



**HAL**  
open science

# La démarche de conception pour la fabrication additive : choix des modes de représentation dans la phase d'analyse

Thanh Hoang Vo

## ► To cite this version:

Thanh Hoang Vo. La démarche de conception pour la fabrication additive : choix des modes de représentation dans la phase d'analyse. Génie des procédés. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAI114 . tel-01792274

**HAL Id: tel-01792274**

**<https://theses.hal.science/tel-01792274>**

Submitted on 15 May 2018

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

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



## THÈSE

Pour obtenir le grade de

## DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : GI : Génie Industriel : conception et production

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Thanh Hoang VO**

Thèse dirigée par **Frédéric VIGNAT**, Maître de Conférences,  
Grenoble INP

préparée au sein du **Laboratoire Laboratoire dSciences pour la  
Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble**  
dans l'**École Doctorale I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux,  
Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés,  
Production**

**La demarche de conception pour la  
fabrication additive: choix des modes de  
representation dans la phase d'analyse**

**The design process for additive  
manufacturing: choice of representation  
modes in the analysis phase**

Thèse soutenue publiquement le **29 septembre 2017**,  
devant le jury composé de :

**Monsieur Frédéric VIGNAT**

MCF, Université de Grenoble Alpes, Directeur de thèse

**Madame Nadège TROUSSIER**

Professeur des Universités, Université de Technologie de Troyes,  
Rapporteur

**Monsieur Lionel ROUCOULES**

Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech à Aix En Provence,  
Rapporteur

**Monsieur Guy PRUDHOMME**

Maître de Conférences, Université de Grenoble Alpes, Co-directeur de  
thèse

**Monsieur Philippe MARIN**

Maître de Conférences, Université de Grenoble Alpes, Co-directeur de  
thèse

**Monsieur Luc MATHIEU**

Professeur des Universités, Paris Sud - IUT de Cachan LURPA - ENS  
Paris Saclay, Président



# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Contexte général de l'étude .....	1
1.1. La Fabrication Additive .....	2
1.1.1. Le développement de la fabrication additive .....	3
1.1.2. Les procédés métalliques de FA.....	5
1.2. Représentations intermédiaires de la pièce dans un processus de conception.....	11
1.2.1. Processus de conception – Axiomatic Design .....	11
1.2.2. Les représentations intermédiaires de la pièce.....	13
1.3. Question de recherche globale.....	16
1.4. Présentation la structure du rapport.....	18
Chapitre 2 Méthodologie de recherche .....	19
2.1. Méthodologie de recherche de conception – Design Research Methodology (DRM) .....	20
2.1.1. La définition du modèle DRM .....	20
2.1.2. Types de recherche avec le modèle DRM.....	25
2.2. Notre méthodologie de recherche .....	26
2.2.1. Notre méthodologie de recherche à la référence du type 5 de modèle DRM.....	26
2.2.2. Application pour répondre à deux questions de recherche.....	27
Chapitre 3 La démarche du processus de conception pour la fabrication additive .....	31
3.1. Etat de l'art du processus de la conception pour la fabrication additive (Research Clarification 1a) .....	32
3.1.1. Les règles de conception pour fabrication additive.....	32
3.1.2. Méthodologies de conception existantes pour la fabrication additive....	35
3.1.3. La synthèse .....	44
3.2. Etude de cas (Descriptive Study 1a) .....	45
3.2.1. Présentation l'étude de cas.....	45

3.2.2. La démarche de conception d'une pièce pour la fabrication additive EBM.....	46
3.2.3. Résultat.....	53
3.3. Une proposition de processus de conception pour la fabrication additive (Prescriptive Study 1a) .....	54
3.4. Tester et Evaluer notre processus de conception pour la fabrication additive (Descriptive Study 2a) .....	56
3.4.1. Définition de la forme initiale .....	57
3.4.2. Reconstruction modèle CAO .....	59
3.4.3. Evaluation.....	63
3.5. Conclusion .....	67
Chapitre 4 Modèle pour choisir entre les types de représentation intermédiaire dans une situation du processus de conception .....	69
4.1. Research Clarification .....	70
4.1.1. Etude bibliographie de la notion de situation de conception .....	70
4.1.2. La définition des termes « maquette virtuelle », « maquette physique » et « prototype » .....	71
4.1.3. Etude bibliographie des caractéristiques des MV, MP et P pour assister le processus de conception .....	76
4.1.4. Les critères de choix entre MV, MP et P issus de l'étude de cas du chapitre 3.....	82
4.1.5. Problématique de recherche affinée .....	83
4.2. Etude de cas (Descriptive Study) .....	84
4.2.1. L'analyse des cas rencontrés dans notre processus de conception .....	86
4.2.2. Les résultats importants de l'étude de cas .....	97
4.3. Une proposition de méthode de choix (Prescriptive Study) .....	100
4.3.1. La méthodologie du raisonnement à partir de cas.....	100
4.3.2. Méthode de choix entre MV et P pour évaluer la pièce dans une situation donnée du processus de conception en utilisant la méthodologie de CBR.....	105
Chapitre 5 Application de la méthode de choix .....	123
5.1. Première étude de cas : reconception de la chape .....	124
5.1.1. Déterminer le cas cible.....	125
5.1.2. Phase remémoration.....	126

5.1.3. Phase de réutilisation.....	128
5.1.4. Phase réalisation .....	130
5.1.5. Phase d'apprentissage .....	131
5.2. Appliquer la méthode de choix dans le processus de reconception de la pièce Rheonova .....	132
5.2.1. Déterminer le cas cible.....	132
5.2.2. Phase remémoration.....	134
5.2.3. Phase réutilisation.....	135
5.2.4. Phase réalisation .....	137
5.2.5. Phase apprentissage .....	137
5.3. Conclusion .....	139
Chapitre 6 Conclusions et perspectives .....	141
6.1. Conclusion .....	142
6.2. Perspectives .....	145
Bibliographie.....	149

# Table des figures

Figure 1-1: Les étapes principales du procédé de fabrication additive (Source : Benoit VERQUIN – Cetim) .....	2
Figure 1-2: Des pièces fabriquées par la fabrication additive (Source : <a href="http://actu-imprimante3d.blogspot.fr/2015/09/dossier-les-materiaux-pour-limpression.html">http://actu-imprimante3d.blogspot.fr/2015/09/dossier-les-materiaux-pour-limpression.html</a> ) ....	3
Figure 1-3: La proportion des procédés de FA (en %) [4] .....	4
Figure 1-4: Les secteurs d'application de fabrication additive [3] .....	5
Figure 1-5: La classification des procédés de FA selon la méthode de modélisation [7] .....	5
Figure 1-6: Le principe du procédé de la "fusion laser" [8].....	6
Figure 1-7: Le principe du procédé de faisceau électron [8] .....	8
Figure 1-8: Evolution de la limite élastique, de la limite mécanique et de l'allongement à la rupture en fonction de température de préchauffe des couche en EBM.....	10
Figure 1-9: Synthèse des caractéristiques de procédé FA métallique .....	10
Figure 1-10: Processus de conception selon Aoussat .....	12
Figure 1-11: SUH - Axiomatic Design .....	12
Figure 1-12: Vues de profil et de dessus de la Mazda Mx5 [34] .....	14
Figure 1-13: Une maquette physique dans le projet Anfa-Sky au Maroc.....	14
Figure 1-14: Maquette virtuelle d'un PDA de Hewlett-Packard .....	15
Figure 1-15: prototype virtuel de téléphone mobile [38] .....	15
Figure 1-16: Chaîne numérique de la conception.....	16
Figure 2-1: Modèle de DRM [4] .....	21
Figure 2-2: les types de recherche avec le modèle DRM .....	25
Figure 2-3: Modèle DRM pour répondre à la question du processus de conception pour la fabrication additive .....	28
Figure 2-4: Application le modèle DRM pour répondre à la deuxième question de recherche.....	28
Figure 3-1. Les surfaces besoin des supports [71] .....	32
Figure 3-2. Étude expérimentale de la distance minimum entre deux éléments [72] .	33
Figure 3-3. La distance minimum entre deux éléments est de 0,3mm [72] .....	33
Figure 3-4. Étude expérimentale du diamètre du trou sans besoin de support.....	33
Figure 3-5. Le diamètre du trou sans besoin des supports .....	33
Figure 3-6. a) Méthodologie de conception; b) Pièce initiale pour étude de cas.....	34
Figure 3-7. Appliqué la méthodologie à une étude de cas .....	35
Figure 3-8. Méthodologie de conception pour la fabrication additive [4] .....	36
Figure 3-9. Schématisation de l'étape de définition du domaine de conception et des données nécessaire [74].....	37
Figure 3-10. Illustration de la définition du domaine fonctionnel [74] .....	37

Figure 3-11. Définition de la géométrie théorique [74].....	38
Figure 3-12. Détermination d'une géométrie réaliste [74].....	39
Figure 3-13. Représentation schématique de la démarche de conception proposée [75].....	40
Figure 3-14. Génération de forme initiale (a) approche guidée; (b) approche optimisation topologique [5].....	41
Figure 3-15. Balançages possibles pour une pièce en forme de 'L' [5].....	42
Figure 3-16. Forme reconçue à partir le résultat obtenu par optimisation topologique [5].....	42
Figure 3-17: Démarche proposée à l'issue de l'état de l'art pour concevoir une pièce par fabrication additive .....	44
Figure 3-18: Pièce à reconcevoir .....	44
Figure 3-19: L'optimisation topologique .....	46
Figure 3-20: Volume de conception .....	46
Figure 3-21: Modèle de l'étape de définition de la forme initiale .....	47
Figure 3-22: Les résultats différents de l'optimisation topologique.....	48
Figure 3-23: Les modèle 3D .....	49
Figure 3-24: Boucle de reconstruction modèle CAO 3D .....	50
Figure 3-25: Evaluer ou valider et finaliser la conception de la pièce .....	51
Figure 3-26: Boucle d'évaluation de la pièce .....	52
Figure 3-27: Proposition d'un processus de conception pour la fabrication additive..	53
Figure 3-28: Méthode de reconstruction modèle CAO 3D .....	54
Figure 3-29: Reconception d'une pièce en appliquant notre processus de conception pour la fabrication additive .....	55
Figure 3-30: Espace de conception et espaces fonctionnels .....	56
Figure 3-31: Modèle des conditions aux limites .....	57
Figure 3-32: Résultat de l'optimisation topologique.....	57
Figure 3-33: Modifier la modélisation de la liaison linéaire annulaire .....	58
Figure 3-34: Résultat final de l'optimisation topologique.....	58
Figure 3-35: Analyse le résultat de l'optimisation topologique pour reconstruction CAO .....	59
Figure 3-36: Modèle CAO 3D.....	59
Figure 3-37: Résultats des calculs éléments finis (a) pièce initiale; (b) pièce issue de l'optimisation topologique .....	60
Figure 3-38: Solution de la géométrie de la pièce .....	61
Figure 3-39: Optimisation paramétrique .....	61
Figure 3-40: Résultat du calcul éléments finis.....	62
Figure 3-41: Intégration des structures treillis.....	63
Figure 3-42: Résultat du calcul éléments finis de la géométrie finale.....	63
Figure 3-43: (a) Le prototype; (b) La pièce cassé pendant l'usinage.....	64

Figure 3-44: (a) Vérification par calcul éléments finis; (b) Pièce cassée dans l'essai....	64
Figure 3-45: Les différentes versions du prototype .....	65
Figure 4-1: modèle de situation de conception collaborative [ref] .....	70
Figure 4-2: (a) Prototype avant finition; (b) Prototype après finition.....	72
Figure 4-3: (a) Modèle CAO 3D; (b) Une définition Elément Fini.....	73
Figure 4-4: Une maquette physique.....	74
Figure 4-5: (a) Résultat du calcul EF; (b) Résultat de l'essai physique .....	82
Figure 4-6: Les situations rencontrées dans cette étude de cas.....	83
Figure 4-7 : La démarche pour faire le choix entre MV et P .....	98
Figure 4-8: Cycle de ma méthode CBR selon Aamodt et Plaza [93].....	100
Figure 4-9: La méthode de choix .....	101
Figure 4-10: Détermination du classement des critères de choix .....	104
Figure 4-11: La phase de réutilisation dans la méthode de choix.....	110
Figure 5-1: La chape en géométrie initiale.....	118
Figure 5-2: La pièce Rhéonova en géométrie initiale.....	126

## Liste des tableaux

Tableau 4-1: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 1 .....	87
Tableau 4-2: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 2 .....	90
Tableau 4-3: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 3 .....	93
Tableau 4-4: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 4 .....	96
Tableau 4-5: Les paramètres de la situation de conception .....	97
Tableau 4-6: Table de comparaison .....	103
Tableau 4-7 : les mots clés associés aux paramètres des attributs .....	107
Tableau 4-8: Définir le niveau d'importance de chaque paramètre dans la situation .....	108
Tableau 4-9: la comparaison entre deux cas.....	109
Tableau 4-10: Un exemple du résultat de la phase remémoration .....	109
Tableau 4-11: Une Template du bilan des cas similaires .....	111
Tableau 4-12: Exemple d'une liste des cas similaires .....	111
Tableau 4-13: Le calcul la similarité de pondération des critères de choix entre deux cas .....	112
Tableau 4-14: Liste de cas similaires avec deux valeurs similarités (de situation et de pondération).....	113
Tableau 4-15: Un exemple de la liste de cas similaire avec deux valeurs de similarités .....	113
Tableau 4-16: Un exemple de la table de comparaison.....	115
Tableau 5-1: La situation de conception pour "la chape" .....	120
Tableau 5-2: La pondération des critères de choix pour "la chape" .....	120
Tableau 5-3: Liste des cas similaires après filtrage .....	121
Tableau 5-4: Liste de cas similaire avec la valeur souhaite de 0,7.....	122
Tableau 5-5: Valeur similarité de pondération des critères de choix .....	123
Tableau 5-6: Liste finale des cas similaires.....	123
Tableau 5-7: Table de comparaison du cas 2 .....	124
Tableau 5-8: Table de comparaison du cas courant .....	124
Tableau 5-9: Un cas complet pour ajouter dans la base donnée .....	126
Tableau 5-10: La situation de conception pour la pièce "Rheonova".....	127
Tableau 5-11: La pondération des critères de choix pour pièce "Rheonova" .....	128
Tableau 5-12: Liste des cas similaires après filtrage .....	129
Tableau 5-13: Liste de cas similaire avec la valeur souhaite de 0,7.....	129
Tableau 5-14: La similarité de pondération des critères entre cas cible et deux cas 4 et cas 8 .....	130
Tableau 5-15: Liste de cas similaire finale.....	130
Tableau 5-16: Table de comparaison du cas 8 .....	130
Tableau 5-17: table de comparaison du cas curent .....	131

Tableau 5-18: Un cas complet pour ajouter dans la base donnée .....	133
---	-----

# Chapitre 1 : Contexte général de l'étude

Ce chapitre présente le contexte général de notre étude. Il donne au lecteur une vision du contexte scientifique dans lequel nous réalisons nos travaux de thèse. D’abord, la situation de la fabrication additive (FA) est présentée. Puis sont abordés la description, le développement, les procédés de la FA. Une première approche partielle de la démarche du processus général de conception d’une pièce mécanique est présentée. Sont alors discutés la description d’un processus de conception ‘traditionnel’, l’utilisation de ce processus pour les procédés soustractifs et les procédés additifs et les représentations de la pièce pendant le processus de conception. Enfin, ce chapitre présente la question de recherche générale de la thèse. En fin de chapitre, un descriptif du plan retenu pour ce manuscrit est présenté.

### 1.1. La Fabrication Additive

La Fabrication Additive (FA) est définie, en référence à l’ASTM (qui est un organisme de normalisation qui rédige et produit des normes techniques concernant les matériaux, les produits, les systèmes et les services), comme étant le procédé de mise en forme d’une pièce par ajout de matière, par empilement de couches successives, en opposition à la mise en forme par enlèvement de matière, tel que l’usinage.

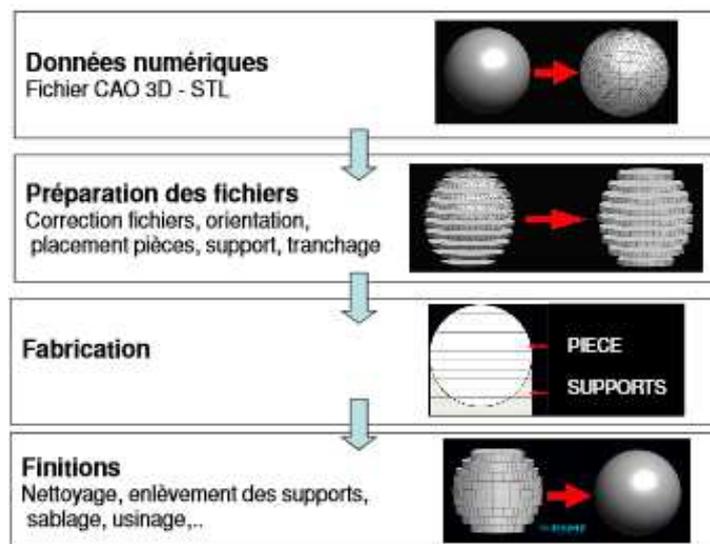


Figure 1-1: Les étapes principales du procédé de fabrication additive (Source : Benoit VERQUIN – Cetim)

Il y a 4 étapes principales dans un procédé de FA tel que présenté Figure 1-1 : création des données numériques, préparation des fichiers, fabrication et finition de la pièce. La première étape consiste à créer un modèle CAO 3D et à l’enregistrer dans un format STL. La deuxième étape vise la préparation des fichiers. Ceci inclut la correction du fichier STL, la définition de l’orientation de la pièce et du placement des supports et le tranchage de la pièce. La troisième étape est celle de la fabrication de la pièce. Enfin, une étape de finition est nécessaire pour le nettoyage, l’enlèvement des supports et l’usinage des surfaces fonctionnelles.

Un gros avantage de la FA est la liberté de la forme de la pièce. La fabrication additive permet de créer des formes complexes telles que Figure 1-2. Ce sont des pièces que nous ne pouvons pas fabriquer avec les technologies traditionnelles. En plus, la fabrication additive n'a pas besoin d'outillages spécifiques pour fabriquer les pièces. Nous allons donc fabriquer les pièces ou les prototypes facilement et rapidement.



Figure 1-2: Des pièces fabriquées par la fabrication additive (Source : <http://actu-imprimante3d.blogspot.fr/2015/09/dossier-les-materiaux-pour-limpression.html>)

### 1.1.1. Le développement de la fabrication additive

La technologie de FA est développée depuis 20 ans. Les premiers procédés de la FA sont apparus à la fin des années 1980 [1] avec la Stéréolithographie (SLA), le dépôt de fil fondu (Fused Deposits Manufacturing – FDM), la fabrication à partir d'objets laminés (Laminated Object Manufacturing – LOM). Ces sont des procédés de prototypage rapide qui sont utilisés pour fabriquer des pièces prototypes. Les matières concernées sont les plastiques, polymère, papier, céramique et bois. Ensuite, la FA s'est développée très vite avec plusieurs procédés métalliques comme la fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting – EBM), la fusion sélective par laser (Selective Laser Melting – SLM) et le frittage sélectif par laser (Selective Laser Sintering – SLS).

Au cours des 26 dernières années, le taux de croissance annuel pour les industries de FA est de 27,3% [61]. Ce taux de croissance s'est accéléré au cours de la période de 2012 à 2014, pour atteindre le chiffre de 33,8%. En 2014, le revenu de l'industrie fabrication additive a augmenté de 35,2% pour atteindre 4,103 milliards de dollars [62]. En 2016, le revenu de FA atteint 6,063 milliards de dollars. Les produits métalliques tirés de la fabrication additive ont augmenté de 49,4% en 2014 pour atteindre 48,7 millions de dollars, contre 32,6 millions de dollars en 2013 [61]. Selon le Wohlers Report 2017, 97 fabricants ont fabriqué et vendu des systèmes de fabrication additive en 2016. Ce chiffre était de 62 entreprises en 2015 et 49 en 2014. Ces fabricants fournissent des produits intéressants et génèrent une concurrence sans précédent dans l'industrie de fabrication additive. Au regard des chiffres ci-

dessus, nous considérons qu'il y a gros potentiel dans l'industrie de fabrication additive.

Au début, les procédés de FA ont été utilisés pour fabriquer les prototypes (prototypage rapide), les outillages (outillage rapide). A ce jour, avec les nouveaux procédés de FA, nous pouvons fabriquer des pièces fonctionnelles en série ou petite série (fabrication directe).

Selon le rapport de Wohlers en 2012 [4], la proportion du prototypage rapide, outillage rapide et fabrication directe dans l'industrie est montré dans la Figure 1-3.

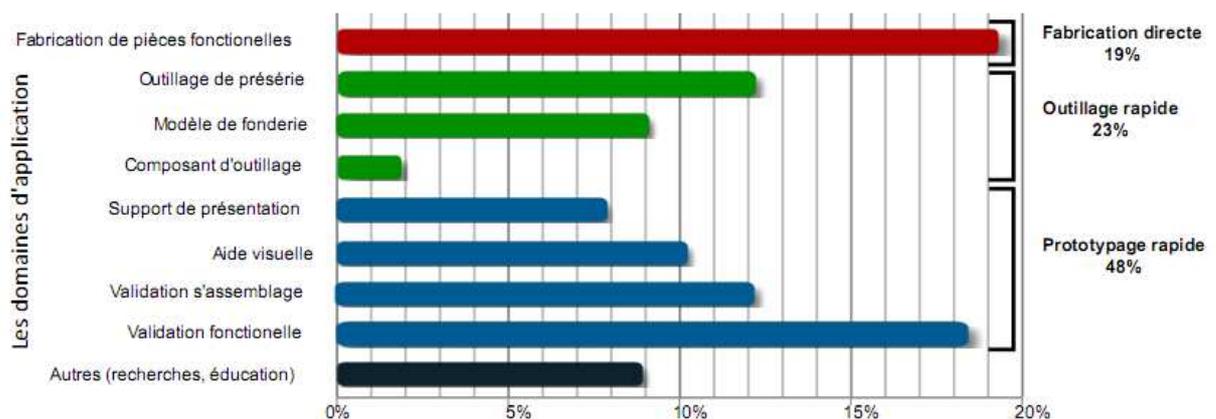


Figure 1-3: La proportion des procédés de FA (en %) [4]

Le prototypage rapide concerne 48% de l'application de la FA. Le prototype peut être fabriqué en différents matériaux avec un temps et un coût de fabrication acceptable [1]. Le prototype est fabriqué pour une validation fonctionnelle ou une validation de l'assemblage de la pièce dans son ensemble. De plus, il peut servir pour une aide visuelle de la pièce et un support de présentation.

L'outillage rapide concerne 23% de l'application de la FA. Selon Nickels [4], les procédés de FA permettent de fabriquer les outillages rapidement et à coût équivalent.

La fabrication directe ne concerne que 19% de l'application de FA mais elle est la plus récente catégorie d'application. A ce jour, des chercheurs et aussi des industriels se concentrent sur le développement de cette catégorie d'application de FA. La fabrication directe est développée pour fabriquer des pièces fonctionnelles en petite ou moyenne série.

La Fabrication Additive est appliquée dans des secteurs différents, présentés dans la Figure 1-4. Les principaux secteurs d'applications de la FA sont ceux de la consommation, l'aéronautique, l'automobile et le médical.

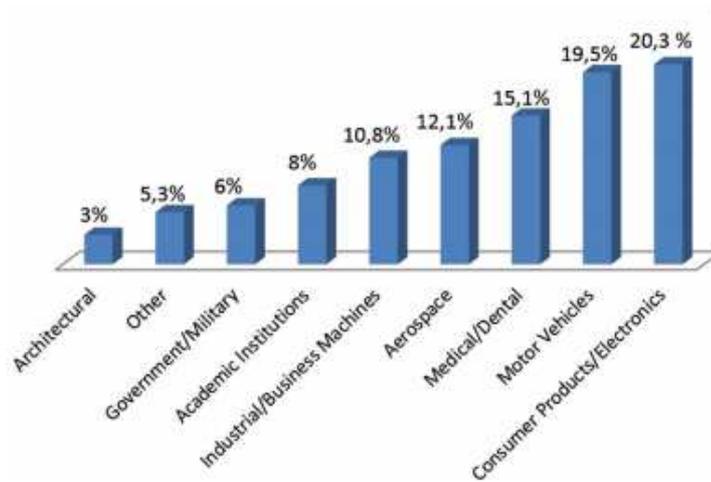


Figure 1-4: Les secteurs d'application de fabrication additive [3]

Nous venons de montrer que la FA prend de plus en plus de place comme moyen de fabrication, et ce dans des secteurs divers. Nous allons maintenant décrire succinctement les procédés de FA dans la partie suivante.

### 1.1.2. Les procédés métalliques de FA

Les procédés de FA sont très nombreux et nous ne vous en présentons ici qu'une partie. Nous pouvons classer les procédés suivant la nature de matériaux utilisés comme les plastique, métallique, polymère ou composite [6] ou suivant le principe associé au procédé (Figure 1-5). Les procédés de FA sont classés dans [7] en 6 groupes principaux : la fusion laser, la polymérisation laser, le procédé d'extrusion thermique, le procédé de la projection matériau, le procédé d'adhérence du matériau, le procédé basé sur le faisceau d'électron. De plus, la Figure 1-5 nous montre aussi la forme sous laquelle le matériau est présent dans chaque procédé : poutre, liquide et solide.

Additive Manufacturing (AM) Processes														
Process	Laser Based AM Processes					Extrusion Thermal	Material Jetting	Material Adhesion	Electron Beam					
	Laser Melting		Laser Polymerization											
Process Schematic														
Name Material	SLS	■	DMD	■	SLA	■	FDM	■	3DP	■	LOM	■	EBM	■
	SLM	■	LENS	■	SGC	■	Robocasting	■	IJP	■	SFP	■		
	DMLS	■	SLC	■	LTP	■			MJM	■				
			LPD	■	BIS	■			BPM	■				
					HIS	■			Thermojet	■				
Bulk Material Type		Powder	■	Liquid	■	Solid	■							

Figure 1-5: La classification des procédés de FA selon la méthode de modélisation [7]

Les procédés basés sur des matériaux liquides nous permettent de fabriquer les pièces en photopolymère avec une polymérisation par rayonnement laser, ultra-

violet ou infrarouge. Ces types de matériaux liquides sont employés dans les deux groupes de procédés : polymérisation laser et projection matériau. Il y a peu de procédés basés sur des matériaux solides (papier, polymère, bois). On les retrouve dans deux groupes de procédés : par extrusion thermique et par adhésion matériau. A ce jour, il y a beaucoup de procédés basés sur des matériaux de base existant sous la forme de poudres, notamment les procédés du type laser et faisceau d'électrons. Au cœur de mon étude, nous nous sommes intéressés à des procédés métalliques qui nous permettent de fabriquer les pièces fonctionnelles et en particulier de structure en moyenne série. Nous nous focaliserons sur les procédés qui mettent en jeu des particules de poudre. Nous allons donc présenter ci-après les procédés basés sur le laser et sur le faisceau d'électrons, par exemple SLS, SLM, DMD ou EBM... Vous pouvez regarder en détails les autres procédés dans la référence [7].

#### 1.1.2.1. Les procédés de FA métallique basés au laser

Les procédés de fabrication additive à base de laser utilisent une source laser avec une puissance faible à moyenne (de 200W à 400W) pour fondre le matériau qui se solidifie en refroidissant. Ces procédés peuvent être distingués en deux sous-catégories, en fonction du mécanisme de changement de phase : la fusion laser et la polymérisation laser. Nous ne parlons ici que des procédés laser par fusion. Dans ces procédés, le matériau est fourni sous forme de poudre, soit à partir d'un lit de poudre, soit par apport continu de cette poudre au niveau des buses. Un faisceau laser est utilisé afin de faire fondre le matériau, qui ensuite refroidit et se solidifie pour produire la pièce. L'optique de balayage est utilisée pour diriger le faisceau laser dans le plan x-y tandis qu'une table se déplace dans la direction z (Figure 1-6).

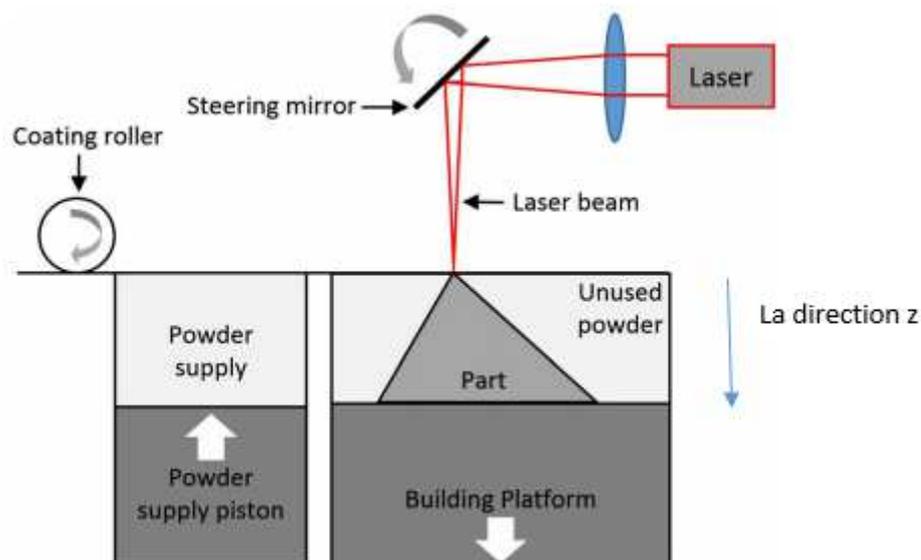


Figure 1-6: Le principe du procédé de la "fusion laser" [8]

### **Quelques procédés qui se basent sur ce principe :**

**Le procédé de frittage sélectif par laser (SLS ou DMLS):** Le SLS utilise une poudre fine, chauffée par un faisceau laser (allant de 7W pour le plastique [13] à 200W [14, 15] pour les métaux) de manière à permettre aux grains de fondre ensemble [16]. Avant que la poudre ne soit frittée par le faisceau laser, tout le lit est chauffé juste au-dessous du point de fusion du matériau afin de minimiser la distorsion thermique et de faciliter la fusion locale et l'adhésion avec la couche précédente. Après qu'une couche ait été construite, le lit est abaissé et une nouvelle couche de poudre est appliquée. Un rouleau rotatif est alors utilisé pour étaler la poudre uniformément. Le matériau fritté forme la pièce, tandis que la poudre de matériau non fritté reste en place pour supporter la structure. Le matériau non fritté peut être nettoyé et recyclé une fois la construction terminée. On peut utiliser des matériaux tels que des poudres métalliques, du nylon, des composites de nylon, du sable, de la cire et des polycarbonates [16]. Ce procédé est utilisé généralement en outillage rapide mais également en fabrication additive métallique.

**Fusion laser sélective (SLM):** SLM est un processus similaire à SLS. Les deux sont des instanciations du même concept mais diffèrent sur des détails techniques. Au lieu du frittage utilisé dans le procédé SLM, la poudre est ici portée à une température de fusion pour former la pièce. Par conséquent, la puissance du faisceau laser est généralement plus élevée (environ 400W). Les pièces réalisées par ce procédé ne présentent pas, ou très peu, de porosités si les piscines de fusion se recouvrent suffisamment. Pour obtenir une bonne qualité surfacique, il est important d'optimiser les différents paramètres du procédé [40][41].

**Le procédé de construction Laser additive directe (DMD ou CLAD):** c'est une technique de fabrication additive qui utilise un laser comme source d'énergie pour fritter ou fondre du matériau en poudre (typiquement du métal), le laser visant automatiquement des points dans l'espace définis par un modèle 3D. Le principe de fonctionnement est très proche du procédé SLS / SLM, même s'il ne se réalise pas dans un lit de poudre. La poudre est alimentée par un certain nombre de buses (généralement 3) directement au niveau de la tête de traitement.

#### *1.1.2.2. Le procédé de faisceau d'électrons (EBM)*

Le procédé par Fusion par faisceau d'électrons a été mis au point par Arcam en 1997. Ce processus est similaire à SLS avec une différence liée à la nature de la source d'énergie (Figure 1-7): EBM est un processus relativement nouveau mais en croissance rapide et similaire à celui de SLS, bien qu'approprié pour la construction de pièces métalliques seulement. La poudre est fondue par un faisceau d'électrons alimenté par une haute tension, typiquement 30-60KV. EBM peut également traiter une grande variété de métaux pré-alliés [23]. La vitesse de fabrication de ce procédé est plus rapide que les procédés Laser [42]. Ceci parce que la vitesse de balayage du

procédé EBM peut atteindre huit kilomètres par seconde [43] contre des dizaines de mètres par seconde pour les procédés SLM [44]. De plus, la forte puissance de la source d'énergie permet d'exploiter de grandes vitesses de déplacement. Le procédé EBM, en raison de la charge des électrons, nécessite une phase de consolidation sous vide de la poudre pour éviter la répulsion électrostatique de ses particules [42]. Pour permettre une adhésion de la couche déposée sur la pièce en construction, cette consolidation est réalisée alors que la chambre de fabrication est chauffée à une température d'environ 750°C pour les alliages de Titane. Selon Lu et al [45], la stratégie de balayage est un facteur important pendant la fabrication qui influe sur la diffusion de chaleur dans le lit de poudre et la qualité de la pièce fabriquée.

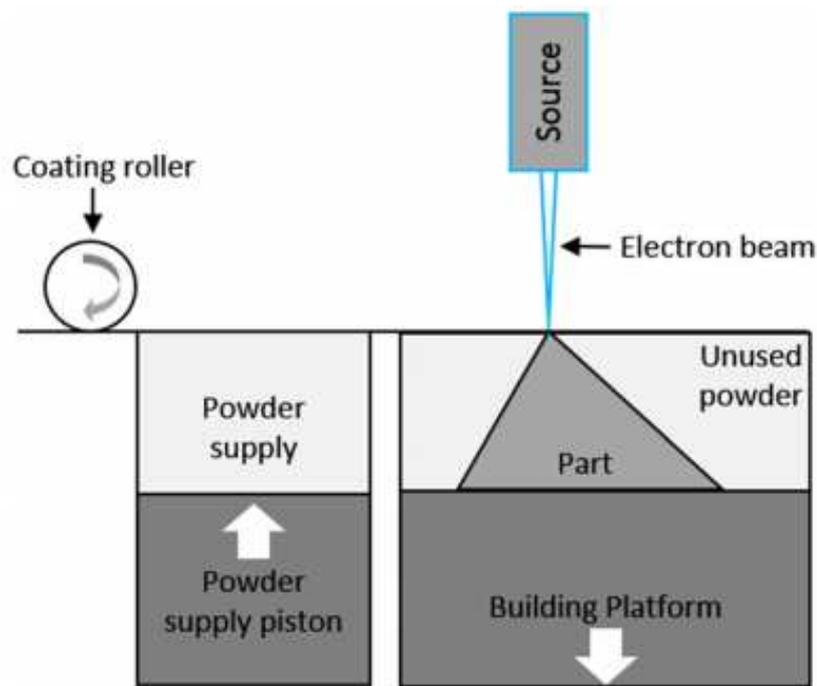


Figure 1-7: Le principe du procédé de faisceau électronique [8]

### 1.1.2.3. Les caractéristiques des procédés

Il y a beaucoup de travaux qui ont l'objectif de caractériser et comparer des procédés de fabrication additive [46][47][48][49]. Ces travaux se focalisent souvent sur la qualité géométrique, surfacique et les propriétés mécaniques des pièces réalisées. En synthèse de ces travaux, Vayre [42] a proposé de comparer les procédés de fabrication additive selon quatre critères : le temps ou vitesse de la fabrication, la qualité de la pièce réalisée, les propriétés des matériaux et l'impact environnemental. Dans cette partie, nous présentons les caractéristiques des principaux procédés de fabrication additive métallique comme SLS, DMLS, SLM, DMD et EBM.

**Le temps ou la vitesse de la fabrication :** il y a peu de travaux qui comparent la vitesse de fabrication des différents procédés de fabrication additive. Parce que ce n'est pas facile de réaliser la même pièce test dans les mêmes conditions avec différents moyens de fabrication. Dans son travail de synthèse, Vayre s'est appuyé

sur différents travaux présentant les temps d'obtention de pièces de dimensions moyennes (volume de construction au moins 200mm \* 200mm \* 200mm) pour comparer la vitesse de la fabrication de ces procédés. La vitesse de fabrication du SLS est de 10 à 100 cm<sup>3</sup>/h, du DMLS est de 7 à 70 cm<sup>3</sup>/h, du SLM est de 5 à 20 cm<sup>3</sup>/h, du DMD est de 10 à 70 cm<sup>3</sup>/h et de l'EBM est de 55 à 80 cm<sup>3</sup>/h. Ces valeurs sont mesurées pour l'épaisseur de couche maximale du procédé [42] et avec un matériau permettant d'atteindre la vitesse la plus élevée. Dans le cas où l'on doit fabriquer des pièces complexes, nous devons choisir des épaisseurs de couches les plus faibles possibles pour minimiser l'effet d'escalier [50] et pour limiter les opérations de finition. La vitesse de fabrication est alors diminuée. Avec les moyens comme SLS, DMLS, il est nécessaire de prévoir une opération d'infiltration de particules de bronze de près de 24h pour obtenir une pièce quasi-dense. L'infiltration est généralement utilisée pour densifier et renforcer les pièces lorsque les propriétés requises ne peuvent être obtenues grâce au processus principal [51]. Pour fabriquer les pièces denses, les moyens les plus rapides sont l'EBM et le DMD à cause d'une part de l'avantage de ne nécessiter que peu (EBM) ou pas (DMD) de support et d'autre part de la vitesse de fabrication. La vitesse de fabrication EBM est importante grâce à la quantité d'énergie apportée, la vitesse de balayage élevée et la possibilité de faire varier le diamètre du spot de 200 µm jusqu'à 1 mm (à comparer au spot de taille fixe de 70 µm du procédé de SLM par exemple). Il y a des expérimentations pour chercher des solutions pour l'augmentation de la vitesse de fabrication des procédés basés sur le Laser [52]. Une des solutions commercialisée est d'effectuer le balayage des sections avec plusieurs sources Laser en parallèle [53].

**La qualité surfacique et dimensionnelle de la pièce réalisée :** pour les pièces fabriquées par les moyens de fabrication additifs et avec des matériaux métalliques, les surfaces présentent une rugosité et un aspect granuleux dus à leur fabrication à partir de poudre. L'état de surface des pièces fabriquées par SLM et DMLS (suivi d'une infiltration) est meilleur que celui des pièces fabriquées par SLM et DMLS non-infiltrées, grâce à l'apport de bronze qui atténue la rugosité [52]. La rugosité arithmétique des pièces fabriquées avec des moyens Laser se situe autour de 15 µm [52]. Pour les pièces réalisées avec l'EBM, la rugosité arithmétique est comprise entre 25 et 35 µm. Dans les mêmes conditions et pour une distance de 100 mm, les procédés SLS, DMLS, SLM présentent une erreur maximale de 0,1 mm ; les procédés EBM conduisent à une erreur inférieure à 0,2 mm ; le procédé DMD présente une erreur de 0,3 mm [76]. Par contre, ces erreurs ne prennent pas en compte les déformations thermiques qui peuvent se produire lors de la fabrication.

**Les propriétés des matériaux :** les pièces denses réalisées par les moyens de fabrication additive métallique peuvent présenter des porosités fermées qui dégradent leur comportement mécanique, notamment en fatigue [54] [55]. Nous pouvons utiliser des moyens d'imagerie 3D tels que la tomographie pour détecter et

quantifier ces porosités. Les propriétés mécaniques des pièces obtenues à l'aide des procédés par fusion sont comparables à celles des matériaux moulés [56], Figure 1-8

Build Temperature, K (°C)	Yield Strength ( $\pm 1\sigma$ ), MPa	Tensile Strength ( $\pm 1\sigma$ ), MPa	Elongation ( $\pm 1\sigma$ ), MPa
973 (700)	883.7 ( $\pm 10.6$ )	993.9 ( $\pm 5.6$ )	13.6 ( $\pm 0.9$ )
951 (678)	932.4 ( $\pm 3.2$ )	1031.9 ( $\pm 2.6$ )	11.6 ( $\pm 1.5$ )
917 (644)	928.8 ( $\pm 5.5$ )	1028.9 ( $\pm 4.3$ )	13.0 ( $\pm 0.7$ )
899 (626)	938.5 ( $\pm 10.9$ )	1029.1 ( $\pm 14.9$ )	13.2 ( $\pm 0.4$ )
973 (700) HIP	841.4 ( $\pm 7.8$ )	938.8 ( $\pm 7.1$ )	13.6 ( $\pm 1.3$ )
951 (678) HIP	868.4 ( $\pm 8.6$ )	974.2 ( $\pm 10.8$ )	13.4 ( $\pm 1.7$ )
917 (644) HIP	865.6 ( $\pm 9.1$ )	969.2 ( $\pm 8.0$ )	14.0 ( $\pm 1.6$ )
899 (626) HIP	875.2 ( $\pm 2.2$ )	977.6 ( $\pm 3.0$ )	13.6 ( $\pm 0.5$ )

Figure 1-8: Evolution de la limite élastique, de la limite mécanique et de l'allongement à la rupture en fonction de température de préchauffe des couches en EBM [42]

**L'impact environnemental** : pour les moyens de fabrication additive en poudre, nous pouvons réutiliser directement 95% de la poudre (après filtrage) non liée à l'issue de la fabrication. C'est une des caractéristiques qui intéresse grandement les éco-concepteurs [56]. A ce jour, il n'y a pas encore une analyse complète de l'impact environnemental d'une pièce réalisée par fabrication additive métallique.

Une synthèse des caractéristiques des procédés FA métalliques est présentée dans la Figure 1-9.

Technology	SLS	DMLS	SLM	EBM	DMD
Manufacturer	3D system – DTM Corp.	EOS GmbH	3D system – MTT	Arcam	POM – Easyclad
Maximal building volume* (in mm <sup>3</sup> )	550 × 550 × 750	250 × 250 × 215	400 × 400 × 400	200 × 200 × 350	300 × 300 × 300
Building speed* (in cm <sup>3</sup> /h)	10–100	7–70	5–20	55–80	10–70
Post-process operations	Cleaning (infiltration) (finishing)	Cleaning (infiltration) (finishing)	Cleaning (finishing)	Cleaning (finishing)	(finishing)
Layer thickness*	20–150 μm	20–100 μm	20–100 μm	50–200 μm	–
Rugosity (in μm)	Ra 2 [5]	Ra 11 [5]	Ra 11 [5]	Ra 25–35*	Ra 10–25*
Dimensional quality*	0.2* mm	0.1–0.2* mm	0.2* mm	0.4* mm	0.3* mm
Available metallic materials*	Any coated material	Steels, cobalt-chrome, aluminum, bronze, titanium.	Steels, cobalt-chrome, aluminum, bronze, titanium.	Steels, cobalt-chrome, aluminum, bronze, titanium, inconel, copper, beryllium, niobium, ...	Steels, inconel, copper, titanium, ...

\* Manufacturer data (3D system, EOS GmbH, Arcam, POM).

Figure 1-9: Synthèse des caractéristiques de procédé FA métallique [42]

Après une étude assez complète des procédés de FA, nous avons résumé quelques points importants comme suit :

- Le développement des moyens de FA métallique nous permet de fabriquer des pièces fonctionnelles, assez légères, en petite ou moyenne série.
- Il y a une grande liberté de la forme de la pièce fabriquée.

- Il y a beaucoup d'études des caractéristiques (Figure 1-10) des procédés de FA. Ces caractéristiques sont devenues une référence importante lorsqu'on conçoit une pièce.

A partir des différences entre les moyens FA et les moyens soustractifs, des résultats qu'on a mis en évidence ci-dessus, nous avons considéré qu'il était nécessaire de préciser le processus de conception pour la FA, en se basant notamment sur la reconception des pièces existantes dans l'industrie. L'objectif est de profiter de la liberté de la forme et d'intégrer les caractéristiques du procédé de FA dans la conception.

Le prototype est ici vu comme une représentation intermédiaire de la pièce que l'on peut comparer à la représentation virtuelle (le modèle CAO, par exemple). On peut obtenir ce prototype, facilement, sans avoir besoin d'outillage spécifique, et dans un délai tout à fait acceptable. Nous allons par la suite étudier les représentations intermédiaires et leurs places dans un processus de conception.

## 1.2. Représentations intermédiaires de la pièce dans un processus de conception

### 1.2.1. *Processus de conception – Axiomatic Design*

Le processus de conception de produits est aujourd'hui une thématique de recherche à part entière. La compétitivité des entreprises dépend non seulement de la maîtrise des technologies nécessaires à leur activité mais également de la stratégie et de la gestion du processus de conception [24]. La conception en tant que processus est l'ensemble ordonné des activités permettant de construire des représentations du produit en développement, représentations dont des instances sont à fournir lors de jalons. Le processus de conception de produit part d'un besoin matériel ou immatériel, inscrit dans un cahier des charges initial, pour aboutir à un produit physique.

Selon Bocquet [25], en génie industriel, la conception est un processus formalisé de 4 étapes principales ci-dessus :

- Etape 1 : de la définition des besoins au cahier des charges
- Etape 2 : du cahier des charges à l'avant-projet
- Etape 3 : de l'avant-projet au prototype industriel
- Etape 4 : du prototype industriel au produit réalisé en série.

Le processus commence par une définition et clarification des besoins du client et vise à le traduire en un cahier de charges. Ensuite, c'est l'étape de recherche des solutions possibles qui sont bien adaptées au cahier des charges. Un prototype industriel est ensuite créé pour valider les performances au regard du besoin avant de réaliser en série et de tester la capacité de l'organisation à réaliser son industrialisation.

AOUSSAT [26] a proposé une démarche de conception en quatre phases (Figure 1-10). La première phase traduit le besoin du client et conduit à la mise en place du cahier des charges fonctionnel. La deuxième phase est celle de l'interprétation du besoin pour conduire à la spécification technique de ce besoin. Dans cette phase, le concepteur va rechercher des nouveaux concepts pour le produit et traduire le cahier des charges fonctionnel au regard des technos envisagées. La troisième phase est la phase de la définition et débouche sur un prototype. Enfin, c'est la phase de validation du produit. Dans tous ces processus, le résultat d'une phase est le point départ de la phase suivante.

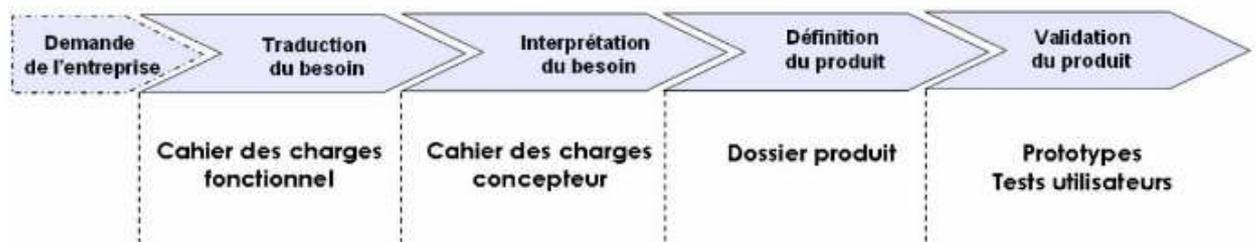


Figure 1-10: Processus de conception selon Aoussat

De nombreux travaux proposent différentes modélisation du processus de conception mais ils sont basés sur des étapes relativement similaires, par exemple : le « System Engineering » [63], le processus de Axiomatic Design [58], etc...

Dans notre cas, nous nous intéressons d'abord à la reconception de pièces existantes pour les adapter à la FA. Le point de départ est donc un mécanisme existant, réalisant les performances attendues, et constitué de pièces obtenues par une fabrication soustractive. Ces pièces ont donc été déjà étudiées et conçues. Leurs surfaces fonctionnelles et leurs dimensions, les formes et dimensions reliant ces surfaces fonctionnelles ont été dimensionnées pour résister aux efforts appliqués, être fabriquées et assemblées. Les fabriquer avec la nouvelle technologie de fabrication additive amène à questionner l'adaptation des formes de ces pièces à cette nouvelle technologie, mais aussi au positionnement de la matière dans l'espace pour en optimiser les performances, notamment la résistance. Le processus de leur conception est ainsi remis en question. Ce travail s'inscrit donc dans le domaine de l'Engineering Change [57].

Pour positionner notre travail, nous nous appuyons sur la définition d'un processus de conception proposé par Suh [58] dans l'Axiomatic Design, Figure 1-11. Nous allons nous appuyer sur ce processus parce ce qu'on a considéré qu'il était le plus adapté pour la conception des produits avec nos technologies additives. Suivant ce modèle, à partir d'un besoin à expliciter, les concepteurs doivent définir les exigences (Functional Requirements) du produit à concevoir. Suit une phase de synthèse (Ideate and create) qui conduit les concepteurs à proposer des solutions. Ces solutions sont

ensuite analysées (Analyze and Test) au regard des critères de performances définis dans les exigences. Ce modèle conduit à voir le processus de conception comme une boucle entre activités de synthèse et d'analyse et ce jusqu'à atteindre une adéquation entre les exigences et les performances des solutions envisagées. Dans cette boucle, les exigences et les solutions doivent toutes deux co-évoluer [59] [60] pour permettre de finaliser le processus. En se basant sur ce modèle, notre objectif est de définir sur quelles représentations intermédiaires s'appuyer, et comment utiliser, au cours des activités d'analyse dans le processus de conception.

### 1.2.2. Les représentations intermédiaires de la pièce

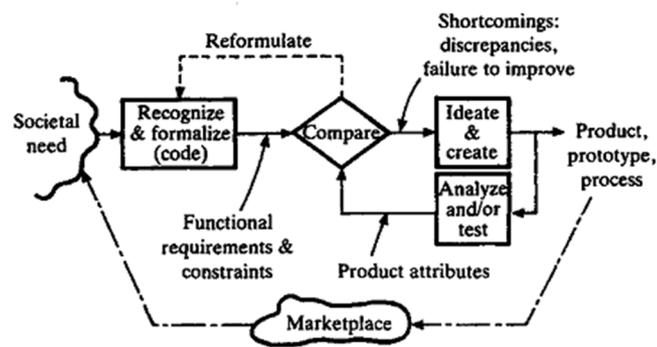


Figure 1-11: SUH - Axiomatic Design [58]

Les représentations intermédiaires sont utilisées par les concepteurs pour représenter les états du produit en cours de conception et les aider à prendre des décisions rapides à leur propos. Le concepteur peut aussi utiliser les représentations intermédiaires comme un moyen de simuler les différentes caractéristiques du produit.

Nous approfondirons dans le chapitre 3 les différentes représentations intermédiaires proposées dans la littérature. Nous présentons ici quelques définitions existantes pour aider à comprendre ces termes.

Il y a de nombreuses définitions des représentations intermédiaires :

Selon Buur et al. [29] : « Ce sont des représentations contenant certaines propriétés du produit et privées de certaines autres. »

Selon Neelamkavil [30] : « Ce sont des représentations simplifiées d'un système, ayant pour objectifs d'accroître notre capacité à comprendre, à prévoir et si possible à contrôler les comportements futurs du système. »

Selon Tichkiewitch [31] : « Ce sont des outils d'interaction, entre l'ensemble des acteurs de la vie du produit, afin de permettre des échanges et des compréhensions mutuelles plus efficaces ».

Les représentations intermédiaires sont utilisées tout au long du processus de conception pour 4 types d'utilisations définies comme ci-dessous, selon Söderman [32] :

- Evaluer le produit
- Détecter les erreurs dans les phases amont du processus de conception
- Stimuler le dialogue entre les différents acteurs
- Aider à la prise de décision

Il y a différents types de représentations intermédiaires du produit :

- Le dessin : les premières représentations d'un produit sont souvent des dessins [33]. Les dessins peuvent être en noir et blanc ou en couleur, en 2D ou en 3D. Le dessin est réalisé à la main par des dessinateurs ou à l'aide de l'outil informatique (Figure 1-12).

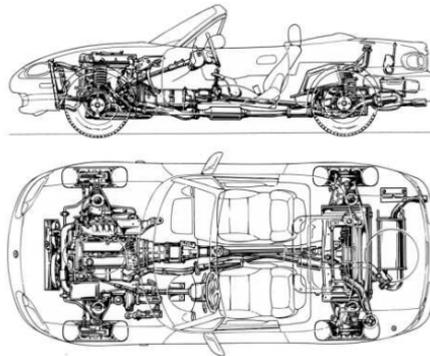


Figure 1-12: Vues de profil et de dessus de la Mazda Mx5 [34]

- La maquette physique : est une version physique du produit mais généralement à une échelle réduite, Figure 1-13. En plus de permettre d'approcher certaines performances, la maquette physique permet au concepteur de percevoir les propriétés visuelles du produit dans sa globalité [35].



Figure 1-13: Une maquette physique dans le projet Anfa-Sky au Maroc

- Le prototype physique : est l'un des exemplaires d'un produit qui nous permet de tester, afin de valider des choix de conception. Le prototype physique est considéré comme un exemplaire de présérie. Cependant, le

prototype physique n'est généralement fabriqué que lors des phases finales du processus de conception à cause du coût et du temps de fabrication [36].

- La maquette virtuelle, Figure 1-14 est une représentation numérique visuelle du produit conçu, mis dans son environnement. L'utilisateur peut ainsi naviguer autour et à l'intérieur de l'objet, du système ou de l'installation. Mais à part cette possibilité de navigation, l'utilisateur est passif face à cette maquette virtuelle [37].



Figure 1-14: Maquette virtuelle d'un PDA de Hewlett-Packard

- Le prototype virtuel [37], Figure 1-15 est une représentation sur laquelle l'utilisateur peut interagir. Ce dernier peut aussi s'immerger dans cette représentation dans le cas d'une installation ou d'un dispositif virtuel. L'utilisateur est donc actif : il peut, par exemple, manipuler l'objet ou un de ses sous-ensembles, tester l'ergonomie ou les fonctionnalités du dispositif. Il y a donc dans ce dernier cas une modélisation physique de la scène et une modélisation comportementale des objets qui permettent une simulation en temps réel.

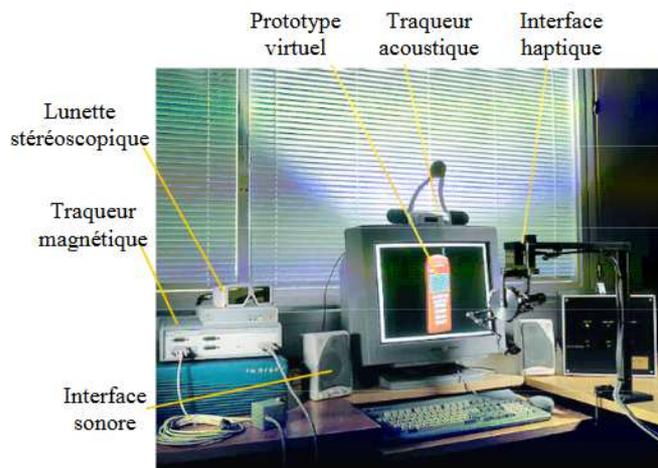


Figure 1-15: prototype virtuel de téléphone mobile [38]

Ces définitions des types de représentation intermédiaire correspondent au contexte de travail de ces auteurs. Elles ne sont peut-être pas transposables à l'ensemble des autres contextes de travail. Nous allons par la suite adapter une partie de ces

définitions à propos des types de représentations intermédiaires à notre contexte de travail concernant la fabrication additive.

Une chaîne numérique de la conception est proposé par Richir [39] en utilisant les représentations intermédiaires comme ci-dessous (Figure 1-16) :

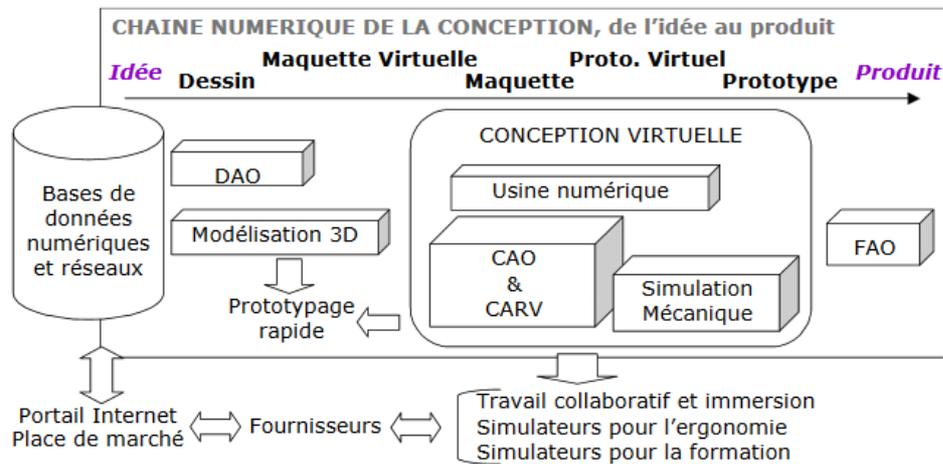


Figure 1-16: Chaîne numérique de la conception [39]

Cette chaîne numérique de la conception permet de passer d'une idée du produit au produit commercialisé, en utilisant différentes représentations intermédiaires, physiques ou virtuelles. En 2003, l'idée de base de Richir est de remplacer les représentations intermédiaires physiques par des représentations intermédiaires virtuelles qui sont réputées plus rapides à réaliser et moins coûteuses. Cette idée est correcte dans son contexte de travail. Mais dans notre contexte de fabrication additive, est-ce que cette idée est toujours valide ? Avec le développement de FA, nous pouvons fabriquer le prototype physique facilement et assez rapidement. Le prototype physique est devenu un concurrent plus sérieux sur des critères de faisabilité et de temporalité avec les représentations virtuelles. Une étude de la comparaison entre représentation virtuelle et physique s'avère donc très intéressante.

A partir de ces considérations sur les représentations intermédiaires du produit en cours de conception, nous allons mettre en évidence nos questions de recherche dans la partie suivante.

### 1.3. Question de recherche globale

Nous avons présenté le développement de FA dans la partie précédente. Nous avons vu que la fabrication additive est en plein de développement. La fabrication additive ne s'applique pas seulement pour la fabrication de prototypes, mais aussi pour la fabrication de pièces industrielles, obtenues en petites ou moyennes séries. Dans cette thèse, on s'intéressera à la fabrication de pièces industrielles en matériau métallique.

Il y a beaucoup de travaux portant sur le processus de conception de pièces mécaniques, travaux que nous avons en partie présentés précédemment. Mais ce sont des modèles qui sont développés en général et pour les technologies de fabrication traditionnelle (fraisage, moulage...). A ce jour, la fabrication additive se développe avec plusieurs procédés qui sont capables de fabriquer les pièces en plastique ou en métal. De plus, la FA a des avantages qui sont des limites pour la technologie traditionnelle. Par exemple, grâce à la liberté de la forme de la pièce, il n'y a pas besoin d'outillages spécifiques. Mais la FA a aussi des inconvénients, par exemple, la qualité de surface de la pièce, nominalement faible, le coût de la fabrication, notamment à cause de l'investissement pour la machine de fabrication et aussi celui de la matière première. Il y a donc des différences sensibles entre la FA et les technologies traditionnelles. Nous considérons donc qu'il est nécessaire d'avoir un nouveau modèle du processus de conception pour la fabrication additive.

Nous avons vu aussi dans la partie précédente l'importance de la représentation intermédiaire dans le processus de conception. Il y a beaucoup de types de représentations intermédiaires. Dans la philosophie des travaux précédents, l'objectif est de remplacer les représentations intermédiaires physiques par des représentations intermédiaires virtuelles qui sont plus rapides à réaliser, et moins coûteuses. Mais avec la FA, les représentations intermédiaires physiques sont réalisées plus facilement et rapidement. Est-ce que ces limites du délai et du coût sont encore rédhibitoires dans le cas de la FA ? De plus, nous avons trouvé que la comparaison entre les représentations intermédiaires physiques et virtuelles est vraiment intéressante, en fonction des situations spécifiques dans lesquelles on se trouve, pour améliorer le processus de conception.

En résumé, nous avons donc mis en évidence deux questions générales de recherche qu'on va étudier pendant la thèse :

- **Quel modèle pour le processus de conception d'une pièce par fabrication additive ?**
  - Comment tirer profits de l'avantage de la FA, par exemple, la liberté de la forme ?
  - Comment intégrer, prendre en compte, les caractéristiques spécifiques au procédé de FA dans le processus de conception ?
- **Quelle est l'influence de la représentation intermédiaire dans le processus de conception pour la fabrication additive ?**
  - Quels nouveaux types de représentations intermédiaires sont accessibles avec la FA
  - Comment faire le choix du type de représentation intermédiaire pour évaluer le produit, dans une situation spécifique et dans un moment spécifique du processus de conception pour la FA ?

Nous allons proposer par la suite une présentation de la structure de notre manuscrit.

#### 1.4. Présentation la structure du rapport

Notre rapport est structuré autour de nos questions et sur la réponse aux deux questions de recherche qu'on a posée ci-dessus.

- Le rapport commence par **ce chapitre** de présentation du contexte du travail de ma thèse. Il met en évidence le développement de la FA et les processus de conception. Dans ce chapitre, nous avons présenté deux questions de recherche pour notre travail.

- Le **Deuxième chapitre** est consacré à la méthodologie de recherche. Nous vous présenterons dans ce chapitre une méthodologie de recherche générale qu'on a utilisée et adaptée pour répondre aux questions de recherche.

- Le **Troisième chapitre** est dédié à une étude du processus de conception pour la fabrication additive. Dans ce chapitre vous sera présenté un état de l'art du processus de conception pour la fabrication additive. Des études de cas permettront d'affiner notre proposition pour un processus de conception dans le cadre de la FA et de répondre ainsi à la première question de recherche.

- Le **Quatrième chapitre** est une étude des représentations intermédiaires à utiliser dans le processus de conception pour la fabrication additive. Dans ce chapitre, nous allons faire une proposition de la définition des notions de maquette et de prototype. De plus, nous allons présenter les études (étude bibliographie et étude de cas) qui nous permettent de proposer une méthode de choix entre les types de représentations intermédiaires pour répondre à la deuxième question de recherche.

- Dans le **Cinquième chapitre** nous appliquons la méthode de choix dans une étude de cas que nous avons mené avec une société start-up.

- Pour finir, le **sixième chapitre** présentera les conclusions de notre travail ainsi que les perspectives.

## Chapitre 2 : Méthodologie de recherche

Nous avons présenté nos questions de recherche à la fin du chapitre précédent. Ces questions ciblent le processus de conception d'une pièce à réaliser par fabrication additive, et plus particulièrement la place des différentes représentations de cette pièce (numériques, physiques) dans ce processus. Pour répondre à ces questions, nous allons nous appuyer sur les méthodologies de recherche existantes qui sont employées dans le domaine de la conception de produits. Nous avons trouvé le terme « méthodologie de recherche pour la conception » dans de nombreux travaux dont ceux de Cross (1993) [64], Fulcher et Hills (1996) [65], Reich (1995) [66] et Blessing (2009) [67]. Nous n'allons pas entrer dans les détails de ces travaux existants. Nous avons suivi une méthodologie qui peut s'inscrire dans les cadres de celle proposée par Blessing : le DRM pour Design Research Methodology. Nous n'avons pas pris cette méthode comme méthode de référence pour structurer notre démarche travail de manière stricte autour des concepts qu'elle développe. Cependant nous avons, au cours de notre recherche, organisé nos travaux autour des 4 grandes étapes qui composent le DRM.

Dans ce chapitre, nous présentons donc les concepts, les définitions, les étapes de cette méthodologie DRM. Puis nous présentons notre démarche et sa proximité avec le DRM

## 2.1. Méthodologie de recherche de conception – Design Research Methodology (DRM)

### 2.1.1. *La définition du modèle DRM*

Blessing propose une méthodologie de recherche de conception appelée DRM [67] pour soutenir la recherche de conception, pour qu'elle devienne plus efficace. Pour questionner cette efficacité, elle s'appuie sur une étude des publications du domaine du design au cours des années 1990-2000 pour mettre notamment en évidence le manque de mise en usage des résultats issus de la recherche dans les pratiques et le manque de rigueur scientifique des travaux de recherche du domaine de la conception. Elle affinera la méthode proposée, le DRM, sur le début des années 2000 [68], [69], [70].

Une méthodologie de recherche dans le domaine de la conception doit guider dans la sélection et l'application d'approche et de méthodes, adaptées et appropriées, et encourager la réflexion sur ces démarches et méthodes à utiliser. DRM est une des méthodes proposées pour assister cette recherche de manière plus rigoureuse qui doit conduire à des résultats plus efficaces et efficients. DRM [67] est donc une méthodologie générique et systématique destinée à améliorer la qualité de la recherche en conception.

Le modèle DRM inclut 4 phases : « Research Clarification (RC)», « Descriptive Study I (DS-I) », « Prescriptive Study (PS) » et « Descriptive Study II (DS-II) ». La relation entre les phases est présentée dans la Figure 2-1.

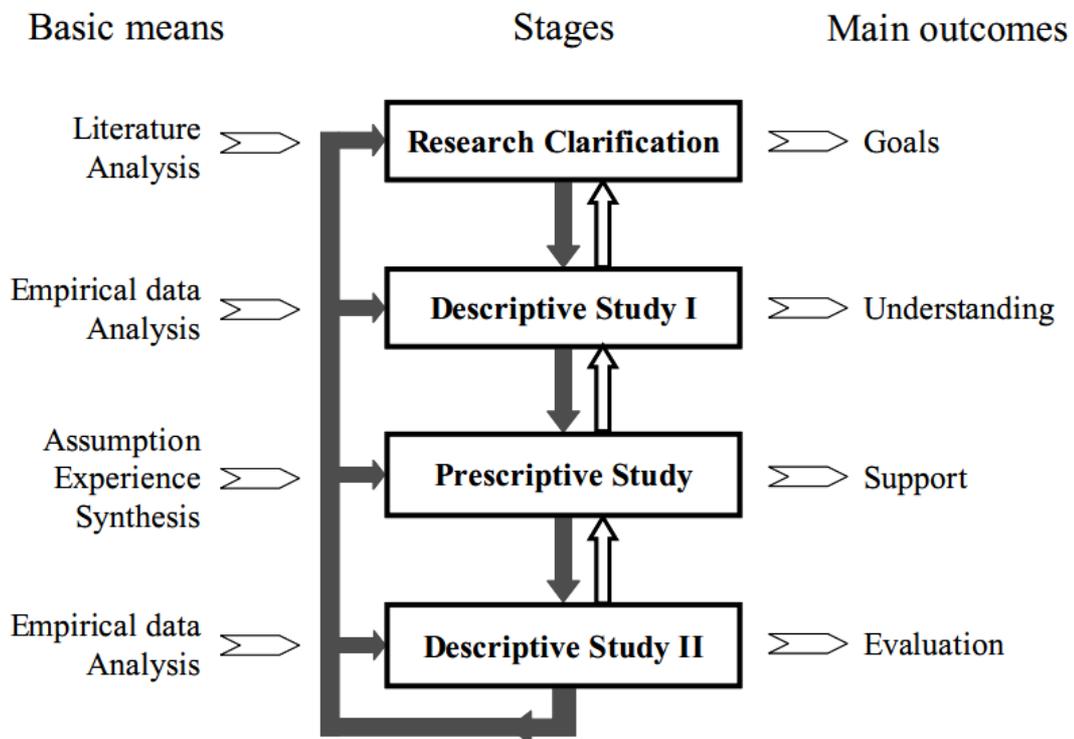


Figure 2-1: Modèle de DRM [67]

Il y a différentes méthodes, des moyens de base, adaptées et utilisées pour chacune des phases, Figure 2-1, comme l'analyse de la littérature pour la première phase, l'analyse des données empiriques pour les phases 2 et 4, des hypothèses, expérience et synthèse pour la phase 3.

Le résultat attendu de chaque phase est également présenté dans la Figure 2-1. La première phase doit définir l'objectif de la recherche, la deuxième phase doit permettre la compréhension de la situation existante et des améliorations à apporter, la troisième phase doit conduire à la création d'un support à implémenter pour conduire à cette amélioration, et la quatrième phase doit permettre l'évaluation des évolutions lors de la mise en œuvre du support. Entre deux phases, il y a des itérations, des allers-retours. Nous allons ci-après expliquer de manière plus approfondie les différentes phases de ce modèle DRM.

### Clarification de recherche (Research Clarification ou RC)

Dans la phase de RC, les chercheurs tentent de trouver des preuves ou des indications, qui étayent leurs hypothèses afin de formuler un objectif de recherche réaliste et le plus structuré possible. Ils le font principalement en recherchant dans la

littérature ou dans leur propre expérience des facteurs qui ont une influence sur le problème de recherche ou sur le succès du produit.

Un facteur d'influence est défini comme un aspect de la situation à laquelle le chercheur est confronté, qui a une influence sur d'autres facteurs qui sont eux-mêmes liés à l'objectif de la recherche. Par exemple le facteur d'influence 'qualité de la définition du problème de conception' influence le facteur 'pourcentage de temps de conception passé sur des modifications' qui lui-même influence le facteur 'temps de mise sur le marché du produit' qui lui-même est en lien avec l'objectif 'montant du profit'.

Les facteurs d'influence peuvent caractériser des aspects produit, organisationnel, économique, humain, processus, connaissances, méthodes et outils, ... c'est-à-dire de tous les domaines liés et/ou impactés par la conception.

Sur la base de ces facteurs, une description initiale de la situation existante est développée, ainsi qu'une description de la situation désirée. Ceci permet de clarifier la question de recherche, de mettre en évidence et d'expliciter les facteurs sur lesquels le chercheur peut travailler pour agir sur l'objectif de la recherche. Nous ne nous attarderons pas ici sur les outils de description des situations développés par le DRM parce que nous ne les avons pas utilisés dans notre thèse.

La méthodologie met aussi en avant les concepts de 'critère de succès' et de 'critère de succès mesurable' pour qualifier le succès d'une recherche. Pour cela, un critère est défini comme la valeur associée et/ou planifiée pour un facteur d'influence. Un critère de succès peut par exemple être 'faible temps de mise sur le marché' qui serait associé au facteur 'temps de mise sur le marché du produit'. Un critère est qualifié de succès s'il a un fort impact sur la réussite de l'atteinte de l'objectif de la recherche. La valeur associée au critère peut être absolue ou relative (respectivement par exemple 5 mois ou diminution de quelques jours pour le critère de temps discuté précédemment), qualitative ou quantitative (respectivement par exemple faible ou chiffrée pour ce même critère de temps). Un critère de succès est dit mesurable si on peut mesurer son effet (au sens de juger les résultats) sur le temps d'un projet (une thèse par exemple). Attention, cette qualité de mesurable n'a donc rien à voir avec la mesure de la valeur du critère, mais elle est en lien avec le temps nécessaire pour mesurer son effet sur l'objectif de la recherche.

Les rôles principaux de la phase RC sont :

- D'Identifier : les objectifs qu'on doit viser, les cibles, les principaux problèmes de recherche, les questions et les hypothèses, les disciplines pertinentes et les domaines à examiner.
- De développer une représentation initiale de la situation existante (appelé Initial Reference Model dans DRM) et de la situation désirée (appelé Initial

Impact Model dans DRM). Ces représentations sont construites à partir des facteurs d'influence et des relations d'influence entre ces facteurs.

- De donner une cible pour la phase suivante en cherchant les critères de succès et les critères de succès mesurable dans le temps du projet de recherche qui contribuent, entravent ou interdisent l'atteinte de l'objectif et de la situation désirée.

Le résultat de cette phase est un objectif de recherche clarifié, une description initiale de la situation existante (Initial Reference Model), une description initiale de la situation désirée (Initial Impact Model) et les critères de succès mesurables explicités.

### **Descriptive Study I (DS-I).**

Dans la phase de DS-I, les chercheurs, ayant maintenant un objectif clair, examinent la littérature afin de trouver plus de facteurs d'influence pour améliorer la description initiale de la situation existante (Reference Model) qui est le résultat de la phase précédente. L'intention est de rendre la description suffisamment détaillée pour être capable de déterminer quels facteurs doivent être considérés pour répondre à la question de recherche. Il s'agit de déterminer les facteurs d'influence prépondérant, les critères de succès et ceux qui sont mesurables. Cette démarche de recherche bibliographique peut/doit être complétée par des approches plus empiriques, faites d'observations et d'interviews des acteurs dans et à propos de leur contexte de conception. Ceci afin de permettre une meilleure compréhension de la situation existante. L'analyse des données empiriques permet alors de compléter la spécification des supports à développer pour résoudre le problème de recherche.

Les méthodes utilisées dans cette phase sont basées sur l'analyse de la bibliographie et des données empiriques.

Les rôles principaux de cette phase sont :

- De mieux comprendre la situation initiale existante, en identifiant et en précisant plus en détail les facteurs et les critères qui ont une influence sur l'atteinte de l'objectif de recherche (succès de la démarche et/ou sur le produit)
- De compléter la description initiale de la situation existante, incluant la définition des critères de succès et l'explicitation de ceux qui sont mesurables
- De choisir les facteurs clés parmi des facteurs ceux qui pourraient être pertinents à adresser pour développer les supports, afin de conduire à une amélioration de la situation initiale
- De fournir une base pour le développement d'un support adressant les facteurs qui ont le plus d'influence et qui peuvent être mesurés au regard des critères de succès

- De fournir des moyens d'évaluer les effets du support développé dans l'étape suivante et mis en usage dans l'étape DSII

Le résultat de cette phase est une description complète de la situation existante (Reference Model), des facteurs d'influence clés, des critères de succès associés à ces facteurs clés, une description initiale de situation désirée (Initial Impact Model) à jour et un descriptif de l'évaluation de la mise en œuvre du support dans cette situation désirée

### **Prescriptive Study (PS)**

Au cours de la phase d'étude prescriptive (PS), les chercheurs utilisent leur compréhension de la description de la situation existante (Reference Model) pour corriger et améliorer leur description initiale de la situation désirée (Initial Impact Model). Cette description représente leur vision sur la façon de s'appuyer sur un ou plusieurs facteurs d'influence clefs obtenus dans la phase DS-I afin de réaliser une réponse à la problématique de recherche. Ils développent différents scénarios possibles en faisant varier le critère de succès associé au facteur clef jusqu'à qu'ils aient assez de confiance pour commencer le développement systématique d'un support pour répondre au problème. Une première évaluation de ce support doit montrer qu'il a été développé correctement. Les méthodes utilisées dans cette phase sont basées sur les données empiriques, l'analyse de ces données et des synthèses.

Les rôles principaux de cette phase sont :

- de développer la description initiale de la situation désirée (Initial Impact Model), basée sur la description de la situation existante (Reference Model) à partir de l'étape de DS-I et des facteurs clefs repérés
- De déterminer la partie de la situation désirée à adresser par le développement et de déterminer les critères de succès mesurables
- De développer systématiquement un support pour adresser la situation désirée au regard des critères de succès mesurables. Le support peut être un logiciel, une méthode, ...
- D'évaluer le support au regard des critères succès mesurables

Le résultat de cette phase est une description de la situation désirée (Impact Model), une proposition du support pour la conception et l'évaluation de ces supports.

### **Descriptive Study 2 (DS-II)**

L'étape suivante est celle de l'étude descriptive deux (DS-II) pour étudier l'impact et la capacité du support à résoudre le problème de recherche explicité. Les chercheurs entreprennent des études empiriques pour mieux comprendre l'effet réel du support. Ces études doivent permettre d'évaluer l'applicabilité du support et d'analyser la qualité du résultat obtenu en implémentant le support. Les chercheurs peuvent

décider d'améliorer le support en recommençant une nouvelle étape de DS-I. Les méthodes utilisées dans cette phase sont basées sur les données empiriques et l'analyse de ces données.

Le rôle principal de cette phase est :

- de vérifier si le support peut être utilisé dans la situation pour laquelle il est destiné et s'il répond aux facteurs qu'il est censé traiter (Application Evaluation)
- de déterminer si le support contribue au succès : aborder l'utilité, les implications et les effets secondaires (Success Evaluation)
- D'identifier les nécessaires futures améliorations à envisager pour le support,
- D'avoir un retour sur les hypothèses faites lors de la construction des hypothèses à la base de la définition de la situation désirée.

Le résultat de cette phase est un modèle d'évaluation qui inclut « l'Evaluation Application » et « Evaluation Success »

### 2.1.2. Types de recherche avec le modèle DRM

Le modèle DRM présenté dans la partie précédente est une méthodologie complète avec tous les phases principales. Dans certains cas, le chercheur peut passer par toutes les phases du DRM pour réaliser son projet de recherche. Mais dans d'autres cas, un projet de recherche peut se concentrer sur une seule phase pour une étude approfondie. La Figure 2-2 présente les sept types possibles de recherche de conception basée sur le modèle DRM selon Blessing [67]. Les questions et les hypothèses de recherche, ainsi que le temps et les ressources disponibles, détermineront le type de recherche à entreprendre.

Research Clarification	Descriptive Study I	Prescriptive Study	Descriptive Study II
1. Review-based	→ Comprehensive		
2. Review-based	→ Comprehensive	→ Initial	
3. Review-based	→ Review-based	→ Comprehensive	→ Initial
4. Review-based	→ Review-based	→ Review-based Initial/ Comprehensive	→ Comprehensive
5. Review-based	→ Comprehensive	→ Comprehensive	→ Initial
6. Review-based	→ Review-based	→ Comprehensive	→ Comprehensive
7. Review-based	→ Comprehensive	→ Comprehensive	→ Comprehensive

Figure 2-2: les types de recherche avec le modèle DRM [67]

Une étude « Review-based » est basée sur l'examen de la littérature uniquement, c'est-à-dire sur une étude de bibliographie. Une étude « Comprehensive » est une étude dans laquelle les résultats sont produits par le chercheur, à partir d'une étude empirique. Le développement du support ou l'évaluation du support est entrepris sous la responsabilité du chercheur. Une étude « Comprehensive » inclut toujours en préalable une étude « Review-based ». Une étude « Initial » est une étude de fin du projet pour anticiper les conséquences des résultats qui sont impliqués avec les phases précédentes. Nous ne présentons pas en détail les 7 types de projet de recherche basées sur le modèle DRM. Nous considérons que notre situation est similaire avec le type 5. Nous allons donc appliquer le type 5 qui est détaillé ci-dessous pour réaliser notre projet de recherche.

#### *Type 5. Développement d'un support basé sur une étude approfondie de la situation existante*

Un projet de recherche de ce type est une combinaison des types 2 et 3. L'objectif est de développer un support dans le cas où le niveau de compréhension de la situation actuelle est médiocre. Par conséquent la recherche implique, après une première étude bibliographique permettant de clarifier l'existant des processus existant pour la conception de pièces destinées à être fabriquées de manière additive, à la fois le développement de la compréhension (DS-I Comprehensive) et le développement du support (PS Comprehensive). Suite à ce développement de support par une étude Comprehensive est développée une étude d'un DS-II de nature Initial.

Selon Blessing, ce modèle de DRM nous propose des phases principales et les liens entre eux. Mais ce n'est pas obligé de réutiliser toutes les phases qu'on a présentées ci-dessus. Le chercheur peut commencer son projet à n'importe quelle phase de ce modèle. Mais c'est important de bien garder le lien entre les phases dans projet de recherche.

Enfin, si le type 5 du DRM est le type le plus adapté pour supporter ma méthode de recherche, comme je l'ai dit en introduction je n'ai pas suivi la méthode dans tous ses détails. Je vais mettre en œuvre les différentes étapes, mais sans implémenter tous les concepts (notamment ceux de facteurs de succès et de critères de succès mesurables).

## 2.2. Notre méthodologie de recherche

### *2.2.1. Notre méthodologie de recherche à la référence du type 5 de modèle DRM*

Notre méthodologie de recherche est construite en 4 phases comme le modèle DRM de référence. Mais le résultat et l'objectif de chaque phase est adaptée afin de correspondre avec notre situation de recherche. Dans notre méthodologie, nous ne développons pas les facteurs influents, les critères succès, les situations existantes (Reference Model), les situations désirées initiales (Initial Impact Model) qui ont été

développées dans le modèle DRM. Nous allons par la suite clarifier les tâches, les objectifs de chaque phase dans notre méthodologie de recherche.

**Phase « Research Clarification » (RC) :** Dans cette phase, nous allons nous baser sur une étude bibliographique. L'objectif de cette phase est d'identifier les objectifs qu'on doit viser, les cibles, les principaux problèmes de recherche, les questions et les hypothèses, les disciplines pertinentes et les domaines à examiner.

**Phase « Descriptive Study I » (DS-I) :** Cette phase est normalement basée sur une étude de cas, comme dans le modèle DRM. L'objectif de cette phase est de mettre en évidence des problèmes, des hypothèses qu'on a obtenues dans l'état de l'art de la phase précédente. Cette phase nous permet aussi de mieux comprendre les résultats de la phase RC ainsi que d'appliquer ses résultats en réalité.

**Phase « Prescriptive Study » (PS) :** Cette phase est dédiée au développement d'un support (méthode, outil), développement normalement basé sur une analyse, une synthèse des données empiriques de l'étude de cas dans DS-I comme le modèle DRM. L'objectif de cette phase est donc d'obtenir un support pour la conception.

**Phase « Descriptive Study II (DS-II) :** Cette étape est normalement basée sur des études de cas comme le modèle DRM. L'objectif de cette phase est d'évaluer ou vérifier le support qu'on a formalisé dans PS.

### 2.2.2. *Application pour répondre à deux questions de recherche*

Nous avons deux questions de recherche :

- Quel modèle pour le processus de conception d'une pièce par fabrication additive ?
  - *Comment tirer les profits de l'avantage de la FA, par exemple, la liberté de la forme ?*
  - *Comment intégrer des caractéristiques du procédé de FA dans le processus de conception ?*
- Quelle est l'influence de la représentation intermédiaire dans le processus de conception pour la fabrication additive ?
  - *Les types de représentations intermédiaires avec la FA*
  - *Le choix du type de représentation intermédiaire pour évaluer le produit dans un moment spécifique du processus de conception pour la FA.*

Pour répondre à la question du processus de conception pour la fabrication additive, nous avons suivi les phases comme décrit en Figure 2-3.

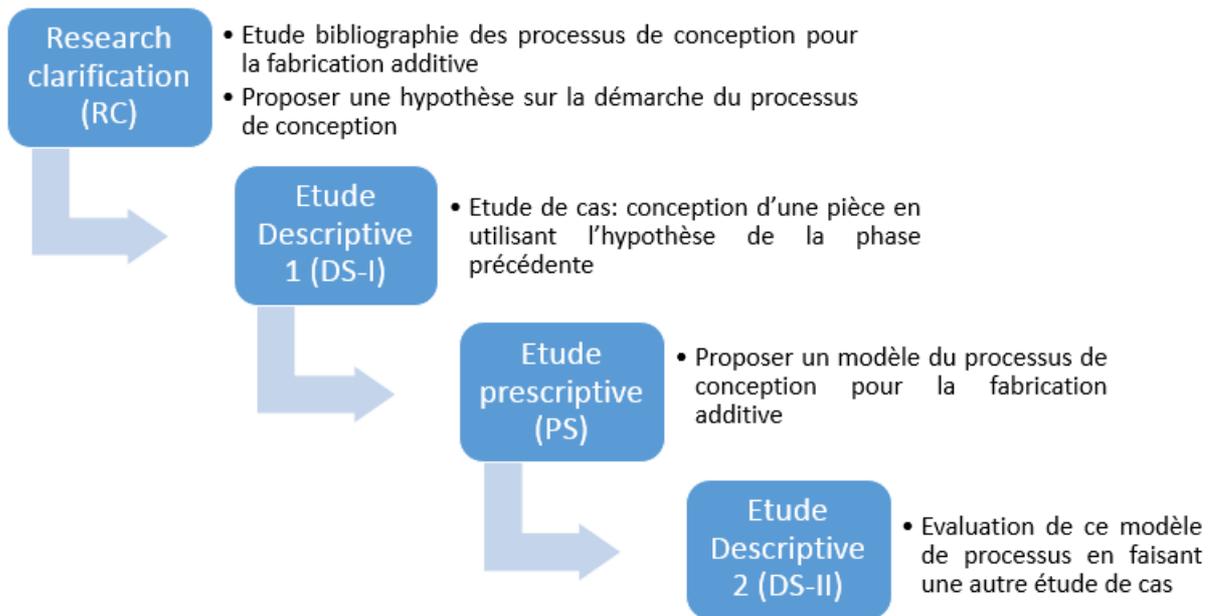


Figure 2-3: Modèle DRM pour répondre à la question du processus de conception pour la fabrication additive

Nous avons commencé par une étude bibliographique (phase RC) des modèles de processus de conception de pièces existants pour la fabrication additive. Cette étude nous permet de proposer une première hypothèse de processus de conception. Cette hypothèse est utilisée dans une étude de cas dans la phase DS-I qui nous permet d'obtenir les bases pour proposer un modèle du processus de conception pour la fabrication additive dans PS. Nous avons continué avec une étude de cas pour évaluer ce modèle du processus dans DS-II. Les phases dans cette application du modèle DRM sont détaillées dans le chapitre 3.

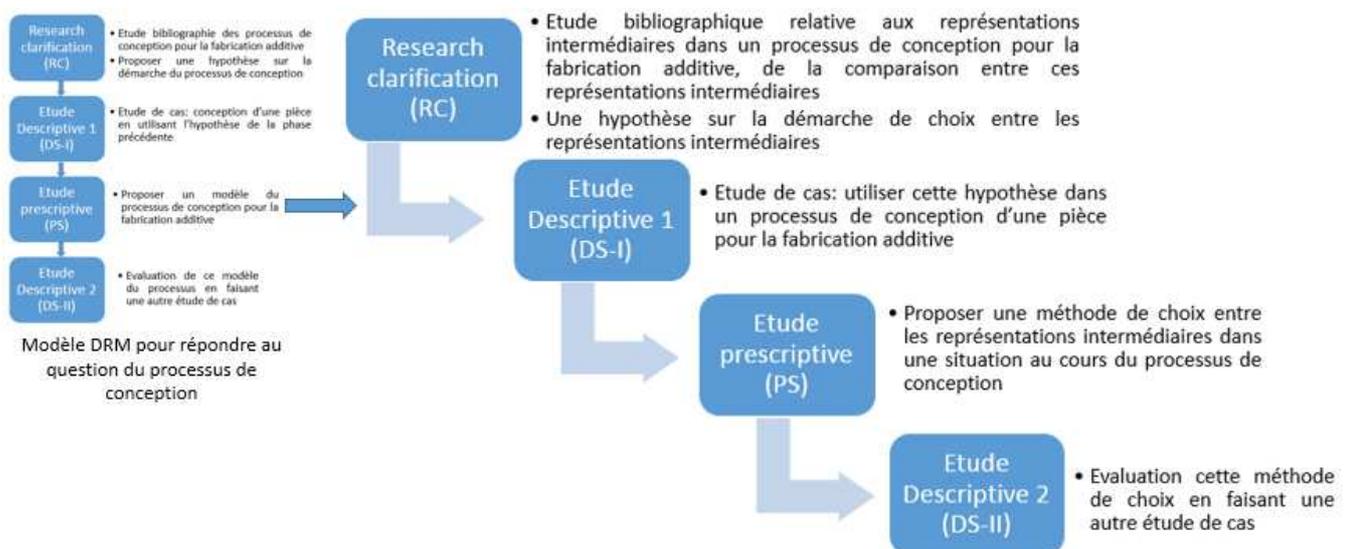


Figure 2-4: Application le modèle DRM pour répondre à la deuxième question de recherche

Notre deuxième question de recherche est apparue dans la phase Etude Descriptive (PS) lorsqu'on cherchait la réponse à la question du processus de conception. C'est à

ce moment qu'on a rencontré des difficultés pour choisir le moyen pour évaluer les comportements de la pièce. Pour répondre à cette deuxième question, la méthodologie pour choisir la représentation intermédiaire pour analyser les comportements de la pièce dans un processus de conception pour la fabrication additive, nous avons suivi les phases comme décrit en Figure 2-4.

Nous avons commencé par une étude bibliographie (phase RC) de la représentation intermédiaire dans un processus de conception pour la fabrication additive. Cette étude nous a permis de comprendre et proposer des définitions des représentations intermédiaires que sont les maquettes et prototypes qu'ils soient virtuels ou physiques. Une deuxième étude bibliographie porte sur la comparaison entre ces représentations intermédiaires de la pièce dans un processus de conception. Cette étude nous permet de formaliser des critères de choix entre les représentations intermédiaires et aussi de proposer une première hypothèse de la démarche pour faire le choix en elles dans une situation donnée. Cette hypothèse est utilisée dans une étude de cas dans la phase DS-I qui nous permet d'obtenir les bases suffisantes pour proposer une méthode de choix entre les représentations intermédiaires dans un processus de conception dans PS. Nous avons continué avec une étude de cas pour évaluer cette méthode de choix dans DS-II. Les phases dans cette application du modèle DRM sont détaillées dans le chapitre 4 et le chapitre 5.



## Chapitre 3 : La démarche du processus de conception pour la fabrication additive

Dans ce chapitre, nous allons détailler les étapes de la première boucle de notre méthodologie de recherche. Ce chapitre nous permet d'affiner notre problématique à partir d'une question de recherche globale définie dans le chapitre d'introduction.

### 3.1. Etat de l'art du processus de la conception pour la fabrication additive (Research Clarification 1a)

Les méthodologies de conception pour la fabrication (Design for Manufacturing) visent à rendre les produits plus faciles à fabriquer en se basant sur les caractéristiques des procédés actuels de fabrication. Toutefois ces caractéristiques ne s'appliquent plus lorsqu'on prend en compte les nouvelles capacités de la Fabrication Additive. Aujourd'hui, il faut donc compléter ces DFX par une méthodologie de conception pour la Fabrication Additive. L'objectif de ces études est le processus de conception d'un produit en utilisant les capacités de ces nouvelles technologies. Pour mieux comprendre notre problème global, nous avons commencé par une étude bibliographique des modèles de processus de conception pour la fabrication additive. Il y a peu de méthodologies de conception qui ont été développées pour la fabrication additive (DFAM – *Design for Additive Manufacturing*). Cette partie présente quelques travaux existants ainsi que, selon nous, leurs avantages et leurs limites.

#### 3.1.1. Les règles de conception pour fabrication additive

Le développement de la fabrication additive offre beaucoup d'opportunités au concepteur dans la conception d'une pièce. Mais il y a aussi les contraintes liées aux procédés qui devront être respectées. Divers travaux ont proposé des règles pour aider les concepteurs à concevoir une pièce pour la fabrication additive. Ils incluent des guidelines de conception pour certains procédés de fabrication additive. Par exemple nous pouvons citer le travail de Kannan [71] qui vise un ensemble de procédés (voir ci-dessous). Par ailleurs, il existe des travaux qui donnent des règles de conception pour un procédé particulier, comme par exemple le travail de Daniel [72] qui concerne le procédé « Selective Laser Melting ».

Le travail de Kannan nous montre des guidelines générales de conception pour les procédés de fabrication additive comme « Fused Deposition Modeling » (FDM), « Stereolithography », « Polyjet », « Selective Laser Sintering » (SLS), « Direct Metal Laser Sintering » (DMLS). Selon Kannan, les caractéristiques les plus importantes que nous devons prendre en compte pour concevoir une pièce sont : la dimension maximale de cette pièce, le type de surface ayant besoin de supports, l'épaisseur minimum de la pièce.

- La dimension maximale de la pièce doit être inférieure à la capacité maximum de la machine.
- Les surfaces ayant besoin de supports : avec la fabrication additive, il est parfois nécessaire d'ajouter des supports pour fabriquer la pièce. La Figure 3-1 montre les surfaces ayant besoin de supports sur les procédés comme FDM/SLA/3DP. Par exemple, les surfaces dites négatives (negative draft), les surfaces en surplomb (overhang), les saignées (undercuts). C'est important d'ajouter le moins de supports possibles à cause de l'augmentation du coût matière et machine et du temps de fabrication. Par ailleurs, on a besoin aussi d'enlever ces supports après fabrication, ce qui génèrera du travail supplémentaire et donc du cout et du temps supplémentaire.

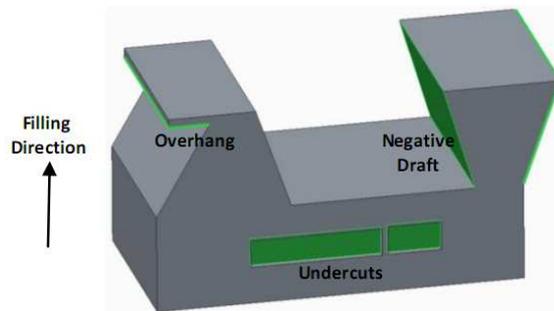


Figure 3-1. Les surfaces besoin des supports [71]

- L'épaisseur minimum de la pièce est dépendante du procédé de fabrication additive mais l'auteur ne précise pas les valeurs associées.

Les travaux de Daniel [72] proposent un ensemble des règles de conception pour la fabrication par « Selective Laser Melting (SLM) » qui permettent aux concepteurs de prendre en compte les caractéristiques de ce procédé lorsqu'ils conçoivent une pièce. Daniel nous montre comment les règles de conception ont été créées. Tout d'abord, les limites géométriques de SLM ont été évaluées au moyen d'une méthodologie expérimentale cyclique quantitative. L'orientation, les géométries fondamentales et les paramètres de la pièce ont été changés jusqu'à l'obtention d'un résultat optimal. Les règles de conception ont ensuite été créées et évaluées à travers une série d'entretiens avec des industriels et académiques professionnels de la conception. Par exemple, pour définir la distance minimum entre deux éléments, Daniel a fabriqué une série de cylindres ou de cubes avec différentes distances entre les deux éléments (Figure 3-2). A partir des résultats, Daniel propose une règle de distance minimum entre deux éléments qui est de 0,3mm (Figure 3-3).

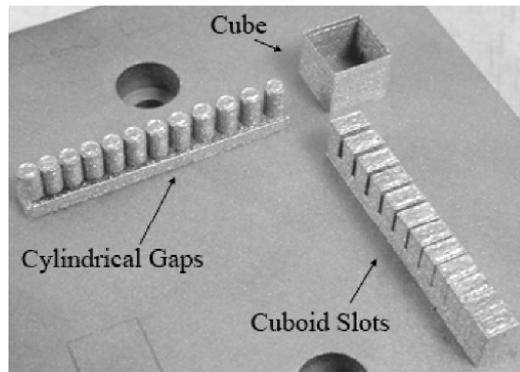


Figure 3-2. Étude expérimentale de la distance minimum entre deux éléments [72]

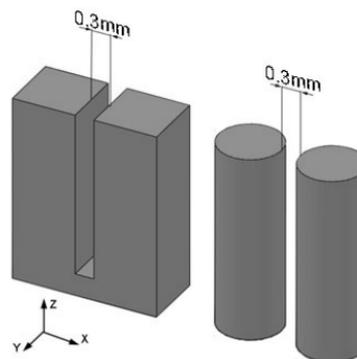


Figure 3-3. La distance minimum entre deux éléments est de 0,3mm [72]

Un autre exemple, pour définir le diamètre du trou en parallèle avec la direction de fabrication (selon z) sans avoir besoin des supports. Daniel a fabriqué une série de trous avec des diamètres différents (Figure 3-4). Le résultat lui permet de proposer un diamètre maximum pour les trous sans besoin de supports, qui est de 7 mm (Figure 3-5). En plus le diamètre minimal fabricable pour un trou est de 1mm.

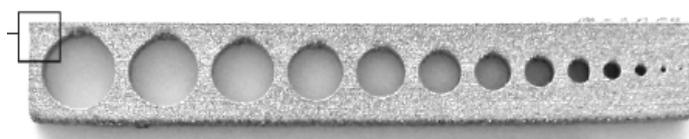


Figure 3-4. Étude expérimentale du diamètre du trou sans besoin de support

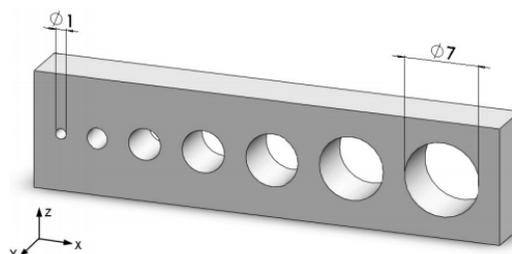


Figure 3-5. Le diamètre du trou sans besoin des supports

Les règles de conception issues de ces travaux nous permettent de prendre en compte les caractéristiques du procédé de fabrication additive lorsqu'on conçoit une

pièce, mais pour obtenir des formes de pièce que l'on a déjà définies. Ces règles de conception ne nous permettent pas de profiter pleinement de la liberté de forme permise par la fabrication additive.

### 3.1.2. Méthodologies de conception existantes pour la fabrication additive

L'objectif global des méthodologies de conception existantes est l'obtention d'une pièce optimale pour la fabrication additive. Il existe quelques méthodologies de conception différentes pour la fabrication additive. Chaque méthodologie a des intérêts et aussi des limites.

En 2011, Tomlin et al [73] proposent une méthodologie de reconception d'une pièce existante pour la réaliser dans un mode de fabrication additive (Figure 3-6a). Le cahier des charges fonctionnel nous donne des informations sur les fonctions à assurer par la pièce et sur les critères de performance quantifiés à respecter. Ceci conduit à définir les paramètres à prendre en compte et les grandeurs associées pour l'optimisation topologique, comme par exemple : le domaine de conception, le modèle des conditions aux limites, ainsi que l'objectif de l'optimisation. Le domaine de conception inclut des zones obligatoires (autour des surfaces fonctionnelles) et des zones autorisées (les zones de liberté par rapport au cahier des charges fonctionnel), (Figure 3-7a). Les objectifs les plus couramment visés pour l'optimisation topologique sont de minimiser la masse ou de maximiser la rigidité de la pièce.

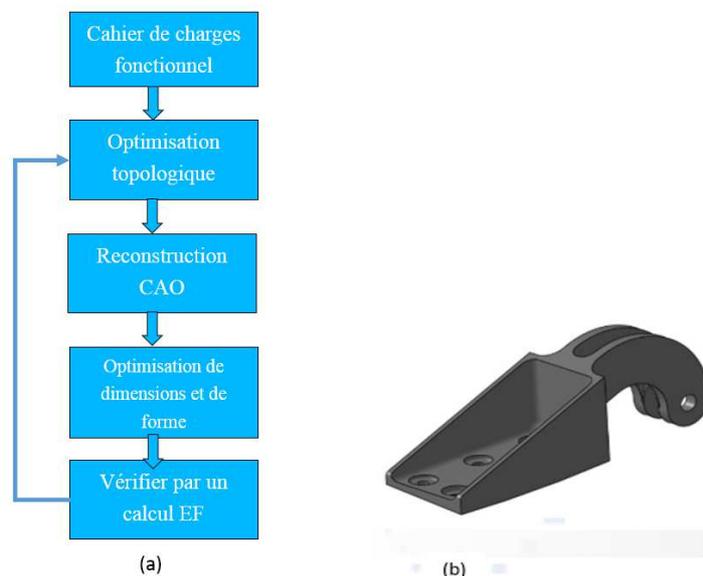


Figure 3-6. a) Méthodologie de conception; b) Pièce initiale pour étude de cas

Le résultat de l'optimisation topologique est une solution de répartition de la matière pour un objectif défini dans un domaine de conception donné. Selon Tomlin, le concepteur doit ensuite faire (sans préciser la méthode) une reconstruction du modèle CAO au plus proche du résultat de l'optimisation topologique en utilisant un

logiciel CAO classique. Ce modèle CAO nous permet de faire une optimisation des dimensions et de la forme de la pièce. Une étape de vérification par calcul EF est importante pour valider la pièce au regard de ses sollicitations mécaniques. Si la solution n'est pas adaptée au cahier des charges fonctionnel, par exemple si la pièce ne résiste pas, il faut refaire une boucle à partir de l'étape d'optimisation topologique avec un changement de volume de conception.

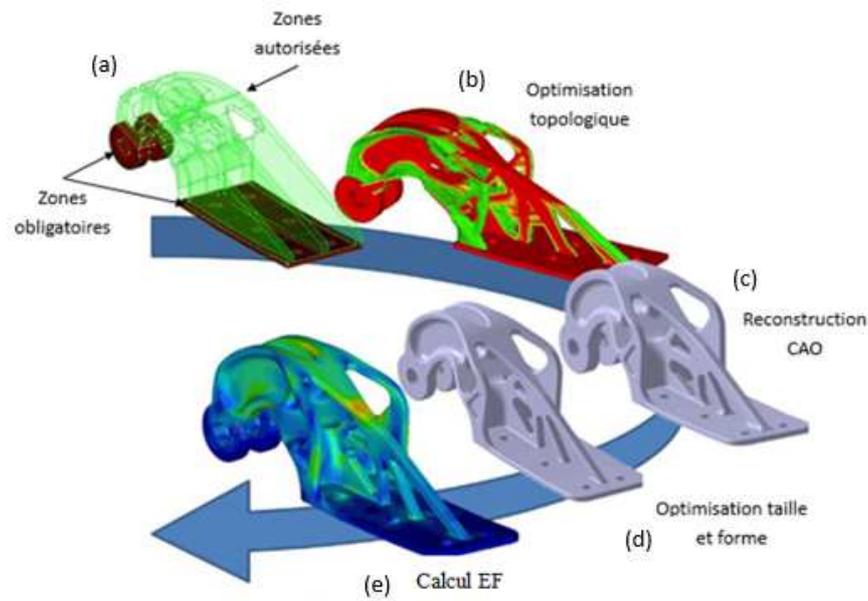


Figure 3-7. Appliqué la méthodologie à une étude de cas

L'étude de cas présentée est celle de la reconception d'une pièce aéronautique (support de charnière d'A320), initialement fabriquée par usinage, et dont la forme initiale est définie en Figure 3-6b. Le résultat de chaque étape dans la méthodologie de Tomlin est montré dans la Figure 3-7. Cette méthodologie nous permet de tirer profit de la liberté de la forme de la fabrication additive à partir de l'optimisation topologique. Mais le processus de conception ainsi décrit ne prend pas en compte les difficultés possibles associées à la fabrication.

En 2013, Rémi Ponche a proposé une autre méthodologie de conception pour la fabrication additive, appliquée au procédé de « Laser Metal Deposition » [74]. Cette démarche utilise l'optimisation topologique pour établir une géométrie théorique tout en tenant compte des contraintes de fabrication afin de concevoir des pièces fabricables (Figure 3-8). En plus, cette méthodologie intègre les informations et les connaissances du domaine de la machine de production et du cahier des charges fonctionnel à toutes les étapes dans le processus de conception.

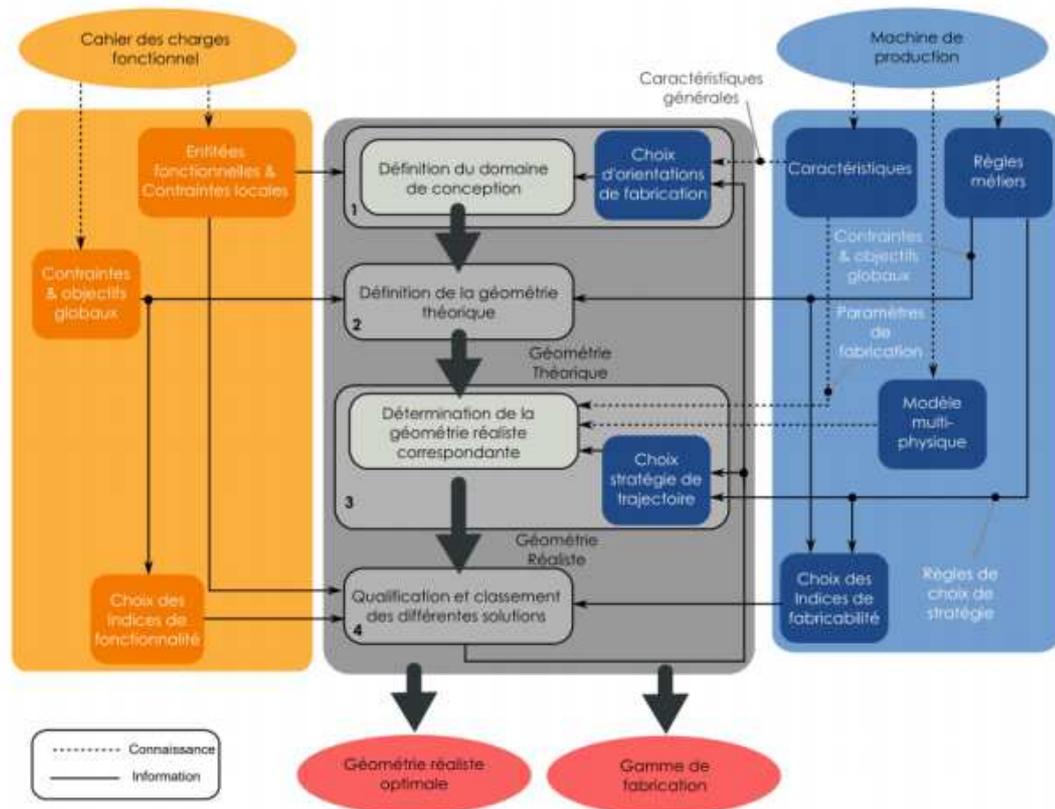


Figure 3-8. Méthodologie de conception pour la fabrication additive [74]

La démarche globale de Rémi Ponche est organisée en quatre principales étapes :

- **Définition du domaine de conception** : Le domaine de conception caractérise l'espace de matière possible constituant le produit final à concevoir. Il est composé de volumes obligatoires et de volumes admissibles. Le domaine de conception est défini à partir des informations du cahier des charges fonctionnel et du procédé de fabrication. L'ensemble des données nécessaires à définition du domaine de conception est synthétisé dans la Figure 3-9.

Le domaine procédé caractérise l'espace accessible par le procédé de fabrication et le domaine fonctionnel définit l'espace disponible à partir du cahier des charges fonctionnel. Le domaine fonctionnel est donné par les entités fonctionnelles du problème et les contraintes locales associées, Figure 3-10. Pour un problème de conception donné, le domaine procédé est défini par l'ensemble des volumes accessibles par le procédé et compatibles avec l'obtention des entités fonctionnelles, et par l'ensemble des volumes nécessitant obligatoirement de la matière pour s'assurer de respecter les spécifications associées aux entités fonctionnelles. Les

caractéristiques du procédé additif utilisé pour définir le domaine procédé sont la dimension minimale, l'espace de travail... (Figure 3-9).

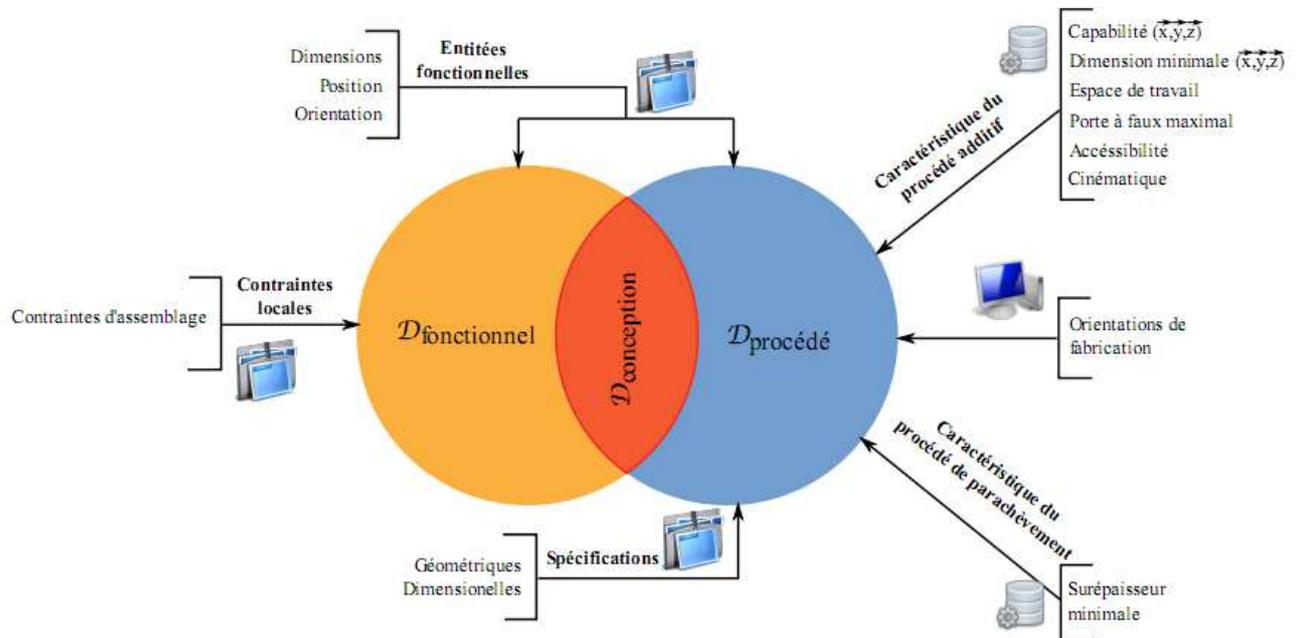


Figure 3-9. Schématisation de l'étape de définition du domaine de conception et des données nécessaire [74]

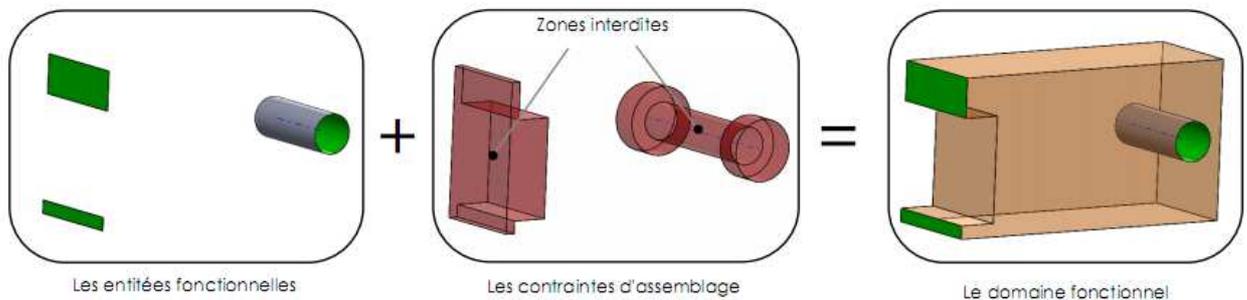


Figure 3-10. Illustration de la définition du domaine fonctionnel [74]

- Définition de la géométrie théorique : la géométrie théorique est le résultat de l'optimisation topologique s'appuyant sur le domaine de conception qui répond le mieux aux objectifs et contraintes globaux du problème de conception (Figure 3-11). Les contraintes et les objectifs sont définis par les informations du cahier des charges fonctionnel. Par exemple, l'objectif de minimiser le déplacement sous chargement. En plus, les contraintes viennent aussi de règles métiers liées au procédé additif utilisé. Par exemple minimiser la masse de la pièce, pour minimiser le temps et le coût de fabrication.

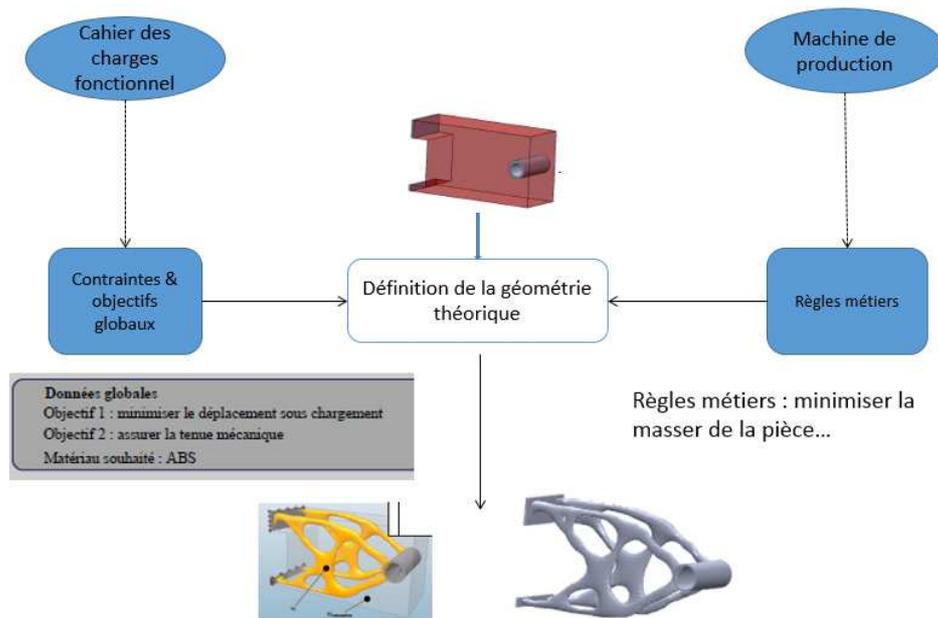


Figure 3-11. Définition de la géométrie théorique [74]

- Détermination de la géométrie réaliste : l'objectif de cette étape est de définir une géométrie de pièce réaliste vis-à-vis du procédé de fabrication, qui soit la plus proche possible de la géométrie théorique déterminée précédemment. Cette étape est un point clé de cette méthodologie. Dans cette étape, il y a une étude d'orientation de la pièce et une étude du choix des trajectoires de fabrication. En plus, pour assurer la fabricabilité de la pièce, il est nécessaire de simuler le processus de fabrication pour prendre en compte les phénomènes physiques et prédire le comportement réel de la pièce au cours de sa fabrication. Ces études sont montrées dans la Figure 3-12. Au début, il faut choisir une direction de fabrication de la pièce. Ensuite, il y a une étude de choix de la stratégie de trajectoire. Une fois que la trajectoire de fabrication a été choisie, le processus de fabrication additive doit être simulé pour définir la géométrie réaliste.

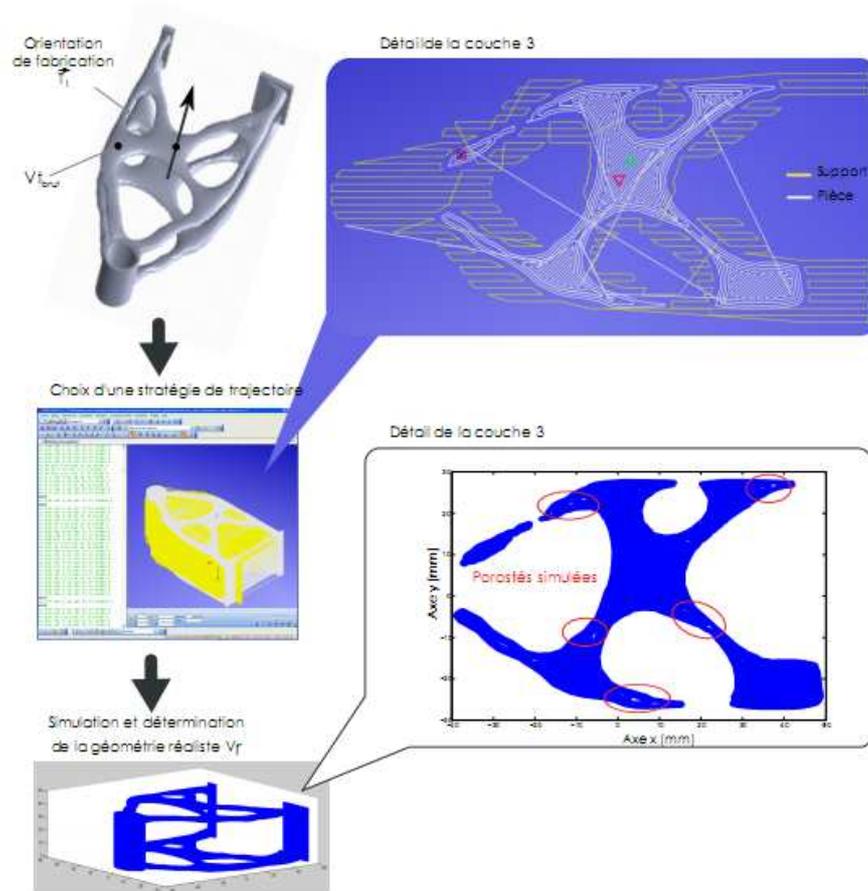


Figure 3-12. Détermination d'une géométrie réaliste [74]

- Qualification et classement des différentes solutions : la géométrie obtenue correspond à une combinaison de choix d'orientations de fabrication et de choix de trajectoires de fabrication. Il est donc possible, avec des combinaisons de stratégies différentes, de déterminer plusieurs géométries pour un même problème initial. L'objectif de la dernière étape de la méthodologie est de classer ces différentes possibilités géométriques au regard du respect des contraintes issues du cahier des charges fonctionnel et des règles du procédé.

Au-delà de la prise en compte des fonctionnalités de la pièce, la démarche de Rémi Ponche a deux objectifs complémentaires :

- Aider le concepteur à tirer l'avantage de la fabrication additive, par l'accès à des formes de pièces performantes pour l'usage prévu, tout en étant bien adaptées à la technologie de production choisie ;
- Intégrer les caractéristiques du procédé au plus tôt dans la démarche de conception.

En 2014, Benjamin Vayre [75] a proposé une démarche de conception de produit fabriqué par EBM (Electron Beam Melting). Selon son auteur, cette démarche doit apporter des réponses aux trois points suivants : la prise en compte des contraintes de fabrication, l'utilisation des nouvelles possibilités de fabrication additive et l'optimisation de la géométrie au regard du cahier des charges fonctionnel. La Figure 3-13 montre les 4 étapes principales de la méthodologie : génération de la forme initiale, choix du balançage, raffinement de la géométrie et validation de la pièce.

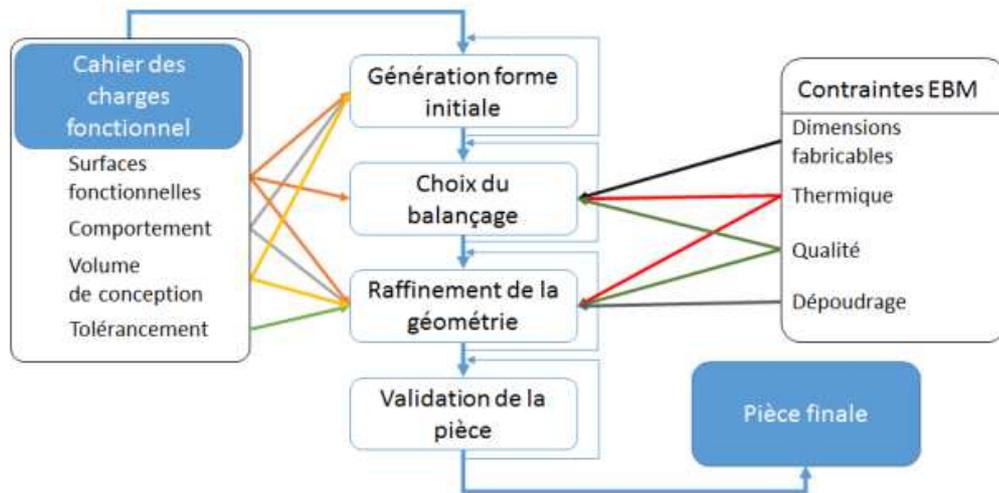


Figure 3-13. Représentation schématique de la démarche de conception proposée [75]

L'objectif de l'étape de génération de la forme initiale est d'obtenir un ou plusieurs modèles géométriques tridimensionnels. Cette étape est guidée par les informations du cahier des charges fonctionnel comme les surfaces fonctionnelles, le comportement attendu et le volume de conception disponible. La Figure 3-14 montre l'exemple de la conception d'une équerre devant relier deux plaques en transmettant des efforts importants. Pour définir les géométries, le concepteur peut se baser sur une approche dite guidée (Figure 3-14a), ou sur un outil d'optimisation topologique (Figure 3-14b). Dans l'approche « guidée », le concepteur s'appuie sur une représentation des surfaces fonctionnelles qu'il relie par un squelette géométrique représentant les flux d'efforts, de contraintes, ou d'énergie transitant entre ces surfaces fonctionnelles. Il construit alors la géométrie volumique en s'inspirant de cette représentation. Dans le principe de l'approche par optimisation topologique, partant d'une description numérique des surfaces fonctionnelles, des volumes autorisés et des chargements mécaniques, un logiciel propose une distribution « optimale » de densité de matière utile. Le choix d'un seuil de densité permet alors au concepteur d'obtenir une surface frontière de la pièce en supprimant la matière des zones peu denses, et en conservant la matière dans le reste du volume initial.

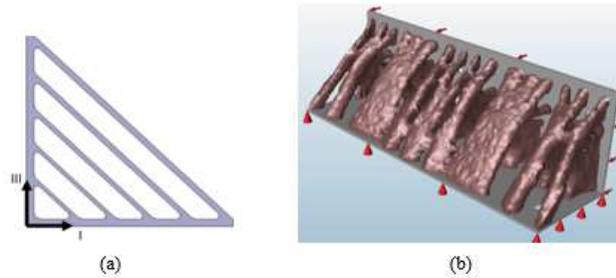


Figure 3-14. Génération de forme initiale (a) approche guidée; (b) approche optimisation topologique [75]

Le balançage de la pièce est une manière de positionner la pièce sur la plaque de fabrication. Il existe plusieurs possibilités de balançage d'une pièce (Figure 3-15). Le choix du balançage des pièces est étudié par Vayre selon plusieurs aspects comme : les dimensions de la pièce par rapport au volume fabricable, la fabricabilité, le délai d'obtention des pièces, le cout de revient des pièces et la qualité des surfaces.

- Dimensions de la pièce : il est nécessaire de choisir le balançage pour que la pièce soit contenue dans le volume de fabrication de la machine. Ou que le positionnement de l'ensemble des pièces fabriquées soit optimisé si on fabrique un lot de pièces.
- Fabricabilité : nous devons tenir compte des règles de fabrication pendant le balançage. C'est-à-dire nous choisissons la possibilité qui évite au maximum les risques de déformations thermiques et de présence de porosités. Par exemple, pour la pièce en forme de 'L' (Figure 3-15), les balançages « a » et « d » conduisent à la présence de surfaces négatives, en dévers, ce qui rend plus complexe la fabrication de la pièce et nécessite des supports. Ces deux balançages sont donc à éviter.
- Le délai d'obtention de la pièce : lors de la réalisation d'une seule pièce, l'orientation qui donne le temps de fabrication le plus court est celle qui minimise la hauteur selon l'axe vertical. par exemple, c'est les cas « d » et « e » dans Figure 3-15 qui sont optimaux selon ce critère. Lors de la réalisation d'une série de pièces, le nombre de pièces réalisées dans une fabrication est important car le temps de fabrication d'une pièce est réduit. Sur la Figure 3-15, selon Vayre, le cas « c » est le balançage qui permet de réaliser le plus de pièces.
- Le cout de revient des pièces dépend du cout d'utilisation machine et du cout de main d'œuvre. L'influence du balançage des pièces sur leur cout est liée à la fabricabilité (en raison du cout des opérations comme usinage, retrait des supports, etc.) et au délai d'obtention de la pièce (minimiser le délai pour minimiser le cout de revient des pièces). Selon

Vayre, les cas « c » et « e » répondent à ces critères suivant le contexte de la fabrication (éviter les surfaces négatives et minimiser le délai d'obtention de la pièce).

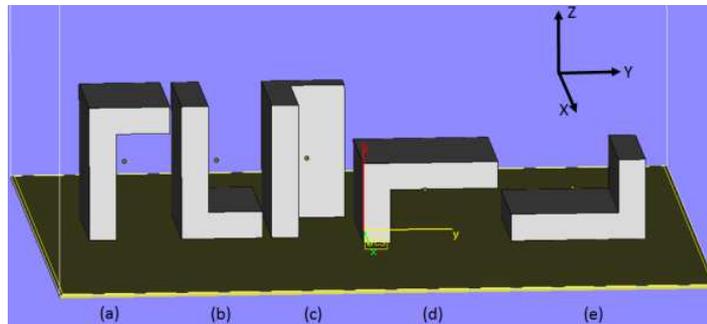


Figure 3-15. Balançages possibles pour une pièce en forme de 'L' [75]

Le raffinement de la géométrie est une étape de reconstruction d'une géométrie par rapport à la forme générée initialement en prenant en compte les contraintes du procédé EBM (la thermique, la qualité de surface et le dépoudrage) et les informations du cahier des charges fonctionnel (les surfaces fonctionnelles, le volume de conception, le comportement souhaité et le tolérancement). La première partie de cette étape est de reconstruire un modèle 3D, en utilisant un outil CAO classique, proche de cette forme initiale. Dans un deuxième temps est proposée une optimisation paramétrique de la pièce avec des paramètres définis lorsqu'on reconstruit la pièce. Le concepteur doit choisir un objectif de minimiser ou maximiser une valeur cible pour l'optimisation paramétrique, par exemple minimiser la masse de la pièce. La Figure 3-16 montre la géométrie après reconstruction géométrique puis optimisation paramétrique, à partir du résultat de l'optimisation topologique (Figure 3-14b).

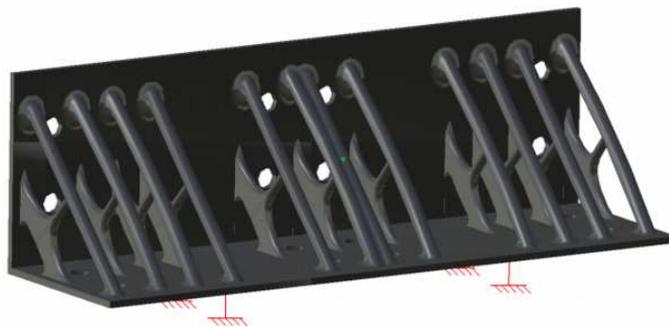


Figure 3-16. Forme reconçue à partir le résultat obtenu par optimisation topologique [75]

La dernière étape est la validation de la géométrie. Si il a obtenu plusieurs géométries, le concepteur va choisir la géométrie la plus pertinente en comparant ces solutions au regard de l'adaptation au cahier des charges fonctionnel et au procédé.

La démarche de Benjamin Vayre aide le concepteur à concevoir une pièce en prenant en compte les caractéristiques du procédé de fabrication additive (procédé EBM) et les contraintes du cahier des charges fonctionnel. En plus, il propose deux approches pour définir la forme initiale de la pièce : l'approche guidée et l'approche de l'optimisation topologique.

### **3.1.3. La synthèse**

Aujourd'hui, Il y a peu de travaux sur la méthodologie de conception pour la fabrication additive. Les méthodologies existantes ont comme objectif de tirer parti des avantages de cette technologie. Certaines méthodologies sont concentrées sur l'intégration des règles métiers du procédé et sont applicables à un seul procédé. Il y a des méthodologies qui utilisent l'optimisation topologique pour chercher des géométries possibles de la pièce mais le travail sur cet outil est très peu approfondi. Nous n'avons pas trouvé une méthodologie globale de conception pour plusieurs procédés de fabrication additive qui nous permettrait d'obtenir les géométries possibles de la pièce en prenant en compte la liberté proposée par la fabrication additive. Mais à partir des travaux existants, nous pouvons mettre en évidence une démarche (Figure 3-17) avec les étapes principales suivantes pour concevoir une pièce pour la fabrication additive comme :

- la génération la forme initiale (Vayre a proposé deux approches, approche guidée et approche de l'optimisation topologique),
- la reconstruction du modèle 3D CAO (comme Tomlin et Vayre),
- l'évaluation ou la validation de la pièce au regard du critère de comportement en usage et lors de la fabrication (comme les trois méthodologies citées ci-dessus).

Cette démarche permet d'intégrer dans chacune de ses étapes les informations du cahier de charges fonctionnel, tout en profitant des libertés offertes par le procédé et en tenant compte néanmoins ses contraintes spécifiques.

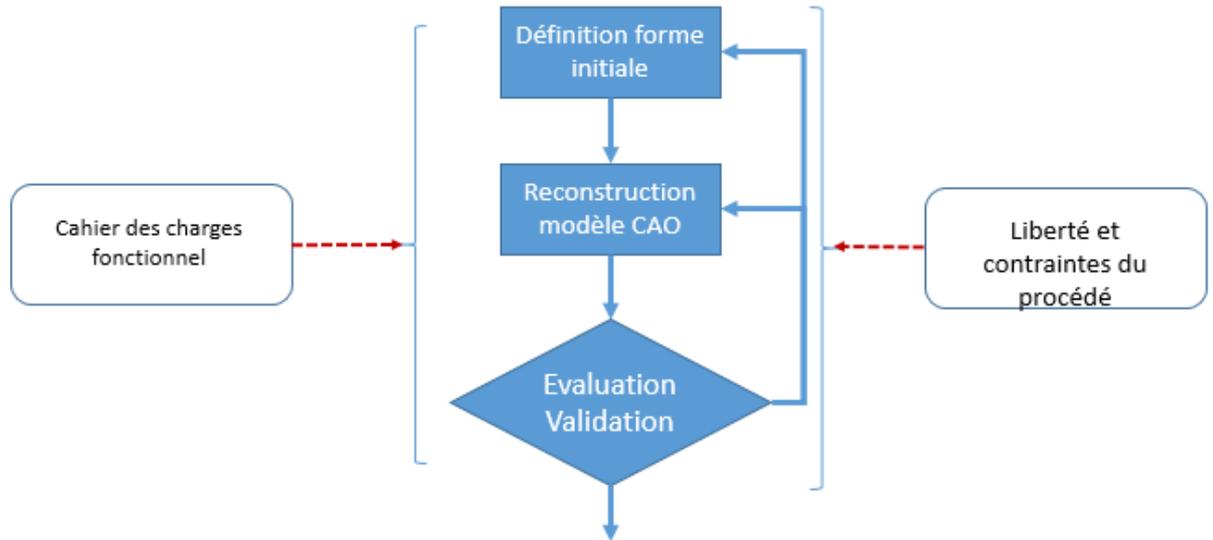


Figure 3-17: Démarche proposée à l'issue de l'état de l'art pour concevoir une pièce par fabrication additive

Afin de tester et affiner ce modèle, nous avons fait une étude de cas sur une pièce industrielle, étude appliquée sur le procédé EBM (Electron Beam Melting).

### 3.2. Etude de cas (Descriptive Study 1a)

#### 3.2.1. Présentation étude de cas

Cette étude de cas va nous permettre de tester les étapes proposées par les sources bibliographiques précédentes, en les mettant en situation réelle. Nous pourrions alors proposer un processus de conception de pièce pour la fabrication additive affiné dans ces macro-étapes proposées à partir de la bibliographie. Dans cette partie, nous présentons cette étude de cas réalisée en contexte industriel. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons pas détailler la fonction et le domaine d'application de cette pièce, mais nous nous concentrerons sur la méthode de reconstruction de la pièce. Nous devons reconcevoir une pièce (Figure 3-18) pour la fabriquer par le procédé EBM.

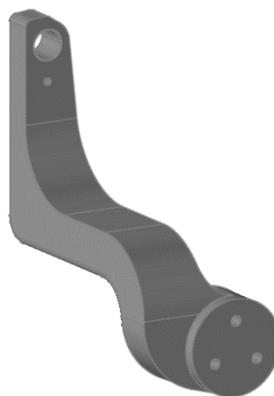


Figure 3-18: Pièce à reconcevoir

Au début, le client nous a fourni un cahier de charges fonctionnel avec les informations suivantes :

- La pièce initiale (Figure 3-18), fabriquée par un procédé traditionnel : l'usinage dans la masse
- Des conditions aux limites : on a trois cas de chargements correspondant à trois phases d'usage de la pièce
- L'objectif global de la nouvelle pièce : 30% de réduction de la masse, mêmes fonctions que la pièce initiale.
- Les surfaces fonctionnelles (détaillées à la suite)
- Un assemblage qui nous montre les liaisons entre notre pièce et les pièces voisines. Ces informations nous donnent une vue 3D avec les volumes « interdits ».
- Délai d'obtention de la pièce : dans 3 mois

### *3.2.2. La démarche de conception d'une pièce pour la fabrication additive EBM*

Nous avons commencé notre travail par une étude des contraintes et des caractéristiques de la machine EBM disponible, comme proposé par Vayre [76] en 2014. Ce sont des facteurs qui influent sur la conception des produits fabriqués par la technologie EBM. Les caractéristiques de la machine EBM sont : le volume fabricable, qui conditionne les dimensions maximales des pièces réalisables, et les dimensions fabricables minimales des entités géométriques. En plus, il faut prendre en compte, lors de la conception d'un produit, les contraintes comme : le dépoufrage, le balançage, l'action de mettre et enlever les supports.

Au début du projet, nous avons pris en compte les informations du cahier des charges fonctionnel fourni par le client et les informations importantes du procédé de fabrication. Ensuite, nous avons continué par une optimisation topologique pour chercher la géométrie optimale de la pièce.

#### *3.2.2.1. Définition de la forme par l'optimisation topologique :*

On peut voir dans la [Figure 3-19](#) la démarche globale que nous avons suivie, incluant l'optimisation topologique.

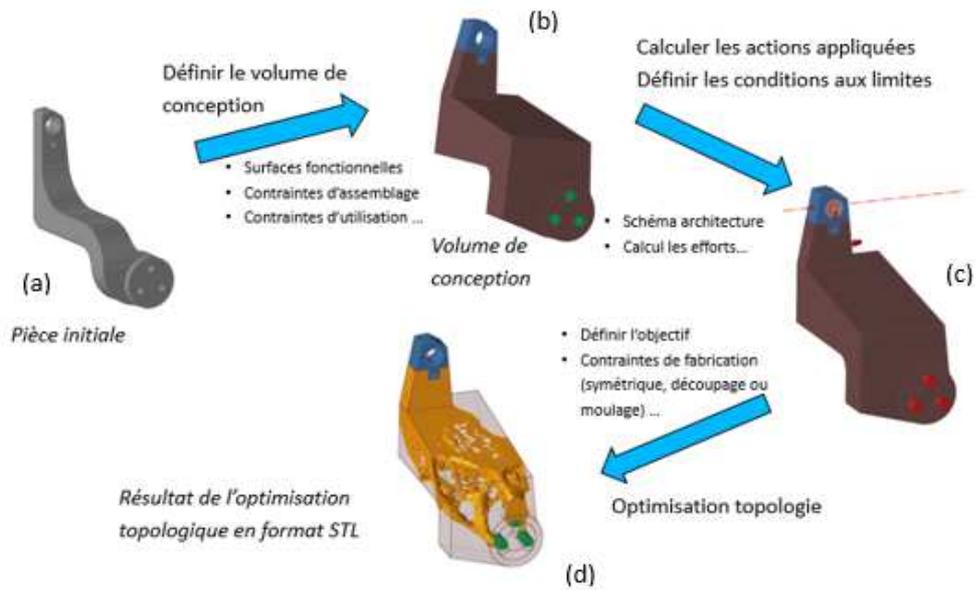


Figure 3-19: L'optimisation topologique

Nous avons au début défini le volume de conception. Le volume de conception inclut les volumes définis par les surfaces fonctionnelles et l'espace de conception, Figure 3-20. Dans cette étude, les surfaces fonctionnelles viennent du cahier des charges fonctionnel. L'espace de conception est défini par les espaces disponibles autour de la pièce initiale dans l'assemblage et l'utilisation du système.

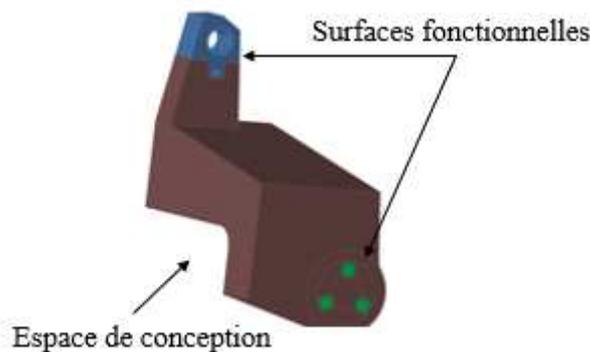


Figure 3-20: Volume de conception

Ensuite, nous avons calculé les actions appliquées à la pièce pour définir le modèle des conditions aux limites. C'est important de définir le modèle des conditions aux limites aussi proche que possible des conditions réelles, ce qui conditionne la qualité et la validité du résultat de l'optimisation topologique.

On lance ensuite l'optimisation topologique avec un objectif de réduction de 40% de la masse par rapport à la masse de la pièce initiale (30% qui est l'objectif affiché, plus 10% pour avoir la capacité d'ajouter de la matière, notamment des congés lorsqu'on

reconstruit la pièce). Un des paramètres pour l'optimisation topologique est l'épaisseur minimale de la pièce. C'est-à-dire que le logiciel va éviter dans le résultat toutes les zones qui sont d'épaisseur inférieure à l'épaisseur minimale. Donc, nous devons choisir une valeur supérieure à la dimension minimale fabricable par la machine de fabrication (0,7mm avec la machine EBM). On obtient alors un résultat de l'optimisation topologique identique à celui que montre l'image Figure 3-19d.

Une évaluation externe est planifiée, au cours de laquelle on présente le résultat de l'optimisation topologique à notre équipe client, incluant son designer. Cette réunion nous permet d'avoir les retours du client au sujet du résultat de cette optimisation topologique (Figure 3-21).

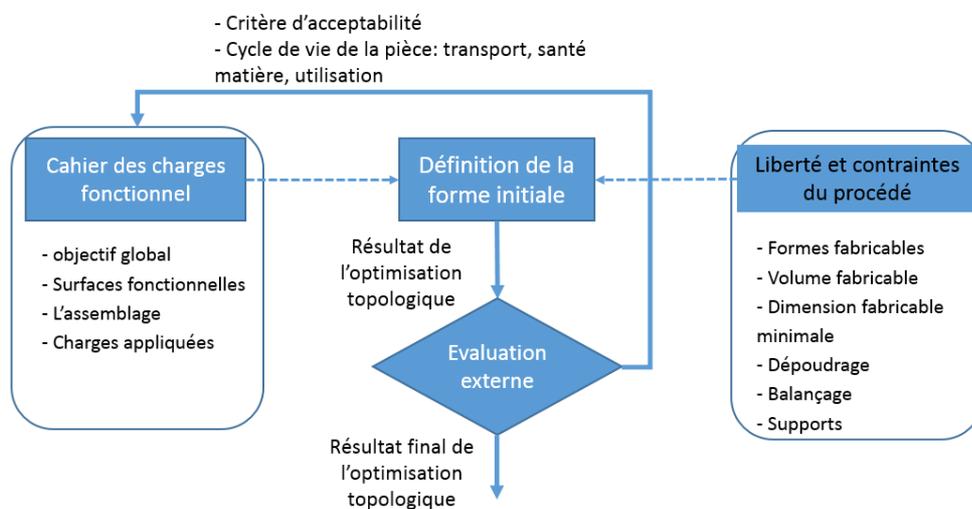


Figure 3-21: Modèle de l'étape de définition de la forme initiale

Deux critères sont au cœur de la discussion durant notre évaluation externe : l'acceptabilité et le cycle de vie de la pièce. L'optimisation topologique nous propose une forme très rudimentaire (Figure 3-19d). L'acceptabilité du client relative à la forme de la pièce est un retour important : cette forme est-elle acceptable au regard de la culture personnelle, sociale, technique de nos clients ? Nous avons discuté aussi avec notre client du cycle de vie de la pièce en nous concentrant sur des étapes autres que l'utilisation comme le transport, le contrôle dimensionnel et santé matière (de défauts, de porosités, de particules ou autres anomalies que peuvent comporter les pièces). Ces critères doivent être intégrés au Cahier des charges fonctionnel. Tout comme sont à ajouter des critères relatifs à la modification possible de quelques pièces voisines pour augmenter notre volume de conception, ou des critères d'utilisation (comme éviter les surfaces qui risquent d'accumuler les poussières pendant l'utilisation). A partir de ces nouvelles informations intégrées au cahier des charges, on a bouclé cette étape par une optimisation topologique avec de nouveaux paramètres, par exemple, on a changé le volume de conception. Le Figure 3-22 nous

montre deux résultats différents de l'optimisation topologique lorsqu'on change le volume de conception, les surfaces fonctionnelles et l'épaisseur minimale de la pièce. Une fois que le résultat de l'optimisation topologique est validé par une nouvelle étape d'évaluation externe, nous passons à l'étape suivante : la reconstruction du modèle CAO 3D.

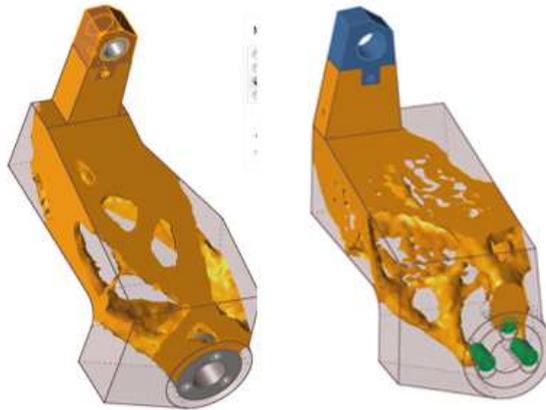


Figure 3-22: Les résultats différents de l'optimisation topologique

On remarque que le résultat de l'optimisation topologique, Figure 3-19d, comporte de nombreuses irrégularités (trous, branches fines, branches non connectées, etc.) qui ne permettent pas d'envisager une fabrication directe de cette géométrie pour être présentée au client. Donc, une étape de reconstruction est nécessaire dans notre processus.

#### 3.2.2.2. Reconstruction du modèle 3D

Dans cette étape, nous cherchons à reconstruire un modèle CAO 3D à partir du résultat de l'optimisation topologique, Figure 3-23a. Dans notre cas, nous avons essayé deux méthodes pour reconcevoir la pièce.

Nous avons utilisé des logiciels comme Meshlab et Magics qui travaillent sur des maillages pour lisser les surfaces et corriger les défauts du résultat de l'optimisation topologique, par exemple enlever les petits morceaux ou remplir les surfaces, les trous...etc. Cette méthode vise à trouver une méthode rapide qui nous permette d'avoir un modèle géométrique acceptable par le client et directement imprimable, Figure 3-23b.

La deuxième méthode est de reconcevoir la pièce à partir de l'utilisation des logiciels CAO classiques. On importe le résultat de l'optimisation topologique dans un logiciel CAO (Catia par exemple). Nous considérons ce résultat 3D comme une forme de référence dont nous pouvons nous inspirer pour reconcevoir la pièce. On utilise les opérations surfaciques ou volumiques pour reconcevoir les éléments de notre pièce à

partir des résultats proposés par l'optimisation topologique. C'est-à-dire qu'on crée les volumes fonctionnels et les liens entre eux afin qu'ils se superposent avec le résultat de l'optimisation topologique. On peut utiliser les opérations habituelles d'extrusion ou de révolution, ou encore de lissage par plusieurs sections ou de balayage avec une esquisse et une courbe guide. L'objectif est de créer un volume le plus proche possible de la proposition de l'optimisation topologique mais qui est plus lisse dans ses formes et qui retrouve une allure plus habituelle d'objet modélisé en CAO. Ensuite, nous avons ajouté les congés pour éviter les concentrations de contrainte, Figure 3-23c.

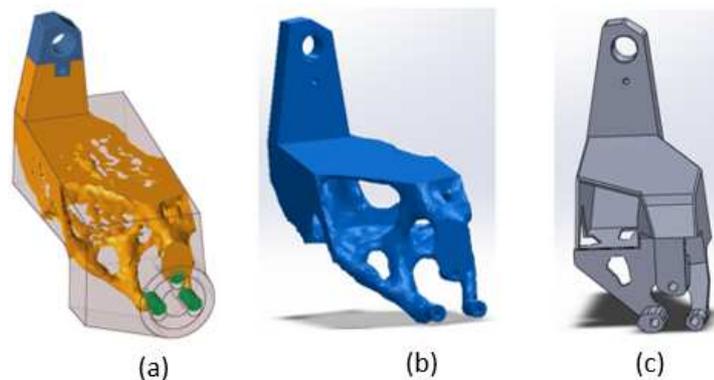


Figure 3-23: Les modèle 3D

La qualité des surfaces du modèle redessiné entièrement dans le logiciel CAO classique est perçue par le concepteur comme meilleure que celle du modèle après simple lissage du maillage. Mais le temps pour reconcevoir la pièce dans logiciel CAO est plus long (2 jours) que celui nécessaire au travail de lissage du maillage (une demi-journée). C'est par ailleurs une méthode très empirique qui conduit au résultat.

A la suite de ce travail, nous avons eu une évaluation externe avec le client à partir de notre modèle CAO, Figure 3-24. Les retours importants de la discussion avec l'équipe client concernent la rigidité et la contrôlabilité de la pièce. Pour la rigidité de la pièce, le client nous demande d'ajouter des renforts dans les zones d'apparence fragiles de la pièce qui peuvent être cassées (de son point de vue) par l'utilisateur lors de manipulations diverses au cours de la vie du produit. Pour ce qui est de la contrôlabilité de la pièce, nous ne pouvons pas à ce moment définir exactement cette notion (contrôlabilité) mais c'est important de le prendre en compte lorsqu'on reconçoit une pièce pour la fabrication additive. Ce peut être par exemple la mesure des dimensions ou des tolérances admissibles. Dans notre étude de cas, nous ne pouvons pas contrôler les dimensions du modèle issu de la méthode de reconstruction sans recours à la modélisation CAO, Figure 3-23b. Et pour le modèle issu de la méthode de reconstruction CAO classique, nous pouvons mesurer les

dimensions, les positions mais juste pour les surfaces canoniques (plan, cylindre...). En plus, il nous reste plusieurs difficultés à étudier, par exemple, comment contrôler les formes obtenues par balayage ou les facettes quelconques, et comment spécifier les déviations admissibles. Suite à la discussion avec nos clients, en tenant en compte des critères de contrôlabilité et d'acceptabilité, nous avons finalement décidé de continuer avec le modèle issu de reconstruction CAO classique.

Les retours de l'étape d'évaluation externe nous permettent de modifier le modèle CAO (pour assurer la rigidité de la pièce) ou d'ajouter des informations supplémentaires dans le cahier de charges fonctionnel (critère de contrôlabilité).

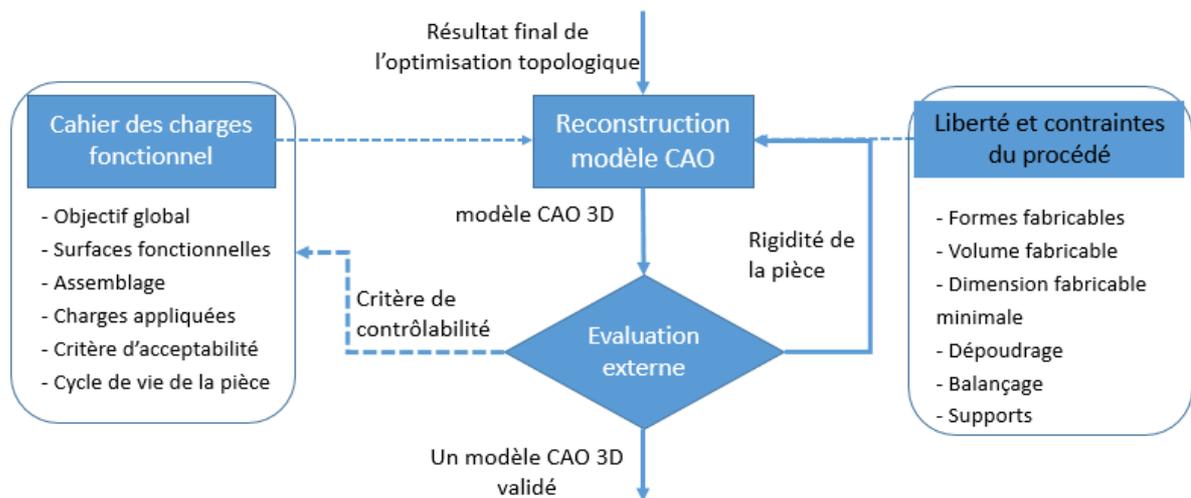


Figure 3-24: Boucle de reconstruction modèle CAO 3D

### 3.2.2.3. Evaluation de la pièce :

Cette étape nous permet d'évaluer la solution qu'on a proposée pour obtenir le produit final, comme décrit dans la Figure 3-25. Dans notre cas, on a évalué la résistance de notre solution par un calcul éléments finis. A partir du résultat du calcul élément finis, nous faisons une évaluation interne, dans notre équipe, qui nous permet d'analyser le résultat du calcul éléments finis. On peut modifier notre modèle CAO à la suite et refaire le calcul jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable. Par exemple, on peut augmenter les dimensions dans les zones trop contraintes, et on peut enlever de la matière dans les zones moins contraintes.

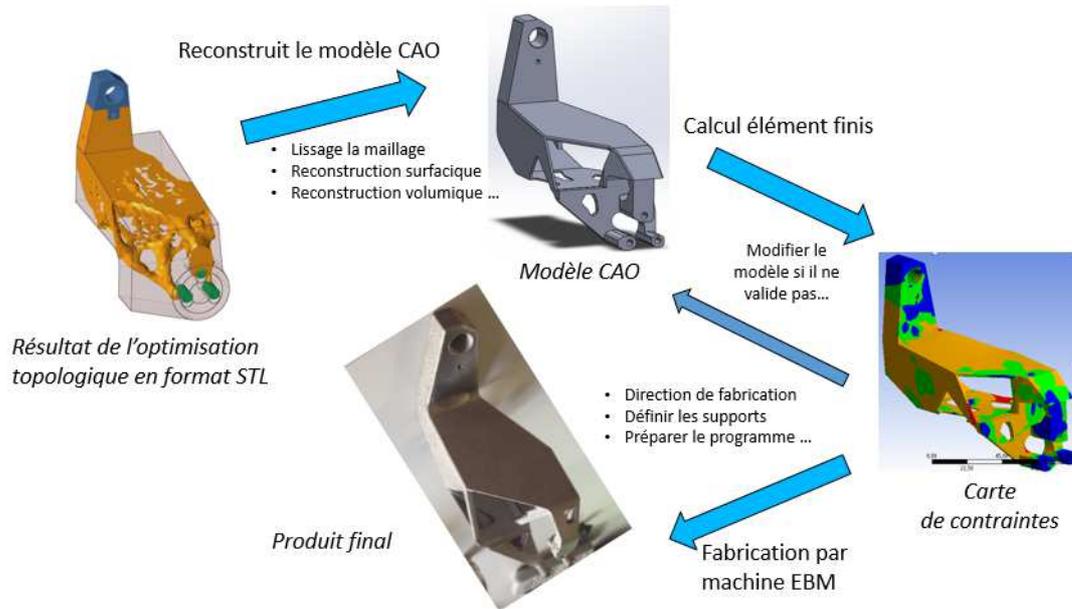


Figure 3-25: Evaluer ou valider et finaliser la conception de la pièce

Nous avons montré le résultat du calcul éléments finis au client, lors d'une nouvelle revue de projet, pour discuter et recevoir des retours d'experts de ce type de pièces, Figure 3-26. Ils nous ont proposé d'enlever de la matière ou d'intégrer des treillis dans les zones moins contraintes pour gagner encore de la masse. Une fois trouvée la solution la plus optimale (qui est évaluée par un calcul éléments finis), on évalue les autres comportements liés à la fabrication de la pièce comme la fabricabilité par le procédé EBM ou la finition (usinage des zones fonctionnelles). Pour l'évaluation du comportement envisagé lors de la fabrication, nous avons fait des évaluations internes à notre équipe et aussi une évaluation externe avec les fabricants chargés de la finition de la pièce. Les retours de ces évaluations nous permettent de modifier encore une fois le modèle CAO et aussi d'ajouter des informations dans le cahier des charges fonctionnel, par exemple les critères liés avec l'usinage comme le maintien ou la mise en position de la pièce.

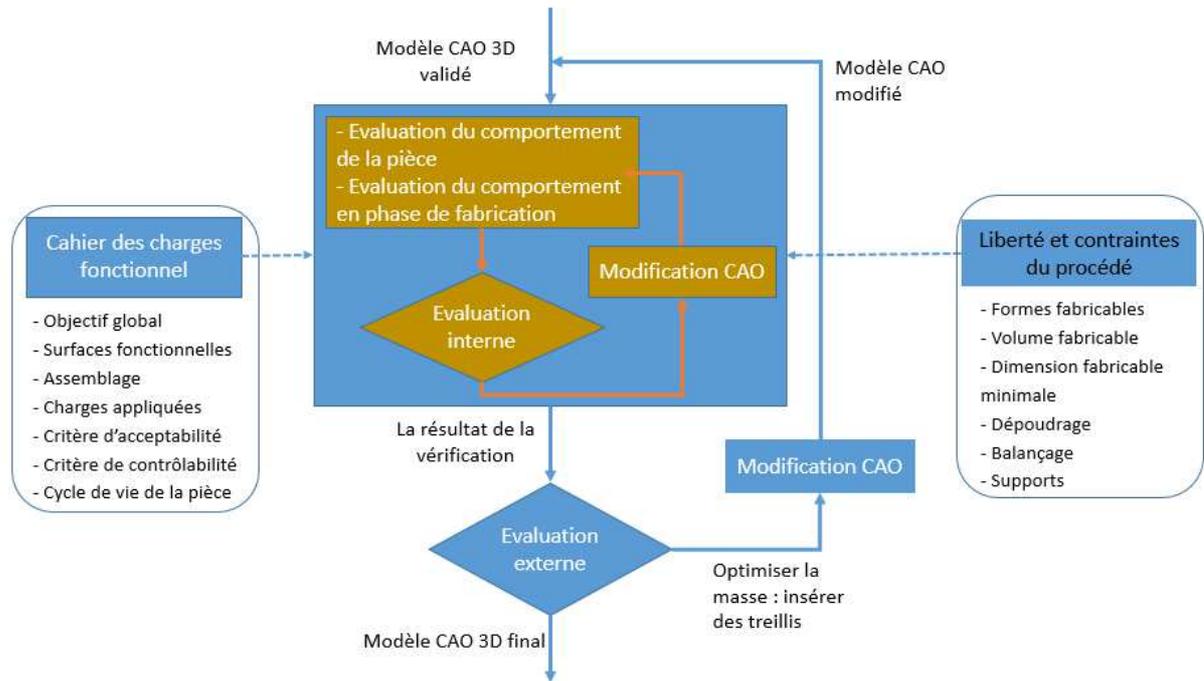


Figure 3-26: Boucle d'évaluation de la pièce

### 3.2.3. Résultat

On a obtenu une pièce finale avec une réduction de 32% de la masse par rapport à la pièce initiale et qui répond à un cahier des charges fonctionnel ayant évolué avec l'apport de critères client.

Cette étude de cas nous a permis de comprendre et de formaliser les étapes principales du processus de conception pour la fabrication additive dans le contexte d'une application réelle. En sortie de cette étude, nous pouvons exprimer les remarques suivantes :

- L'optimisation topologique est un outil qui propose des géométries avec lesquelles on peut tirer profit de la liberté de la forme de la fabrication additive.
- L'évaluation externe est importante, à la fin de chaque étape, par notre équipe client.
- L'étape de reconstruction de la pièce à partir du résultat de l'optimisation topologique n'est pas facile et prend un temps important (de 2 à 3 jours).

### 3.3. Une proposition de processus de conception pour la fabrication additive (Prescriptive Study 1a)

Après une étude bibliographique du processus de conception pour la fabrication additive et notre étude de cas, nous proposons un modèle de processus de conception qui permet de réaliser une pièce par fabrication additive (appliqué au procédé EBM) à partir d'un cahier des charges fonctionnel, Figure 3-27.

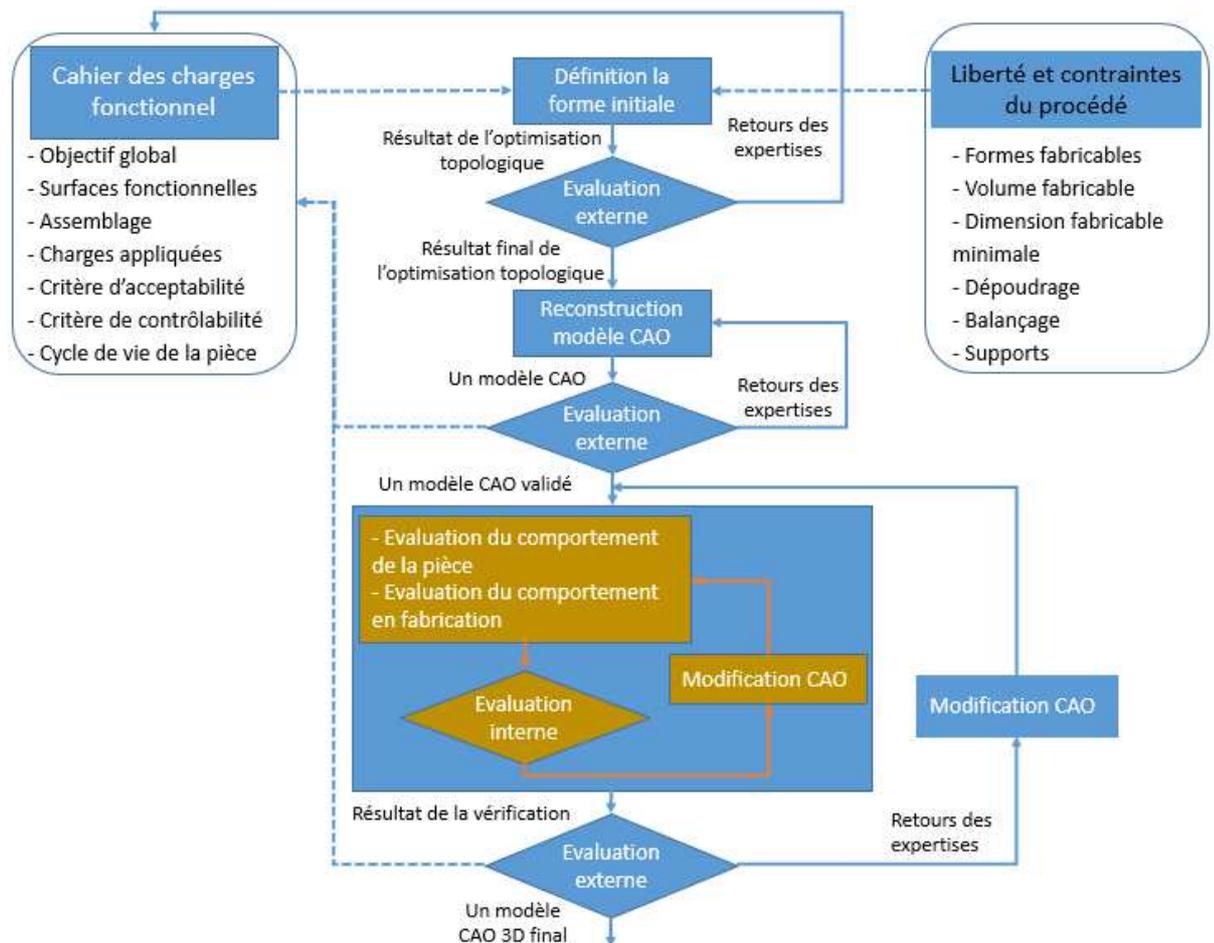


Figure 3-27: Proposition d'un processus de conception pour la fabrication additive

Il y a 3 étapes principales dans notre processus : définition de la forme initiale, reconstruction d'un modèle 3D et évaluation du comportement de la pièce et du comportement en cours de fabrication. Dans ce processus, un point important est l'étape d'évaluation externe à la fin de chaque étape principale. Une étape d'évaluation externe est une discussion avec notre équipe client ou avec d'autres experts pour évaluer le résultat de chaque étape dans notre processus.

- Définition de la forme initiale : c'est la première étape importante dans le processus de conception pour la fabrication additive. L'optimisation topologique permet d'obtenir une proposition de géométrie pour la pièce. Dans cette étape, nous devons définir l'espace fonctionnel, l'espace de

conception, le modèle mécanique des conditions aux limites et l'objectif de l'optimisation. Les espaces fonctionnels sont des espaces autour desquels on construit des zones que l'on est obligé de garder dans la nouvelle pièce parce que ce sont des interfaces avec d'autres pièces. L'espace de conception est constitué des zones libres où on peut (ou le logiciel peut) répartir de la matière. L'espace de conception est défini à partir des informations du cahier des charges fonctionnel, prenant en compte des critères comme l'assemblage et/ou l'utilisation du système. Les conditions aux limites sont dépendantes des charges appliquées au système complet. L'étape d'évaluation externe à la fin cette étape permet aux acteurs du projet, et notamment le client, de proposer des modifications au résultat de l'optimisation topologique ou d'ajouter des informations supplémentaires dans le cahier des charges fonctionnel.

- La reconstruction d'un modèle 3D : l'objectif de cette étape est la création d'un modèle 3D CAO à partir du résultat de l'optimisation topologique. Il y a deux méthodes qui nous permettent de réaliser cette étape (Figure 3-28). Par la première méthode nous pouvons lisser et corriger les maillages du résultat de l'optimisation topologique pour obtenir un modèle CAO dont nous pouvons envisager la fabrication. Nous utilisons des logiciels capables de traiter les maillages comme Meshlab, Magic... Cette méthode est assez rapide (dépendant de la complexité de la pièce, 0,5 à 1 jour pour notre étude de cas). Pour la deuxième méthode, nous pouvons utiliser les logiciels CAO classiques pour dessiner la pièce manuellement en s'appuyant sur le résultat de l'optimisation topologique. Un avantage de créer la pièce par cette deuxième méthode est la définition des paramètres pour contrôler ou faire une optimisation paramétrique de notre pièce par la suite. En plus, avec cette méthode, nous pouvons prendre en compte les libertés et limites du procédé comme le dépoudrage, la dimension fabricable minimale. Mais cette méthode est assez longue (dépendant de la complexité de la pièce, 2 à 3 jours pour notre étude de cas).

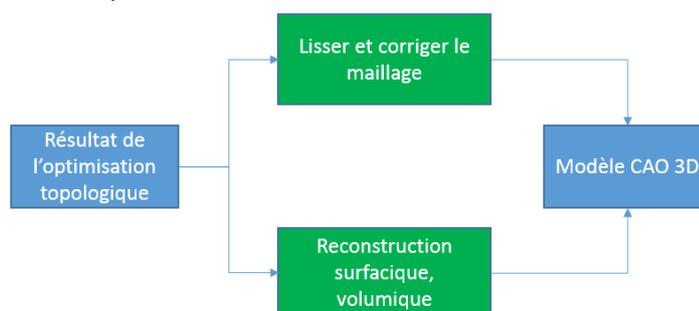


Figure 3-28: Méthode de reconstruction modèle CAO 3D

- L'évaluation du comportement de la pièce et du comportement en cours de fabrication : l'objectif de cette étape est d'évaluer le comportement de la pièce en usage (la résistance) et le comportement pendant la fabrication (fabricabilité de la pièce brute par fabrication additive et la finition de la pièce par l'usinage). Cette étape inclut une boucle d'évaluation interne et la modification du modèle CAO pour obtenir un résultat optimal avant l'évaluation externe avec l'équipe client ou les experts. L'étape d'évaluation externe qui suivra cette évaluation interne nous permet d'obtenir un modèle 3D final validé, que nous pouvons théoriquement utiliser pour fabriquer les pièces en série.

Ce processus ayant été formalisé au cours de notre première étude de cas, on va tester notre processus avec une autre étude de cas que nous présentons dans la partie suivante.

### 3.4. Tester et Evaluer notre processus de conception pour la fabrication additive (Descriptive Study 2a)

Dans cette étude de cas en partenariat avec un industriel, nous étudions une pièce initialement en acier, de masse 125g, Figure 3-29. Notre objectif est la reconception de cette pièce, en alliage de Titane, avec un objectif de réduction de 40% de la masse. Nous n'en dirons pas plus sur les fonctionnalités de la pièce pour cause de confidentialité. En appliquant notre processus de conception, on a obtenu la géométrie finale de la pièce comme indiqué sur la Figure 3-29, image à droite.

Cette étude de cas nous permet de tester et évaluer notre processus étape par étape. Nous avons au début un cahier des charges fonctionnel fourni par nos clients. Dans les sections suivantes nous présentons le déroulement de chaque étape du processus de conception dans ce cas.

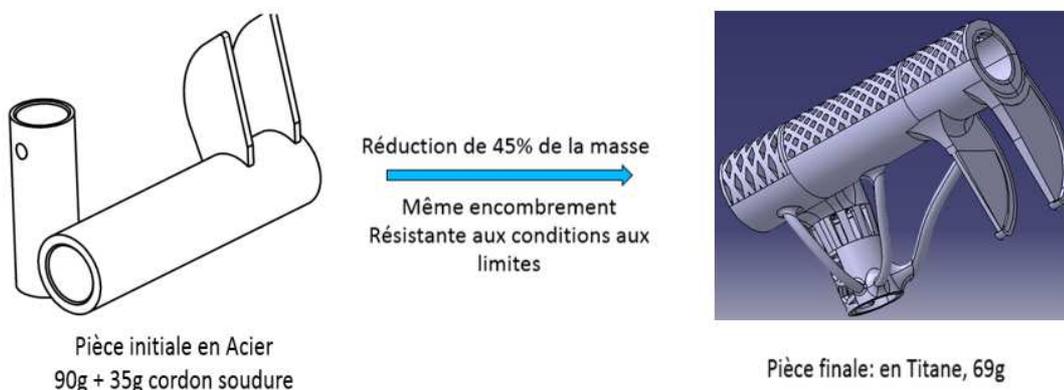


Figure 3-29: Reconcepting a part using additive manufacturing

### 3.4.1. Définition de la forme initiale

Nous utilisons l'optimisation topologique pour définir la forme initiale de la pièce. Pour définir les paramètres de l'optimisation comme l'espace de conception, l'espace fonctionnel, le modèle de conditions aux limites et l'objectif, nous utilisons des informations données par le cahier des charges fonctionnel. Dans ce cas, l'espace de conception est défini comme un volume disponible par rapport aux pièces voisines, Figure 3-30. Les espaces fonctionnels sont constitués de quatre paliers et deux ailettes en position haute, voir aussi Figure 3-30.

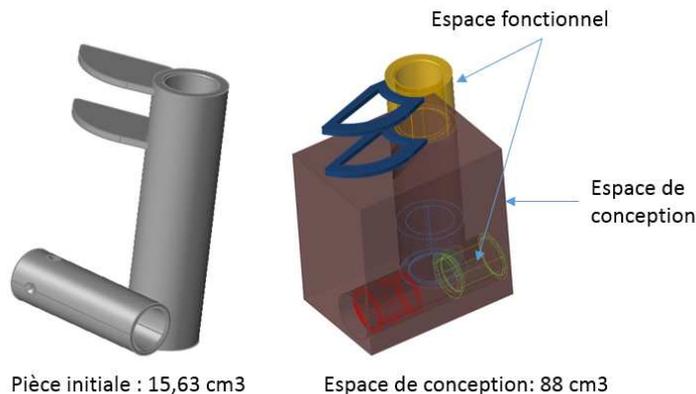


Figure 3-30: Espace de conception et espaces fonctionnels

Nous avons eu une discussion avec notre client pour préciser l'espace de conception ainsi que l'espace fonctionnel. Cette discussion permet de mettre en évidence un autre espace disponible qui n'était pas initialement dans le cahier des charges fonctionnel. Ceci a pour conséquence d'augmenter l'espace de conception. Nous avons également discuté à propos des espaces fonctionnels et on a considéré de minimiser le volume des espaces fonctionnels pour donner un espace de conception maximal à l'optimisation topologique. Par exemple, on diminue l'épaisseur des quatre paliers.

Ensuite, nous modélisons le modèle des conditions aux limites, modèle que nous intégrons sous un logiciel d'optimisation topologique (Inspire), Figure 3-31. Mais il y a des liaisons qu'on ne peut pas modéliser dans Inspire, par exemple, la liaison linéaire annulaire, la rotule... Donc, nous devons chercher un modèle équivalent par représenter le réel. Nous avons considéré de définir la liaison dans l'axe rotation vertical comme un appui plan sous le palier vert et un pivot glissant sur le palier rouge. Nous ne parlons pas en détail des cas de chargements pour cause de confidentialité. Nous lançons alors une optimisation topologique avec un objectif de réduction de 30% de la masse par rapport à la pièce initiale.

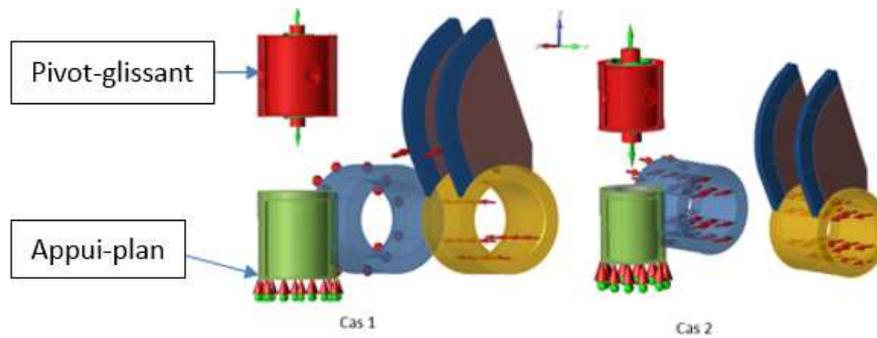


Figure 3-31: Modèle des conditions aux limites

Nous avons obtenu un résultat d'optimisation topologique (Figure 3-32) qui nous permet de discuter avec notre équipe client. Nous avons discuté autour de la forme proposée par l'optimisation topologique et à propos du modèle des conditions aux limites qu'on a défini. La forme proposée par l'optimisation topologique est intéressante pour la fabrication additive. Mais on a trouvé que la matière est concentrée sur les zones autour de ces deux cylindres de la forme initiale. En plus, les liaisons entre les zones fonctionnelles ne comportent pas beaucoup de matière ce qui pose problème par rapport à la rigidité de la pièce, par exemple, au voisinage du palier rouge. Nous avons considéré qu'il n'a pas beaucoup matière autour du palier rouge à cause de la liaison pivot-glissant. Cette liaison ne laisse pas beaucoup de liberté pour ce palier. Le logiciel donc considère que la zone autour du palier rouge est déjà suffisamment rigide. Ce n'est pas nécessaire d'ajouter encore de la matière dans cette zone.

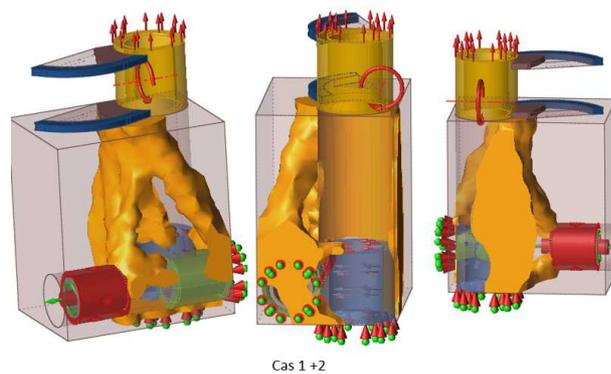


Figure 3-32: Résultat de l'optimisation topologique

Suite à notre discussion, nous avons modifié notre modèle des conditions aux limites. Par exemple, nous remplaçons la liaison pivot-glissant par trois ponctuelles au milieu du cylindre pour laisser plus de liberté de cette zone, Figure 3-33. Ensuite nous avons déplacé ces trois ponctuelles vers les positions extrêmes du cylindre pour voir le changement du résultat de l'optimisation topologique.

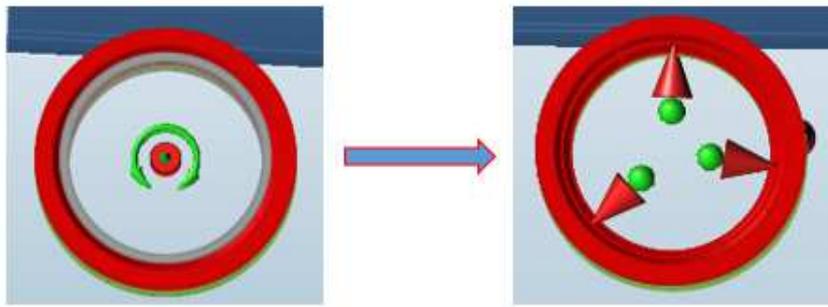


Figure 3-33: Modifier la modélisation de la liaison pivot en linéaire annulaire

Nous lançons l'optimisation topologique pour obtenir un deuxième résultat, Figure 3-34. On continue le processus par une évaluation externe avec notre client.

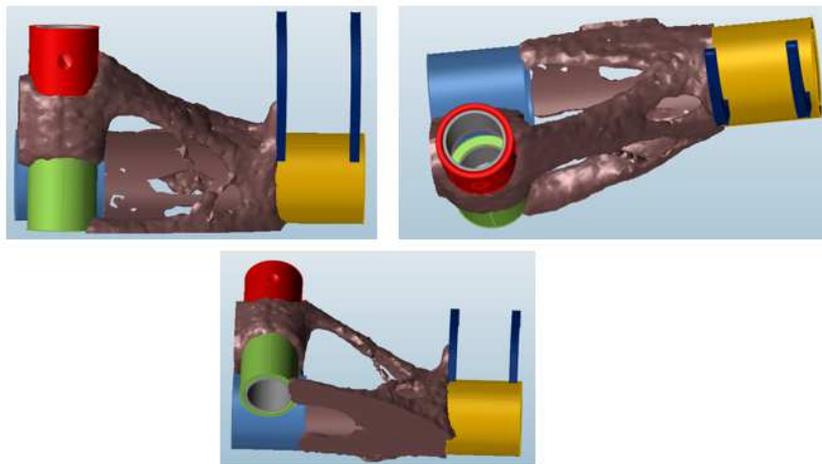


Figure 3-34: Résultat final de l'optimisation topologique

Le résultat obtenu après avoir modifié le modèle des conditions aux limites est cohérent avec les retours des expertises. La matière est bien répartie dans les zones autour des surfaces fonctionnelles. La forme de la pièce obtenue est assez rigide du point de vue des expertises. Dans cette étape, les retours d'expertises sont importants pour améliorer la forme de la pièce, et nous avons pu valider cette forme avec notre client. Nous passons donc à l'étape de reconstruction du modèle CAO à partir du résultat de l'optimisation topologique.

#### 3.4.2. Reconstruction modèle CAO

Dans cette étape, nous utilisons le logiciel de CAO classique (Catia) pour la reconstruction du modèle à partir du résultat de l'optimisation topologique. Une analyse du résultat de l'optimisation topologique permet d'extraire des idées de reconstruction, Figure 3-35. Il s'agit d'identifier des entités géométriques (zones massives, trous, évidements, portions de cylindres, poutres, etc.) que l'on pourra construire dans le logiciel de CAO.

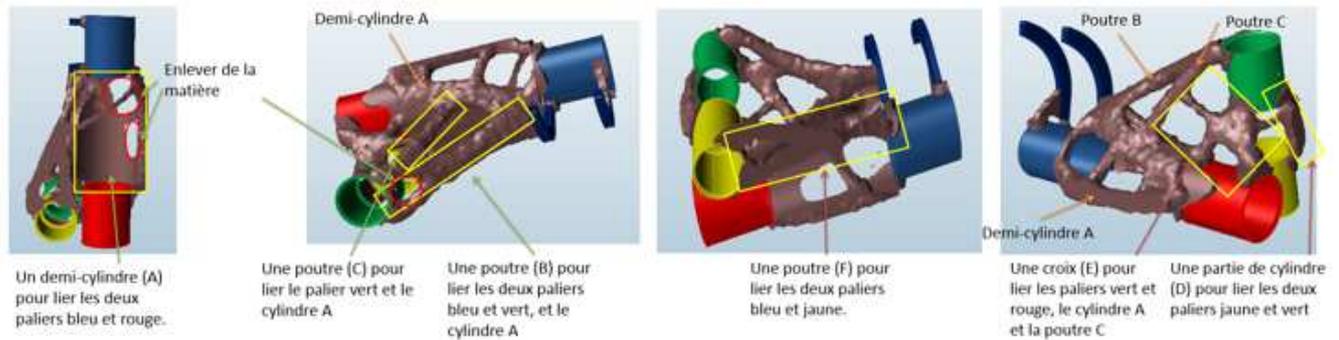


Figure 3-35: Analyse du résultat de l'optimisation topologique pour la reconstruction CAO

Ensuite, on utilise Catia pour la reconstruction du modèle CAO sur la base des entités géométriques identifiées. On conçoit au début les espaces fonctionnels. Et on continue avec les formes qu'on a analysées précédemment pour lier les espaces fonctionnels. Pour créer des formes, on utilise les fonctions générales comme « extrusion », « révolution », « surface épaisseur » ou « balayage »... On a obtenu à la fin un modèle CAO comme le montre la Figure 3-36.

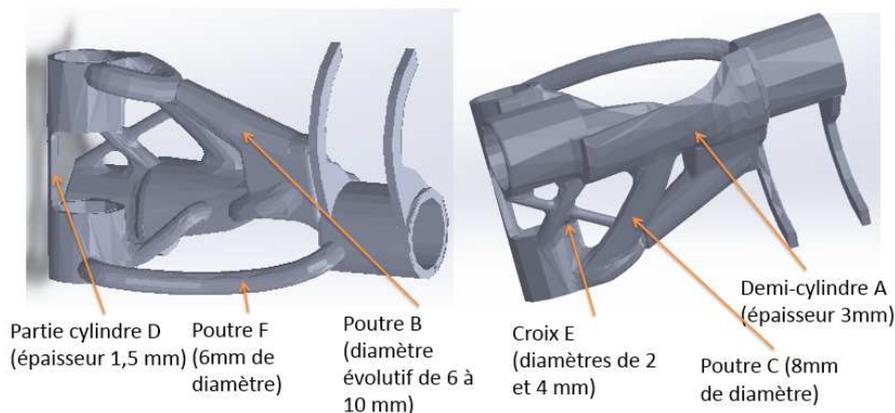


Figure 3-36: Modèle CAO 3D

Nous présentons alors ce modèle à notre équipe client au cours d'une évaluation externe. Nous avons discuté autour la forme et de la rigidité de la pièce. Dans notre cas, la pièce initiale est en Acier. Si on change le matériau d'Acier à Titane, on a déjà gagné en masse au regard des masses volumiques. Donc, notre client nous demande de faire un calcul éléments finis pour comparer les deux pièces : la pièce proposée à l'issue du travail de reconstruction et la pièce initiale supposée réalisée en titane. Nous avons fait un calcul éléments finis pour ces deux pièces soumises aux mêmes conditions aux limites. On a obtenu le résultat présenté Figure 3-37.

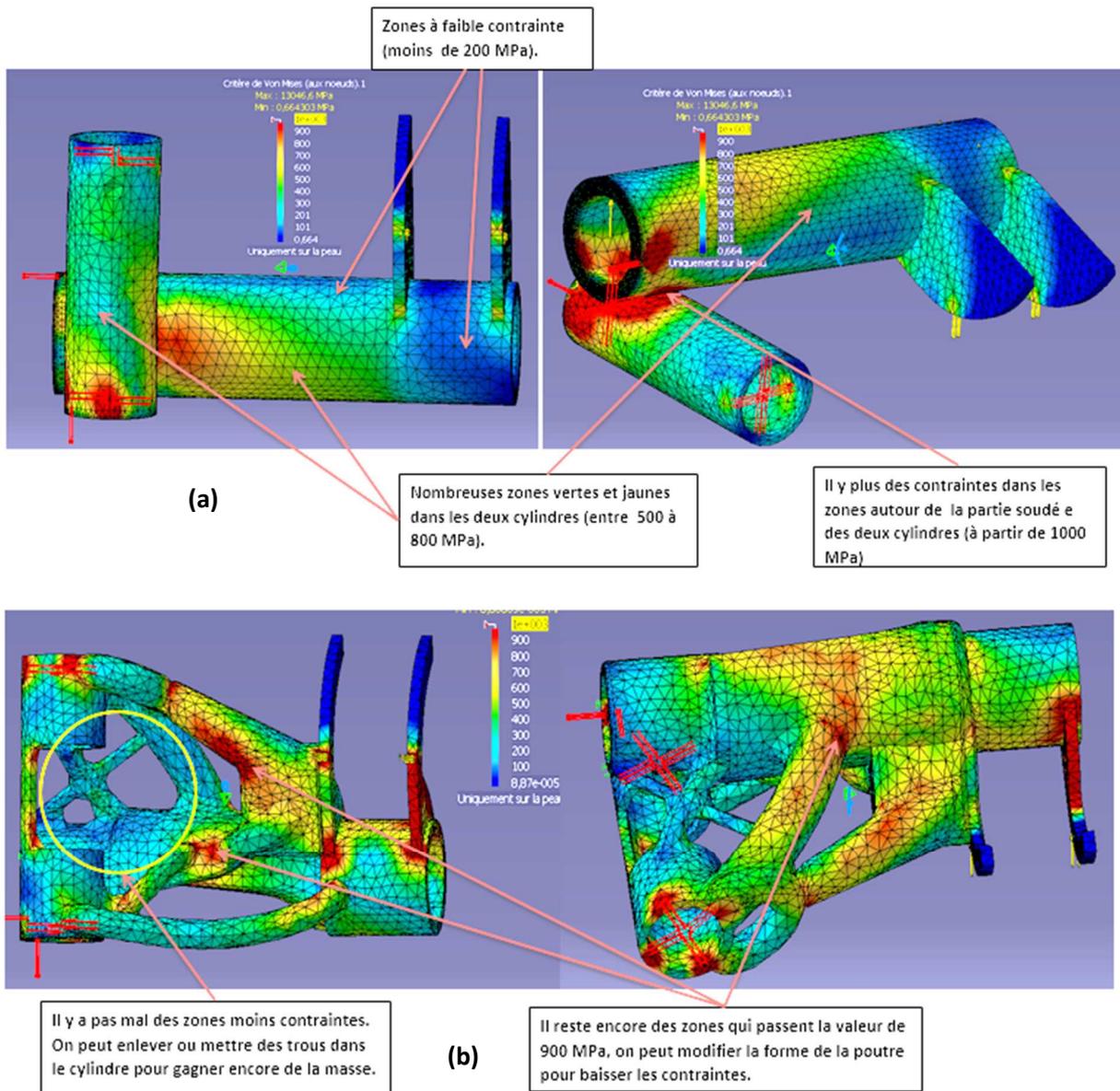


Figure 3-37: Résultats des calculs éléments finis (a) pièce initiale; (b) pièce issue de l'optimisation topologique

La masse de la pièce initiale en Titane est de 110g. Le calcul EF de cette pièce (figure 36a) montre qu'il y a de nombreuses zones sous contraintes dans les deux cylindres (entre 500 à 800 MPa). La masse de la pièce issue de l'optimisation topologique est de 76g. Pour la résistance de cette pièce (Figure 3-37b), il y a plusieurs zones sous-contraintes et aussi des zones sur-contraintes. Nous pouvons changer l'épaisseur des éléments pour obtenir une pièce qui résiste.

L'évaluation externe avec l'équipe client nous permet de choisir une solution pour la géométrie de la pièce. La masse de la pièce initiale est plus importante que la masse de la pièce issue de l'optimisation topologique mais la forme de la pièce initiale prend déjà en compte tous les critères du cycle de vie de la pièce (cette géométrie a déjà été utilisée et validée en réel). Nous avons choisi une solution intermédiaire entre la

pièce initiale et la pièce issue de l'optimisation topologique (Figure 3-38). On a gardé les deux grands cylindres et ajouté les poutres dans les endroits donnés par l'optimisation topologique. En plus, on va enlever de la matière dans les zones moins contraintes dans les deux cylindres pour gagner encore de la masse.

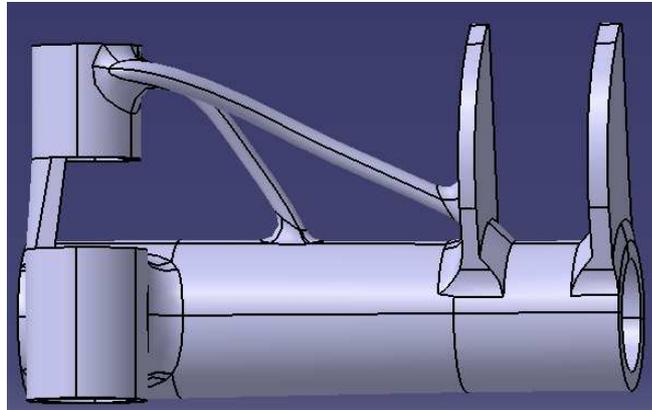


Figure 3-38: Solution de la géométrie de la pièce

Pour le grand cylindre, nous redessinons, comme sur la Figure 3-39 (les formes de la pièce en rouge) pour gagner de la masse dans les zones sous-contraintes. La nouvelle géométrie du cylindre est paramétrée (paramètres  $E_1$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  dans la figure 38) et on effectue une optimisation paramétrique.

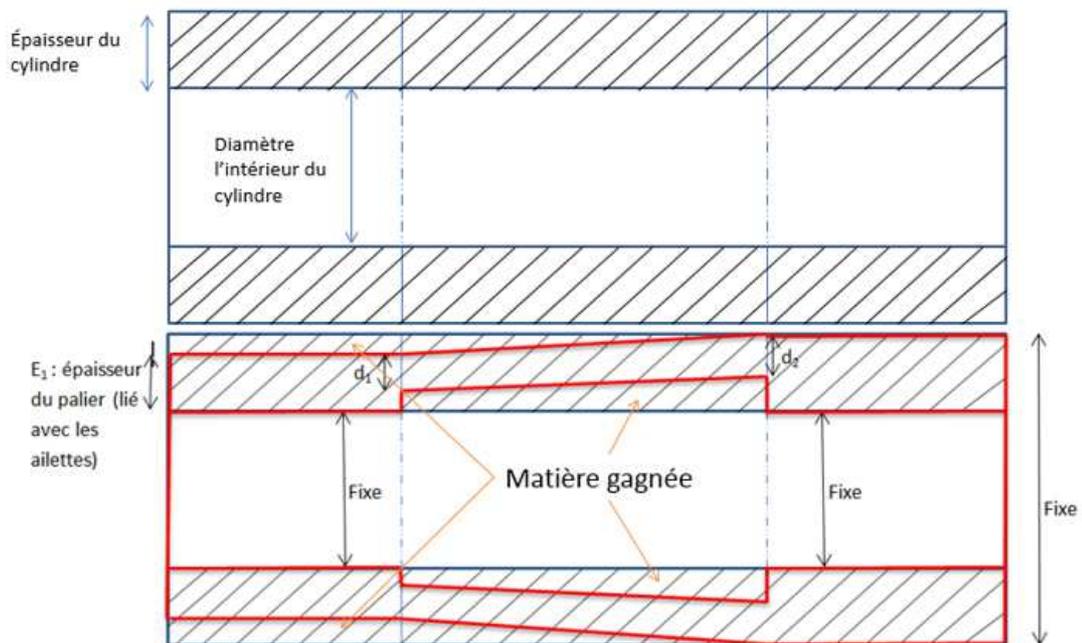


Figure 3-39: Optimisation paramétrique

Nous utilisons le résultat de l'optimisation paramétrique pour discussion avec notre équipe client dans une nouvelle étape d'évaluation externe. A la fin, nous obtenons

une géométrie validée par le client que l'on va évaluer au regard des comportements mécaniques de la pièce et aussi des comportements relatifs à la fabrication.

### 3.4.3. Evaluation

Nous avons fait un calcul éléments finis de notre solution (Figure 3-40) pour une évaluation interne et pour montrer au client dans l'étape d'évaluation externe. Suivant ce calcul, la pièce résiste aux cas de charge sauf la zone de soudure entre l'ailette et le cylindre, peut-être à cause de la valeur (3mm maximum autorisé selon le cahier des charges du client) du rayon des congés.

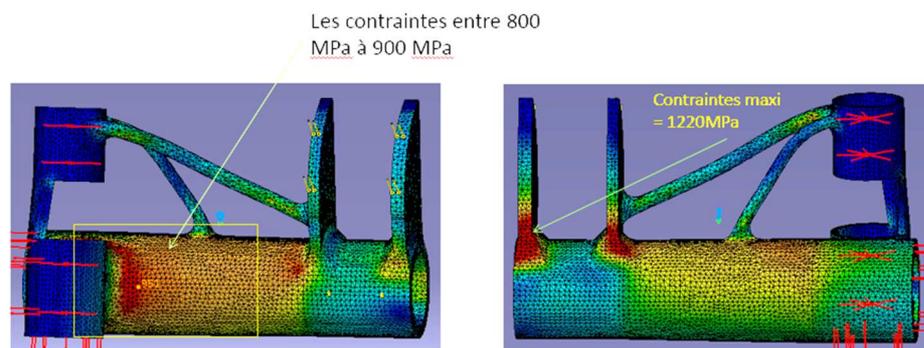
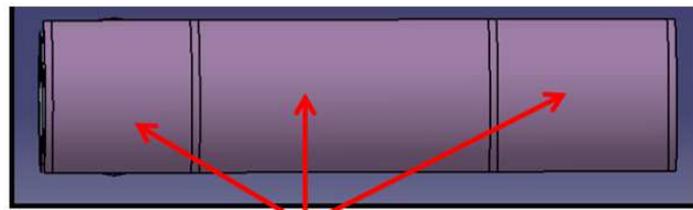


Figure 3-40: Résultat du calcul éléments finis

Dans l'évaluation externe, notre client trouve qu'il y a encore trop des zones bleues (sous-contraintes) dans la pièce. Proposition est faite de changer les paramètres (l'épaisseur des paliers ou le diamètre des congés) pour minimiser la masse de la pièce. En plus, au niveau expertise de la fabrication par la machine EBM, il nous est demandé de prendre en compte des critères de fabrication comme par exemple, la possibilité de dépoudrage du grand cylindre. Suite à ces différentes remarques, il est décidé d'intégrer des treillis dans les zones les moins contraintes de ces deux cylindres pour minimiser la masse de la pièce et pour faciliter le dépoudrage après fabrication.

Pour choisir où intégrer des treillis, nous avons observé que la contrainte dans le cylindre n'est pas uniforme. Donc, nous avons défini trois volumes différents (correspondant à différents niveaux de contrainte) pour intégrer 3 structures treillis avec des paramètres différents (Figure 3-41a). Nous avons utilisé la structure treillis présentée sur la Figure 3-41b qui est définie par les paramètres comme l'épaisseur d'un élément, la distance entre deux éléments et l'angle l'inclinaison de chaque élément. Nous lançons ensuite une optimisation paramétrique pour les structures treillis. Dans notre étude de cas, on utilise un module d'optimisation de Catia pour optimiser la pièce avec un objectif (minimiser la masse) et les variables sont les paramètres du treillis. Ce module permet de rechercher les valeurs des paramètres

dans une plage que l'on a définie pour obtenir un résultat optimal par rapport à notre objectif.



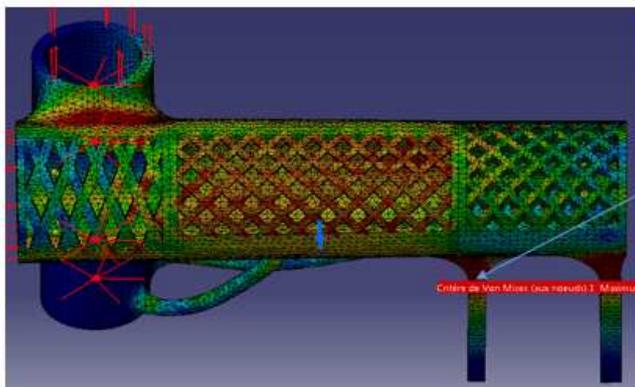
3 volumes identifiés ou l'on intègre 3 structures avec des paramètres différents  
(a)



(b)

Figure 3-41: Intégration des structures treillis

Nous continuons par une discussion avec notre client autour du résultat du calcul éléments finis de notre pièce, dont le résultat est présenté Figure 3-42. Selon ce calcul la pièce résiste sauf dans la zone de soudure de l'ailette avec le cylindre.



Résultats:

Masse: 68g

Contrainte maxi : 1229 MPa localisé sous les ailettes

Ailleurs contrainte au max de 930 MPa

Figure 3-42: Résultat du calcul éléments finis de la géométrie finale

Après la validation de la pièce avec notre client, nous avons fabriqué plusieurs prototypes dans un build de la machine EBM pour évaluer les comportements en fabrication ainsi que la résistance de la pièce, une photo de la pièce obtenue est disponible en Figure 3-43a. Les surfaces fonctionnelles doivent ensuite passer par une étape de finition, en usinage. L'usinage de la première pièce ne se passe pas bien, le treillis est abimé lors du bridage ainsi que les pattes réalisant la jonction entre les deux cylindres, Figure 3-43b. L'effort de bridage a été trop important pour ces zones et

a abimé la pièce. L'usinage de la deuxième pièce se passe bien car notre expert d'usinage a diminué l'effort de bridage de la pièce. L'effort de bridage a été moins important, mais suffisant pour l'usinage.



Figure 3-43: (a) Le prototype; (b) La pièce cassé pendant l'usinage

Suite à cette étape, et puisque nous disposons d'un exemplaire de la structure dans laquelle cette pièce devait s'intégrer, nous avons fait un essai de notre prototype sur une chaise (notre pièce est un élément dans cette chaise) qu'on a récupéré chez notre client. Il s'agissait d'assembler la pièce dans son environnement d'usage, et de lui appliquer manuellement des efforts qui semblaient relativement importants mais réalistes comme situation d'usage extrême. Il est à noter néanmoins que les efforts appliqués n'ont pas été quantifiés avec précision. Mais le prototype que nous avons réalisé, qui était résistant au vu du calcul éléments finis, s'est cassé (

Figure 3-44). Les premières observations de cette rupture montrent que ce n'est pas dans la zone déclarée comme sur-contrainte par la simulation que la rupture a eu lieu.

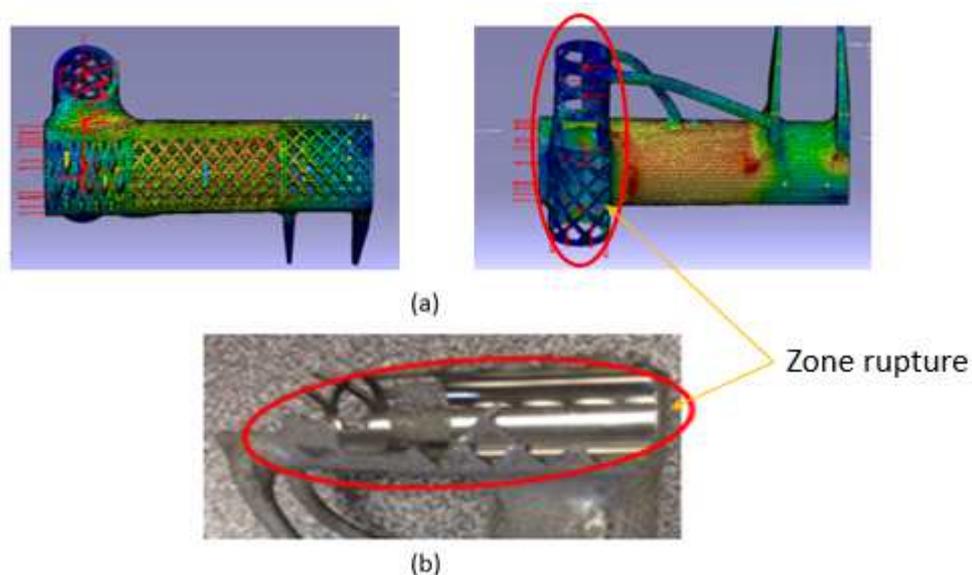


Figure 3-44: (a) Vérification par calcul éléments finis; (b) Pièce cassée dans l'essai

En conclusion de cette phase, nous avons pris beaucoup de temps sur la boucle de calcul éléments finis pour obtenir la meilleure solution possible. Mais il apparaît que le résultat de l'essai en situation réelle n'est pas le même que celui de la simulation numérique.

A ce moment du processus, nous avons deux choix possibles pour continuer :

- soit nous envisageons de refaire le calcul éléments finis pour résoudre ce problème.
- soit nous fabriquons des prototypes avec différents paramètres et différentes variations géométriques pour vérifier la résistance de la pièce par des essais.

Dans ce cas, on a décidé de continuer avec les prototypes, d'une part par manque de temps pour modifier les modèles numériques et refaire les calculs éléments finis, et d'autre part parce que l'on ressentait plus de confiance envers les résultats d'essais physiques qu'envers ceux issus de simulations numériques, compte tenu de la rupture du premier prototype (validé par simulation numérique) lors de l'essai. Il est à noter par ailleurs que nous avons la chance de disposer du mécanisme dans lequel cette pièce devait s'assembler, ce qui permettait d'effectuer des tests relativement réalistes, rapidement et à moindre frais à condition de pouvoir fabriquer rapidement des pièces prototypes.

Nous avons donc modifié les zones cassées de notre pièce. Nous proposons trois solutions dans cette zone : laisser le treillis et augmenter l'épaisseur des éléments (Figure 3-45a), garder le treillis dans une moitié du cylindre seulement (Figure 3-45b), remplacer le treillis par un cylindre entier (Figure 3-45c) et fabriquons en même temps ces trois prototypes différents. Après finition et essai, la version (a) a été cassée lors d'un essai en situation, et les deux autres versions ont résisté aux cas charges en situation d'usage et en situation d'usinage. Nous avons finalement choisi la version (b) à cause de la masse de cette version, plus légère que la version (c), et aussi de sa forme plus représentative d'une fabrication additive grâce au treillis, ce que notre client souhaitait montrer à ses partenaires.

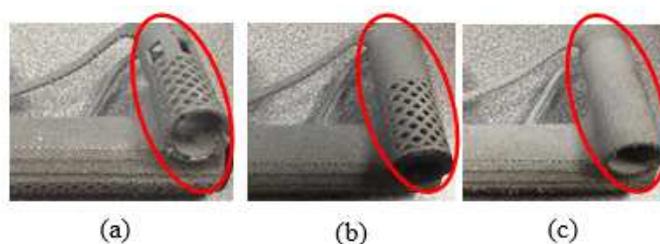


Figure 3-45: Les différentes versions du prototype

### 3.5. Conclusion

Nous avons proposé un processus de conception pour la fabrication additive, Figure 3-27, qui est le résultat de l'étude bibliographique et des études de cas. Après évaluation de notre processus par une étude de cas, nous avons considéré que ce processus de conception semble bien adapté pour concevoir une pièce par la fabrication additive. Ce processus nous permet de bien tirer profit de la liberté de forme accessible par la fabrication additive. En plus, nous pouvons intégrer au plus tôt les libertés du procédé lorsqu'on conçoit la pièce. Un point important de notre processus est l'étape d'évaluation externe à la fin de chaque étape principale. Cette évaluation nous permet de prendre en compte des retours des experts pour évaluer le résultat de chaque étape dans le processus.

Dans l'étape de reconstruction du modèle CAO, nous pouvons intégrer une partie d'optimisation paramétrique lorsque la pièce inclut des formes aisément paramétrables, par exemple le cylindre. En plus d'une évaluation externe avec l'équipe client, une évaluation de la résistance dans l'usage doit être nécessaire.

Dans l'étape d'évaluation du comportement de la pièce en usage et en fabrication, en plus d'utiliser les simulations numériques (maquette virtuelle) nous pouvons aussi utiliser le prototype pour évaluer la pièce. Dans notre étude de cas, il y a un moment où l'on doit choisir entre effectuer un calcul éléments finis et faire un essai avec un prototype pour évaluer la résistance de la pièce. Nous avons choisi le prototype à cause du temps et du manque de confiance dans le résultat du calcul élément finis. Dans cette étude de cas, on n'a rencontré des difficultés que pour vérifier la résistance. Mais quand on pense globalement dans le processus de conception, pour évaluer un comportement de pièce, par exemple : la forme, l'assemblage, la fabrication, est ce que la maquette virtuelle est toujours une meilleure solution ? Dans notre étude de cas, on peut voir que le prototype est mieux que la maquette virtuelle pour un cas particulier. Mais en global, est ce que le prototype peut toujours remplacer la maquette virtuelle pour évaluer les comportements de la pièce dans le processus de conception pour la fabrication additive ? On ne peut pas répondre à ces questions pour le moment. Mais la fabrication additive permet de faire des prototypes sans besoins d'outillages spécifiques, à des coûts et dans des temps relativement courts. Donc, nous pouvons considérer que le prototype est devenu comme un élément en concurrence avec la maquette virtuelle pour évaluer ou valider un comportement de la pièce dans un processus de conception. Mais nous ne savons pas quel est le meilleur choix pour évaluer notre pièce dans une situation donnée. Nous avons considéré que ce problème est une problématique au cœur du processus de conception pour la fabrication additive. L'objectif de la suite de notre

travail est de trouver une méthode permettant d'apporter des éléments de réponses à cette question.

## Chapitre 4 : Modèle pour choisir entre les types de représentation intermédiaire dans une situation du processus de conception

Ce chapitre présente une deuxième boucle de notre méthodologie de recherche (présentée dans le chapitre 2-Méthodologie de recherche) pour chercher la réponse à la problématique proposée à la fin du chapitre précédent : Quelle est l'influence de la représentation intermédiaire dans le processus de conception pour la fabrication additive ? Il inclut trois parties, correspondant avec une « Research Clarification (RC) », une « Descriptive Study (DS) » et enfin une « Prescriptive Study (PS) ».

- L'étape de Research Clarification (RC) est essentiellement composée d'une étude bibliographique. Le concept de « situation de conception » est d'abord étudié pour déterminer les conditions dans lesquelles nous allons comparer entre les types de représentations intermédiaires qui permettent de représenter la pièce considérée et ses comportements. Ceci nous conduira aussi à affiner notre problématique. Puis nous ferons une étude bibliographique sur les concepts de représentation intermédiaire. Nous définirons notre acceptation des termes, les types de représentations intermédiaires, « maquette virtuelle (MV)», « maquette physique (MP) » et « prototype (P) ». Enfin, une étude bibliographique des caractéristiques des MV, MP et P sera effectuée, nous permettant de définir des critères choix entre ces trois représentations. Cette liste de critères sera complétée par des critères empiriques issus de l'étude de cas du chapitre précédent. A travers ce travail, nous proposerons aussi une première construction des étapes à effectuer pour faire le choix entre MV, MP et P.
- L'étape « Descriptive study » (DS) nous permettra de tester et analyser notre proposition de démarche de choix sur la même étude de cas que celle du chapitre 3.
- La Prescriptive Study (PS) nous conduira à une proposition de modèle de choix formalisée et structurée autour des concepts de situation et de critère.

#### 4.1. Research Clarification

##### 4.1.1. Etude bibliographie de la notion de situation de conception

Notre objectif est de construire une méthode qui conduise à un choix entre MV, MP et P pour évaluer la pièce dans une situation donnée dans un processus de conception. Par exemple, au cours du processus de conception d'une pièce, nous voulons analyser la résistance de cette pièce. Au début du projet, un modèle CAO peut être pertinent. En fin de projet il peut être plus pertinent d'avoir un essai en contexte réel. En fonction de la situation, caractérisée ici par la phase du projet, le choix du type de représentation de cette pièce peut donc être différent. De manière plus générique, Il nous faut donc définir les paramètres permettant de caractériser la situation.

Nous avons donc mené une étude bibliographique sur cette notion de situation. Il y a peu de travaux existants qui définissent la notion de situation de conception. Prudhomme et al. [77] présentent un modèle de situation de conception qui est schématisé sur la Figure 4-1.

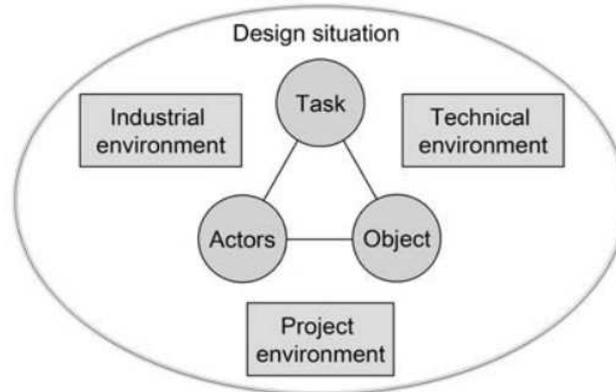


Figure 4-1: modèle de situation de conception collaborative [77]

Selon ce modèle, il y a 6 attributs dans une situation de conception :

- Tâche de conception : décrit les tâches à mener, le travail à conduire, qui peut être caractérisé par l'objectif et les conditions du travail.
- Objet de conception : c'est la pièce ou le produit qui est en cours de conception.
- Les acteurs : ce sont les parties prenantes du projet en relation avec la tâche concernée.
- Contexte industriel : concerne la politique, la stratégie, l'organisation industrielle
- Contexte technique : fait référence aux techniques disponibles, par exemple les outils, les procédures, les ressources et les méthodes de communication.
- Contexte projet : inclut les méthodes de conception recommandées et les types de gestion projet envisagés.

Nous avons adopté ce modèle pour caractériser les situations de conception dans notre étude de cas. L'objectif est de mettre en évidence les attributs importants de la situation dans un processus de conception pour la fabrication additive.

#### 4.1.2. La définition des termes « maquette virtuelle », « maquette physique » et « prototype »

Dans un processus de conception, nous pouvons utiliser les modélisations numériques ou des solutions physiques pour évaluer les comportements de notre pièce. Par exemple, pour évaluer la résistance mécanique de la pièce, nous pouvons utiliser le calcul éléments finis ou nous pouvons faire des essais avec une pièce physique.

La littérature utilise de nombreuses appellations pour faire référence aux modélisations physiques ou numériques. Par exemple, les modèles numériques peuvent être nommés maquettes virtuelles ou des prototypes virtuels. Les modèles physiques peuvent être nommés des maquettes physiques, des prototypes physiques ou des prototypes. Pour clarifier le vocabulaire employé nous allons proposer notre définition des termes « maquette » et « prototype » en intégrant les spécificités de notre contexte de fabrication additive.

#### 4.1.2.1. Les définitions existantes

Les notions de prototype et de maquette sont largement utilisées dans le langage usuel. Nous avons trouvé plusieurs définitions de ces notions sur les dictionnaires internet.

**Prototype** : Premier exemplaire construit d'un ensemble mécanique, d'un appareil, d'une machine, qui est destiné à en expérimenter en service les qualités en vue de la construction en série [78] [79]. C'est un exemplaire d'essai réalisé avant la fabrication en série [80]. Selon [81], il peut être réalisé en un ou plusieurs exemplaires afin de permettre des tests.

**Maquette** : c'est une représentation partielle ou complète d'un système ou d'un objet (existant ou en projet) afin d'en tester et valider certains aspects et/ou le comportement (maquette fonctionnelle) [82]. La maquette peut être réalisée en deux ou trois dimensions, à une échelle donnée, le plus souvent réduite (ou parfois agrandie pour en faciliter la visualisation) [78] [82]. La représentation peut être réelle à une échelle donnée ou peut être virtuelle (maquette numérique CAO) [82].

Cependant des articles scientifiques nous proposent des définitions légèrement différentes. Les auteurs utilisent souvent les termes « prototype virtuel » et « prototype physique ».

**Prototype virtuel** : pour Choi & Chang, c'est un prototype pour les tests et l'évaluation des caractéristiques spécifiques d'un produit ou d'un procédé de fabrication dans un environnement informatique [83]. Pour Rook le prototype virtuel est un modèle informatique qui peut être traité et manipulé de la même manière qu'un prototype physique [84]. Pour une voiture, par exemple, cela signifie non seulement vérifier la forme des pièces, mais aussi au-delà tester les fonctions du véhicule, même en cas d'accident, faire des analyses et examiner les besoins pour l'entretien. H.J Bullinger et al [86] ont regroupé les composants du prototype virtuel dans 3 groupes : le modèle CAO (modèle 3D), la simulation et la réalité virtuelle. Le modèle CAO nous permet de représenter la forme du produit. La simulation est le moyen permettant de modéliser ou simuler (tester) les caractéristiques comportementales du produit. La réalité virtuelle est l'environnement qui permet de simuler l'interaction entre l'utilisateur et le produit.

**Prototype physique:** Selon F. Zorriassarine et al, il y a 3 types de prototypes physiques : prototype traditionnel (qui a été fabriqué par les technologies traditionnelles), prototype rapide (qui a été fabriqué par les technologies additives) et le prototype hybride (qui a été fabriqué par une combinaison des technologies traditionnelles et additives) [85].

#### 4.1.2.2. Une proposition de définitions

Suite à ces recherches initiales, nous proposons les définitions que nous adopterons dans le contexte de la thèse ci-après. Nous voulons distinguer entre le prototype et la maquette comme dans les définitions citées plus haut, mais notre définition est adaptée à notre contexte de fabrication additive.

- **Prototype :**

Nous nous appuyons sur les définitions précédentes [78], [79], [80] et nous prenons en compte le contexte de la fabrication additive qui nous permet une fabrication en petite et moyenne série. Nous pouvons fabriquer des premières pièces qui ont les mêmes caractéristiques (matériaux, résistance, technologie de fabrication...) que la pièce finale. Notre proposition de définition du prototype est donc comme suit :

*Un Prototype est une première pièce physique qui a les mêmes propriétés supposées pour le produit et le processus de fabrication que la pièce de série. Un prototype permet de faire un ou des essais et de valider toutes les performances de la pièce.*

Le concept de prototype est donc associé à la représentativité de celui-ci par rapport à une pièce de production série, selon la grande majorité des critères d'évaluation possibles.

Ceci inclut pour le prototype une étape de finition qui peut être nécessaire pour en tester les propriétés. Par exemple, si un prototype est fabriqué par EBM (Figure 4-2a), s'en suit la finition par usinage des zones fonctionnelles (Figure 4-2b).



Figure 4-2: (a) Prototype avant finition; (b) Prototype après finition

- **Maquette :**

Dans notre contexte de travail, nous considérons que « *la maquette est une représentation de la pièce finale afin de tester, évaluer une (ou des) performance(s) particulière(s) ou un (ou des) comportement(s) particulier(s). La Maquette peut être physique (tangible) ou virtuelle (numérique).* »

- **Maquette virtuelle :** les articles scientifiques parlent de « prototype virtuel » pour faire référence à un modèle informatique [83] [84] ou un modèle CAO, une simulation numérique, une réalité virtuelle [86]. Dans notre contexte nous n'utiliserons le terme « prototype » que pour les objets physiques. Nous utiliserons le terme « maquette » à la place de « prototype » lorsque l'objet considéré est virtuel, compte tenu de la similarité inévitablement limitée de la représentation virtuelle par rapport à la pièce physique finale sur de nombreux critères de manipulations et de comportements.

Nous considérons que « *la maquette virtuelle est une maquette numérique, qui est une représentation géométrique ou est une définition numérique, qui nous permet de faire des simulations pour tester, évaluer un (ou des) comportement(s).* »

Exemples de maquettes virtuelles : une géométrie 3D (Figure 4-3a) ou un calcul éléments finis (Figure 4-3b).

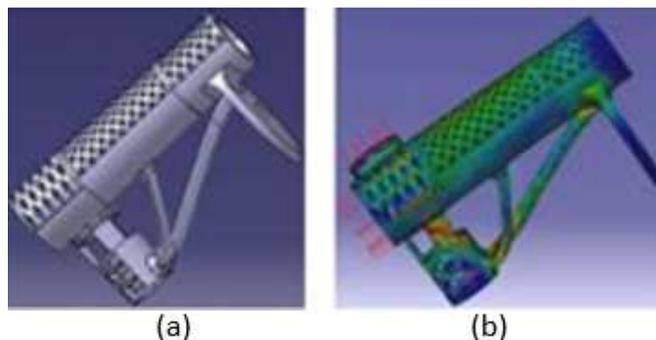


Figure 4-3: (a) Modèle CAO 3D; (b) Une définition Élément Fini

- **Maquette physique :**

Pour différencier les notions de prototype et de maquette physique, nous considérons que *la maquette physique est une représentation matérielle de la pièce utilisée pour en tester un (ou plusieurs) comportement(s). La maquette physique peut être réalisée à une échelle donnée, le plus souvent réduite ou agrandie pour en faciliter la visualisation.*

La maquette physique est utilisée pour faire des essais. Le but de la maquette physique n'est pas de devenir une première pièce de la série mais de tester un comportement partiel, selon un ou plusieurs aspects choisis, du

produit final. Par exemple, une maquette obtenue par l'assemblage de plaques légères par des attaches parisiennes permettra de démontrer un choix de comportement cinématique sans s'intéresser à l'aspect extérieur du produit final, alors qu'une maquette obtenue par impression 3D suivie d'opérations de ponçage, peinture et vernissage permettra de vérifier l'acceptabilité esthétique du produit final sans représenter son comportement cinématique.

Nos définitions peuvent être utilisées dans tous les contextes. Mais dans ce document, ces définitions sont utilisées dans le contexte de la fabrication additive.

Ces définitions ne résolvent pas tous les problèmes de vocabulaire. Par exemple dans notre étude de cas, nous avons fabriqué une pièce (Figure 4-4) qui a la même forme que celle sortie de l'optimisation topologique, pour montrer rapidement au client un aperçu de la forme de la pièce en réel. Cette pièce est fabriquée par la machine EBM, même technologie et même matériau que la pièce finale. Nous pouvons donc considérer cette pièce comme une maquette physique parce qu'on la fabrique juste pour évaluer la forme de la pièce. Mais cette pièce nous permet aussi d'évaluer toutes les performances de la pièce. Donc, est-ce qu'elle peut avoir une fonction de prototype ? Autre exemple, nous avons fabriqué une pièce sans surépaisseur pour en tester rapidement la résistance. Est-ce que cette pièce est une maquette physique ou un prototype ?

Une discussion autour de la maquette physique et prototype est intéressante. Est-ce qu'une maquette physique peut devenir un prototype, et inversement ? La réponse dépend peut-être de l'objectif du concepteur, ou du moment de sa réalisation dans le processus de conception, et surtout, selon nos définitions, du niveau de complétude de la représentativité de l'objet considéré par rapport à une pièce que l'on imagine par la suite être fabriquée en série.



Figure 4-4: Une maquette physique

Dans notre étude, nous utilisons une seule technologie de fabrication de brut : la technologie de fabrication additive (EBM). Celle-ci est destinée préférentiellement à réaliser des prototypes. Cependant, lorsque par exemple nous réaliserons des pièces sans surépaisseurs d'usinage pour en tester la résistance dans un montage de test, on peut considérer que cette pièce est une maquette physique puisqu'elle ne permet pas de représenter les comportements de l'objet pendant et après les étapes de finition ni toutes leurs conséquences potentielles sur le comportement final de la pièce de série (qualités de surfaces, tolérances géométriques, résistance pendant l'usinage, précision de comportement cinématique dans le système complet, résistance à la fatigue, etc.)

Du coup, nous pouvons dire qu'un prototype « doit représenter de manière stricte le comportement de la pièce de série que l'on souhaite évaluer ». Exemple, une pièce avec la même forme générale et les mêmes surfaces usinées (mêmes tolérances géométriques, etc.) que la pièce de série pourrait représenter de manière assez rigoureuse le comportement cinématique de la pièce finale, même si l'une est fabriquée en acier et l'autre en titane. On pourrait alors la considérer comme un prototype cinématique, alors qu'on ne pourrait pas la considérer comme un prototype du point de vue du comportement dynamique ou du point de vue de la RDM.

#### *4.1.3. Etude bibliographie des caractéristiques des MV, MP et P pour assister le processus de conception*

Nous avons commencé par une étude des travaux existants sur les critères et/ou méthodes de choix entre MV, MP et P dans une situation du processus de conception. Nous n'avons pas trouvé de travaux directement reliés à ces critères de choix, mais un certain nombre d'études qui caractérisent les intérêts ou les inconvénients liés à la réalisation et l'usage des MV, MP et P (vus selon notre définition). Nous avons donc orienté notre étude sur une caractérisation de ces trois formes de représentation du produit. Notre objectif sera ensuite de définir des critères de choix à partir de ces caractéristiques.

Dans les travaux existants les termes rencontrés sont : maquette virtuelle, maquette physique, prototype virtuel, prototype physique. Nous avons bien sûr pris en compte les caractéristiques de ces représentations pour les appliquer à nos définitions des « maquettes virtuelles (MV) », « maquette physique (MP) » et « prototype (P) »

Nous avons travaillé à partir de six articles obtenus à la suite de notre recherche bibliographique. Tous concernent des techniques de fabrication traditionnelles ou dites de prototypage rapide des maquettes physiques ou prototypes

Plusieurs travaux [83] [84] [86] [87] proposent de faire l'intégration de la maquette physique et de la maquette virtuelle au plus tôt dans le processus de développement, permettant ainsi de minimiser le temps et le cout du processus. Les caractéristiques

associées à l'usage de la maquette virtuelle ou de la maquette physique sont liées à des capacités qu'elles possèdent concernant la communication, le développement de concept, le test et la vérification de concept. Dans ces études, ces caractéristiques sont présentées sous la forme d'avantages et d'inconvénients respectifs de la maquette virtuelle et de la maquette physique.

Selon ces auteurs, la CAO permet de voir la géométrie de la pièce, avec des couleurs variées [85][88]. La maquette virtuelle est facile de diffusion par le réseau internet et elle est toujours disponible lorsqu'on en a besoin [83][84][85][86]. En plus, elle est facile à modifier et dans un délai assez court [83][84][85]. La maquette virtuelle permet de détecter divers défauts concernant les critères du cycle de vie comme : l'assemblage, le fonctionnement (la cinématique + dynamique), la fabrication... avant la réalisation du prototype physique. Mais avec la maquette virtuelle, la rétroaction sensorielle des utilisateurs est limitée [88].

Selon Vandeveld et al [87], la maquette physique joue un rôle important dans un processus de développement du produit. Plus particulièrement, elle améliore la communication entre les membres des équipes. Par exemple, il est plus facile d'expliquer les fonctions de la pièce sur un objet réel. Mais la réalisation d'une maquette physique pose toujours des problèmes de temps et de cout. Selon Vandeveld, cependant pour une maquette physique fabriquée par prototypage rapide, le temps et le cout de réalisation sont réduits parce qu'elle est fabriquée sans besoin d'outil spécifique. Mais il reste que la modification de la maquette physique est généralement difficile et couteuse comparée à celle d'une maquette virtuelle.

Nous pouvons structurer les caractéristiques des MV, MP et P telles que nous les avons obtenues de la littérature comme suit :

- *Temps pour modifier*: Le temps de modification de la maquette virtuelle, à partir d'une décision d'amélioration, se décline en heures, plutôt que en jours et en semaines dans le cas de la maquette physique [84]
- *Temps de réalisation de la maquette physique, maquette virtuelle ou prototype*: c'est le temps pour obtenir la MV, MP et P. Une maquette physique est fabriquée dans un délai assez long lorsque fabriquée par les technologies traditionnelles [84][85][86][88]. Mais avec le développement de la fabrication additive, il n'y a pas besoin d'outillages spécifiques, le temps d'obtention d'une maquette physique par « prototypage rapide » devient acceptable [85][86].
- *Cout d'obtention* : c'est le cout pour obtenir la MV, MP ou P. La fabrication d'un prototype physique par la technologie traditionnelle est couteuse [84][85][86][88]. Par rapport, la fabrication additive n'a pas besoin d'outillages spécifiques, le cout de la maquette physique fabriquée par la fabrication additive est diminué [86][87].

- *Cout amélioration continue* : le cout d'amélioration continue dépend des itérations à réaliser sur la maquette physique [83][85]. L'utilisation de la maquette virtuelle contribue à la minimisation de ce cout.
- *Diffusion* : échange des informations au sujet de la maquette. La maquette virtuelle facilite l'échange d'informations par le fait qu'elle peut être transférée par Internet entre les experts [83][84][85][86]. (entre ingénieurs/concepteurs, avec les clients, le fabriquant...).
- *Capacité de vérification de la géométrie* [83][84][85][86] : la maquette virtuelle et la maquette physique nous aident à vérifier la géométrie, la forme et pour détecter les erreurs du concept [83][84][85][86]. Il faut faire attention avec les maquettes physiques fabriquées par fabrication additive, il y a des problèmes de déformation physique [85] : ces dernières n'ont pas toujours une géométrie sous charge identique à celle de la pièce de série sous les mêmes conditions.
- *Capacité de vérification d'assemblage* : la maquette virtuelle peut aider le concepteur à vérifier l'assemblage de la pièce dans un système complexe, ainsi que de voir le jeu entre les pièces [83][84][85][86].
- *Capacité de vérification de la fabrication et de la production* : détecter les erreurs de la fabrication et production au plus tôt dans le processus est possible avec une maquette virtuelle [83][84][85][86] avec par exemple une simulation du procédé de fabrication. Ex : simulation de la machine NC ou CNC. [83] développe un modèle pour la simulation du processus du prototypage rapide comme SLS, 3DP (fabriqué couche par couche). Avec la simulation des processus, on peut optimiser les paramètres du processus, et aussi vérifier la fabricabilité du produit.
- *Capacité de modification du MV, MP et P* [83][84][85]: il est facile de modifier la maquette virtuelle, mais il est difficile ou impossible de modifier la maquette physique existante [83][84][85].
- *Disponibilité quand on en a besoin* : la maquette physique n'est pas toujours disponible quand on en a besoin, contrairement à la maquette virtuelle qui est plus facilement disponible [79], en particulier sur des sites géographiques distants.
- *Matériau disponible* : Pour la maquette physique, les matériaux nécessaires pour les ingénieries ne sont pas toujours possibles ou disponibles [85][88]. Il est donc rare de pouvoir faire un prototype dans le même matériau que celui de la pièce finale.
- *Soutenir la collaboration* : La maquette physique soutient le travail collaboratif. Elle permet de faciliter la communication, la discussion entre les membres dans une équipe. La maquette physique permet de partager des connaissances pour aider les acteurs à comprendre les concepts [87].

- *Rétroaction sensorielle des utilisateurs* : avec la maquette virtuelle, la rétroaction sensorielle des utilisateurs est limitée [88]

Ces sont là des caractéristiques du MV, MP et P issues des travaux existants, sachant que les maquettes physiques ou prototypes sont réalisés par des procédés de technologie traditionnelle ou avec des procédés de prototypage rapide. A partir de ces caractéristiques, nous allons proposer des critères de choix entre MV, MP et P, sachant que la réalisation des objets physiques sera obtenue par fabrication additive.

En plus, les caractéristiques des MV, MP et P sont influencées par deux caractéristiques du cycle de développement de la pièce, le temps et le cout.

- *Temps du cycle de développement* : c'est le temps total du processus de développement du produit (jusqu'à ce que le produit soit envoyé sur le marché). La maquette virtuelle [83][84][86] et la maquette physique [86][87] permettent de réduire le temps du processus de développement. Par exemple, le temps du processus de développement d'une voiture est réduit de 6 ans à moins de 3 ans [84] grâce à l'usage de la maquette virtuelle. Mais dans ces articles, il n'y a pas de comparaisons directes entre maquette virtuelle et maquette physique.
- *Coût du cycle de développement* : c'est le coût total du processus de développement du produit (jusqu'à ce que le produit soit envoyé sur le marché). La maquette virtuelle [83][84][86] et la maquette physique [86][87] permettent de réduire le cout du processus de développement. Par exemple, pour la conception du Boeing 777 il a été économisé plusieurs millions dollars en utilisant la maquette virtuelle [84].

#### 4.1.3.1. Critères de choix entre MV, MP et P pour une réalisation en fabrication additive

A partir des caractéristiques définies précédemment, dans un contexte de fabrication traditionnelle ou de prototypage rapide des maquettes physiques et prototypes, nous proposons ci-après des critères de choix entre MP, MV et prototype dans un cadre de fabrication additive.

Les critères sont déterminé comme ci-dessous:

- *Le temps de réalisation de la tâche* : Les travaux existants parlent de l'influence du temps consacré à MV, MP et P sur le temps total du processus de développement d'un produit. Ce temps consacré à ces MV, MP et P prend en compte d'une part le temps d'obtention de MV, MP et P et d'autre part le temps

de l'analyse associée à ces maquettes ou prototypes. Par exemple, le temps d'obtention de MV est peut-être moins long que celui de P, mais le temps total nécessaire pour l'analyse souhaitée avec MV est peut-être supérieur à celui d'une analyse avec P. Nous avons donc défini le critère de temps comme *le temps pour réaliser la tâche, incluant le temps d'obtention (réalisation de la maquette ou du prototype) et le temps d'analyse (temps nécessaire pour analyser la pièce avec la solution choisie)*. Ce critère sera utilisé pour calculer le ratio entre le temps de réalisation la tâche au regard du temps total ou du temps restant dans le cycle de développement.

- *Le cout de la tâche* : de la même façon qu'avec le critère de temps, les travaux existants parlent du cout total du processus et du cout d'obtention la MV, MP ou P. Dans notre contexte, nous allons nous intéresser à la somme des couts de réalisation et des couts d'analyse pour obtenir le cout de la tâche.  
*Donc, nous avons défini le critère 'cout de la tâche' comme la somme des couts de réalisation et d'analyse avec le prototype ou la maquette physique.*
- *La capacité de réaliser la tâche* : les travaux existants parlent de la capacité des maquettes et prototypes à permettre de vérifier la géométrie, l'assemblage, les fonctions de la pièce ainsi que la fabrication et production. Par exemple, dans une situation liée avec la tâche d'analyse de la forme de la pièce, ce critère doit nous permettre de nous orienter vers une maquette ou un prototype qui assistera le concepteur dans l'analyse de la forme de la pièce. En plus, nous considérons que le « matériau disponible » est une caractéristique qui est incluse dans ce critère. C'est la disponibilité des matériaux pour évaluer l'impact du choix de la matière sur le comportement de la pièce. Par exemple, on peut aisément changer le matériau d'une MV pour faire un calcul de poids ou de résistance. Alors qu'il faudra faire plusieurs MP ou P pour tester des matériaux différents. Ajoutons *a contrario* (mais cet aspect n'est pas sorti de la bibliographie) que si certaines caractéristiques de la matière utilisée ne sont pas connues et quantifiées, l'usage de la maquette virtuelle ne sera pas possible alors que le P contient intrinsèquement ces caractéristiques sans que l'on ait besoin de les formaliser.
- *La modifiabilité* : Dans les travaux existants, il y a deux informations concernant cette modifiabilité : la « modification du prototype physique » et « modification de la maquette virtuelle ». Nous avons considéré que ces deux informations sont liées à la modifiabilité de la pièce. Donc, nous avons défini la modifiabilité comme le critère qui est lié à la capacité de modifier la maquette virtuelle, maquette physique ou le prototype. Est-ce qu'on peut le modifier

facilement et rapidement lorsque l'on souhaite vérifier l'impact de cette modification sur le comportement analysé ?

- *Diffusion*: c'est la capacité de diffusion (transmission aux collaborateurs) de la maquette virtuelle, maquette physique et du prototype. La diffusion est un critère important pour la conception collaborative à distance. Par exemple si l'on souhaite effectuer plusieurs analyses différentes, il sera probablement plus simple de diffuser une maquette numérique auprès des divers services devant mener ces analyses, que de diffuser une maquette physique.
- *Disponibilité quand on a besoin* : c'est un critère important aussi pour la conception collaborative. Est-ce que la maquette virtuelle, la maquette physique ou le prototype sont toujours disponibles quand on a besoin ? La maquette virtuelle peut être utilisée par plusieurs personnes en même temps. La maquette physique ou le prototype ne peuvent par contre être utilisés que par une seule personne au même moment, sauf à en réaliser plusieurs exemplaires, ce qui a des implications plus lourdes que la duplication d'une maquette virtuelle.
- *Soutenir la collaboration* : c'est la capacité de soutenir le travail collaboratif. Par exemple, la communication, la discussion entre les membres dans une équipe, ou partager des connaissances pour aider les acteurs à comprendre les concepts. La bibliographie montre que ce critère conduit plus particulièrement au choix du Prototype dans le processus global de conception. Mais elle ne parle pas du positionnement de MV selon ce critère.
- *Rétroaction sensorielle vers les utilisateurs* : ce critère est lié à la possibilité de l'utilisateur d'évaluer MV et P par ses différents sens tels que la vue (formes, textures...), le toucher (dureté, rugosité, poids, vibrations, thermique...), l'ouïe (bruit en fonctionnement...), l'odorat, etc. La bibliographie montre que la maquette physique ou le prototype sont privilégiées au regard de ce critère.

Ces sont des critères que nous avons déterminés à partir des caractéristiques de MV, MP et P trouvés dans l'étude bibliographique. Une analyse de ces critères est importante pour choisir les critères qui vont vraiment servir dans notre contexte de fabrication additive. A partir de cette liste des critères trouvés selon l'étude bibliographie et reformulés ci-dessus, nous avons choisi d'en garder certains ou d'intégrer plusieurs critères à un critère. Nous avons choisi les critères ci-dessous au regard de nos expériences précédentes :

- *Le temps et le coût de réaliser la tâche* : Le temps et le cout sont deux critères importants dans un processus de conception. Pendant notre projet avec une entreprise, ces deux critères sont toujours proposés par notre client.

- *La capacité de réaliser la tâche* : nous le garderons parce qu'il est un critère lié directement avec notre objectif de travail (analyser les comportements de la pièce).
- *La modifiabilité* : c'est aussi un critère important pour une comparaison entre MV et P parce que nous devons modifier les MV, MP et P plusieurs fois pour évaluer différentes solutions de conception de la pièce.
- *Capacité de soutenir la collaboration*: nous avons intégré les deux critères, la diffusion et la disponibilité, à ce critère. Ce sont des critères qui nous permettent de comparer la capacité du MV, MP et P à soutenir la collaboration entre le concepteur, le client et les experts de divers domaines.
- *Rétroaction sensorielle des utilisateurs* : ce critère va être intégré dans un critère dont on va parler ci-dessous.

#### 4.1.4. Les critères de choix entre MV, MP et P issus de l'étude de cas du chapitre

##### 3

Au-delà des critères de choix entre MV, MP et P issus de l'étude bibliographique, nous avons retenu deux critères importants auxquels nous avons été confrontés dans l'étude de cas précédente. Nous avons un prototype déjà validé par un calcul élément finis, c'est à dire qu'on avait déjà analysé la résistance de notre pièce avec la MV avant de réaliser le P. Mais pendant l'essai mécanique, le P s'est cassé. À partir de cette situation, nous avons rajouté deux autres critères qui sont en cohérence avec nos expériences antérieures :

- *Quantité d'information* : la quantité de connaissance issue de la simulation avec maquette virtuelle ou de l'essai avec maquette physique ou prototype. C'est un critère important dans le cas où on a besoin des informations en retour. Par exemple, si on analyse la résistance avec une maquette virtuelle, on peut voir la carte de contraintes, Figure 4-5a, donc identifier les zones à risques et les points de ruptures potentielles. Mais si on analyse avec le prototype, on peut savoir uniquement s'il a résisté ou pas. Par exemple, dans la Figure 4-5b, un prototype est cassé pendant l'essai mais on ne sait pas exactement la raison, et on a du mal à identifier le point de départ de la rupture. Le critère de « *Rétroaction sensorielle des utilisateurs* » est intégré dans ce critère. Dans les travaux existants, MP et P sont souvent donnés comme fournissant plus d'information que la MV. Par exemple, les MP et P nous permettent de connaître la qualité de surface ou de rugosité de la pièce.

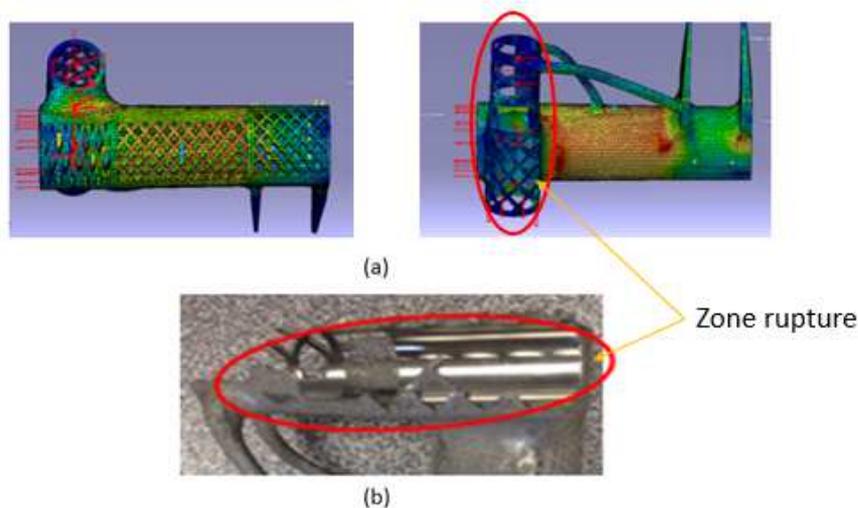


Figure 4-5: (a) Résultat du calcul EF; (b) Résultat de l'essai physique

- *La représentativité* : il s'agit de l'aptitude (ou capacité) à la représentation des caractéristiques effectives du comportement de la pièce. Par exemple le prototype que nous avons réalisé, qui était résistant au vu du calcul éléments finis (Figure 4-5a) s'est cassé lors d'un test (Figure 4-5b). Ce qui montre que le résultat du calcul par éléments finis n'est pas dans ce cas représentatif du comportement réel de la pièce. Ceci est dû aux hypothèses faites lors des modélisations qui conduisent à des écarts entre résultats de simulation et comportements réels. Dans d'autres cas, ce pourrait être la maquette physique ou le prototype qui pourraient ne pas être représentatifs de la réalité parce que par exemple on ne saurait reproduire en expérimentation les conditions d'usage du composant testé. Ce qui nous intéresse ici c'est la capacité des maquettes ou prototypes à être représentatifs des comportements réels dans leurs conditions d'usage.

#### 4.1.5. Problématique de recherche affinée

Les travaux existants ne présentent pas les méthodes ou les modèles pour faire le choix entre MV, MP et P. Nous avons défini des caractéristiques associées aux MV, MP et P pour un processus de conception de pièces réalisées avec fabrication additive. A partir de ces caractéristiques, nous avons déterminé les critères pour le choix entre MV, MP et P au cours du processus de conception.

Dans notre étude, nous avons utilisé toujours la technologie EBM pour fabriquer les pièces. C'est la même technologie pour fabriquer les pièces en série. Donc, nous nous sommes concentrés plutôt sur le prototype que la maquette physique. Par la suite de notre travail, nous continuerons autour d'une problématique de choix entre MV et P.

A partir de l'étude bibliographique, nous avons mis en évidence des attributs pour une situation de conception. Ces attributs sont : la tâche de conception, l'objet de conception, les acteurs et les contextes (industriel, projet et technique).

Ceci nous permet d'affiner notre problématique que nous exprimons comme suit : *pour une situation donnée, dans un processus de conception pour la fabrication additive EBM, quel est le modèle (ou la méthode) qui nous permettra de choisir entre MV et P pour analyser un comportement spécifique de notre pièce ?*

Nous allons dans la partie suivante déterminer les éléments qui nous permettront de proposer un modèle de choix entre MV et P au cours du processus de conception.

#### 4.2. Etude de cas (Descriptive Study)

Nous reprenons l'étude de cas de la pièce en croix que nous avons utilisée dans le chapitre précédent (chapitre 3). La Figure 4-6 nous rappelle les moments importants dans le processus de reconception de la pièce. Ces moments sont définis au regard des caractéristiques et des comportements que nous avons analysés : la forme, la résistance, la fabrication et la finition de la pièce, que nous avons associés à des situations différentes.

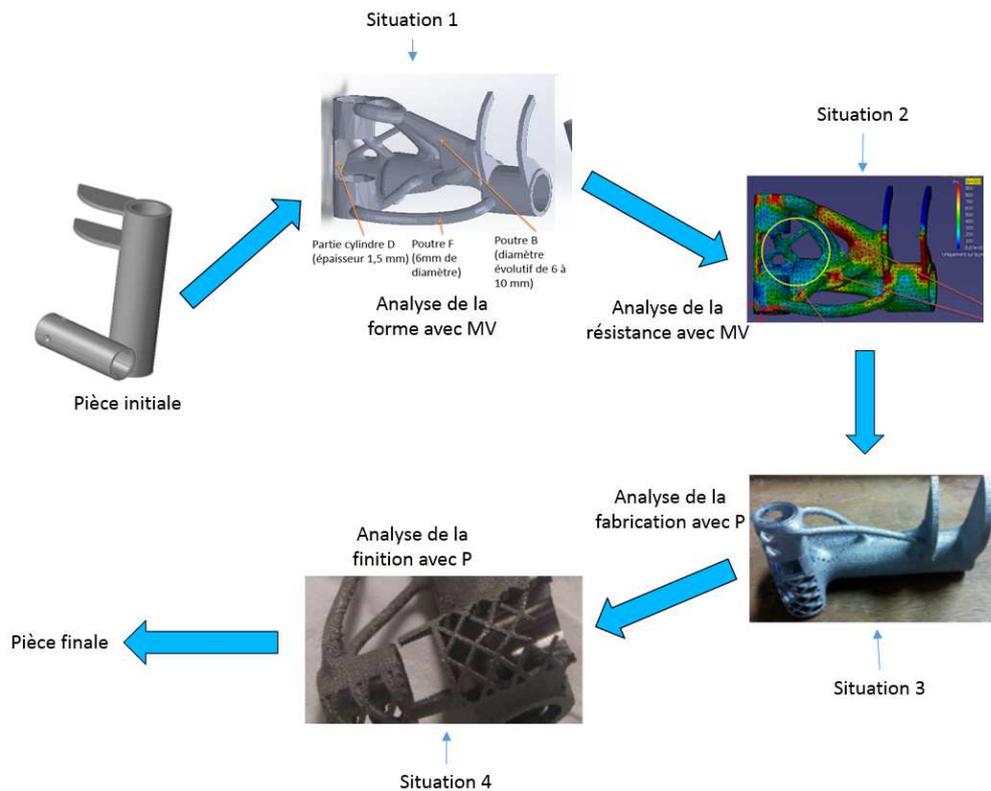


Figure 4-6: Les situations rencontrées dans cette étude de cas

La Figure 4-6 ne présente que les moments importants de notre processus de conception. Pour chaque moment, nous avons fait des itérations avec le client pour

obtenir le résultat final comme nous avons présenté dans le chapitre 3. Dans chacun de ces moments nous nous sommes confrontés à des cas particuliers. Nous allons donc analyser les 4 cas principaux décrits ci-dessus et rencontrés lors du processus. Au cours de l'étude de 2 de ces cas, nous avons utilisé la MV : pour analyser la forme et la résistance de la pièce. Par contre le P a été utilisé pour analyser la fabrication et la finition la pièce.

Pour commencer, et pour chaque cas, nous allons décrire les situations propres à ces cas par leurs attributs (tâche, objet, acteurs, contextes) pour essayer de mettre en relation les choix entre MV, MP et P avec ces situations.

Pour toutes les situations, l'objet de conception est la pièce en croix.

Les participants à la base sont l'équipe concepteur au laboratoire G-SCOP et notre client à distance. En plus, dans quelques situations particulières, nous ajoutons les interventions d'experts. Par exemple, un expert en usinage participe avec nous dans l'étape de finition de la pièce.

La tâche de conception et certains éléments de contexte sont différents pour chaque situation. Nous présentons les détails de chaque situation dans la partie suivante.

Nous rappelons que nous avons défini les critères de choix entre MV et P comme suit :

- La capacité de réaliser la tâche
- La capacité de soutenir la collaboration
- La modifiabilité
- Le temps de réalisation de la tâche
- Le cout de réalisation de la tâche
- La représentativité
- La quantité d'informations obtenue

Dans la section suivante, nous allons pour chacun des 4 cas : préciser les attributs de chacune des situations, associer des valeurs à chacun des critères, présenter le choix qui a été fait.

Dans les 4 situations, il y a des attributs qui ne changent pas. Donc, nous présentons tous les attributs dans la situation 1. Pour les 3 situations restantes, nous ne détaillons que les attributs qui ont changé de valeur par rapport la situation 1.

L'étude des 4 cas nous permettra de proposer une démarche générale de choix au regard des valeurs associées aux attributs et critères.

#### 4.2.1. L'analyse des cas rencontrés dans notre processus de conception

Nous allons décrire les situations à partir d'attributs qui caractérisent ces situations et de paramètres qui qualifient ces attributs. Les paramètres ont été construits empiriquement. Nous ferons une synthèse de ces paramètres en fin de section 4.2.1

##### 4.2.1.1. Cas 1

Au début du projet, nous avons rencontré un premier cas lié avec la tâche de l'analyse de la forme de la pièce. Pour ce premier cas : la MV est un modèle CAO 3D ; le prototype est la pièce fabriquée par machine EBM.

##### Les attributs dans la situation 1 :

- *La tâche de conception* : analyser la forme de la pièce. Il s'agit de vérifier la forme de la pièce avec notre client. Avec la fabrication additive, on peut proposer des solutions que le client n'a pas encore vues. On propose les solutions avec un point de vue conception, mais le client va regarder notre solution avec différents points vues, par exemple : économique, utilisation, transport, esthétique, impression de solidité ou de fragilité qui se dégage de la forme
- *Objet de conception*: pièce en croix, « pièce initiale » dans la Figure 4-6 (attribut commun pour 4 situations des 4 cas)
- *Les acteurs* :
  - Concepteur-chercheur du laboratoire G-SCOP : un thésard en deuxième année qui maîtrise le logiciel d'optimisation topologique (Inspire) et le logiciel CAO (Catia).
  - Equipe client (à distance) : un chef de projet qui regarde la forme des points vue économique, utilisation et transport. Intervient aussi un designer qui est capable de regarder la forme du point vue de l'esthétique et de certains critères d'acceptabilité par le client final.
- Contexte industriel (attribut commun pour 4 situations des 4 cas) :
  - Confidentialité : un contrat de confidentialité a été signé entre le laboratoire G-SCOP et le partenaire industriel. Il garantit le non diffusion des informations techniques et économiques du projet
  - Aéronautique : il existe des contraintes normatives et des pratiques liées au domaine. Pour notre projet, la contrainte est essentiellement de réaliser des pièces résistantes et les plus légères possibles.
  - Petite série : les pièces développées s'intègrent dans la cabine de pilotage et sont en nombre de 4 par avion

- Contexte projet :
  - Objectif de la pièce ou du travail envisagé (paramètre commun pour les 4 situations): réduction de 40% de la masse par rapport la pièce initiale (la masse initiale est 125g, la masse espérée est donc de 75g)
  - Durée pour la conception de la pièce finale (paramètre commun pour les 4 situations) : 6 mois
  - La position dans le processus : au début du projet de reconception
  - Organisation (paramètres commun pour les 4 situations): Travail asynchrone du concepteur-chercheur deux jours par semaine, une réunion visio-conférence par semaine entre le concepteur-chercheur et le client pour évaluer la forme de la pièce.
- Contexte technique : il inclut les moyens matériels et humains pour réaliser les MV, MP et P.
  - Pour réaliser la MV
    - Logiciels utilisés : Inspire et Catia
    - Opérateur : concepteur-chercheur
  - Pour réaliser le P
    - Technologie utilisé : machine Electron Beam Melting [EBM]
    - Opérateur : concepteur-chercheur avec une expertise de cette technologie.

La comparaison entre MV et P au regard des critères :

L'objectif de la tâche est d'analyser la forme de la pièce. Ces formes peuvent être définies à l'aide du logiciel Inspire (pour l'optimisation topologique) et Catia (pour le modèle CAO). Suite à cette réalisation du modèle CAO, la réunion synchrone peut s'appuyer sur le modèle CAO ou sur un prototype réalisé à partir du modèle CAO. Nous discutons dans cette section du choix entre ces deux représentations au regard des critères de choix définis plus haut.

- *La capacité de réalisation de la tâche* : dans cette situation, nous pouvons réaliser la MV et P. Nous n'avons pas de contraintes critiques relatives au logiciel, à la technologie et aux opérateurs. En plus, le modèle CAO et la pièce fabriquée par EBM nous permettraient d'analyser la géométrie globale de la pièce. Donc, les deux solutions sont bien adaptées au regard de ce critère.

- *La capacité à soutenir la collaboration* : la diffusion de MV est facile (par internet) et rapide (quelques secondes). Le P est diffusé par la poste (deux sites distants d'environ 450km). Le temps de la diffusion est d'au moins une journée. Par contre, une fois envoyée le P n'est plus disponible à sa localisation d'origine, alors qu'une copie de la MV est toujours disponible pour être utilisée. Donc, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *La modifiabilité* : le temps de modification d'une MV est dépendant de la complexité de la pièce et de ce que l'on doit modifier (un jour maximum). La modifiabilité de MV est toujours plus facile et rapide que la modification de P. Elle est même une condition initiale de la réalisation de P. Donc, pour notre situation, la MV est plus adaptée selon ce critère que le P.

- *Le temps de réalisation de la tâche* :

- Analyse avec MV : le temps pour concevoir le modèle CAO (2j).
- Analyse avec P : le temps de concevoir le modèle CAO (2j) plus le temps de fabrication du P (1j) si la machine est disponible. Le temps de fabrication inclut le temps de fabrication par la machine ainsi que le temps de dépoudrage et de retrait des supports.

Dans ces conditions, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *Le cout de réalisation de la tâche* :

- Analyse avec MV : ce cout est le cout du travail du concepteur plus le cout du logiciel CAO.
- Analyse avec P : ce cout est le cout du travail du concepteur plus le cout du logiciel CAO plus le cout de fabrication du P.

Dans ces conditions, MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *Représentativité* : dans cette situation, pour analyser la forme, la géométrie générale de la pièce, le modèle CAO et le P nous permettent de voir toutes les formes de la pièce. Avec le modèle CAO, nous pouvons tourner la pièce dans le logiciel CAO. Avec le prototype, nous pouvons tourner la pièce dans nos mains. On peut faire l'hypothèse que du point de vue visuel, le P ou le MV sont autant représentatifs des formes. Par contre le toucher n'est possible qu'avec le prototype.

- *Quantité d'information* : dans cette situation, pour la forme générale de la pièce, nous avons approximativement le même niveau d'information fourni par MV et par P.

Nous avons résumé la comparaison entre MV et P pour le cas 1 dans le Tableau 4-1. Dans ce tableau, nous utilisons « + » pour la représentation qui est plus adaptée au critère et « - » pour celle qui est moins adaptée au critère.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tâche	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modifiabilité	+ (heure)	- (jour)
Le temps	+ (1 jour)	- (2 jour)
Le cout	+	-

Représentativité	-	+
Quantité d'information	+	+

Tableau 4-1: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 1

*Le choix et raison* : Le choix qui a été fait est la MV. Quels sont les critères prépondérants pour ce choix ?

- La capacité de soutenir la collaboration : le client et le concepteur-chercheur ne se situent pas dans le même lieu. Donc la diffusion des informations est un élément important. Dans notre cas les maquettes virtuelles ont été échangées par mail. Le temps d'échange est ainsi réduit au minimum.

- La modifiabilité : Il est facile de modifier la maquette virtuelle. C'est-à-dire qu'on peut le modifier rapidement pour prendre en compte le retour du client. On peut avoir la version modifiée plus vite pour nous permettre de rediscuter au sujet de ces modifications.

#### 4.2.1.2. Cas 2

Après l'analyse de forme de la pièce, nous avons dû faire face à une nouvelle tâche : l'analyse de la résistance de la pièce. Dans ce nouveau cas, la MV est un modèle de calcul éléments finis de la pièce. Le prototype est la pièce fabriquée par la machine EBM et un banc d'essai nous permet de tester cette pièce.

#### Les attributs dans la situation 2 :

- La tâche de conception : analyser la résistance de la pièce.
- Les acteurs :
  - Concepteur-chercheur au laboratoire G-SCOP : un thésard en deuxième année qui a la capacité de faire le calcul élément finis sur Catia.
  - Equipe client (à distance) sur le site de l'entreprise : un chef de projet et un ingénieur qui sont tous deux capables d'analyser la résistance mécanique de la pièce à travers les résultats du calcul EF
- Contexte projet :
  - La position dans le processus : au début du projet
- Contexte technique :
  - Pour réaliser le MV
    - Logiciel utilisé : Catia ou Ansys
    - Opérateur : le concepteur est toujours disponible
  - Pour réaliser le P

- Technologie utilisée : la machine Electron Beam Melting [EBM] disponible au laboratoire, et un banc d'essais adaptable et disponible dans l'entreprise
- Opérateur : le concepteur avec une expertise de cette technologie.

Comparaison entre MV et P au regard des critères :

- *La capacité de réaliser la tâche d'analyse de la résistance* : dans cette situation, nous avons des moyens et aussi des opérateurs pour réaliser la MV et P. Avec la MV, nous pouvons regarder le résultat du calcul EF pour savoir si notre pièce résiste ou pas. Avec le P, nous pouvons connaître le résultat après avoir fait un essai. En général, les deux MV et P nous permettront de savoir si la pièce résiste. Donc, les deux solutions sont bien adaptées à ce critère si on peut réaliser l'essai.

- *La capacité de soutenir la collaboration* : la diffusion du résultat de calcul éléments finis (MV) est plus facile et rapide (par internet en quelques secondes) que le P. Par contre, le banc d'essai étant dans l'entreprise, la diffusion de la pièce réalisée au laboratoire, est nécessaire pour faire l'essai. Donc, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *La modifiabilité* : la modifiabilité de MV est plus facile et rapide (quelques heures) que le P (quelques jours). Donc, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *Le temps de réalisation de la tâche*

- Analyse avec MV : le temps est le temps de concevoir le modèle CAO (2j) plus le temps de définir les conditions aux limites (1j) plus le temps de calcul du logiciel (2h).
- Analyse avec P : le temps est le temps de concevoir le modèle CAO (2j) plus le temps de fabrication du P (1j) plus le temps d'envoyer le prototype au centre d'essai (1j) plus le temps de réalisation de l'essai (1j si le banc d'essai est disponible). Dans notre cas, le banc d'essai existe.

Dans ces conditions, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *Le cout de réalisation de la tâche:*

- Analyse avec MV : ce cout est le cout du travail du concepteur plus les couts du logiciel CAO et du logiciel de calcul élément finis.
- Analyse avec P : ce cout est le cout du travail du concepteur plus le cout de logiciel CAO plus le cout de fabrication du P plus le cout de réalisation de l'essai dans notre cas.

Sans quantifier en détail les couts, on estime que la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *Représentativité* : Il s'agit de la confiance que l'on accorde aux résultats du calcul élément finis ou de l'essai avec prototype. Le résultat du calcul EF est un résultat

théorique sur lequel on manque de confiance au vu des particularités de la géométrie de notre pièce (complexité des formes, fidélité des dimensions des formes représentées, états de surface, ...). L'essai est fait avec un prototype réel. Donc, on considère ici que le P génère plus de confiance que le modèle de calcul EF.

- Quantité d'information : dans cette situation, le calcul éléments finis nous permet d'avoir une carte de contrainte. Nous avons une connaissance sur la répartition de la contrainte (Von Mises) dans l'ensemble de la pièce. Avec le P, nous pouvons savoir si la pièce a résisté ou si elle a cassé et où, mais nous n'avons pas d'information sur la répartition des contraintes. Donc, pour nous dans cette situation, la MV est mieux adaptée que le P en termes de quantité d'informations fournies.

Nous avons résumé la comparaison entre MV et P pour le cas 2 dans le Tableau 4-2 .

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tâche	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+ (heure)	- (Quelque jour)
Le temps de réaliser la tâche	+ (3j)	- (5j minimum)
Le cout de réalisation de la tâche	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	+	-

Tableau 4-2: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 2

*Le choix et les raisons* du choix : Le choix qui a été fait est celui de la MV. Quels sont les critères prépondérants pour ce choix ?

- Le temps : le temps de réaliser un calcul éléments finis est assez court (temps de modélisation en CAO, temps de faire le modèle des conditions aux limites + temps de calcul de la machine), notamment parce que le modèle des conditions aux limites est déjà défini dans l'étape de l'optimisation topologique. Par contre, le temps d'analyser avec le prototype est long parce qu'il inclut le temps de préparation de la machine, le temps de fabrication, le temps d'envoyer au client et le temps de faire des essais.

- La modificabilité : la maquette virtuelle est facile à modifier. C'est la première fois qu'on analyse la résistance de notre pièce, donc on n'est pas sûr que notre pièce résiste. Normalement, on doit modifier les paramètres de notre pièce pour obtenir une meilleure solution. Avec une maquette virtuelle, on peut modifier et ré-analyser rapidement. Par contre, avec le prototype, cela prend du temps.

- Quantité d'information : dans cette situation, nous avons besoin de connaître la carte de contraintes pour optimiser la pièce, par exemple ajouter de la matière dans les zones les plus contraintes et inversement en enlever dans les zones les moins contraintes. Donc, la quantité d'information en retour du résultat d'analyse est importante. Pour ce critère, la MV est mieux que le P.

#### 4.2.1.3. Cas 3

Après l'analyse de la résistance de la pièce, nous avons dû réaliser une troisième tâche : « l'analyse de la fabrication de la pièce ». Dans ce nouveau cas, la MV est un ensemble de modèles CAO 3D et les logiciels qui nous permettent d'analyser la fabricabilité de la pièce. Le prototype est une pièce qui est fabriquée par la machine EBM.

#### Les attributs dans la situation 3 :

- La tâche de conception : « analyse de la fabrication » de la pièce. C'est pour vérifier la fabricabilité de notre pièce que l'on doit analyser les éléments importants du processus de fabrication. Ce qui est fait ici est d'une part le choix des stratégies de fabrication et des paramètres associés (orientation de construction, positions et formes des supports, etc.), puis d'autre part une analyse des caractéristiques de la pièce pour définir les caractéristiques de la fabrication. Avec la technologie choisie, ici c'est l'EBM, on analyse si la machine est capable de fabriquer ce type de pièce. Il nous faut par exemple: choisir l'orientation pour s'assurer que le volume englobant de la pièce est compatible avec le volume maxi de la machine (pour machine EBM qu'on a utilisée, le volume maxi est 200 mm \* 200 mm \* 190 mm) ; vérifier que le dépoudrage est réalisable; définir la stratégie de la fabrication comme la position de fabrication ou la direction de la fabrication ; définir les supports pour limiter les risques au niveau des surfaces en contre-dépouille ou en surplomb.
- Les acteurs :
  - Le concepteur-chercheur et un expert de la fabrication sur machine EBM
  - Equipe client: chef de projet et un ingénieur
- Contexte projet :
  - La position dans le processus : au milieu du projet
- Contexte technique :
  - Pour réaliser la MV
    - Logiciels utilisés : Magics, Assembly
    - Opérateur : Concepteur-chercheur
  - Pour réaliser le P
    - Technologie utilisée : machine Electron Beam Melting [EBM]
    - Opérateur : Concepteur avec une expertise de cette technologie.

### La comparaison entre MV et P au regard des critères :

- *La capacité de réalisation de la tâche*: au début nous considérons que nous avons les moyens et aussi des opérateurs pour réaliser la MV (analyse la fabricabilité) et P (une fabrication). Avec MV dans cette situation, nous pouvons définir les paramètres principaux de la fabrication pour la machine EBM comme les supports, la direction et la stratégie de la fabrication. Les paramètres sont définis en utilisant les règles de fabrication selon les expériences des experts. Avec le P, nous obtenons le résultat de la fabrication en réel. Nous pouvons analyser la qualité de la pièce obtenue. En plus, on peut analyser les effets des paramètres de la fabrication qu'on a définis.

- *La capacité de soutenir la collaboration* : la diffusion de MV est facile et rapide par internet. Dans ce cas, c'est un modèle CAO (en format step) et un fichier Magic qui définit le support et la stratégie de fabrication. La disponibilité de la MV est dépendante des logiciels qu'on a. C'est-à-dire qu'on doit avoir les logiciels correspondants pour ouvrir et visualiser la MV. Avec le prototype, pour diffuser une pièce c'est moins facile. Pour le P, nous ne pouvons pas l'utiliser en différents lieux en même temps pour le cas qu'on a un seul prototype. De manière globale, le MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *La modifiabilité* : pour modifier la MV, nous pouvons changer les paramètres sur le logiciel, par exemple sur Magics, c'est facile et rapide (quelques minutes). Pour modifier le P, il faut changer les paramètres et relancer la fabrication. Cela prend au minimum une journée. Donc, la MV est plus adapté au critère que le P.

- *Le temps de réalisation de la tâche*

- Analyse avec MV : C'est le temps pour définir la programmation pour la fabrication qui est 2h.
- Analyse avec P : le temps est le temps de définir la programmation (2h) plus le temps de fabrication du P (1j).

Dans ces conditions, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *Le cout de réalisation de la tâche*

- Analyse avec MV : c'est le cout du travail du concepteur plus le cout logiciel (seulement pour Magics, Assembly est un logiciel gratuit).
- Analyse avec P : le cout est le cout du travail du concepteur plus le cout du logiciel (comme ci-dessus), plus le cout de fabrication du P.

Dans ces conditions, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- *Représentativité* : le résultat d'analyse de la fabrication avec la MV est le résultat estimé par les experts au regard de leurs expériences. Donc, nous ne sommes pas vraiment sûrs de ce résultat. En plus, pour l'instant, nous n'avons pas encore un moyen pour simuler exactement le processus de fabrication (EBM) avec tous les paramètres comme l'énergie, la thermique... Donc, la confiance dans le résultat est moins grande que le résultat issu d'une analyse avec le prototype.

- *Quantité d'information* : nous n'avons pas beaucoup d'informations obtenues après l'analyse de la fabrication avec MV. Parce qu'aucun logiciel ou MV ne permet de visualiser la pièce après fabrication. Nous appliquons seulement des critères de fabricabilité. C'est au concepteur de faire le travail à la fois de conception et d'évaluation de la stratégie de fabrication, en s'appuyant sur un outil de pure représentation géométrique de ce qu'il envisage. Avec le prototype, nous pouvons avoir des informations fiables sur le dépoufrage, mais aussi sur la qualité de notre pièce, par exemple la déformation, la rugosité de la pièce. Nous pouvons détecter aussi les erreurs pendant la fabrication. Par exemple, la stratégie de la fabrication, l'énergie ou thermique dans la chambre de fabrication. En plus, le résultat de l'analyse avec P peut nous permettre définir de nouvelles règles de fabrication par machine EBM. Donc pour nous dans cette situation, le P est mieux adapté que la MV.

Nous avons résumé la comparaison entre MV et P pour le cas 3 dans Tableau 4-3.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réalisation de la tâche	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+ (quelque minutes)	- (une journée)
Le temps de réalisation de la tâche	+ (2 à 3h)	- (1 jour)
Le cout de réalisation de la tâche	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	-	+

Tableau 4-3: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 3

*Le choix et ses raisons* : le choix que l'on a fait est celui du prototype. Quels sont les critères prépondérants pour ce choix ?

- Nous avons choisi le P parce que le résultat d'analyse avec la MV n'est pas toujours correct. En plus, nous avons besoin en retours des informations pour évaluer la fabrication de la pièce. Par exemple, les informations sur les supports, la direction et la position de la fabrication... Donc, les deux critères prépondérants sont: représentativité et quantité d'information. En comparaison des niveaux sur ces deux critères, le choix est clairement P.

#### 4.2.1.4. Cas 4

Après avoir obtenu une pièce en sortie de fabrication additive, nous avons fait face à la quatrième tâche : l'analyse de l'usinage de la pièce. Pour cette tâche, la MV est une programmation des opérations de finition telles que définies par l'expert en usinage. Le programme d'usinage inclut la définition de la mise en position, le maintien en position, la vitesse de coupe, les trajectoires d'outil, etc... Le prototype est le processus d'usinage de notre pièce réelle par la machine de fraisage qui utilise la programmation préparée par l'expert.

#### Les attributs dans la situation 4 :

- La tâche de conception : analyser la finition de la pièce et le processus qui permet cette finition. Le concepteur ou le fabricant analyse les paramètres du processus d'usinage comme : la mise en position et les surfaces de positionnement, le maintien de la pièce, les trajectoires d'outils, les vitesses de coupe, ....
- Les acteurs :
  - Concepteur – chercheur, et un expert en usinage
  - Equipe client (à distance) : chef de projet et un ingénieur
- Contexte projet :
  - La position dans le processus : à la fin du projet
- Contexte technique :
  - Pour réaliser la MV
    - Logiciel utilisé : Esprit
    - Opérateur : expert en usinage
  - Pour réaliser le P
    - Technologie utilisée : machine de fraisage
    - Opérateur : expert en usinage

#### La comparaison entre MV et P au regard des critères :

- *La capacité de réaliser la tâche* : nous considérons que nous avons les moyens et aussi les opérateurs pour réaliser la MV (une simulation d'usinage) ou le P (un usinage). Dans cette situation, nous pouvons définir les paramètres principaux du processus de fraisage pour la machine CNC comme les trajectoires d'outils, les vitesses de coupe... Nous pouvons aussi simuler le fraisage sur Esprit et exporter une programmation pour la machine CNC. Les paramètres sont définis en utilisant les règles de fabrication selon les expériences des experts. C'est-à-dire qu'avec la MV nous pouvons analyser le futur résultat du fraisage du point de vue de l'expert. Avec le P, nous obtenons le résultat du fraisage en réel. Nous pouvons vérifier le résultat de la fabrication obtenu avec les paramètres choisis et nous pouvons de plus analyser la

qualité de la pièce obtenue. Les deux solutions permettent d'analyser, de différentes manières, la finition de la pièce.

- La capacité de soutenir la collaboration : Pour la même raison que pour la situation 3. La MV est plus adapté que le P.

- La modifiabilité : Pour modifier le P, nous devons changer les paramètres dans la programmation et relancer l'usinage (1 jour), à condition de disposer d'une pièce non usinée. Pour modifier la MV, nous devons seulement changer les paramètres dans le logiciel. C'est vraiment rapide (quelques minutes) et il n'est pas nécessaire de disposer d'une pièce réelle sortie de F.A.

- Le temps de réalisation de la tâche

- Analyse avec MV : c'est le temps de définir les paramètres du fraisage et le temps de simuler le processus du fraisage (2h).

- Analyse avec P : le temps de fabrication du P (1j) plus le temps de finition (1j) si on a déjà les moyens de mise et maintien en position.

Dans ces conditions, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- Le cout :

- Analyse avec MV : c'est le cout du travail de l'expert plus le cout du logiciel (Esprit)

- Analyse avec P : c'est le cout du travail de l'expert plus le cout de logiciel (Esprit), plus le cout de fabrication du P brut et le cout de finition par usinage.

Dans ces conditions, la MV est plus adapté à ce critère que le P.

- Représentativité : les paramètres d'usinage sont définis par l'expert selon son expérience. Pour l'instant, nous ne pouvons pas calculer la résistance de la pièce pendant l'usinage. Nous avons rencontré un cas au cours duquel la pièce s'est cassée pendant l'usinage à cause de l'effort de coupe. Donc, la confiance dans le résultat de la MV est moindre que ceux obtenus avec le prototype.

- Quantité d'information : Nous nous trouvons dans le même cas que lors de la situation 3. Avec la MV, nous avons analysé le processus de l'usinage en condition idéale, avec des paramètres qui sont définis par notre expérience. Mais nous ne pouvons pas obtenir de retour sur le résultat réel des opérations de finition selon les paramètres choisis. Par exemple, nous avons modélisé le processus d'usinage avec une valeur de vitesse de coupe et une vitesse d'avance définies par notre expérience. Mais nous ne pouvons pas obtenir les informations du processus d'usinage avec ces valeurs de paramètres. Avec le prototype, nous pouvons détecter les erreurs pendant l'usinage. Nous pouvons aussi savoir la qualité de notre processus au regard de la qualité de notre pièce. En plus, le résultat d'analyse avec P peut peut-être nous permettre de nous confronter avec de nouveaux problèmes pendant l'usinage qui n'étaient pas détectables sur le logiciel. Donc, pour nous dans cette situation, le P est mieux adapté que la MV.

Nous avons résumé la comparaison entre MV et P pour le cas 4 dans Tableau 4-4.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tâche	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+ (quelque minute)	- (1 jour)
Le temps de réalisation de la tâche	+ (2 heures)	- (2 jour)
Le cout	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	-	+

Tableau 4-4: Tableau de comparaison entre MV et Prototype pour le cas 4

*Le choix et ses raisons* : le choix qu'on a fait est celui du prototype. Quels sont les critères prépondérants pour ce choix ?

- C'est la même raison que pour le cas 3. Nous avons choisi le P à cause de la confiance dans le résultat d'analyse et aussi pour les informations de retours (observation de la qualité du résultat selon les valeurs des paramètres du processus) pour évaluer le processus d'usinage. Donc, cela correspond aux deux critères : représentativité et la quantité d'information. En comparaison des niveaux de ces deux critères le choix est clairement P.

#### 4.2.2. Les résultats importants de l'étude de cas

De notre étude de cas basée sur quatre cas successifs dans le processus de conception, nous obtenons les deux résultats principaux que nous synthétisons ci-dessous :

- Nous avons défini six attributs pour décrire une situation : Tâche, Objet, Acteur, contexte industriel, contexte projet et contexte technique. En les faisant fonctionner pour décrire nos quatre situations, nous mettons en évidence un certain nombre de paramètres à définir pour qualifier ces attributs. Une synthèse des paramètres associés à chacun de ces attributs et aussi des valeurs qui leur sont associées est présentée dans la table ci-dessous :

Attribut	Paramètre	Valeurs	Description
<b>Tâche</b>	Nature de la Tâche	1. Analyse de forme 2. Analyse de résistance 3. Analyse de fabrication 4. Analyse de la finition ...	Le travail à réaliser
<b>Objet</b>	Type d'Objet	1. Pièce 2. Mécanisme	Produit à concevoir

		...	
<b>Acteur</b>	Fonction des Acteurs	1. Concepteur chercheur 2. Ingénieur 3. Chef de projet 4. Designer 5. Expert de fabrication 6. Expert de finition ...	Les participants pour réaliser la tâche
	Compétences	1. Optimisation topologique 2. Modélisation modèle CAO 3. Calcul mécanique ...	Les compétences des acteurs pour réaliser la tâche
<b>Contexte industriel</b>	Domaine application	1. Aéronautique ...	Le domaine appliqué de la pièce
	Stratégie	1. Confidentialité 2. Petite série ...	La stratégie de l'industriel
<b>Contexte projet</b>	Objectif	1. Minimiser la masse 2. Augmenter la rigidité ...	Objectif du projet
	Durée	1. Longue 2. Moyenne 3. Courte	Durée pour la conception de la pièce finale
	Position	1. au début du projet 2. au milieu du projet 3. à la fin du projet	La position de la situation dans le processus de conception
	Organisation	1. Travail asynchrone 2. Réunion visio-conférence par semaine	L'organisation du travail pour réaliser la tâche
<b>Contexte technique</b>	Technologie (Logiciel ou Machine)	1. Catia 2. Inspire 3. Optistruct 4. Esprit 5. Magics 6. Machine EBM 7. Machine CNC ....	Logiciel ou machine utilisé pour réaliser la MV, MP ou P
	Disponibilité de l'opérateur	1. Concepteur-chercheur 2. Expert de fabrication 3. Expert de finition ....	La disponibilité de l'opérateur du logiciel ou la machine.

Tableau 4-5: Les paramètres de la situation de conception

Les paramètres et les valeurs dans ce tableau sont un résumé disponible à cet instant. Nous pourrions enrichir ce tableau avec des paramètres ou des valeurs qu'on va rencontrer dans les autres cas d'études.

- Une démarche générale pour faire le choix entre MV et P au cours du processus de conception, comme décrit Figure 4-7. Dans un cas particulier, l'évaluation des MV, MP et P au regard d'une liste de critères permet de sélectionner le meilleur outil pour atteindre les objectifs de la tâche concernée. La première étape de la démarche est la détermination de la situation de conception. Dans cette étape, nous donnons des valeurs aux paramètres de la situation qui sont définis dans le tableau au-dessus (Tableau 4-5). Dans la deuxième étape, nous voulons comparer MV et P au regard des critères de choix. Ces critères sont ceux définis au paragraphe 1.3.1. Le concepteur remplit, en fonction de son expérience et de manière qualitative, une table de comparaison entre MV et P par rapport à ces critères. La troisième étape est de faire le choix en utilisant la table de comparaison et la pondération des critères, qui est elle aussi définie par le concepteur en tenant compte de la situation. Cette pondération est nécessaire car, quand on a fait le choix dans les situations décrites ci-dessus, on n'a pas pris en compte tous les critères. Certains ont été considérés comme plus importants que d'autres. Il y a donc lieu de hiérarchiser les critères.

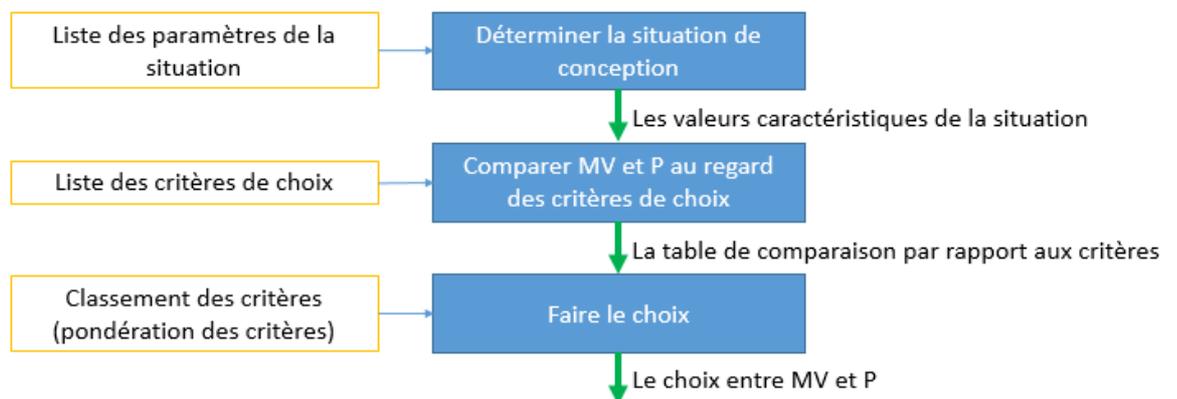


Figure 4-7 : La démarche pour faire le choix entre MV et P

Au-delà de ces deux résultats importants, nous pouvons aussi faire les remarques suivantes :

- Pour faire le choix entre MV et P pour chaque cas :
  - Il est parfois difficile de donner une valeur précise à chacun des critères. Les valeurs peuvent être différentes avec des concepteurs différents selon leurs expériences respectives.
  - Le choix entre MV et P est décidé sans être rigoureusement justifié. Il s'appuie lui aussi sur l'expérience du concepteur.
- Nous définissons la notion de cas comme un ensemble {situation, critères, pondération, choix}

- Nous définissons ainsi des ensembles {situation, critères, pondération, choix} particuliers qui deviennent des cas de référence pour les situations futures.

Ayant constaté que les choix concernant MV et P sont largement dépendants de l'expérience du concepteur, nous allons ci-dessous proposer une méthode permettant de réduire le côté subjectif de ces choix.

#### 4.3. Une proposition de méthode de choix (Prescriptive Study)

Dans cette partie, nous allons développer notre démarche générale pour faire le choix entre MV et P au cours du processus de conception. Connaissant les choix effectués dans les études antérieures, face à de nouveaux cas, comment pouvons-nous effectuer les choix les plus pertinents ? En quoi il est indispensable de s'appuyer sur notre expérience préalable pour faire nos choix ?

Il y a trois points à approfondir dans notre démarche (Figure 4-7) pour faire le choix:

- Les comparaisons entre MV et P selon les critères de choix sont faites à partir de valeurs estimées par le concepteur. Donc, le choix n'est justifié que par l'expertise d'une personne, souvent de manière subjective.
- Il n'y a pas un retour d'information sur les difficultés, réussites et sur la qualité des résultats obtenus après avoir mené l'analyse à partir du choix décidé.
- Le choix et la comparaison effectués ne sont pas enregistrés et capitalisés et ne peuvent donc pas être réutilisés de manière structurée pour les cas suivants.

Pour supporter notre démarche, nous proposons d'utiliser la méthode de raisonnement par cas. C'est une méthode permettant d'utiliser les expériences, les cas déjà rencontrés, pour proposer une solution pour un nouveau cas. Avec cette méthode, nous pouvons construire et justifier notre choix dans une situation donnée en s'appuyant sur des cas références. Nous présentons en détail cette méthode ci-après.

##### 4.3.1. La méthodologie du raisonnement à partir de cas

Le raisonnement à partir de cas (RàPC) (nommé en anglais case-based reasoning (CBR)) résout les problèmes en retrouvant des cas similaires rencontrés et résolus et en les adaptant au cas considéré. Cette méthodologie est apparue il y a une quinzaine d'années mais les travaux initiaux sur le sujet remontent cependant aux années 1980 et aux expériences de Schank et ses étudiants à l'Université Yale [89] [90] [91]. Les origines de la méthode CBR sont associées au désir de comprendre comment les gens se souviennent des expériences passées et les réutilisent. Il a été reconnu que pour résoudre des problèmes, les gens travaillent souvent en se rappelant comment ils ont résolu des problèmes similaires dans le passé.

Une définition classique de la méthode CBR proposée par Riesbeck and Schank [92] : CBR est une méthodologie qui aide à résoudre les nouveaux problèmes en utilisant ou en adaptant les solutions associées à des anciens problèmes. Il y a 4 étapes principales dans un système de raisonnement par cas (Cf. Figure 4-8) :

- La phase de remémoration (RETRIEVE) : l'objectif de cette phase est d'extraire de la base de cas des anciens cas dont la partie problème est similaire au problème du nouveau cas (cas cible). Les cas extraits de la base sont appelés les cas sources. Ces cas extraits seront à la base de la phase de réutilisation suivante.
- La phase de réutilisation (REUSE) : cette phase permet de proposer une solution au problème du cas cible en appliquant les solutions proposées pour les cas sources. Il est possible d'utiliser la même solution que celle du cas source ou proposer une nouvelle solution en référence à la solution du cas source. A l'issue de cette phase, une ou plusieurs solutions seront proposées pour le cas cible.
- La phase de révision (REVISE) : dans cette phase, les solutions proposées par la phase précédente sont révisées en fonction de certaines règles, de connaissances dans le domaine d'application. La phase de révision peut être faite par des experts dans le domaine d'application ou parfois d'une manière automatique.
- La phase d'apprentissage (RETAIN) : dans cette phase, le cas cible avec une solution validée dans la phase précédente est ajoutée dans la base de cas. Mais avant d'ajouter ces cas, il faut vérifier la pertinence de cet ajout. Par exemple, éviter les cas redondants, ce qui pourrait augmenter le temps de recherche dans le système.

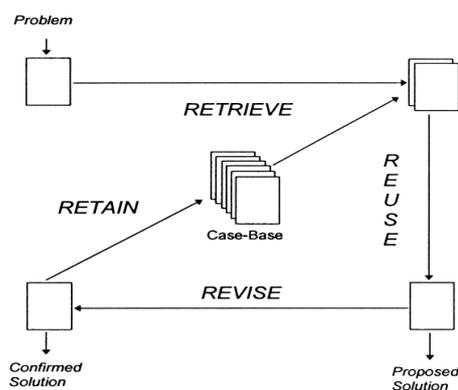


Figure 4-8: Cycle de ma méthode CBR selon Aamodt et Plaza [93]

Domaine application du CBR est très large [97] comme psychologie cognitive, reconnaissance de formes, apprentissage automatique, sciences cognitives, recherche

d'information, statistiques/ robotique, structures de données, génie logiciel et planification de processus.

Selon Watson [95], le CBR est une méthodologie générale qu'on peut utiliser dans différentes domaines. Nous n'avons besoins que changer la technologie corresponde avec le domaine d'application. Deux éléments plus importants dans méthode CBR sont la définition le cas et la fonction pour chercher les cas similaires.

### Représentation le cas dans CBR

Un cas dans le CBR [98] est une pièce contextualisée de l'expérience qui peut être représentés sous les trois formes principales : la représentation de vecteurs de caractéristique, les représentations structurées et les représentations textuelles :

- La représentation de vecteurs de caractéristique : le cas est présenté au format d'un vecteur avec une paire attribut-valeur. Cette représentation est souvent utilisée dans le domaine d'apprentissage automatique.
- **les représentations structurées** : le cas est présenté par classe et des sous-classes. Il a souvent utilisé pour les cas qui sont des représentations relationnelles. Par exemple, Ho & Mathew [99] a présenté les cas de forgeage en classes et sous-classes objet. Les cas de forgeage peuvent être classés en différentes classes en fonction des propriétés géométriques ou d'autres caractéristiques, Figure 4-9.

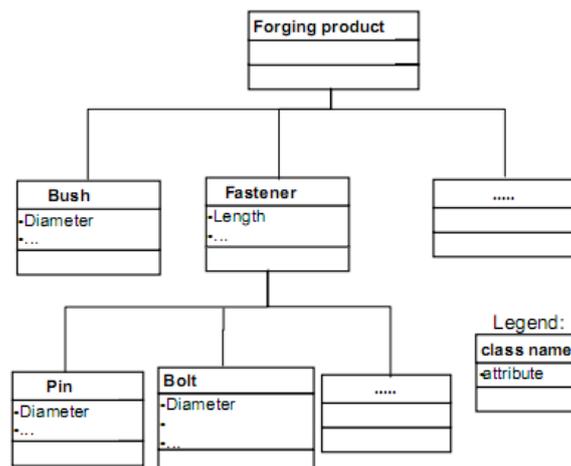


Figure 4-9: Un exemple de la représentation structure

- les représentations textuelles : ils n'imposent qu'une structure faible sur les cas. Cela permet une exploitation facile de l'expérience capturée dans les documents tels que les rapports des bugs ou les FAQ. Les champs de texte sont généralement représentés comme des éléments d'éléments linguistiques (par

exemple, des mots réduits). Par exemple, Rodrigues & al [100] a présenté un cas de e-learning contenu comme Figure 4-10.

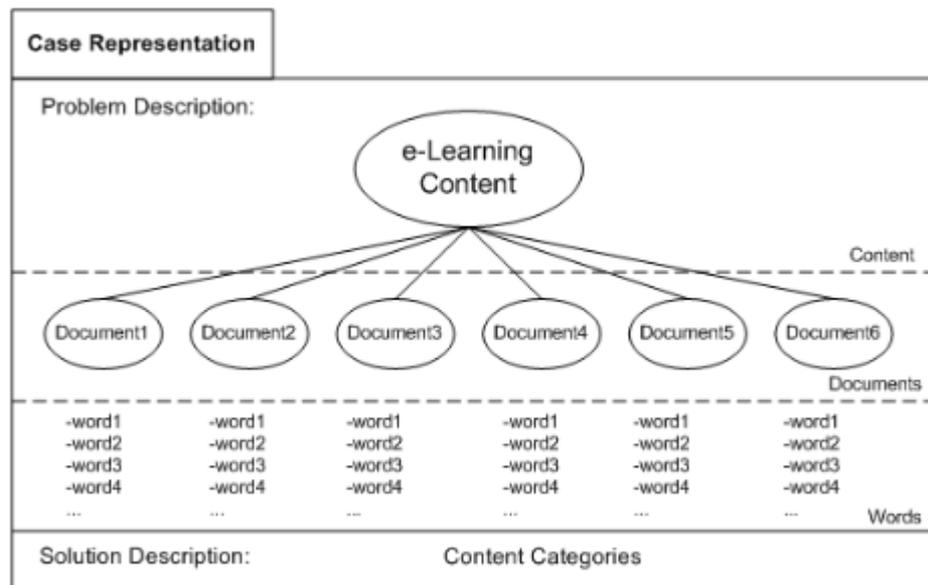


Figure 4-10: Un exemple du cas représentation textuelle

### Retrieve : chercher des cas similaires

Watson [95] a listé 4 technologies principales pour chercher les cas similaires comme : le plus proche voisin, induction, « fuzzy logic » et SQL.

- **CBR utilisé « le plus proche voisin »** : c'est une technologie qui a utilisé plus que les autres technologies. La similarité du cas cible (target) avec les cas sources dans la base de données pour chaque attribut sont déterminés. Ce calcul peut être de multiplier avec une valeur de pondération. La similarité est calculée par l'équation au-dessous.

$$\text{Similarity}(T, S) = \sum_{i=1}^n f(T_i, S_i) \times w_i$$

Avec T est le cas cible ; S est le cas source ; n est le nombre de l'attribut dans chaque cas ; i est le numéro de l'attribut de 1 à n ; f est la similarité pour l'attribut i entre cas T et cas S ; w est la valeur de pondération de l'attribut i. La valeur de similarité est entre 0 et 1, le plus grand le plus similaire. Price & al [101] utilisait cette technologie pour définir les paramètres du procédé de coulée sous pression en aluminium. Ho & Mathew [95] a utilisé « le plus proche voisin » pour chercher des cas similaires de forgeage.

- CBR utilisé induction : Les algorithmes d'induction construisent des arbres de décision à partir d'historiques de cas, exemple Figure 4-11. Richard Heider [102] de CFM-international a décrit un bon exemple de l'utilisation de techniques inductives pour la CBR. Le projet Cassiopee a développé un système d'aide à la décision pour la maintenance technique des moteurs CFM56-3 utilisés sur les Boeing 737.

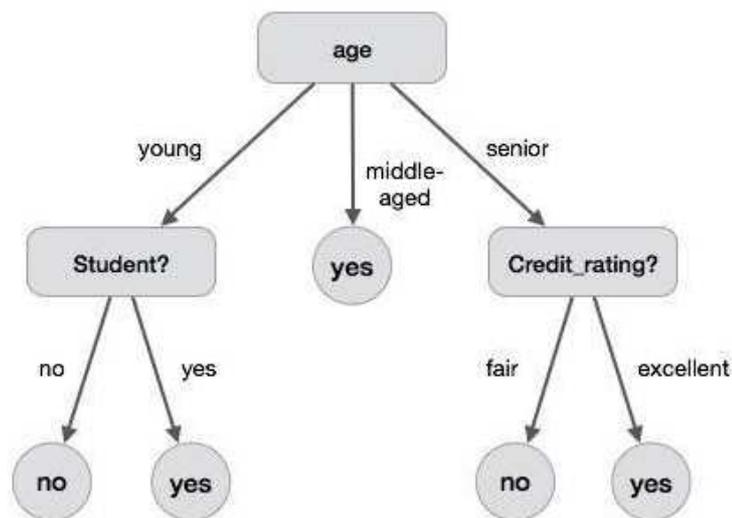


Figure 4-11: Arbres de décision

- CBR utilisé « fuzzy logic » [103] : cette technologie est formalisé la valeur de similarité au terme : excellent, good, fair, poor comme dans la figure ci-dessous. Cette figure nous montre la différence entre les attributs. « Fuzzy logic » nous permet de transférer une valeur quantitative de chaque attribut à une description qualitative de l'attribut afin de comparer entre les attributs. Il y a autres travaux qui sont appliqué « fuzzy logic » dans la CBR comme Slonim [104], Voskoglou [105]...
- CBR utilisé SQL (database technologie) : À sa forme la plus simple, la CBR pourrait être mise en œuvre en utilisant une technologie de base de données. Les bases de données sont des moyens efficaces de stocker et de récupérer de gros volumes de données. Si les descriptions de problèmes pouvaient faire des requêtes bien formées, il serait facile de récupérer des cas avec des descriptions correspondantes. Rodrigues & al [100] a utilisé cette technologie pour chercher les contenus e-learning correspondre les besoins du client.

Dans notre étude, nous proposons une méthode de choix utilisant le modèle de CBR avec 4 phases principales. Le cas dans notre méthode est présenté par une

**présentation structurée.** Notre CBR utilise « **le plus proche voisin** » pour chercher les cas similaires.

#### 4.3.2. Méthode de choix entre MV et P pour évaluer la pièce dans une situation donnée du processus de conception en utilisant la méthodologie de CBR

Dans cette partie, nous utilisons la méthodologie de CBR pour créer une méthode permettant de choisir entre MV et P pour analyser une proposition issue du processus de conception pour la fabrication additive. Nous disposons d'une base de cas issue de nos études de cas précédentes. Notre méthode permettra d'utiliser nos expériences issues des cas précédemment étudiés pour faire un choix dans un nouveau cas. Les étapes dans la méthode sont présentées dans la Figure 4-12.

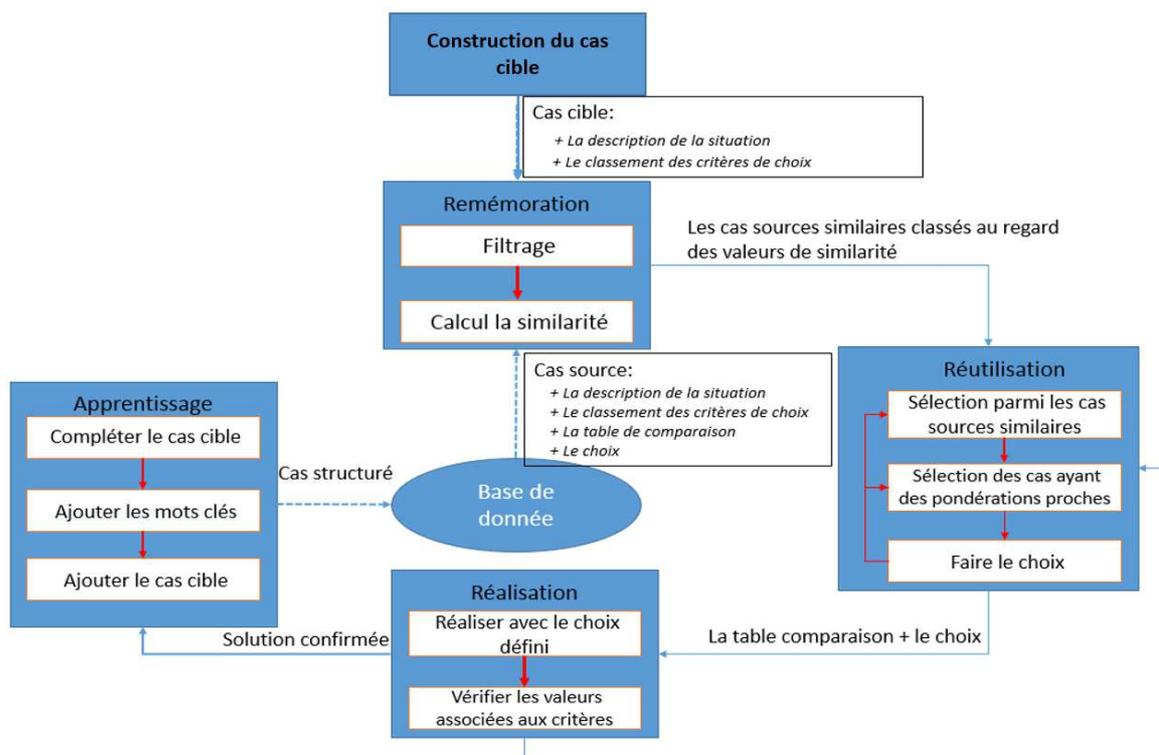


Figure 4-12: La méthode de choix

Face à un nouveau problème de choix entre MV ou P, nous définissons un cas cible avec la description de la situation dans laquelle il apparaît. Le cas cible est rentré dans la méthode sur la phase de remémoration. La méthode doit nous permettre de faire un choix entre MV et P qui est adapté à la situation dans ce cas cible.

Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter la structure des cas dans la base de données et détailler les phases dans le cycle de CBR du modèle ci-dessus.

#### 4.3.2.1. Structure d'un cas dans la base de données

CBR est une méthode qui utilise les connaissances stockées dans une base de données afin de proposer une solution pour un nouveau cas. Ces connaissances sont stockées sous forme de cas. Selon Mile [94], un cas dans la base de cas est normalement défini par une paire : le problème et la solution associée. Donc, un cas va être représenté par :

- La description du problème
- La solution du problème
- La conclusion de la solution ou des commentaires ou l'explication qui relie la description du problème et la solution

Tous les CBR n'utilisent pas forcément tous les types d'informations. La description du problème et la solution apportée sont des éléments indispensables. Certaines caractéristiques seront utilisées en tant qu'index lors de la recherche et l'ajout de cas. Les index doivent être suffisamment concrets et abstraits à la fois pour qu'ils concernent un maximum de cas et qu'ils soient réutilisables dans les raisonnements futurs. Ils doivent aussi permettre de déduire rapidement les cas.

Dans la partie précédente, nous avons défini la notion de cas comme un ensemble {situation, critères, pondération, choix}. Nous ajoutons en outre un élément appelé « référence » indiquant quel cas dans la base de données est utilisé comme référence pour la construction du choix de solution dans le nouveau cas.

Nous proposons une structure de cas dans la base de données composée des informations suivantes :

- La situation : Le problème est celui du choix entre MV et P. Ce choix doit se faire dans des situations particulières. Nous avons défini des attributs pour décrire cette situation et des paramètres pour qualifier ces attributs selon le Tableau 4-5 (qui est une synthèse des paramètres des attributs dans une situation de conception).
- Le classement des critères de choix entre MV et P : on va classer les sept critères dans trois groupes.
  - Plus important (valeur pondération : 3)
  - Important (valeur pondération : 2)
  - Moins important (valeur pondération : 1)

Le classement des critères de choix est fait par le concepteur au regard des valeurs des paramètres dans cette situation de conception.

- La table de comparaison entre MV et P. Ceci nous montre la comparaison du niveau de performance des solutions (MV ou P) selon chaque critère retenu

pour cette situation. Cette table est enregistrée en format .xlsx avec le même nom que le cas étudié. Par exemple, pour le cas x, la table de comparaison est enregistrée sous le nom casx.xlsx.

Critères	MV	Prototype
Capacité de réaliser la tâche	+	+
Capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+ (quelque minute)	- (1 jour)
Temps de réalisation de la tâche	- (2 heures)	+ (2 jour)
Cout de réalisation de la tâche	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	-	+

Tableau 4-6: Table de comparaison

- Le choix effectué entre MV et P dans ce cas
- Référence : c'est le cas référence de notre choix entre MV et P.

Les trois derniers éléments — la table de comparaison, le choix et la référence — sont renseignés à partir des expériences dans les études de cas passées. Les attributs de la situation et le classement des critères de choix sont définis par le concepteur.

Dans notre méthode, nous définissons les concepts de « cas source » et « cas cible » de la manière suivante :

- Cas source : un cas complet dans la base de données. Il inclut « la situation », « les critères de choix et la pondération des critères », « la table de comparaison entre MV et P par rapport aux critères », « le choix » et « la référence ».
- Cas cible : un nouveau cas dans lequel nous devons faire le choix entre MV et P. Il inclut le descriptif de « la situation », « les critères de choix » et la « pondération des critères » que l'on définit spécifiquement pour le cas considéré. Nous devons compléter « la table de comparaison entre MV et P par rapport aux critères », « le choix » et « la référence » pour compléter le cas cible.

Nous utiliserons la description de la situation pour rechercher des cas similaires dans la première phase du cycle de CBR.

#### 4.3.2.2. La construction du cas cible

Dans la partie précédente, nous avons présenté le cas cible comme un cas dans lequel nous devons faire le choix entre MV et P. Dans cette partie, nous allons présenter comment le concepteur détermine les éléments définissant le cas cible.

Pour définir le cas cible, le concepteur doit déterminer les valeurs des paramètres de la situation de conception et le classement des critères de choix entre MV et P.

- La situation de conception : le concepteur doit déterminer les valeurs des paramètres de la situation de conception selon le Tableau 4-5. Ses valeurs sont déterminées sous la forme de mots clés. Le concepteur peut choisir des mots clés existants dans la base de données ou ajouter un nouveau mot clé. Si ce doit être à partir d'un nouveau mot clé, nous allons ajouter ce nouveau mot clé dans la liste de valeurs existantes pour ce paramètre dans la phase d'apprentissage à la fin de la méthode de choix, Figure 4-12. Par exemple, la nature de la tâche de notre cas est l'analyse de la forme de la pièce. Pour déterminer le paramètre « nature de la tâche », nous avons choisi la valeur « analyse de la forme » qui est déjà dans la liste de valeurs existantes.
- Le classement des critères de choix : nous utilisons les mêmes critères de choix pour tous les cas dans notre étude. Donc, le concepteur ne définit que la pondération des critères. Le concepteur va classer les sept critères dans trois groupes comme on l'a présenté dans la partie précédente. Pour classer les critères de choix, le concepteur prend en compte les informations de la situation de conception et aussi les besoins du client pour ce cas, Figure 4-13. Ce classement est relativement subjectif (dépendant de la sensibilité du concepteur) mais il est néanmoins défini au regard des valeurs des paramètres de la situation de conception et des besoins du client. Nous considérons que les besoins du client sont plus importants que les autres informations pour définir le classement des critères de choix.

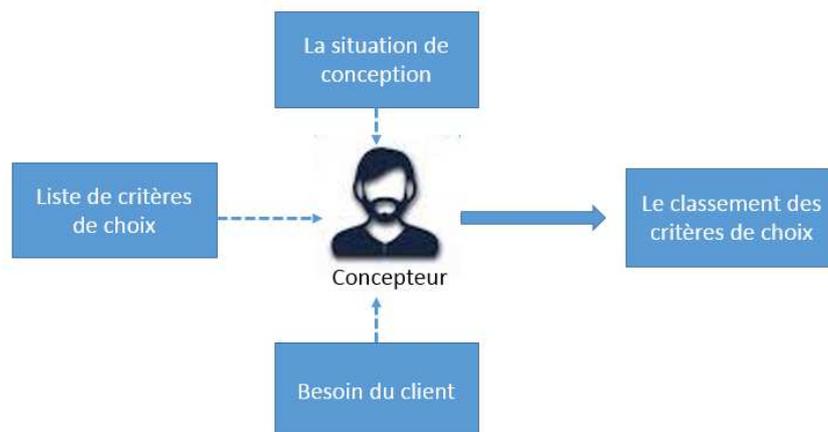


Figure 4-13: Détermination du classement des critères de choix

#### 4.3.2.3. Les phases dans la méthode de choix

##### **Phase de remémoration**

Cette étape s'appuie sur la recherche de similarité entre le nouveau cas (cas cible) et les cas dans une base de cas. Les mesures de similarité sont trouvées à l'aide d'un algorithme de recherche. Plusieurs algorithmes permettent de trouver les cas similaires. Par exemple : le plus proche voisin (Nearest Neighbour) ; les approches inductives ; l'induction basée sur la connaissance ; la recherche basée sur la structure ; etc. Parmi ces méthodes, la méthode du plus proche voisin est la plus souvent utilisée dans un système de CBR. En plus, cette méthode est facile à appliquer dans notre modèle. Nous allons donc utiliser cette méthode pour la tester.

L'algorithme plus proche voisin (Nearest neighbour) [95] : Cette méthode implique l'évaluation de la similarité entre un cas cible et un cas source dans la base de cas, elle-même basée sur la mesure de similarité de chaque attribut du cas cible par rapport à l'attribut correspondant du cas source. Cette mesure sur chaque attribut peut être multipliée par un facteur de pondération. La somme de la similarité de tous les attributs du cas est calculée pour fournir une mesure de la similarité entre le cas cible et les cas source dans la base de cas. Ceci peut être représenté par l'équation:

$$\text{Similarity}(T, S) = \sum_{i=1}^n f(T_i, S_i) \times w_i$$

Avec le cas cible  $T$ , le cas source  $S$ , le nombre d'attributs  $n$  pour chaque cas, une fonction de similarité  $f$  pour l'attribut et le facteur de pondération  $w_i$  associé à *chacun des attributs*. Ce calcul est fait pour tous les cas sources dans la base de données. La valeur de similarité est normalisée sur un intervalle de 0 à 1 où « zéro » est totalement différent et « un » est la correspondance exacte.

Une étape de filtrage peut être utilisée avant lancer la recherche de similarité. L'étape de filtrage consiste à réduire au préalable le nombre de cas utilisés dans le calcul.

Appliqué à notre environnement, cette phase inclut deux étapes. Au début, nous regardons tous les attributs de la situation afin de chercher des attributs qui peuvent être utilisés pour une étape de filtrage. Dans notre contexte d'application, nous considérons que l'attribut « la tâche de conception » est très important. Donc, nous voulons ne chercher que les cas dans la base de données qui ont la même tâche de conception que le cas cible.

Ensuite, l'étape de calcul de la similarité permet de comparer tous les autres attributs de la situation du cas cible avec les attributs de la situation du cas source pour chercher des cas similaires en utilisant l'algorithme « le plus proche voisin »

$$PS = \frac{\sum_{k=1}^n (f_k * w_k)}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (\text{fonction de similarité})$$

Avec : PS : valeur de similarité de la situation totale (entre 0 et 1)

$f_k$  : valeur de similarité du paramètre k, 0 si différent et 1 si similaire

$w_k$  : pondération d'importance du paramètre k

n : nombre de paramètres à comparer

Dans la fonction de similarité, nous devons définir deux éléments initialement inconnus (valeur de similarité et pondération d'importance du paramètre k) pour obtenir la valeur de similarité totale.

Pour comparer les attributs dans la situation de deux cas, nous avons déterminé les attributs dans la situation sous la forme de mots clés (Tableau 4-7 ci-dessous). Ces sont des mots clés que nous avons obtenus à partir de nos études de cas. Donc, nous allons comparer les deux attributs correspondants de deux situations. S'ils ont la même valeur,  $f_k$  égale 1, si non  $f_k$  égale 0. Par exemple, si les deux tâches sont la « forme »,  $f_k$  égale 1. Si une tâche est la « forme » et l'autre tâche est la « résistance »,  $f_k$  égale 0. Nous poursuivons ainsi la comparaison de tous les autres attributs de la situation.

Dans les cas où la valeur du paramètre k inclut plusieurs mots clés, la valeur de similarité du paramètre k est calculée de la manière suivante :

$$f_k = \frac{s_k}{\max(i; j)}$$

Avec :

- $s_k$  : le nombre de mots clés similaires du paramètre k
- i : nombre de mots clés du paramètre k de la situation courante
- j : nombre de mots clés du paramètre k de la situation de référence
- $\max(i; j)$  : égale i si  $i > j$ , égale j si  $i \leq j$ .

Par exemple, supposons que le paramètre k de notre situation inclut deux mots clés, et que le paramètre k de la situation de référence inclut 3 mots clés. S'il y a qu'un seul mot clé similaire entre les deux, la valeur similarité du paramètre k égale 1/3.

Attribut	Paramètre	Mot clé
Tâche	Nature de la Tâche	« forme », « résistance », « fabrication », « finition »...

<b>Objet</b>	Type d'Objet	« Pièce », « Mécanisme »...
<b>Acteur</b>	Fonction des Acteurs	« Concepteur chercheur », « Ingénieur », « Chef projet », « Designer », « Expertise de fabrication », « Expertise de finition »...
	Compétences	« maîtrise », « apprentissage »...
<b>Contexte industriel</b>	Domaine application	« Aéronautique »
	Stratégie	« Confidentialité », « Petite série »...
<b>Contexte projet</b>	Objectif	« masse », « rigidité »...
	Durée	« long », « moyen », « courte »...
	Position	« au début du projet », « au milieu du projet » « à la fin du projet »...
	Organisation	« Travail asynchrone », « Réunion visio-conférence par semaine »...
<b>Contexte technique</b>	Logiciel	« Catia », « Inspire », « Optistrukt », « Esprit », « Magics »....
	Disponibilité de l'opérateur	« oui », « non »...
	Technologie	« Machine EBM », « Machine CNC »....
	Disponibilité de l'opérateur	« oui », « non »...

Tableau 4-7 : les mots clés associés aux paramètres des attributs

- $w_k$  : pondération d'importance du paramètre k

Nous allons classer les paramètres de la situation en 3 groupes selon leur niveau d'importance.

- o Moins important :  $w_k = 1$
- o Important :  $w_k = 2$
- o Très important :  $w_k = 3$

Pour déterminer le niveau d'importance de chaque paramètre, nous avons regardé le nombre de critères sur lesquels il a une influence, Tableau 4-8. Par exemple, le paramètre « objectif » de l'attribut « contexte projet » influe sur les critères temps et cout. Il a donc un niveau d'importance égal à 2.

Comment fait-on pour définir si un paramètre a une influence sur un critère ? Par exemple, si le paramètre « position » de l'attribut « contexte projet » vaut « au début du projet », alors le critère de temps n'est pas important car la durée la tâche n'est pas critique par rapport au temps restant pour le projet. Mais si ce même paramètre vaut « à la fin du projet », alors le critère temps est important car le temps restant est faible. Donc, nous considérons que le paramètre « position » influe sur le critère de « temps ».

Attribut	Paramètre	Critère d'influence	Niveau importance
<b>Objet</b>	Type d'Objet	Temps	1

<b>Acteur</b>	Fonction des Acteurs	Capacité de réaliser la tâche	1
	Compétences	Temps, capacité de réaliser la tâche	2
<b>Contexte industriel</b>	Domaine application	Cout de réalisation de la tâche	1
	Stratégie	Collaboration	1
<b>Contexte projet</b>	Objectif	Temps, cout	2
	Durée	Temps	1
	Position	Temps, représentativité	2
	Organisation	Collaboration	1
<b>Contexte technique</b>	Logiciel	Temps, cout	2
	Disponibilité de l'opérateur	Capacité de réaliser la tâche, temps, cout	3
	Technologie	Temps, cout	2
	Disponibilité de l'opérateur	Capacité de réaliser la tâche, temps, cout	3

Tableau 4-8: Définir le niveau d'importance de chaque paramètre dans la situation

Nous avons construit ce tableau en utilisant l'expérience issue de nos études de cas passées. Le niveau d'importance du paramètre dépend de ses influences sur les critères de choix. Vous pouvez trouver dans le Tableau 4-8 les critères d'influence de chaque paramètre. Ensuite, nous allons classer les paramètres dans trois groupes avec trois niveaux d'importance selon le nombre de critères d'influence de chaque paramètre. C'est notre première proposition qui sera à améliorer dans les études de cas suivantes. Pour continuer, nous considérons que notre classement au niveau d'importance du paramètre est acceptable.

Ci-dessous, un exemple de comparaison entre un cas cible et un cas source pour illustrer l'usage de la fonction de similarité, Tableau 4-9.

Attribut	Paramètre	Situation cible	Situation source	Pondération $w_k$	Valeur similarité $f_k$	$W_k * f_k$
<b>Objet</b>	Type d'Objet	« Pièce »	« Pièce »	1	1	1
<b>Acteur</b>	Fonction des Acteurs	« Concepteur chercheur », « Ingénieur », « Chef projet »	« Concepteur chercheur », « Ingénieur », « Chef projet »	1	1	1
	Compétences	« maîtriser »	« apprentissage »	2	0	0
<b>Contexte industriel</b>	Domaine application	« Aéronautique »	« Aéronautique »	1	1	1
	Stratégie	« Confidentialité »	« Confidentialité »	1	1	1
<b>Contexte projet</b>	Objectif	« masse »	« rigidité »	2	0	0
	Durée	« moyen »	« moyen »	1	1	1
	Position	« au début du projet »	« au début du projet »	2	1	2
	Organisation	« Réunion visio-conférence par semaine »	« Réunion visio-conférence par semaine »	1	1	1

<b>Contexte technique</b>	Logiciel	« Catia », « Inspire »	« Catia », « Inspire »	2	1	2
	Disponibilité de l'opérateur	« oui »	« oui »	3	1	3
	Technologie	« Machine EBM »	« Machine EBM »	2	1	2
	Disponibilité de l'opérateur	« oui »	« oui »	3	1	3
			<b>Valeur totale</b>	<b>22</b>		<b>18</b>
			<b>Valeur similarité totale</b>	<b>18/22=0,81</b>		

Tableau 4-9: la comparaison entre deux cas

La valeur de similarité totale est 0,81. C'est-à-dire le cas cible est similaire à 81% avec le cas source.

Nous allons chercher des cas qui sont similaires avec une valeur de similarité minimum souhaitée. Nous proposons de choisir une valeur de similarité minimum souhaitée entre 50% à 70%. Si nous choisissons une valeur de similarité limite trop haute, nous pouvons perdre certains cas similaires utiles. Si nous choisissons une valeur de similarité faible, nous allons obtenir dans la liste beaucoup de cas peu utiles. A la fin de cette phase, nous obtenons une liste des cas similaires qui sont classés par rapport à la valeur de similarité. Par exemple, nous voulons chercher des cas possédant une valeur similarité supérieure à 70%. Nous obtenons la liste ci-dessous :

Nom du cas	Valeur similarité de la situation de conception	Classement des critères de choix (cas source)	La table de comparaison entre MV, MP et P par rapport aux critères de choix	Le choix	Reference
Cas 1	PS1 = 90%	C1	Cas1.xlsx	MV	Cas m
Cas 2	PS2 = 87%	C2	Cas2.xlsx	P	
Cas 3	PS3 = 80%	C3	Cas3.xlsx	MV	
Cas 4	PS4 = 75%	C4	Cas4.xlsx	MV	
...					
Cas n	PSn = 70%	Cn	Cas4.xlsx	P	

Tableau 4-10: Un exemple du résultat de la phase remémoration

La table de comparaison entre MV est enregistrée en format Excel (.xlsx) avec le même nom avec le cas qu'on est en train d'étudier. Par exemple, pour le cas 2, la table de comparaison est enregistrée au nom de cas2.xlsx.

### **Phase de réutilisation**

L'objectif de cette étape est de résoudre un nouveau problème (cas cible) en s'appuyant sur la solution des cas similaires (cas source) dans le contexte du cas cible.

Globalement, il y a trois types d'adaptation : l'adaptation par copie, l'adaptation manuelle et l'adaptation automatique à l'aide d'algorithmes, de formules, de règles, etc [96]. Dans les systèmes CBR simples, lorsque l'on a retrouvé un cas similaire, on réutilise directement la solution qu'il propose pour le problème courant (cas cible). Dans ce type de systèmes, on considère que les similarités sont suffisantes et que l'on peut négliger les différences entre le cas trouvé et le cas cible. Mais il est rare que l'on trouve un cas identique au problème. Il est alors souvent nécessaire d'adapter les solutions préexistantes. L'adaptation consiste donc à construire une nouvelle solution à partir du cas cible et des cas similaires trouvés. Cette phase met l'accent sur les différences entre les cas trouvés et le problème posé par le cas cible et sur l'information utile à transférer à la nouvelle solution.

Dans cette phase, nous allons donc utiliser les solutions issues des cas similaires trouvés dans la phase précédente pour proposer une nouvelle solution pour le cas cible. Les solutions qu'on a obtenues à partir des cas similaires incluent le tableau de comparaison entre MV, MP et P, le classement des critères de choix, et le choix.

Nous proposons quatre étapes principales pour faire notre choix à partir des solutions issues des cas similaires obtenus après la phase de remémoration (Figure 4-14). Par la suite, nous présentons en détails les étapes de cette phase.

- Nous commençons par une étape de consultation des choix faits dans tous les cas similaires obtenus par la phase précédente. Si tous les cas conduisent au même choix, nous pouvons passer à l'étape faire le choix (voir la Figure 4-14). Si non, nous devons passer à l'étape suivante, étape de la sélection des cas ayant des situations similaires les plus proches.

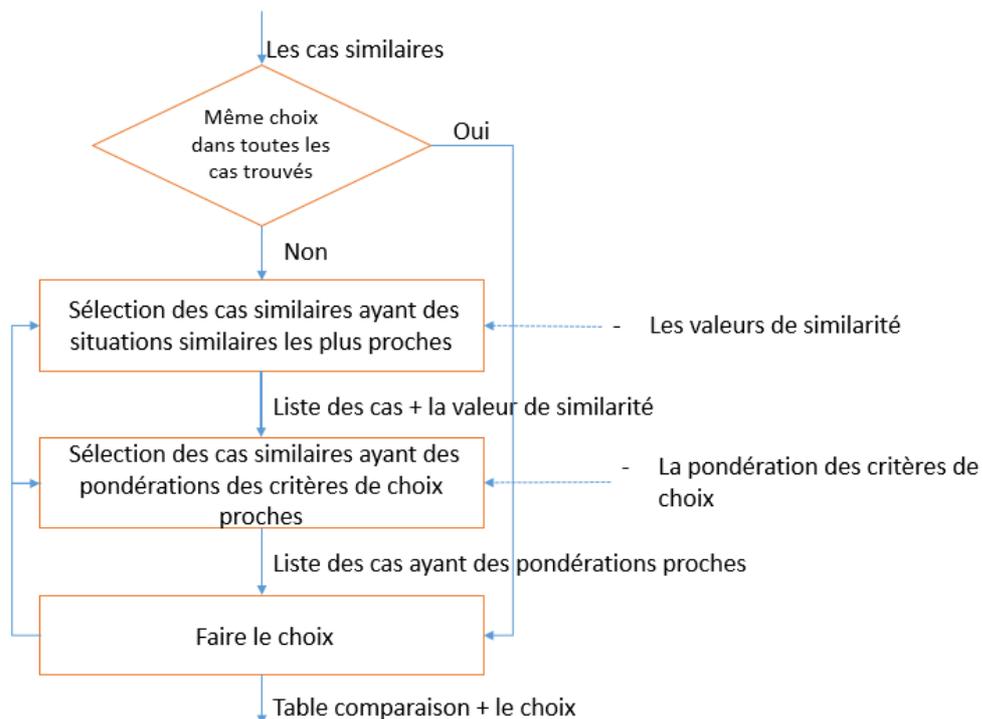


Figure 4-14: La phase de réutilisation dans la méthode de choix

- Si le choix des cas similaires est différent, nous entrons dans l'étape 'sélection des cas similaires ayant des situations similaires les plus proches' à partir du résultat de la phase précédente. La liste des cas similaires est structurée comme dans le Tableau 4-11.

Nom du cas	Valeur similarité de la situation de conception	Classement des critères de choix (cas source)	La table de comparaison entre MV et P par rapport aux critères de choix	Le choix	Référence
Cas 1	PS1	C1	Cas1.xlsx		
...					

Tableau 4-11: Une Template du bilan des cas similaires

Les cas dans cette liste sont classés selon la valeur de similarité de la situation entre les cas sources et le cas cible. Dans la phase précédente, nous avons cherché les cas similaires avec une valeur de similarité de la situation moyenne (entre 50-70) pour pouvoir obtenir tous les cas similaires utiles. Dans cette étape, nous affinons la liste des cas similaires avec une valeur de similarité de la situation au plus haut pour ne garder que les cas similaires nécessaires pour faire le choix entre MV et P. Par exemple, nous avons obtenu une liste de n cas similaires avec une valeur de similarité de la situation de 70% ou plus, Tableau 4-10. Dans cette étape nous voulons ne conserver que

les cas dotés de situations similaires à plus de 80%. Nous avons trouvé trois cas dans la liste précédente comme ci-dessous :

Nom du cas	Valeur similarité de la situation de conception	Classement des critères de choix (situation source)	La table de comparaison entre MV, MP et P selon les critères de choix	Le choix	Référence
Cas 1	PS1 = 90%	C1	T1	MV	Non
Cas 2	PS2 = 87%	C2	T2	P	Non
Cas 3	PS3 = 80%	C3	T3	MV	Cas 1

Tableau 4-12: Exemple d'une liste des cas similaires

- Nous allons passer dans l'étape de « Sélection des cas similaires ayant des pondérations des critères de choix proches » qui nous permet de choisir les cas similaires au regard la similarité de la pondération de critères de choix. Rappelons que nous avons classé nos critères de choix en trois groupes d'importances associés à trois valeurs de pondération comme ci-dessous :
  - o Très important : 3
  - o Important : 2
  - o Moins important : 1

Pour chercher des cas similaires avec les pondérations de critères proches, nous allons comparer les deux classements de critères de deux cas, cas cible et cas sources similaires, en utilisant la même démarche que nous avons utilisée pour chercher des situations similaires. C'est-à-dire utiliser l'algorithme « le plus proche voisin ».

$$PC = \frac{\sum_{k=1}^n (c_k * w_k)}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (\text{fonction de similarité})$$

Avec : PC : valeur de similarité totale de la pondération des critères de choix (entre 0 et 1)

$c_k$  : Si les deux pondérations sont de même niveau (important – important), la valeur de similarité égale 1. Si les deux pondérations sont de deux niveaux différents mais proches, par exemple important avec moins important ou important avec très important, la valeur de similarité égale 0,5. Si non la valeur de similarité égale 0.

$w_k$  : pondération d'importance du critère k

n : nombre de critères à comparer

Tableau 4-13 nous montre un exemple du calcul la similarité de pondération des critères de choix entre deux cas.

Critère de choix	Cas cible	Cas 2	
		Pondération	Valeur similarité
Capacité de réaliser la tâche	3	3	<b>1</b>
Capacité de soutenir la collaboration	2	2	<b>1</b>
Modificabilité	2	3	<b>0.5</b>
Temps de réalisation de la tâche	1	1	<b>1</b>
Cout de réalisation de la tâche	1	1	<b>1</b>
Représentativité	2	2	<b>1</b>
Quantité d'information	1	3	<b>0</b>
<b>Similarité de pondération des critères</b>			<b>70%</b>

Tableau 4-13: Le calcul la similarité de pondération des critères de choix entre deux cas

Nous pouvons chercher la similarité de pondération des critères uniquement dans le groupe « très important » pour que la comparaison soit concentrée sur les critères nécessaires pour faire le choix (le choix souvent s'appuie sur les critères importants). Une alternative serait de comparer tous les critères dans les trois groupes du classement.

Nous allons calculer la similarité de la pondération de critères pour tous les cas similaires obtenus dans l'étape précédente. Nous obtenons une liste de cas similaires avec deux valeurs de similarité : la valeur de similarité de la situation de conception et la valeur similarité de la pondération de critères de choix. Cette liste est présentée comme dans le Tableau 4-14.

Nom du cas	Valeur de similarité de la situation de conception	Valeur de similarité de la pondération des critères	La table de comparaison entre MV et P par rapport aux critères de choix	Le choix	Référence
Cas 1	PS1	PC1	Cas1.xlsx		
...					

Tableau 4-14: Liste de cas similaires avec deux valeurs similarités (de situation et de pondération)

Par exemple, nous avons fait ce calcul pour les trois cas similaires du Tableau 4-12. Le résultat obtenu est présenté dans la Tableau 4-15.

Nom du cas	Valeur de similarité de la situation de conception	Valeur de similarité de la pondération des critères	La table de comparaison entre MV et P par rapport aux critères de choix	Le choix	Référence
Cas 1	PS1 = 90%	PC1 = 85%	Cas1.xlsx	MV	Non
Cas 2	PS2 = 87%	PC2 = 75%	Cas2.xlsx	P	Non
Cas 3	PS3 = 80%	PC3 = 80%	Cas3.xlsx	MV	Cas 1

Tableau 4-15: Un exemple de la liste de cas similaire avec deux valeurs de similarités

Nous affinons la liste des cas similaires avec une valeur de similarité de la pondération souhaitée. Par exemple, nous ne voulons que choisir les cas qui ont une valeur de similarité de pondération des critères de choix supérieure à 80% dans la Tableau 4-15. Nous obtenons une liste avec deux cas, cas 1 et cas 3.

- Nous passons ensuite dans l'étape de faire le choix au regard des cas similaires obtenus dans l'étape précédente. Cette étape est faite manuellement par le concepteur. Nous ne pouvons que proposer quelques stratégies pour aider les concepteurs à décider le choix entre MV et P.

- Si le choix pour tous les cas similaires est le même, le concepteur peut faire le même choix.
- Si non : il peut faire le même choix qu'un cas similaire dans lequel il a le plus confiance au regard de deux valeurs de similarités : similarité de la situation et similarité de pondération des critères de choix. Le cas auquel il a le plus confiance peut être trouvé par les stratégies suivantes :
  - Si un cas similaire a simultanément deux valeurs de similarité (de la situation et de la pondération) au plus haut. Nous pouvons alors faire le même choix que celui de ce cas.
  - Si non, nous pouvons faire le même choix que le choix qui est le plus utilisé dans la liste de cas similaires. Ceci parce que la liste finale de cas similaires est déjà passée par les étapes d'affinage sur ces deux valeurs de similarité (de la situation et de la pondération).
  - Enfin, le concepteur peut décider quelle solution il souhaite choisir pour l'analyse qu'il a à mener, selon sa propre connaissance et son appréhension de la situation, et selon les éléments de comparaison listés dans les tableaux de comparaisons.

A la fin de cette phase, nous avons obtenu le choix pour ce cas cible. Nous mémorisons aussi la table de comparaison du cas qu'on a utilisé pour faire le choix comme la table de comparaison provisoire pour notre cas. Nous allons utiliser les valeurs dans cette

table de comparaison provisoire avec les valeurs qu'on va obtenir dans la phase réalisation pour créer une table de comparaison de notre cas. Nous devons créer la table de comparaison parce que nous avons besoin de compléter notre cas avant de l'ajouter dans notre base de données.

### ***Phase de réalisation***

L'objectif de cette phase est de mettre en œuvre le choix qui a été fait dans la phase précédente et vérifier que ce choix va nous permettre d'atteindre, ou pas, nos buts avec cette solution.

Nous avons défini trois étapes principales :

- Nous analysons les comportements de notre pièce avec les moyens (MV ou P) définis par le choix de la phase précédente. Par exemple, nous avons choisi d'utiliser le P pour analyser la résistance de notre pièce. Dans cette phase, nous allons donc fabriquer un prototype et tester la résistance de ce prototype.
- La deuxième étape est la vérification que l'on peut atteindre notre résultat souhaité avec la solution choisie. Est-ce qu'on peut atteindre tous nos buts avec la solution de notre choix ? Par exemple, si on veut analyser la résistance de la pièce avec le prototype, nous devons vérifier que le résultat obtenu est adapté à nos objectifs ou pas (analyse possible de la résistance de la pièce) ?
- La troisième étape est la vérification des valeurs associées aux critères dans la table de comparaison.

Par exemple, nous avons obtenu une table comparaison pour le cas cible à la fin de la phase précédente, Tableau 4-16, et le choix est le P. Nous avons fabriqué un prototype et réalisé notre tâche. Dans cette étape, nous devons donc vérifier les valeurs supposées des critères de choix du Prototype avec les valeurs qu'on a obtenues en réalisant la tâche (les valeurs réelles). Nous devons modifier les valeurs dans la table de comparaison si on a obtenu des valeurs différentes. Par exemple, le temps mis pour réaliser la tâche avec le prototype est 1 jour, mais le temps dans la table de comparaison était estimé à 2 jours. Donc, nous pouvons modifier la valeur de temps dans la table de comparaison pour le cas cible de 2 jours à 1 jour.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tâche	+	+

La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+ (quelque minute)	- (1 jour)
Le temps de réalisation de la tâche	- (2 heures)	+ (2 jour)
Le cout	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	-	+

Tableau 4-16: Un exemple de la table de comparaison

Pour les valeurs de MV associées aux critères, nous ne changeons pas parce que nous n'avons pas réalisé la tâche avec MV. Nous ne connaissons donc pas ces valeurs en réalité.

A la fin, nous avons une nouvelle table de comparaison pour le cas cible. Si le concepteur ne change pas le choix entre MV et P au regard de la nouvelle table de comparaison, nous pouvons confirmer le choix qui a été fait. Par contre, si le choix est différent, nous devons retourner à l'étape 1 pour refaire la tâche avec le nouveau choix. En outre nous devons expliquer les raisons de mise en défaut de la solution choisie pour le cas cible. Ceci afin d'aider les concepteurs à éviter les mêmes erreurs dans les cas futurs.

Après cette phase, nous obtenons le choix entre MV et P et la table de comparaison par rapport aux critères pour le cas cible. Ces deux éléments nous permettent de compléter le cas cible pour en faire un cas de référence pouvant être éventuellement inséré dans la base de donnée.

### ***Phase d'apprentissage***

C'est la dernière étape du cycle du CBR. Au cours de cette phase, la nouvelle situation et sa solution validée vont être ajoutées à la base de cas. Il faut donc déterminer quelles informations doivent être sauvegardées et sous quelle forme, et comment indexer ce nouveau cas dans la base. La mémorisation du nouveau cas résolu est l'occasion d'enrichir la base de connaissances [94].

Dans notre modèle, pour cette phase, nous allons faire trois étapes principales pour ajouter une nouvelle situation à la base de données.

- Au début, nous allons compléter le cas cible avant de l'ajouter dans la base de données. C'est-à-dire que nous complétons le cas cible avec 4 éléments principaux : la situation, le classement des critères, la table de comparaison entre MV et P par rapport aux critères et le choix. La description de la situation

et le classement des critères sont faits au début de la méthode de choix. Le choix et la table de comparaison sont les résultats de la phase précédente.

- Ajouter les mots clés : c'est une étape qui nous permet d'enrichir nos valeurs des paramètres des attributs dans la situation de conception. Nous avons stocké les valeurs de la situation de conception en format de « mot clés ». Parfois, nous allons rencontrer des situations avec des valeurs qui n'existent pas encore dans notre base de données. Donc, cette étape nous permet d'ajouter des nouvelles valeurs possibles d'attributs de la situation de conception dans la base de données. Par exemple, pour le paramètre « objectif », il y a deux valeurs de « masse » et « rigidité ». Mais nous avons une nouvelle situation avec un objectif de minimiser le moment d'inertie de la pièce. C'est une nouvelle valeur, cette étape nous permet d'ajouter un « mot clé » (inertie) dans la base de données.
- Ajouter le cas cible : nous allons ajouter ce cas comme nouveau cas source dans la base de données. En plus, nous allons noter dans la partie de référence du choix de ce cas le nom des cas similaires que nous avons utilisés pour faire notre choix.



## Chapitre 5 : Application de la méthode de choix

Ce chapitre présente deux études de cas qui sont utilisées pour appliquer la méthode développée dans le chapitre précédent. Cette méthode a pour objectif d'aider à faire le choix entre MV et P dans une situation particulière au cours du processus de conception. La première étude de cas concerne une pièce appelée 'chape' dont la conception fait partie du même projet que les pièces étudiées lors des études de cas que j'ai présentées dans les chapitres précédents. La deuxième étude de cas concerne la reconception d'un corps de rhéomètre dont l'étude a été menée dans le cadre d'un projet avec une start-up dont le nom est Rhéonova.

### 5.1. Première étude de cas : reconception de la chape

La reconception de la chape (Figure 5-1) s'inscrit dans le même projet industriel que les pièces précédentes de mes études. Nous vous rappelons que c'est un projet de reconception de pièces existantes dans le domaine aéronautique. L'objectif principal est, tout en assurant les mêmes fonctionnalités, de minimiser la masse de la pièce. Dans ce cas, le client veut atteindre une réduction de 40% de la masse par rapport à la pièce initiale. La chape est une pièce pour lier l'accoudoir et le corps du siège. Les zones fonctionnelles de la chape sont présentées dans la Figure 5-1. La chape est fixée au siège par les vis. L'accoudoir du siège est lié avec la chape par un axe de rotation. Il y a aussi une zone qui permet de positionner l'accoudoir dans les différentes positions. Nous ne présenterons pas ici de manière détaillée les conditions aux limites, ni les différents étapes du processus de reconception de cette pièce. Nous allons faire l'étude du choix entre MV, MP et P dans une situation particulière du processus de conception. Cette étude est réalisée par une équipe de concepteurs du laboratoire G-SCOP (un thésard en conception mécanique, des experts en fabrication EBM, un expert en usinage) et une équipe du client (chef de projet, ingénieur mécanique et designer).

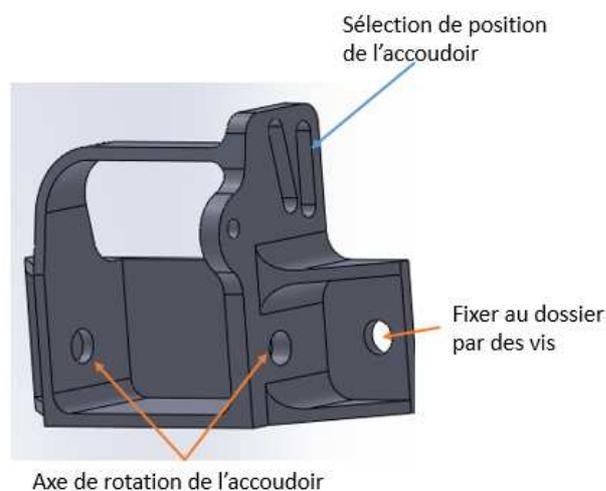


Figure 5-1: La chape en géométrie initiale

### 5.1.1. Déterminer le cas cible

Dans le processus de reconception de la chape, nous allons rencontrer une situation dans laquelle on doit choisir entre MV et P pour analyser la résistance de la pièce. Nous présentons ci-après l'application de la méthode de choix pour décider notre choix. C'est un moment au début du processus de conception, où nous devons analyser la résistance de la nouvelle géométrie de « la chape ». Nous devons choisir entre les deux possibilités : faire un calcul éléments finis ou faire un essai avec une pièce fabriquée par la machine EBM.

Notre cas cible est défini par deux éléments : la situation et le classement des critères de choix. Les valeurs des paramètres de la situation de conception sont définies dans le tableau ci-dessous :

Attribut	Paramètre	Valeurs	Liste de valeurs existantes
<b>Tâche</b>	Nature de la Tâche	<i>Analyse la résistance</i>	1. Analyse la forme 2. Analyse la résistance 3. Analyse la fabrication 4. Analyse la finition
<b>Objet</b>	Type d'Objet	<i>Pièce</i>	1. Pièce 2. Mécanisme
<b>Acteur</b>	Fonction des Acteurs	<i>Concepteur chercheur Ingénieur Chef projet</i>	1. Concepteur chercheur 2. Ingénieur 3. Chef projet 4. Designer 5. Expertise de fabrication 6. Expertise de finition
	Compétences	<i>Calcul mécanique Modélisation modèle CAO</i>	1. Optimisation topologique 2. Modélisation modèle CAO 3. Calcul mécanique 4. Fabrication 5. Finition
<b>Contexte industriel</b>	Domaine application	<i>Aéronautique</i>	1. Aéronautique
	Stratégie	<i>Confidentialité Petite série</i>	1. Confidentialité 2. Petite série
<b>Contexte projet</b>	Objectif	<i>Minimiser la masse</i>	1. Minimiser la masse 2. Augmenter la rigidité
	Durée	<i>Moyen</i>	1. Long 2. Moyen 3. Courte
	Position	<i>Au début du projet</i>	1. au début du projet 2. au milieu du projet 3. à la fin du projet
	Organisation	<i>Réunion visio-conférence par semaine</i>	1. Travail asynchrone 2. Réunion visio-conférence par semaine
<b>Contexte technique</b>	Logiciel	<i>Catia</i>	1. Catia 2. Inspire 3. Optistruct 4. Esprit

			5. Magics
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>	1. Oui 2. Non
	Technologie	<i>Machine EBM</i>	1. Machine EBM 2. Machine CNC
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>	1. Oui 2. Non

Tableau 5-1: La situation de conception pour "la chape"

Vous pouvez trouver dans la colonne « valeur » les valeurs des paramètres de la situation de notre cas cible. Dans la colonne « liste des valeurs existantes » sont présentées les valeurs qui existent dans les cas de références. Pour définir les valeurs des paramètres, nous devons choisir si possible les mots clés dans la liste des valeurs existantes. Si la valeur d'un paramètre n'existe pas dans la liste, nous pouvons donner un nouveau mot clé pour définir ce paramètre. Ce mot clé va s'ajouter dans la liste dans la phase d'apprentissage à la fin de cette méthode, figure 9 du chapitre 4.

Le classement des critères de choix est défini par le concepteur au regard des valeurs des paramètres de cette situation.

Critère de choix	Pondération des critères	
	Groupe	Valeur pondération
Capacité de réaliser la tâche	Plus important	3
Capacité de soutenir la collaboration	Important	2
Modificabilité	Important	2
Temps de réalisation de la tâche	Moins important	1
Cout de réalisation de la tâche	Moins important	1
Représentativité	Important	2
Quantité d'information	Important	2

Tableau 5-2: La pondération des critères de choix pour "la chape"

Nous allons ensuite aborder la phase de « remémoration » de notre méthode de choix, afin de chercher les cas similaires avec notre cas cible.

### 5.1.2. Phase remémoration

Nous allons chercher dans la base de données les cas qui sont des situations similaires avec la situation de notre cas cible. Il y a deux étapes dans cette phase :

- Filtrage : nous allons chercher les situations qui ont la même tâche que celle de notre cas cible. Dans notre cas, c'est analyse de résistance de la pièce. Nous avons trouvé deux cas correspondants, décrits comme suit, cas 2 et cas 6 :

Situation		Cas 2	Cas 6
Attribut	Paramètre	Valeur	Valeur
<i>Tâche</i>	Nature de la tâche	La résistance	La résistance
<i>Objet</i>	Type d'Objet	Pièce	Pièce

<i>Acteur</i>	Fonction des Acteurs	Conception chercheur, chef de projet, ingénieur	Conception chercheur, chef de projet, ingénieur
	Compétences	Calcul mécanique, Modélisation CAO	Calcul mécanique, Modélisation CAO
<i>Contexte industriel</i>	Domaine application	Aéronautique	Aéronautique
	Stratégie	Confidentialité, Petite Série	Confidentialité, Petite Série
<i>Contexte projet</i>	Objectif	Masse	Masse
	Durée	Moyen	Moyen
	Position	Au début	A la fin
	Organisation	Visio-conférence	Visio-conférence
<i>Contexte technique</i>	Logiciel	Catia	Catia
	Disponibilité de l'opérateur	Oui	Oui
	Technologie	EBM	EBM
	Disponibilité de l'opérateur	Oui	Oui
<b>Pondération critères</b>			
<i>Capacité de réaliser la tâche</i>		3	3
<i>Capacité de soutenir la collaboration</i>		2	1
<i>Modificabilité</i>		3	1
<i>Temps de réalisation de la tâche</i>		1	3
<i>Cout de réalisation de la tâche</i>		1	2
<i>Représentativité</i>		2	3
<i>Quantité d'information</i>		2	2
<b>La table de comparaison (format fichier)</b>		Cas2.xlsx	Cas6.xlsx
<b>Le choix</b>		MV	P
<b>Référence</b>		Non	Non

Tableau 5-3: Liste des cas similaires après filtrage

Nous pouvons trouver dans le Tableau 5-3 les valeurs des paramètres pour chaque situation, la pondération des critères de choix pour ces cas, le choix fait dans chaque cas, la référence et le nom du fichier sur lequel nous avons enregistré la table de comparaison.

- Calcul la similarité : dans cette étape, nous devons chercher des cas similaires dans les cas filtrés avec une valeur de similarité souhaitée que nous conseillons entre 0,5 et 0,7 dans le chapitre 4. Pour ce cas, notre pièce est dans le même projet que d'autres cas de notre base de données. Donc, nous voulons choisir une valeur similarité souhaitée un peu plus haut, et nous retenons la valeur de 0,7. Nous allons calculer manuellement la similarité de situation du cas cible avec les situations des cas dans la liste après filtrage, selon la fonction présentée dans la partie méthode de choix. Ensuite, on ne retiendra que les cas ayant une similarité de plus de 70%. Dans cette partie, nous ne présentons pas le calcul détaillé de la similarité. Nous ne

présentons que le résultat après calcul. Le résultat de cette étape est montré dans le tableau suivant :

Nom de cas similaire	Valeur similarité	Le choix
Cas 2	0,95 (95%)	MV
Cas 6	0,9 (90%)	P

Tableau 5-4: Liste de cas similaire avec la valeur souhaitée de 0,7

Selon le résultat, nos deux cas sont similaires à plus de 70% avec notre cas cible. Nous n'avons pas trouvé beaucoup des cas similaires à cause de notre base de données qui est petite. La valeur de similarité est haute parce qu'on est en train d'étudier un cas qui prend place dans le même projet que ceux des deux cas similaires dans la base de données.

La phase suivante va nous permettre de faire le choix entre MV, MP et P au regard des cas similaires qu'on a trouvé dans cette phase.

### 5.1.3. Phase de réutilisation

Nous avons trouvé deux cas similaires à la fin de la phase précédente. En plus, le choix proposé dans ces deux cas n'est pas le même : un avec choix de MV (cas 2) et un avec choix de P (cas 6). Donc, nous devons passer les trois étapes principales de cette phase tel que proposé dans la figure 19 du chapitre 4.

- Sélection des cas ayant des situations similaires. L'objectif de cette étape est de choisir les cas similaires les plus proches parmi des cas dans le résultat de la phase précédente au regard de valeur de similarité. Cette étape est utilisée lorsqu'on a obtenu beaucoup de cas similaires. Nous pouvons limiter les cas similaires en augmentant la valeur de similarité souhaitée. Dans cette étude de cas, nous n'avons obtenu que deux cas similaires. On va donc choisir de garder les deux cas similaires de notre liste.

- Sélection des cas ayant des pondérations proches, parmi les cas issus de l'étape précédente. Nous commençons par calculer la similarité entre la pondération des critères du cas cible avec la pondération des critères de ces deux cas similaires qu'on a obtenus.

Critère de choix	Cas cible	Cas 2		Cas 6	
		Pondération	Valeur similarité	Pondération	Valeur similarité
Capacité de réaliser la tâche	3	3	<b>1</b>	3	<b>1</b>
Capacité de soutenir la collaboration	2	2	<b>1</b>	1	<b>0.5</b>
Modificabilité	2	3	<b>0.5</b>	1	<b>0.5</b>
Temps de réalisation de la tâche	1	1	<b>1</b>	3	<b>0</b>
Cout de réalisation de la	1	1	<b>1</b>	2	<b>0.5</b>

tâche					
Représentativité	2	2	<b>1</b>	3	<b>0.5</b>
Quantité d'information	2	2	<b>1</b>	2	<b>1</b>
<b>Similarité de pondération des critères</b>			<b>92,3%</b>		<b>65,3%</b>

Tableau 5-5: Valeur similarité de pondération des critères de choix

Nous rappelons la méthode utilisée pour calculer la valeur de similarité de la pondération d'un critère de choix. Si les deux pondérations sont dans le même niveau (par exemple important – important), la valeur de similarité égale 1. Si les deux pondérations sont dans deux niveaux différents mais proches (par exemple important avec moins important, ou important avec très important) la valeur de similarité égale 0,5. Si non la valeur de similarité égale 0. Les valeurs de similarité de la pondération de chaque critère entre notre cas et les deux cas similaires que l'on avait gardés de l'étape précédente sont présentées dans le tableau 5. Nous avons obtenu la valeur de similarité issue de la pondération des critères proche de 92,3% pour le cas 2 et de 65,3% pour le cas 6.

- Faire le choix : nous avons obtenu une liste de cas similaires, après l'étape précédente, que l'on qualifie comme suit :

Nom de cas similaire	Valeur similarité des situations	Valeur de similarité de la Pondération des critères	Le choix
Cas 2	0,95 (95%)	92,3%	MV
Cas 6	0,9 (90%)	65,3%	P

Tableau 5-6: Liste finale des cas similaires

A partir de ce tableau, nous avons décidé d'utiliser le MV pour analyser la résistance de notre pièce. Ce choix est fait au regard du cas 2 qui a une haute valeur de similarité de situation et également une haute valeur de similarité issue de la pondération des critères. La valeur de similarité issue de la pondération des critères du cas 2 est plus haute que celle du cas 6. Donc, nous avons fait confiance au choix du cas 2.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tâche	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+(heure)	-(Quelque jour)
Le temps de réaliser la tâche	+(3j)	-(5j minimum)
Le cout de réaliser la tâche	+	-
Représentativité	-	+

Quantité d'information	+	-
------------------------	---	---

Tableau 5-7: Table de comparaison du cas 2

Nous avons mémorisé aussi la table de comparaison du cas 2 comme une table de comparaison provisoire de notre cas. Comme nous avons expliqué dans la description de la méthode de choix, les valeurs dans cette table seront vérifiées dans la phase suivante pour ce qui concerne le MV qui a été choisie. La table de comparaison du cas 2 sera utilisée pour créer la table de comparaison de notre cas.

#### 5.1.4. Phase réalisation

Dans cette phase, nous allons faire un calcul éléments finis pour analyser la résistance de notre pièce puisque le choix de MV a été fait précédemment. Avec le résultat du calcul élément finis, nous pouvons avoir une carte des contraintes de notre pièce, les zones trop ou moins chargées et la conclusion sur la résistance de la pièce. Donc, notre choix peut nous permettre d'atteindre tous nos besoins.

Ensuite, nous allons mettre à jour la table de comparaison avec les valeurs associées aux critères de choix de MV (notre choix) pour notre nouveau cas. Pour les valeurs des critères de la colonne Prototype, nous garderons la même valeur avec table de comparaison du cas 2.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tache	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	<i>+ (quelques minutes)</i>	- (Quelque jour)
Le temps de réaliser la tache	<i>+ (2j)</i>	- (5j minimum)
Le cout de réaliser la tache	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	+	-

Tableau 5-8: Table de comparaison du cas courant

Nous avons obtenu une table de comparaison qui est presque la même que la table du cas 2. Nous avons juste modifié le temps de modificabilité et le temps de réaliser la tâche. A la fin de cette phase, nous avons un cas complet avec la situation, le classement des critères, la table de comparaison (Tableau 5-8) et le choix et la référence (cas 2).

### 5.1.5. Phase d'apprentissage

Dans cette phase, nous allons ajouter notre cas complet à la base de données. Il y a deux choses à faire :

- Nous allons vérifier les valeurs des paramètres de la situation de ce cas. Nous rappelons que la valeur des paramètres de la situation est définie sous la forme de « mots clés ». Si une valeur n'existe pas dans la base de données, nous devons ajouter cette nouvelle valeur dans la liste d'options sur laquelle nous choisirons quand on définira une nouvelle situation. Dans cette étude de cas, nous n'avons pas de nouvelles valeurs.
- Ensuite, nous allons ajouter ce cas dans notre base de données. Nous avons déjà 8 cas de référence. Donc, ce cas est enregistré au nom « cas 9 ». La table de comparaison MV et P de ce cas (Tableau 5-8) est enregistrée dans le fichier « cas9.xlsx ». Dans la partie de référence, on a noté cas 2 pour montrer au lecteur qu'on a fait le choix de ce cas au regard du cas 2. Tous les éléments de notre cas sont présentés dans le tableau suivant :

<b>Situation</b>		<b>Cas 9</b>
<b>Attribut</b>	<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
<i>Tâche</i>	Nature de la tâche	<i>Analyse la résistance</i>
<i>Objet</i>	Type d'Objet	<i>Pièce</i>
<i>Acteur</i>	Fonction des Acteurs	<i>Concepteur chercheur</i> <i>Ingénieur</i> <i>Chef projet</i>
	Compétences	<i>Calcul mécanique</i> <i>Modélisation modèle CAO</i>
<i>Contexte industriel</i>	Domaine application	<i>Aéronautique</i>
	Stratégie	<i>Confidentialité</i> <i>Petite série</i>
<i>Contexte projet</i>	Objectif	<i>Minimiser la masse</i>
	Durée	<i>Moyen</i>
	Position	<i>Au début du projet</i>
	Organisation	<i>Réunion visio-conférence par semaine</i>
<i>Contexte technique</i>	Logiciel	<i>Catia</i>
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>
	Technologie	<i>Machine EBM</i>
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>
<b>Pondération critères</b>		
<i>Capacité de réaliser la tâche</i>		3
<i>Capacité de soutenir la collaboration</i>		2
<i>Modificabilité</i>		2
<i>Temps de réalisation de la tâche</i>		1

<i>Cout de réalisation de la tâche</i>	1
<i>Représentativité</i>	2
<i>Quantité d'information</i>	2
<b>La table de comparaison (format fichier)</b>	Cas9.xlsx
<b>Le choix</b>	MV
<b>Référence</b>	Cas 2

Tableau 5-9: Un cas complet pour ajouter dans la base donnée

## 5.2. Appliquer la méthode de choix dans le processus de reconception de la pièce Rheonova

La pièce Rhéonova Figure 5-2 à gauche est une pièce obtenue par usinage à reconcevoir dans un projet avec une start-up. L'objectif est de minimiser le moment d'inertie de cette pièce. Il y a deux zones fonctionnelles sur cette pièce, qui est présenté dans la Figure 5-2 à droite. Nous ne présentons pas en détails les conditions aux limites ni les étapes dans le processus de reconception de cette pièce. Comme dans l'étude de cas précédente, nous nous focalisons sur l'application de la méthode de choix entre MV et P pour un cas particulier. Les détails de ce cas sont présentés dans la partie suivante.

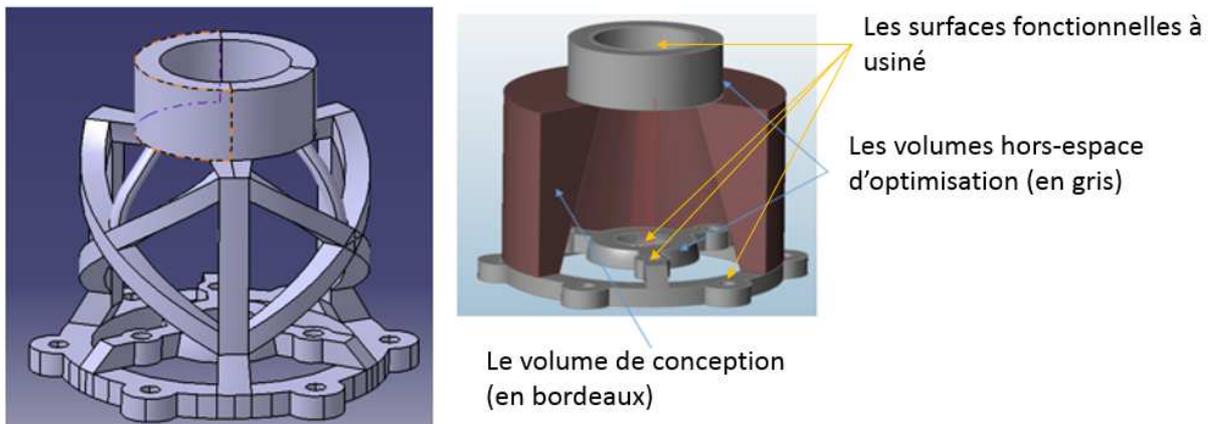


Figure 5-2: La pièce Rheonova en géométrie initiale

### 5.2.1. Déterminer le cas cible

Dans le processus de reconception, nous allons rencontrer un cas qui nous demande de choisir entre MV et P pour analyser la finition de la pièce. Nous devons usiner les surfaces fonctionnelles de cette pièce, Figure 5-2. Il y a deux possibilités : soit on fabrique un prototype et on l'usine, soit nous modélisons le processus de l'usinage sur Esprit. Nous présentons par la suite l'application de la méthode de choix pour décider si l'on s'oriente vers la simulation numérique (MV) ou la fabrication EBM suivie de l'usinage finition sur un prototype (P). C'est un moment à la fin du processus de conception, nous devons analyser la finition de la nouvelle géométrie de la pièce « Rheonova ».

Notre cas cible est défini par deux éléments : la situation et le classement des critères de choix. Les valeurs des paramètres de la situation de conception sont définies dans le tableau 10 :

<b>Attribut</b>	<b>Paramètre</b>	<b>Valeurs</b>	<b>Liste de valeurs existantes</b>
<b>Tâche</b>	Nature de la Tâche	<i>Analyse de la finition</i>	1. Analyse de la forme 2. Analyse de la résistance 3. Analyse de la fabrication 4. Analyse de la finition
<b>Objet</b>	Type d'Objet	<i>Pièce</i>	1. Pièce 2. Mécanisme
<b>Acteur</b>	Fonction des Acteurs	<i>Concepteur chercheur Expertise de finition</i>	1. Concepteur chercheur 2. Ingénieur 3. Chef de projet 4. Designer 5. Expert de fabrication 6. Expert de finition
	Compétences	<i>Calcul mécanique Modélisation modèle CAO Finition</i>	1. Optimisation topologique 2. Modélisation modèle 3. Calcul mécanique 4. Fabrication 5. Finition
<b>Contexte industriel</b>	Domaine d'application	<i>Rhéologie</i>	1. Aéronautique
	Stratégie	<i>Confidentialité Petite série</i>	1. Confidentialité 2. Petite série
<b>Contexte projet</b>	Objectif	<i>Minimiser le moment d'inertie</i>	1. Minimiser la masse 2. Augmenter la rigidité
	Durée	<i>Moyen</i>	1. Long 2. Moyen 3. Courte
	Position	<i>A la fin du projet</i>	1. au début du projet 2. au milieu du projet 3. à la fin du projet
	Organisation	<i>Travail asynchrone</i>	1. Travail asynchrone 2. Réunion visio-conférence par semaine
<b>Contexte technique</b>	Logiciel	<i>Catia Esprit</i>	1. Catia 2. Inspire 3. Optistruct 4. Esprit 5. Magics
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>	1. Oui 2. Non
	Technologie	<i>Machine EBM Machine CNC</i>	1. Machine EBM 2. Machine CNC
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>	1. Oui 2. Non

Tableau 5-10: La situation de conception pour la pièce "Rheonova"

Le classement des critères de choix est défini par le concepteur au regard des valeurs des paramètres de cette situation.

Critère de choix	Pondération des critères	
	Groupe	Valeur pondération
Capacité de réaliser la tâche	Plus important	3
Capacité de soutenir la collaboration	Important	1
Modificabilité	Important	2
Temps de réalisation de la tâche	Moins importants	2
Cout de réalisation de la tâche	Moins importants	1
Représentativité	Important	3
Quantité d'information	Important	3

Tableau 5-11: La pondération des critères de choix pour pièce "Rheonova"

Nous allons ensuite passer à la phase « remémoration » de notre méthode de choix pour chercher les cas similaires avec notre cas cible.

### 5.2.2. Phase remémoration

Nous allons chercher dans la base de données les cas qui présentent des situations similaires à celle de notre cas cible. Il y a deux étapes dans cette phase :

- Filtrage : nous allons chercher les situations qui possèdent la même tâche que notre cas cible, c'est-à-dire analyse de la finition de la pièce. Nous avons trouvé cette correspondance avec les deux cas suivants, cas 4 et cas 8 :

Situation		Cas 4	Cas 8
Attribut	Paramètre	Valeur	Valeur
<i>Tâche</i>	Nature de la tâche	La finition	La finition
<i>Objet</i>	Type d'Objet	Pièce	Pièce
<i>Acteur</i>	Fonction des Acteurs	Conception chercheur, chef de projet, ingénieur, expertise finition	Conception chercheur, chef de projet, ingénieur, expertise finition
	Compétences	Calcul mécanique, Modélisation CAO, Finition	Calcul mécanique, Modélisation CAO, Finition
<i>Contexte industriel</i>	Domaine application	Aéronautique	Aéronautique
	Stratégie	Confidentialité, Petite Série	Confidentialité, Petite Série
<i>Contexte projet</i>	Objectif	Masse	Masse
	Durée	Moyen	Moyen
	Position	Au milieu	A la fin
	Organisation	Visio-conférence	Visio-conférence
<i>Contexte technique</i>	Logiciel	Catia, Esprit	Catia, Esprit
	Disponibilité de l'opérateur	Oui	Oui
	Technologie	EBM, CNC	EBM, CNC
	Disponibilité de l'opérateur	Oui	Oui

<b>Pondération critères</b>		
<i>Capacité de réaliser la tâche</i>	3	3
<i>Capacité de soutenir la collaboration</i>	2	1
<i>Modificabilité</i>	2	1
<i>Temps de réalisation de la tâche</i>	1	2
<i>Cout de réalisation de la tâche</i>	1	1
<i>Représentativité</i>	3	3
<i>Quantité d'information</i>	3	3
<b>La table de comparaison (format fichier)</b>	Cas4.xlsx	Cas8.xlsx
<b>Le choix</b>	P	P
<b>Référence</b>	Non	Non

Tableau 5-12: Liste des cas similaires après filtrage

Nous pouvons trouver dans le Tableau 5-12 les valeurs des paramètres de la situation, la pondération des critères de choix, le choix, la référence et le nom du fichier sur lequel nous avons enregistré la table de comparaison.

- Calcul de la similarité : dans ce cas, nous avons choisi la valeur similarité souhaitée de 0,6 qui est plus bas que l'application précédente (la chape) parce que notre pièce est dans un projet différent de tous les cas déjà présents dans la base donnée. Le résultat de cette étape est montré dans le tableau suivant :

<b>Nom de cas similaire</b>	<b>Valeur similarité</b>	<b>Le choix</b>
Cas 4	0,75 (75%)	P
Cas 8	0,8 (80%)	P

Tableau 5-13: Liste de cas similaire avec la valeur souhaite de 0,7

Selon le résultat, nous avons deux cas similaires à plus de 60% avec notre cas cible. Ces deux cas restent dans la liste des cas après le filtrage. La phase suivante nous permet de faire le choix entre MV et P au regard des cas similaires qu'on a trouvés dans cette phase.

### 5.2.3. Phase réutilisation

Nous avons trouvé deux cas similaires à la fin de la phase précédente. En plus, le choix effectué dans ces deux situations est le même, c'est le P. Nous pouvons donc faire le choix de P comme les deux cas similaires. Mais dans cette étude, nous voulons calculer aussi la pondération proche des critères de notre cas avec les deux cas de référence. La valeur similarité de pondération des critères de choix est présentée dans le tableau suivant :

<b>Critère de choix</b>	<b>Cas cible</b>	<b>Cas 4</b>		<b>Cas 8</b>	
		<b>Pondération</b>	<b>Valeur similarité</b>	<b>Pondération</b>	<b>Valeur similarité</b>
Capacité de réaliser la tâche	3	3	1	3	1
Capacité de soutenir la collaboration	1	2	0,5	1	1

Modificabilité	2	2	1	1	0,5
Temps de réalisation de la tâche	2	1	0,5	2	1
Cout de réalisation de la tâche	1	1	1	1	1
Représentativité	3	3	1	3	1
Quantité d'information	3	3	1	3	1
<b>Similarité de pondération des critères</b>			<b>90%</b>		<b>93,3%</b>

Tableau 5-14: La similarité de pondération des critères entre cas cible et deux cas 4 et cas 8

Nous avons obtenu la similarité de pondération des critères de 90% de notre cas avec le cas 4 et de 93,3% avec le cas 8. Il est prévu dans l'étape suivante de faire le choix au regard de ces deux cas sélectionnés.

- Faire le choix : nous avons obtenu une liste de cas similaire (Tableau 5-15) après l'étape précédente:

Nom de cas similaire	Valeur similarité de la situation	Valeur similarité de pondération des critères	Le choix
Cas 4	0,75 (75%)	90%	P
Cas 8	0,80 (80%)	93,3%	P

Tableau 5-15: Liste de cas similaire finale

Ces deux cas similaires trouvés dans la base de données ayant choisi le P, nous décidons d'utiliser aussi le P pour analyser la finition de notre pièce. De plus, la valeur de similarité de la situation et la similarité de pondération des critères de ces deux cas avec notre cas est très haute.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tâche	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+ (quelque minute)	- (1 jour)
Le temps de réaliser la tâche	+ (2 heures)	- (2 jours)
Le cout de réaliser la tâche	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	-	+

Tableau 5-16: Table de comparaison du cas 8

Nous avons décidé aussi d'utiliser la table de comparaison du cas 8 comme table de comparaison provisoire de notre cas à cause de de similarité de la situation et la

similarité de pondération des critères (plus haute que le cas 4). Les valeurs dans cette table devront être vérifiées dans la phase suivante.

#### 5.2.4. Phase réalisation

Dans cette phase, nous allons analyser la finition de notre pièce avec un prototype. Nous fabriquons plusieurs prototypes en même temps avec la machine EBM. Ces prototypes sont utilisés pour tester les stratégies de l'usinage. Nous pouvons analyser la mise en position et maintien la pièce. En plus, la résistance de notre pièce pendant l'usinage est aussi validé. Avec la solution choisie, nous pouvons atteindre tous nos besoins

Ensuite, nous allons mettre à jour la table de comparaison avec les valeurs associées aux critères du P (notre choix). Pour les valeurs associées aux critères de MV, nous garderons la même valeur que celles de la table de comparaison du cas 8.

Critères	MV	Prototype
La capacité de réaliser la tâche	+	+
La capacité de soutenir la collaboration	+	-
Modificabilité	+ (quelque minute)	- (4 heures)
Le temps de réaliser la tâche	+ (2 heures)	- (1,5 jours)
Le cout de réaliser la tâche	+	-
Représentativité	-	+
Quantité d'information	-	+

Tableau 5-17: table de comparaison du cas curent

Nous avons obtenu une table de comparaison presque identique à la table du cas 8. Nous avons juste modifié le temps de modificabilité et le temps de réaliser la tâche. Ces temps sont changés à cause de la complexité de la pièce et aussi l'expérience de l'expertise d'usinage. A la fin de cette phase, nous avons un cas complet avec la situation, le classement des critères, la table de comparaison (Tableau 5-17), la référence (cas 8) et le choix.

#### 5.2.5. Phase apprentissage

Dans cette phase, nous allons ajouter notre cas complet à la base de données. Il y a deux choses à faire :

- Nous allons vérifier les valeurs des paramètres de la situation de ce cas. Les valeurs du paramètre « domaine application » et « objectif » ne sont pas dans la liste existante de notre base de donnée. Donc, nous ajoutons le mot clé

« Rhéologie » dans la liste de valeur du paramètre « domaine d'application », et le mot clé « moment d'inertie » dans la liste de valeur du paramètre « objectif ».

- Ensuite, nous allons ajouter ce cas dans notre base de données. Nous avons déjà 9 cas de référence. Donc, ce cas est enregistré au nom « cas 10 ». La table de comparaison de ce cas (Tableau 5-17) est enregistrée dans le fichier « cas10.xlsx ». Dans la partie de référence, on a noté cas 8 pour montrer au lecteur qu'on a fait le choix de ce cas au regard du cas 8. Tous les éléments de notre cas sont présentés dans le tableau suivant :

<b>Situation</b>		<b>Cas 10</b>
<b>Attribut</b>	<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
<i>Tâche</i>	Nature de la tâche	<i>Analyse de la finition</i>
<i>Objet</i>	Type d'Objet	<i>Pièce</i>
<i>Acteur</i>	Fonction des Acteurs	<i>Concepteur chercheur</i> <i>Expertise de finition</i>
	Compétences	<i>Calcul mécanique</i> <i>Modélisation modèle CAO</i> <i>Finition</i>
<i>Contexte industriel</i>	Domaine application	<i>Rhéologie</i>
	Stratégie	<i>Confidentialité</i> <i>Petite série</i>
<i>Contexte projet</i>	Objectif	<i>Minimiser le moment d'inertie</i>
	Durée	<i>Moyen</i>
	Position	<i>A la fin du projet</i>
	Organisation	<i>Travail asynchrone</i>
<i>Contexte technique</i>	Logiciel	<i>Catia</i> <i>Esprit</i>
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>
	Technologie	<i>Machine EBM</i> <i>Machine CNC</i>
	Disponibilité de l'opérateur	<i>Oui</i>
<b>Pondération critères</b>		
	<i>Capacité de réaliser la tâche</i>	3
	<i>Capacité de soutenir la collaboration</i>	1
	<i>Modificabilité</i>	2
	<i>Temps de réalisation de la tâche</i>	2
	<i>Cout de réalisation de la tâche</i>	1
	<i>Représentativité</i>	3
	<i>Quantité d'information</i>	3
<b>La table de comparaison (format fichier)</b>		Cas10.xlsx

<b>Le choix</b>	P
<b>Référence</b>	Cas 8

Tableau 5-18: Un cas complet pour ajouter dans la base donnée

### 5.3. Conclusion

Nous avons présenté une méthode de choix entre MV et P pour évaluer la pièce dans une situation de conception au chapitre 4. Cette méthode est basée sur un modèle de Case Based Reasoning. Le concepteur définit d'abord le cas courant qui inclut la situation de conception qu'on voudrait d'étudier, le classement des critères de choix. Un calcul de la similarité de situation entre cas cible et les cas dans la base de données sont réalisés pour aider le concepteur de choisir les cas similaires souhaités. La deuxième comparaison est faite entre la pondération de critères de choix du cas cible avec les cas dans la base de données. Après ce calcul, le concepteur obtient une liste de cas similaires avec une valeur de similarité de situation et une valeur de similarité de pondération des critères. Ces deux valeurs sont des références pour que le concepteur choisisse le cas le plus similaire avec le cas courant. Le concepteur fait le choix au regard du choix dans les cas similaires choisis. Ensuite, le concepteur réalise cette situation avec la solution choisie (MV ou P). Cette phase est pour vérifier le choix qu'il a été fait et pour compléter le cas courant en ajoutant les deux éléments, la table de comparaison entre MV et P par rapport aux critères de choix et le choix (MV ou P). A la fin, le concepteur va ajouter le cas courant dans la base de données.

Cette méthode a été appliquée à deux études de cas qui sont présentées dans le chapitre 5 pour montrer ses avantages et ses limites. En général, cette méthode a bien aidé le concepteur pour choisir entre MV et P pour évaluer la pièce dans un processus de conception. Le concepteur peut regarder les comparaisons, le choix entre MV et P a été fait dans les cas similaires avec le cas courant pour avoir confiance pour faire son choix. Par contre, nous n'avons pas beaucoup de cas de référence dans la base de données. Le concepteur n'a donc pas beaucoup de choix pour les cas similaires. De plus, cette méthode n'est qu'une aide pour le concepteur. Elle ne donne pas le choix automatique. Le choix dépend des expériences, des compétences du concepteur qui fait le choix manuellement. Ces remarques ouvrent des perspectives intéressantes que nous allons aborder dans le chapitre suivant.



## Chapitre 6 : Conclusions et perspectives

## 6.1. Conclusion

Le présent travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire G-SCOP sur la thématique de la conception pour la fabrication additive. Dans notre travail, nous nous sommes focalisés sur les procédés métalliques qui engendrent des changements importants de processus par rapport aux procédés conventionnels. Une première partie de ce manuscrit a présenté l'état de l'art des procédés de fabrication additive métallique. Elle fait apparaître plusieurs axes de recherche autour de la fabrication additive métallique dans les domaines des matériaux, des performances des procédés et de la conception pour la fabrication additive. Nous avons considéré que de nombreux changements liés à fabrication additive ne sont pas encore pris en compte par une démarche de conception pour la fabrication additive. Nous nous sommes donc concentrés sur l'axe de recherche méthode de conception pour exploiter des possibilités de la fabrication additive.

Le manuscrit continue par un état de l'art sur la démarche de conception et les règles de conception pour la fabrication additive. Il y a peu travaux sur la méthodologie de conception pour la fabrication additive. Les travaux existants se sont concentrés plutôt sur les caractéristiques des procédés que sur la partie conception de la pièce. Certaines méthodologies se sont intéressées à l'intégration des règles métiers du procédé et sont applicables à un seul procédé. Il y a des méthodologies qui utilisent l'optimisation topologique pour chercher des géométries possibles de la pièce mais le travail sur cet outil est peu intégré à une démarche de conception globale. Nous n'avons pas trouvé une méthodologie globale de conception pour plusieurs procédés de fabrication additive qui nous permettrait d'obtenir les géométries possibles de la pièce en prenant en compte la liberté proposée par la fabrication additive. Mais cependant nous en retenons les étapes importantes à prendre en compte dans un processus de conception pour la fabrication additive. Les résultats du travail sur l'état de l'art nous ont permis d'envisager des expérimentations pour approfondir ces étapes et pour caractériser les liens entre ces étapes.

Nous avons donc ensuite proposé un processus de conception pour la fabrication additive, qui est développé à partir des travaux existants et de nos expérimentations. Il y a 3 étapes principales dans notre processus : définition de la forme initiale, reconstruction d'un modèle 3D et évaluation du comportement de la pièce et de son comportement en cours de fabrication. L'optimisation topologique est le cœur de l'étape de définition de la forme initiale. Cet outil nous permet de profiter de la liberté de forme de la pièce pour la fabrication additive en inspirant le concepteur et lui permettant d'imaginer de nouvelles formes à partir des exigences. Dans notre méthode, le résultat de cette étape prend déjà en compte les contraintes du procédé ainsi que les exigences particulières du client (style par exemple). Pour la deuxième étape, nous avons proposé deux stratégies de reconstruction de la pièce à partir des résultats de l'optimisation topologique. La première stratégie est de travailler

directement sur le maillage du résultat de l'optimisation. Cette stratégie est réalisable de manière automatique. La deuxième stratégie utilise les logiciels CAO (Catia pour notre travail) classiques pour dessiner la pièce en s'appuyant sur le résultat de l'optimisation topologique. Cette deuxième stratégie est totalement manuelle. La dernière étape est l'évaluation du comportement de la pièce et du comportement en cours de fabrication. Cette étape inclut une boucle d'évaluation interne et une boucle d'évaluation externe avec l'équipe client ou les experts. La boucle d'évaluation externe nous permet de valider tous les comportements de la pièce afin d'obtenir un modèle 3D final validé, que nous pouvons théoriquement utiliser pour fabriquer les pièces en série.

Nous avons évalué par la suite notre processus par son application à une étude de cas. Nous avons conclu que ce processus de conception semble bien adapté pour concevoir une pièce pour la fabrication additive. Notre proposition de processus de conception pour la fabrication additive présente les avantages suivants :

- tirer le profit de la liberté la forme de la pièce pour la fabrication additive avec l'optimisation topologique
- intégrer les expériences, les retours des expertises dans le résultat de l'optimisation topologique pour définir la forme initiale de la pièce.
- intégrer au début du processus de conception les libertés et les contraintes du procédé.
- ajouter une l'évaluation externe à la fin chaque étape principale. Cette évaluation nous permet de prendre en compte des retours des expertises afin de valider le résultat à chaque étape. Nous pouvons donc éviter au maximum l'aller-retour entre deux étapes dans le processus.
- pouvoir s'appliquer à tous les procédés de fabrication additive

Il y a aussi des limites à notre proposition de processus de conception :

- nous n'avons pas encore pu approfondir les différentes stratégies de l'optimisation topologique.
- les méthodes de reconstruction du modèle CAO à partir du résultat de l'optimisation topologique ne sont pas encore optimales par rapport aux critères de temps, de qualité surface, de contrôlabilité, de robustesse...

Dans la deuxième période de notre travail, nous avons développé la troisième étape de notre processus de conception, soit l'étape d'évaluation des performances. Il est en effet apparu, lors des premières expérimentations de la démarche de conception que nous proposons, que certaines pièces cassaient en essais alors qu'elles avaient été validées par des simulations éléments finis. Nous avons alors à choisir entre refaire un calcul éléments finis plus fin (maillage et modèle plus fin) et donc plus couteux en temps ou faire un essai avec des prototypes de différentes dimensions

pour déterminer la résistance de la pièce. Nous avons considéré que le choix entre prototype et maquette virtuelle étaient une question intéressante à développer dans le cadre de la démarche de conception que nous proposons.

Pour répondre à cette question un état de l'art de la notion de situation dans le contexte de conception, et des représentations intermédiaires de la pièce utilisées dans cette situation, est proposé. A partir des résultats de cet état de l'art et de nos études de cas, nous avons proposé une définition des termes de « Maquette virtuelle », « Maquette physique » et « Prototype ». De plus, nous avons aussi défini les caractéristiques d'une situation de conception qui vont permettre de guider le choix entre MV, MP et P en phase d'évaluation des performances de la pièce. Une liste de critères de choix est aussi définie au regard des critères de la littérature et de nos études de cas. Nous avons ensuite proposé une méthode de choix entre les représentations intermédiaires (notamment entre MV et P) pour évaluer la pièce dans une situation de conception. Cette méthode de choix est basée sur un modèle de Case Based Reasoning. Cette méthode a été appliquée à deux études de cas qui sont présentées dans le chapitre 5 pour montrer ses avantages et ses limites actuelles. Cette méthode permet d'aider le concepteur dans son choix entre MV et P pour évaluer la pièce dans un processus de conception.

Notre méthode de choix a les avantages suivants:

- c'est la seule méthode de choix formalisée entre les différentes représentations intermédiaires pour l'évaluation de la performance de la pièce en conception.
- Elle permet d'éviter les mauvais choix (entre MV et P) qui augmentent le temps et le coût du processus de conception.
- Elle réduit la subjectivité dans la sélection parce que le concepteur fait le choix au regard de résultats de cas similaires présents dans la base de données.
- la phase d'apprentissage nous permet d'enrichir notre base de données et éviter les mêmes erreurs dans les futurs processus de conception

Notre méthode de choix a aussi des limites telles que :

- la méthode est concentrée sur la MV et P
- elle ne peut pas donner le choix directement sans interprétation du concepteur. Le choix dépend de l'analyse du concepteur et n'est donc pas automatisé.
- elle nécessite de beaucoup enrichir la base de données de cas références pour devenir fiable et pertinente
- les calculs de la similarité de situation et de la similarité de pondération des critères sont complexes. Les valeurs dans la fonction du calcul similarité sont définies en relatif.

Ces remarques ouvrent des perspectives intéressantes que nous allons aborder dans la partie suivante.

## 6.2. Perspectives

Dans cette partie, nous allons étudier les perspectives et prolongements possibles de notre travail.

Nous allons d'abord discuter de notre proposition du processus de conception pour la fabrication additive. Nous proposons trois perspectives pour aller plus loin avec ce processus.

- Optimisation topologique : La stratégie de définition de l'espace de conception a une influence très forte sur le résultat. Dans notre travail, nous avons défini le volume de conception le plus grand possible pour laisser la plus grande liberté possible au logiciel afin de proposer une géométrie de la pièce optimale. Mais avec un grand volume, le temps de calcul du logiciel est long. Il peut même atteindre quelques jours avec une taille de maillage assez fin. Nous pensons à diminuer le volume de conception pour réduire le temps calcul du logiciel sans augmenter la taille du maillage. Nous voulons tester une nouvelle stratégie qui peut résoudre le problème du temps de calcul tout en laissant la liberté d'optimisation au logiciel. Cette stratégie se déroule en 2 temps:
  - Premier temps : définir le volume de conception le plus grand possible. Nous pouvons lancer un calcul avec une taille de maillage assez grossier. Ce calcul nous permet d'obtenir rapidement une proposition de géométrie de la pièce.
  - Deuxième temps : redéfinir le volume de conception, guidé par le premier résultat de l'optimisation topologique. L'idée est de mettre le volume de conception proche la géométrie proposé par le logiciel de calcul pour diminuer le volume de conception. Ensuite, nous pouvons lancer le deuxième calcul avec une taille de maillage plus fine.
- Reconstruction modèle CAO et intégration des structures treillis : l'étape de reconstruction modèle CAO est toujours difficile et longue. Nous voulons développer une méthode qui nous permette de concevoir le modèle CAO automatiquement et le plus rapidement possible, à partir des résultats de l'optimisation topologique. Dans notre travail, nous avons intégré les structures treillis dans la pièce. Mais nous n'avons pas encore intégré une méthode qui nous permet de choisir le type, la taille de treillis. La thèse d'Abdul Hadi AZMAN (soutenance 2017) est intéressante pour nous. Il a développé une démarche de conception des structures treillis. Cette méthode sert de guide aux concepteurs pour l'intégration des structures en treillis dans les pièces fabriquées par fabrication additive, en utilisant un matériau

équivalent. Les concepteurs auront à leur disposition les informations nécessaires pour choisir les types et la densité des structures treillis à utiliser. Abdul Hadi AZMAN a aussi développé une méthodologie pour calculer les propriétés du matériau équivalent, qui peut nous aider pour le calcul éléments finis des structures treillis. Nous envisageons d'intégrer les travaux de Hadi dans notre processus de conception.

- Conception collaborative : un des points forts de notre processus de conception est l'évaluation externe avec les clients et l'intégration des expertises à la fin de chaque étape. Nous avons considéré que notre processus est comme un processus de conception collaborative. Au sein du laboratoire G-SCOP, il y a une équipe « conception collaborative (CC) » qui définit les interactions comme toutes les actions ayant pour but d'échanger de la connaissance, de négocier des contraintes, de partager de l'information ou encore d'élaborer des solutions collectivement. Nous envisageons d'intégrer notre processus dans les démarches de conception collaborative proposées par cette équipe. Ces démarches nous permettront de gérer les réunions, les échanges, les connaissances afin d'optimiser le temps et le résultat du processus de conception.

Nous allons ensuite discuter des perspectives autour la méthode de choix entre les représentations intermédiaires de la pièce :

- Réduire la subjectivité du choix: dans notre méthode de choix, il reste encore des étapes que le concepteur doit interpréter. Le classement des critères est défini par le concepteur. De plus, dans certains cas, le choix est décidé aussi par le concepteur. Nous souhaitons par la suite diminuer les étapes manuelles dans notre méthode afin de réduire la subjectivité du choix du concepteur. Nous envisageons de :
  - Développer une méthode pour définir automatiquement ou semi-automatiquement le classement des critères au regard des valeurs des paramètres de la situation de conception.
  - Développer un algorithme qui nous permette de faire le choix automatique, au regard des deux valeurs de similarité (la similarité de situation de conception et la similarité de pondération des critères), de cas référence dans la base de données.
- Fonction du calcul de la similarité : Dans la fonction du calcul de la similarité de situation de conception, nous devons développer une nouvelle méthode pour définir le niveau d'importance de chaque paramètre caractéristique de la situation de conception. Dans notre méthode, nous avons déterminé le niveau d'importance au regard du nombre de critères sur lesquels il a une influence.

Cette définition qui s'appuie sur notre expérience est acceptable. Mais nous ne faisons pas ce test au regard des nombreuses situations de conception rencontrées dans les différents projets. Nous ne pouvons donc pas confirmer que notre choix est parfait au regard de toutes ces situations.



# Bibliographie

- [1] Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13(2), 89-96.
- [2] AM Platform: Additive Manufacturing Strategic Research Agenda: Release 2014. Available online <http://www.rm-platform.com/linkdoc/AM%20SRA%20-%20February%202014.pdf> Access 5 Mar 2015
- [3] Wohlers, T. (2014). Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry; Wohlers Associates. Inc.: Fort Collins, CO, USA.
- [4] Wohlers, T. (2012). *Wohlers report 2012*. Wohlers Associates, Inc.
- [5] Nickels, L. (2009). Channelling quality for moulded parts using fast manufacturing. *Metal Powder Report*, 64(8), 8-12.
- [6] Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(2), 589-609.
- [7] Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83.
- [8] Woesz, A. (2008). Rapid prototyping to produce porous scaffolds with controlled architecture for possible use in bone tissue engineering. In *Virtual Prototyping & Bio Manufacturing in Medical Applications* (pp. 171-206). Springer US.
- [9] 3D Systems SLA production series brochure, Information on <http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/sla-series-0514-usen-web.pdf> Accessed 3 May2015
- [10] Salonitis, K., Tsoukantas, G., Stavropoulos, P., & Stournaras, A. (2003). A critical review of stereolithography process modeling. In *1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, VRAP*.
- [11] Gebhardt, I. A. (2003). Rapid prototyping: industrial rapid prototyping system: prototyper: solid ground curing.
- [12] Dahotre, N. B., & Harimkar, S. (2008). *Laser fabrication and machining of materials*. Springer Science & Business Media.
- [13] Kruth, J. P. (1991). Material in-process manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 40(2), 603-614.

- [14] Castoro, M., & Kumpaty, S. (2013, April). Impact of laser power and build orientation on the mechanical properties of selectively laser sintered parts. In *Proceedings of The National Conference on Undergraduate Research (NCUR)*. University of Wisconsin La Crosse, WI.
- [15] 3D Systems SLS production series brochure, Information on [http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/sls-series-0214-usen-web\\_1.pdf](http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/sls-series-0214-usen-web_1.pdf) Accessed 23 Apr 2015
- [16] Chryssolouris, G. (2013). *Manufacturing systems: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- [17] Khaing, M. W., Fuh, J. Y. H., & Lu, L. (2001). Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1), 269-272.
- [18] Costa, L., & Vilar, R. (2009). Laser powder deposition. *Rapid prototyping journal*, 15(4), 264-279.
- [19] Ready for Printing-3D Printing at Siemens video. Information on <http://youtu.be/VyEgbyNg0Q8?t=3m46s> Accessed 16 June 2014
- [20] Liu, J., & Li, L. (2004). In-time motion adjustment in laser cladding manufacturing process for improving dimensional accuracy and surface finish of the formed part. *Optics & Laser Technology*, 36(6), 477-483.
- [21] Cesarano III, J., King, B. H., & Denham, H. B. (1998). *Recent developments in robocasting of ceramics and multimaterial deposition* (No. SAND--98-2195C; CONF-980826--). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).
- [22] Pandremenos, J., Paralikas, J., Chryssolouris, G., Dybala, B., & Gunnink, J. W. (2008, September). RM product development: design principles, simulation and tool. In *International Conference on Additive Technologies, Ptuj*.
- [23] Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
- [24] BASCOUL, C. (1995). Pour une conception mécanique assistée par ordinateur. 4ème colloque sur la Conception Mécanique Intégrée. *PRIMECA, La Plagne, France*, 3-5.
- [25] Bocquet, J. C. (1994). Mécanique, génie des matériaux, acoustique.
- [26] Aoussat, A., Christofol, H., & Le Coq, M. (2000). The new product design-a transverse approach. *Journal of Engineering Design*, 11(4), 399-417.

- [27] Desmoulins, N. (2009). *Maîtriser le levier informatique: accroître la valeur ajoutée des systèmes d'information*. Pearson Education France.
- [28] Christofol, H. (1995). *Modélisation systémique du processus de conception de la coloration d'un produit* (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [29] Buur, J., & Andreasen, M. M. (1989). Design models in mechatronic product development. *Design studies*, 10(3), 155-162.
- [30] Neelamkavil, F. (1987). *Computer simulation and modelling*. John Wiley & Sons, Inc.
- [31] Tichkiewitch, S. (1997). Relecture de l'estampage à la lumière de la mécanique. *Connaissances et savoir-faire en entreprise, Edition HERMES, Paris, France*.
- [32] Söderman, M. (1998). *Product representations: understanding the product in the design process*.
- [33] Won, P. H. (2001). The comparison between visual thinking using computer and conventional media in the concept generation stages of design. *Automation in construction*, 10(3), 319-325.
- [34] Kadri, A. (2007). *Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits, dans les phases amonts du processus de conception* (Doctoral dissertation, Université d'Angers).
- [35] Porter, T. (1979). *How architects visualize*. Van Nostrand Reinhold Company.
- [36] Wikipedia, <http://fr.wikipedia.org>, 2006.
- [37] Fuchs, P., & Moreau, G. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Presses des MINES.
- [38] Tuikka, T. (2002). *Towards computational instruments for collaborating product concept designers*. University of Oulu.
- [39] Richir, S. (2003). Les technologies de la réalité virtuelle pour la conception de produits. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Angers*.
- [40] Yadroitsev, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2007). Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied surface science*, 253(19), 8064-8069.
- [41] Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., & Smurov, I. (2010). Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12), 1624-1631.
- [42] Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13(2), 89-96.

- [43] Arcam AB : Machines EBM de la société Arcam, 2014. <http://www.arcam.com/technology/products/>.
- [44] EOS GmbH : Fiche technique EOS m 400, avril 2014. [http://www.eos.info/systems\\_solutions/metal/sys-tems\\_equipment/eos\\_m\\_400](http://www.eos.info/systems_solutions/metal/sys-tems_equipment/eos_m_400).
- [45] Lu, W., Lin, F., Han, J., Qi, H., & Yan, N. (2009). Scan strategy in electron beam selective melting. *Tsinghua Science & Technology*, 14, 120-126.
- [46] Kruth, J. P., Vandenbroucke, B., Vaerenbergh, V. J., & Mercelis, P. (2005). Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques.
- [47] Xu, F., Wong, Y. S., & Loh, H. T. (2001). Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(5), 283-296.
- [48] Scaravetti, D., Dubois, P., & Duchamp, R. (2008). Qualification of rapid prototyping tools: proposition of a procedure and a test part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(7), 683-690.
- [49] Castillo, L. (2005). Study about the rapid manufacturing of complex parts of stainless steel and titanium. *TNO report with the collaboration of AIMME*.
- [50] Ahn, D., Kim, H., & Lee, S. (2009). Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing. *Journal of materials processing technology*, 209(2), 664-671.
- [51] Kumar, S., & Kruth, J. P. (2007). Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts. *Materials & design*, 28(2), 400-407.
- [52] Kim, D. S., Bae, S. W., & Choi, K. H. (2007). Development of industrial SFF system using dual laser and optimal process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6), 659-666.
- [53] Kim, H. C., Choi, K. H., Doh, Y. H., & Kim, D. S. (2009). Fabrication of parts and their evaluation using a dual laser in the solid freeform fabrication system. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10), 4857-4866.
- [54] Christian, K. D., & German, R. M. (1995). Relation between pore structure and fatigue behavior in sintered iron-copper-carbon. *International journal of powder metallurgy*, 31(1), 51-61.
- [55] Gerard, D. A., & Koss, D. A. (1990). Low cycle fatigue crack initiation: modeling the effect of porosity. *International journal of powder metallurgy*, 26(4), 337-343.
- [56] Murr, L. E., Esquivel, E. V., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Martinez, E. Y., ... & Stafford, S. W. (2009). Microstructures and mechanical properties of electron

beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V. *Materials characterization*, 60(2), 96-105.

[57] Jarratt, T. A., Eckert, C. M., Caldwell, N. H., & Clarkson, P. J. (2011). Engineering change: an overview and perspective on the literature. *Research in engineering design*, 22(2), 103-124.

[58] Suh, N. P. (2001). *Axiomatic design: Advances and applications (the oxford series on advanced manufacturing)*.

[59] Lonchamp, P. (2004). *Co-évolution et processus de conception intégrée de produits: Modèle et support de l'activité de conception* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).

[60] Maher, M., & Tang, H. H. (2003). Co-evolution as a computational and cognitive model of design. *Research in Engineering Design*, 14(1), 47-64.

[61] Wohlers, Terry. Wohlers report 2015. Wohlers Associates, Inc, 2015.

[62] Wohlers, Terry. Wohlers report 2017. Wohlers Associates, Inc, 2017.

[63] Walden, D. D., Roedler, G. J., Forsberg, K., Hamelin, R. D., & Shortell, T. M. (Eds.). (2015). *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*. Wiley.

[64] Cross, N. (1993). Science and design methodology: a review. *Research in engineering design*, 5(2), 63-69.

[65] Fulcher, A. J., & Hills, P. (1996). Towards a strategic framework for design research. *Journal of Engineering Design*, 7(2), 183-193.

[66] Reich, Y. (1995). The study of design research methodology. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 117(2), 211-214.

[67] Blessing, L. T., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology*. Springer Science & Business Media.

[68] Blessing, L. (2003). What is this thing called design research?. In *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*.

[69] Blessing, L. (2003), Future issues in design research, In *Lindemann U (ed) Human behavior in design: Individuals, Teams, Tools, Springer Verlag, Heidelberg*, pp 298-303

[70] Blessing LTM, Chakrabarti A., 2002, DRM: a design research methodology, In *Les sciences de la conception, l'enjeu scientifique du 21eme siècle en hommage à Herbert Simon, Ed J. Perrin, Lyon, France*

- [71] Kannan, T. Design for additive manufacturing. *Jul-2013.(Online). Available: [http://geometricglobal.com/wp-content/uploads/2013/11/Geometric\\_Whitepaper-Additive-Manufacturing\\_July-2013.pdf](http://geometricglobal.com/wp-content/uploads/2013/11/Geometric_Whitepaper-Additive-Manufacturing_July-2013.pdf). pdf.(Accessed: 27-Apr-2016).*
- [72] Daniel, T. (2007). *The development of design rules for selective laser melting* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, University of Wales Institute, Cardiff, UK).
- [73] Tomlin, M., & Meyer, J. (2011). Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. In *Proceeding of the 7th Altair CAE technology conference* (pp. 1-9).
- [74] Ponche, R. (2013). *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN)).
- [75] Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Designing for additive manufacturing. *Procedia CirP*, 3, 632-637.
- [76] Vayre, B. (2014). *Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [77] Prudhomme, G., Pourroy, F., & Lund, K. (2007). An empirical study of engineering knowledge dynamics in a design situation. *Journal of Design Research*, 6(3), 333-358.
- [78] <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/prototype/64610>
- [79] <http://www.notrefamille.com/dictionnaire/definition/prototype/>
- [80] <http://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/>
- [81] OCDE, 1993, alinéa 115, p. 46
- [82] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Maquette>
- [83] Choi, S. H., & Chan, A. M. M. (2004). A virtual prototyping system for rapid product development. *Computer-Aided Design*, 36(5), 401-412.
- [84] Rooks, B. (1998). A shorter product development time with digital mock-up. *Assembly automation*, 18(1), 34-38.
- [85] Zorriassatine, F., Wykes, C., Parkin, R., & Gindy, N. (2003). A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, 217(4), 513-530.
- [86] Bullinger, H. J., Warschat, J., & Fischer, D. (2000). Rapid product development—an overview. *Computers in industry*, 42(2), 99-108.

- [87] Vandeveldel, A., Van Dierdonck, R., & Clarysse, B. (2002). The role of physical prototyping in the product development process. *Vlerick Leuven Gent Management School Working Paper Series*, 7.
- [88] Bordegoni, M., Cugini, U., Caruso, G., & Polistina, S. (2009). Mixed prototyping for product assessment: a reference framework. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 3(3), 177-187.
- [89] Schank, R. C., Abelson, R. P., & Scripts, P. (1977). *Goals and Understanding*. Erlbaum. Hillsdale, New Jersey, US, ISBN: 0-470-99033-3.
- [90] Schank, R. C. (1983). *Dynamic memory: A theory of reminding and learning in computers and people*. Cambridge university press.
- [91] Hammond, K. J. (2012). *Case-based planning: Viewing planning as a memory task*. Elsevier.
- [92] Riesbeck, C. K., & Schank, R. C. (2013). *Inside case-based reasoning*. Psychology Press.
- [93] Aamodt, A., & Plaza, E. (1994). Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI communications*, 7(1), 39-59.
- [94] Mille, A. (1995). Raisonement basé sur l'expérience pour coopérer à la prise de décision. *Un nouveau paradigme en supervision industrielle, Thèse de doctorat de l'université Jean Monnet, Saint-Etienne, Décembre*.
- [95] Watson, I. (1998). *Applying case-based reasoning: techniques for enterprise systems*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [96] Rasovska, I. (2006). *Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas: Application au diagnostic dans une plateforme d'e-maintenance* (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté).
- [97] Aha, D. W. (1998). The omnipresence of case-based reasoning in science and application. *Knowledge-based systems*, 11(5), 261-273.
- [98] Bergmann, R., Kolodner, J., & Plaza, E. (2005). Representation in case-based reasoning. *The Knowledge Engineering Review*, 20(3), 209-213.
- [99] Ho, C., & Mathew, J. (2008, June). Case-Based Reasoning System for Forging Process Design. In *Innovative Computing Information and Control, 2008. ICICIC'08. 3rd International Conference on* (pp. 45-45). IEEE.
- [100] Rodrigues, L., Antunes, B., Gomes, P., Santos, A., Barbeira, J., & Carvalho, R. (2007). Using textual CBR for e-learning content categorization and retrieval. In *Proceedings of International Conference on Case-Based Reasoning*.

- [101] Price, C. J., & Pegler, I. S. (1995, January). Deciding parameter values with case-based reasoning. In *UK Workshop on Case-Based Reasoning* (pp. 119-133). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [102] Heider, R. (1996). Troubleshooting CFM 56-3 engines for the Boeing 737 using CBR and data-mining. *Advances in Case-Based Reasoning*, 512-518.
- [103] Mendel, J. M. (1995). Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 83(3), 345-377.
- [104] Slonim, T. Y., & Schneider, M. (2001). Design issues in fuzzy case-based reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*, 117(2), 251-267.
- [105] Voskoglou, M. G. (2009, August). Fuzzy sets in case-based reasoning. In *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009. FSKD'09. Sixth International Conference on* (Vol. 6, pp. 252-256). IEEE.

