_6(MDET) = P_6(t_i) \quad (3)$$

$$\underline{P_2(MDET)} = \begin{pmatrix} \sum_{k_1=1}^{n_{F_1}} p_{2,1}(t_{k_1}) \\ \dots \\ \sum_{k_D=1}^{n_{F_D}} p_{2,D}(t_{k_D}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

où t_{k_j} sont les outils qui répondent le mieux au critère F pour le domaine j, et n_{F_i} est le nombre d'outils impliqués. Pour ce calcul, seuls les outils jugés en termes de facilité d'utilisation sont donc utilisés.

$$\underline{P_3(MDET)} = \begin{pmatrix} \sum_{k_1=1}^{n_{F_1}} p_{3,1}(t_{k_1}) \\ \dots \\ \sum_{k_D=1}^{n_{F_D}} p_{3,D}(t_i) \end{pmatrix} \quad (5)$$

où t_{k_j} sont les outils pour lesquels le paramètre F est le meilleur pour le domaine j, et n_{F_i} est le nombre d'outils impliqués.

$$P_4(MDET) = \sum_{j=1}^D \sum_{k=1}^N P_4(t_{k_j}) \quad (6)$$

où t_{k_j} sont les outils pour lesquels le paramètre F est le meilleur pour le domaine j, et n_{F_i} est le nombre d'outils impliqués.

$$P_5(MDET) = P_5(t_i) \text{ if } F(t_i) = \text{Max} \{F_{t_i}\} \quad (7)$$

5.2 Étape 1 : Évaluation des outils

5.2.1 Déroulement de l'évaluation

Cette étape de la méthodologie s'adresse directement aux utilisateurs de l'outil et est décomposée en deux étapes comme décrites sur la Figure 27, une première étape permettant d'encoder les RI et une seconde étape d'évaluer ces dernières.

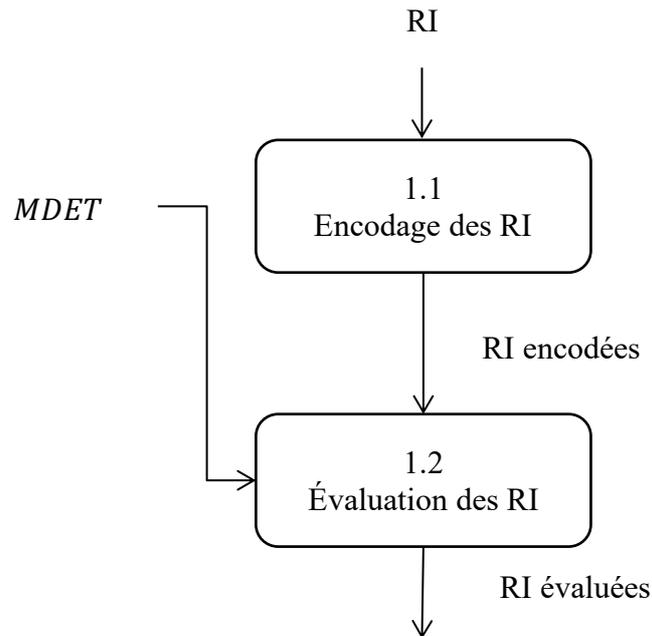


Figure 27 : Processus d'évaluation des RI

Les concepteurs vont utiliser notre outil d'évaluation pour évaluer leur portfolio de représentations intermédiaires. Chaque évaluation de RI sera considérée comme étant une ligne du tableau $\underline{\underline{E_{N,D}}}$ avec N le nombre d'idée et D le nombre de domaine, encadré dans le Tableau 9 :

Tableau 9 : Exemple de tableau de résultat d'évaluation

Domaine	Critère	Paramètres de conception	RI			
			RI 1	RI 2	...	RI N
Domaine 1	Critère 1	Paramètres de conception 1				
		...				
		Paramètres de conception k_{1_1}				
	Critère 2	Paramètres de conception 1				
		...				
		Paramètres de conception k_{1_2}				
				
	Critère j_1	Paramètres de conception 1				
		...				
Paramètres de conception k_{j_1}						
...				
Domaine D	Critère 1	Paramètres de conception 1				
		...				
		Paramètres de conception k_{2_1}				
	Critère 2	Paramètres de conception 1				
		...				
		Paramètres de conception k_{D_2}				
				
	Critère j_D	Paramètres de conception 1				
		...				
Paramètres de conception k_{j_D}						

Ainsi la RI qui sera référencée comme RI 1 aura comme évaluation $\underline{E_{1,D}}$, c'est-à-dire la première colonne du tableau $\underline{E_{N,D}}$.

Cette liste sera décomposée d'autant de parties qu'il y a de domaines étudiés et aura autant de ligne que du nombre des différents paramètres de conception.

5.2.2 Résultats de l'évaluation

Le résultat de l'évaluation va dépendre de paramètres $P_2(MDET)$, $P_3(MDET)$ et $P_5(MDET)$ de l'outil réalisé, mais aussi du degré d'importance choisi par le concepteur de l'outil (ou le chef de projet) des pondérations entre chaque domaine. En effet, pour obtenir les trois niveaux d'évaluations souhaités si après, il est nécessaire de renseigner les poids de chaque domaine dans l'évaluation globale.

Nous identifions trois types d'évaluations dans les résultats :

- L'évaluation de chaque critère $E_{C_{D_i}}$
- L'évaluation dans chaque domaine D_i que l'on notera E_{D_i}
- L'évaluation globale que l'on notera E_G

Dans cette partie, nous montrerons le cas pour n'importe quel type de pondération en fonction de la définition de l'outil MDET.

Chaque évaluation est indépendante et peut être différente selon le domaine et le positionnement dans le processus de conception.

Comme énoncé lors de la section précédente, le MDET est composé de plusieurs composantes, celle traitant des indicateurs, des critères et des paramètres d'évaluation sont stockés dans les paramètres $P_2(MDET)$, $P_3(MDET)$ et $P_5(MDET)$.

- $P_2(MDET)$ définit les critères d'évaluation
- $P_3(MDET)$ définit les paramètres de conception
- $P_5(MDET)$ définit la méthode d'évaluation

L'évaluation globale va dépendre de l'évaluation des critères qui vont eux-mêmes dépendre de l'évaluation des paramètres de conception.

Il est nécessaire de définir trois types de données pour que l'ensemble des évaluations puisse être réalisé :

- La pondération entre les paramètres de conception P_R qui sera définie par le $P_2(MDET)$
- La pondération entre les critères P_C qui sera définie par le $P_3(MDET)$
- La pondération entre les domaines d'évaluation P_G qui sera définie par le concepteur de l'outil ou le chef de projet.

Grâce à ces informations, nous pouvons donc définir les équations 8 à 10 pour les évaluations de la RI j : $E_C(j)$, $E_D(j)$ et $E_G(j)$:

$$E_{C_{D_i}}(j) = \sum_{k=1}^{n_{R_{D_i}}} P_R(k).E_{k,j} \quad (8)$$

$$E_{D_i}(j) = \sum_{k=1}^{n_{C_i}} P_C(k).E_{C_{D_i}}(j) \quad (9)$$

$$E_G(j) = \sum_{i=1}^{N_D} P_G(D_i).E_{D_i}(j) \quad (10)$$

À partir de ces différentes définitions, chaque RI a obtenu une évaluation pour chaque règle de conception, chaque critère et chaque domaine. Nous pouvons donc passer à l'étape suivante qui est l'analyse des résultats qui nous permettra d'identifier les meilleures RI.

5.3 Étape 2 : Analyse

L'étape d'analyse fournit aux concepteurs les différentes évaluations des RI tout en isolant à la fois la meilleure RI globale ainsi que les meilleures RI pour chaque domaine.

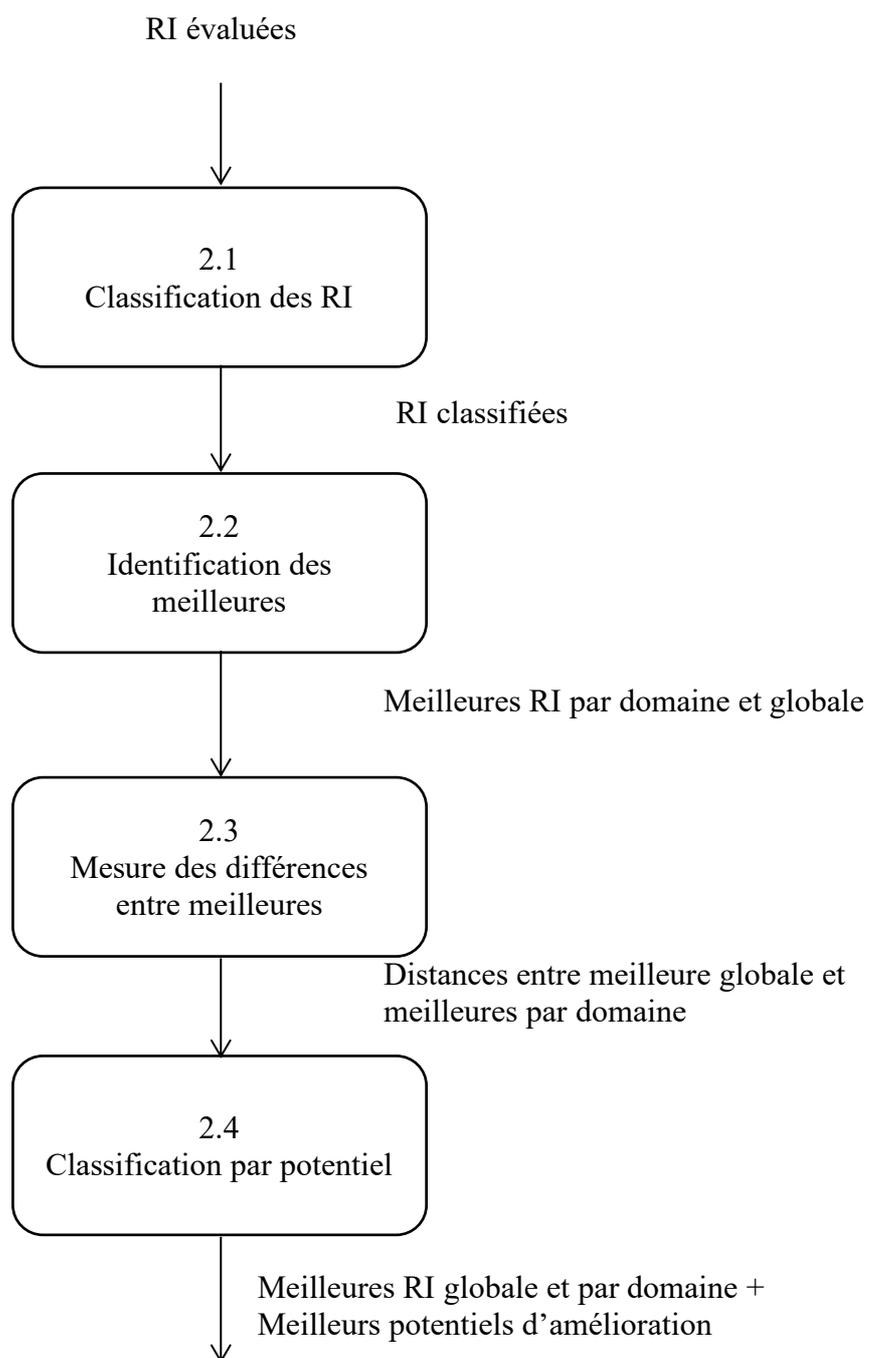


Figure 28 : Processus d'analyse des RIs

Le processus d'analyse s'articule autour de **4 sous-étapes** comme proposées sur la Figure 28:

- La phase de **classification** des RI permet d'ordonner les RI par ordre d'importance, c'est-à-dire de la note la plus élevée à la plus faible.
- **L'identification** des meilleures RI permet d'isoler celles qui ont la meilleure évaluation dans chaque domaine, mais aussi celles qui ont obtenu l'évaluation globale la plus importante. Comme sur la Figure 29, nous pouvons identifier :
 - La meilleure RI pour le domaine 1 : 2
 - La meilleure RI pour le domaine 2 : 3
 - La meilleure RI pour le domaine 3 : 5
 - La meilleure RI pour l'évaluation globale : 2

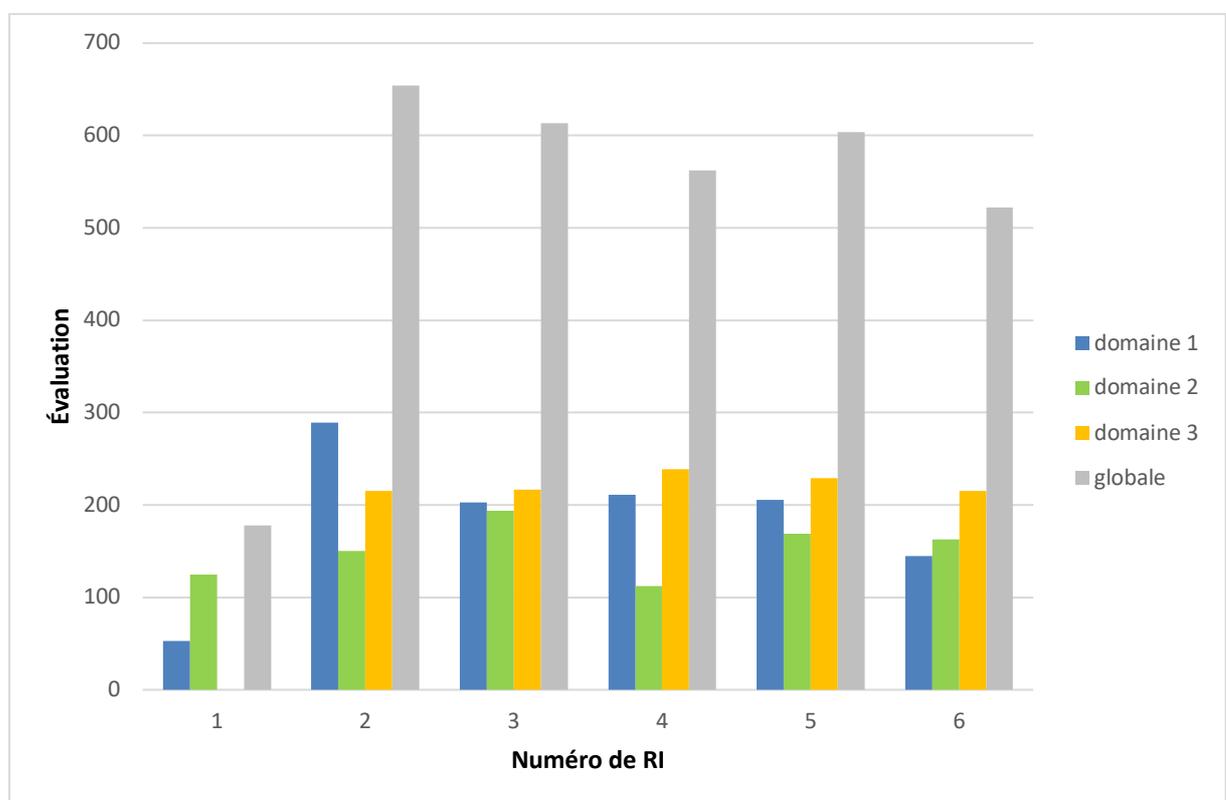


Figure 29 : Résultats de l'évaluation

- La **mesure des écarts** entre la ou les meilleures RI et la ou les meilleures pour chaque domaine permet d'identifier les potentiels d'amélioration susceptibles d'être mis en œuvre dans les étapes suivantes comme identifier sur la Figure 30, nous pouvons mesurer deux potentiels d'amélioration pour la RI 2, sur le critère 1 (RI 2') et le critère 2 (RI 2'').

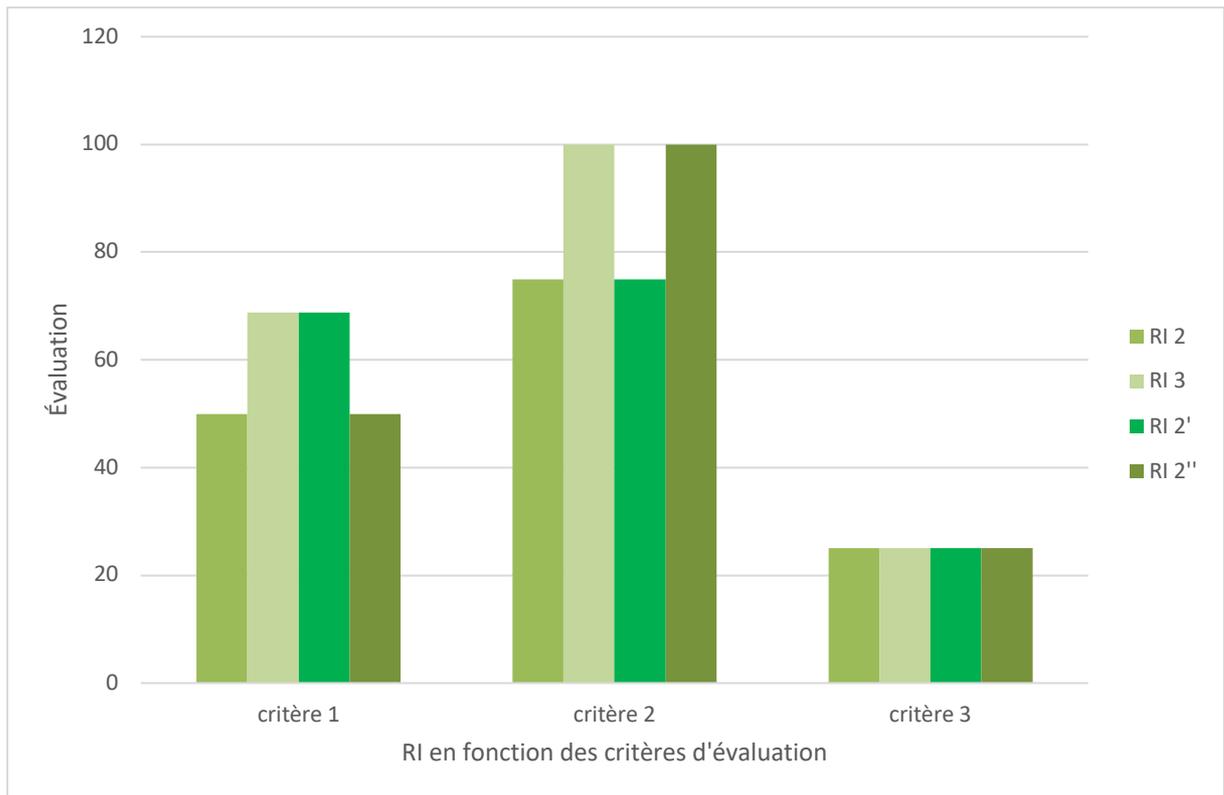


Figure 30 : Identification et mesure des potentiels d'amélioration

- La **classification des potentiels** est réalisée afin de privilégier ceux qui auront l'impact plus important sur les performances des meilleures RI comme présenté sur le Tableau 10 :

Tableau 10 : Classification des potentiels

	Potentiel	Classement
Domaine 2	Potentiel 1	18,75
	Potentiel 2	25
Domaine 3	Potentiel 1	4,17
	Potentiel 3	16,67
	Potentiel 4	2,78

5.4 Étape 3 : DfX

Cette étape de la méthodologie a pour but d'améliorer la ou les RI dont l'évaluation globale est la meilleure. Cette amélioration va s'appuyer sur des recommandations extraites et adaptées de méthodes de conception qui se focaliseront sur chaque règle de conception évaluée. Ces méthodes sont issues de l'analyse de l'état de l'art (section 3.3.1) qui permet ainsi de développer les stratégies permettant d'améliorer la représentation intermédiaire. Ces recommandations vont permettre aux concepteurs lors de la phase d'amélioration de comprendre et d'adapter la conception de leur(s) RI.

Cette étape suit le processus illustré sur la Figure 31.

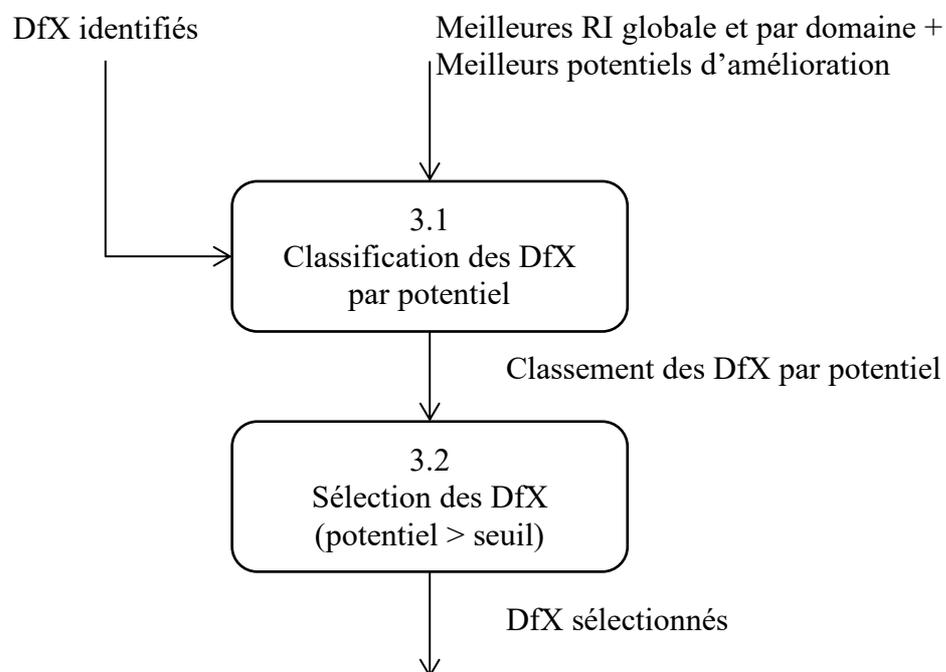


Figure 31 : Processus de recommandation des DfX

Pour chaque critère d'évaluation est associé un DfX identifié lors de la phase de création de l'outil. Une harmonisation des DfX est réalisée afin de s'assurer qu'il y ait un équilibre entre les recommandations.

Cependant, il faut faire attention au lien qui peut exister entre les recommandations et les domaines. En effet, il est très courant que les améliorations développées aient des contreparties dans d'autres critères, il faut donc relier les différents critères les uns aux autres pour ne pas avoir de compensations négatives trop importantes.

Comme montré sur la Figure 32, il faut donc faire l'arborescence des critères d'évaluation afin d'identifier les liens existants entre les différents critères pour anticiper ces contreparties et ainsi justifier les choix de DfX formulés aux concepteurs. Seront formalisées en rouge les contreparties négatives et en vert les contreparties positives sur la figure ci-après.

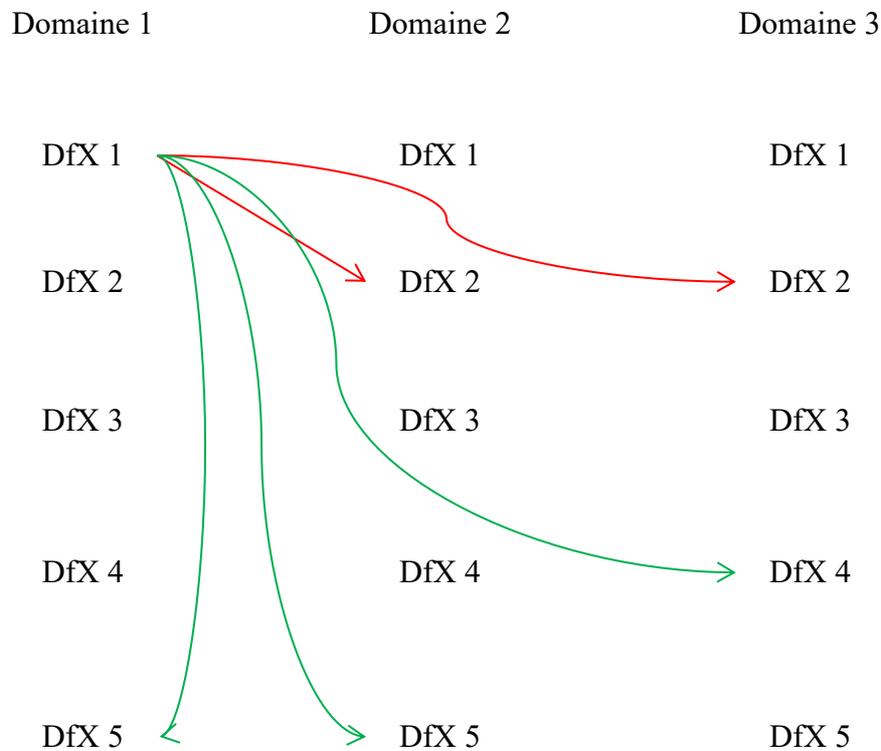


Figure 32 : Modélisation de l'arborescence des contreparties des DfX

Ces liens entre DfX sont ainsi formalisés pour la sélection des recommandations comme montrée dans l'équation 11 suivante, où \underline{E}_i est l'évaluation initiale, \underline{E}_a est l'évaluation améliorée, \underline{P} est le potentiel d'amélioration et \underline{M}_{DfX} est la matrice des DfX :

$$\underline{E}_i + \underline{M}_{DfX} \times \underline{P} = \underline{E}_a \quad (11)$$

La matrice $\underline{M_{DfX}}$ est formalisée afin de quantifier les liens entre les DfX qu'ils soient positifs ou négatifs. De cette formalisation, nous recherchons donc une amélioration des potentiels \underline{P} qui vérifient l'équation 12 :

$$\frac{\|\underline{E_a}\|}{\|\underline{E_i}\|} > 1 \iff \frac{\|\underline{E_i} + \underline{M_{DfX}} \times \underline{P}\|}{\|\underline{E_i}\|} > 1 \quad (12)$$

Une fois les potentiels \underline{P} sélectionnés nous proposons aux concepteurs les DfX associés. Ainsi nous avons pu mesurer l'amélioration envisageable de la RI. Nous nous sommes assurés de ce fait que les DfX n'allaient pas dégrader les performances de la RI sélectionnée.

5.5 Étape 4 : Amélioration

L'étape d'amélioration permet aux concepteurs de reprendre le portfolio de RI à partir des meilleures RI et des recommandations de l'étape précédente afin d'améliorer et de proposer une ou plusieurs nouvelles RI.

5.6 Étape 5 : Réévaluation

L'étape de réévaluation est réalisée afin de vérifier que les modifications n'ont pas entraîné de contreparties trop importantes dans des critères annexes et que l'amélioration est globale. On reproduit alors l'étape d'évaluation telle que décrite pour l'étape 1, mais uniquement pour les nouvelles RI.

5.7 Étape 6 : Comparaison

La comparaison est à réaliser dans le but d'assurer l'efficacité de la méthodologie proposée et ainsi vérifier que les RI améliorées conviennent au projet de conception et qu'il existe un impact quantitatif et positif de la méthodologie. Sur la Figure 33 sont présentés les résultats de la comparaison, qui compare les évaluations de la meilleure RI d'un point de vue global avec la RI améliorée.

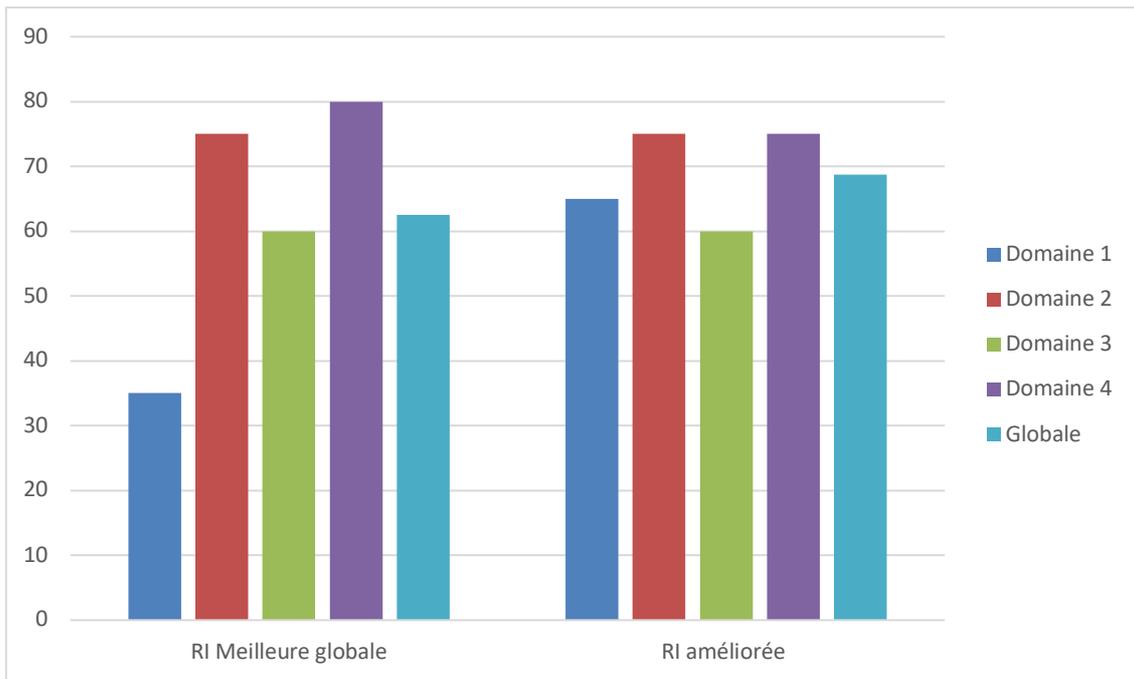


Figure 33 : Étape de comparaison

Il est nécessaire d'observer les résultats d'un point de vue global, mais aussi local, l'évaluation globale est augmentée, car le domaine 1 a été amélioré au détriment d'une légère diminution du domaine 4, dans le cas où ce compromis entre plusieurs domaines est trop important, le concepteur aura le choix entre conserver la solution précédente à savoir la RI « meilleure globale » soit recommencer l'étape d'amélioration en utilisant les autres recommandations proposées par l'étape d'analyse.

5.8 Positionnement de la méthodologie proposée

Dans ce chapitre, nous avons pu montrer comment est composée la méthodologie proposée dans cette thèse, elle a pour but de faciliter la phase d'évaluation et d'amélioration des RI dans le processus de conception. Cette méthodologie en 7 étapes permet aux concepteurs d'appréhender le problème de conception multidomaine et de créer en suivant ces étapes :

- Un outil d'évaluation multidomaine en suivant la méthodologie MDET
- Un outil de sélection de potentiel en comparant les performances des meilleures RI
- Une matrice de choix de DfX qui permet de sélectionner les DfX les plus utiles pour augmenter la performance de la meilleure RI.

Cette méthodologie est donc composée de trois apports différents que nous pouvons ainsi classifier en reprenant la méthode de Tomiyama et al [3] (cf. p.32) dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Classification des apports de la méthodologie

	General	Individual
Abstract	<p><i>Design theory</i></p> <p>(/)</p>	<p><i>Math-based methods</i></p> <p>L'outil d'évaluation MDET</p>
Concrète	<p><i>Design methodolgy</i></p> <p>Proposition méthodologique</p>	<p><i>Design methods</i></p> <p>La méthode de sélection des DfX</p>

Cette méthodologie a pour objectif d'être utilisable pour le processus de conception simplifié présenté précédemment et pourra donc être utilisée dans n'importe quel type de processus de conception que nous avons pu détailler lors de l'état de l'art. Ce processus doit être composé d'étapes de génération de RI et d'évaluation de ces dernières, ce qui est l'essence même du processus de conception. Suivant la nature du processus de conception, la nature des RI peut évoluer, il est donc nécessaire de réaliser cette méthodologie autant de fois que le processus de conception a besoin d'évaluer une forme nouvelle de RI. Contrairement à ce qui a pu être observé durant l'état de l'art, cette méthodologie n'est pas une « nouvelle » méthode d'évaluation, mais une adaptation de l'existant pour l'étude multidomaine.

Dans le prochain chapitre, nous allons voir l'application de cette méthodologie pour un projet de conception s'intéressant à l'innovation, la considération de l'impact environnemental et à la fabrication additive. Cette méthodologie sera utilisée pour les phases amont de conception c'est-à-dire pour une représentation intermédiaire sous forme de fiche idée. Nous allons ainsi pouvoir détailler les 7 étapes de cette méthodologie grâce à une application et à un contexte particulier

6. Contexte d’application et expérimentations

Dans ce chapitre nous allons tout d’abord détailler le contexte d’application de la méthodologie ainsi que les différentes expérimentations que nous avons menées à la validation des différentes étapes de la méthodologie MDET proposée et la création du démonstrateur permettant de tester les propositions de ce travail de thèse.

Une fois l’existence du besoin d’une méthodologie confirmée par notre expérimentation 0 (section 6.2), les résultats de l’expérimentation 1 nous permettront de valider la méthode et ainsi de créer l’outil d’évaluation (section 6.3). Nous présenterons le démonstrateur numérique de l’outil d’évaluation (sections 6.4 et 6.5) avant l’expérimentation 2 (section 6.6) ainsi que la suite du démonstrateur (sections 6.7 à 6.12) qui permettra de soutenir l’expérimentation 3 qui validera le processus d’évaluation proposée dans cette thèse (section 6.13).

Chaque expérimentation réalisée aura pour objectif de valider une partie, comme présenté dans le Tableau 12, de cette méthodologie et les hypothèses formulées au chapitre 4 :

- Expérimentation 0 : vérification du besoin d’outil d’évaluation multidomaine
- Expérimentation 1 : validation de l’évaluation des outils d’évaluation
- Expérimentation 2 : comparaison entre l’expertise du MDET et celles d’experts
- Expérimentation 3 : validation de l’amélioration des RI par le processus proposé

Tableau 12 : objectif des expérimentations

Étape de la méthodologie	0	1	2	3	4	5	6
Expérimentation 0	■						
Expérimentation 1	■	■					
Expérimentation 2	■	■	■				
Expérimentation 3		■	■	■	■	■	■

L’objectif, le protocole, les critères de validation ainsi que les résultats et conclusions seront détaillés pour chacune des expérimentations.

6.1 Contexte de l'application

Dans ce travail de thèse, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'intégration de l'innovation, de l'impact environnemental et de la fabrication additive dans le processus de conception. Ainsi nous présenterons ici les objectifs de chaque domaine.

6.1.1 L'innovation

Le développement de produit nouveau représente pour les entreprises un vecteur important dans son développement. En effet la conception de produit nouveau permet aux entreprises de garder ou de gagner des parts de marché et ainsi se libérer de la pression concurrentielle [14].

L'industrie mondialisée d'aujourd'hui incite les entreprises à se diversifier afin de leur garantir de garder leur place. Pour rester compétitifs et rentables, les industriels se doivent donc de réduire les coûts (de conception, de fabrication, de transport), d'accroître la qualité et d'améliorer le retour sur investissement.

L'innovation est définie par Schumpeter [80], comme étant « le premier usage commercial d'un produit, procédé ou service qui n'a jamais été exploité auparavant ». L'innovation est donc la matérialisation et l'exploitation d'une nouveauté dans un but commercial.

L'innovation peut aussi avoir un rôle plus prospectif, c'est-à-dire qu'elle peut permettre d'identifier de nouvelles opportunités : par l'identification de nouveaux marchés à acquérir dans le but de se développer en proposant de nouveaux produits, services ou en développant de nouvelles technologies. Pour toutes ces raisons, il est essentiel d'avoir une stratégie intégrant l'innovation pour survivre [81].

Pour évaluer le caractère innovant des entreprises, les sociétés de consulting comme le *Boston Consulting Group* s'appuient sur des critères quantitatifs : retour sur investissement, nombre de brevets, nombre de projets de recherche, etc.

Cependant plusieurs études montrent qu'être innovant n'est pas source de vitalité en soi, cela ne suffit pas. En effet, l'innovation est aussi un risque [82] et un coût pour les entreprises [83]. Le retour sur investissement peut être long [84]. Rosenbusch démontre dans son étude empirique qu'un des facteurs d'influence dans la réussite d'une démarche d'innovation est le développement de son processus d'innovation. Il est plus intéressant pour les entreprises de développer leur processus d'innovation que d'allouer des ressources dans de nouveaux projets. Il est ainsi préférable d'investir dans l'élaboration d'une méthodologie permettant de prendre les décisions dans le processus d'innovation plutôt que de démarrer de nouveaux projets sans

cadre ni outils permettant de gérer l'avancement de ce nouveau projet. Dès lors, le processus d'innovation a un besoin méthodologique, c'est-à-dire un besoin de méthodes lui permettant de quantifier l'innovation pour lui faciliter les prises de décision et ainsi permettre aux concepteurs de créer plus d'innovation.

Le besoin méthodologique du processus d'innovation peut être apporté lors du processus de conception. Pour Perrin [85], l'innovation ne peut être créée sans un processus de conception s'appuyant sur des outils de créativité pour les phases de divergence (recherche de concepts) tout en assurant un contrôle de la réussite du produit (évaluation/test utilisateur). Il est donc nécessaire de définir les critères d'évaluation de l'innovation dans le processus de conception et d'apporter les méthodes pour l'évaluer, ce que nous ferons dans la suite des travaux.

6.1.2 L'impact environnemental

L'importance de la prise en compte de l'impact environnemental est notamment apparue prégnante à compter de l'émergence de la notion de développement durable en 1987 issue du rapport Brundtland rédigé par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies. Ce rapport définit le développement durable comme étant le développement « qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » [86]. La définition de développement durable est un développement à la fois économique, sociétale et environnementale. L'ONU a formalisé ce développement durable autour de 17 objectifs⁵ qui sont présentés sur la Figure 34.

⁵ ONU, « Les 17 objectifs de développement durable », disponible à l'adresse suivante <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/> [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019]



Figure 34 : Les 17 objectifs du développement durable selon l'ONU

Sa définition a été détaillée par la norme en vigueur (ISO 14000) comme étant « un développement économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable ». La méthode d'évaluation des performances d'un produit pour le volet environnemental la plus reconnue scientifiquement reconnue (et la seule normalisée à ce jour) est l'analyse du cycle de vie (ACV).

Dès lors, cette méthode permet à partir de l'ensemble des données du cycle de vie de quantifier l'impact du produit dans le but de l'améliorer globalement. Elle s'appuie sur la détermination du cycle de vie du produit, décrite sur la Figure 35. Pour chaque étape du cycle de vie, l'impact du produit sera ainsi comptabilisé. Le cycle de vie d'un produit comprend ainsi 6 phases : la conception, l'extraction de matière première et énergie, la fabrication le transport, l'usage, le tri-fin de vie.

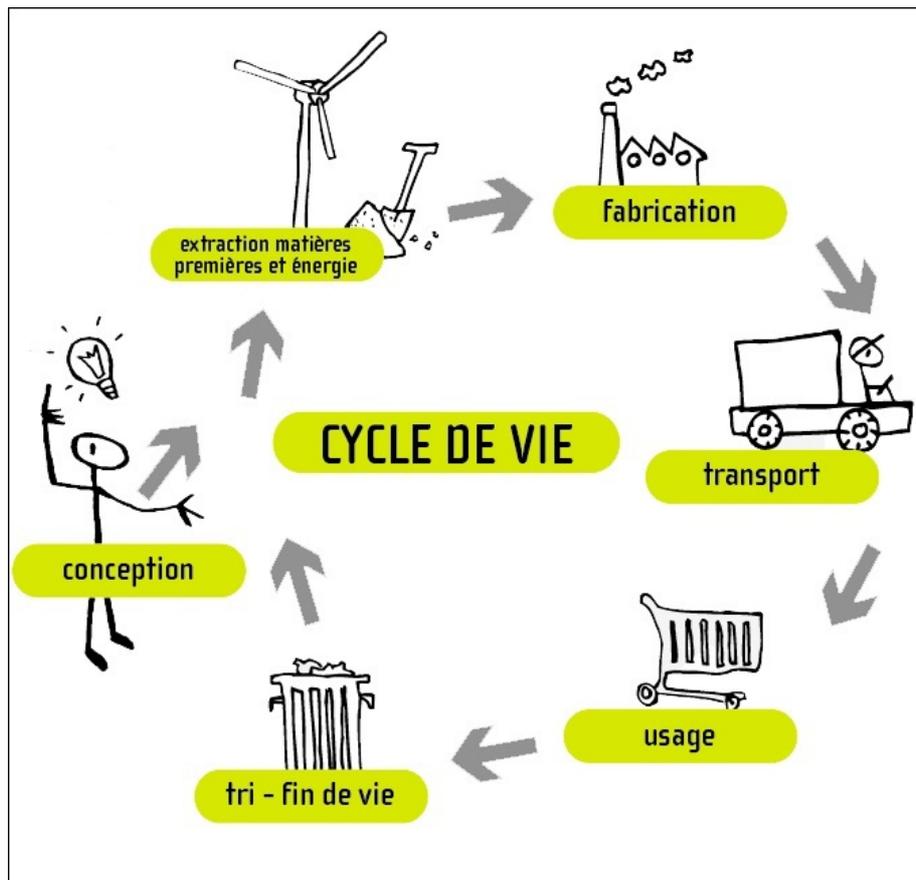


Figure 35 : Cycle de vie d'un produit⁶

Pour chacune des phases du cycle de vie, les concepteurs doivent renseigner l'ensemble des flux générés par le produit. Cette étape s'appelle l'inventaire. Elle est la plus sensible et la plus difficile à renseigner. En effet, chacune des différentes contributions doit être renseignée le plus précisément possible. Ces contributions sont ensuite traduites en impact environnemental.

⁶ Pôle Éco-conception, « L'ACV, qu'est-ce que c'est ? », disponible à l'adresse suivante : <https://www.eco-conception.fr/articles/h/l-acv-c-est-quoi-decouvrez-nos-nouvelles-pages-web-sur-l-analyse-du-cycle-de-vie.html> [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019].

L'analyse du Cycle de Vie est normalisée⁷ et prévoit **quatre** étapes nécessaires à l'analyse des impacts environnementaux présentées sur la Figure 36 :

- **Définition** des objectifs et du champ de l'étude
- **Inventaire** : déclarer l'ensemble des flux entrant et sortant du processus étudié
- **Évaluation** des impacts environnementaux
- **Interprétation** des résultats permettant de tirer les conclusions sur les définitions des objectifs.

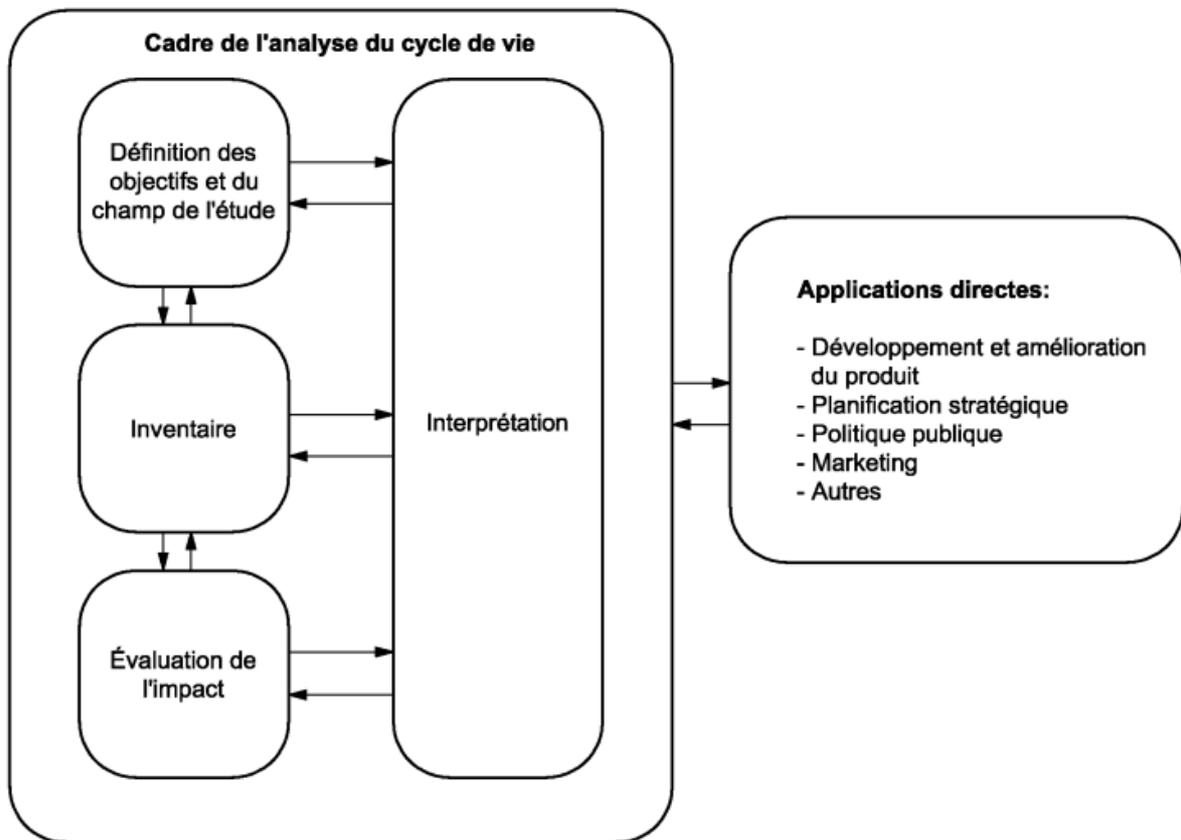


Figure 36 : Étapes de l'ACV⁸

⁷ ISO, norme 14 040 « Analyse du cycle de vie », disponible à l'adresse suivante : <http://www.siso-inc.com/pour-en-savoir-plus/autres-normes/normes-pour-l-environnement/serie-14040---analyse-du-cycle-de-vie> [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019].

⁸ *ibid.*

L'impact environnemental représente ainsi « l'ensemble des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de l'environnement (négatives ou positives) engendrées par un projet, un processus, un procédé, un ou des organismes et un ou des produits, de sa conception à sa fin de vie »⁹. L'impact environnemental est alors quantifié à l'aide d'indicateurs présenté dans le Tableau 13, et distingué entre l'air, l'eau et la terre.

Tableau 13 : Indicateurs d'impact environnemental ¹⁰

Air	Eau	Terre
Contribution à l'effet de serre	Eutrophisation des eaux douces	Consommation d'énergie primaire (indicateur de flux)
Acidification de l'air	Écotoxicité aquatique	Épuisement des ressources non renouvelables
Formation d'ozone troposphérique	Eutrophisation des eaux marines	Toxicité humaine
Appauvrissement de la couche d'ozone	Consommation d'eau (indicateur de flux)	Occupation des sols
Particules et effets respiratoires des substances inorganiques		

Cependant, l'ACV ne permet pas une évaluation pendant la conception du produit et demande ainsi l'utilisation de méthodes plus lourdes afin de redéfinir le produit pour qu'il respecte le cahier des charges [65], [87]. Dans ce cas, l'utilisation d'une méthodologie d'écoconception telle que définie par la norme¹¹, permet de réduire l'impact environnemental du produit en modifiant ce dernier et donc de respecter le cahier des charges. Néanmoins, ces méthodologies nécessitent d'avoir déjà réalisé un processus de conception pour obtenir les données nécessaires à son utilisation : c'est une méthode de reconception [50], [88].

⁹ ADEME, « Les impacts environnementaux », 05 décembre 2018, disponible à l'adresse suivante <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/elements-contexte/impacts-environnementaux> [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019].

¹⁰ *ibid.*

¹¹ ISO, norme 14006 « Système de management environnemental », disponible à l'adresse suivante : <https://www.iso.org/fr/standard/43241.html> [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019].

De nombreuses méthodes ont ainsi été proposées par la communauté scientifique, Bovea les classifie en fonction de leurs objectifs [47]. Cependant comme le montre Rousseau [89], il devient de plus en plus compliqué pour les concepteurs de se retrouver dans le très grand nombre de méthodes et outils disponibles. Elles sont toutes définies pour un produit particulier [49] ou pour une étape du cycle de vie précise [90]. En effet, le concepteur manque de critères lui permettant de choisir le type de méthode qu'il doit utiliser et éprouve des difficultés à déterminer la méthode la plus appropriée à son projet.

6.1.3 La fabrication additive

La fabrication additive est un procédé de fabrication de « nouvelle » génération. En effet, la genèse de ce procédé date du 19^{ème} siècle sous le nom de photosculture [91] et de topographie [92].

Longtemps considérée comme un procédé de prototypage (« rapid prototyping »), son évolution est constante et importante depuis les années 1980 [76], profitant d'une amélioration significative des technologies optiques et de l'évolution de l'informatique. La fabrication additive s'est diversifiée sous forme de **sept** catégories de procédés différents normalisés¹²:

- **Photopolymérisation en cuve**
- **Projection de matière**
- **Projection de liant**
- **Fusion sur lit de poudre**
- **Extrusion de matière**
- **Dépôt de matière sous énergie concentrée**
- **Stratification de couches**

Cette catégorisation a été réalisée pour regrouper les technologies utilisant la même architecture, le même mécanisme physique de transformation et des matériaux identiques.

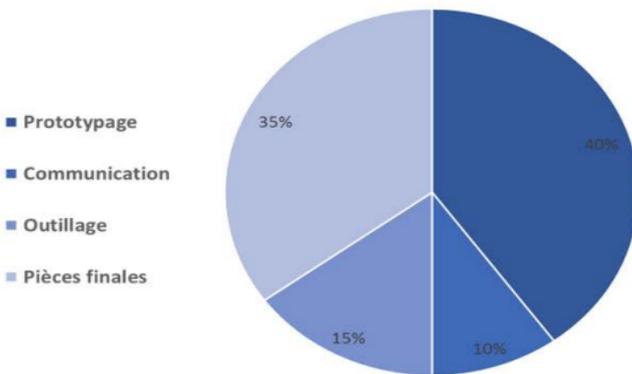
La fabrication additive se développe considérablement et tend à se démocratiser. En effet, ce procédé de fabrication est de plus en plus utilisé pour produire des pièces fonctionnelles. Cette évolution est visible sur Figure 37. Ce développement est rendu possible grâce à des gammes de produits de plus en plus variés. Comme le montre Figure 37, elle a été multipliée par plus de 10 en seulement 10 ans. On peut également observer que son utilisation est diverse : la fabrication additive sert toujours de procédé de prototypage (35 %), de procédé de fabrication

¹² ISO, norme 17296-2, « Fabrication additive — Principes généraux », disponible à l'adresse suivante : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17296:-2:ed-1:v1:fr> [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019].

directe (30 %), pour fabriquer des outillages (15 %), mais aussi d'outils à la communication (10 %). Ces multiples usages facilitent ainsi son intégration dans la sphère industrielle.

Par ailleurs, la technologie de ce procédé ne cesse d'être améliorée. Si son évolution vers une fabrication directe est due aux avancées technologiques (puissance des lasers) et scientifiques (nouveaux matériaux disponibles) [37], les dernières avancées permettent aux pièces réalisables par la fabrication additive d'être de plus en plus volumineuses : le projet du *Council for Scientific and Industrial Research* CSIR d'Afrique du Sud a pour ambition de créer la machine de fabrication additive la plus grande du monde, pour un espace de travail de 2000*600* 600mm¹³. Cela permet d'ouvrir de nouvelles opportunités en repoussant les limites dimensionnelles de la fabrication additive.

Répartition des projets par type d'application



Évolution de la part (%) de la production directe de pièces

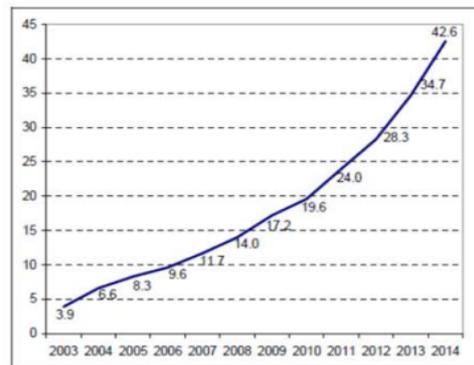


Figure 37 : Évolution du marché de la fabrication additive ¹⁴

La fabrication additive offre une toute nouvelle manière de réaliser une pièce. En effet les procédés de fabrication classiques, par enlèvement de matière, par déformation par fusion ou par assemblage, nécessitent l'utilisation d'outils spécifiques et un processus de conception adapté pour obtenir la pièce désirée. La fabrication additive, quant à elle, se veut beaucoup plus

¹³3D Natives, « La plus grande imprimante 3D métal bientôt sur le marché », 3 mars 2017, disponible à l'adresse suivante : <https://www.3dnatives.com/imprimante-3d-metal-aeroswift-03032017/> [consulté pour la dernière fois le 26 avril 2019].

¹⁴PIPAME, Le futur de la fabrication additive, 2016 disponible à l'adresse suivante : https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2017-Fabrication-additive.pdf [consulté pour la dernière fois le 25 avril 2019].

créative et moins standardisée. En effet, la fabrication d'une pièce nécessite seulement 4 étapes comme sur la Figure 38 [93]:

- *La création d'un modèle 3D* : cette étape consiste à définir les volumes de la pièce à fabriquer
- *La conversion* : pour pouvoir la fabriquer, la machine doit obtenir un format qui permettra au logiciel du procédé de tracer les trajectoires de la matière. Le plus commun est le format STL (STéréoLitography) qui permet de facettiser les surfaces de la pièce.
- *La préparation* : cette étape consiste à télécharger le fichier STL sur le logiciel de la machine et de venir renseigner les paramètres de fabrication (tels que l'épaisseur de couche, l'orientation de la pièce, la vitesse de déplacement). Il convient de vérifier que le support est bien positionné et que les épaisseurs de couche sont suffisantes pour soutenir la matière.
- *Le post-traitement* : cette étape dépend en partie de la matière utilisée, elle consiste à enlever la matière support, mais aussi l'imprégnation pour les pièces poreuses, le traitement thermique, de densification et de surfaces.

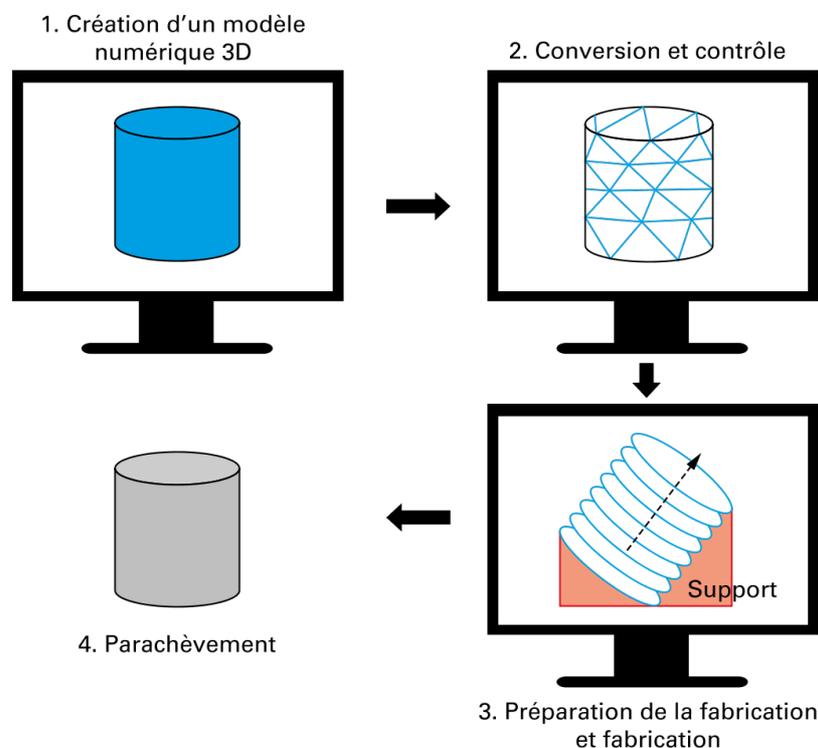


Figure 38 : Étapes de fabrication en FA [93]

Les possibilités offertes par la fabrication additive en comparaison avec les procédés de fabrication traditionnels sont importantes. Gibson et al. [37] identifie qu'il existe quatre types de complexités, rendues possibles par la fabrication additive, qui permettent à cette dernière de se démarquer et ainsi trouver sa place dans l'univers des procédés de fabrication :

- Complexité de **forme** : les possibilités de forme sont « presque » infinies pour ce procédé. Il est possible de fabriquer des pièces directement en 3D. La fabrication couche par couche permet également de laisser des cavités creuses dans la matière, afin d'alléger la structure. De plus les formes complexes n'entraînent pas de surcoût de fabrication.
- Complexité **hiérarchique** : la fabrication de structures complexes est désormais possible : des structures de types treillis alvéolaires sont réalisables sans opération supplémentaire. Les échelles de ces structures peuvent même évoluer au cours de la fabrication afin d'optimiser la résistance mécanique de la pièce dans les zones contraintes et de réduire le poids de la pièce dans les zones plus relâchées.
- Complexité **fonctionnelle** : la fabrication additive permet de fabriquer des assemblages de composants. Il est également possible d'inclure des corps étrangers dans la pièce lors de la fabrication (capteurs, gaines, écrous) et ainsi limiter le nombre d'opérations à réaliser par la suite
- Complexité de **matériau** : la réalisation de pièces multimatériaux est également possible, la distribution des matériaux peut être continue [94] ou discontinue en formant un empilement de couches de matériaux différents [40].

La conception de produit pour la fabrication additive doit tirer pleinement profit des quatre potentiels énoncés précédemment. À l'heure actuelle, il est difficile pour les concepteurs de tirer profit de plus de deux de ces complexités. Dès lors, il existe aujourd'hui un réel besoin de méthodologie afin d'apporter aux concepteurs les connaissances et les méthodes nécessaires pour prendre en compte ces quatre complexités et ainsi utiliser au maximum le potentiel de cette méthode de conception.

Ce problème méthodologique est confirmé par Bourell [76]. Il montrait dans sa « Roadmap for additive manufacturing: identifying the future of freeform processing » que malgré un contexte

plus que positif, il manque à la fabrication additive des méthodes permettant aux concepteurs d'adapter leur façon de concevoir.

En effet, la manière de concevoir des produits n'est pas la même en comparaison avec les procédés traditionnels. Il faut adapter l'ensemble du processus de conception afin de changer de paradigme. L'utilisation de la fabrication additive nécessite ainsi une démarche plus globale dans le processus de conception, Laverne [28] a proposé une méthodologie permettant d'apporter les connaissances manquantes aux concepteurs lors des phases amont, c'est-à-dire lors des phases où le concept de produit est élaboré. Ces connaissances permettent de déverrouiller la créativité du concepteur à travers les exemples des possibilités offertes par la FA. Cependant le choix entre plusieurs concepts n'est pas clairement établi, la formalisation des critères de sélection est difficile à définir lorsqu'il s'agit de procédés de fabrication. Rias [68] propose quant à elle de faire appel à des experts pour réaliser cette sélection. L'étape de sélection dans le processus de conception doit s'intéresser à des caractéristiques du produit qui sont liées à la fabrication additive, or lors de la sélection de concept les critères ne sont pas établis, il faut donc transmettre aux concepteurs les critères lui permettant d'évaluer ses concepts vis-à-vis de la fabrication additive.

Le contexte des trois domaines que l'on souhaite intégrer au processus de conception étant maintenant établi, nous pouvons nous intéresser aux expérimentations qui permettront de valider la méthodologie proposée. Ainsi nous allons voir comment l'expérimentation 0 valide le besoin d'outil multidomaine pour le concepteur.

6.2 Expérimentation 0 : validation du besoin d'outil multidomaine

Cette expérimentation 0 a été réalisée lors d'un séjour de recherche à l'école Polytechnique de Turin en juin 2017 et plus particulièrement au sein du master *sustainable engineering*. Nous avons recueilli l'avis de 12 participants, tous étudiants en master ingénieur.

6.2.1 Objectif

L'objectif de cette expérience est d'étudier l'impact des outils d'évaluation pour les concepteurs, c'est-à-dire, de mesurer les écarts entre une méthode d'évaluation subjective et une méthode d'évaluation objective de produits identifiés comme appartenant à un ou deux domaines.

6.2.2 Protocole

L'expérience est composée de trois étapes différentes :

- Les participants doivent évaluer neuf produits conçus avec des préoccupations particulières dans un but de réduire l'impact environnemental, d'améliorer le potentiel innovant, ou fabriqué avec des technologies innovantes (telles que la fabrication additive) présentées en Figure 39.
- Chaque participant a évalué chaque produit en termes de durabilité et d'innovation. Ils n'ont aucun outil pour les aider. Les évaluations subjectives utilisent l'échelle de Likert (1-5) : 1 pour mauvais et 5 pour bon. Les participants devaient répondre à un formulaire Google Form : « Quel est le caractère innovant ? » ; « Quel est l'impact environnemental ? »
- Chaque participant a ensuite évalué chaque produit à l'aide de deux outils appropriés (impact environnemental [31], innovation [52]).

À la fin, les deux résultats sont comparés pour évaluer la différence et juger du bien-fondé de l'utilisation d'outils pour l'évaluation des produits.

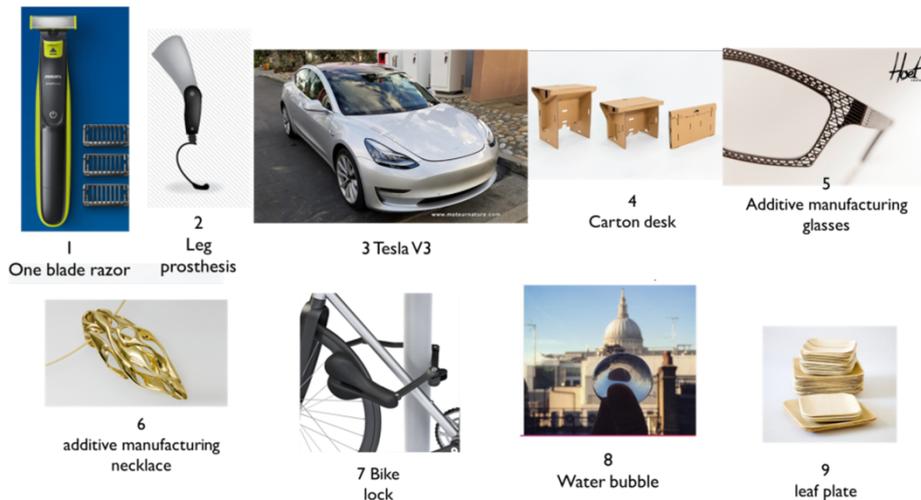


Figure 39 : Produits sélectionnés

6.2.3 Critères de validation

Cette expérimentation 0 permet l'utilisation de méthodes non paramétriques en raison de la taille de l'échantillon. Pour chaque produit, nous analysons la distribution et la différence entre les deux types d'évaluations par :

- La méthode Kolmogorov-Smirnov, utilisée pour un échantillon non paramétrique : cela signifie que l'échantillon suit une distribution normale si la probabilité est significative (c'est-à-dire signification $>0,05$). Cette méthode permet de modéliser notre échantillon et ainsi pouvoir caractériser l'étendue des réponses des participants par l'analyse de cette distribution normale. Les résultats des produits sont présentés dans le Tableau 14.
- La méthode de Wilcoxon, qui permet d'identifier si l'évolution entre deux échantillons de données est corrélée. Ici nous étudierons la corrélation des résultats entre les deux méthodes d'évaluation. Si la corrélation existe, nous pourrions ainsi discuter de l'évolution de l'appréhension des domaines par les participants lors de l'expérimentation. Les résultats sont présentés au Tableau 15.

6.2.4 Résultats

Le Tableau 14 présente les résultats du Test de Kolmogorov-Smirnov, les paramètres que nous étudions dans ce tableau sont :

- La moyenne : valeur moyenne de l'évaluation du produit X
- L'écart-type : écart-type de l'évaluation du produit X
- Le coefficient de variation : $\frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}} \times 100$
- La signification : la probabilité que notre échantillon de données suive une loi normale.

Tableau 14 : Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov

Outil		Produit	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Impact environnemental	Avec	Moyenne	1,61	2,75	3,33	3,33	2,58	2,81	2,17	3,75	3,89
		Écart-type	0,45	0,81	0,90	0,42	0,62	0,40	1,04	0,42	0,64
		Coefficient de variation	28,0 %	29,5 %	27,0 %	12,6 %	24,0 %	14,2 %	47,9 %	11,2 %	16,5 %
		Signification	0,70	0,97	0,96	1,00	0,92	0,91	0,98	1,00	0,99
	Sans	Moyenne	2,58	3,00	4,18	3,58	3,07	2,57	3,08	4,73	4,75
		Écart-type	1,24	0,60	0,81	1,16	1,00	1,28	0,96	0,59	0,58
		Coefficient de variation	48,1 %	20,0 %	19,4 %	32,4 %	32,6 %	49,8 %	31,2 %	12,5 %	12,2 %
		Signification	0,69	0,14	0,21	0,32	0,33	0,62	0,46	0,00	0,00
Innovation	Avec	Moyenne	1,48	2,11	2,11	2,02	1,11	1,03	1,70	2,05	2,02
		Écart-type	0,50	0,48	0,61	0,83	0,61	0,53	0,47	0,68	0,65
		Coefficient de variation	33,8 %	22,7 %	28,9 %	41,1 %	55,0 %	51,5 %	27,6 %	33,2 %	32,2 %
		Signification	0,83	0,55	0,94	0,76	0,97	0,94	0,37	0,98	0,70
	Sans	Moyenne	2,75	4,25	3,88	3,50	2,29	2,36	4,08	4,73	3,56
		Écart-type	1,29	1,06	0,86	1,45	0,99	1,01	0,76	0,46	1,26
		Coefficient de variation	46,9 %	24,9 %	22,2 %	41,4 %	43,2 %	42,8 %	18,6 %	9,7 %	35,4 %
		Signification	0,41	0,12	0,20	0,22	0,32	0,57	0,48	0,04	0,65

15 analyses sur les 18 du Tableau 14 montrent que l'hypothèse d'une distribution normale n'est pas rejetée en raison de la valeur de signification supérieure à 0,05. Trois évaluations ne sont pas significatives en raison du niveau de signification inférieur à 0,05 (cases orangées dans le Tableau 14). Nous basons donc notre analyse sur 15 produits évalués.

Premièrement, 12 des 15 évaluations ont un écart-type plus petit (case en vert) grâce à l'utilisation d'une méthode objective (« avec outil »). Cela signifie que cette méthode est plus précise, c'est-à-dire que l'utilisation de notre outil d'évaluation permet de réduire la variabilité du résultat d'évaluation. En ce sens, cette expérimentation permet de mettre en évidence un point important de notre méthodologie : l'évaluation multidomaine d'un produit peut conduire à de grandes variations dans le résultat si l'évaluateur n'est pas « guidé » : notre outil peut donc jouer ce rôle de guide et faciliter le travail d'évaluation en réduisant la variabilité sur les résultats. En outre, 14 des 15 ont une note d'évaluation réduite, c'est-à-dire que la valeur moyenne des produits est plus faible à l'aide de la méthode « avec outil ». Les résultats montrent donc que les participants surestiment les performances des produits à l'aide de la méthode subjective (« sans outil »).

Deuxièmement, il semble que les outils réduisent la portée de l'évaluation des participants. L'analyse montre que les outils permettent de réduire l'écart-type, mais pas nécessairement le coefficient de variation, c'est-à-dire que la note moyenne de chaque produit est réduite, mais que le coefficient de variation ne diminue pas. Cela confirme le fait que les performances sont surévaluées dans le cas d'une évaluation « sans outil » et qu'une méthode « avec outil » est plus précise.

Tableau 15 : Résultats du test de Wilcoxon

Produit	Signification								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Impact environnemental	0,31	0,498	0,465	1	0,686	0,269	0,416	0,109	0,109
Innovation	0,023	0,002	0,003	0,018	0,021	0,013	0,003	0,003	0,007

Le Tableau 15 montre les résultats du test de Wilcoxon. L'hypothèse de ce test est la suivante: « les deux échantillons ont la même distribution et suivent la même évolution ». Si la signification est inférieure à 0,05, l'hypothèse est invalidée. Pour l'évaluation de l'innovation, l'hypothèse est clairement rejetée, ce qui signifie que les participants changent considérablement leur point de vue entre les deux évaluations. Ce résultat est conforme au Tableau 14, l'étendue de la population est considérablement différente avec et sans outil. Ce test montre que l'innovation est nettement une caractéristique subjective et qu'elle est difficile à évaluer de manière précise sans outil.

Cela permet de mettre une nouvelle fois en évidence la nécessité de disposer d'outils, de « guides », pour réaliser des évaluations de produits sur certains domaines qui risquent de conduire à des évaluations aux résultats trop variables pour être réellement utiles. L'étape 0 de notre méthodologie permet alors d'obtenir un outil d'évaluation multidomaine pour faciliter ce travail d'évaluation.

6.2.5 Analyse et conclusion de l'expérimentation 0

Cette expérience montre que sans connaissance sur différents domaines, il est difficile d'évaluer les produits en fonction de ces différents domaines. Le Tableau 14 montre à quel point les participants surestiment les performances du produit. De plus, cela permet d'identifier que les outils réduisent les déviations. Le

Tableau 15 permet de comprendre comment évaluer l'évolution de l'évaluation entre les deux étapes (sans outil puis avec outil).

En ce qui concerne l'impact environnemental, les participants surestiment les performances, mais suivent en moyenne la même distribution avec ou sans outil. Pour l'aspect novateur, la subjectivité de cette caractéristique peut expliquer pourquoi les participants changent radicalement leur évaluation.

Cette expérimentation 0 s'est appuyée sur des produits réels et industrialisés, et montre de réelles différences entre une méthode d'évaluation subjective et une méthode d'évaluation objective. Il est certain que l'utilisation d'outils d'évaluation multidomaines sera d'autant plus bénéfique lorsque ce dernier sera utilisé lors de la définition du produit, c'est-à-dire lors de l'évaluation de ses représentations intermédiaires dans le processus de conception et particulièrement lors des phases amont.

Une limite de cette expérience pourrait être le nombre réduit de participants.

Dès lors, l'expérimentation 0 nous a permis de montrer qu'il est nécessaire d'apporter des méthodologies ou méthodes d'évaluation afin d'évaluer la performance multidomaine.

6.3 Expérimentation 1 : validation de la méthode de sélection des outils permettant la création de l'outil MDET

L'expérience précédente montre que les concepteurs lors des étapes d'évaluation ont besoin d'aide pour choisir la meilleure représentation intermédiaire. Nous avons pu voir dans l'état de l'art qu'il existait un grand nombre d'outils d'évaluation de performance disponibles pour les concepteurs, mais qu'il leur était très difficile de choisir les bons dans le cas de projets multidomains. En raison de ces observations, nous avons proposé une méthode d'évaluation de ces outils que nous avons détaillée dans la section 5.1.2, permettant de quantifier la performance d'évaluation d'outils d'évaluation. Cette expérimentation étudiera seulement trois des quatre paramètres définis pour quantifier la performance des outils d'évaluation.

Comme l'expérimentation 0, celle-ci s'est déroulée lors d'un séjour de recherche à l'école Polytechnique de Turin (juin 2017) au sein du master *sustainable engineering*. Il y a eu 12 participants et tous étudiants de ce master.

6.3.1 Objectif

L'objectif de cette expérience est de valider la méthode d'évaluation des outils d'évaluation en fonction de trois critères :

- La position dans le processus de conception (DPP)
- La facilité d'outil (F)
- Le bénéfice de l'outil (B)

La différence entre cette méthode d'évaluation et celle proposée à la section 5.1.2 est le critère EDC (*External data constraint*). En effet, lors de cette expérimentation (2017) ce critère n'était pas encore formalisé sous cette forme, et n'a donc pas été pris en compte.

La méthode d'évaluation est décrite à la Figure 40.

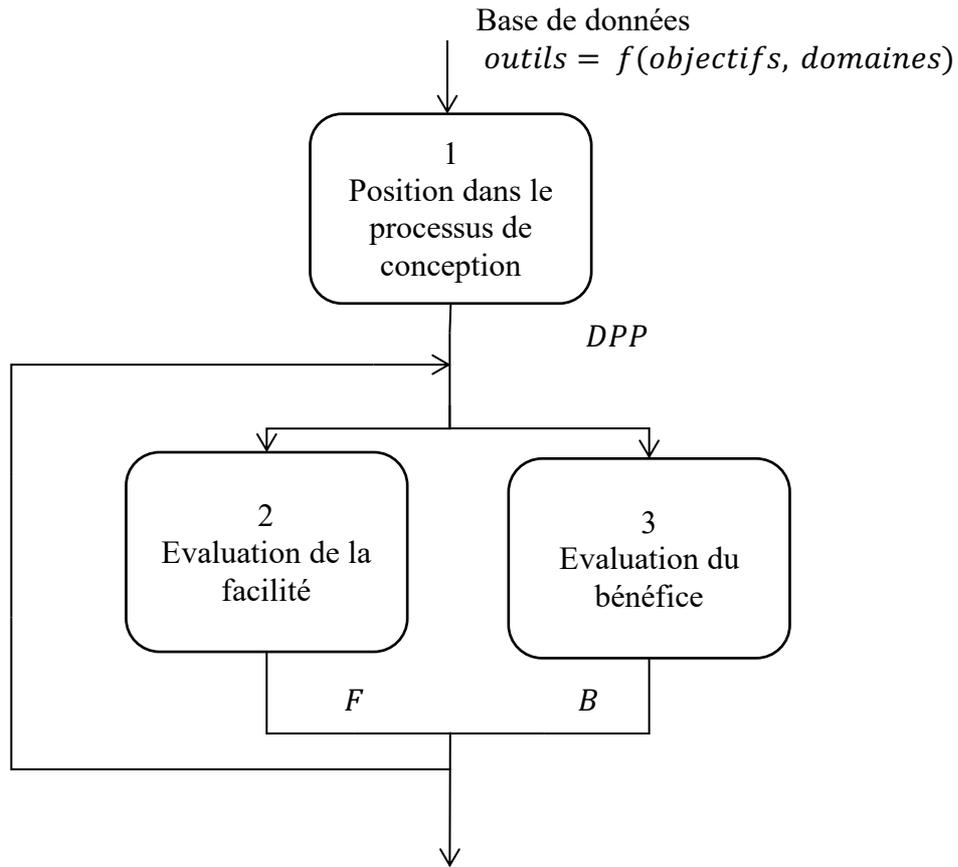


Figure 40 : Méthode d'évaluation des outils

La grille d'évaluation est la même que celle formulée dans la section 5.1.2.

Cette expérimentation a pour objectif de s'assurer de l'objectivité de la méthode d'évaluation des outils en analysant la répétabilité de l'évaluation. Cela nous permettra de fournir le meilleur outil, quel que soit l'objectif du concepteur.

6.3.2 Protocole

Des groupes de quatre étudiants présentent aux autres le résumé d'un article scientifique sélectionné traitant d'un outil d'évaluation des aspects d'innovation et d'impact environnemental. Les étudiants doivent évaluer la position du processus de conception (DPP), la facilité (F) et le bénéfice (B) de chaque outil présenté dans les articles selon la méthode proposée à la Figure 40. Les résultats sont comparés aux résultats obtenus dans la section 6.4.3.

L'expérience est constituée de trois étapes :

- Chaque groupe d'étudiants avait 3 jours pour étudier et analyser un article traitant d'un outil d'évaluation afin de préparer une présentation montrant la méthode d'évaluation et les caractéristiques des représentations intermédiaires ;
- Chaque groupe présente leur analyse ;
- À la fin de chaque présentation, les étudiants appliquent la méthode d'évaluation.

6.3.2.1 Critères de validation

Le résultat de chaque participant est comparé à l'évaluation obtenue par le référent (l'auteur de cette thèse) pour estimer six paramètres de résultat :

- Nombre de réponses exactes (réponses similaires à l'évaluation de référence)
- Nombre de réponses proches (réponses avec la bonne position dans le processus de conception et la différence entre l'évaluation de référence et le participant est de 1.)
- Pourcentage de réponses exactes
- Pourcentage de réponses proches
- Résultat global sur l'ensemble des articles
- Résultat global sur l'ensemble des articles avec réponses proches

Notre analyse des résultats se fera donc sur la valeur de ces 6 paramètres. Si les résultats des participants sont proches de l'évaluation réalisée par le référent, alors nous pourrions en conclure que les critères et la méthode d'évaluation permettent d'obtenir des résultats répétables et donc objectifs.

6.3.2.2 Résultats

Les scores sont présentés dans le Tableau 16. Le résultat global montre que la méthode est relativement simple à appliquer. La principale difficulté présentée par les participants est l'identification de la position dans le processus conception de l'utilisation de l'outil.

Tableau 16 : Résultat de l'évaluation des outils

		Analyse du besoin		Recherche de concepts		Développement		Implémentation	
		F	B	F	B	F	B	F	B
Article 1	Réponse exacte	10	4	8	8	10	10	11	11
	Réponse proche	1	7	0	0	0	0	0	0
	Réponse	11	11	11	11	11	11	11	11
	Résultat exact	91 %	36 %	73 %	73 %	91 %	91 %	100 %	100 %
	Résultat proche	100 %	100 %	73 %	73 %	91 %	91 %	100 %	100 %
Article 2	Réponse exacte	16	16	17	17	17	17	5	15
	Réponse proche	0	0	0	0	0	0	0	2
	Réponse	17	17	17	17	17	17	17	17
	Résultat exact	94 %	94 %	100 %	100 %	100 %	100 %	29 %	88 %
	Résultat proche	94 %	94 %	100 %	100 %	100 %	100 %	29 %	100 %
Article 3	Réponse exacte	10	10	4	4	0	1	0	0
	Réponse proche	0	0	0	0	3	2	2	2
	Réponse	11	11	11	11	11	11	11	11
	Résultat exact	91 %	91 %	36 %	36 %	0 %	9 %	0 %	0 %
	Résultat proche	91 %	91 %	36 %	36 %	27 %	27 %	18 %	18 %
Global	Résultat exact	63 %							
	Résultat proche	69 %							

Pour les trois articles (Article 1 : [95] ; Article 2 : [32] ; Article 3 : [96]), nous pouvons observer que le nombre de réponses est de 11 pour chacune des évaluations. Les résultats vont de 0 % à 100 % pour le résultat exact et de 18 % à 100 % pour le résultat proche. Nous avons mis en couleur verte les résultats jugés très corrects (entre 67 % et 100 %), en orange les résultats corrects (entre 33 % et 67 %) et en rouge les résultats mauvais (entre 0 % et 33 %).

6.3.2.3 Conclusion de l'expérimentation

L'expérience valide l'objectivité et la simplicité de la méthode. En effet, l'écart constaté entre les résultats de référence et les résultats des participants s'explique par le fait qu'un grand nombre d'entre eux ont exprimé une difficulté à trouver le bon positionnement des outils dans le processus de conception. Malgré cette difficulté, nous pouvons observer que la différence entre résultat exact et résultat proche est très faible, ce qui montre que les critères de facilité et de bénéfice ont été correctement compris. La limite de cette expérience est donc qu'il aurait été nécessaire de proposer un descriptif détaillé du processus de conception afin de garantir la compréhension des différents états des représentations intermédiaires d'un produit et ainsi faciliter la détermination de la position d'un outil. Cette limite est due au fait que le panel interrogé était étudiant et peu à l'aise dans la compréhension d'un processus de conception.

L'expérimentation 1 permet d'éliminer la crainte de la subjectivité de la méthode de sélection des outils. Dès lors, il est possible d'appliquer cette méthode pour la création du MDET aux domaines de l'impact environnemental, de l'innovation et de la fabrication additive pour les phases amont de conception. Cela nous permet donc de valider partiellement les hypothèses 1 et 2 (section 4.2) à savoir que la sélection permettant de créer l'outil d'évaluation n'est pas biaisée par la subjectivité des concepteurs.

Nous pouvons dès à présent proposer la création de l'outil MDET adapté au contexte présenté en section 6.1 à savoir aux domaines de l'innovation, de l'impact environnemental et de la fabrication additive. Cet outil s'intéressera aux phases amont de conception qui ont été présentées en section 2.1.4 comme étant les phases ayant le plus d'influence sur le produit final.

6.4 Création de l'outil d'évaluation

Nous allons suivre, pour créer l'outil d'évaluation MDET, les quatre étapes de la méthodologie vue au chapitre précédent (5.1), à savoir, l'identification des outils, l'évaluation de ces outils, la sélection puis enfin la création.

Les différents outils que nous avons évalués dans cette étude de cas ont été extraits de la littérature scientifique et ont été développés dans un objectif d'estimation des performances des domaines innovation, de l'environnement et la fabrication additive intégrées au cours du processus de conception.

6.4.1 Identification du panel d'outils

Ces outils, classés par domaine (domaine principal/domaine secondaire), sont décrits dans le Tableau 17. Nous les référençons par des lettres grecques lorsqu'ils traitent principalement d'innovation, par des lettres majuscules lorsqu'ils évaluent la durabilité et par des chiffres romains s'agissant de la fabrication additive. Dans le tableau sont référencés les articles permettant d'évaluer l'innovation (I), l'environnement (E), la fabrication (Fa).

Tableau 17 : Outils évalués

Nom	Réf.	Domaine		ID
		1 ^{er}	2 nd	
10 Golden Rules in EcoDesign	[8]	E		A
Eco-innovation	[61]	I	E	η
Eco-ideation	[31]	I	E	α
Sustainable product design model	[97]	E		B
Eco-innovative	[11]	E		C
Sustainable manufacturing	[98]	E	Fa	D
Total life-cycle considerations	[42]	E		F
Roadmap for predicting product end-of-life costs	[99]	E		G
MA-AHP approach for selecting the highest sustainability index	[63]	E		H
Economics of AM for end-usable metal parts	[95]	E	Fa	I
Streamlined LCA framework	[65]	E		J
Quality function deployment for optimum environmental performance improvement	[62]	E		K
Environmental performance strategy map	[100]	E		L
Environmental performance evaluation and indicators	[101]	E		M
LCA	[102]	E		N

CO2PE!	[103]	E	Fa	P
Characteristics of innovative, mechanical products	[52]	I		β
Radical innovation project selection model	[54]	I		γ
Innovation evaluation	[32]	I		δ
Supporting product design by anticipating the success chances of new value profiles	[104]	I		ϵ
A method to set up a complexity index to improve decision making performance	[105]	I		ζ
Topology optimization	[75]	Fa		VIII
Adding product value	[106]	Fa		II
DFAM	[38]	Fa		III
DWAM	[41]	Fa		VII
Design for laser AM	[71]	Fa		V
Creative early DFAM	[68]	Fa	I	VI
DFAM worksheet	[69]	Fa		IV
Eco-innovation dashboard	[107]	I	E	θ

6.4.2 Évaluation des outils

L'évaluation a impliqué 29 outils d'évaluation différents (8 pour l'innovation, 16 pour l'environnement et 9 pour la fabrication). Certains outils traitaient de deux domaines, mais par souci de clarté, nous n'avons retenu que le domaine principal.

Chaque outil a été évalué et les meilleurs ont été sélectionnés conformément à la méthodologie décrite dans la Figure 24. Les performances de l'outil ont été évaluées selon la méthodologie de la section 5.1.2. Dans la Figure 41, les performances de chaque outil sont modélisées sous forme d'histogramme et sont situées dans l'une des quatre étapes de la conception. La couleur bleue correspond aux outils relevant du domaine principal de l'innovation, la couleur verte à l'environnement et la couleur jaune à la fabrication additive.

6.4.3 Sélection des outils

La valeur minimale obtenue était de 2 (outil II) et la valeur maximale de 14 (outils α , F, IV, J, V, H et D), bien que la valeur maximale théorique soit de 20. Cet écart peut être expliqué par l'incapacité des outils existants à trouver une solution optimale sans une durée conséquente temps ni savoir-faire important.

Les résultats étaient conformes l'état de l'art : l'innovation a été évaluée dès les premières étapes de la conception, l'environnement a été contrôlé tout au long du processus et la fabrication additive a été étudiée dans les phases ultérieures.

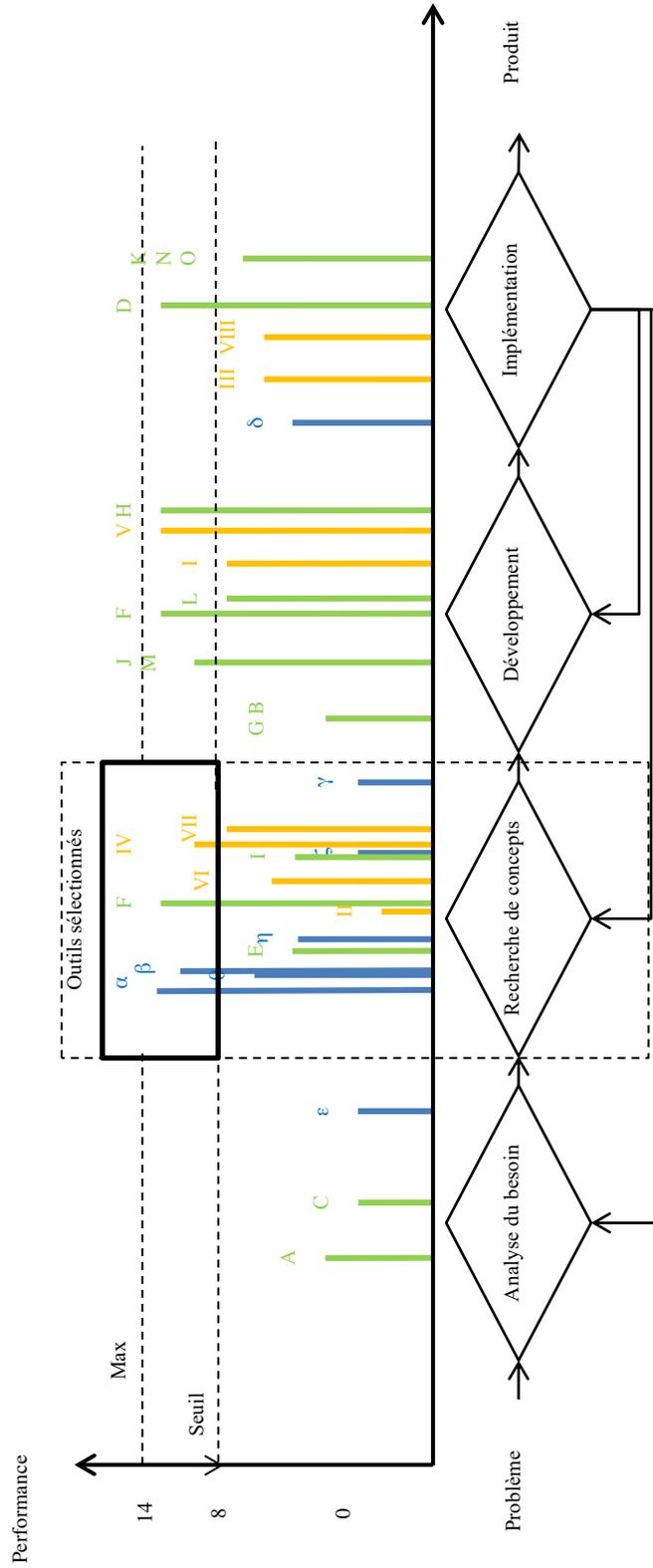


Figure 41 : Résultats de l'évaluation des outils

Nous avons étudié les différentes méthodes de sélection possible, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients présentés dans le Tableau 18:

Tableau 18 : Avantages et inconvénients des méthodes de sélection

Type de sélection	Avantages	Inconvénients
Sélection par rang	<ul style="list-style-type: none"> On obtient toujours des candidats 	<ul style="list-style-type: none"> La sélection est indépendante de la qualité des candidats
Sélection par seuil fixe	<ul style="list-style-type: none"> La sélection obtenue aura toujours une évaluation de qualité 	<ul style="list-style-type: none"> Le nombre de candidats sélectionnés peut être nul ou limité
Sélection par seuil mobile	<ul style="list-style-type: none"> On obtient toujours des candidats La sélection obtenue aura toujours une évaluation de qualité 	<ul style="list-style-type: none"> Les candidats sélectionnés ne peuvent représenter qu'un seul domaine.

Nous utiliserons la sélection par seuil mobile avec la valeur de 20 %. Dans l'éventualité où il n'y a qu'un domaine de sélectionné, la conclusion sera que les critères d'évaluation des performances des autres domaines ne sont pas utilisables pour cette étape de conception.

Quatre outils $t_{1 \rightarrow 4}$ ont été retenus :

- $t_1 = \beta$, Characteristics of innovative products [52]
- $t_2 = F$, Total lifecycle considerations [42]
- $t_3 = IV$, DFAM worksheet [69]
- $t_4 = \alpha$, Eco-ideation [31]

L'outil t_1 est proposé par Saunders et al. [52], et permet d'identifier les caractéristiques des produits innovants. À partir de l'étude de plusieurs produits reconnus comme innovants, car distingués par des prix, ils identifient cinq types d'innovations qu'ils détailleront sous plusieurs critères. Ces critères seront ainsi confrontés à d'autres produits performants pour vérifier leur validité et la distribution des tendances de conception actuelle. Cet outil d'évaluation a été formalisé dans le but d'éviter une conception désastreuse, c'est-à-dire que le produit créé ne rencontre aucun marché. Le but de cette étude est donc de savoir si le développement de produit répond au moins à un des critères suivants :

Tableau 19 : Critères et paramètres de conception de l'outil t_1

Critères	Paramètres de conception
Functionality	Additional Function
Architecture	Modified Size Modified Physical Layout Expanded Usage Physical Environment
External interactions	Modified Material Flow Modified Energy Flow Modified Information Flow Interaction with Infrastructure
User interactions	Modified Physical Demands Modified Sensory Demands Modified Mental Demands
Cost	Purchase Cost Operating Cost

Ces critères nous serviront donc pour modéliser l'outil t_1 .

L'outil t_1 a été utilisé pour la phase de recherche de concepts. ($P_1(t_1) = P_6(t_1) = 2$). L'évaluation de l'innovation reposait sur cinq types de critères ($P_2(t_1) = [5, 0, 0]$) répartis en 12 paramètres de conception ($P_3(t_1) = [12, 0, 0]$). Pour créer les critères, l'outil s'est appuyé sur l'étude de produits innovants et performants ($P_4(t_1) = 1$). L'évaluation du produit est un résultat binaire pour chaque règle ($P_5(t_1) = 1$). L'outil t_1 est modélisé à la Figure 42.

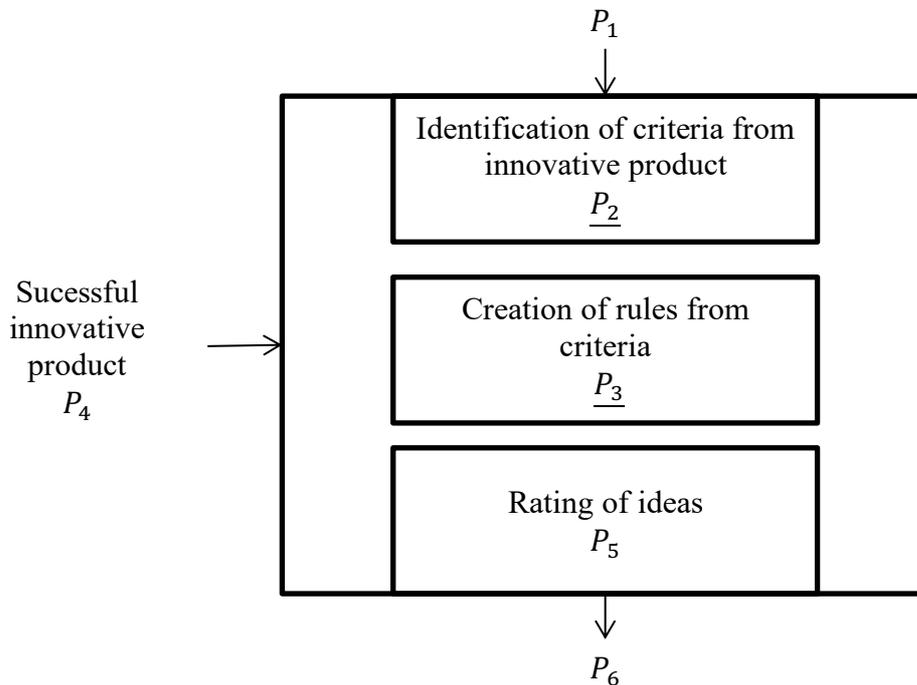


Figure 42 : Modélisation de l'outil t_1

L'outil t_2 est proposé par Jawahir et al. (2006) et permet d'identifier la performance durable des représentations intermédiaires. En étudiant les différents aspects qui constituent le *design for sustainability*, ils distinguent ainsi chaque étape du cycle de vie et identifient les raisons expliquant une augmentation de son empreinte sur l'environnement, mais aussi sur l'économie et l'espèce humaine. Nous nous intéresserons uniquement aux moyens mis en œuvre pour l'environnement et l'économie, car l'évaluation de la performance sociale est encore trop complexe de notre point de vue pour être intégrée dans ce travail de thèse. La méthode préconise de créer un ensemble de critères d'évaluation de la durabilité des représentations intermédiaires en fonction du projet de conception. Ils découpent ainsi les critères en fonctions de l'étape du cycle de vie (*Pre-manufacturing, manufacturing, use, end of life*) et en fonction du domaine (*environment, economic, social*). Cette méthode d'évaluation a été créée dans le but de comparer les produits similaires en s'appuyant sur des critères s'intéressant au cycle de vie du produit.

L'outil t_2 a été utilisé pour quantifier l'impact des représentations intermédiaires sur la recherche de concepts ($P_1(t_2) = P_6(t_2) = 2$). L'évaluation de la durabilité a été basée sur trois types de critères (*environment, economic, social*) ($P_2(t_2) = [0, 3, 0]$) divisé en 12 paramètres de conception (*Pre-manufacturing, manufacturing, use, et end of life* pour chacun des critères précédents) ($P_3(t_2) = [0, 12, 0]$). Pour établir les critères, l'outil devait explorer les exigences et l'environnement du produit ($P_4(t_2) = 2$). Le résultat de l'évaluation est une matrice ($P_5(t_2) = 2$). L'outil t_2 est schématisé à la Figure 43.

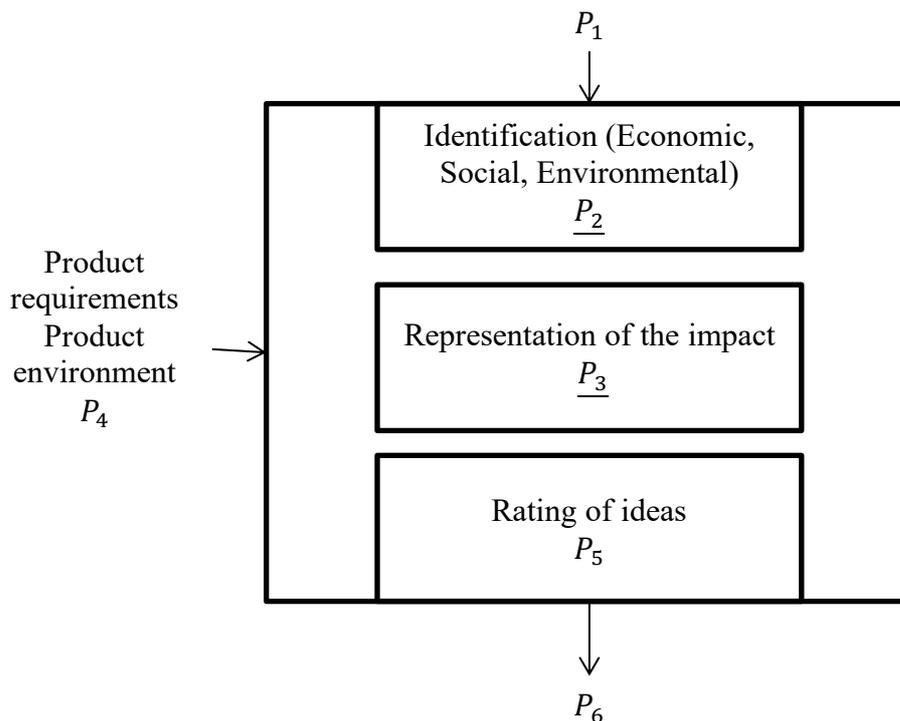


Figure 43 : Modélisation de l'outil t_2

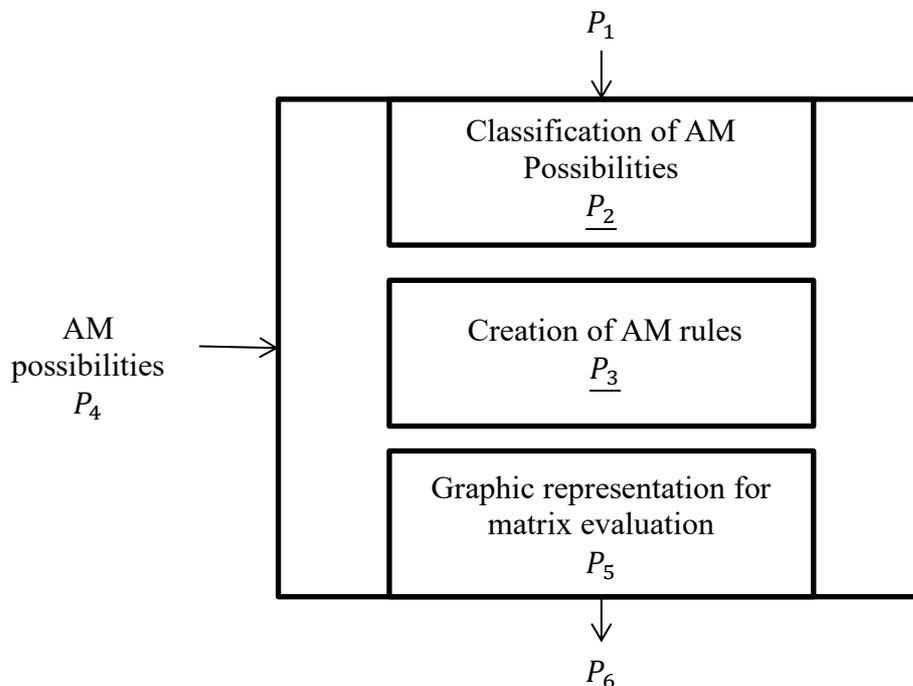
L'outil t_3 est proposé par Booth et al. (2016), cet outil propose à travers 8 règles de conception par des exemples imagés une méthode d'évaluation de la « fabricabilité » des représentations intermédiaires. Ces règles de conception sont identifiées à partir de l'état de l'art de DFAM. À partir de cette évaluation, les concepteurs sont alors guidés vers une reconception, un autre procédé de fabrication ou la fabrication additive. Cet outil a été développé dans le but d'identifier les défauts que font généralement les concepteurs non-initiés à la fabrication additive.

Cet outil s'appuie sur 8 paramètres :

- *Unsupported Features*
- *Complexity*
- *Material removal*
- *Thin Features*
- *Stress Concentration*
- *Functionality*
- *Tolerances*
- *Geometric Exactness*

L'outil t_3 a été utilisé pour la phase de recherche de concepts ($P_1(t_3) = P_6(t_3) = 2$). L'évaluation de la fabrication additive est divisée en 8 paramètres de conception ($P_3(t_3) = [0, 0, 8]$). Nous choisissons de regrouper ses 8 paramètres en 4 critères (*Shape, Hierarchical, Material, Functionality*) d'évaluation qui suivent les potentiels d'amélioration identifiés par Gibson et al. [37]. Pour établir les critères, l'outil nécessite l'étude des possibilités du processus de fabrication additive ($P_5(t_3) = 1$). Le résultat de l'évaluation de la représentation graphique est une évaluation suivant l'échelle de Likert. L'outil t_3 est schématisé à la Figure 44.

Figure 44 : Modélisation de l'outil t_3



L'outil t_4 est proposé par Bocken et al. [31]. Il permet à partir de l'identification des paramètres qui ont le plus d'impact sur l'environnement du projet de conception de proposer une évaluation des performances de représentations intermédiaires. Cette évaluation est un questionnaire qui propose trois niveaux explicités à chacun des paramètres identifiés. Cet outil a été développé afin de concevoir des produits qui réduisent l'émission de gaz à effet de serre.

L'outil t_4 a été utilisé pour la phase de recherche de concepts ($P_1(t_4) = P_6(t_4) = 2$). Les évaluations de l'innovation et de la durabilité reposaient chacune sur 2 types de critères (*Product Design* et *Process & value chain*) ($P_2(t_4) = [2, 2, 0]$), divisés en 14 paramètres de conception (*[Delivery of Value ; Product functionality ; Compacting ; Components ; Expérience]* ; *[Material ; End of life ; Packaging ; Distance ; Transport ; Temperature of transport ; Temperature cycles ; Temperature for storage ; Storage time]*) ($P_3(t_4) = [5, 9, 0]$). Pour établir les critères, l'outil nécessaire pour étudier les exigences du produit ($P_5(t_4) = 1$). Le résultat de l'évaluation était une enquête à trois niveaux pour chaque règle. L'outil t_4 est schématisé à la Figure 45.

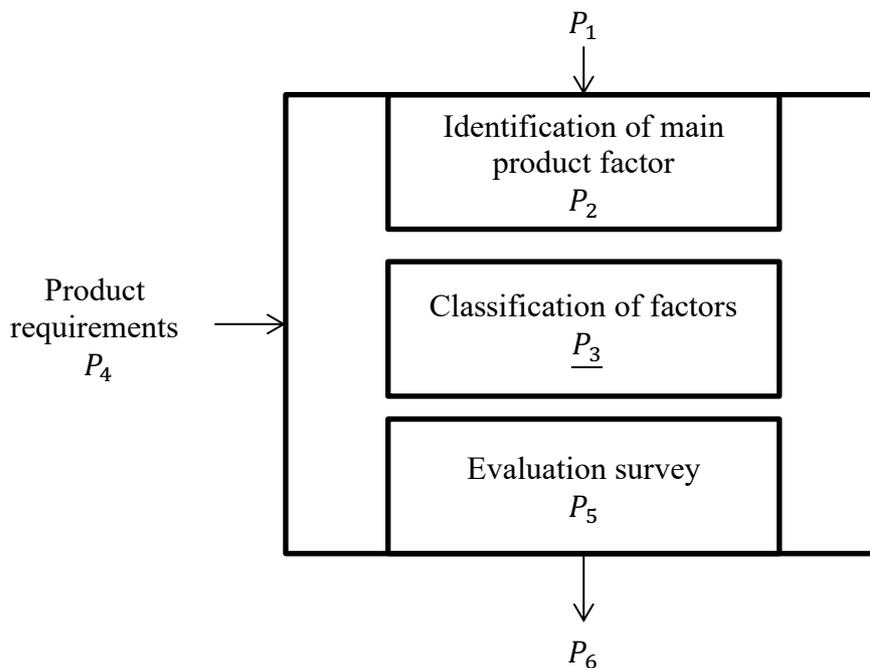


Figure 45 : Modélisation de l'outil t_4

La modélisation des outils t_1 à t_4 est présentée dans le Tableau 20. Il faut maintenant définir les éléments qui vont constituer le MDET. Pour cela nous allons appliquer les différentes étapes permettant de passer d'un ensemble d'outils t_i à la modélisation MDET comme définies dans la section 5.1.4. Les paramètres qui définissent le MDET et qui permettront de proposer un seul et unique outil sont résumés dans le Tableau 20.

Ainsi trois outils sont sélectionnés pour leurs qualités à identifier les critères et paramètres de conception permettant d'évaluer les performances des représentations intermédiaires et un outil est sélectionné pour ses capacités à faciliter la communication entre concepteurs et à homogénéiser l'étape d'évaluation.

Nous avons utilisé trois des quatre outils sélectionnés t_1 , t_2 et t_3 ($n_F = 3$) pour établir les critères et les transcrire en règle de conception (une pour chaque domaine évalué). L'outil t_4 a été utilisé pour transposer les paramètres de conception dans une évaluation.

Les paramètres du MDET ont été calculés selon les équations 2 à 7 (section 5.1.4.2) et les résultats sont présentés dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Paramètres du MDET

Outils	t_1	t_2	t_3	t_4	MDET
P_1	2	2	2	2	2
P_2	(5,0,0)	(0,4,0)	(0,0,4)	(2,2,0)	(5,4,4)
P_3	(12,0,0)	(0,12,0)	(0,0,8)	(5,9,0)	(12,12,8)
P_4	1	2	1	2	1
P_5	3	3	3	1	1
P_6	2	2	2	2	2

Le MDET modélisé en Figure 46 montre l'architecture de l'outil à implémenter, c'est-à-dire où sont disponibles les paramètres de conception, les critères et de quelle manière celles-ci doivent être formalisées pour les concepteurs.

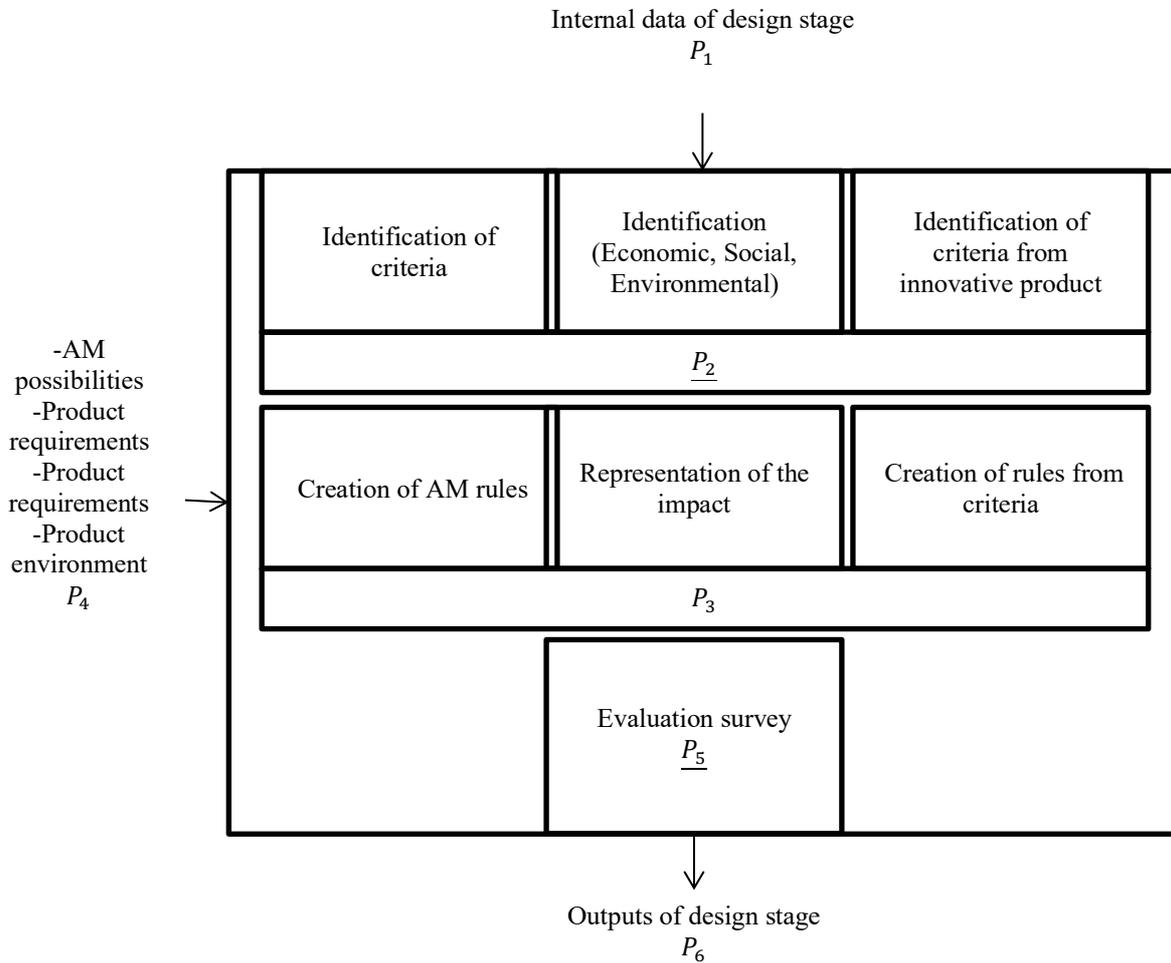


Figure 46 : Modélisation de l'outil MDET

Le MDET a ensuite été mis en œuvre sous forme de démonstrateur qui va être utilisé par le concepteur chargé du projet. Il est illustré à la Figure 47, qui représente l'écran de démarrage qui contient les options suivantes : gestion de projet (création de nouveau projet ou poursuite de projet), personnalisation des outils en fonction des besoins du projet, gestion de la base de données d'outil.

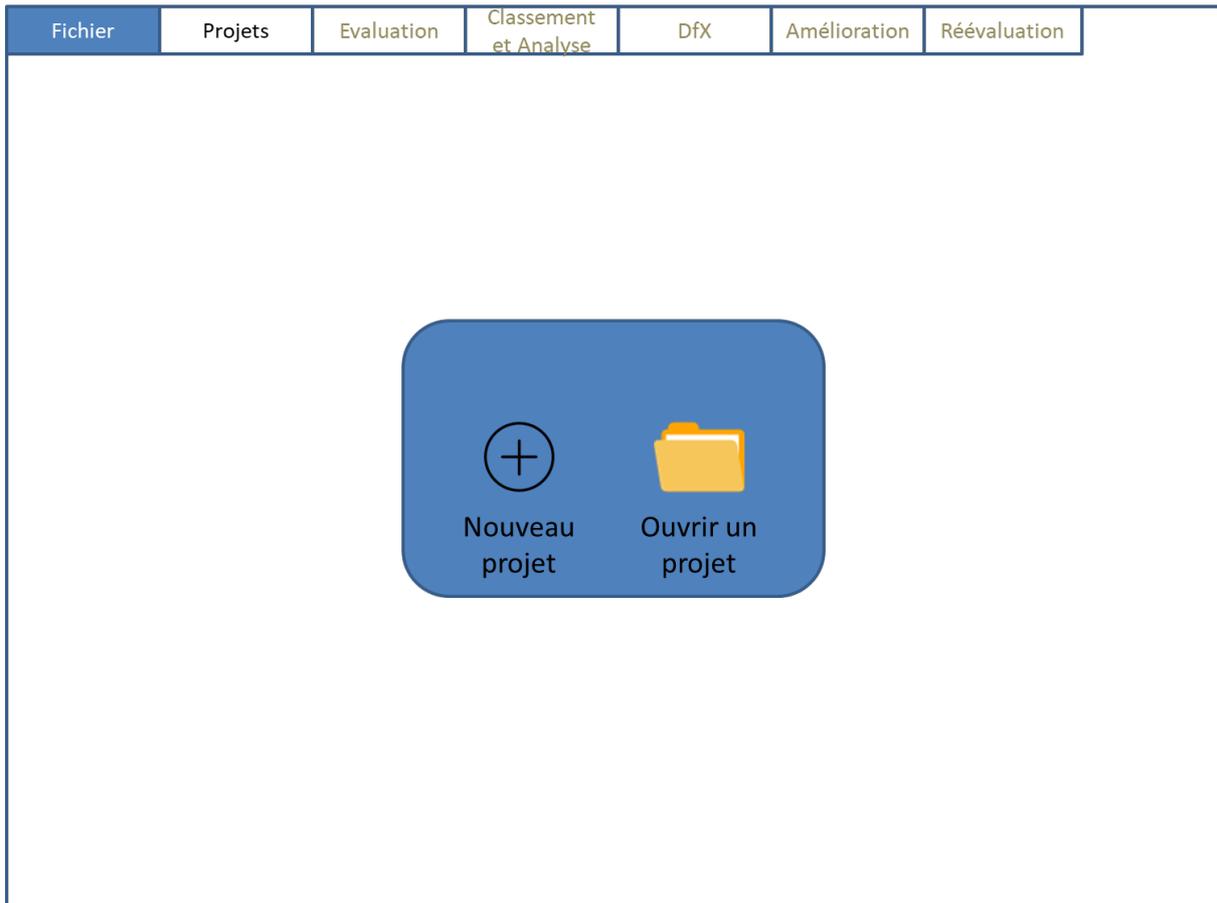


Figure 47 : Écran de démarrage

L'utilisation de l'outil se poursuit avec la sélection de la représentation intermédiaire à évaluer ainsi que la sélection du ou des domaines que l'on souhaite évaluer comme sur la Figure 48.

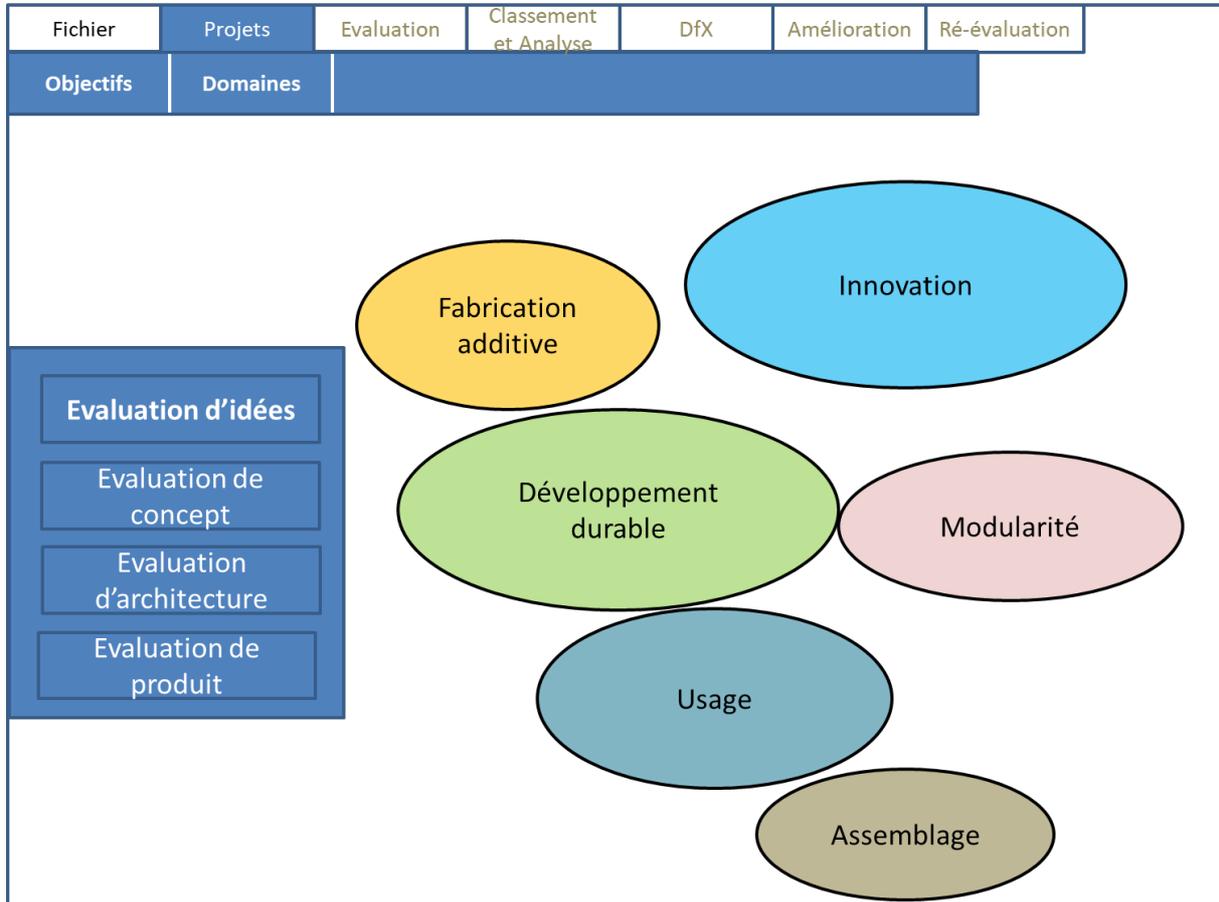


Figure 48 : Sélection des domaines

6.4.4 Description de l'outil d'évaluation

Une description des fonctionnalités et de l'utilisation de l'outil est présentée dans les sections suivantes.

Une impression d'écran de l'outil est disponible en Figure 49. Sur cette figure nous pouvons identifier 3 zones distinctes :

- Zone 1 : permet de naviguer dans les différentes options, mais aussi les étapes de la méthodologie.
- Zone 2 : cette zone permet de rentrer un peu plus dans l'étape active et ainsi dialoguer avec l'utilisateur, s'il faut ajouter des documents, etc.
- Zone 3 : cette zone est la zone principale d'échange avec l'utilisateur, c'est ici qu'il aura accès aux évaluations, résultats.

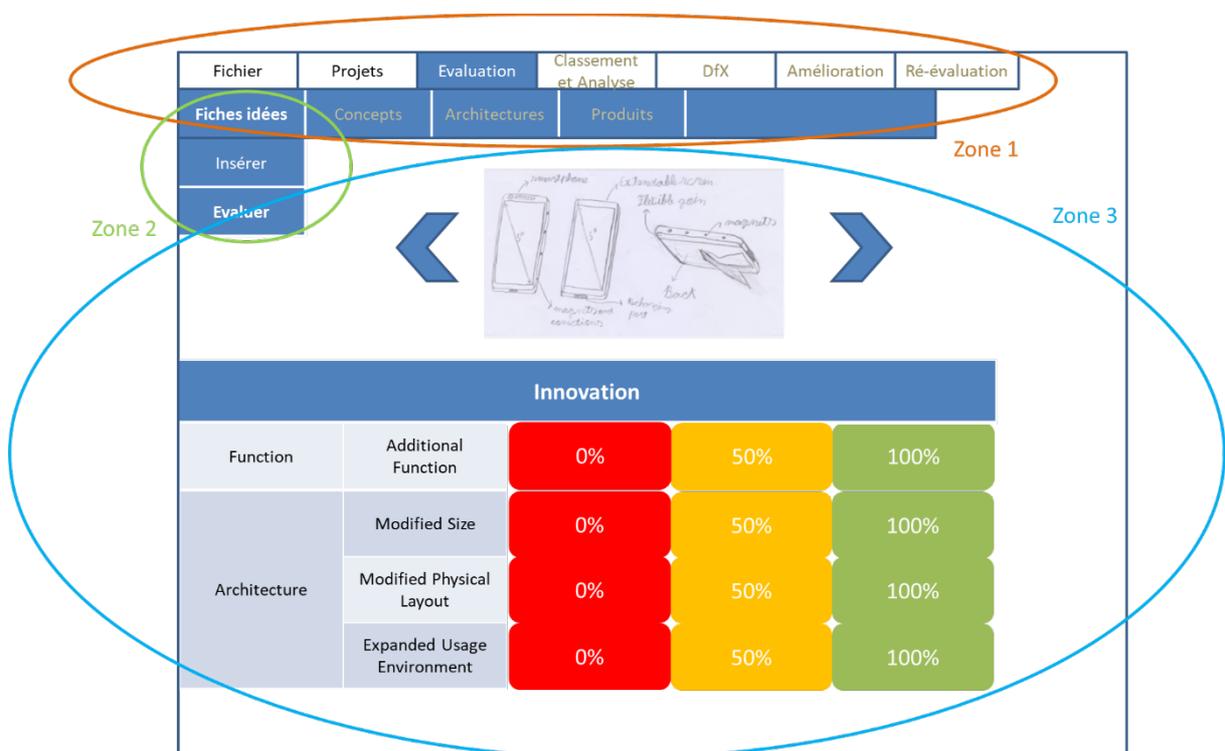


Figure 49 : Description de l'outil

La modélisation du MDET proposée va permettre son utilisation dans le cas d'étude présenté précédemment, c'est-à-dire l'évaluation de représentations intermédiaires lors de phases amont s'intéressant aux domaines de l'innovation, l'impact environnemental et la fabrication additive. Dans cette section, nous avons pu détailler les différentes étapes séparant la définition des domaines d'étude à la modélisation du MDET. Une fois cette modélisation réalisée, nous avons pu proposer une forme au MDET.

Dans la prochaine section, nous allons montrer la phase d'évaluation et sa modélisation dans l'outil informatique proposé.

6.5 Évaluation

L'étape d'évaluation est l'étape 1 du processus proposé au chapitre 5 de ce travail de thèse. Elle est la première étape qui s'intègre dans le processus de conception créatif formalisé sur la Figure 12.

La phase d'évaluation de la représentation intermédiaire est réalisée en suivant le déroulement de la Figure 49 et de la Figure 50. Comme proposé par les outils sélectionnés, chaque domaine est divisé en plusieurs critères qui sont eux-mêmes divisés en plusieurs paramètres de conception. Pour chaque règle de conception, une description des attentes est donnée : cet objectif n'est pas considéré (0 % - rouge), il est partiellement atteint (50 % - jaune) ou il l'est complètement (100 % - vert). L'ensemble des domaines, critères et paramètres gérés par l'outil est présenté dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Domaines/critères/ paramètres de conception du cas d'étude

Domaines	Critères	Paramètres de conception
Innovation	Fonction	Fonction ajoutée
	Architecture	Modification de taille
		Modification de l'architecture
		Environnement d'utilisation
	Interactions externes	Modification du flux de matière
		Flux d'énergie
		Flux d'information
	Interactions avec l'utilisateur	Utilisation physique
		Utilisation sensorielle
		Utilisation cognitive
Coût	Coût d'achat	
	Coût d'utilisation	
Environnement	Paramètres de conception	Efficiencce des matières premières
		Quantité de procédés différents
		Quantité d'emballages
		Volume/poids du produit
	Durée de vie du produit	Durée de l'utilisation
Fin de vie	Réutilisation	
	Réglementation	
Fabrication additive	Forme	Surfaces non portées
		Complexité
	Hiérarchie	Suppression du support
		Épaisseur des murs
	Matière	Concentration de contrainte
	Fonctionnalité	Fonctionnalité
		Tolérances
Exactitude géométrique		

La possibilité est laissée au concepteur de mettre une note intermédiaire de 25 % ou 75 % s'il hésite entre deux niveaux comme sur la Figure 50. Comme préconisé sur les outils sélectionnés, la pondération entre chaque règle de conception et chaque critère est laissée à 1. Nous verrons par la suite dans le Tableau 27 que ces pondérations auront une importance.

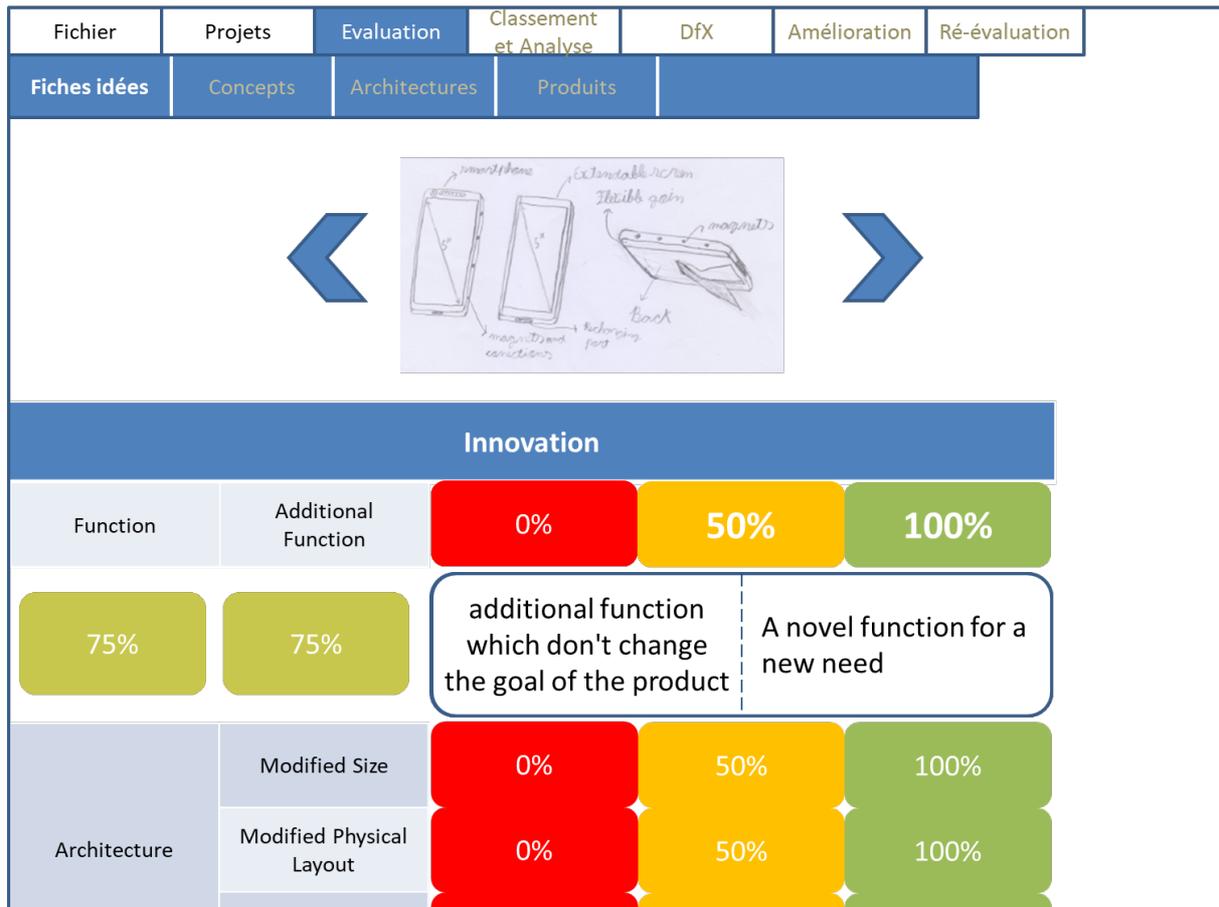


Figure 50 : Évaluation pour un niveau entre deux propositions

L'outil dorénavant créé, il s'agira grâce à l'expérimentation 2 de contrôler que les résultats obtenus par l'outil sont proches de ceux des experts des domaines étudiés.

6.6 Expérimentation 2 : validation de l'outil d'évaluation multidomaine

Cette expérimentation a eu lieu à l'école Polytechnique de Turin et à l'école Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris entre juin et juillet 2018. Cette expérimentation a pour objectif de valider les performances de l'outil d'évaluation multidomaine (MDET), c'est-à-dire permettre à des concepteurs d'évaluer leurs représentations intermédiaires s'intéressant à plusieurs domaines. Cette expérimentation a pour but de comparer les résultats d'évaluation réalisés par des étudiants de l'école Polytechnique de Turin et un panel d'experts.

Une séance de créativité a été réalisée afin de produire des concepts à évaluer. Cette séance avait comme objectif de « Rendre un smartphone plus intelligent » c'est-à-dire d'apporter de nouvelles fonctions à un smartphone en développant de nouveaux accessoires ou applications permettant une utilisation différente. Pour faciliter le déroulement de cette séance de créativité, les participants ont pu s'aider de quatre cibles potentielles décrites sous forme de persona. Ces persona ont été orientés afin qu'il y ait un souhait prononcé pour l'innovation, l'environnement et la fabrication additive.

6.6.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est de vérifier que l'outil d'évaluation multidomaine permet aux concepteurs de se rapprocher des résultats d'évaluations réalisées par des experts de chaque domaine.

6.6.2 Protocole

Cette expérimentation s'est déroulée en trois étapes :

- 1^{ère} étape : les étudiants réalisent une séance de créativité afin de proposer des représentations intermédiaires ;
- 2^{ème} étape : les étudiants évaluent les représentations intermédiaires à l'aide de l'outil MDET ;
- 3^{ème} étape : ces représentations intermédiaires sont évaluées par les experts sans et avec l'outil MDET.

Les outils d'évaluation sont présentés en annexes (Figure 67 à Figure 72).

6.6.3 Critères de validation

Pour valider les hypothèses associées à cette expérimentation nous allons mesurer l'écart d'évaluation entre les étudiants avec l'outil et les experts. Ces écarts vont permettre de quantifier la performance de l'outil.

Nous étudierons également le classement réalisé par les experts et les étudiants des représentations intermédiaires.

Les résultats des évaluations nous permettent de définir les indicateurs suivants :

- Écart : écart moyen entre les différents experts

$$\text{Écart} = \frac{1}{N_{\text{expert}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{expert}}} (E_{\text{moyenne_expert}} - E_{\text{expert}_i}) \quad (13)$$

- Écart « moyenne » : écart entre la moyenne des évaluations des experts et la moyenne des évaluations des étudiants

$$\text{Écart « moyenne »} = E_{\text{moyenne_Expert}} - E_{\text{moyenne_Étudiants}} \quad (14)$$

Ainsi nous pourrions valider la pertinence de l'utilisation de l'outil MDET si l'écart « moyenne » est inférieur à l'écart, ce qui signifiera que les résultats obtenus par les participants sont proches des résultats obtenus par les experts.

6.6.4 Résultats :

Les étudiants lors de la séance de créativité ont proposé 11 représentations intermédiaires. Ces idées sont de deux types :

- Application et service
- Nouveau produit

Nous pouvons adapter le MDET en fonction du type de représentation intermédiaire, nous aurons les trois domaines (innovation, environnement et fabrication additive) pour les nouveaux produits et deux domaines (innovation et environnement) pour les applications et services.

Les écarts sont représentés de la Figure 51 à Figure 53. Nous pouvons ainsi voir sur ces figures deux types de données : la valeur des écarts entre les étudiants et l'écart avec la moyenne des évaluations des experts. Ces deux écarts nous permettent d'observer la différence d'évaluation entre un panel utilisant l'outil MDET et un panel d'experts.

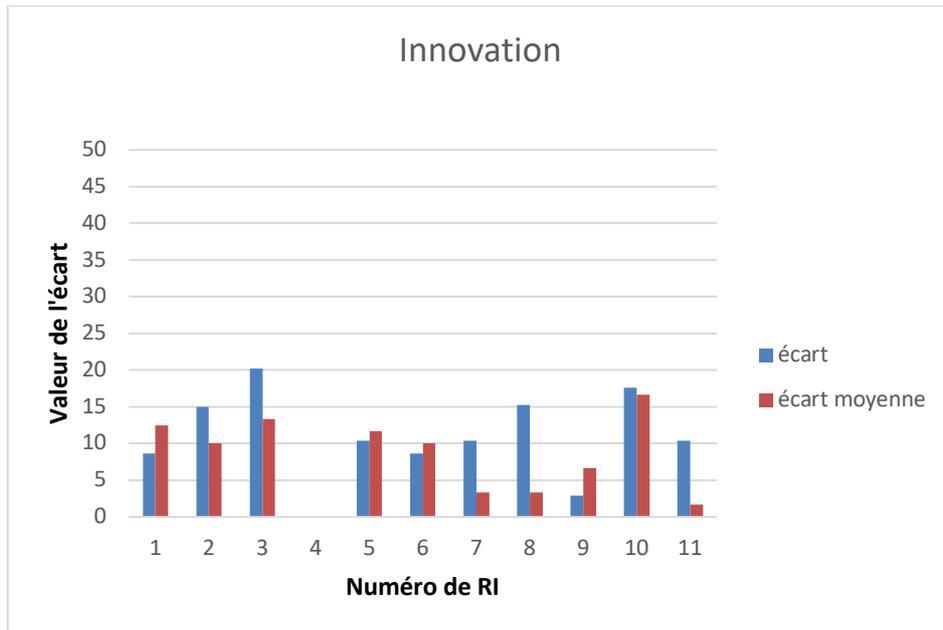


Figure 51 : Résultat pour l'innovation

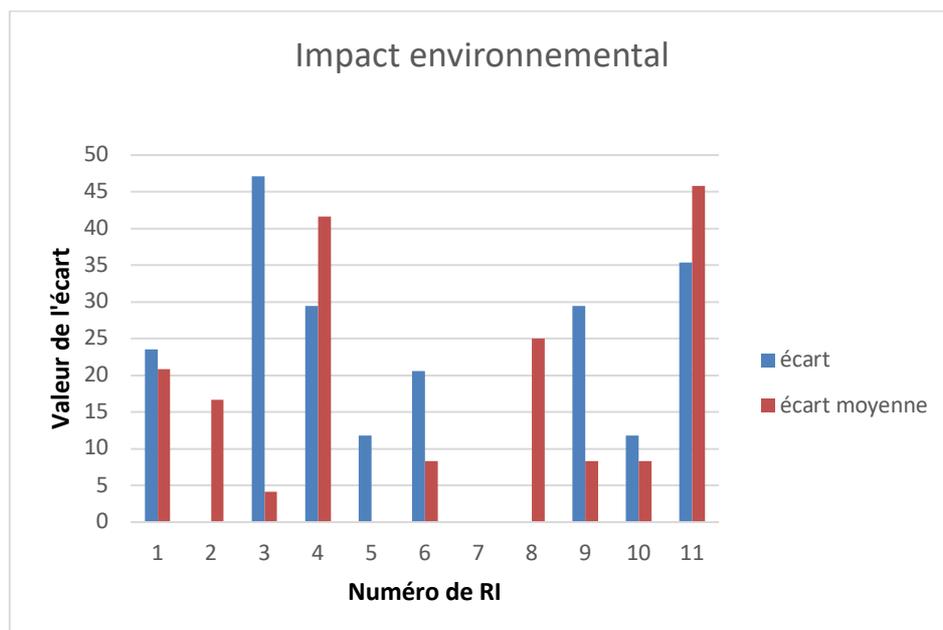


Figure 52 : Résultat pour l'environnement

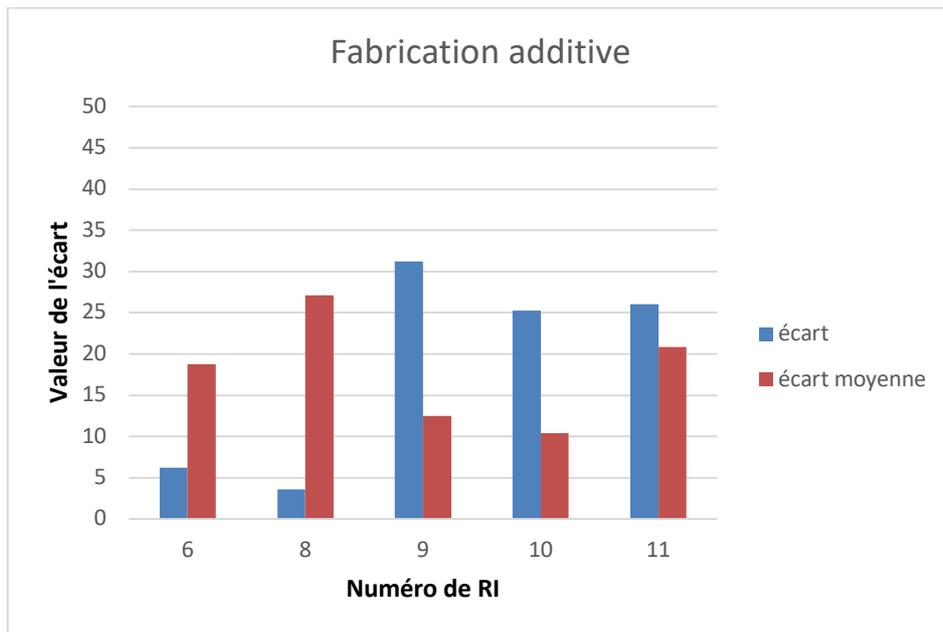


Figure 53 : Résultat pour la fabrication additive

Dans le Tableau 22, nous modélisons deux paramètres issus du critère « écart » formulé par l'équation 13 :

- Écart expert qui décrit la moyenne des écarts entre les experts sur l'ensemble des représentations intermédiaires, qui peut être calculé avec ou sans MDET
- Écart étudiant/expert qui décrit la moyenne des écarts entre l'évaluation des étudiants et l'évaluation des experts avec l'outil MDET

Tableau 22 : Écarts entre les participants et les experts

	Sans outil	MDET	
	Écart experts	Écart experts	Écart étudiant/expert
I	10,86	14,36	13,59
E	26,15	/	/
FA	18,48	7,65	13,54

Grâce aux évaluations réalisées par les participants, nous avons pu obtenir un classement des représentations intermédiaires afin de comparer trois résultats d'évaluation (experts sans outil, experts avec MDET, participants avec MDET).

Pour chacune des évaluations, nous calculons le rang de chaque représentation intermédiaire comme si elle avait été évaluée par tous les experts en même temps. Nous pouvons donc classer globalement chaque idée. Nous obtenons trois types de résultats :

- Le rang des représentations intermédiaires pour les experts sans outil
- Le rang des représentations intermédiaires pour les experts avec le MDET
- Le rang des représentations intermédiaires pour les étudiants avec le MDET

Les trois meilleures représentations intermédiaires, pour chaque participant ou groupe de participants, sont classées dans le Tableau 23. Par exemple, la représentation intermédiaire n° 2 est classée première par les experts en environnement sans outil MDET. Le classement pour le groupe « Experts » est déterminé en calculant l'évaluation moyenne de chaque représentation intermédiaire.

On peut ainsi visualiser dans ce tableau deux types de RI :

- Celle obtenant de bons rangs pour chacun des domaines comme la RI n° 10 qui est classée en position 1 ou 2 par l'ensemble des évaluations (sauf les experts Innovation sans outil et 3^{ème} en FA sans outil)
- Celle obtenant un bon rang uniquement pour un domaine comme la RI n° 11 en FA et la RI n° 6 en Innovation.

Tableau 23 : Classement des représentations intermédiaires

		I			DD			FA			
		Rang	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sans outil	FA	Expert 1							6	8, 9, 10, 11	
		Expert 2							9	6, 10	
		Expert 3							6	8	9
	E	Expert 1				2, 10	8	6			
		Expert 2				2	3, 4				
	I	Expert 1	8	10	6						
		Expert 2	3	4, 9							
	Experts		8	6	4	2, 8, 10			6	9	8, 10
	MDET	Étudiants		11	10	2, 8, 9	3	10	9	11	10
FA		Expert 1							11	10, 8	
		Expert 2							9	11	10
		Expert 3							10	9	6
E		Expert 1				8	10	11			
		Expert 2				10					
I		Expert 1	6	10	4						
		Expert 2	6, 9		4						
Experts		6	10	4	10	8	11	10	9	11	

6.6.5 Conclusion de l'expérimentation

Lors de cette expérimentation, nous avons pu mettre en place 3 paramètres de mesures de l'efficacité de notre outil.

L'écart mesuré entre les experts montre qu'il est difficile pour eux d'avoir toujours le même avis et qu'il existe ainsi une part de subjectivité dans cette évaluation qui est due à l'expérience vis-à-vis du type de représentation intermédiaire proposée.

À la première lecture, on peut observer dans le Tableau 22 que l'écart moyen entre les étudiants et les experts est dans le même ordre de grandeur que l'écart entre les experts entre eux. L'évaluation réalisée par les étudiants rentre donc dans le même ordre de grandeur que celle des experts.

Lors de cette expérimentation, nous avons pu faire tester l'outil d'évaluation aux experts, cette étape nous a permis de voir que leurs résultats étaient plus précis à l'exception de l'étude de l'environnement. Pour ce domaine, les résultats n'étaient pas utilisables, les experts n'ayant pas rempli assez d'évaluation pour que cela soit significatif.

Le troisième paramètre mis en place pour valider cette expérimentation est l'analyse des rangs des représentations intermédiaires.

Lors de l'analyse des rangs, nous pouvons voir que 5 idées (6, 8, 9, 10, 11) luttent pour chacun des podiums. Avoir toujours les mêmes représentations intermédiaires montre que les experts des différentes évaluations ont les mêmes conclusions. Les étudiants ont pour chaque domaine une à deux représentations intermédiaires en commun avec les experts avec et sans MDET. Les experts ont en commun lors des deux évaluations également une à deux représentations intermédiaires.

L'évaluation obtient donc dans l'ensemble des résultats proches des experts, et ce pour chacun des domaines étudiés. Parallèlement, il est intéressant de noter qu'en présence de représentations intermédiaires différentes, par exemple, une application/service ou un nouveau produit, les évaluations ont su s'adapter à cette variation et restaient tout à fait pertinentes. L'outil MDET permet ainsi d'améliorer la phase d'évaluation des experts.

Maintenant que nous avons pu voir les bienfaits et tout l'intérêt de l'utilisation de l'outil MDET dans la phase d'évaluation, l'étape centrale de la méthodologie, présentée sur la Figure 22, a été validée, il s'agit de poursuivre notre étude par la formalisation des étapes intervenant après l'évaluation de la méthodologie proposée, à savoir les étapes d'analyse, de recommandations, de réévaluation et de comparaison. L'expérimentation 3 permettra de quantifier l'amélioration des représentations intermédiaires dans les domaines étudiés. Nous décrivons une étude de cas dans laquelle le MDET a été utilisé pour évaluer l'innovation, l'impact environnemental et le potentiel de la fabrication additive.

6.7 Analyse

Lorsque l'ensemble des RI du projet de conception sont évalués, la phase d'analyse est réalisée. Cette étape consiste à identifier quelles sont les RI qui obtiennent les meilleures évaluations au niveau des domaines d'expertise et au niveau global. Cette étape est présentée sur la Figure 56 (classement des RI globales et écarts relatifs des RI sélectionnées).

Sur la Figure 54 est présentée les résultats de toutes les représentations intermédiaires sous forme de graphique radar, afin d'identifier les performances de chaque représentation intermédiaire pour chaque critère de chaque domaine et permet d'observer les notes maximales.

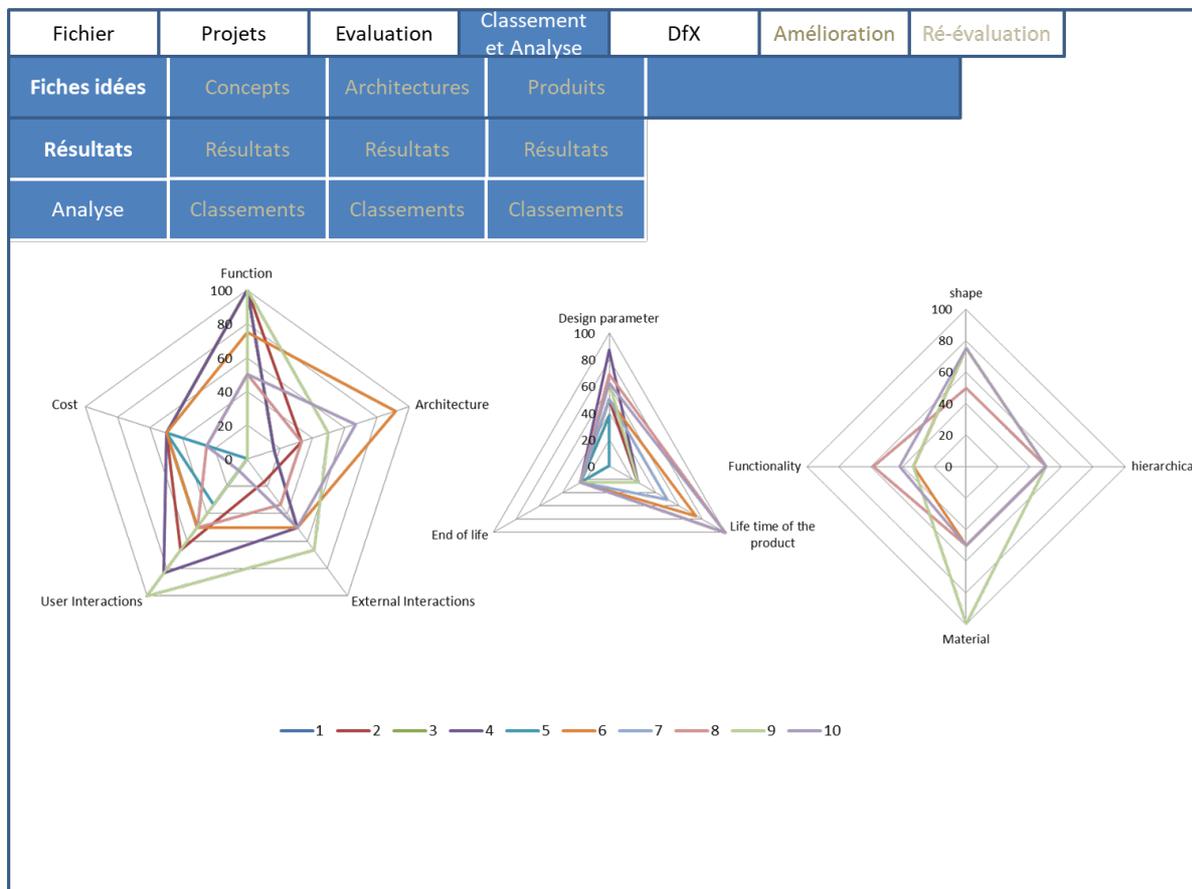


Figure 54 : Résultat brut des RI

Sur la Figure 55 est présentée la version de la Figure 54, mais uniquement pour la représentation intermédiaire sélectionnée, ici la représentation intermédiaire n° 6. Cela permet aux concepteurs de passer de représentation intermédiaire afin de se rendre plus facilement compte des résultats isolés.

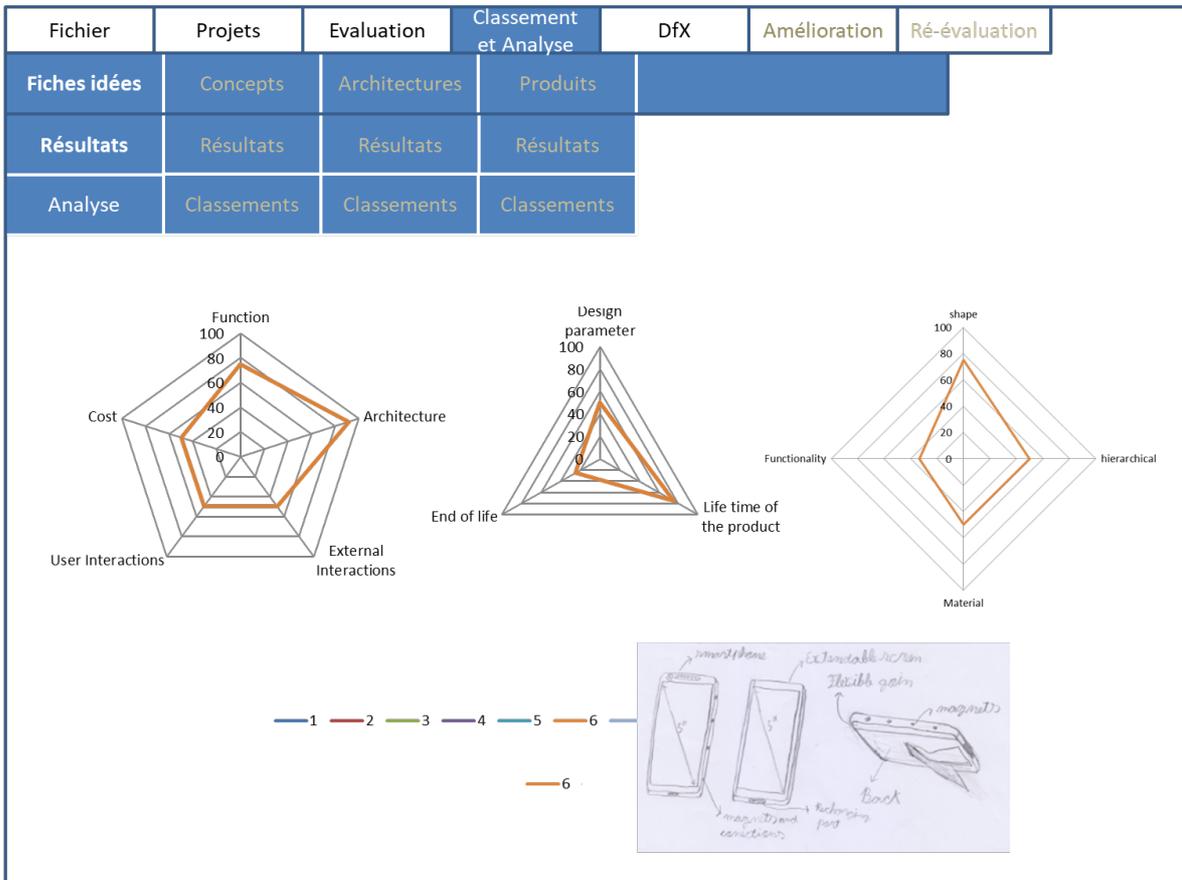


Figure 55 : Résultat pour une RI

Enfin sur la Figure 56, nous présentons aux concepteurs le classement de l'évaluation globale ainsi que le potentiel d'amélioration possible pour les différents domaines. Cette étape permet d'installer les modifications que devront faire les concepteurs sur leurs représentations intermédiaires et de sélectionner les meilleures représentations locales c'est-à-dire celles qui obtiennent les meilleurs résultats dans les domaines étudiés.

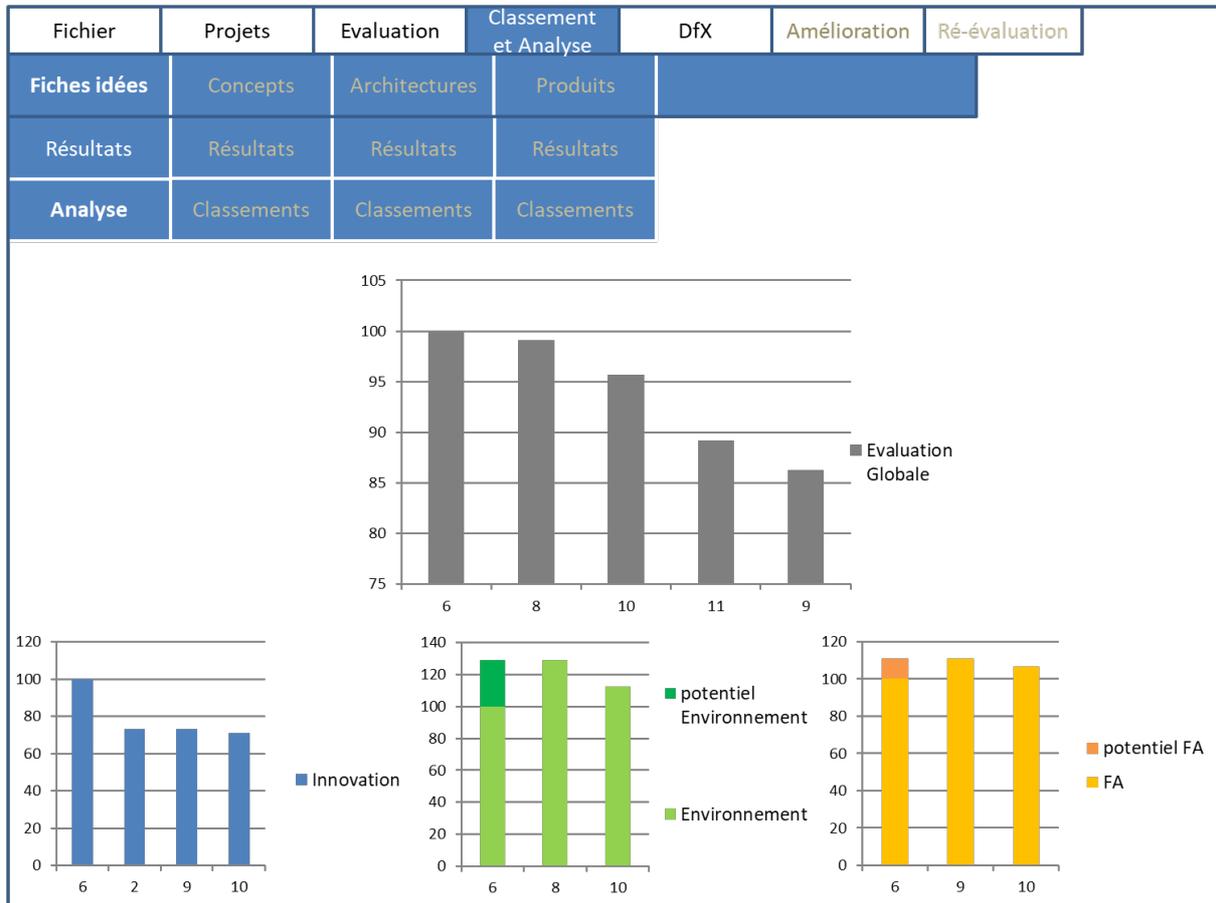


Figure 56 : Analyse des potentiels d'amélioration

6.8 DfX : recommandation de conception

De l'étape d'analyse, nous avons pu identifier les critères pour chaque domaine où la RI choisie avaient un potentiel d'amélioration permettant une amélioration « certaine ». Ces critères ont été identifiés comme certains car l'écart entre la RI locale et globale était la plus importante et que la réduction de cet écart permettrait un bénéfice certain à la RI choisie. Elles ont été écrites de façon à respecter les préconisations des outils ([31], [41], [42], [52], [69], [100], [107]) et sont formalisées dans les Tableau 24, Tableau 25 et Tableau 26.

Tableau 24 : DfX innovation

DfX Innovation	
<u>C1 : Fonction</u>	
<p>Votre idée n'ajoute pas de fonction ou celle-ci ne répond pas à un besoin réellement identifié par le cahier des charges, par votre étude du marché ou votre analyse du consommateur. Vous pouvez malgré tout identifier une fonction réalisée par une autre idée et l'intégrer à celle-ci. Aidez-vous du potentiel qu'offre par exemple la fabrication additive.</p>	
Lien avec I : C3 ; C4 ; C5	Lien avec E : C1 Lien FA : C1 ; C2 ; C4
<u>C2: Architecture</u>	
<ul style="list-style-type: none"> - Modification de taille : le volume d'un produit constitue un potentiel d'innovation que ce soit la course à la miniaturisation (nano capteur) ou la course à la grandeur (taille des écrans de télévision). Ce critère répond à une certaine demande du consommateur. - Modification de l'architecture : La disposition même des différents composants dans le produit peut permettre d'améliorer les performances du produit, réduire le volume ou le coût du produit. - Environnement d'utilisation : Augmenter le nombre de situations d'utilisation comme par exemple le développement des caméras type GoPro. 	
Lien avec I : C3 ; C5	Lien avec E : C1 Lien FA : C1 ; C2 ; C4
<u>C3 : Interactions externes</u>	
<ul style="list-style-type: none"> - Flux de matière : Le produit peut s'adapter à différents matériaux ou à des matériaux sous différents états ce qui permet d'élargir l'utilisation du produit. - Flux d'énergie : L'utilisation ou la valorisation des différentes sources d'énergie constitue un moyen d'amélioration du produit : pompe à chaleur, cogénération, hybridation - Flux d'information : L'information est de plus en plus importante dans les produits, votre idée propose-t-elle de nouveaux canaux d'information à l'utilisateur ou au microcontrôleur afin de mieux utiliser le produit ? L'ajout de capteur peut s'avérer intéressant afin de mieux identifier l'usage du produit dans les meilleures conditions de fonctionnement, attention un trop grand nombre d'informations augmente le coût du produit sans pour autant améliorer significativement le produit. 	
Lien avec I : C1 ; C2 ; C5	Lien avec E : C1 Lien FA : C3 ; C4
<u>C4 : Interactions avec l'utilisateur</u>	
<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation physique : l'utilisation du produit est facilitée d'un point de vue physique ou adapté aux personnes en situation de handicap (par exemple aide à la préhension, exosquelette) - Utilisation sensorielle : l'utilisation du produit est facilitée d'un point de vue sensoriel (par exemple mode colorblind) - Utilisation cognitive : l'utilisation du produit est facilitée pour les personnes en situation de handicap (par exemple, code couleur ou géométrie adaptée à un geste) 	
Lien avec I : C1	Lien avec E : C1 Lien FA : C1 ; C5
<u>C5: Coût</u>	
<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'achat : le coût d'achat est la combinaison de chaque paramètre étudié, mais son estimation doit permettre de se positionner par rapport à la concurrence. - Coût d'utilisation : représente le coût d'utilisation du produit, peut être diminué en utilisant une source d'énergie moins coûteuse ou en modifiant la matière ou l'architecture du produit pour réduire la maintenance. 	
Lien avec I : C1 ; C2 ; C3	Lien avec E : C2 ; C3 Lien FA : C2

Tableau 25 : DfX Environnement

DfX Environnement	
<p><u>C1: Paramètres de conception</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Efficience des matières premières : les matériaux utilisés proviennent de matières premières, la transformation, la rareté et l'extraction de la matière première est à prendre en compte. - Quantité de procédés différents : le nombre de procédés par lequel transite la matière ainsi que les différentes phases du transport augmente l'impact environnemental, diminuer les transports ou le nombre de procédés permet de diminuer l'impact. - Quantité d'emballages : la quantité de packaging augmente l'impact de votre produit sans apporter de plus-value, le packaging est utilisé dans toutes les phases de transport. - Volume/poids du produit : Le volume et le poids du produit augmentent l'impact du produit dans les phases de transport. 	
Lien avec E: C3	Lien avec I : C1 ; C2 ; C3 ; C5 Lien FA : C2
<p><u>C2 : Durée de vie du produit</u></p> <p>La durée de vie du composant est importante dans le calcul de l'impact environnemental, plus un produit est utilisable longtemps, plus l'impact de sa fabrication est négligé.</p>	
	Lien avec I : C5 Lien FA : C3 ; C4
<p><u>C3: Fin de vie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Réutilisation : Un produit tout ou en partie réutilisable permet de limiter l'impact du produit sur l'environnement en offrant une seconde vie à une partie du produit. - Réglementation : Le produit doit répondre à des réglementations, plus le produit est sensible plus les réglementations sont difficiles et coûteuses à respecter. 	
Lien avec E : C1	Lien avec I : C5 Lien FA : C1 ; C2 ; C3 ; C4

Tableau 26 : DfX fabrication additive

DfX Fabrication Additive	
<p><u>C1 : forme</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Surfaces non portées : pour que votre produit utilise le moins possible de matière support, il faut que chaque surface de votre produit respect la règle des 45°. C'est-à-dire qu'une inclinaison supérieure à 45° nécessite du support pour soutenir la surface. - Complexité : Pour tirer le plein potentiel de la fabrication additive, un niveau de complexité du produit est nécessaire, s'il n'est pas vérifié il convient de revenir vers des procédés de fabrication traditionnelle. 	
Lien FA : C2 ; C3 ; C4	Lien avec I : C1 ; C2 ; C4 Lien avec E : C1
<p><u>C2: Hiérarchie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Suppression du support : Il est important de créer des espaces pour l'évacuation du support lors de réalisation de poche. - Épaisseur des murs : Respecter une dimension limite entre 1 et 3 mm pour que les parois de votre produit soient correctement réalisées. 	
Lien FA : C1 ; C3	Lien avec I : C5 Lien avec E : C1 ; C3
<p><u>C3 : matière</u></p> <p>Éviter les arêtes vives et renforcer à l'aide de nervures les surfaces subissant les contraintes mécaniques.</p>	
Lien FA : C1 ; C2	Lien avec I : C3 Lien avec E : C2 ; C3
<p><u>C4: Fonctionnalité</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnalité : Il est possible de réaliser des liaisons mécaniques d'une seule impression. Préférer un assemblage pour les éléments soumis à de fortes répétitions - Tolérances/Exactitude géométrique : Précision 0,1-0,5 % attention aux tolérances, il convient donc de ne pas avoir de surface nécessitant une précision de dimension trop grande. 	
Lien FA : C1	Lien avec I : C1 Lien avec E : C2 ; C3

Chaque DfX (Tableau 24 ; Tableau 25 ; Tableau 26) est ensuite lié aux autres pour identifier les contreparties d'une amélioration, elles sont explicitement données aux concepteurs, mais aussi formalisées pour la sélection des recommandations comme montrée dans l'équation 15 suivante, où \underline{E}_i est l'évaluation initiale, \underline{E}_a est l'évaluation améliorée, \underline{P} est le potentiel d'amélioration et \underline{M}_{DfX} est la matrice des DfX :

$$\underline{E}_i + \underline{M}_{DfX} \times \underline{P} = \underline{E}_a \quad (15)$$

Ce calcul permet ainsi de quantifier l'amélioration possible par le potentiel identifié dans la section précédente et permet ainsi de classer les différents potentiels de manière plus précise.

La matrice M_{DfX} pour notre cas d'études est présentée dans le Tableau 27 :

Pour remplir cette matrice, il faut identifier quels sont les différents critères qui auront un impact les uns par rapport aux autres. Cette identification se fait un à un, 1 si cet impact est positif et -1 s'il est négatif (car nous avons comme coefficient de pondération entre chaque critère de 1). Cette matrice est de ce fait symétrique. Ce travail doit être fait au moment de l'écriture des DfX, c'est-à-dire au moment de la création de l'outil MDET.

Tableau 27 : Lien et effet des différentes recommandations

Criteria		Innovation					Environnement			AM			
		C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C4
Innovation	C1 : Function	1		1	1	-1	1			1	1		-1
	C2 : Architecture		1	-1		1	1			-1	1		-1
	C3 : External interactions	1	-1	1		-1	1					-1	-1
	C4 : User interactions	1			1		1			1			1
	C5 : Cost	-1	1	-1		1		-1	-1		-1		
Environnement	C1 : Design parameter	1	1	1	1		1		1	1	1		
	C2: Life time of the product					-1		1				1	1
	C3 : End of life					-1	1		1	1	1	1	1
AM	C1 : Shape	1	-1		1		1		1	1	-1	1	1
	C2 : Hierarchical	1	1			-1	1		1	-1	1	-1	
	C3 : Material			-1				1	1	1	-1	1	
	C4 : Functionality	-1	-1	-1	1			1	1	1			1

Sur la Figure 57, la proposition des DfX est classée en fonction du potentiel d'amélioration calculé par l'équation 15. Les concepteurs ont alors à choisir le ou les recommandations qu'ils souhaitent obtenir. Les recommandations sont ainsi proposées comme formulées sur la Figure 58.

Fichier	Projets	Evaluation	Classement et Analyse	DfX	Amélioration	Ré-évaluation
Fiches idées	Concepts	Architectures	Produits			

DfX	Potential
<u>Material (AM)</u>	+3,3
<u>Shape (AM)</u>	+1,66
<u>Life time (S)</u>	+1,66
<u>Design parameter (S)</u>	+0,8
<u>DfX disponibles</u>	

Figure 57 : Identification des DfX

Fichier	Projets	Evaluation	Classement et Analyse	DfX	Amélioration	Ré-évaluation
Fiches idées	Concepts	Architectures	Produits			
				DfX	Potential	
				<u>Material (AM)</u>	+3,3	↓
				<u>Shape (AM)</u>	+1,66	
				<u>Life time (S)</u>	+1,66	
				<u>Design parameter (S)</u>	+0,8	
				<u>DfX disponibles</u>		
				C3 : Material Éviter les arêtes vives et renforcer à l'aide de nervures les surfaces subissant les contraintes mécaniques.		
				Lien AM : Hierarchical, Shape		Lien avec I : Architecture Lien avec S : Design Parameter

Figure 58 : Choix des DfX

Cette étape de recommandation est maintenant terminée, les concepteurs ont ainsi pu préparer cette étape en amont en sélectionnant les recommandations et en les liants dès la fabrication du MDET. L'étape d'analyse permet de proposer les meilleurs potentiels d'amélioration de la meilleure représentation intermédiaire. Ainsi la sélection des meilleures recommandations est possible. La prochaine étape est donc l'étape d'amélioration avec l'ensemble des données que la méthodologie propose aux concepteurs.

6.9 Amélioration

Les concepteurs vont pouvoir proposer une représentation intermédiaire améliorée à l'aide de la sélection des meilleures représentations intermédiaires locales ainsi que des recommandations qui ont été sélectionnées lors de l'étape d'analyse. Une fois la RI améliorée, les concepteurs ont besoin d'ajouter celle-ci dans l'outil comme le montre la Figure 59, c'est le même dispositif que lors de la phase d'évaluation, la seule différence est la phase dans laquelle a lieu cette opération.

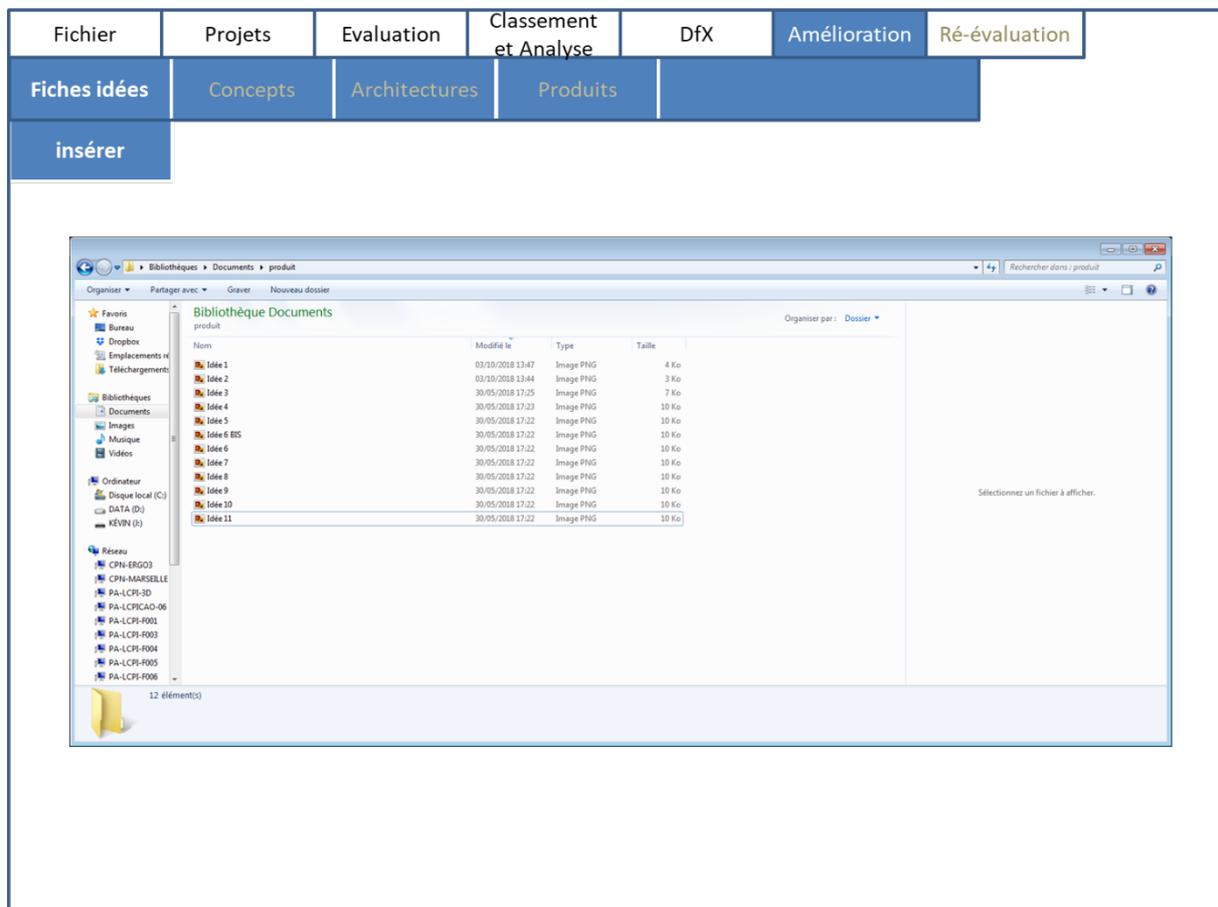


Figure 59 : Insertion de la RI améliorée

6.10 Réévaluation

L'étape de réévaluation consiste à évaluer les performances de la représentation intermédiaire améliorée de l'étape précédente. Cette étape est semblable à l'étape d'évaluation, elle reprend les mêmes critères et paramètres de conception afin de s'assurer qu'il n'y ait pas de biais entre les deux étapes d'évaluation et de bien tenir compte des contreparties que l'amélioration pourrait créer. La différence est seulement le positionnement dans la méthodologie comme figuré dans la zone 1 de la Figure 60.

Fichier	Projets	Evaluation	Classement et Analyse	DfX	Amélioration	Ré-évaluation
Fiches idées	Concepts	Architectures	Produits			
Évaluer						
Résultat						
Innovation						
Function	Additional Function	0%	50%	100%		
Architecture	Modified Size	0%	50%	100%		
	Modified Physical Layout	0%	50%	100%		
	Expanded Usage Environment	0%	50%	100%		

Figure 60 : Réévaluation de la RI améliorée

6.11 Comparaison

Une fois la réévaluation effectuée, un compte rendu de la séquence d'utilisation de l'outil est généré afin d'informer les utilisateurs sur les données de cette étape du processus de conception :

- Le nombre de RI générées
- La performance moyenne et maximale pour chaque critère/domaine
- L'amélioration quantifiée par l'utilisation de l'outil
- Les points faibles à monitorer pour les prochaines étapes

Ces données vont permettre aux concepteurs d'avoir un regard plus qualitatif sur leur projet actuel afin de le corriger au fur et à mesure, mais aussi de revoir l'élaboration de l'étape de conception où l'outil est utilisé afin d'améliorer le processus global.

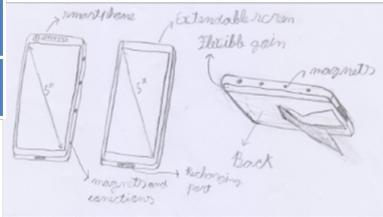
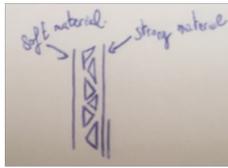
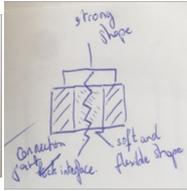
Fichier	Projets	Evaluation	Classement et Analyse	DfX	Amélioration	Ré-évaluation	
Fiches idées	Concepts	Architectures	Produits	Rapport			
Évaluer							
Résultat	RI 6			RI améliorée			
Nombre de représentation intermédiaire		11+1					
Meilleur global		6					
Amélioration Additive Manufacturing		+12,50%					
Amélioration Innovation		0					
Amélioration Environnement		8%					
Performance moyenne				Points à regarder			
Fabrication additive: 40,33				Additive manufacturing : <u>2</u>			
Innovation : 38,66				Innovation : <u>4</u>			
Développement durable : 35,44				Développement durable : <u>1</u>			

Figure 61 : Compte rendu de la phase de conception

6.12 Synthèse du cas d'application

De ce cas d'application nous avons pu appréhender la construction d'un outil d'évaluation multidomaine, appliqué aux phases amont de conception. Nous avons pu à travers les sections de ce chapitre, suivre le déroulement de la méthodologie proposée. Cette application de la proposition méthodologique a permis de créer un outil qui identifie les performances de représentation intermédiaire s'intéressant à l'innovation, l'environnement et la fabrication additive. Cette application qui s'articule autour des étapes de la méthodologie permet de regrouper et d'agglomérer les différentes informations que va devoir gérer la méthodologie.

La création de cette application permet de proposer une réponse aux constats 3 et 4 formulés dans la section 3.5 de l'état de l'art : permettre d'évaluer une performance multidomaine et d'associer les DfX à un potentiel d'amélioration de la représentation intermédiaire du produit.

De plus cette application de la méthodologie permet de réaliser l'expérimentation 3 qui permettra de valider les hypothèses 1 et 3 formulées dans la section 4.2 :

- Hypothèse 1 : Le processus proposé permet d'évaluer et améliorer la performance multidomaine
- Hypothèse 3 : Les informations lors des phases d'évaluation permettent d'utiliser des méthodes de recommandation

L'expérimentation 3 permet de vérifier à travers une expérimentation que les hypothèses sont vérifiées.

6.13 Expérimentation 3 : validation du déroulement de la méthodologie proposée

Cette expérimentation a eu lieu aux Arts et Métiers à Paris en janvier 2019, des étudiants de l'École de Biologie Industrielle (EBI) ont mené une séance de créativité dans le cadre de leur formation de master 2. L'objectif pour les étudiants lors de cette formation était de valider leur concept et d'imprimer ce concept à l'aide de la fabrication additive.

6.13.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est de confronter l'application de la méthodologie vis-à-vis d'un projet de conception. Pour cela, nous avons réalisé l'expérience sur 6 projets de conception.

6.13.2 Protocole

Chaque groupe de conception est composé de 10 étudiants de l'EBI et d'un élève ingénieur. Le déroulement de l'expérimentation est le suivant et est formalisé sur la Figure 62:

- Brief de démarrage (15 min) : présentation du déroulement de la séance, définition des 3 axes d'amélioration, démonstration de l'outil
- 1ère phase d'évaluation (45 min) : chaque groupe évaluera les fiches idées de l'autre groupe présent
- Classement et analyse (15 min) : sélection de la meilleure fiche idée, sélection de l'axe d'amélioration
- Sélection des DfX les plus pertinents (15 min)
- Phase d'amélioration de la fiche idée (60 min) : en s'appuyant des DfX et des fiches idées « meilleur local »
- Réévaluation (10 min) : chaque groupe réévaluera la nouvelle (ou les nouvelles) proposition(s)

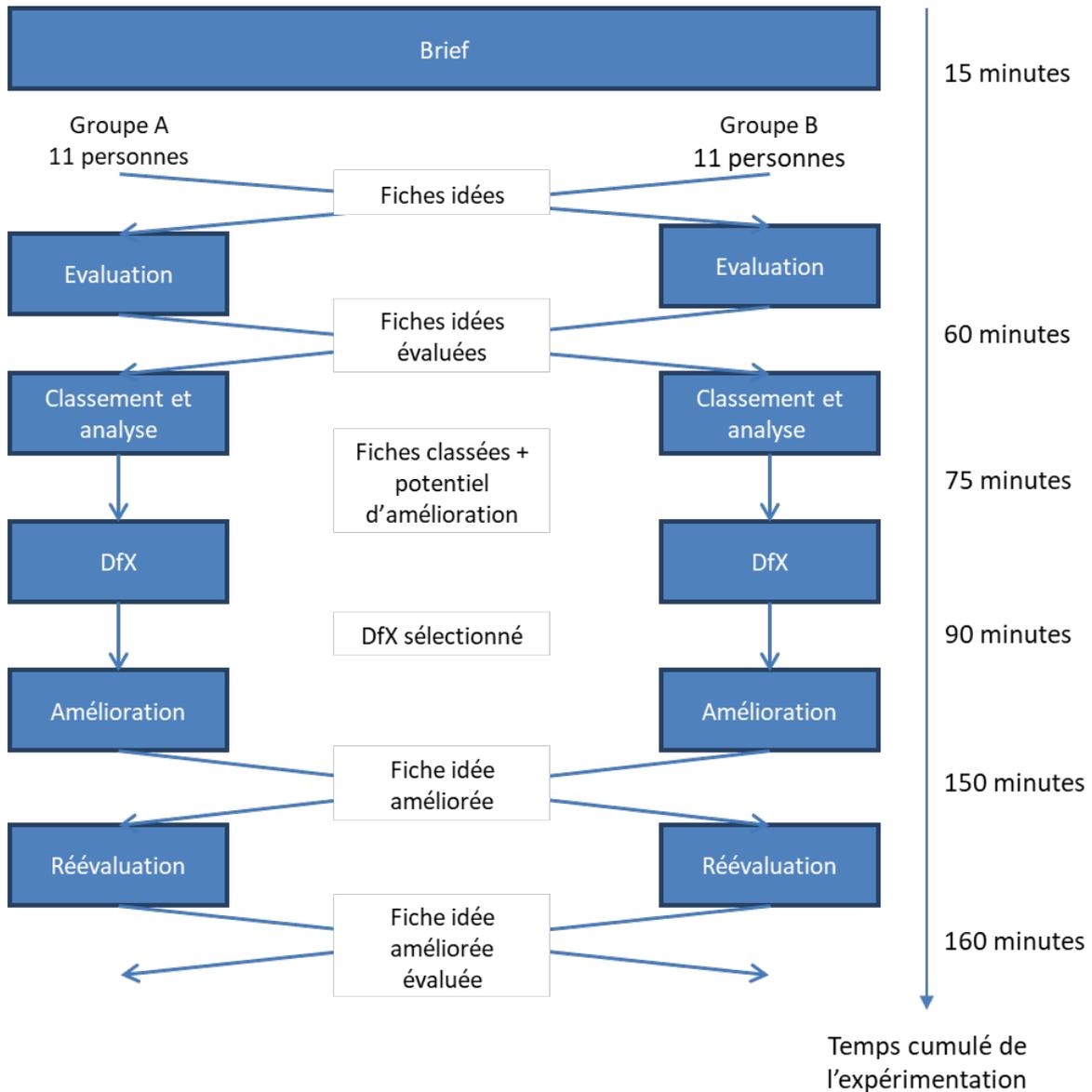


Figure 62 : Déroulement de l'expérimentation

6.13.3 Critères de validation

Nous allons, pour valider cette méthodologie, comparer l'évaluation des représentations intermédiaires réalisées entre la première évaluation de la méthodologie et la phase de réévaluation.

6.13.4 Résultat

Lors de cette expérience, les groupes ont chacun proposé des représentations intermédiaires très diverses comme en témoignent les domaines traités dans le Tableau 28 :

Tableau 28 : Sujets des projets de conception

Groupe	Sujet
1	Équipement de cuisine innovant
2	Étui à lunettes innovant
3	Bouteille d'eau connectée
4	Brosse à dents de voyage
5	Ampoule mesurant la qualité d'air
6	Pilulier connecté

Chaque projet a donc été évalué deux fois, nous avons pu quantifier les différences notées entre ces deux étapes dans le Tableau 29. Dans ce tableau sont détaillées pour chaque groupe la variation de l'évaluation ainsi que l'amélioration en pourcentage pour les deux domaines évalués (innovation et fabrication additive). Ainsi pour le groupe 2, une amélioration correspondant à 6,6 points en innovation a permis d'améliorer son évaluation en innovation de 33 % entre les deux évaluations.

Tableau 29 : Variation des évaluations

	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 5	Gr 6
Innovation	-1,6/-5,88 %	6,6/33 %	0/0 %	13,3/42,1 %	/	32,5/88,7 %
Fabrication	-4,5/-12 %	3,1/7,14 %	8,4/14,7 %	0/0 %	/	12,5/28,5 %
Note globale	-2,9/-8,8 %	4,9/15,3 %	4,2/8,25 %	6,6/18,18 %	/	22,5/55,9 %

6.13.5 Conclusion de l'expérimentation

Sur les six projets de conception, nous pouvons observer une amélioration positive pour quatre projets (amélioration de 8,25 à 55,9 % de performance). Un projet n'a pas évolué. Un projet parmi les six a dégradé sa représentation intermédiaire après avoir réalisé les étapes 1 à 5 de la méthodologie.

La méthodologie a donc permis d'améliorer la représentation intermédiaire en une seule itération pour quatre des six projets, ce qui démontre son intérêt. En effet, en quelques heures, les participants ont pu réaliser la méthodologie, sans connaissance dans les domaines de l'innovation et de la fabrication additive, et ainsi améliorer significativement leur représentation intermédiaire.

S'agissant du groupe de travail qui a vu sa représentation intermédiaire se dégrader, il est nécessaire de réaliser l'étape 6 c'est-à-dire de passer par la phase de comparaison et de resélections de DfX afin d'essayer une nouvelle recommandation pour la suite du projet. L'étape 6 de comparaison permet de vérifier le bon déroulement de la méthodologie. Ainsi, une autre recommandation aurait pu être réalisée pour améliorer la représentation intermédiaire.

Enfin, un groupe n'a pas souhaité améliorer la représentation intermédiaire sélectionnée, ce qui est possible dans la méthodologie, le concepteur a le choix de suivre ou non les recommandations.

6.14 Conclusion générale des expérimentations

Nous avons pu voir dans ce chapitre quatre expérimentations qui nous ont permis de confronter la création de notre méthodologie au déroulement d'un processus de conception. En effet l'expérimentation 0 a pu mettre en lumière le besoin d'outil multidomaine dans les processus de conception dus au manque d'expertise présent dans les équipes de conception, mais aussi dû aux manques de ressources qui sont présentes dans les phases amont. Les résultats de cette expérimentation, bien que limités par la quantité de données, ont validé en partie l'hypothèse 1 quant à l'apport d'un processus d'évaluation multidomaine dans le processus de conception sous forme d'un outil.

L'expérimentation 1 a permis de conforter l'objectivité de la méthode d'évaluation proposée dans la méthodologie lors de la sélection des outils. Cette expérimentation permet de valider d'une part la méthode d'évaluation des outils de la littérature et d'autre part l'objectivité de cette dernière. Les résultats ont été limités par le manque de connaissance des participants aux sciences de la conception, ils montrent néanmoins une ressemblance entre les évaluations des participants et des résultats du référent.

Les résultats des deux premières expérimentations ont permis de valider le besoin de méthode et les étapes de celle proposée pour la création de l'outil multidomaine MDET. Cela a conduit à la réalisation de l'expérimentation 2 qui avait pour objectif de comparer les résultats obtenus par des experts des domaines considérés aux résultats obtenus par l'outil. Plusieurs natures de résultats ont pu être examinées à savoir l'évaluation des experts, l'évaluation d'étudiant utilisant le MDET et l'évaluation des experts avec le MDET. Ces trois résultats ont permis de montrer que la précision d'évaluation par l'outil était proche du niveau d'évaluation des experts. La classification issue des résultats des évaluations a permis de montrer une convergence vers les mêmes représentations intermédiaires entre les différents participants. Ces résultats permettent de valider que l'outil d'évaluation proposé tend à proposer les mêmes résultats d'évaluation que des experts des domaines considérés.

Une fois la méthode de création de l'outil ainsi que l'outil d'évaluation validés par les expérimentations, nous avons proposé de valider au travers de l'expérimentation 3, l'apport du processus d'évaluation proposée dans ce travail de thèse. Cette expérimentation 3 a pour but de valider l'hypothèse 3, c'est-à-dire que « les informations lors des phases d'évaluation permettent d'utiliser des méthodes de conception d'amélioration ». Ainsi 6 projets de conception différents ont suivi le processus d'évaluation afin d'améliorer leur concept de

produit. Les résultats montrent qu'il est ainsi possible d'améliorer les concepts générés au cours du processus de conception en s'intéressant à plusieurs domaines.

Ces trois expérimentations ont été menées dans le but de valider les hypothèses formulées dans le chapitre 4. Le Tableau 30 reprend les liens entre les hypothèses et les expérimentations et revient sur la validation des hypothèses.

Tableau 30 : Retour sur les hypothèses

	Expérimentation 0	Expérimentation 1	Expérimentation 2	Expérimentation 3	Validation
Hypothèse 1					Partielle
Hypothèse 2					Oui
Hypothèse 3					Oui

Les hypothèses 2 et 3 ont été validées par les expérimentations 1, 2 et 3. En effet, nous avons pu observer que l'évaluation réalisée par les étudiants avec l'outil MDET était proche de celle réalisée par les experts des domaines considérés et que la création de cet outil reposait sur des critères objectifs. De plus l'expérimentation 3 a permis de confirmer qu'il était possible lors du processus d'évaluation d'utiliser des méthodes de recommandation afin d'améliorer les RI réalisées.

Enfin, l'hypothèse 1 a été partiellement validée lors de ce travail de thèse, les expérimentations menées n'ont pas permis de comparer des processus de conception, mais seulement des étapes de ce processus.

Les propositions réalisées au cours de ce chapitre ont montré que les RI clés étaient de bons critères pour évaluer l'avancée du processus de conception (Expérimentation 1), qu'à partir de critères objectifs et tangibles il est possible d'évaluer les RI (Expérimentation 2), également qu'il était possible d'utiliser des recommandations (DfX) lors des étapes d'évaluation (Expérimentation 3). Enfin les évaluations ont été formulées en définissant la performance de la RI à l'étape du processus de conception considéré (Expérimentations 2 et 3). Nous venons donc, à travers ce chapitre, de montrer que les propositions réalisées lors de ce travail de thèse apportent des éléments de réponse aux constats établis lors de l'état de l'art (section 3.5).

7. Conclusion et perspectives

Cette thèse, réalisée au laboratoire LCPI de l'école d'Arts et Métiers ParisTech en co-encadrement avec le laboratoire GeM avait pour objectif l'étude des phases d'évaluation multidomaine dans le processus de conception. L'état de l'art a permis de formuler quatre constats qui nous ont eux-mêmes menés à la formalisation de la problématique suivante : « Comment les phases d'évaluation dans un processus de conception multidomaine peuvent-elles permettre d'accroître les performances du produit à partir des représentations intermédiaires ? »

Afin d'apporter une réponse à cette problématique, une méthodologie a été proposée, et des hypothèses ont été formulées :

- Hypothèse 1 : Le processus proposé permet d'évaluer et améliorer la performance multidomaine
- Hypothèse 2 : L'outil d'évaluation multidomaine permet d'obtenir une évaluation proche des experts
- Hypothèse 3 : Les informations lors des phases d'évaluation permettent d'utiliser des méthodes de conception d'amélioration

Ces hypothèses ont pu être démontrées dans le chapitre 6 grâce à l'application de la proposition méthodologique à l'innovation, l'impact environnemental et à la fabrication additive.

Il s'agira ici de présenter les apports de ce travail de thèse sous forme de synthèse et de proposer les perspectives de ce travail à court et à long terme.

7.1 Synthèse des apports scientifiques

Dans ce travail de thèse, nous avons pu montrer dans un premier temps l'importance de la conception dans la littérature, mais aussi les difficultés qu'elle rencontre dans son intégration dans l'industrie. Cette faible intégration s'explique par le fait qu'il est complexe pour les industriels de choisir et d'intégrer les méthodes de conception dans leur propre processus. L'intégration de nouveaux domaines d'expertises permet au processus de conception d'améliorer les performances aux produits finaux.

Fort de ces constats, nous proposons un processus d'évaluation et d'amélioration de représentation intermédiaire multidomaine basé sur :

- Une méthode permettant aux concepteurs de créer leurs outils d'évaluation sur mesure, c'est-à-dire en fonction des domaines intégrés dans le processus de conception ainsi qu'en fonction de la représentation intermédiaire à évaluer.
- Un processus d'évaluation et d'amélioration des représentations intermédiaires en 7 étapes présenté sur la Figure 63:

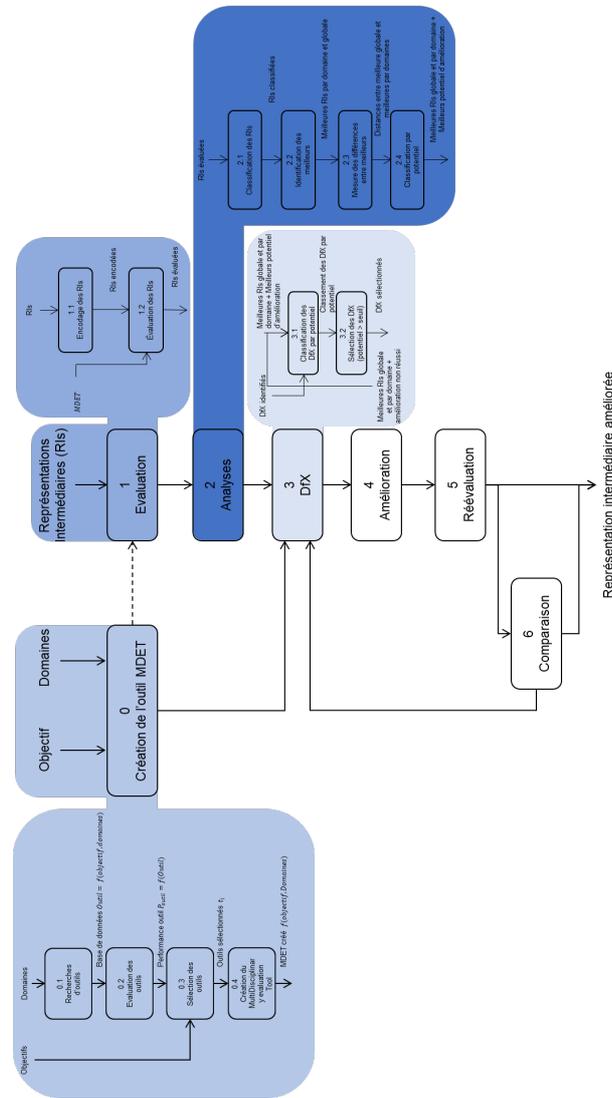


Figure 63: processus d'évaluation proposé

Les apports de cette méthodologie sont classés dans le Tableau 31.

Tableau 31: Apports de la thèse

General	Individual
---------	------------

Abstract	<i>Design theory</i> (/)	<i>Math-based methods</i> L'outil d'évaluation MDET
Concrète	<i>Design methodolgy</i> Proposition méthodologique	<i>Design methods</i> La méthode de sélection des DfX

Cette méthodologie se veut générique, applicable à tout domaine qui doit être intégré dans le processus de conception et pour lequel des connaissances formalisées sous forme d'outils d'évaluation existent dans la littérature. Nous avons ainsi appliqué cette méthodologie à l'innovation, la fabrication additive et à l'impact environnemental.

Ces propositions ont été testées par quatre expérimentations afin de s'assurer au fur et à mesure de leur validité : pertinence de l'évaluation multidomaine ; validation de la méthode d'évaluation des outils ; comparaison des évaluations entre l'outil et des experts ; quantification des améliorations de la méthodologie.

Les apports de ce travail sont donc un processus d'évaluation (Figure 22) pour le processus de conception, une méthode de création d'un outil multidomaine (Figure 23) et une application pour l'innovation, la fabrication additive et l'impact environnemental pour les phases amont (Chapitre 6).

7.2 Perspectives

Ces travaux ont permis de proposer un processus d'évaluation multidomaine intégré au processus de conception et de proposer une méthode permettant la création d'un outil d'évaluation multidomaine adapté aux besoins du projet de conception. De ces propositions, il est possible de dégager des perspectives de développement et de recherche afin de montrer les améliorations possibles.

7.2.1 Perspectives de développement

Dans un premier temps, il s'agit de présenter les améliorations et enrichissements possibles à apporter à la méthodologie à court terme.

Deux axes de développement peuvent ainsi se dégager :

- la **constitution de bases de données**
- la **formalisation d'une continuité** entre les étapes du processus de conception.

Le **premier axe de développement** de la méthodologie serait donc de constituer des bases de données où seront stockés trois types d'éléments permettant une structuration des connaissances au sein de cette méthodologie :

- Une base de données constituée de **l'ensemble des méthodes de conception évaluées** par la méthode de création de MDET
- Une base de données constituée de **l'ensemble des outils MDET**
- Une base de données de **l'ensemble des recommandations DfX**

Cette constitution des bases de données permettra aux laboratoires et entreprises, utilisant cette méthodologie, de **capitaliser** sur les multiples utilisations du processus d'évaluation. En effet, si dans un premier temps, la description et l'évaluation des outils pour l'utilisation de la méthode MDET nécessite des ressources, son utilisation répétée permettra d'enrichir les bases de données et donc facilitera les utilisations futures tout en limitant le temps de réalisation du processus d'évaluation.

Le **second axe de développement** de la méthodologie est d'améliorer la **continuité des méthodes d'évaluation** entre les différentes étapes du processus de conception. En effet, la méthodologie permet de créer et d'évaluer les représentations intermédiaires réalisées lors du processus de conception. Or, aujourd'hui, la méthode MDET préconise la création d'un outil pour chaque forme de représentations intermédiaires rencontrée dans le processus de

conception. Il n'existe alors aucune continuité dans les outils d'évaluation entre deux étapes du processus. Ainsi, formaliser la continuité de ces évaluations permettrait d'utiliser les mêmes critères d'évaluation en ne modifiant que les paramètres de conception étudiés lors des différentes étapes. Il faudrait alors anticiper la création des outils d'évaluation en amont du projet de conception, c'est-à-dire, créer un outil s'adaptant à chaque étape du processus de conception. Pour cela, la méthodologie devra s'adapter à l'étape de création d'outils, et plus précisément, lors de la sélection des outils et la création du MDET en sélectionnant les critères d'évaluation sur l'ensemble du processus de conception. Cette amélioration permettrait donc de créer des outils communs à l'ensemble du processus de conception tout en restant pertinent pour une utilisation ciblée à une représentation intermédiaire.

Ces deux axes de développement permettront d'améliorer l'intégration de l'outil multidomaine dans le processus de conception en facilitant sa création et en élargissant son spectre d'application.

7.2.2 Perspectives de recherche

Les perspectives de recherche qu'ouvre ce travail sont diverses. Nous proposons de développer deux perspectives en particulier :

- comment **l'intelligence artificielle et la veille méthodologique automatique** pourraient permettre de **créer des outils sur-mesure** en adaptant directement les méthodes aux objectifs décrits par les domaines et par la représentation intermédiaire voulue ?
- comment **l'intégration de critères organisationnels dans le processus d'évaluation** pourrait permettre de **rendre plus robuste l'évaluation** ?

Une première perspective de recherche de ce travail serait donc de proposer une méthodologie permettant aux concepteurs de créer **automatiquement** le processus d'évaluation adapté à leurs domaines d'études et leur processus de conception. Cela permettrait, en effet, aux concepteurs de s'affranchir du travail de création d'outils lors de nouveaux projets de conception multidomaine. Les concepteurs pourront alors s'appuyer sur des méthodes issues de **l'intelligence artificielle**. Il s'agirait de définir la création des règles permettant l'intégration des outils d'évaluation dans les bases de données pour que **la veille se réalise automatiquement**. Chacun des outils intégrés dans la base de données devra être traduit sous la forme de briques fonctionnelles qui restent à définir. Une piste pourrait être la formalisation proposée dans la section 5.1.4. Il restera à définir comment les différentes briques de chaque

outil et de chaque domaine pourront être assemblés. Ces règles d'assemblage devront faire l'objet de personnalisation en fonction des domaines, du positionnement dans le processus de conception (c'est-à-dire de la (les) représentation(s) intermédiaire(s) étudiée(s)). Ce travail pourra s'appuyer sur la constitution des bases de données évoquée dans les perspectives de développement.

La **deuxième perspective de recherche** serait de permettre au processus d'évaluation d'être intégré au sein d'un projet industriel complexe et ainsi de prendre en compte de nouvelles contraintes de conception. En effet, le processus de conception tend, comme la fabrication, à être multi-site. Il est donc nécessaire que les méthodologies proposées s'adaptent à ces mutations. L'intégration de critères et paramètres permettant de décrire les relations entre les acteurs du processus de conception [108] (PLM) permettra aux concepteurs du projet d'apporter des critères « terrain » dans l'évaluation mais aussi dans leurs choix afin de répondre aux mieux aux objectifs de leur projet. Pour ce faire, la création de l'outil MDET devra être réalisée en deux parties :

- une première dépendant des domaines intégrés au processus de conception
- et une seconde dépendant du contexte défini par les relations entre les acteurs du projet.

Dès lors, le processus d'évaluation prendra en compte aussi bien **des critères techniques qu'organisationnels dans le processus de conception** ce qui lui permettra d'être plus robuste.

Nous avons, au travers de ces deux perspectives de recherche, proposé deux approches différentes permettant d'approfondir le processus d'évaluation multidomaine en y intégrant toujours plus de domaines y compris organisationnels et en facilitant son utilisation grâce au développement de nouveaux outils informatiques.

Ainsi, nous espérons avoir contribué au développement de méthodologies et méthodes de conception, en particulier à l'évaluation et à l'amélioration des représentations intermédiaires dans un processus de conception multidomaine. Nous pensons également avoir ouvert des voies de recherche qui permettront, dans les années à venir, de continuer à optimiser le processus de conception de produit.

Production scientifique

Conférence nationale

Confère

Audoux, K., Segonds, F., Kerbrat, O., & Aoussat, A. (2017) Identification de la performance lors des phases amont de conception pour la fabrication additive de produits durables et innovants *CONFERE'17*, 6 et 7 juillet 2017, Séville, Espagne.

Conférence internationale

CIRP Design

Audoux, K., Segonds, F., Kerbrat, O., & Aoussat, A. (2017). Selection method for multiple performances evaluation during early design stages. *Procedia CIRP*, 70, 204-210.

PLM 18

Audoux, K., Laverne, F., D'antonio, G., Segonds, F., Kerbrat, O., Chiabert, P., & Aoussat, A. (2018, July). Multicriteria Evaluation Method in PLM Environment: A Pilot Study. In *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management* (pp. 534-542). Springer, Cham.

Revue scientifique internationale

IJIDEM

Audoux, K., Segonds, F., Kerbrat, O., & Aoussat, A. (2019). Toward a customized multicriterion tool for product evaluation in the early design phases: the CMDET methodology. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-13.

Bibliographie

- [1] D. G. Ullman, *The mechanical design process*, 4th ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- [2] N. Cross, « Designerly Ways of Knowing: Design Discipline Versus Design Science », *Design Issues*, vol. 17, n° 3, p. 49-55, juill. 2001.
- [3] T. Tomiyama, P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, C. Kind, et F. Kimura, « Design methodologies: Industrial and educational applications », *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, n° 2, p. 543-565, 2009.
- [4] J.-L. Le Moigne et H. A. Simon, *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*. Paris: Dunod, 1991.
- [5] V. Hubka et W. E. Eder, « Conception of Design Science and its Methods », in *Design Science*, London: Springer London, 1996, p. 77-87.
- [6] G. Boothroyd, « Product design for manufacture and assembly », *Computer-Aided Design*, vol. 26, n° 7, p. 505-520, juill. 1994.
- [7] G. Boothroyd et P. Dewhurst, *Product design for assembly*. Massachusetts: Boothroyd Dewhurst Incorporated, 1987.
- [8] C. Luttrupp et J. Lagerstedt, « EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development », *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, n° 15-16, p. 1396-1408, 2006.
- [9] S. Shah, « Sources and Patterns of Innovation in a Consumer Products Field: Innovations in Sporting Equipment », *Sloan Working Paper, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, WP-4105*, vol. 4105, 2000.
- [10] J. G. Bralla, *Handbook of product design for manufacturing: a practical guide to low-cost production*, McGraw-Hill Book Company. New-York, 1986.
- [11] F. Segonds, G. Cohen, P. Véron, et J. Peyceré, « PLM and early stages collaboration in interactive design, a case study in the glass industry », *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 10, n° 2, p. 95-104, mai 2016.
- [12] S. Tichkiewitch et A. Riel, *The reasons for Integration in Design*. EMIRAcle, 2010.
- [13] A. Neely, M. Gregory, et K. Platts, « Performance measurement system design: a literature review and research agenda », *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 15, n° 4, p. 80-116, 1995.
- [14] N. Lahonde, « Optimisation du processus de conception: proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, Paris, 2010.
- [15] J. Daalhuizen, P. Badke-Schaub, et J. Fokker, « Community based design support », in *TCME'08, 7th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering*, 2008, p. 21-25.
- [16] U. Lindemann, R. Stetter, et M. Viertlböck, « A pragmatic approach for supporting integrated product development », *Journal of Integrated Design and Process Science*, vol. 5, n° 2, p. 39-51, 2001.
- [17] R. Rohatynski, « Diagnosing the gap between methodology of engineering design and industrial practice », *WDK Publications*, p. 43-50, 2001.
- [18] N. P. Suh, « Axiomatic Design Theory for Systems », *Research in engineering Design*, p. 189-209, 1998.
- [19] G. Pahl et W. Beitz, *Engineering design: a systematic approach*. Londres: Springer Science & Business Media, 2013.

- [20] Y. Benabid, « Contribution à l'amélioration du processus de conception des produits innovants: Développement d'outils d'aide au choix des processus », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, Paris, 2015.
- [21] T. J. Howard, S. J. Culley, et E. Dekoninck, « Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature », *Design Studies*, vol. 29, n° 2, p. 160-180, 2008.
- [22] Design Council, « Double diamond design process », *London: Design Council*, 2006.
- [23] M. Ray, *Elements of design engineering*. Prentice-Hall International, UK, 1985.
- [24] C. Bouchard, R. Camous, et A. Aoussat, « Nature and role of intermediate representation (IR) in the design process », *International Journal of Vehicle Design*, vol. 38, n° 1, p. 1-25, 2005.
- [25] C. Mougenot, « Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée », PhD Thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2008.
- [26] J.-F. Boujut et E. Blanco, « Intermediary Objects as a Means to Foster Co-operation in Engineering Design », *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, vol. 12, n° 2, p. 205-219, juin 2003.
- [27] J. S. Gero, « Towards a theory of designing as situated acts », in *The Science of Design International Conference, Lyon*, 2002.
- [28] F. Laverne, « Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, Paris, 2016.
- [29] L. T. M. Blessing et A. Chakrabarti, *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London, 2009.
- [30] B. Yannou, B. Zimmer, R. Farel, M. Jankovic, et J. Stal Le Cardinal, « Proofs of utility, innovation, profitability and concept for innovation selection », présenté à The 19th International Conference on Engineering Design (ICED 2013), Seoul, Korea, 2013, p. 1-10.
- [31] N. M. P. Bocken, J. M. Allwood, A. R. Willey, et J. M. H. King, « Development of an eco-ideation tool to identify stepwise greenhouse gas emissions reduction options for consumer goods », *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, n° 12, p. 1279-1287, 2011.
- [32] M. Binz et H. Reichle, « Evaluation method to determine the success potential and the degree of innovation of technical product ideas and products », présenté à the 15th International Conference on Engineering Design (ICED 05), Melbourne, Australia, 2005.
- [33] M. Tichem et T. Storm, « Designer support for product structuring—development of a DFX tool within the design coordination framework », *Computers in Industry*, vol. 33, n° 2, p. 155-163, 1997.
- [34] W. A. Knight, « Design for manufacture analysis: early estimates of tool costs for sintered parts », *CIRP annals*, vol. 40, n° 1, p. 131-134, 1991.
- [35] T.-C. Kuo, S. H. Huang, et H.-C. Zhang, « Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 41, n° 3, p. 241-260, déc. 2001.
- [36] P. Dewhurst, « Computer-aided assessment of injection molding cost—a tool for DFA analyses », in *Report 24*, Dep. Industrial & Manufacturing Engineering, University of Rhode Island USA, 1987.
- [37] I. Gibson, D. W. Rosen, et B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. Boston, MA: Springer US, 2010.

- [38] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, et J.-Y. Hascoet, « A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, n° 4, p. 389-398, 2014.
- [39] B. Vayre, F. Vignat, et F. Villeneuve, « Designing for Additive Manufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 3, p. 632-637, janv. 2012.
- [40] M. K. Thompson *et al.*, « Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints », *CIRP Annals*, vol. 65, n° 2, p. 737-760, 2016.
- [41] F. Laverne, F. Segonds, G. D'Antonio, et M. Le Coq, « Enriching design with X through tailored additive manufacturing knowledge: a methodological proposal », *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 11, n° 2, p. 279-288, 2017.
- [42] I. . Jawahir, O. . Dillon Jr., K. E. Rouch, K. J. Joshi, A. Venkatachalam, et I. H. Jaafar, « Total life-cycle considerations in product design for sustainability: A framework for comprehensive evaluation. », présenté à 10th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Barcelone, Espagne, 2006, p. 1-10.
- [43] R. W. Chen, D. Navin-Chandra, et F. Print, « A cost-benefit analysis model of product design for recyclability and its application », *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, vol. 17, n° 4, p. 502-507, 1994.
- [44] H. A. Becker, « Social impact assessment », *European Journal of Operational Research*, vol. 128, n° 2, p. 311-321, 2001.
- [45] Z. Imam, « Integration of Maintenance Activities into the Design of Automation Systems », Thèse de doctorat, Université de Lille 1 - Sciences et Technologies, Lille, 2015.
- [46] A. Vahdat, A. Lebeck, et C. S. Ellis, « Every Joule is Precious: The Case for Revisiting Operating System Design for Energy Efficiency », présenté à The 9th workshop on aM SIGOPS European Workshop Beyond the PC: New Challenges for the operating system, New-York, 2000.
- [47] M. D. Bovea et V. Pérez-Belis, « A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process », *Journal of Cleaner Production*, vol. 20, n° 1, p. 61-71, janv. 2012.
- [48] F. Cluzel, « Eco-design implementation for complex industrial system: from scenario-based LCA to the definition of an eco-innovative R&D projects portfolio », Ecole Centrale, Paris, France, 2012.
- [49] A. Mayyas, A. Qattawi, M. Omar, et D. Shan, « Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 4, p. 1845-1862, mai 2012.
- [50] H. Brezet, « Ecodesign, a Promising Approach to Sustainable Production and Consumption », *United Nations Environmental Program (UNEP)*, 1997.
- [51] R. H. Chenhall, « Reliance on manufacturing performance measures, total quality management and organizational performance », *Management Accounting Research*, vol. 8, n° 2, p. 187-206, 1997.
- [52] M. N. Saunders, C. C. Seepersad, et K. Hölltä-Otto, « The characteristics of innovative, mechanical products », *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, n° 2, p. 1-9, 2011.
- [53] R. Garcia et R. Calantone, « A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review », *Journal of Product Innovation Management*, vol. 19, n° 2, p. 110-132, 2002.

- [54] B. Zimmer et B. Yannou, « Proposal of a radical innovation project selection model based on proofs of value, innovation and concept », *DS 70: Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, 2012*.
- [55] J. F. Bard, R. Balachandra, et P. E. Kaufmann, « An interactive approach to R&D project selection and termination », *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 35, n° 3, p. 139-146, août 1988.
- [56] C. Yang, Q. Zhang, et S. Ding, « An evaluation method for innovation capability based on uncertain linguistic variables », *Applied Mathematics and Computation*, vol. 256, p. 160-174, avr. 2015.
- [57] F. T. S. Chan et H. J. Qi, « An innovative performance measurement method for supply chain management », *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 8, n° 3, p. 209-223, août 2003.
- [58] D. M. Anderson, *Design for manufacturability: how to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production*. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [59] D. J. H. Spangenberg, « Design for Sustainability (DfS): Interface of Sustainable Production and Consumption », in *Handbook of Sustainable Engineering*, J. Kauffman et K.-M. Lee, Éd. Springer Netherlands, 2013, p. 575-595.
- [60] F. Cluzel, B. Yannou, D. Millet, et Y. Leroy, « Eco-ideation and eco-selection of R&D projects portfolio in complex systems industries », *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, p. 4329-4343, 2016.
- [61] J. A. O'Hare, « Eco-innovation tools for the early stages: an industry-based investigation of tool customisation and introduction », University of Bath, 2010.
- [62] A. Halog, F. Schultmann, et O. Rentz, « Using quality function deployment for technique selection for optimum environmental performance improvement », *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, n° 5, p. 387-394, 2001.
- [63] M. F. Hassan, M. Z. M. Saman, S. Sharif, et B. Omar, « An integrated MA-AHP approach for selecting the highest sustainability index of a new product », *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 57, p. 236-242, 2012.
- [64] M. A. Ilgin et S. M. Gupta, « Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art », *Journal of Environmental Management*, vol. 91, n° 3, p. 563-591, janv. 2010.
- [65] M. Arena, G. Azzone, et A. Conte, « A streamlined LCA framework to support early decision making in vehicle development », *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, p. 105-113, 2013.
- [66] S. Gupta, G. S. Dangayach, et A. K. Singh, « Key Determinants of Sustainable Product Design and Manufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 26, p. 99-102, janv. 2015.
- [67] S. Byggeth et E. Hochschorner, « Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement », *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, n° 15-16, p. 1420-1430, 2006.
- [68] A.-L. Rias, F. Segonds, C. Bouchard, et S. Abed, « Towards additive manufacturing of intermediate objects (AMIO) for concepts generation », *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 11, n° 2, p. 301-315, 2017.
- [69] J. W. Booth, J. Alperovich, T. N. Reid, et K. Ramani, « The Design for Additive Manufacturing Worksheet », in *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2016, p. 1-8.
- [70] F. Segonds, « Design By Additive Manufacturing: an application in aeronautics and defence », *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 13, n° 4, p. 237-245, oct. 2018.

- [71] C. Emmelmann, D. Herzog, et J. Kranz, « 10 - Design for laser additive manufacturing », in *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, Éd. Woodhead Publishing, 2017, p. 259-279.
- [72] F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, et M. Le Coq, « Assembly based methods to support product innovation in design for additive manufacturing: an exploratory case study », *Journal of Mechanical Design*, vol. 137, p. 1-8, 2015.
- [73] C. Klahn, B. Leutenecker, et M. Meboldt, « Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 36, p. 230-235, janv. 2015.
- [74] H. Rodrigue et M. Rivette, « An Assembly-Level Design for Additive Manufacturing Methodology », in *IDMME-Virtual Concept*, Bordeaux, France, 2010.
- [75] D. Brackett, I. Ashcroft, et R. Hague, « Topology optimization for additive manufacturing », in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX*, 2011, p. 348-362.
- [76] D. L. Bourell, M. C. Leu, et D. W. Rosen, « Roadmap for additive manufacturing: identifying the future of freeform processing », *The University of Texas at Austin, Austin, TX*, p. 11-15, 2009.
- [77] J. Parrot, « W.A.M, Wire Additive Manufacturing : champs des possibles et utilisation raisonnée », Thèse de doctorat, École centrale de Nantes, Nantes, 2018.
- [78] G. Costa, « Design and Optimisation Methods for Structures produced by means of Additive Layer Manufacturing processes », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, Bordeaux, 2018.
- [79] T. H. Vo, « La démarche de conception pour la fabrication additive : choix des modes de représentation dans la phase d'analyse », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Grenoble, 2017.
- [80] J. A. Schumpeter, « The theory of economic development. Cambridge », *MA: Harvard*, 1934.
- [81] C. Kobe, P. E. Harland, et M. Meier Joos, « Towards an innovation capability assessment taking into account the level and type of innovation », in *13th International Conference on Management of Technology (IAMOT 2004)*, 2004.
- [82] E. Berggren et T. Nacher, « Introducing new products can be hazardous to your company: Use the right new-solutions delivery tools », *Academy of Management Perspectives*, vol. 15, n° 3, p. 92-101, 2001.
- [83] A. H. Van de Ven, « Central Problems in the Management of Innovation », *Management Science*, vol. 32, n° 5, p. 590-607, 1986.
- [84] N. Rosenbusch, J. Brinckmann, et A. Bausch, « Is innovation always beneficial? A meta-analysis of the relationship between innovation and performance in SMEs », *Journal of Business Venturing*, vol. 26, n° 4, p. 441-457, juill. 2011.
- [85] J. Perrin, *Concevoir l'innovation industrielle: Méthodologie de conception de l'innovation*. Paris: CNRS, 2001.
- [86] G. H. Brundtland, « Rapport Brundtland : Notre avenir à tous », Ministère des Affaires étrangères et du Développement international, Paris, 1987.
- [87] S. Vinodh et G. Rathod, « Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design », *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, n° 8, p. 833-842, mai 2010.
- [88] R. Karlsson et C. Luttrupp, « EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue », *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, n° 15-16, p. 1291-1298, janv. 2006.
- [89] P. Rousseaux *et al.*, « "Eco-tool-seeker": A new and unique business guide for choosing ecodesign tools », *Journal of Cleaner Production*, vol. 151, p. 546-577, mai 2017.

- [90] P. C. Priarone, G. Ingarao, L. Settineri, et R. Di Lorenzo, « On the Impact of Recycling Strategies on Energy Demand and CO2 Emissions When Manufacturing Al-based Components », *Procedia CIRP*, vol. 48, p. 194-199, janv. 2016.
- [91] J.-L. Gall, « Photo/sculpture. L'invention de François Willème », *Études photographiques*, n° 3, nov. 1997.
- [92] J. E. Blather, « United States Patent Office », p. 3, 1892.
- [93] F. Laverne, F. Segonds, et P. Dubois, « Fabrication additive Principes généraux », *Techniques de l'ingénieur Fabrication additive - Impression 3D*, vol. base documentaire : TIB633DUO., n° ref. article : bm7017, p. 1-20, 2016.
- [94] P. Muller, « Fabrication additive de pieces multimatériaux », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, 2013.
- [95] E. Atzeni et A. Salmi, « Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, n° 9-12, p. 1147-1155, 2012.
- [96] J. R. Duflou *et al.*, « Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach », *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, n° 2, p. 587-609, 2012.
- [97] G. Howarth et M. Hadfield, « A sustainable product design model », *Materials & Design*, vol. 27, n° 10, p. 1128-1133, 2006.
- [98] F. L. Le Bourhis, O. Kerbrat, J.-Y. Hascoet, et P. Mognol, « Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, n° 9-12, p. 1927-1939, 2013.
- [99] W. M. Cheung, R. Marsh, P. W. Griffin, L. B. Newnes, A. R. Mileham, et J. D. Lanham, « Towards cleaner production: a roadmap for predicting product end-of-life costs at early design concept », *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, p. 431-441, 2015.
- [100] L. De Benedetto et J. Klemeš, « The Environmental Performance Strategy Map: an integrated LCA approach to support the strategic decision-making process », *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n° 10, p. 900-906, 2009.
- [101] C. Jasch, « Environmental performance evaluation and indicators », *Journal of Cleaner Production*, vol. 8, n° 1, p. 79-88, 2000.
- [102] A. M. Contreras, E. Rosa, M. Pérez, H. Van Langenhove, et J. Dewulf, « Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production », *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n° 8, p. 772-779, 2009.
- [103] K. Kellens, W. Dewulf, M. Overcash, M. Z. Hauschild, et J. R. Duflou, « Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, n° 2, p. 242-251, 2012.
- [104] Y. Borgianni, G. Cascini, F. Pucillo, et F. Rotini, « Supporting product design by anticipating the success chances of new value profiles », *Computers in Industry*, vol. 64, n° 4, p. 421-435, 2013.
- [105] L. Budde, O. Nagler, et T. Friedli, « A method to set up a complexity index to improve decision-making performance », *Procedia CIRP*, vol. 36, p. 53-58, 2015.
- [106] R. I. Campbell, H. Jee, et Y. S. Kim, « Adding product value through additive manufacturing », présenté à The 19th International Conference on Engineering Design (ICED 2013), Seoul, Korea, 2013, p. 259-268.

- [107] J. Carrillo-Hermosilla, P. del Río, et T. Könnölä, « Diversity of eco-innovations: reflections from selected case studies », *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, n° 10-11, p. 1073-1083, juill. 2010.
- [108] M. Garetti, S. Terzi, N. Bertacci, et M. Brianza, « Organisational change and knowledge management in PLM implementation », *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 1, n° 1, p. 43-51, janv. 2005.

Table des figures

Figure 1 : Évolution des publications mondiales et traitant de conception entre 2000 et 2018.....	13
Figure 2 : Position de la thèse dans les sciences de la conception.....	14
Figure 3 : Évolution des coûts engagés par le projet [12] et positionnement des phases amont [11]	16
Figure 4 : Axe de recherche du laboratoire LCPI et positionnement du travail de thèse	20
Figure 5 : Localisation des établissements traitant de conception.....	22
Figure 6 : Progression de l'état de l'art	25
Figure 7 : Domaines de la théorie Axiomatic design [18].....	26
Figure 8 : Processus de conception de Ullman [1].....	27
Figure 9 : Processus de conception systématique de Pahl et Beitz [19].....	29
Figure 10 : Modèle de processus de conception de Howard et al. [21].....	32
Figure 11 : Représentation intermédiaire clé et processus de conception simplifié	36
Figure 12 : Modèle de conception créatif proposé	38
Figure 13 : DFAM par Ponche et al. [38].....	41
Figure 14 : Processus de conception enrichi par le DWAM de Laverne [28].....	43
Figure 15 : Design for sustainability [42].....	44
Figure 16 : Répartition des experts pour l'évaluation de l'innovation [54].....	47
Figure 17 : Méthode d'évaluation par analyse fonctionnelle [32].....	49
Figure 18 : Méthode d'évaluation AHP [63]	51
Figure 19 : Additive manufacturing Worksheet evaluation [69]	53
Figure 20 : Méthodologie d'amélioration des RI multidomaines	59
Figure 21 : Problématique et hypothèses	60
Figure 22 : Méthodologie d'amélioration des RIs multidomaines	64
Figure 23 : Création de l'outil d'évaluation multidomaine	66
Figure 24 : Méthode d'évaluation des outils de l'état de l'art.....	68
Figure 25 : Processus de création de l'outil multidomaine	71
Figure 26 : Paramétrisation des outils d'évaluation	72
Figure 27 : Processus d'évaluation des RI.....	75
Figure 28 : Processus d'analyse des RIs	79
Figure 29 : Résultats de l'évaluation.....	80
Figure 30 : Identification et mesure des potentiels d'amélioration	81
Figure 31 : Processus de recommandation des DfX.....	82
Figure 32 : Modélisation de l'arborescence des contreparties des DfX	83
Figure 33 : Étape de comparaison	85
Figure 34 : Les 17 objectifs du développement durable selon l'ONU.....	92
Figure 35 : Cycle de vie d'un produit.....	93

<i>Figure 36 : Étapes de l'ACV.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure 37 : Évolution du marché de la fabrication additive</i>	<i>97</i>
<i>Figure 38 : Étapes de fabrication en FA [93].....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 39 : Produits sélectionnés.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 40 : Méthode d'évaluation des outils</i>	<i>107</i>
<i>Figure 41 : Résultats de l'évaluation des outils.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure 42 : Modélisation de l'outil t1</i>	<i>117</i>
<i>Figure 43 : Modélisation de l'outil t2</i>	<i>118</i>
<i>Figure 44 : Modélisation de l'outil t3</i>	<i>119</i>
<i>Figure 45 : Modélisation de l'outil t4</i>	<i>120</i>
<i>Figure 46 : Modélisation de l'outil MDET</i>	<i>122</i>
<i>Figure 47 : Écran de démarrage</i>	<i>123</i>
<i>Figure 48 : Sélection des domaines</i>	<i>124</i>
<i>Figure 49 : Description de l'outil.....</i>	<i>125</i>
<i>Figure 50 : Évaluation pour un niveau entre deux propositions</i>	<i>128</i>
<i>Figure 51 : Résultat pour l'innovation</i>	<i>131</i>
<i>Figure 52 : Résultat pour l'environnement</i>	<i>131</i>
<i>Figure 53 : Résultat pour la fabrication additive</i>	<i>132</i>
<i>Figure 54 : Résultat brut des RI</i>	<i>136</i>
<i>Figure 55 : Résultat pour une RI</i>	<i>137</i>
<i>Figure 56 : Analyse des potentiels d'amélioration.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 57 : Identification des DfX</i>	<i>143</i>
<i>Figure 58 : Choix des DfX.....</i>	<i>144</i>
<i>Figure 59 : Insertion de la RI améliorée.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 60 : Réévaluation de la RI améliorée</i>	<i>146</i>
<i>Figure 61 : Compte rendu de la phase de conception.....</i>	<i>147</i>
<i>Figure 62 : Déroulement de l'expérimentation.....</i>	<i>150</i>
<i>Figure 63 : Évolution pour Springer</i>	<i>175</i>
<i>Figure 64 : Évolution au sein de Sciencedirect.....</i>	<i>175</i>
<i>Figure 65 : Évolution au sein de Springer</i>	<i>176</i>
<i>Figure 66 : Outil d'évaluation des experts en innovation</i>	<i>176</i>
<i>Figure 67 : Outil d'évaluation des experts en environnement</i>	<i>176</i>
<i>Figure 68 : Outil d'évaluation des experts en Fabrication additive.....</i>	<i>177</i>
<i>Figure 69 : Outil MDET pour le domaine innovation</i>	<i>178</i>
<i>Figure 70 : Outil MDET pour le domaine environnement</i>	<i>179</i>
<i>Figure 71 : Outil MDET pour le domaine fabrication additive</i>	<i>180</i>

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Synthèse des verrous scientifiques.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 2 : Laboratoires traitant de conception</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 3 : Liste des établissements traitant de conception.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 4 : Caractérisation des DTM adaptée de Tomiyama et al. [3]</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 5 : Constat de l'état de l'art</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 6 : Lien hypothèses et expérimentations</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 7 : Critère d'évaluation de la facilité et du bénéfice</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 8 : Critères d'évaluation du besoin externe de données</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 9 : Exemple de matrice de résultat d'évaluation</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 10 : Classification des potentiels.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 11 : Classification des apports de la méthodologie</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 12 : Indicateurs d'impact environnemental</i>	<i>95</i>
<i>Tableau 13 : Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov.....</i>	<i>103</i>
<i>Tableau 14 : Résultats du test de Wilcoxon.....</i>	<i>104</i>
<i>Tableau 15 : Résultat de l'évaluation des outils</i>	<i>109</i>
<i>Tableau 16 : Outils évalués.....</i>	<i>111</i>
<i>Tableau 17 : Avantages et inconvénients des méthodes de sélection.....</i>	<i>115</i>
<i>Tableau 18 : Critères et paramètres de conception de l'outil t1.....</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 19 : Paramétrisation du MDET</i>	<i>121</i>
<i>Tableau 20 : Domaines/critères/ paramètres de conception du cas d'étude</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 21 : Écarts entre les participants et les experts</i>	<i>132</i>
<i>Tableau 22 : Classement des représentations intermédiaires.....</i>	<i>134</i>
<i>Tableau 23 : DfX innovation</i>	<i>139</i>
<i>Tableau 24 : DfX Environnement.....</i>	<i>140</i>
<i>Tableau 25 : DfX fabrication additive.....</i>	<i>141</i>
<i>Tableau 26 : Lien et effet des différentes recommandations</i>	<i>142</i>
<i>Tableau 27 : Sujets des projets de conception.....</i>	<i>151</i>
<i>Tableau 28 : Variation des évaluations</i>	<i>151</i>
<i>Tableau 29 : Retour sur les hypothèses</i>	<i>154</i>

Liste des abréviations et des acronymes

AHP	Analytic Hierarchical process
AVC	Analyse du cycle de vie
CAO	Conception assistée par ordinateur
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CSIR	Council for scientific and industrial research
DBAH	Design by additive manufacturing
DGRI	Direction générale de la recherche industrielle
DFAM	Design for additive manufacturing
DfE	Design for environment
DfX	Design for X
DfS	Design for sustainability
DPP	Design process position
DTM	Design theory and methodology
DWAM	Design with additive manufacturing
DWX	Design with X
E	Environnement
EA	Équipe d'accueil
EBI	École de biologie industrielle
EDC	External data constraint
F	Facilité
FA/AM	Fabrication additive/additive manufacturing
Fa	Fabrication

HCERES	Haut conseil d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur
I	Innovation
IIE	Institute of Industrial Engineers
ISO	International organization of standardisation
LCPI	Laboratoire de conception de produits et d'innovation
MDET	Multidomain evaluation tool
ONU	Organisation des Nations unies
OST	Observatoire des sciences et techniques
PIPAME	Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques
PLM	Product lifecycle managment
RI	Représentation intermédiaire
STL	STréréoLitography
UMR	Unité mixte de recherche

Annexes

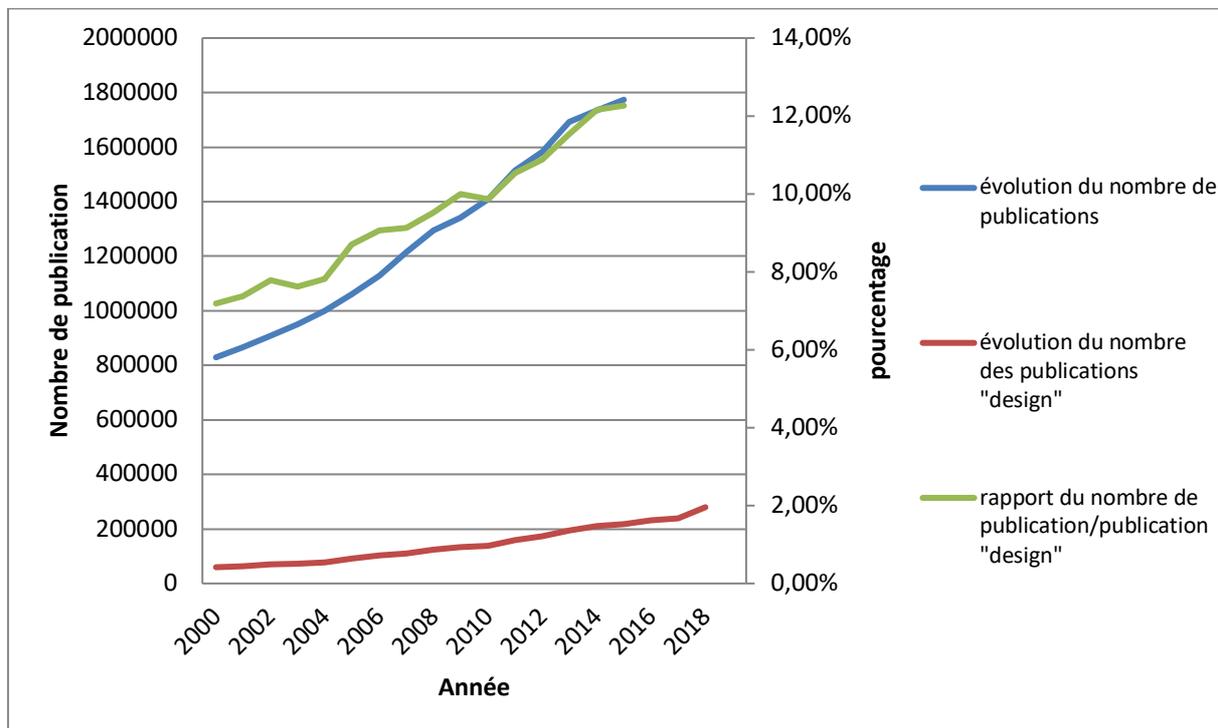


Figure 64 : Évolution pour Springer

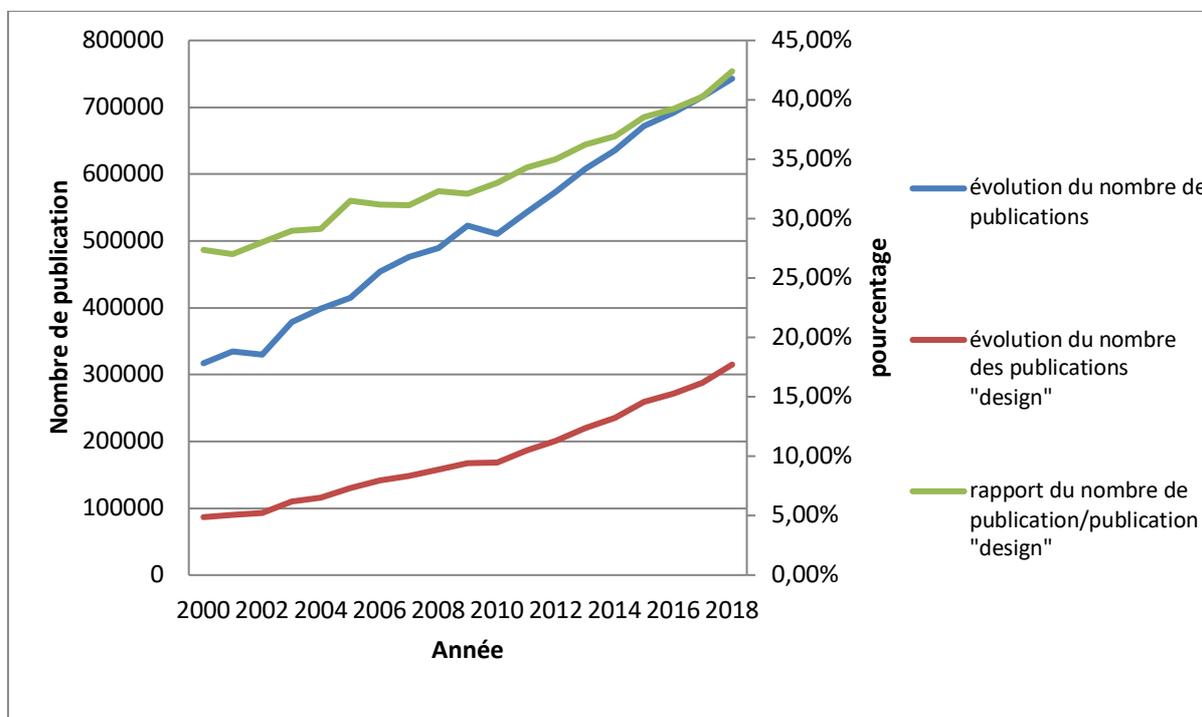


Figure 65 : Évolution au sein de ScienDirect

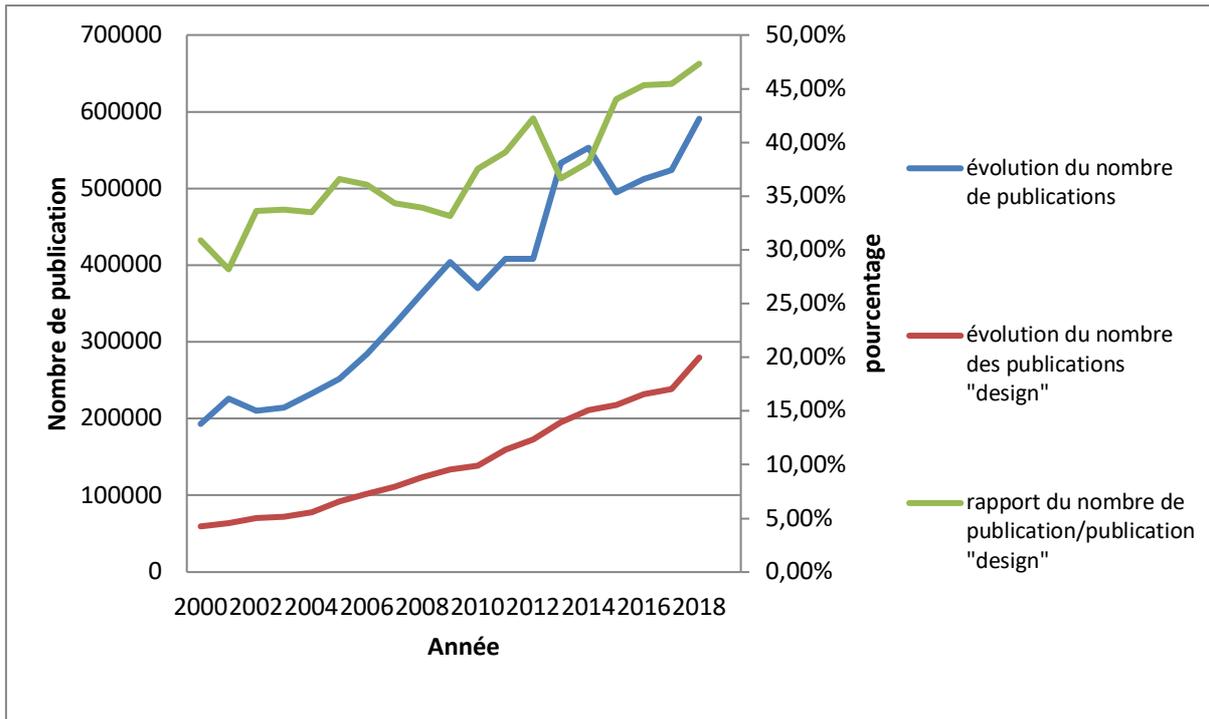


Figure 66 : Évolution au sein de Springer

Innovation				
	0%	50%	100%	Result
Function	No additional function FAUX		New function for new need FAUX	
Architecture	no changement FAUX		the architecture is improve in terms of size FAUX	
External Interactions	the material and energy flow increase FAUX		the material and energy flow decrease FAUX	
User Interactions	The usability decrease FAUX		the usability increase FAUX	
Cost	the cost increase FAUX		The cost is reduce FAUX	

Figure 67 : Outil d'évaluation des experts en innovation

Environment				
	0%	50%	100%	Result
material	Material non efficient FAUX		Material efficient FAUX	
Life time of the product	Shorter life time product FAUX		Higher life time product FAUX	
End of life	Non recycling or reuse product FAUX		Re usable and recyclable product FAUX	

Figure 68 : Outil d'évaluation des experts en environnement

Additive manufacturing				
	0%	50%	100%	Result
shape	The shape of the product is composed of non complex form		The shape is complexed	
	FAUX	FAUX	FAUX	
hierarchical	the walls are thin (<1,5mm) and the part is 2D		the wall are not thin (>3mm) and completly 3D	
	FAUX	FAUX	FAUX	
Material	the part is composed with interior corner without ribs		the part is composed with interior corner with ribs	
	FAUX	FAUX		
Functionality	mating surfaces are bearing and endure >1000 cycle		Mating surfaces are not functional	
	FAUX	FAUX	FAUX	

Figure 69 : Outil d'évaluation des experts en Fabrication additive

		Innovation			result
		0%	50%	100%	
Function	Parameter	no additional function	additional function which don't change the goal of the product	a novel function for a new need	
Architecture	Additional Function	no change	a part of the product change its size	the whole product reduce its size	
	Modified Size	no change	a part of the architecture changed	the architecture of the product is modified	
	Modified Physical Layout	no expanded usage	the product can be use in more environments with additional option	the product can be use in more environments	
External Interactions	Expanded Usage Environment	No change	room for improvement	Accept differents materials or uses materials in new ways	
	Modified Material Flow	No change	room for improvement	Utilizes new sources of energy of converts to a different form in a better ways	
	Modified Energy Flow	No adaptation	The product interacts with particular previously owned infrastructures	The product interacts with previously owned infrastructures	
User Interactions	Modified Information Flow	The product don't change the physical use of the kind of product	room for improvement	The product is easier to use physically beyond subtle or incremental differences.	
	Modified Physical Demands	The product don't change the sensory use of the kind of product	room for improvement	The product is easier to use from a sensory stand point beyond subtle or incremental differences.	
	Modified Sensory Demands	The product don't change the mentally use of the kind of product	room for improvement	The product is easier to use mentally beyond subtle or incremental differences.	
Cost	Purchase	Purchase cost is the same or higher than previous product (<<)	Purchase cost is different (<)	Purchase cost is significantly different (<<)	
	Maintenance	Operating and/or maintenance is the same or higher than previous product (<<)	Operating and/or maintenance cost is different (<)	Operating and/or maintenance costs are significantly different.	

Figure 70 : Outil MDET pour le domaine innovation

		Environment			result
		0%	50%	100%	
Parameter		inefficient : High use/loss, disposable, Non Recyclable	room for improvement.	Efficient: Low use and loss; Reusable, recyclable	
Design parameter	Raw materials efficiency				
	quantity of different processed	>10 for each life cycle phase (on average)	between 3 and 10 for each life cycle phase (on average)	< 3 for each life cycle phase (on average)	
	quantity of packaging	> 4 repackings	2-3 repacking	One shelf ready pack	
	Volume/weight of the product	oversized / dilute	room for improvement	compact/dense	
Life time of the product	is the product durable? Is the effect or experience long-lasting? Can the product be used in a targeted way to fulfill the required functions	short life time/short lived effect/unfocused	Medium effect, not very targeted	the product is durable/long lasting/adaptable to target use	
	Can the product be entirely used up or is it endlessly reusable	100% waste not reusable, repairable or recyclable	some recycle, repair disassembly reuse issues	0% waste at end life/ Endlessly reusable	
End of life	regulation	The product is dangerous and the regulation are many	the product fulfill with the regulations	there is no regulation on the product or fulfill with	

Figure 71 : Outil MDET pour le domaine environnement

Additive Manufacturing			
Parameter	0%	50%	100%
shape	Unsupported Features FADET	Overhanging features have a minimum of 45deg support FADET	there is no overhanging features FADET
	Complexity FADET	The part is complex without interior features FADET	There are interior features or surface curvature FADET
hierarchical	Material removal FADET	internal cavities do not have opening for removing materials FADET	There are no internal cavities channel of holes or the support structures can be easily removed by opening FADET
	Thin Features FADET	walls are between 1,5 mm and 3mm FADET	walls are more than 3 mm FADET
Material	Stress Concentration FADET	The part have interior corners without chamber fillet or rib FADET	The part have interior corners with generous chamber fillet or rib FADET
	Functionality FADET	mating surfaces are bearing surfaces or must endure for 1000+ of cycles FADET	the mating surfaces are purely non functional FADET
Functionality	Tolerances FADET	Hole or length dimensions are nominal FADET	hole and length tolerances are not important FADET
	Geometric Exactness FADET	The part has large, flat surfaces or has a form that is important to surfaces, or forms that are should be exact FADET	the part has small or no flat surfaces or forms that need to be exact FADET

Figure 72 : Outil MDET pour le domaine fabrication additive

PROPOSITION D'UN PROCESSUS D'ÉVALUATION MULTIDOMAIN POUR AMÉLIORER LA CONCEPTION DE PRODUIT

RESUME : La concurrence industrielle pousse les entreprises à développer de nouveaux produits innovants. En outre, les industriels sont soumis à de plus en plus de contraintes issues des différents acteurs du processus de conception (fabricants, utilisateurs) ou liées aux évolutions de leur environnement (réglementations, technologies). Il leur est donc nécessaire d'adapter leurs activités de conception et plus particulièrement les étapes d'évaluation pour que les produits développés correspondent aux exigences multiples de toutes les parties prenantes. Ces contraintes se traduisent par l'intégration de nouveaux domaines ou l'évolution de domaines existants dans le processus de conception.

Dans ce contexte, l'objectif de ces travaux de thèse est de formaliser et d'apporter des méthodes permettant l'évaluation multidomaine dans le processus de conception. Ce manuscrit s'intéresse donc à la problématique suivante : « Comment les phases d'évaluation dans un processus de conception multidomaine peuvent-elles permettre d'accroître les performances du produit à partir des représentations intermédiaires ? ». Pour cela nous proposons une méthodologie permettant d'améliorer le processus d'évaluation en créant un outil d'évaluation multidomaine et en formalisant les étapes du processus d'évaluation pour apporter des méthodes d'amélioration adaptées aux domaines concernés par le produit à concevoir. Des expérimentations sont menées afin de valider leurs apports dans le processus de conception en s'intéressant notamment à trois domaines : l'innovation, la prise en compte des impacts environnementaux et la fabrication additive. Ces expérimentations ont permis de valider la méthodologie de création de l'outil d'évaluation et l'apport des étapes d'amélioration.

Mots clés : Conception amont, évaluation de performance, méthodologie, méthode de conception, outil d'évaluation multidomaine,

PROPOSAL FOR A MULTIDOMAIN EVALUATION PROCESS TO IMPROVE PRODUCT DESIGN

ABSTRACT: Industrial competition is driving companies to develop new innovative products. In addition, industrial companies are increasingly subject to constraints from the various actors in the design process (manufacturers, users) or linked to changes in their environment (regulations, technologies). It is therefore necessary for them to adapt their design activities and more particularly the evaluation steps so that the products developed correspond to the multiple requirements of all stakeholders. These constraints result in the integration of new domains or the evolution of existing domains into the design process.

In this context, the objective of this thesis work is to formalize and provide methods for multidomain evaluation in the design process. This manuscript therefore addresses the following question: "How can evaluation phases in a multidomain design process help to increase the performance of intermediate representations? ». To this end, we propose a methodology to improve the evaluation process by creating a multidomain evaluation tool and formalizing the steps of the evaluation process to provide improvement methods adapted to the areas concerned by the product to be designed. Experiments are being carried out to validate their contribution to the design process, focusing in particular on three areas: innovation, taking into account environmental impacts and additive manufacturing. These experiments made it possible to validate the methodology for creating an evaluation tool and the contribution of the improvement steps.

Keywords: Early design, performance evaluation, methodology, design method, multidomain evaluation tool