



HAL
open science

Conception pour la fabrication additive : approche méthodologique pour les systèmes mécaniques multicorps

Myriam Orquéra

► **To cite this version:**

Myriam Orquéra. Conception pour la fabrication additive : approche méthodologique pour les systèmes mécaniques multicorps. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Toulon, 2019. Français. NNT : 2019TOUL0018 . tel-02895646

HAL Id: tel-02895646

<https://theses.hal.science/tel-02895646v1>

Submitted on 10 Jul 2020

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

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

ÉCOLE DOCTORALE

Laboratoire Conception de Systèmes Mécaniques et Robotiques
COSMER
(E.A. 7398)

THÈSE

présentée par :

Myriam Orquéra

soutenue le : **9 décembre 2019**

pour obtenir le grade de Docteur en Mécanique

Spécialité : MECANIQUE

Conception pour la fabrication additive
*Approche méthodologique pour les systèmes
mécaniques multicorps*

THÈSE dirigée par :

M. MILLET Dominique Professeur, Université de Toulon

THÈSE co-encadrée par :

M. CAMPOCASSO Sébastien Maître de conférences, Université de Toulon

JURY :

M. BERNARD Alain **Président, Rapporteur**

Professeur des Universités, École Centrale de Nantes

M. SEGONDS Frédéric **Rapporteur**

Maître de Conférences HDR, Arts et Métiers Sciences et Technologies, LCPI, HESAM Université,
Paris

M. VILLENEUVE François **Examineur**

Professeur des Universités, Université de Grenoble Alpes

M. MERMOZ Emmanuel **Examineur**

Docteur HDR, Airbus Helicopters

*Pour mon amour, qui a toujours fait pétiller ma vie,
qui a toujours su me pousser vers de nouvelles aventures.*

*Pour mon fils, ce rayon de soleil
qui me donne joie et force de vivre.*

« El saber no ocupa plaza »
Citation de la grand-mère de ma grand-mère :
« Le savoir n'occupe pas de place »

Remerciements

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les membres du jury de thèse pour m'honorer de leur présence. Je souhaite remercier tout particulièrement Alain Bernard et Frédéric Segonds d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire. Merci à François Villeneuve ainsi qu'à Emmanuel Mermoz d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

J'adresse mes plus sincères remerciements à l'Université de Toulon ainsi qu'au directeur de SeaTech qui m'ont accordé un aménagement de service, me permettant d'améliorer mes conditions de travail pendant toute la durée de cette thèse.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse Dominique Millet pour sa sage folie de m'avoir fait confiance tout au long de cette thèse et pour ses conseils. Cette thèse nous a permis de tisser des liens professionnels et amicaux très appréciables pour travailler ensemble. Merci aussi d'avoir ouvert un module d'enseignement sur la fabrication additive, dans lequel je me régale à enseigner tout ce que j'ai découvert pendant cette thèse.

Mille mercis à Sébastien Campocasso, co-encadrant de cette thèse. Sa lucidité, son ambition, tous ses conseils, et son aiguillage ont été pour moi bénéfiques et plus enrichissants qu'il ne peut le penser. Je souhaite à tous les thésards d'avoir un encadrant aussi constructif et agréable que lui.

Il m'aurait été impossible de réaliser cette thèse dans de bonnes conditions sans l'appui et la collaboration de Sabine Seillier, technicienne de la plateforme MAQ-3D. Je ne suis pas certaine d'avoir suffisamment dit merci pour toutes ses fabrications et nettoyages de pièces. Et c'est toujours un réel plaisir de travailler avec elle.

Lors des comités de thèses, les éclairages académiques d'Olivier Kerbrat et industriels de Benjamin Vayre m'ont été très utiles. Cela m'a permis d'orienter certains axes de recherche au cours de ma thèse et aussi de me conforter dans d'autres. C'est pourquoi, je tiens à les remercier d'avoir accepté de suivre mes travaux pendant ces années.

L'accueil de tous les membres du laboratoire COSMER fut au-delà de mes espérances. Pour tous leurs conseils avisés, leurs sourires, leur soutien (...) un grand merci.

J'ai souvent partagé le travail de cette thèse ou demandé de l'aide à des collègues qui n'ont pas hésité à répondre présents. C'est pourquoi, je souhaite remercier :

- Serge Nicolas, pour toutes ses idées astucieuses et son soutien inconditionnel,
- Daniel Peloux, qui a toujours répondu présent et avec le sourire pour usiner les pièces ainsi que Nicolas Hinden,

- Cédric Anthiérens, mon « co-bureau », pour la programmation LabView, ses conseils et de partager mes joies et mes peines,
- Sofiane Meradji, pour m'avoir permise de lancer les innombrables calculs d'optimisation sur le cluster du laboratoire IMATH,
- Ingrid Descarega, prêtresse des emplois du temps, à qui j'ai tellement demandé de modifications, d'aménagements...
- Tous les autres collègues que je ne peux citer de crainte de faire doubler le volume de ce mémoire.

Merci à tous les étudiants qui ont participé aux projets, et à tous les autres qui m'écoutent avec patience.

Enfin, un réel et énorme merci à ma grande et petite famille ainsi qu'à mes amis. Je vais enfin pouvoir être plus présente auprès de vous, vous qui m'avez tant soutenue et épaulée, vous que j'aime tant.

Sommaire

Remerciements	v
Sommaire	vii
Lexique	ix
Index des figures	xi
Index des tableaux	xvii
I. Introduction	1
I.1. Contexte général de la fabrication additive	2
I.2. Contexte de la thèse	4
I.3. Champ d'étude de la thèse	5
I.4. Originalité et apport de la thèse	6
I.5. Organisation du mémoire	7
II. Bibliographie et problématique	9
II.1. Introduction	10
II.2. De la liberté de forme aux optimisations	11
II.3. De la liberté de forme au choix des pièces et du procédé de FA	33
II.4. De la liberté de forme aux méthodes de conception	47
II.5. De la liberté de forme aux verrous scientifiques	61
II.6. Conclusion et stratégie de recherche	63
III. Optimisations pour la conception d'un système mécanique à réaliser par fabrication additive	65
III.1. Introduction	66
III.2. Les différents types d'optimisation	66
III.3. Optimisation topologique d'un système mécanique, le nouveau paradigme	83
III.4. Conclusion sur les trois familles d'optimisation	105
IV. Méthodologie de conception de systèmes mécaniques multicorps pour la fabrication additive	107
IV.1. Introduction et ambitions de la méthodologie	108
IV.2. Présentation de la méthodologie proposée	108
IV.3. La méthodologie pas à pas	117

IV.4. Essais sur le cas d'étude	137
IV.5. Conclusion	146
V. Conclusions générales et perspectives	149
V.1. Les apports de la thèse	150
V.2. Les perspectives de recherche	150
V.3. Autour de cette thèse	153
V.4. Publications et communications	154
VI. Références	157
VII. Annexes	169
VII.1. Comportement mécanique de l'étude de cas « Poignet de robot »	170
VII.2. Etude de cas « Moteur à air »	171
PhD abstract	185
Résumé de la thèse	186

Lexique

Abréviations	Signification
BJ (Binder Jetting)	Projection de liant
CLAD (Construction Laser Additive Direct)	Dépôt de matière sous énergie concentrée par laser
DED (Direct Energy Deposition)	Dépôt sous énergie concentrée
DfAM (Design for Additive Manufacturing)	Conception pour la fabrication additive
EBM (Electron Beam Melting)	Faisceau d'électrons sur lit de poudre métallique
EC	Espace de conception
ENC	Espace de non conception
FDM (Fused Deposition Modeling)	Extrusion de matière
FGM (Functional Gradient Material)	Matériau à gradient
FIR (Functional Improvement Rate)	Taux d'amélioration de fonctions
LBM (Laser Beam Melting)	Fusion laser sur lit de poudre métallique
LMD (Laser Metal Deposition)	Dépôt de matière sous énergie concentrée
LOM (Laminated Object Manufacturing)	Stratification de couches
MJ (Material Jetting)	Projection de matière
OBOT	Organigramme des Boucles de l'Optimisation Topologique
OT	Optimisation topologique
PolyJet	Projection de matière
SLA ou SL (StéréoLithographie Apparatus)	Photo-polymérisation en cuve
SLS ou LS ((Selective) Laser Sintering)	Fusion laser sur lit de poudre plastique
STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data)	Format STEP
TOMS (Topological Optimization of a Mechanical System)	Méthode d'optimisation topologique de système mécanique
WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)	Dépôt de matière sous énergie concentrée

Index des figures

Figure 1. Caricature montrant la différence entre un procédé de fabrication par enlèvement de matière et un par ajout. Support du concours « Ma thèse en 180s » de M. Orquéra. Dessin : Amélie Darnis _____	2
Figure 2. Différence entre usinage et fabrication additive. Source: Renishaw.com _____	3
Figure 3. (a) Mise en situation de la charnière de capot ; (b) Charnière réalisée par procédé traditionnel ; (c) Charnière réalisée par fabrication additive. (EDAG_Engineering, 2018) _____	3
Figure 4. (a) Panneau de fuselage de 1m ² de superficie réalisé en 2018 par le procédé WAAM. Source : STELIA aerospace ; (b) Nano-structure fabriqué par le procédé de FA lithophanie à deux photons (Vyatskikh et al., 2018) _____	3
Figure 5. Les sept procédés de fabrication additive (Dilberoglu et al., 2017) _____	4
Figure 6. Comparaison entre une pièce réalisée par procédé conventionnel (usinage) et par le procédé CLAD (Frechard, 2015) _____	5
Figure 7. Evolution du nombre de publications sous Google Scholar. Les mots clefs sont pour la courbe rouge : additive manufacturing, additive manufactured, additively manufactured, 3D Printing; pour la courbe verte : design for additive manufacturing, topological optimization, DfAM et topology optimization. _____	6
Figure 8. Influence du paramètre p sur la pénalisation de la densité _____	14
Figure 9. Influence du facteur de pénalisation p sur l'effet damier (Bendsøe & Sigmund, 1999) _____	14
Figure 10. Processus d'optimisation topologique à l'aide du logiciel Optistruct de la société ALTAIR. Support d'étude : poutre encastree-libre (espace de conception en vert et de non conception en rouge). Objectif : Minimisation de la masse avec contrainte de déplacement vertical _____	15
Figure 11. Dépendance au raffinement du maillage (Bendsøe & Sigmund, 2003) _____	16
Figure 12. (a) Conception sous CAO; (b) Destruction de la pièce lors du post-traitement par usinage. Adapté de (Doutre, 2015; Hoang et al., 2015) _____	16
Figure 13. Influence des paramètres sur le résultat d'optimisation topologique. (a) Cas de charge ; (b) Espace de conception et de non conception ; (c) MinMember et MaxMember non sélectionnés ; (d) MinMember imposé à 12 mm et MaxMember non sélectionné ; (e) MinMember imposé à 3 mm et MaxMember imposé à 12 mm. (Morretton et al., 2017) _____	17
Figure 14. Les étapes itératives de l'optimisation topologique (Zhou et al., 2004) _____	18
Figure 15. Structures du matériau composite réalisant les propriétés du matériau du modèle SIMP pour p=3 (Bendsøe & Sigmund, 1999) _____	19
Figure 16. (a) Résultat de l'optimisation SIMP d'une poutre cantilever non pénalisée ; (b) Lien entre la densité et la fraction de volume dans une cellule lattice ; (c) Intégration de cellules lattice variables dans le résultat d'optimisation. (Brackett et al., n.d.) _____	19
Figure 17. (a) Résultat de la topologie en fonction du seuil de densité choisi; (b) Courbe de la compliance en fonction du seuil de la densité choisi (Hsu & Hsu, 2005) _____	20
Figure 18. Etapes de l'optimisation à la reconception _____	21

Figure 19. Etapes de reconception d'une pièce optimisée. (a) Résultat de l'optimisation (seuil de densité : 0,1) ; (b) Export du résultat en format STL et reconception avec l'outil PolyNurbs d'Inspire ; (c) Pièce finie	21
Figure 20. (a) Bras articulé non assemblé (Cali et al., 2012) ; (a') Engrenage direct (Calignano et al., 2014); (b) Roue dentée conçue par bio-mimétisme (Kamps et al., 2017); (c) Matériau lattice dit « le plus léger au monde ». Source : http://www.boeing.com ; (d) Surface poreuse pour implant orthopédique (Sing et al., 2016); (e) Outillage de moule et canaux internes de refroidissement. Source: Renishaw.com ; (f) Coupe d'un échangeur thermique. Source: Polyshape ; (g) Figurine équilibrée statiquement (Prévost et al., 2013); (h) Implant de crane. Source: Poly-Shape/OBL; (i) Structure lattice à gradient (Sun et al., 2016); (j) Optimisation topologique d'une poutre en bi-matière (Gaynor et al., 2014) ; (k) Carte électronique. Source: nano-di.com; (l) Pièces à matériau auxétique proposés par (Ou et al., 2018), appelés KinetiX; (m) Impression 4D avant et après la chauffe (Teoh et al., 2016)	24
Figure 21. Exemple industriel: Fixation d'un rotor de drone. Source : MBProto	25
Figure 22. Concept de culasse de F1 réalisée sous LBM (Inovar Communications Ltd, 2016)	27
Figure 23. (a) Structure de tenségrité ; (b) Détail du nœud de fixation ; (c) Comparaison entre la pièce conventionnelle, la pièce topologiquement optimisée et la pièce topologiquement optimisée et ayant reçu les modifications de fixation. (Ren & Galjaard, 2015)	28
Figure 24. Comparaison du coût de la complexité de surface entre la FA et les procédés traditionnels (Conner et al., 2014)	28
Figure 25. Raisons proposées lors d'un sondage auprès de 88 industriels pour leur choix de la FA (Niaki et al., 2019)	34
Figure 26. Choix du procédé en fonction des exigences fonctionnelles. Source : www.core77.com	38
Figure 27. Diagramme d'Ishikawa pour le procédé LBM (Berglund et al., 2019)	40
Figure 28. Défaut de réalisation d'une surface en surplomb réalisée par FDM sans support (Leary et al., 2014)	41
Figure 29. (a) Effet escalier (Pandey et al., 2007); (b) Impact de l'orientation de l'impression sur la rugosité pour le procédé LBM adapté de (Strano et al., 2013b)	42
Figure 30. (a) Réalisation d'une pièce de 6 mètres de long par procédé WAAM. Source : WAAMAT Cranfield; (b) Capacités dimensionnelles de quelques machines (Breteau et al., 2015)	43
Figure 31. (a) Qualité des intervalles de tolérance (IT) et position de l'IT (DIN EN ISO 286-1) pour la FDM ; (b) Comparaison des IT entre les procédés de fabrication conventionnels et trois procédés de FA (Lieneke et al., 2015, 2016)	43
Figure 32. Les domaines interagissant avec la conception pour la FA	48
Figure 33. Comparaison entre la pièce obtenue par optimisation topologique (à gauche) et la pièce ayant subi en plus des modifications suivant les règles de tracé adaptées au procédé LBM pour diminuer les supports et le post traitement (à droite). (Saunders, 2017b)	49
Figure 34. Extrait de règles de tracé proposées par (Adam & Zimmer, 2015) pour les formes cylindriques	50

Figure 35. Impact du choix de l'orientation de la pièce sur sa conception l'axe z étant celui du dépôt de matière (Leutenecker-Twelsiek et al., 2016a)	53
Figure 36. Différentes approches pour concevoir une pièce optimisée pour la FA (Lindemann et al., 2015). (a) CAO issue de l'optimisation topologique; (b) Application des règles de conception sans optimisation topologique ; (c) Utilisation des fonctions standards de la CAO sur l'optimisation topologique ;(d) Application des règles de conception, des fonctions standards de la CAO sur l'optimisation topologique	54
Figure 37. (a) Méthodologie DfAM proposée par (Rosen, 2007) ; (b) Méthode axiomatique pour la FA (Salonitis, 2016)	56
Figure 38. Etapes de l'optimisation topologique, avec l'exemple d'une réduction de masse de 75% pour un cube soumis à une charge de compression sur la face supérieure (Walton & Moztarzadeh, 2017)	57
Figure 39. Méthodologie de conception d'une pièce proposée par (Kumke et al., 2016)	59
Figure 40. Version initiale de la perforatrice. Etude de cas: « la perforatrice »	67
Figure 41. Ordre des optimisations en fonction des entrées utiles	67
Figure 42. Schéma bloc de l'optimisation architecturale	69
Figure 43. Sous étapes de l'optimisation architecturale	69
Figure 44. Diagramme des interacteurs de l'étude de cas en phase d'utilisation de la « perforatrice »	71
Figure 45. Différentes positions des liaisons et configurations pour le cas d'étude « perforatrice »	72
Figure 46. Les formes traditionnelles en gris et les surfaces fonctionnelles en orange du (a) carter et du (b) poinçon de la « perforatrice »	72
Figure 47. Différentes orientations de fabrication possibles pour le carter du cas d'étude « perforatrice »	73
Figure 48. Schéma bloc de l'optimisation fonctionnelle	75
Figure 49. Sous étapes de l'optimisation fonctionnelle	76
Figure 50. Graphe des liaisons (en violet) et du flux de puissance (en rouge) de l'étude de cas « la perforatrice »	78
Figure 51. (a) Résumé des améliorations sur le poinçon ; (b) Modifications des surfaces fonctionnelles. Etude de cas « la perforatrice »	79
Figure 52. (a) Espaces de non conception du carter visible sur le carter traditionnel ; (b) Espace de conception en vert transparent avec les espaces de non conception. Etude de cas « la perforatrice »	80
Figure 53. Schéma bloc de l'optimisation topologique	81
Figure 54. Sous étapes de l'optimisation topologique	81
Figure 55. Quelques étapes lors de l'optimisation topologique du carter de la « Perforatrice ». (a) Maillage des volumes ; (b) Choix du seuil de densité ; (c) Vérification du comportement du résultat non re-conçu. Etude de cas « la perforatrice » sous la suite HyperWorks	82
Figure 56. (a) Reconception du carter ; (b) Reconception du poinçon ; (c) Assemblage fini de la « perforatrice »	83

Figure 57. (a) Charnière obtenue par procédés conventionnels ; (b) les différentes étapes de l'optimisation ; (c) comparaison entre la charnière optimisée et la conventionnelle. (Tomlin & Meyer, 2011)	83
Figure 58. Influence de l'optimisation topologique d'une pièce dans un système mécanique. Source du piston optimisé : Solidthinking.com	84
Figure 59. Prise en compte de l'impact des pièces optimisées pour l'optimisation du mécanisme	85
Figure 60. Schéma bloc de l'optimisation topologique d'un produit mécanique (TOMS)	86
Figure 61. Sous étapes de l'optimisation topologique d'un produit mécanique	86
Figure 62. Organigramme de la boucle d'optimisation topologique pour l'optimisation d'un produit mécanique (OBOT)	89
Figure 63. Impact du choix des espaces de conception sur la seconde boucle d'optimisation	90
Figure 64. Etude de cas : « poignet de robot » (Bône et al., 1984)	91
Figure 65. (a) Poignet de robot sous CAO ; (b) Support ; (c) Bras ; (d) Outil. Les espaces de conception sont en vert et ceux de non conception en orange	92
Figure 66. Conditions aux limites de l'étude de cas « poignet de Robot »	92
Figure 67. (a) Ordre d'optimisation des classes d'équivalences pour le chemin 1 ; (b) Détail de l'application de l'OBOT suivant le chemin 1 sur le cas d'étude « poignet de robot »	94
Figure 68. Comparaison de résultats en fonction du choix de l'espace de conception sur le « poignet de robot »	95
Figure 69. Résultats de la répartition des densités et de la reconception sous CAO pour le chemin 1. Etude de cas « poignet de robot »	96
Figure 70. (a) Ordre d'optimisation des classes d'équivalences pour le chemin 2 ; (b) Détail de l'application de l'OBOT suivant le chemin 2 sur le cas d'étude « poignet de robot »	97
Figure 71. Résultats de la répartition des densités et de la reconception sous CAO pour le chemin 2. Etude de cas « poignet de robot »	97
Figure 72. (a) Optimisation simultanée des classes d'équivalences pour le chemin 3 ; (b) Détail de l'application de l'OBOT suivant le chemin 3 sur le cas d'étude « poignet de robot »	98
Figure 73. Comparaisons du temps de calcul logiciel pour les trois chemins d'optimisation pour le « poignet de robot »	99
Figure 74. Résultats de la répartition des densités et de la reconception sous CAO pour le chemin 3. Etude de cas « poignet de robot »	99
Figure 75. Graphe de l'évolution de la masse totale et du rapport R_{CM} du « poignet de robot » en fonction du nombre de boucles pour le chemin 3	101
Figure 76. Chemins dérivés pour optimiser le produit « poignet de robot »	101
Figure 77. Reconception du poignet de robot suite aux trois chemins d'optimisation	102
Figure 78. Etapes de conception usuelles illustrées par l'étude de (Seabra et al., 2016)	109
Figure 79. Méthodologie de conception d'un système mécanique pour la fabrication additive	110
Figure 80. Détails des sous-étapes de la méthodologie de conception d'un produit mécanique pour la fabrication additive	111
Figure 81. Phases : d'admission (a), point mort (b), d'échappement (c) du moteur E_c . Schéma cinématique (d). Etude de cas « moteur à air »	118

Figure 82. Les optimisations permettant d'obtenir les différents moteurs. Etude de cas « moteur à air » _____	118
Figure 83. (a) Placement des liaisons et surfaces fonctionnelles des moteurs Ec, Eam1 et Eam2 ; (b) Placement architecturalement optimisé des liaisons et surfaces fonctionnelles du moteur Eam3. Etude de cas « moteur à air » _____	122
Figure 84. Graphe de liaisons / du flux d'énergie / de la transmission de puissance du « moteur à air » _____	124
Figure 85. Amélioration de la liaison pivot entre l'arbre moteur et le carter par palier hydrostatique (Orquéra et al., 2017) _____	125
Figure 86. (a) Espace de conception (gris transparent) et de non conception (gris non transparent) permettant de diminuer les pertes de charge dans la chemise ; (b) Agrandissement de l'admission pour réaliser une avance à l'admission. Etude de cas « moteur à air » _____	126
Figure 87. Demi-coupe d'un piston pour l'exemple de solution d'augmentation de l'étanchéité entre le piston et la chemise (Orquéra et al., 2017). Etude de cas « moteur à air » _____	128
Figure 88. Espaces de conception (en gris) et de non conception (en orange). Pour le moteur Eam1 : (a) le carter, (d) la chemise, (f) le piston. Pour le moteur Eam2 : (b) le carter, (e) la chemise, (g) le piston. Pour le moteur Eam3 : (c) le carter, (e) la chemise, (h) le piston. Etude de cas « moteur à air » _____	129
Figure 89. Résultats de la mise en volume des carters des « moteurs à air » _____	133
Figure 90. Les assemblages des moteurs. De gauche à droite : le moteur Ec, Eam1, Eam2 puis Eam3 _____	133
Figure 91. Plateau de fabrication de la Connex Objet 350 de Statasys avec les pièces du moteur Eam3 emplies de support. Etude de cas « moteur à air » _____	135
Figure 92. Vérification de la tenue mécanique en phase de fonctionnement du piston Eam1 par éléments finis pour l'étude de cas « moteur à air » _____	136
Figure 93. Contraintes de Von Mises à la première fréquence propre des carters (a) Ec, (b) Eam1, (c) Eam2, (d) Eam3. Etude de cas « moteur à air » _____	136
Figure 94. Les quatre moteurs fabriqués et assemblés en position d'admission. (a) Ec, (b) Eam1, (c) Eam2, (d) Eam3. Etude de cas « moteur à air » _____	137
Figure 95. Schéma bloc du banc d'essais pour la mesure de la vitesse des « moteurs à air » _____	138
Figure 96. Schéma bloc du banc d'essais pour la mesure de l'autonomie des « moteurs à air » _____	138
Figure 97. Mise en place des essais de mesure d'autonomie des « moteurs à air » _____	139
Figure 98. Schéma bloc du banc d'essais pour la mesure de la puissance des « moteurs à air » _____	139
Figure 99. Mise en place des essais pour la mesure de la puissance des « moteurs à air » _____	140
Figure 100. Analyse de la mesure de la vitesse du moteur Eam1 pour une pression de 0,5 bar _____	141
Figure 101. Allure de l'autonomie du moteur Eam1 pour une pression de 0,5 bar _____	142
Figure 102. Courbes des vitesses de rotation de sortie en fonction de la pression d'entrée des « moteurs à air » _____	143
Figure 103. Courbes de l'autonomie de sortie en fonction de la pression d'entrée des « moteurs à air » _____	144

Figure 104. Courbes de la puissance de sortie en fonction de la pression d'entrée des « moteurs à air » _____	145
Figure 105. Courbes comparatives du FIR des « moteurs à air » _____	147
Figure 106. Exemple de système à architecture complexe: Scie sauteuse _____	151
Figure 107. Différents contextes de conception. (a) http://www.lemarin.fr/etiquettes/navire-du-futur ;	
(b) https://fr.wikipedia.org/ ;	
(c) http://www.maxisciences.com/	(d)
http://www.hobbydownloads.com/ ;	(e)
https://en.wikipedia.org/wiki/Swing_Bridge,_River_Tyne _____	152
Figure 108. (a) Projet d'optimisation d'un système bielle manivelle réalisé par les étudiants de l'école d'ingénieurs SeaTech en appliquant la méthode TOMS pour la LBM ; (b) Travaux de conception optimisée d'un décapsuleur à réaliser par FA _____	154
Figure 109. Analyse fonctionnelle lors de la phase d'utilisation du « moteur à air » _____	171
Figure 110. Schéma cinématique et paramétrage du cas d'étude « moteur à air » _____	172
Figure 111. Connectique d'admission pneumatique. Etude de cas « moteur à air » _____	173
Figure 112. Insert taraudé. Etude de cas « moteur à air » _____	173
Figure 113. Encodeur optique. Etude de cas « moteur à air » _____	173
Figure 114. Chaines de cotes pour la longueur de guidage de la chemise au point mort haut (à gauche), au point mort bas (à droite) _____	174
Figure 115. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Ec de l'étude de cas « moteur à air » _____	176
Figure 116. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Eam1 de l'étude de cas « moteur à air » _____	176
Figure 117. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Eam2 de l'étude de cas « moteur à air » _____	177
Figure 118. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Eam3 de l'étude de cas « moteur à air » _____	177
Figure 119. Protocole de mesure de la vitesse de sortie du moteur à air en fonction de la pression d'entrée _____	178
Figure 120. Protocole de mesure de l'autonomie du moteur à air en fonction de la pression d'entrée _____	179
Figure 121. Protocole de mesure de la puissance du moteur à air en fonction de la pression d'entrée _____	180
Figure 122. Orientation de fabrication des éprouvettes sur le plateau de la Connex Objet 350 _____	181
Figure 123. Images des profils de rupture pour une éprouvette imprimée (a) à 45° (b) horizontalement (c) verticalement _____	182
Figure 124. Mesure des diamètres de la jupe du piston pour le sens de fabrication 1 _____	182
Figure 125. Mesure des diamètres de la jupe du piston pour le sens de fabrication 2 _____	183
Figure 126. Mesure des diamètres de la jupe du piston pour le sens de fabrication 3 _____	183

Index des tableaux

Tableau 1. Quelques chiffres clés sur les marchés à l'échelle mondiale dédiée à la fabrication additive de différents secteurs industriels. (PIPAME, 2017b) _____	2
Tableau 2. Avantages et inconvénients de différents types de méthodes d'optimisation topologique (Y. Tang & Zhao, 2016) _____	12
Tableau 3. Classement d'articles scientifiques sur l'optimisation topologique en fabrication additive _____	22
Tableau 4. Classement d'articles scientifiques sur les champs de possibilités de la fabrication additive _____	32
Tableau 5. Seuil de rentabilité de certains procédés de FA par rapport à des procédés conventionnels (Gebler et al., 2014) _____	36
Tableau 6. Liste des tolérances réalisables pour les procédés conventionnels et ceux de FA (uz Zaman et al., 2017) _____	38
Tableau 7. Les défauts géométriques classiques en FA _____	41
Tableau 8. Contribution relative du coût d'achat de machines AM au coût total du produit (Thompson et al., 2016) _____	44
Tableau 9. Classement des articles scientifiques sur la prise en charge des défauts et sur l'impact environnemental en fonction des procédés de fabrication étudiés _____	46
Tableau 10. Définitions concernant le domaine de la conception pour la FA _____	48
Tableau 11. Références sur les règles de tracé pour la FA classées par procédé _____	51
Tableau 12. Classement d'articles scientifiques sur les différentes méthodes de conception pour la fabrication additive en fonction du procédé _____	60
Tableau 13. Classement des procédés ayant la capacité de réaliser le cas d'étude _____	73
Tableau 14. Exemple de classement des orientations de l'étude de cas en fonction des différents critères. _____	74
Tableau 15. Gain de l'application des trois optimisations sur le cas d'étude « la perforatrice »	83
Tableau 16. Evaluation de l'influence des masses et inerties de chacune des pièces du « poignet de robot » _____	93
Tableau 17. Nombre d'équations impactées par les caractéristiques des pièces du « poignet de robot » _____	94
Tableau 18. Résultats de l'application de l'OBOT suivant le chemin 1 _____	95
Tableau 19. Résultats de l'application de l'OBOT suivant le chemin 2 _____	97
Tableau 20. Résultats de l'application de l'OBOT suivant le chemin 3 _____	100
Tableau 21. Influence du coefficient de convergence sur le chemin 3 _____	100
Tableau 22. Résultats de chaque chemin et comparaison avec une seule boucle d'optimisation sur le cas d'étude « poignet de robot » _____	102
Tableau 23. Classement des chemins en fonction des objectifs du concepteur _____	103
Tableau 24. Résultat de l'optimisation TOMS du « moteur à air » _____	131
Tableau 25. Détails et résultats de l'optimisation TOMS du « moteur à air » _____	131
Tableau 26. Résultats des masses des composants des « moteurs à air » _____	134

Tableau 27. Gain en pourcentage sur les masses, volumes et inerties des « moteurs à air »	134
Tableau 28. Estimation des coûts et des gains de coût matière pour l'étude de cas « moteur à air »	134
Tableau 29. Estimation des coûts de fabrication et du temps de production. Quantité matière et temps estimés par le logiciel Objet Studio alloué à la machine de FA Connex 350 pour l'étude de cas « moteur à air »	135
Tableau 30. Analyse modale des carters de l'étude de cas « moteur à air »	136
Tableau 31. Gains obtenus par les moteurs sur la vitesse de rotation pour une pression d'entrée de 3 bars	144
Tableau 32. Gains obtenus par les moteurs sur l'autonomie des « moteurs à air »	145
Tableau 33. Gains obtenus par les moteurs sur la puissance de sortie des « moteurs à air »	145
Tableau 34. Valeur du sens d'amélioration δ pour chacune des caractéristiques de l'étude de cas « moteur à air »	146
Tableau 35. Extrait du tableau des spécificités	172
Tableau 36. Caractéristiques en traction du VeroWhite	181
Tableau 37. Caractéristiques en flexion du VeroWhite	181
Tableau 38. Caractéristiques d'état de surface du VeroWhite. L'impression horizontale a été faite sans support	182

I. Introduction

I.1.	Contexte général de la fabrication additive	2
I.2.	Contexte de la thèse	4
I.3.	Champ d'étude de la thèse	5
I.4.	Originalité et apport de la thèse	6
I.5.	Organisation du mémoire	7

I.1. Contexte général de la fabrication additive

Apparue dans les années 1980 avec le dépôt du brevet de la Stéréolithographie, la fabrication additive (FA) est un procédé qui “produit des objets physiques à partir d’informations numériques, et ce, ligne par ligne, surface par surface, ou couche par couche” (Thompson et al., 2016) comme le caricature la Figure 1.



Figure 1. Caricature montrant la différence entre un procédé de fabrication par enlèvement de matière et un par ajout. Support du concours « Ma thèse en 180s » de M. Orquéra. Dessin : Amélie Darnis

L’arrivée de la fabrication additive est considérée comme une révolution industrielle et touche de nombreux domaines (Attaran, 2017; Bahnini et al., 2018; PIPAME, 2017a) tels que l’alimentaire (Pinna et al., 2016), l’architecture et la construction (Labonnote et al., 2016), l’automobile (Cosma et al., 2018), le médical, l’aérospatial (Han, 2017), le design et la mode, la production (Tableau 1)...

Tableau 1. Quelques chiffres clés sur les marchés à l’échelle mondiale dédiée à la fabrication additive de différents secteurs industriels. (PIPAME, 2017b)

Secteur	Volumes et parts de marché (2014)	Taux de croissance annuel moyen à 5 ans
Aérospatial	0,8 \$Md – 18 %	15-20 %
Production et outillage industriel	0,8 \$Md – 18 %	15-20 %
Santé	0,7 \$Md – 15/17 %	20-25 %
Automobile	0,5 \$Md – 12 %	15-20 %
Joallerie	0,5 \$Md – 12 %	25-30 %
Energie	Moins de 5 %	30-35 %
Autres	Moins de 20 %	20-25 %
TOTAL	4-5 \$Md	25 %

La principale différence entre la FA et la fabrication traditionnelle est la possibilité de placer la matière où on le souhaite. Cela permet :

- de réduire la quantité de matière à enlever par usinage, comme le montre la Figure 2,
- ou encore de réaliser des formes plus complexes que celles obtenues par le moulage ou le forgeage (Figure 3).



Figure 2. Différence entre usinage et fabrication additive. Source: Renishaw.com

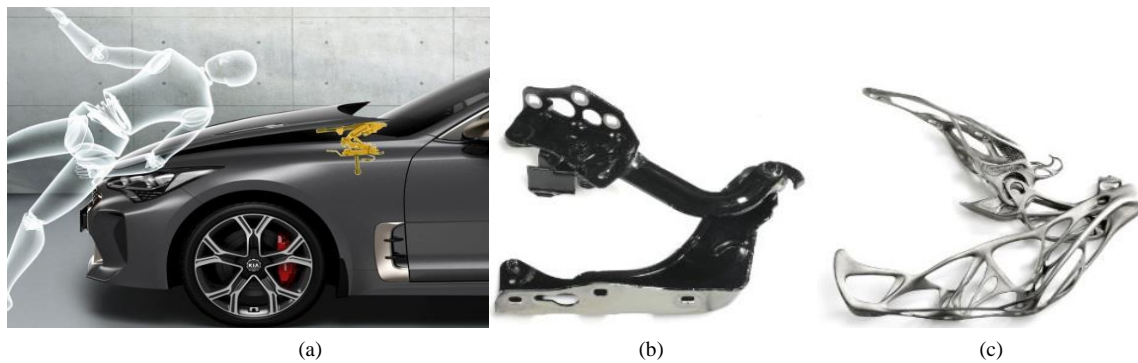


Figure 3. (a) Mise en situation de la charnière de capot ; (b) Charnière réalisée par procédé traditionnel ; (c) Charnière réalisée par fabrication additive. (EDAG_Engineering, 2018)

Depuis le premier brevet de nombreuses technologies de fabrication additive ont vu le jour permettant la réalisation de pièces de différentes envergures (Figure 4), de différents matériaux, de différentes précisions, qualités... Ces nombreuses possibilités poussent les industriels à s'intéresser à ces procédés et rechercher les moyens de les exploiter et de les valider.

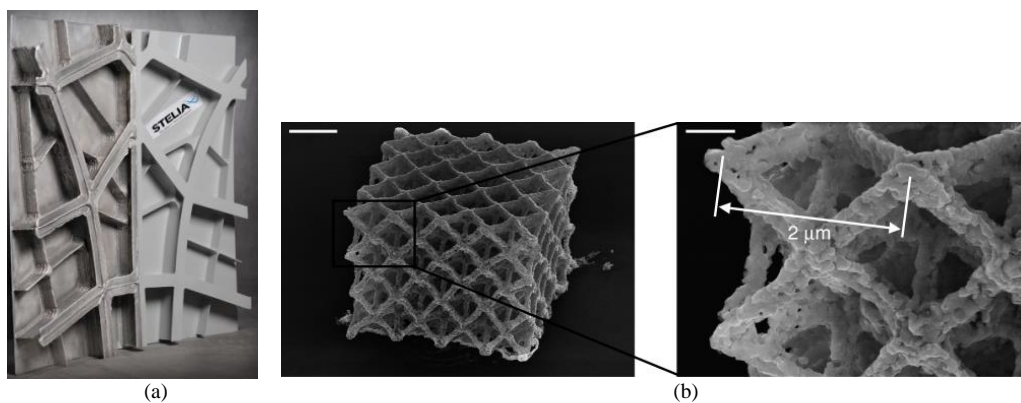


Figure 4. (a) Panneau de fuselage de 1m² de superficie réalisé en 2018 par le procédé WAAM. Source : STELIA aerospace ; (b) Nano-structure fabriqué par le procédé de FA lithographie à deux photons (Vyatskikh et al., 2018)

L'ISO (AFNOR, 2015) et l'ASTM proposent une classification des procédés de FA en sept catégories dont chaque principe est détaillé dans la Figure 5.




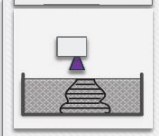
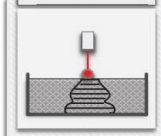
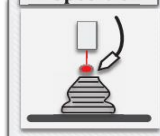

	Extrusion de matière	Photopolymérisation en cuve	Projection de matière	Projection de liant	Fusion sur lit de poudre	Dépôt de matière sous énergie concentrée	Stratification de couches
Scheme							
Process	Layer by layer deposition of molten material	Selective curing of photo-curable material in a liquid container	Material deposition and subsequent curing	Selective dispense of binder for joining powder in a bed	Fusing of powder in a bed by melting the selected region	Direct fusion of the material	Bonding of individual sheets of material
Name	FDM RC MJS SFF	SLA DLP LAMP 2PP	DOD MJ NPJ	BJ	SLS SLM DMLS EBM MJF	LENS EBAM DMT	LOM UC

Figure 5. Les sept procédés de fabrication additive (Dilberoglu et al., 2017)

I.2. Contexte de la thèse

En 2014 une nouvelle école d'ingénieurs appelée SeaTech prend naissance au sein de l'Université de Toulon (UTLN). L'arrivée de cette école, née de la fusion entre les écoles d'ingénieurs ISITV de l'UTLN et de l'antenne de Toulon de SupMéca, a permis la mise en place d'un laboratoire appelé COSMER pour COncEption de Systèmes Mécaniques et Robotiques auquel a été adossé une plateforme de fabrication additive (FA) appelée MAQ-3D intégrant de nouveaux procédés de FA.

Agrégée de mécanique depuis 1999, mon enseignement de prédilection est la conception de produits industriels. Enseignante en IUT Génie Mécanique et Productique, puis à SupMéca et enfin à SeaTech, l'arrivée de la fabrication additive a attiré mon attention car elle « redéfinit entièrement la façon avec laquelle les industriels conçoivent leurs produits » (PIPAME, 2017a). Que ce soit au sein du laboratoire ou à l'Université de Toulon, aucune thèse n'a jusqu'alors traité de la fabrication additive. Dans un souci de veille technologique, dans un élan de curiosité, une volonté d'entrer dans le monde de la recherche et avec une envie d'améliorer mes compétences dans le domaine, m'engager dans une thèse est apparu comme une réponse à ces attentes.

C'est ainsi que ce doctorat a été réalisé sous le statut de PRAG avec une décharge (d'environ un tiers de mon enseignement) octroyée par l'Université de Toulon.

I.3. Champ d'étude de la thèse

L'émergence des procédés de fabrication additive a bouleversé nos connaissances non seulement en terme de fabrication mais aussi en terme de conception. Les technologies de fabrication par couches ouvrent des possibilités de réalisation de formes très différentes de celles conçues et réalisées par les processus de fabrication traditionnels (tels que l'usinage, la forge ou encore le moulage) comme l'indiquent (L. Barbieri et al., 2019). Toutefois, cette apparente liberté de conception est soumise à de nouvelles contraintes de fabrication telles que celles imposées par les post-traitements. C'est pourquoi les travaux de cette thèse sont orientés sur le thème de la conception pour la fabrication additive et plus particulièrement sur la conception de systèmes mécaniques multicorps.

La conception d'un système mécanique pour la FA fait appel à de nombreuses connaissances et compétences. Dans ce mémoire de nombreux champs de compétences seront cités mais ne seront pas détaillés comme par exemple le bio-mimétisme (du Plessis et al., 2019) ou encore l'étude de l'impact environnemental.

Les conceptions dites lattice (Y. Tang & Zhao, 2014), auxétique (Ou et al., 2018), pour matériaux à gradient (Loh et al., 2018), multi-matériaux (Chu et al., 2019) ou encore la nano-impression (Ivanova et al., 2013) ne seront également pas étudiées. Toutefois, dès que cela peut être utile, et dès que la phase de conception y est propice, les références utiles pour réaliser ce choix de conception seront proposés.

Certaines technologies de FA, telle que le dépôt de matière sous énergie concentrée, peuvent réparer ou ajouter des fonctions à une pièce existante. Cela évite de refaire la pièce ou permet de diminuer la perte de matière et assure un gain de masse comme le montre la Figure 6. Cette particularité de la FA ne sera pas également étudiée dans ce mémoire.

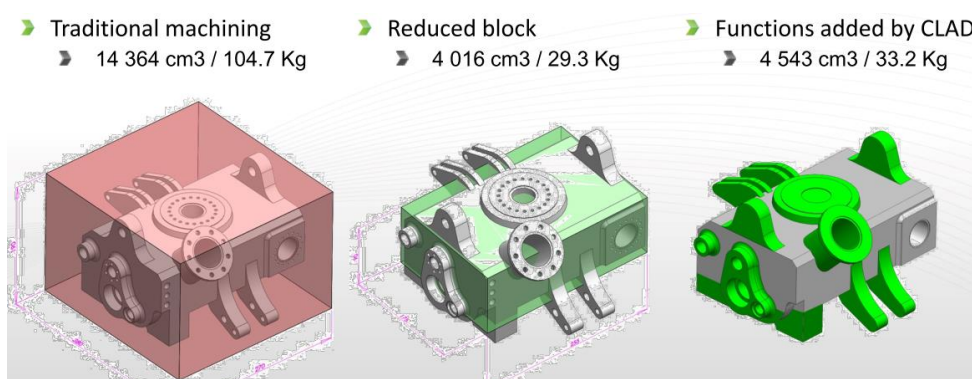


Figure 6. Comparaison entre une pièce réalisée par procédé conventionnel (usinage) et par le procédé CLAD (Frechard, 2015)

I.4. Originalité et apport de la thèse

La fabrication additive a suscité un réel intérêt dans le monde industriel et dans la recherche. Le nombre d'articles publiés augmente chaque année, comme le montre la Figure 7, et il est difficile pour les concepteurs et les industriels de suivre toutes les nouveautés autour de la FA. Un des objectifs des travaux de thèse est de capitaliser les connaissances nécessaires pour concevoir un mécanisme fabriqué par FA.

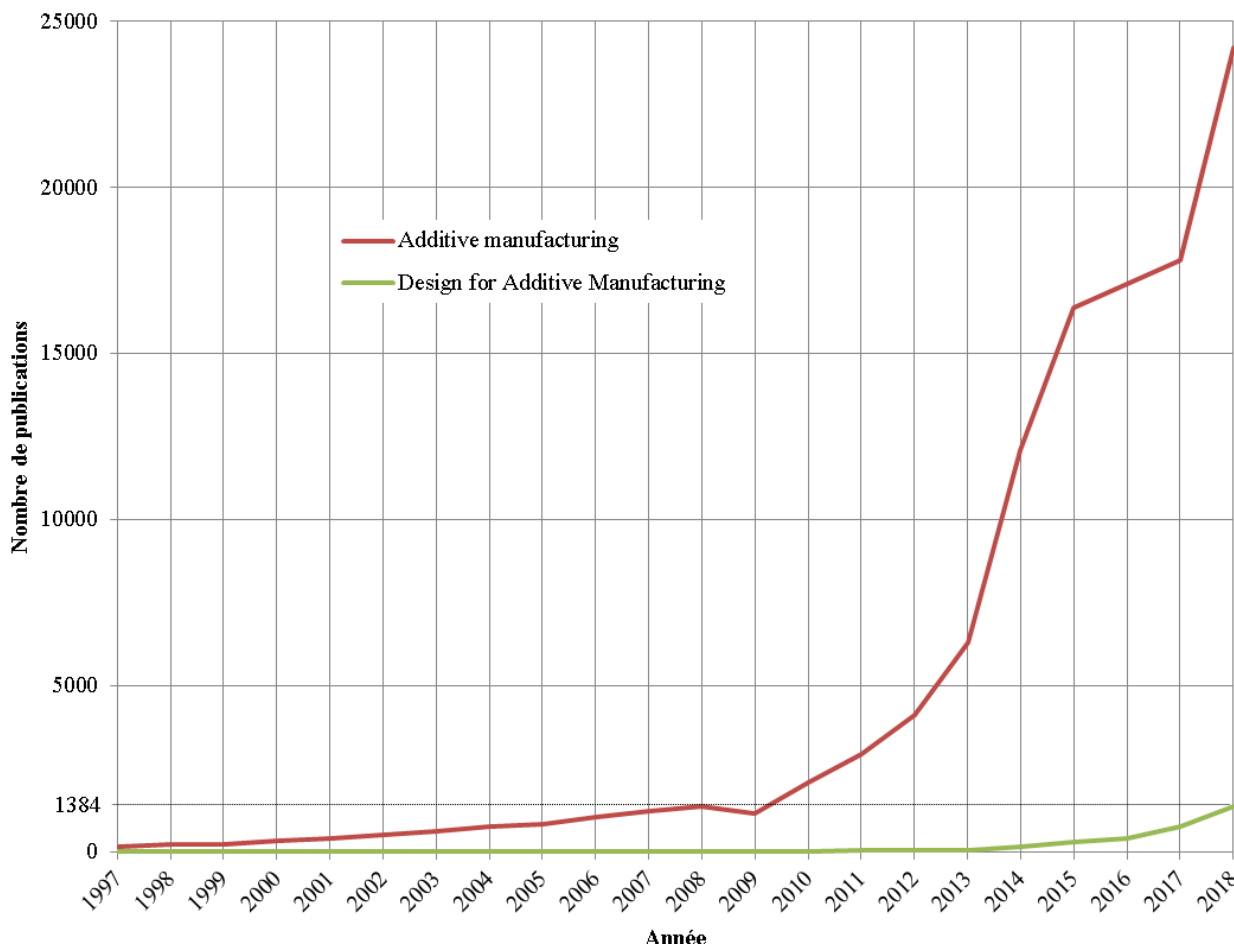


Figure 7. Evolution du nombre de publications sous Google Scholar. Les mots clefs sont pour la courbe rouge : additive manufacturing, additive manufactured, additively manufactured, 3D Printing; pour la courbe verte : design for additive manufacturing, topological optimization, DfAM et topology optimization.

D'autre part, la conception de pièces pour la FA exploite de plus en plus un outil mathématique appelé l'optimisation topologique (OT). Cela permet d'obtenir des pièces plus légères et moins encombrantes tout en résistant aux sollicitations mécaniques. La plupart des systèmes mécaniques sont composés de pièces qui ont des liaisons et interactions entre elles. Appliquer sur l'une d'elle une optimisation topologique entraîne une modification des efforts dans les liaisons et influe sur le comportement mécanique du système. Un autre apport de cette thèse est de proposer un moyen de réaliser des optimisations topologiques de systèmes multicorps en prenant en compte l'impact de la diminution des inerties et des masses.

L'optimisation topologique est une optimisation à réaliser lors de la conception d'une pièce. Mais il est aussi possible de réaliser des optimisations grâce aux ajouts de fonctionnalités ou

encore par une conception monolithique qui sont à présent possibles par ces nouveaux procédés de fabrication. Ainsi, il sera mis en évidence dans ce mémoire que trois optimisations sont applicables pour réaliser un produit plus performant.

I.5. Organisation du mémoire

Ce mémoire s'organise autour de trois parties principales précédées d'une introduction et clôturées par une conclusion, le tout complété par des annexes.

L'introduction générale a permis une mise en contexte des prémices de cette thèse et a présenté brièvement l'objet de cette recherche. Le contexte général de la fabrication additive a été décrit afin de délimiter le champ d'étude des travaux de recherche.

La deuxième partie concerne l'étude bibliographique réalisée sur le thème de la conception pour la fabrication additive. Elle permettra de mieux préciser la frontière d'étude, de détailler les avancées de la recherche sur la conception pour la FA puis de mettre en lumière les verrous scientifiques.

Suite à un premier chapitre d'introduction, il sera détaillé les différentes optimisations possibles telle que l'optimisation topologique, outil mathématique couramment utilisé pour concevoir pour la FA, ou encore les différentes possibilités de la FA.

Toutes les pièces ne sont pas intéressantes à concevoir et à réaliser par FA. De plus, chaque procédé possède des caractéristiques de fabrication (qualité, dimension, matériaux possibles, coût par pièce...). C'est pourquoi, le chapitre suivant détaillera les raisons de concevoir pour la FA et comment choisir le procédé adapté.

Les nouvelles contraintes de fabrication ont donné lieu à de nouvelles règles de tracé et méthodologies de conception qui feront l'objet du quatrième chapitre.

Enfin, cet état de l'art débouchera sur les verrous scientifiques sur lesquels se sont appuyés tous les travaux de cette thèse.

La troisième partie, permet de répondre à deux des verrous scientifiques identifiés. Un des premiers objectifs sera de proposer un classement des différentes optimisations possibles lors de la conception d'une pièce pour la FA. Les démarches pour appliquer les optimisations seront détaillées, puis les apports de chacune des familles seront démontrés grâce à un cas d'étude.

Dans un système mécanique, la diminution de la masse et/ou de l'inertie d'une pièce résultant de l'optimisation topologique peut impacter le comportement mécanique. Ainsi, un des apports majeur de cette thèse est la proposition d'une méthodologie d'optimisation pour un système mécanique multicorps appelée TOMS (pour Topological Optimization of a Mechanical System). Dans un premier temps, une boucle d'optimisation sera mise en place dans le but de prendre en compte la diminution des masses et inerties des pièces d'un mécanisme lors de son optimisation. Puis, il sera démontré que l'ordre d'optimisation des pièces a un impact sur les caractéristiques du mécanisme obtenu. Ainsi en fonction des objectifs de conception, des ordres d'optimisation -

appelés chemins d'optimisation- seront proposés. Un nouveau cas d'étude permettra de mettre en lumière les apports de l'optimisation TOMS. Une analyse des résultats permettra de proposer des principes de choix de chemin en fonction des objectifs de conception.

Alors que la partie précédente traite d'une étape de conception pour la fabrication additive, une méthodologie globale de conception pour la FA d'un système multicorps sera proposée dans la quatrième partie afin de capitaliser les différents apports de cette thèse.

Il sera tout d'abord expliqué les raisons et les ambitions de cette méthodologie. Une présentation générale puis détaillée sera réalisée puis, afin de permettre une meilleure compréhension de l'application de la méthodologie, un troisième cas d'étude sera proposé. Sur ce dernier, la méthodologie sera appliquée pas à pas. Pour permettre une comparaison entre un système conçu avec une méthode usuelle et celle proposée, quatre conceptions seront proposées et chacune a été fabriqué au sein de la plateforme MAQ-3D. Des essais sur ces pièces montreront les apports de la méthode.

La dernière partie conclura les travaux de recherche. Il y sera résumé les principales contributions réalisées, les résultats obtenus. Puis, des perspectives de recherche seront proposées. Pour finir, un chapitre sera consacré sur le rayonnement que ces années de thèse ont eu sur mon travail.

II. Bibliographie et problématique

II.1.	Introduction	10
II.2.	De la liberté de forme aux optimisations	11
II.2.1.	Introduction	11
II.2.2.	Les différentes optimisations de forme	11
II.2.3.	Autres optimisations possibles par la FA	24
II.2.4.	Conclusion et lien entre toutes les optimisations	32
II.3.	De la liberté de forme au choix des pièces et du procédé de FA	33
II.3.1.	Introduction	33
II.3.2.	Choix des pièces à réaliser par FA	33
II.3.3.	Choix du procédé de FA	37
II.3.4.	Conclusion	46
II.4.	De la liberté de forme aux méthodes de conception	47
II.4.1.	Introduction	47
II.4.2.	Les règles de conception	49
II.4.3.	Les aides à la conception pour la FA	52
II.4.4.	Les méthodologies de conception pour la FA	55
II.4.5.	Conclusion sur les méthodologies de conception pour la FA	60
II.5.	De la liberté de forme aux verrous scientifiques	61
II.5.1.	Analyse des besoins d'évolution des méthodologies de conception pour la FA	61
II.5.2.	Verrous scientifiques	62
II.6.	Conclusion et stratégie de recherche	63
II.6.1.	Solution au verrou 1	63
II.6.2.	Solution au verrou 2	64
II.6.3.	Solution au verrou 3	64

II.1. Introduction

Cette première partie « état de l'art » se compose de cinq chapitres.

Le chapitre II.2 permettra tout d'abord de découvrir ce que signifie la liberté de forme pour la fabrication additive et son impact sur le design des pièces. Il sera expliqué au sous-chapitre II.2.2 que pour déterminer où la matière doit se trouver, une **optimisation de forme ou de structure**, appelée optimisation topologique, peut être réalisée. Sa définition mathématique ainsi que des exemples seront proposés. Dans un deuxième temps, les **possibilités de la FA** seront énumérées au sous-chapitre II.2.3. En effet, le champ des possibilités de la fabrication additive est très élevé. Ainsi, différentes améliorations de produits sont envisageables. Une proposition de classement des améliorations conclura ce premier chapitre.

Au chapitre II.3 seront détaillées les **raisons de concevoir une pièce par un procédé de fabrication additive** ainsi que le **choix du procédé de FA** le mieux adapté au besoin. De tous les procédés de fabrication, il faut choisir celui qui permettra de réaliser au mieux la pièce à concevoir. Le choix du procédé dépend de différentes raisons comme le coût ou la flexibilité. D'autres aspects de la fabrication additive tels que le temps de fabrication ou encore l'impact environnemental peuvent influencer le besoin de fabriquer une pièce par ces procédés. Ainsi de cette bibliographie, il a été identifié des familles de critères permettant de choisir entre procédé conventionnel ou procédé de FA.

Chaque procédé de fabrication additive possède des avantages et des inconvénients (choix des matériaux, envergure des pièces, qualité surfacique...). Le choix d'un procédé nécessite une réelle connaissance des capacités machines en constante évolution. Le sous-chapitre II.3.3 met en évidence les défauts usuels de chacun des procédés ainsi que les critères de choix du procédé de FA.

Tout comme cela a été fait pour les procédés de fabrication traditionnels, des **règles de tracé** (ou règles de conception) pour la FA ont été définies. Des exemples seront détaillés pour certaines technologies de FA au chapitre II.4.2.

De ces règles, optimisations et améliorations, sont nées des **méthodologies de conception** permettant aux concepteurs de réaliser une pièce qui peut être appelée « optimale » tout en répondant aux nouvelles contraintes du procédé utilisé (sous-chapitre II.4.4).

Le chapitre II.5 mettra en lumière, au regard des chapitres précédents, les **verrous scientifiques**.

Dans le dernier chapitre II.6, qui conclura la bibliographie, la **stratégie de recherche** sera présentée. Il sera ainsi détaillé comment chaque verrou a été levé tout au long de cette thèse.

II.2. De la liberté de forme aux optimisations

II.2.1. Introduction

Ce chapitre commence par un bref inventaire des différentes optimisations de forme. Puis l'algorithme SIMP (Simple Isotropic Material with Penalization) ainsi que les étapes pour optimiser topologiquement une pièce seront détaillés.

La FA offre un champ de possibilités d'applications très étendu et en constant accroissement. Ce champ est une opportunité pour améliorer une pièce ou un mécanisme, mais peut dépendre du procédé choisi. C'est pourquoi le deuxième sous-chapitre détaillera les possibilités permettant d'optimiser une conception pour la FA proposées dans la littérature.

II.2.2. Les différentes optimisations de forme

La conception d'une pièce mécanique doit répondre à un ou plusieurs besoins exprimés par des spécifications, des sollicitations mécaniques... Afin de supporter les sollicitations mécaniques, le choix du matériau et de la géométrie de la pièce sont primordiaux. Le calcul de la forme optimale pour supporter les sollicitations mécaniques peut s'avérer complexe, ce qui implique de plus en plus l'utilisation des outils informatiques. C'est dans ce contexte que l'optimisation des structures assistée par ordinateur est apparue. Cela permet, à l'aide d'algorithmes mathématiques, de déterminer de meilleures conceptions, en termes de réponses structurelles admissibles (déformations, contraintes, fréquences propres, etc.), voire de fabrication (Eschenauer & Olhoff, 2001).

Les approches de l'optimisation de forme peuvent être classées suivant trois familles (Allaire & Schoenauer, 2007) :

- l'optimisation paramétrique : la conception étant déjà réalisée, seuls quelques paramètres (tels qu'une épaisseur, une longueur...) pourront être modifiés comme des variables ;
- l'optimisation géométrique : les frontières de l'espace de conception seront modifiées pour obtenir la forme optimale mais la topologie restera la même ;
- l'optimisation topologique : la topologie sera, dans un volume donné, modifiée sans aucune restriction pour obtenir la forme optimale.

La topologie est la caractéristique s'apparentant à la forme générale de l'entité concernée (Ponche, 2013).

Pour (Thompson et al., 2016), «L'optimisation topologique est une approche numérique qui identifie où le matériau doit être placé dans un domaine donné pour obtenir une fonctionnalité désirée (rigidité par exemple) et pour un ensemble donné de charges et de contraintes, tout en optimisant la qualité telle que la quantité de matériau / le poids ou la répartition uniforme des

contraintes». Et d'après (Guo & Cheng, 2010) l'optimisation topologique «vise à trouver le moyen optimal de répartition des matériaux dans la structure».

Ainsi l'optimisation topologique permet à partir d'un domaine donné d'obtenir un concept de répartition de matière atteignant un objectif et répondant à des contraintes.

Une formulation simple et générique d'un problème d'optimisation peut s'écrire de la manière suivante (Bendsøe & Sigmund, 2003; Cavazzuti et al., 2011; Kim et al., 2002; Zhou et al., 2004) :

Équation 1

$$\min_{\Gamma \in \Omega} f(\Gamma)$$

$$\text{Tel que } c(\Gamma) \geq 0$$

Avec :

- Γ : ensemble des variables de conception
- Ω : domaine (ou espace de conception)
- $f(\Gamma)$: fonction objectif
- $c(\Gamma)$: fonction contrainte

II.2.2.1. L'optimisation topologique par le modèle SIMP

Il existe de nombreux algorithmes (ou méthodes) permettant d'optimiser une forme topologiquement. Chaque algorithme offre des avantages et des inconvénients (Y. Tang & Zhao, 2016) comme indiqué dans le Tableau 2.

Tableau 2. Avantages et inconvénients de différents types de méthodes d'optimisation topologique (Y. Tang & Zhao, 2016)

Method name	Advantages	Disadvantages
Ground Structure	It is easy to implement; It is suitable for the design of low-volume truss-like structure	An initial ground structure has a significant impact on the final result
SIMP	It is easy to implement; It requires less storage space and computational effort	It is only effective as long as the final goal is to obtain a black-and-white design; Final result largely dependent on penalize parameter; It is easy to generate check-like structure
Level set	The optimized result has a continuous boundary	Solutions are different for different starting points; It is sensitive to a number of algorithmic parameters
Homogenization	The concept of element with intermediate density is clear; It can be applied to optimize the structure with intermediate density	Large storage space and computation effort
Evolution	It does not require calculating the derivative of the objective function	It is sensitive to a number of algorithmic parameters
Genetic algorithm	It does not require calculating the derivative of the objective function	Large computation load is needed even for simple problem; It is more likely to converge to local optimize point

(Kim et al., 2002) proposent d'ailleurs une étude comparative des différentes méthodes en détaillant leur pertinence d'utilisation dans le processus de conception.

Une formulation mathématique permettant d'optimiser la topologie d'une structure (dans un volume de matière fixé, noté Ω) peut être écrite en terme d'énergie de déformation totale U dans le domaine élastique (Bendsøe & Sigmund, 2003; Eschenauer & Olhoff, 2001) :

Équation 2

$$\begin{aligned} & \min_{\Gamma \in \Omega} U(\underline{d}) \\ & \text{Tel que } \underline{\underline{K}} \cdot \underline{d} = \underline{F} \end{aligned}$$

Où

- \underline{F} : vecteur des efforts
- \underline{d} : vecteur des déplacements globaux
- $\underline{\underline{K}}$: matrice de rigidité
- $\underline{\underline{K}} \cdot \underline{d} = \underline{F}$: loi de comportement élastique
- Γ : variable de conception

U peut être écrit (en écriture élément finis) de la manière suivante:

Équation 3

$$U(d) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \cdot \int_{V_i} \underline{\underline{\varepsilon}}_i^T(d) \cdot \underline{\underline{E}}_i(\Gamma) \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}_i(d) \cdot dV_i$$

Avec

- $\underline{\underline{E}}_i$: matrice d'élasticité de l'élément i
- $\underline{\underline{\varepsilon}}_i$: vecteur déformation de l'élément i
- V_i : volume de l'élément i
- N : le nombre total d'éléments finis

La distribution des matériaux est contrôlée par une variable de conception qui peut être exprimée par une fonction de commutation définie comme suit :

Équation 4

$$\Gamma(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in \Omega_S \\ 0 & \text{si } \begin{cases} x \in \Omega \\ x \notin \Omega_S \end{cases} \end{cases}$$

Où Ω désigne tout le domaine de conception et Ω_S le domaine occupé par la matière isotrope. x est un point structurel.

Cela signifie qu'à chaque élément sera assigné un matériau "solide" ou du "vide".

Plutôt que d'utiliser une fonction de commutation, le modèle de matériau SIMP (Simple Isotropic Material with Penalization) couvre toute la gamme des valeurs de densité comprises entre 0 et 1 (Bendsøe, 1995; Bendsøe & Sigmund, 1999; Rozvany et al., 1992; Zhou &

Rozvany, 1991). Ainsi, sous la formulation de minimisation de flexibilité (ou compliance), une variable continue (telle que $0 \leq \rho \leq 1$) est introduite. Chaque élément peut être considéré comme un matériau poreux avec des vides microscopiques. Pour obtenir une distribution de densité allant de 0 à 1, la méthode suppose que la rigidité du i -ème élément est donnée par l'Équation 5:

Équation 5

$$E_i(\Gamma) = \rho_i^p(\Gamma) \cdot E^*$$

Où E^* est la rigidité initiale du matériau isotrope, ρ_i la densité de l'élément i et p le facteur de pénalité ($1 \leq p \leq 4$). Son rôle est de pénaliser la densité intermédiaire ($p \geq 3$ est généralement requis), comme le montre la Figure 8. Ainsi, l'interprétation du résultat sera plus facile car l'effet damier dû aux densités intermédiaires sera diminué (voir Figure 9).

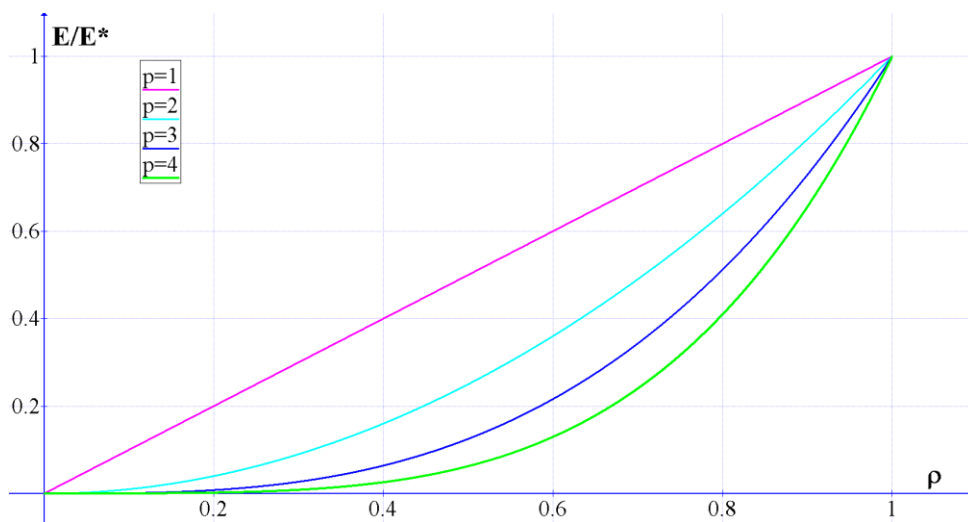


Figure 8. Influence du paramètre p sur la pénalisation de la densité

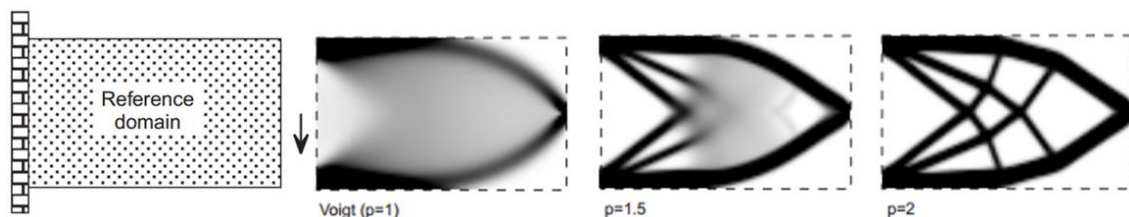


Figure 9. Influence du facteur de pénalisation p sur l'effet damier (Bendsøe & Sigmund, 1999)

Grâce à sa simplicité et à ses bons résultats, le modèle SIMP est implémenté dans de nombreux codes commerciaux de calcul par éléments finis et d'optimisation pour la conception (Eschenauer & Olhoff, 2001; Kim et al., 2002; Saadlaoui et al., 2017) et utilisé pour la conception des pièces fabriquées par FA (Aremu et al., 2010; Krishna et al., 2017).

II.2.2.2. Utilisation pratique de l'optimisation topologique

Dans cette section, les grandes lignes de la procédure de réalisation d'une optimisation topologique d'une pièce sont expliquées.

Le logiciel utilisé est la suite HyperWorks de la société ALTAIR, dont le solveur d'optimisation se nomme OptiStruct. Altair OptiStruct est un solveur d'analyses structurelles pour les problèmes linéaires et non linéaires soumis à des chargements statiques et dynamiques.

L'application du modèle SIMP avec un logiciel commercial implique de suivre le flux de travail détaillé dans la Figure 10.

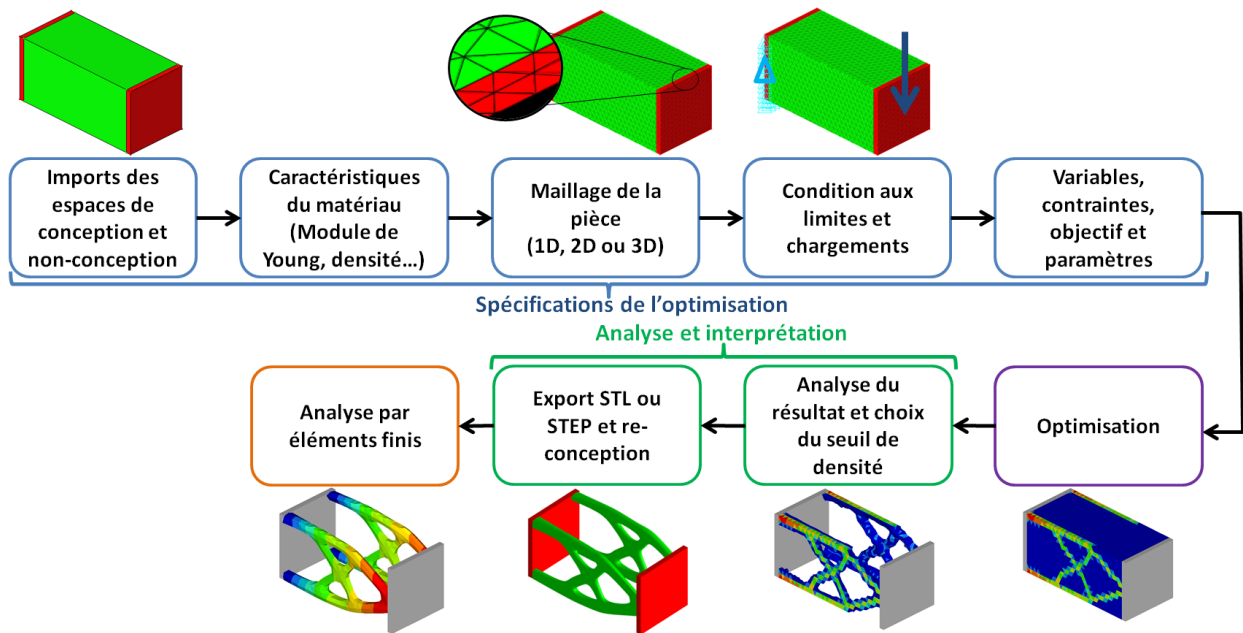


Figure 10. Processus d'optimisation topologique à l'aide du logiciel OptiStruct de la société ALTAIR. Support d'étude : poutre encastree-libre (espace de conception en vert et de non conception en rouge). Objectif : Minimisation de la masse avec contrainte de déplacement vertical

II.2.2.2.1. Définition de l'espace de conception et de l'espace de non conception

L'espace de conception (EC) est le volume qui pourra être modifié lors d'une optimisation (Ponginan, 2015; Rodrigue & Rivette, 2010). Pour (Y. Tang & Zhao, 2014), l'espace de conception est défini comme un volume qui est utilisé pour relier des surfaces fonctionnelles (SF) et les aider à remplir leurs rôles fonctionnels. L'espace de conception devrait être le plus grand possible «pour explorer toutes les opportunités d'amélioration de la conception» comme le conseillent (Goelke, 2016).

Un espace de non conception (ENC), est la partie de la pièce dans laquelle le logiciel ne modifie pas la répartition de matière.

L'utilisation de l'espace de non conception est facultative lors de l'optimisation topologique. Les espaces de non conception sont:

- utilisés pour représenter une pièce extérieure (tel un coussinet),

- un volume qui ne doit pas être modifié (comme un logo, ou une canalisation)
- les volumes sur lesquels les surfaces fonctionnelles subissent des charges.

II.2.2.2.2. Maillage des espaces de conception et de non conception

Le modèle SIMP est un modèle dont le résultat dépend de la précision du maillage (Sigmund & Petersson, 1998) comme le montre la Figure 11. Or lorsque le maillage est fin, le temps de calcul peut devenir très élevé. C'est pourquoi, un compromis entre la taille du maillage et temps de calcul est nécessaire.

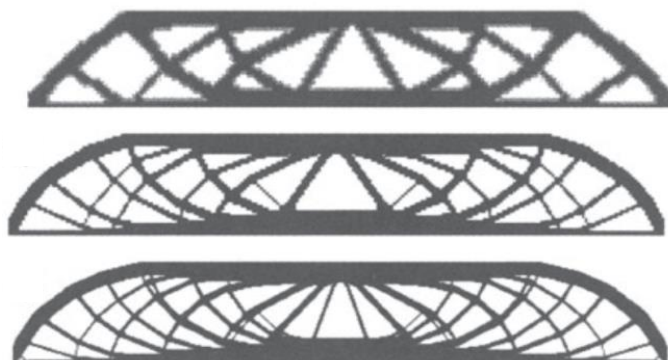


Figure 11. Dépendance au raffinement du maillage (Bendsøe & Sigmund, 2003)

II.2.2.2.3. Conditions aux limites

Les cas de chargement doivent être déterminés pour chaque étape de la vie de la pièce ou du produit. Cela signifie que doivent être prise en compte des phases de fabrication (montage, usinage...) (Benoist et al., 2018a), assemblage, fonctionnement, maintenance, ou étapes de recyclage par exemple. La non-prise en compte des différentes phases de vie peut conduire à la destruction de la pièce comme dans le cas de la Figure 12.

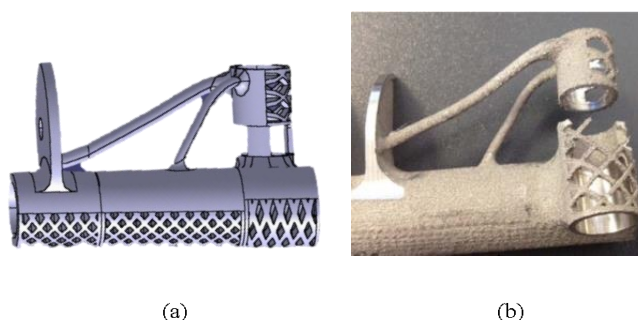


Figure 12. (a) Conception sous CAO; (b) Destruction de la pièce lors du post-traitement par usinage. Adapté de (Doutre, 2015; Hoang et al., 2015)

(S. G. Barbieri et al., 2017; Cavazzuti et al., 2011; Iqbal et al., 2019) proposent la conception d'une pièce optimisée, soumise à différentes sollicitations correspondant à chacune des phases de vie de la pièce. La conception ainsi obtenue est une pièce optimisée pour différents cas de charge.

II.2.2.2.4. Objectifs, contraintes et paramètres

L'objectif de l'optimisation dépend du besoin du concepteur. Généralement il s'agit de minimiser la masse ou de minimiser la compliance (flexibilité). Afin de poser correctement le problème d'optimisation, l'objectif doit être accompagné d'une contrainte aidant l'algorithme à converger vers une solution. Par exemples :

- minimiser la masse avec une contrainte en fréquence (maximiser la première fréquence propre),
- minimiser la compliance avec une contrainte sur le volume.

Les paramètres à choisir dans l'algorithme SIMP sont :

- Le coefficient de pénalisation p (dont la définition et l'impact ont été donnés au II.2.2.1),
- Le Min Member (mindim),
Le facteur de pénalité p peut ne pas être suffisant pour éviter l'effet damier et interpréter le résultat. Le paramètre mindim impose une épaisseur minimale de paroi et réduit ainsi l'effet damier. Ce paramètre permet aussi de respecter la faisabilité de fabrication.
- Le Max member (maxdim),
De même, le paramètre maxdim (moins utile pour interpréter le résultat) impose une épaisseur maximale de paroi.
- Les contraintes de fabrication,
Cela permet d'adapter le résultat au procédé de fabrication visé. Pour la FA, aucune contrainte ne sera imposée, par contre pour le moulage, un sens de démoulage peut être imposé.

La modification d'un de ces paramètres peut induire un résultat d'optimisation différent (Morretton et al., 2017, 2019; Weis et al., 2019) comme le montre la Figure 13.

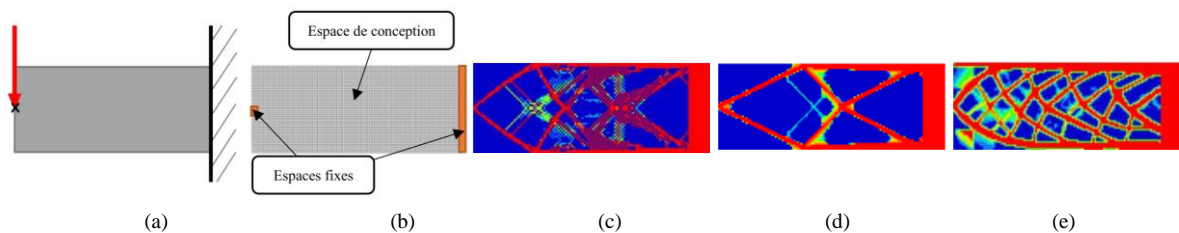


Figure 13. Influence des paramètres sur le résultat d'optimisation topologique. (a) Cas de charge ; (b) Espace de conception et de non conception ; (c) MinMember et MaxMember non sélectionnés ; (d) MinMember imposé à 12 mm et MaxMember non sélectionné ; (e) MinMember imposé à 3 mm et MaxMember imposé à 12 mm. (Morretton et al., 2017)

II.2.2.2.5. Optimisation

L'algorithme d'optimisation topologique est basé sur une procédure itérative connue sous le nom de méthode du gradient. Les étapes itératives d'optimisation sont détaillées par (Zhou et al., 2004) à la Figure 14.

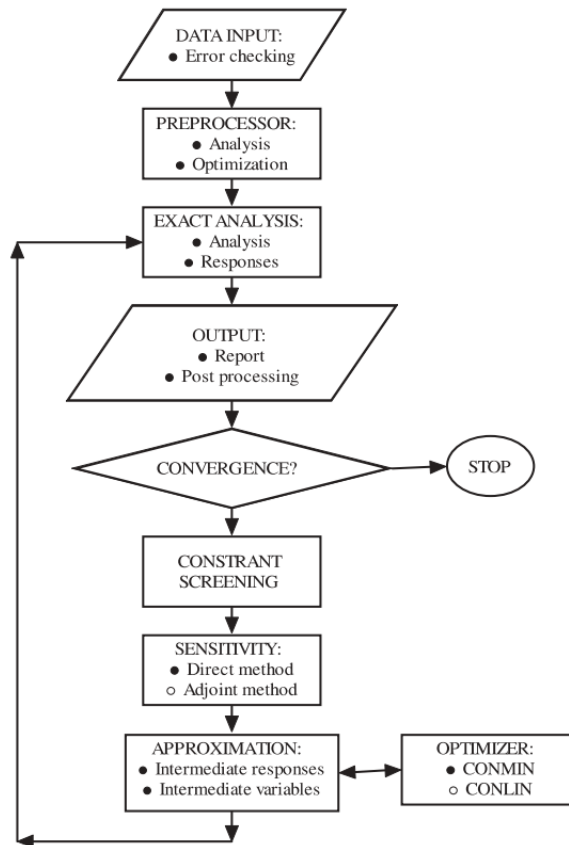


Figure 14. Les étapes itératives de l'optimisation topologique (Zhou et al., 2004)

Le processus d'optimisation débute par un contrôle des données puis par une analyse par éléments finis.

Deux critères de convergence sont utilisés par le solveur Optistruct, et si l'un d'eux est satisfait, alors l'optimisation a convergé (Altair, 2018):

- Regular convergence : elle est atteinte lorsque pour deux itérations consécutives, la valeur d'évolution de la fonction objectif est inférieure à la valeur de la tolérance objectif. A cela, s'ajoute une tolérance de 1% de violation des contraintes.
- Soft convergence : elle est atteinte lorsqu'il y a un très faible, voire pas de changement, des variables de conception sur deux itérations consécutives. Il n'est pas nécessaire d'évaluer l'objectif ou les contraintes pour le dernier point, le modèle étant inchangé depuis l'itération précédente.

II.2.2.2.6. Interprétation du résultat

☞ Interprétation par matériaux composites

Le modèle SIMP est aussi appelé méthode d'optimisation de la topologie basée sur la densité ou encore modèle proportionnel de « matériaux fictifs ou artificiels » (Eschenauer & Olhoff, 2001). Une interprétation de la matière à densité intermédiaire ($0 < \rho < 1$) a été proposée par (Bendsøe & Sigmund, 1999). En effet, quel que soit le tenseur isotropique d'élasticité obtenu par le modèle

SIMP, et en fonction de la valeur du facteur de pénalisation p , l'interprétation physique peut se faire par un matériau composite composé d'un matériau de base de densité $\rho=1$ et d'une matrice à densité nulle, comme le montre la figure ci-dessous.

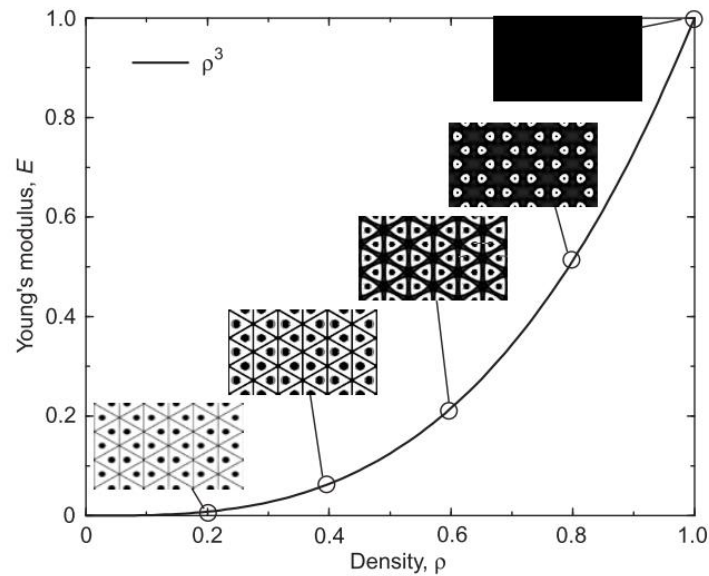


Figure 15. Structures du matériau composite réalisant les propriétés du matériau du modèle SIMP pour $p=3$ (Bendsøe & Sigmund, 1999)

☞ Interprétation par matériau lattice

(Brackett et al., n.d.) proposent une interprétation de la densité intermédiaire par une structure lattice (ou treillis). La variation du volume d'une cellule lattice est proportionnelle à la valeur de la densité. Ainsi, chacune des densités intermédiaires peut être physiquement réalisée par une cellule ayant une fraction de volume adaptée (voir la Figure 16).

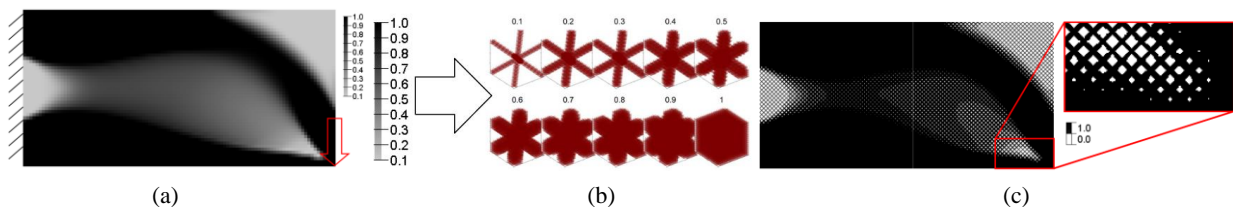


Figure 16. (a) Résultat de l'optimisation SIMP d'une poutre cantilever non pénalisée ; (b) Lien entre la densité et la fraction de volume dans une cellule lattice ; (c) Intégration de cellules lattice variables dans le résultat d'optimisation. (Brackett et al., n.d.)

☞ Interprétation par matériau à densité $\rho=1$

Plutôt que d'avoir recours à des matériaux composites il est possible d'interpréter le résultat de l'optimisation par une matière à densité $\rho=1$ en choisissant la valeur du seuil de densité minimale (appelé couramment threshold density value). Cela signifie que tout élément du maillage ayant une densité

- inférieure au seuil choisi se verra imposer une densité nulle,
- supérieure ou égale au seuil choisi aura la densité du matériau de base ($\rho=1$).

Ce choix appartient au concepteur qui doit vérifier la tenue mécanique de la nouvelle pièce. En fonction du seuil choisi, des discontinuités peuvent apparaître, pouvant fragiliser la pièce ou modifier sa rigidité comme le montrent (Hsu & Hsu, 2005) à la Figure 17.

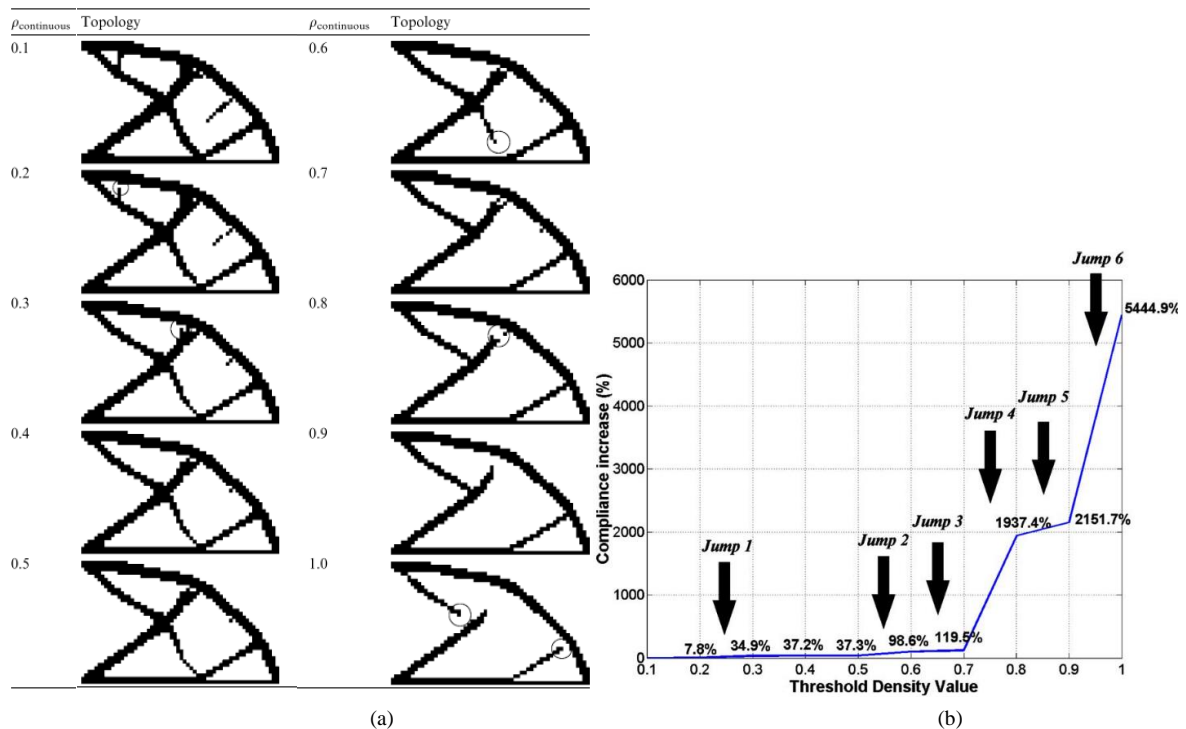


Figure 17. (a) Résultat de la topologie en fonction du seuil de densité choisi; (b) Courbe de la compliance en fonction du seuil de la densité choisi (Hsu & Hsu, 2005)

Une structure ayant une topologie continue est plus résistante qu'une pièce ayant une topologie discontinue. Ainsi, la valeur du seuil de densité doit être choisie en comparant la tenue mécanique de la pièce pour différents seuils (Hsu & Hsu, 2005).

Dans ce mémoire, les interprétations des résultats suivront cette démarche.

👉 Interprétation par multi-matériaux

Une autre manière d'interpréter les densités intermédiaires est de réaliser des pièces avec des matières différentes ayant un module de Young différent (Park & Sutradhar, 2015; Sanders et al., 2018; M. Y. Wang & Wang, 2004).

Le matériau à gradient appelé FGM (Functional gradient material) est une composition progressive de la matière dans une pièce. La fabrication additive des FGM permet de contrôler la densité et la porosité de la matière (Loh et al., 2018). Il est possible aussi de fabriquer une pièce composée de matériaux distincts pour produire une structure monolithique.

Enfin, (Vogiatzis et al., 2017) proposent une interprétation de la matière à densité intermédiaire par une cellule lattice pouvant être composée de plusieurs matériaux.

Comme il a été spécifié dans l'introduction, la conception des pièces multi matériaux ne fait pas partie du champ d'études. C'est pourquoi, ce sous-chapitre ne sera pas plus détaillé.

II.2.2.2.7. Mise en volume ou reconception

Une fois le choix de l'interprétation des densités effectué, la reconception du résultat doit se faire. Il est nécessaire de reconcevoir car le maillage laisse des surfaces non lisses et non continues. Ainsi des logiciels de reconception tels que Inspire de ALTAIR, 3D Expérience de Dassault Systemes ou encore NX de Siemens permettent de reconstruire les pièces obtenues. Les étapes de reconception sont différentes en fonction du logiciel utilisé. Les exemples étudiés au cours de cette thèse ont exploité Optistruct pour la partie optimisation topologique et des logiciels de CAO dont Inspire pour la partie reconception. L'interprétation du résultat de l'optimisation étant par matériau à densité $\rho=1$ (voir II.2.2.2.6 à la page 18), les étapes nécessaires à ce jour, de l'optimisation à la reconception sont montrées à la Figure 18.

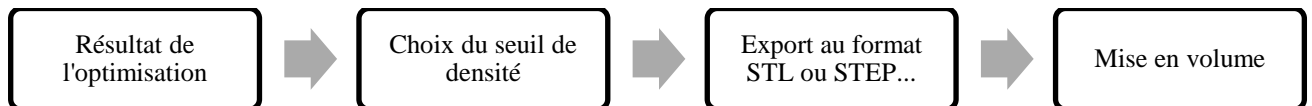


Figure 18. Etapes de l'optimisation à la reconception

Une fonction lissage de surface (appelée OSSmooth dans Optistruct) permet de diminuer l'irrégularité des surfaces. Si le résultat du lissage présente une pièce à état de surface jugé convenable par le concepteur, alors la partie reconception peut être évitée.

La reconception consiste à englober les parties qui doivent recevoir de la matière, voir la Figure 19. Il faut que le résultat de la reconception soit le plus proche du résultat de l'optimisation.

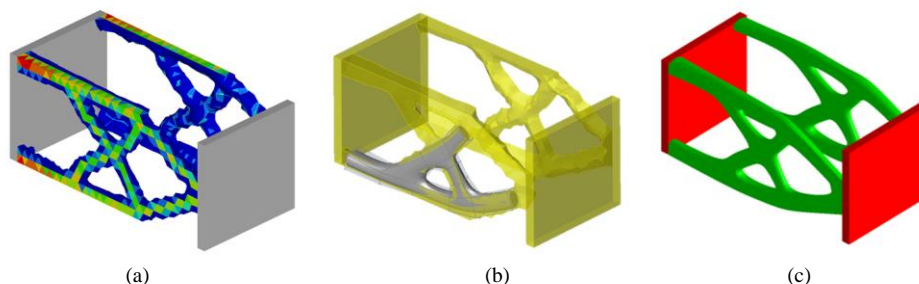


Figure 19. Etapes de reconception d'une pièce optimisée. (a) Résultat de l'optimisation (seuil de densité : 0,1) ; (b) Export du résultat en format STL et reconception avec l'outil PolyNurbs d'Inspire ; (c) Pièce finie

II.2.2.3. Conclusion

Ce sous-chapitre a montré l'importance de l'outil mathématique d'optimisation topologique dans le cas de la conception pour la fabrication additive. L'optimisation topologique peut permettre :

- une diminution de la masse de la pièce,
- une diminution de la quantité de matière et donc du coût,
- une diminution de l'impact environnemental en phase de fonctionnement pour les pièces embarquées (Gebisa & Lemu, 2017b; Huang et al., 2016),
- un ajout de fonction (absorption de choc par exemple) (Cheng et al., 2015).

Le Tableau 3, page suivante, recense de manière non exhaustive les publications scientifiques traitant de l'optimisation topologique.

Tableau 3. Classement d'articles scientifiques sur l'optimisation topologique en fabrication additive

Référence	Particularité	Modèle d'optimisation	Objectif d'optimisation + contrainte	Interprétation du résultat de l'optimisation	Application sur une pièce	Développement d'algorithme	Procédé de FA
(Allaire & Schoenauer, 2007)	Cours sur la conception optimale						
(Aremu et al., 2010)	Comparaison entre SIMP et BESO	SIMP + BESO	Compliance	Densité $\rho=1$	Poutre cantilever Poignet métallique pour l'aérospatial		
(S. G. Barbieri et al., 2017)	Optimisation d'une pièce sous plusieurs cas de charges	SIMP	Masse + résistance élastique	Densité $\rho=1$	Piston de moteur thermique		LBM
(Bendsøe & Sigmund, 1999)	Différentes interprétations du résultat de l'optimisation	SIMP et homogénéisation		Matériaux composites	Poutre cantilever		
(Bendsøe & Sigmund, 2003)	Livre sur l'optimisation topologique						
(Bendsøe, 1995)	Livre sur l'optimisation topologique pour la conception						
(Brackett et al., n.d.)	Comment interpréter le résultat avec une approche de contrainte de fabrication	SIMP		Matériau lattice, Multi-matériaux			
(Cavazzuti et al., 2011)	Optimisation d'une pièce sous plusieurs cas de charges	SIMP	Masse + résistance élastique	Densité $\rho=1$	Châssis d'un véhicule automobile		
(Cazacu & Grama, 2014)	Comparaison de différents modèles	SIMP, ESO, SKO, level-set			Équerre de fixation		
(Eschenauer & Olhoff, 2001)	Généralités sur l'optimisation topologique						
(Gebisa & Lemu, 2017a)	Optimisation d'une pièce sous plusieurs cas de charges	SIMP	Compliance pondérée + fraction de la masse et épaisseur minimale	Densité $\rho=1$	Interface de fixation d'un moteur à réaction		LBM - FDM
(Guo & Cheng, 2010)	Etat de l'art des avancées de l'optimisation topologique						
(Kim et al., 2002)	Les différents modèles d'optimisation et leur application dans la conception						
(Hsu & Hsu, 2005)	Interprétation des résultats de l'optimisation	SIMP		Approche de contour des densités	Cantilever, bras de suspension...		

(Iqbal et al., 2019)	Optimisation d'une pièce sous plusieurs cas de charges	SIMP	Compliance pondérée + fraction du volume	Densité $\rho=1$	Prothèse de bassin		
(Krishna et al., 2017)	Optimisation d'une pièce et fabrication	SIMP	Compliance	Densité $\rho=1$	Poutre bi-appuyée		FDM
(L. Tang et al., 2016)	Comparaison entre pièces conventionnelles et pièces optimisées pour une conception légère	SIMP	Volume + résistance élastique Masse + résistance élastique	Densité $\rho=1$	Flasque, Cantilever, plaque d'interface...		LBM
(Luo et al., 2006)	Conception aérodynamique d'un missile optimisé en statique et dynamique	SIMP	Compliance + fréquence propre	Densité $\rho=1$	Missile		
(Micheletti et al., 2019)	Développement du modèle SIMP en SIMPATY	SIMP		Densité $\rho=1$	Poutre cantilever, poutre bi-appuyée...		
(Munk et al., 2019)	Optimisation d'une pièce sous plusieurs cas de charges	BESO	Masse + déplacement	Densité $\rho=1$	Train d'atterrissage, fixation moteur		
(Rodrigue & Rivette, 2010)	Optimisation d'une pièce d'un produit		Volume	Densité $\rho=1$	Carter de train épicycloïdal		
(Saadlaoui et al., 2017)	Comparaison de différents logiciels d'optimisation intégrant différents modèles	SCO, SIMP-CCO, DCO	Masse + résistance élastique, Compliance + volume	Densité $\rho=1$	Cube soumis à de la compression		LBM
(Tomlin & Meyer, 2011)	Optimisation d'une pièce sous plusieurs cas de charges	SIMP	Masse + résistance élastique	Densité $\rho=1$	Support de charnière de nacelle		
(Ulu et al., 2018)	Optimisation d'une pièce pour minimiser le coût	SIMP	Coût + compliance	Densité $\rho=1$	Cantilever, poutre en L, Interface de fixation d'un moteur à réaction...		EBM
(Walton & Mozarzadeh, 2017)	Optimisation d'une pièce et fabrication	SIMP	Compliance pondérée + fraction de la masse	Densité $\rho=1$	Montants de suspension		EBM
(Wildman & Gaynor, 2017)	Diminuer la distorsion thermique des pièces	SIMP		Densité $\rho=1$	Poutre avec plusieurs conditions limites		
(Zegard & Paulino, 2016)	Interprétation du résultat	Ground structure, SIMP	compliance	Densité $\rho=1$	Cantilever, sphère sous torsion...		FDM, SLS

■ Sujet traité

II.2.3. Autres optimisations possibles par la FA

II.2.3.1. Le champ des possibilités de la FA

L'optimisation topologique détaillée au chapitre précédent permet d'obtenir la forme optimale d'une pièce pour répondre aux sollicitations mécaniques. En plus de l'optimisation topologique, d'autres types d'optimisations peuvent être effectuées pour améliorer la conception d'une pièce ou d'un produit. Par exemple, le concepteur peut améliorer l'ergonomie d'une pièce, diminuer les pertes de charges d'un conduit etc. De plus, la fabrication additive permet de réaliser des pièces à fonctionnalité augmentée par rapport aux procédés traditionnels. Les procédés de dépôt de matière par couches permettent par exemple de déposer des matériaux différents ou encore de réaliser directement des liaisons cinématiques.

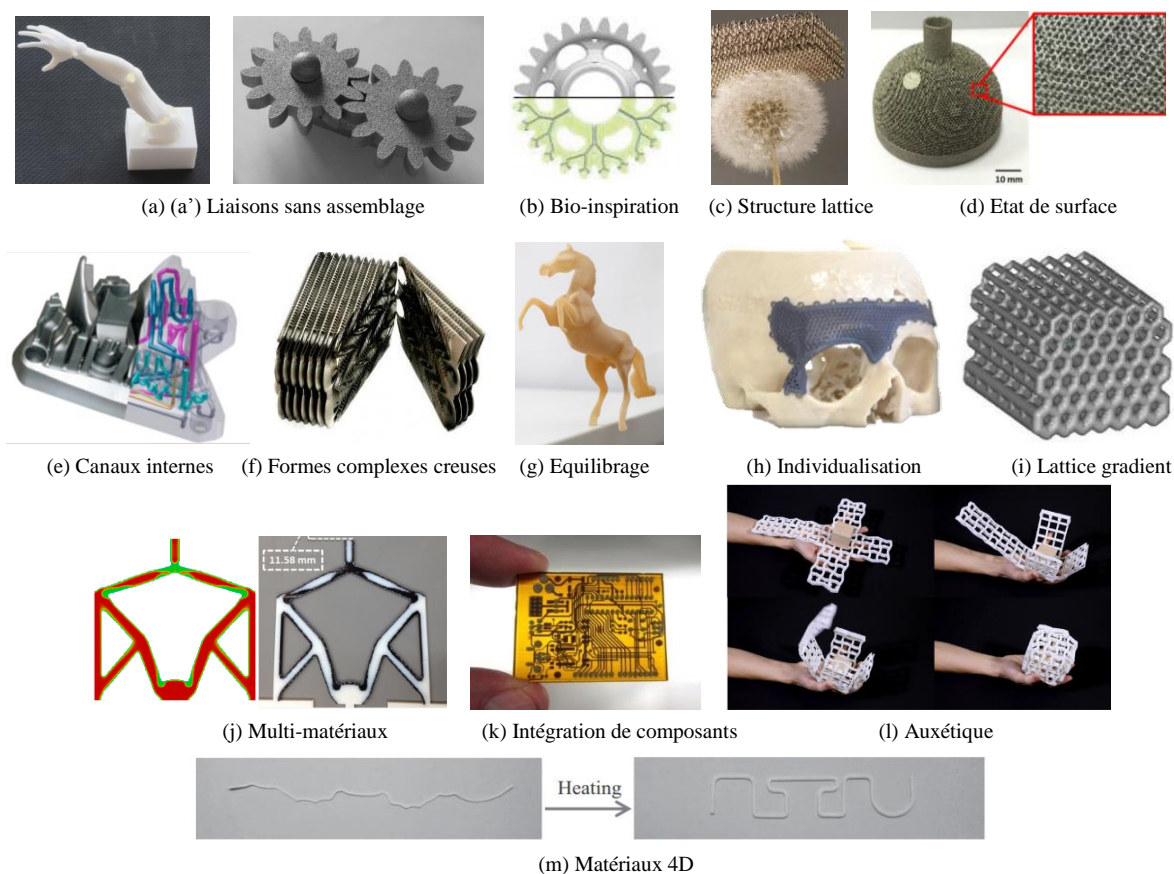


Figure 20. (a) Bras articulé non assemblé (Cali et al., 2012) ; (a') Engrenage direct (Calignano et al., 2014); (b) Roue dentée conçue par biomimétisme (Kamps et al., 2017); (c) Matériau lattice dit « le plus léger au monde ». Source : <http://www.boeing.com>; (d) Surface poreuse pour implant orthopédique (Sing et al., 2016); (e) Outillage de moule et canaux internes de refroidissement. Source: Renishaw.com; (f) Coupe d'un échangeur thermique. Source: Polyshape ; (g) Figurine équilibrée statiquement (Prévost et al., 2013); (h) Implant de crane. Source: PolyShape/OBL; (i) Structure lattice à gradient (Sun et al., 2016); (j) Optimisation topologique d'une poutre en bi-matière (Gaynor et al., 2014) ; (k) Carte électronique. Source: nano-di.com; (l) Pièces à matériau auxétique proposés par (Ou et al., 2018), appelés KinetiX; (m) Impression 4D avant et après la chauffe (Teoh et al., 2016)

Une augmentation de la valeur ajoutée est possible en FA grâce aux ajouts de fonctions et à l'augmentation de la performance (Campbell et al., 2013). Afin de connaître l'éventail des améliorations possibles, il est important de connaître le champ des possibilités de la fabrication

additive. Un panel du champ des possibilités de la fabrication additive est illustré par la Figure 20.

II.2.3.2. Regroupement de pièces en une seule (ou conception monolithique)

La conception monolithique consiste à reconcevoir un ensemble de pièces en une seule. Les avantages de la reconception de plusieurs pièces en une seule sont nombreux (Schmelzle et al., 2015; S. Yang & Zhao, 2016) :

- diminution de la masse,
- diminution du nombre de pièces et des références à gérer,
- diminution du nombre d'interfaces,
- diminution de l'encombrement,
- diminution des interfaces dans lesquelles des fuites sont généralement détectées,
- diminution de l'usure,
- pas d'éléments d'assemblage,
- augmentation des performances,
- diminution du nombre de matériaux.

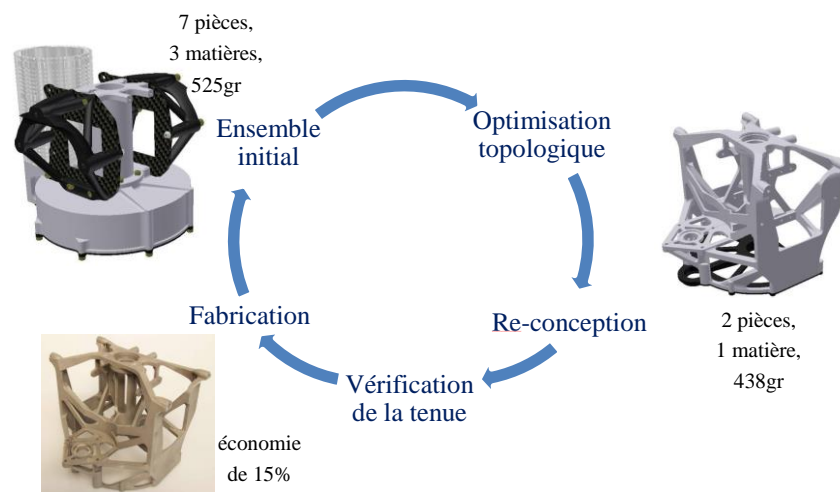


Figure 21. Exemple industriel: Fixation d'un rotor de drone. Source : MBProto

Afin de choisir les pièces à unir, (Boothroyd, 1994) a défini trois critères. Si une réponse positive est apportée à l'un de ces trois critères, alors les pièces ne peuvent être conçues en une seule :

- Pendant le fonctionnement du produit, les pièces ont-elles un mouvement relatif (les mouvements modérés pouvant être compensés par des éléments élastiques intégrés ne sont pas pris en compte) ?
- La pièce doit-elle être d'un matériau différent ou être isolée de toutes les autres pièces déjà assemblées ?
- Les pièces doivent-elles être séparées pour le montage d'une autre ?

(S. Yang et al., 2018) proposent de compléter cette liste en adaptant les recommandations de (Fagade & Kazmer, 1999) à la fabrication additive :

- La conception monolithique implique-t-elle un supplément d’outillage ?
- La conception monolithique implique-t-elle une augmentation significative du coût et de la difficulté de fabrication ?
- La conception monolithique empêche-t-elle la réutilisation du matériau ou son recyclage ?

(S. Yang et al., 2018; S. Yang & Zhao, 2016) proposent une méthodologie numérique permettant de sélectionner rapidement et efficacement les pièces pouvant être unies. Cette méthode numérique prend en compte les six critères précédents ainsi que les contraintes de la fabrication additive.

II.2.3.3. Fabrication directe de liaisons (ou d’assemblages)

La fabrication directe de liaisons (Figure 20 (a, a’)) est la fabrication de mécanismes avec des pièces ayant un ou plusieurs mouvements relatifs, par le procédé de FA et ce, sans opération d’assemblage.

Seuls certains procédés permettent de réaliser directement des assemblages (Cuellar et al., 2018) :

- polymérisation en cuve (Stéréolithographie)
- projection de matière (Polyjet),
- projection de liant (Binder Jetting),
- extrusion de matière (FDM),
- fusion sur lit de poudre (SLS, LBM, EBM).

Comme l’indiquent (De Laurentis & Mavroidis, 2004) le jeu laissé entre les pièces en mouvement, est rempli soit par la poudre, soit par un support. Dans les deux cas, il sera nécessaire de les éliminer, d’où la nécessité d’ouvrir ou de ventiler les volumes piégés. De plus, la direction de fabrication doit être définie afin d’éviter le soutien (si nécessaire).

(Y. Liu et al., 2017) ont étudié l’impact de certains paramètres (vitesse de balayage, épaisseur de couche, apport d’énergie, etc.) afin de déterminer le meilleur compromis permettant d’obtenir une rugosité et un jeu optimal. (Cali et al., 2012) et (Y. Li & Chen, 2017) ont proposé de concevoir un joint contrôlé, sans assemblage, pour maintenir les positions des pièces, soit par frottement, soit par pression. La fabrication directe de liaisons ainsi que d’une transmission à engrenages sont proposées par (Calignano et al., 2014).

II.2.3.4. Diminution de volume et conception légère

Il est possible, grâce à la FA, d'obtenir des pièces légères et ce de différentes manières :

- optimisation topologique de la pièce (comme cela a été détaillé au chapitre II.2.2),
- conception par matériaux architecturés aussi appelé lattice (voir II.2.3.6) comme le montre la Figure 20 (c),
- réalisation de parois semi-creuses emplies de structures de type nid d'abeille ou lattice comme le montre la Figure 22,



Figure 22. Concept de culasse de F1 réalisée sous LBM (Inovar Communications Ltd, 2016)

- concevoir avec des matériaux à densités différentes (voir chapitre II.2.3.6), les parties de la pièce qui sont peu sollicitées pouvant être réalisées par une matière dont la densité est plus faible,
- réaliser une conception monolithique ou des assemblages directs (comme vu au sous-chapitre précédent),
- adapter la reconception des pièces aux contraintes de fabrication de la FA.

En effet, lors de la reconception d'une pièce, il est important de s'affranchir des contraintes de fabrication des procédés traditionnels (accessibilité des outils par exemple). Ainsi (Ren & Galjaard, 2015) proposent-ils la reconception d'un nœud de fixation d'une structure à tensegrité pour le procédé LBM (voir la Figure 23). La pièce d'origine est réalisée en mécano-soudé.

La démarche suivie est la suivante :

- prise en compte des surfaces fonctionnelles,
- optimisation topologique,
- vérification de la tenue,
- puis reconception en prenant en compte les contraintes de fabrication.

Une nouvelle étude a permis de mettre en évidence l'obsolescence du positionnement des trous réalisant l'encastrement avec les câbles de maintien de la structure. Le positionnement d'origine était contraint par le procédé de soudage, qui pour la fabrication additive n'a pas lieu d'exister. Ainsi, tout en gardant la fonctionnalité des trous, leurs entraxes ont été diminués comme le montre la Figure 23.

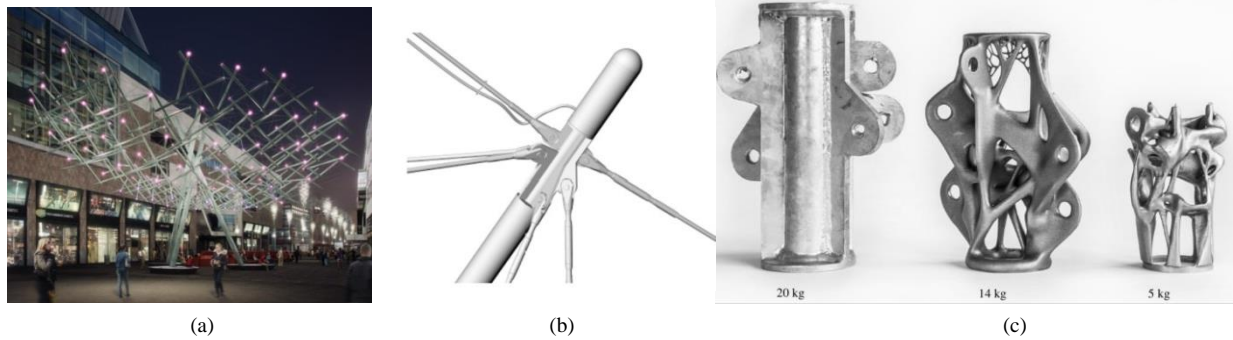


Figure 23. (a) Structure de tensegrité ; (b) Détail du nœud de fixation ; (c) Comparaison entre la pièce conventionnelle, la pièce topologiquement optimisée et la pièce topologiquement optimisée et ayant reçu les modifications de fixation. (Ren & Galjaard, 2015)

Un gain important de masse et de volume est mis en évidence en comparant les pièces traditionnelles aux pièces fabriquées par FA.

Ainsi les avantages de la fabrication additive sont:

- diminution de la masse des pièces mobiles, de la masse embarquée, voir Figure 20 (c) à la page 24,
- diminution des effets d'inertie (vibrations, fatigue des pièces de liaison...),
- diminution de la résistance au mouvement,
- diminution des dimensions des composants de transmission de puissance et de guidage (roulement, clavette...),
- diminution du brut de matière,
- diminution du coût matière.

II.2.3.5. Complexité des surfaces

Les technologies de FA offrent au concepteur une plus grande liberté dans la réalisation des formes géométriques complexes. L'avantage de la FA est que cette complexité n'entraîne aucun coût supplémentaire (voir Figure 24). En effet, aucun outillage, aucune expertise supplémentaire de l'opérateur, ni même un temps de fabrication supplémentaire ne sont nécessaires ; alors qu'il existe une relation directe entre la complexité géométrique d'une pièce et le coût du moule pour l'obtenir en fonderie (Gao et al., 2015).

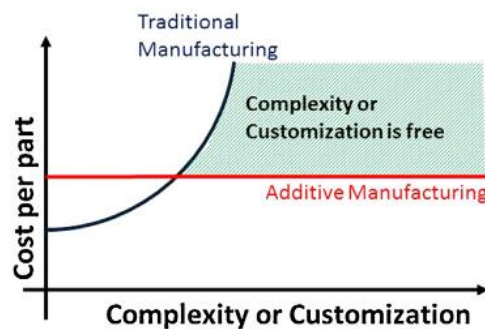


Figure 24. Comparaison du coût de la complexité de surface entre la FA et les procédés traditionnels (Conner et al., 2014)

La conception de formes complexes, à coût fixe quelle que soit la taille de la série, présente de nombreux avantages. Cela permet :

- une adaptabilité aux modifications fréquentes (pour les moules par exemple, Figure 20 (e)),
- de réaliser des formes complexes (obtenues par exemple lors d'une optimisation topologique), voir Figure 20 (b, c, f, h),
- d'obtenir des états de surface variés, voir Figure 20 (d),
- de réaliser des canaux internes ou d'autres formes creuses, voir Figure 20 (e, f),
- d'intégrer des fonctions supplémentaires (comme l'absorption au choc, les échanges thermiques, l'équilibrage statique et/ou dynamique d'une pièce, la diminution des pertes de charges, la diminution des pertes de frottement, l'augmentation de l'aérodynamisme, l'amortissement...), voir Figure 20 (e, f, g),
- de réaliser des pièces uniques, voir Figure 20 (h),
- de réaliser du bio-mimétisme, voir Figure 20 (b).

Cette dernière possibilité permet de concevoir des pièces pour la FA par bio-mimétisme. Le biomimétisme tire profit des formes, des processus et des écosystèmes de la nature, puis les imite pour concevoir (Rosen, 2007). La bio inspiration et la FA permettent d'ouvrir le champ de créativité aboutissant ainsi à des conceptions de pièces répondant au mieux au besoin (Emmelmann, Sander, et al., 2011).

II.2.3.6. Optimisations sur les matériaux et optimisations spécifiques

La FA offre de nombreuses autres possibilités. Quelques exemples sont montrés dans les sous-chapitres suivants. Ces optimisations possibles ne sont pas étudiées dans ce mémoire de thèse, toutefois, dans la suite de ce manuscrit, il sera proposé les références utiles dès que cela sera utile.

☞ Matériaux innovants

On entend par matériaux innovants, les matériaux architecturés, auxétiques, à gradients et enfin, les matériaux de type 4D.

- Matériaux architecturés

Dans un chapitre précédent, il a été noté que l'interprétation des densités de matière peut être effectuée par des matériaux de type lattice ou plus généralement de type architecturé.

On appelle les matériaux architecturés, les matériaux présentant des variations géométriques et/ou de composition à l'échelle mésoscopique (0,1 à 10 mm), dans le but d'obtenir des propriétés particulières à l'échelle macroscopique (Bouaziz et al., 2008), voir la Figure 20 (c).

Il existe de nombreux avantages à l'utilisation de ce type de matériau tels que :

- allègement de structures,
- modification des échanges thermiques,

- amélioration de la bio-intégration,
- absorption des chocs/impacts,
- amortissement des vibrations,
- absorption acoustique,
- ...

- Matériaux auxétiques

Les matériaux auxétiques présentent un coefficient de Poisson négatif à l'échelle macroscopique, contrairement aux matériaux conventionnels, qui ont un retrait transversal lors de la traction axiale (Li Yang et al., 2015). Les avantages de ces matériaux sont :

- Absorption des chocs,
- Adaptation de la forme en fonction d'une sollicitation.

Récemment, (Ou et al., 2018) ont proposé une nouvelle génération de matériaux auxétiques appelés les KinetiX permettant des transformations spatiales sous une sollicitation simple, voir la Figure 20 (l).

- Matériau à gradient

Un matériau à gradient est un matériau à évolution spatiale de ses propriétés par changement :

- de la densité du matériau,
- de la composition du matériau (multi-matériaux)
- des paramètres géométriques d'une structure cellulaire, voir la Figure 20 (i).

D'après (Kumar Bohidar et al., 2014), les matériaux à gradient ont un grand potentiel dans les applications où les conditions de fonctionnement sont difficiles, notamment les boucliers thermiques, les tubes d'échangeurs thermiques, les implants biomédicaux, etc.

- Matériaux 4D

D'après (Khoo et al., 2015), « L'impression 4D est un processus de fabrication additive intégrant des matériaux intelligents dont la forme de départ est celle imprimée en 3D. Après la fabrication, l'objet 3D répondrait de manière prévue aux stimuli externes de l'environnement ou par l'interférence de l'homme, ce qui entraînerait un changement de forme ou de propriétés physiques au fil du temps. ». La Figure 20 (m) présente un exemple.

☞ Intégration de composants et/ou multi matériaux

Une pièce peut être qualifiée de multi-matériaux lorsqu'elle est composée d'au moins deux matériaux primaires. Ils peuvent être distribués continûment ou non à l'intérieur de la structure (Muller, 2013). Lorsque la distribution est continue, on parle alors de pièce multi-matériaux à gradient continu.

Il existe des procédés de FA permettant la fabrication de pièces comportant plusieurs matériaux: la projection de matière (PolyJet) (Gaynor et al., 2014; Krivec et al., 2017; Meisel, 2015; Vaithilingam et al., 2016; K. Wang et al., 2015) ainsi que la stratification de couches (LOM).

D'autres procédés peuvent aussi le permettre si des prédispositions ou des modifications sur la machine sont effectués (Bandyopadhyay & Heer, 2018; Vaezi, Chianrabutra, et al., 2013) : l'extrusion de matière (FDM), la projection de liant (Binder Jetting) (Le Néel et al., 2018), le CLAD (Hofmann et al., 2014) ou dépôt de matière sous énergie concentrée (DED) ou encore et plus rarement la Photopolymérisation (SLA) et la fusion sur lit de poudre (LBM). Cette particularité permet d'obtenir des pièces dont le comportement en tout point peut être différent. De plus, dans le chapitre optimisation topologique, il a été montré que l'interprétation des densités intermédiaires peut être réalisée par un choix de réalisation de pièce multi-matériaux. Le fait de pouvoir réaliser des pièces multi-matériaux permet également des ajouts de fonctions tels que (Vaezi, Chianrabutra, et al., 2013) :

- Isoler ou protéger une partie de la pièce,
- Amortir des vibrations,
- Améliorer la conductivité thermique à des endroits précis,
- Réaliser un comportement particulier de la pièce sous sollicitation, voir Figure 20 (j),
- Augmenter une ergonomie (grip d'une poignée par exemple) ou une esthétique particulière,
- Réaliser et/ou enrober des composants électriques,
- Diminuer le volume d'une pièce (en diminuant les éléments d'assemblage par exemple),
- Diminuer le temps d'assemblage et de collage, voir Figure 20 (j).

Enfin, il est aussi possible de réaliser des composants particuliers tels que des cartes électroniques, voir Figure 20 (k).

☞ Nano-impression

La nano-impression peut se définir par la réalisation de pièces imprimées dont les formes sont à l'échelle microscopique ($< 100 \mu\text{m}$). Les procédés permettant de réaliser cela sont résumés dans l'article de (Vaezi, Seitz, et al., 2013). Les applications sont nombreuses comme l'indique (Nanoscribe, 2017).

☞ Réparation et ajouts de fonctions

Certains procédés de FA (CLAD, WAAM) permettent de réparer des pièces mécaniques par ajout de matière (Frechard, 2015; Harris, 2017). Cela ajoute un avantage à la fabrication d'un point de vue impact environnemental matière (Walachowicz et al., 2017; Wits et al., 2016).

Il est aussi possible de réaliser un ajout d'entités sur des pièces pré-produites tel que le montre la Figure 6 à la page 5.

II.2.4. Conclusion et lien entre toutes les optimisations

Comme le montre le chapitre précédent, le champ des possibilités de la FA est très varié. Ce panel ne cesse de s'étoffer grâce à la recherche. Concevoir une pièce pour la FA demande donc de connaître le champ des possibilités. Le Tableau 4 suivant recense à ce jour la plupart des articles traitant d'une ou de plusieurs des possibilités de la FA.

Tableau 4. Classement d'articles scientifiques sur les champs de possibilités de la fabrication additive

Sujet traité	Références
Conception monolithique	(Rodrigue & Rivette, 2010; Schmelzle et al., 2015; Sisca et al., 2016; S. Yang et al., 2018, 2015, 2016; S. Yang & Zhao, 2016)
Fabrication directe d'assemblage	(Bâlc & Vilău, 2017; Cali et al., 2012; Calignano et al., 2014; Cuellar et al., 2018; De Laurentis & Mavroidis, 2004; Y. Li & Chen, 2017; Y. Liu et al., 2017; Su et al., 2013)
Intégration de fonction	<ul style="list-style-type: none"> • Esthétique : (Galimberti et al., 2016; Martínez et al., 2015) • Equilibrage : (Bächer et al., 2014; Christiansen et al., 2015; Prévost et al., 2013; Xie & Chen, 2017) • Echangeur : (Belova & Vulf, 2017; Felber et al., 2016; Zakaria, 2017) • Absorbeur acoustique : (Casarini et al., 2018; C. Jiang et al., 2017)
Bio-mimétisme	(Buonamici et al., 2019; Emmelmann, Petersen, et al., 2011; Emmelmann, Sander, et al., 2011; Fayemi, 2017; Fu et al., 2014; Gebeshuber & Gordon, 2011; Geim et al., 2003; Kamps et al., 2017; K. Liu & Jiang, 2011; Maier et al., 2013; Porter et al., 2016; Reap et al., 2005; Rosen, 2007; Rui et al., 2013; Ruszaj, 2016; Schmidt & Beleggratis, 2013; Zhao et al., 2010)
Diminution de volume	(Galjaard, Hofman, Perry, et al., 2015; Galjaard, Hofman, & Ren, 2015; Ren & Galjaard, 2015)
Composants intégrés, Multi-matériaux	(Bandyopadhyay & Heer, 2018; Chu et al., 2019; Gaynor et al., 2014; Hofmann et al., 2014; Krivec et al., 2017; Le Néel et al., 2018; Meisel, 2015; Muller, 2013; Vaezi, Seitz, et al., 2013; Vaithilingam et al., 2016; K. Wang et al., 2015)
Conception légère	(Cheng et al., 2015; Chougrani et al., 2018; Kantareddy et al., 2016; Posser & Freitas de Oliveira, 2019; Prem et al., 2015; Seabra et al., 2016; L. Tang et al., 2016; L Yang et al., 2016)
Matériaux architecturés (lattice, gradient)	(Ashby, 2013; Bouaziz et al., 2008; Brechet & Embury, 2013; Cheng et al., 2015; Chougrani et al., 2018; Kessler et al., 2017; Leary et al., 2016; N. Li et al., 2018; Loh et al., 2018; Muller, 2013; Primo et al., 2017; Rosen, 2007; Rumpf et al., 2013; Sun et al., 2016; Y. Tang & Zhao, 2014, 2016; Ziegler et al., 2017)
Comportement auxétique	(de Lima & Paulino, 2018; Grimmelsmann et al., 2016; Kirsch, 1990; Lu et al., 2017; Ou et al., 2018; Smardzewski et al., 2013; Vogiatzis et al., 2017; K. Wang et al., 2015; X. T. Wang et al., 2016; Wu et al., 2019; Xiao et al., 2018; Li Yang et al., 2015; Yuan et al., 2017)
Comportement 4D	(Choong et al., 2016; Khoo et al., 2015; Noh et al., 2016; Teoh et al., 2016)
Micro- et Nano-implosion	(Alting et al., 2003; Davoudinejad et al., 2018; Kong et al., 2016; Ovsianikov et al., 2008; Y. Tang & Zhao, 2016; Vaezi, Seitz, et al., 2013; Vyatskikh et al., 2018)

La variété proposée et la diversité des applications rendent la conception difficile. Une classification des optimisations permettrait de les regrouper en différentes catégories. Chacune de ces catégories va permettre de réaliser une conception avec des apports particuliers.

Ainsi une des catégories sera celle regroupant les optimisations de l'architecture globale du système telles que la conception monolithique ou la diminution de volume. Cette catégorie sera appelée optimisation architecturale.

Les optimisations des surfaces et des fonctions du système, telles que la fabrication directe de liaison, l'ajout de fonctions, le bio-mimétisme (...), seront regroupées dans l'optimisation appelée fonctionnelle.

Enfin, les optimisations de type topologique, paramétrique ou géométrique font partie de la catégorie optimisation de forme. Dans ce mémoire, seule l'optimisation topologique sera étudiée.

En conclusion, il existe plusieurs types d'optimisations à prendre en compte lors de la conception pour la FA d'un système mécanique. Chacune de ces optimisations permet un gain sur des aspects différents tels que la masse, la fonctionnalité, le comportement mécanique... C'est pourquoi il est important dès le début de la conception de prendre en compte ces trois optimisations et d'en connaître les données d'entrée.

Les définitions complètes ainsi que l'application de ces optimisations seront détaillées au chapitre III.2.

II.3. De la liberté de forme au choix des pièces et du procédé de FA

II.3.1. Introduction

Le sous-chapitre II.3.2 est un état de l'art sur la démarche de choix des pièces à réaliser par FA. Cette étape est cruciale dès le début de la conception et le bon choix des pièces dicté par des critères bien établis est primordial.

De plus, même si les sept familles de FA référencées par la norme sont tous par ajout de matière, chacun réalisera la même pièce avec des caractéristiques (de qualité, de précision...), des matériaux et des post-traitements différents. C'est pourquoi, il est nécessaire de connaître chaque procédé avec ses capacités et ses contraintes pour choisir celui qui sera le plus adapté à la fabrication de la pièce.

Dans le sous-chapitre II.3.3, les limites de fabrication des différents procédés sont ensuite détaillées montrant les défauts et ce, que ce soit d'ordre géométrique, surfacique ou autre. Puis, il sera détaillé comment quantifier le coût de production pour permettre ainsi de choisir un procédé de FA. Quelques méthodes de mesure de l'impact environnemental seront aussi proposées. Enfin, des méthodologies de choix du procédé de FA seront présentées.

II.3.2. Choix des pièces à réaliser par FA

Les pièces à fabriquer par FA doivent être choisies selon différents critères. (Klahn et al., 2014) suggèrent quatre critères :

- conception intégrée : comprend la conception monolithique et des ajouts de fonctions,
- individualisation : personnalisation d'une pièce,
- conception légère : réduction de la masse pour les pièces mobiles,
- conception efficace : amélioration de performance, réduction des pertes pendant la phase d'exploitation.

Treize critères sont définis par (Lindemann et al., 2015) en tenant compte des aspects économiques, techniques et stratégiques. Outre les quatre critères proposés précédemment, il existe par exemple des contraintes de processus, telles que des limitations de taille, un temps de traitement ou un aspect stratégique et économique lié à la consommation de matière. En effet, les procédés de FA réduisent considérablement le ratio « buy-to-fly » car seule la matière support et parfois les surépaisseurs sont perdues. (Allen, 2006) montre que pour des pièces en titane à réaliser pour l'aérospatial dont le rapport buy-to-fly est assez élevé, la FA est avantageuse par rapport à la fabrication conventionnelle. Le ratio buy-to-fly est le rapport entre la masse de matière mise en œuvre pour réaliser une pièce et la masse qui est effectivement utilisée en fonctionnement.

De nos jours, augmenter la valeur ajoutée d'un mécanisme devient un des principaux axes de recherche. (Burkhart & Aurich, 2015) déterminent quelle pièce sera fabriquée par FA en comptant le nombre de fonctions que la FA peut améliorer. Cette étude prend en compte l'aspect environnemental ainsi que les fonctions spécifiques telles que la diminution de la masse, l'augmentation du transfert thermique, l'amélioration de la dynamique des fluides...

(Niaki et al., 2019) ont réalisé un sondage auprès de différents industriels, appartenant à différents pays et secteurs et ayant adopté la FA. Le résultat montre 24 raisons de choisir la FA pour réaliser une pièce comme le montre la Figure 25.

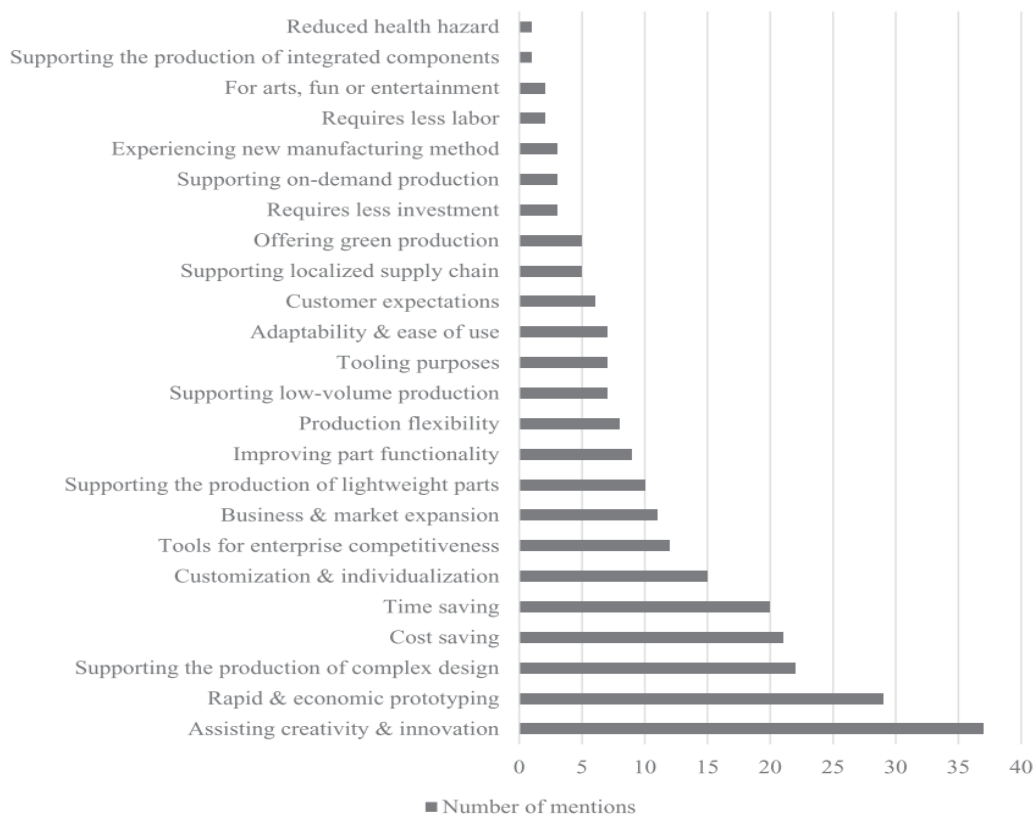


Figure 25. Raisons proposées lors d'un sondage auprès de 88 industriels pour leur choix de la FA (Niaki et al., 2019)

Ainsi, il semble que le choix des pièces à fabriquer par FA dépende de quatre critères plus ou moins liés, tels que:

- la capacité du procédé de FA choisi,
- le critère économique,

- l'impact environnemental,
- les performances du système fabriqué.

II.3.2.1. Capabilité de la FA

On entend par capabilité de la FA, l'adéquation d'un procédé de FA à réaliser une performance demandée. C'est-à-dire, la capacité d'un procédé à réaliser :

- des pièces en un matériau spécifique,
Pour certains matériaux difficiles à usiner (titane, céramique), la FA permet de produire une pièce « near net shape » (minimisant les usinages) et avec des formes plus complexes.
- dans l'intervalle de tolérance spécifié,
- ou encore dans les dimensions mentionnées.

Il est nécessaire de connaître les possibilités des différents procédés de FA, c'est-à-dire, les caractéristiques mécaniques, les dimensions maximales... Si l'un des procédés de fabrication additive répond aux attentes, il s'agit d'une raison supplémentaire de réaliser la pièce par FA.

II.3.2.2. Stratégie économique

L'impression 3D est aussi appelée fabrication digitale. Cela signifie que la fabrication de la pièce est directement réalisée à partir du fichier CAO sans nécessité d'outils supplémentaires. De plus, une pièce réalisée par FA a peu besoin de post-traitement (tels que l'assemblage ou l'usinage). Cet aspect réduit les délais de commercialisation (Lindwall et al., 2017). La chaîne logistique diminue considérablement (Cotteleer 2014; Attaran 2017; Mashhadi & Behdad 2017; Gao et al. 2015) et un rapprochement entre le concepteur et la fabrication est possible et permet réactivité et flexibilité. Enfin, la gestion de l'incertitude liée à la demande est plus facile et l'inutilité de l'outillage induit la réduction de stockage.

« Cela a un impact important sur le délai de mise sur le marché d'un nouveau produit et sur la capacité de produire facilement des modifications de modèle tout au long de la vie d'un produit » selon (Diegel et al., 2010).

Selon le procédé de FA choisi (Projection de liant, polymérisation en cuve, fusion sur lit de poudre, ou projection de matière), la fabrication de plusieurs pièces au cours de la même production est possible et induit ainsi la réduction du coût par pièce. De plus, l'utilisation de poudre non exploitée lors d'une précédente production de pièce pour le processus de fusion sur lit de poudre a pour effet de réduire considérablement le coût par pièce.

(Atzeni et al., 2010) montrent qu'une bonne conception (adaptée à la FA) permet de rendre la FA compétitive par rapport à l'injection plastique pour une production de pièces en plastique. (Gebler et al., 2014) ont déterminé le seuil de rentabilité de différents procédés de FA par rapport à des procédés conventionnels tel que le montre le Tableau 5. Au vue de l'évolution

rapide des technologies mises en œuvre, ce tableau a certainement évolué depuis la date de sa création.

Tableau 5. Seuil de rentabilité de certains procédés de FA par rapport à des procédés conventionnels (Gebler et al., 2014)

Break-even point (in pieces)	Printed material	Process comparison
279–5,800	Polymer	SLA compared to injection moulding
7,500	Polymer	FDM compared to injection moulding
14,000	Polymer	SLS compared to injection moulding
42	Aluminium	SLS compared to high-pressure die casting
190	Steel	SLM compared to milling

La FA est un procédé adapté à la réalisation de pièces uniques, individualisées et répondant à un besoin bien spécifique. Cet aspect particulier est utilisé dans les industries de la médecine ou de la bijouterie (Campbell et al., 2013; Diegel et al., 2010; Hague et al., 2003; Thompson et al., 2016).

II.3.2.3. Stratégie environnementale

Selon (Burkhart & Aurich, 2015), afin de réduire l'impact sur l'environnement, il convient d'identifier les éléments susceptibles d'être améliorés par FA, en particulier pour la phase d'utilisation. La FA est une alternative durable à l'usinage dans la production de pièces à rapport buy-to-fly élevé (Reeves, 2009).

(S. Yang et al., 2017) montrent que la conception monolithique offre des perspectives intéressantes en termes de réduction de la consommation d'énergie et de l'impact environnemental. Ce résultat est conforté par les travaux de (S. Yang et al., 2019) qui montrent que la FA peut avoir un impact environnemental plus faible que les procédés conventionnels de par non seulement la conception monolithique mais aussi la diminution de masse, l'augmentation de la durée de vie, et l'amélioration des performances fonctionnelles.

L'ajout de fonctions dans les éléments structurels permet aussi de réduire l'impact environnemental global de ces éléments multifonctionnels tel que le prouvent (Agustí-Juan & Habert, 2017; Walachowicz et al., 2017).

De plus, (Nyamekye et al., 2015) ont montré que des facteurs tels que la consommation de matériaux, les étapes de fabrication, la longueur de la chaîne d'approvisionnement ainsi que la rapidité de la production affectent l'impact environnemental.

II.3.2.4. Stratégie de performance

Le terme performance désigne l'étendue de la capacité de la FA à améliorer une pièce ou un produit d'un point de vue technique. Si la FA permet d'améliorer les performances d'un produit grâce aux optimisations et champ des possibilités (traité au chapitre II.2), alors le choix de la FA peut être fait. (Burkhart & Aurich, 2015) proposent de choisir un ou plusieurs indicateurs de

performance est de quantifier la possibilité de l'amélioration. Cela correspond par exemple à l'amélioration de la conduction thermique ou la diminution de pertes de charges...

Ce choix est couramment fait lors de la comparaison entre une pièce réalisée par un procédé d'obtention et celle que l'on pourrait obtenir par FA avec toutes les optimisations possibles. Une estimation des gains fonctionnels permet de conforter un choix.

De plus, il faut s'affranchir des freins psychologiques dus à l'apprentissage classique de conception pour les procédés conventionnels. Les formes et possibilités offerts par la FA sont très différents et beaucoup moins restrictifs que ceux des procédés conventionnels pour lesquels la plupart des concepteurs ont été formés. C'est pourquoi, pour cette étape de choix, il faut connaître toutes les possibilités de la FA ainsi que les avantages cités au chapitre II.2.

II.3.3. Choix du procédé de FA

II.3.3.1. Capabilité des procédés de FA

☞ Capabilité du procédé

Les sept procédés de fabrication définis par la norme NF E67-001 diffèrent l'un de l'autre et doivent être choisis en conséquence. Les procédés de FA sont différents de par :

- les caractéristiques propres du procédé :
 - type de matière première (métallique, plastique...),
 - état de la matière première (poudre, liquide ...),
 - les propriétés du matériau une fois fabriqué,
 - nécessité de supports,
 - nécessité d'un plateau de fabrication,
 - post traitement possible,
 - coût machine,
 - coût matière première...
- la capabilité du procédé :
 - résolutions minimales,
 - dimensions maximales de fabrication,
 - paramètres machine pouvant être contrôlés,
 - qualité géométrique et dimensionnelle,
 - productivité (empilage de pièces, rapidité de fabrication...),
 - possibilité de fabriquer des enceintes fermées,
 - possibilité de fabriquer directement des liaisons cinématiques,
 - possibilité de multi-matière,
 - possibilité de réparation...

La Figure 26 montre la sélection du procédé en fonction des caractéristiques et capabilités permettant de répondre à des besoins fonctionnels pour des pièces en polymères, et dans le

Tableau 6 se trouvent quelques tolérances réalisables en FA mais aussi par les procédés traditionnels. Les caractéristiques et capacités machines doivent être connues du concepteur. Toutefois, certaines des valeurs des tolérances minimales sont obtenues (dans la cadre de ce Tableau 6) dans des conditions particulières difficilement reproductibles en production usuelle.

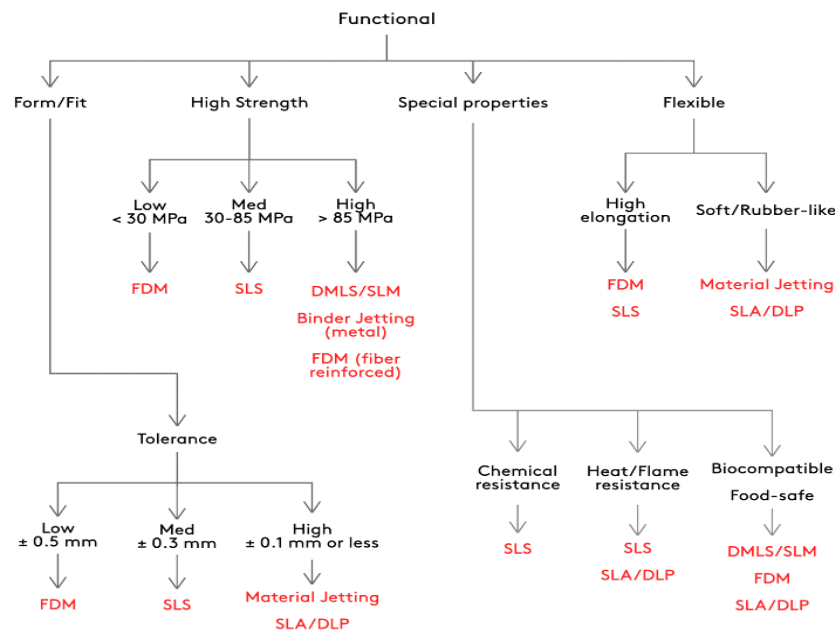


Figure 26. Choix du procédé en fonction des exigences fonctionnelles. Source : www.core77.com

Tableau 6. Liste des tolérances réalisables pour les procédés conventionnels et ceux de FA (uz Zaman et al., 2017)

Class	Manufacturing process	Tolerance (mm)
Traditional manufacturing	Sand casting	1.00–5.50
	Die casting	0.26–0.71
	Investment casting	0.1–0.59
	Low pressure casting	0.23–0.59
	Forging	0.59–3.22
	Extrusion	0.34–3.22
Additive manufacturing	Sheet forming	0.10–3.22
	Stereolithography (SLA)	0.025–0.10
	Digital light processing (DLP)	0.10–0.20
	Multi-jet modeling (MJM)	0.10–0.20
	3D printing (3DP)	0.20–0.40
	Fused deposition modeling (FDM)	0.05–0.5
	Electron beam melting (EBM)	0.20–0.40
	Selective laser sintering (SLS)	0.1–0.46
	Selective laser melting (SLM)	0.05–0.10
	Direct metal laser sintering (DMLS)	0.10–0.20
	Laminated object manufacturing (LOM)	0.25–0.50
	Ultrasonic consolidation (UC)	0.127–0.254
	Laser metal deposition (LMD)	0.125–0.250

☞ Défauts par procédé couramment rencontrés

De plus, en fonction de la stratégie de conception, de l'orientation des pièces, de la mise en place des supports, du choix du matériau, des caractéristiques et de la capacité machine, chaque procédé de FA et chaque machine diffèrent en termes de :

- gauchissement et retrait dimensionnel,
- précision de fabrication de la pièce,
- stabilité dimensionnelle de la pièce,
- rugosité de la pièce,
- dimensions minimales d'une forme,
- espace minimum entre les formes,
- capacité à réaliser un champ des possibilités de la FA,
- coût de fabrication d'une pièce.

(Berglund et al., 2019) proposent un diagramme d'Ishikawa, à la Figure 27, permettant de recenser toutes les causes possibles des défauts géométriques lors de l'impression par fusion laser sur lit de poudre (LBM). La branche « Part geometry » est importante pour réaliser une pièce correspondant aux spécifications. Toutefois, les formes géométriques entraînant un défaut de fabrication sont différentes en fonction du procédé de FA utilisé. Une classification des défauts de fabrication voire des impossibilités de fabrication peut être effectuée de la manière suivante : défauts géométriques, défauts dimensionnels, défauts surfaciques et défauts métallurgiques

Les défauts recensés permettent de déterminer si une pièce peut ou non être fabriquée par un procédé de fabrication additive. Dans ce mémoire, les défauts suivants ne seront pas traités :

- de la tenue mécanique (et défauts métallurgiques),
- de la matière première,
- les défauts résultants du paramétrage machine,
- les défauts résultants du transfert numérique entre le fichier CAO et la machine.

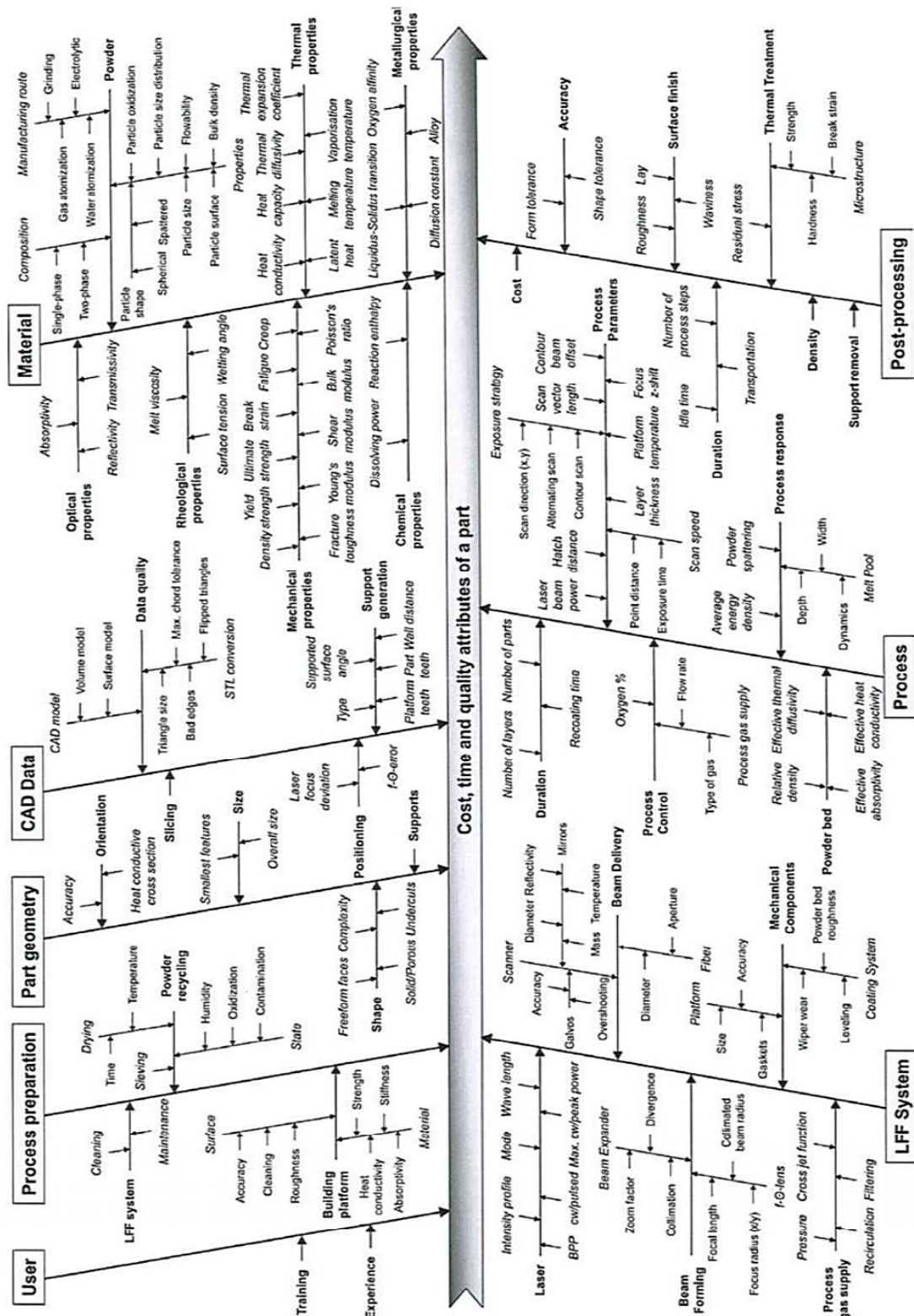


Figure 27. Diagramme d'Ishikawa pour le procédé LBM (Berglund et al., 2019)

👉 Défauts géométriques

On entend par défaut géométrique l'écart entre les formes résultant de la fabrication et les formes nominales définies par la CAO (forme cylindrique ou plane par exemple). Ces défauts


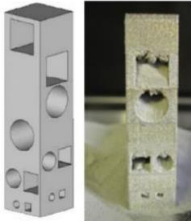
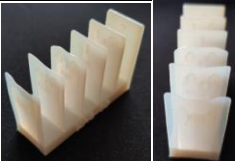


peuvent être nuisibles à l'assemblage et au bon fonctionnement. La Figure 28 montre un exemple de défaut.

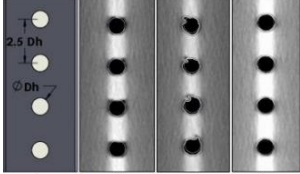
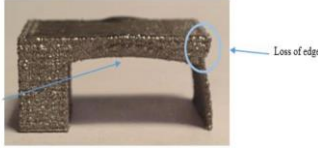


Figure 28. Défaut de réalisation d'une surface en surplomb réalisée par FDM sans support (Leary et al., 2014)

Le Tableau 7 suivant recense de manière non exhaustive les défauts identifiés lors d'impression et ce, quel que soit le procédé.

Tableau 7. Les défauts géométriques classiques en FA

Nom du défaut	Images et références	Procédés de FA concernés	Causes
Effondrement de matière	 Bavures sur un ¼ de tube réalisé par FDM (Chalvin et al., 2019)	FDM	<ul style="list-style-type: none"> – Surface à trop forte pente, en porte à faux ou en surplomb – Manque de support – Mauvaise orientation de la pièce – Mauvaise conception
Scories	 Scories sur LBM (O. Poyraz et al., 2015)	LBM	<ul style="list-style-type: none"> – Surface en porte à faux ou en surplomb – Manque de support – Mauvaise orientation de la pièce – Mauvaise conception
Manque de matière	 Paroi trop fine sur Polyjet (fabriquée par la plateforme MAQ-3D de l'université de Toulon)	Tous les procédés sauf ceux dédiés pour la nano-impression	<ul style="list-style-type: none"> – Résolution du procédé
Distorsion, gauchissement (warping)	 Gauchissement de surface réalisée par LBM (Cooper et al., 2015)  Gauchissement en FDM (Neofab, 2018)	FDM LBM EBM CLAD WAAM	<ul style="list-style-type: none"> – Retrait thermique – Retrait de solidification – Manque de support pour l'évacuation thermique – Mauvaise conception

<p>Défaut de forme</p>	 <p>Défaut de cylindricité de perçages en fonction de l'orientation de fabrication LBM (Snyder et al., 2016)</p>  <p>Défaut de planéité, d'épaisseur et de perte de l'angle vif (Vo et al., 2018)</p>	<p>FDM LBM EBM</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Retrait thermique - Manque de support pour l'évacuation thermique - Mauvaise orientation de la pièce - Manque de support pour le « maintien de la matière » - Mauvaise conception
-------------------------------	---	----------------------------	---

☞ Défauts surfaciques

Les défauts surfaciques sont ceux du 2^{ème} au 4^{ème} ordre recensés par les normes GPS. Ils sont relatifs aux ondulations, aux effets escaliers, à la rugosité...

(Pandey et al., 2007) ont proposé d'estimer la rugosité en fonction de l'inclinaison des pièces ainsi que du temps nécessaire de fabrication (Figure 29).

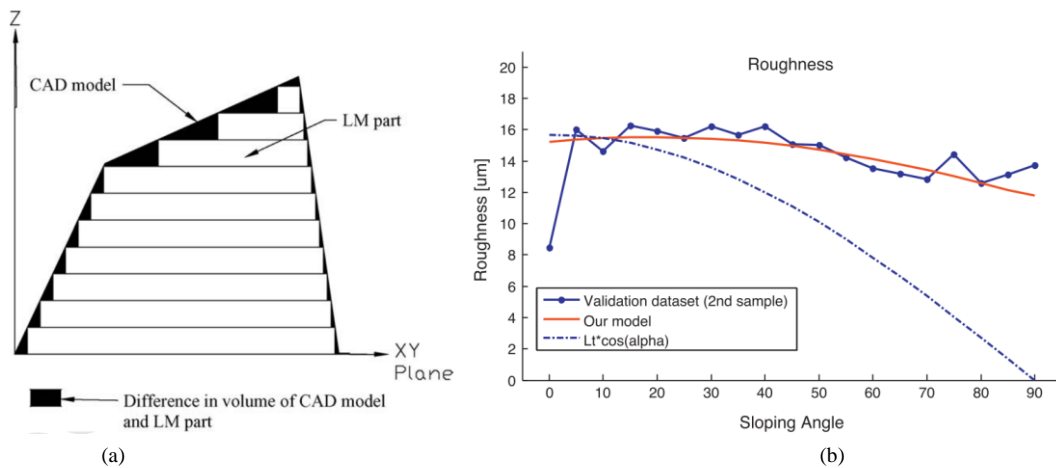


Figure 29. (a) Effet escalier (Pandey et al., 2007); (b) Impact de l'orientation de l'impression sur la rugosité pour le procédé LBM adapté de (Strano et al., 2013b)

☞ Capacité dimensionnelle

Cela peut correspondre à la capacité d'un procédé à :

- fabriquer une pièce de grande taille,

Les enceintes des machines de fabrication additive sont en général de faible volume. Cela restreint le choix de la machine et la capacité de faire des pièces de grandes dimensions sauf pour les technologies de type DED, à savoir le CLAD et le WAAM (Figure 30) qui travaille « à ciel ouvert ».



(a)

Fabricant	Machine	Dimensions de la zone de travail (mm ³)
Arcam	Arcam Q10	200*200*180
	Arcam Q20	φ350*380
	Arcam A2X	200*200*380
3D Systems	ProX 100	100*100*80
	ProX 200	140*140*100
	ProX 300	250*250*300
	ProX 400	500*500*500
EOS	EOSINT M280	250*250*325
	EOSINT M290	250*250*325
	EOS 400	400*400*400
	PRECIOUS M 080	φ80*100
SLM Solutions	SLM 125 HL	125*125*125
	SLM 280 HL	280*280*350
	SLM 500 HL	500*280*325

(b)

Figure 30. (a) Réalisation d'une pièce de 6 mètres de long par procédé WAAM. Source : WAAMAT Cranfield; (b) Capacités dimensionnelles de quelques machines (Breteau et al., 2015)

- obtenir la résolution, c'est-à-dire à fabriquer des formes (ou détails) de très petite taille,
- à respecter les tolérances dimensionnelles et géométriques.

A ce jour peu d'articles existent sur ce sujet. (Lieneke et al., 2015, 2016) ont réalisé des mesures dimensionnelles sur des pièces réalisées par les technologies FDM, SLS et LBM. Il est à noter que les intervalles de tolérance obtenus en FA dépendent de l'orientation de fabrication comme le montre la Figure 31.

En conclusion, en fonction du procédé choisi, les caractéristiques et contraintes imposées feront aboutir à la conception d'une pièce dont les formes, voire les fonctionnalités différeront de si elle était conçue pour un autre procédé. En effet, il est possible par une conception adaptée au procédé, de diminuer voire d'éviter ces défauts. La conception adaptée au procédé est l'application de règles de tracé qui seront détaillés au chapitre II.4.2.

Dimension [mm]	IT class			Position of tolerance zone		
	x	y	z	x	y	z
3	IT14	IT14	IT14	j	k	r
6	IT13	IT14	IT14	j	j	k
10	IT13	IT13	IT13	j	j	>zc
18	IT13	IT13	IT12	j	j	zc
30	IT12	IT12	IT13	J	j	y
50	IT12	IT12	IT12	m	j	z
80	IT12	IT12	IT12	n	j	r
120	IT10	IT11	IT10	u	f	t
180	IT10	IT11	IT11	u	f	u
250	IT10	IT11	IT11	v	d	v
315	IT09	IT11	IT11	v	e	t
400	-	-	IT11	-	-	r

Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting												
Sintering												
Drop forging												
Precision forging												
Cold extrusion												
Milling												
Cutting												
Turning												
Drilling												
Face milling												
Planing												
Stripping												
Circular grinding												
Additive manufact.												
FDM										xyz	xyz	z
LS										xyz	xyz	xyz
LM										xy	xy	xy

(a)

(b)

Figure 31. (a) Qualité des intervalles de tolérance (IT) et position de l'IT (DIN EN ISO 286-1) pour la FDM ; (b) Comparaison des IT entre les procédés de fabrication conventionnels et trois procédés de FA (Lieneke et al., 2015, 2016)

II.3.3.2. Stratégie économique

Le choix d'un procédé dépend aussi du coût de production. Ce coût dépend du prix de la machine, de la matière, de la consommation énergétique, du support nécessaire, du temps de production, etc...

(Hopkinson & Dicknes, 2003) ont analysé les coûts relatifs à la fabrication additive de polymères tandis que (Baumers et al., 2016) se sont penchés sur la FA métallique. (Thompson et al., 2016) ont résumé les résultats (Tableau 8)

Tableau 8. Contribution relative du coût d'achat de machines AM au coût total du produit (Thompson et al., 2016)

	Polymers (2003)			Metal (2016)	
	FDM	SL	LS	EBM	DMLS
Annual AM machine costs (k€)	23	219	73	57	59
AM machine cost per product/build (€)	2.64	3.92	0.52	513	1964
Total cost per product/build (€)	4.47	5.25	2.20	1246	4183
Relative AM machine cost per product/build (%)	59	75	24	41	47

Le choix du procédé en fonction de son coût est en priorité déterminé par le coût par pièce. (Cunico & De Carvalho, 2015) comparent les coûts des procédés de Stéréolithographie, fusion laser sur lit de poudre plastique et extrusion de matière avec l'injection plastique et ce, pour trois pièces différentes et des volumes de production différents. Ils démontrent ainsi que l'extrusion de matière (FDM) est la plus compétitive.

II.3.3.3. Stratégie environnementale

Au chapitre II.3.2.3, il a été vu que le choix des pièces à réaliser par FA peut être dicté par des critères environnementaux. Il en est de-même pour le choix du procédé de fabrication.

L'impact environnemental de ces technologies ne dépend pas seulement de la quantité de matière utilisée mais aussi de l'énergie consommée par la machine et de l'obtention du matériau de base (poudre, fil...). (Sreenivasan & Bourell, 2009) ont réalisé une étude permettant d'estimer l'énergie électrique consommée par chaque sous composant du procédé de fusion laser sur lit de poudre plastique (SLS). La majeure partie de l'énergie a été consommée par les appareils de chauffage de la chambre (37%), suivis par les moteurs pas à pas pour la commande de piston (26%), les entraînements du rouleau (16%) et le laser (16%). Cela montre que pour réduire la consommation énergétique, il faut minimiser le temps de chauffe et réaliser une fabrication avec le plateau contenant le plus de pièces possibles.

L'impact environnemental a été comparé par (Faludi et al., 2015) entre trois procédés de fabrication: l'extrusion de matière (FDM), la projection de matière (Polyjet) et un procédé d'usinage (tour numérique) et ce, pendant la phase de fabrication. Il a été constaté que la FDM a

un impact beaucoup moins important que les 2 autres technologies. De plus, l'impact environnemental ne dépend pas que du procédé mais surtout de comment on utilise les machines. L'impact est moins important lorsque la fabrication est réalisée « à plateau plein ».

(Le Bourhis, 2014; Le Bourhis et al., 2014) ont mis au point une méthodologie permettant de modéliser et de mesurer l'impact environnemental pour le procédé de FA de projection de poudres (CLAD) en prenant en compte l'ensemble des sources d'impacts liées au procédé de fabrication.

Enfin, une étude réalisée par (Ford & Despeisse, 2016), montre que la FA peut jouer un rôle sur l'impact environnemental non seulement lors de la fabrication mais aussi tout au long du cycle de vie. (Ford et al., 2015) indique aussi que la capacité de la FA à réparer des pièces permet de rallonger la durée de vie des mécanismes et ainsi joue en faveur de l'impact environnemental.

II.3.3.4. Méthodes de choix des procédés de FA

(Mançanares et al., 2015; Peko et al., 2015) proposent de choisir le procédé de fabrication additive basée sur la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), en fonction de différents critères tels que la variété de choix matière, la qualité surfacique, le post traitement, le coût....

Dans le même esprit, afin de sélectionner le procédé, (Kadkhoda-ahmadi et al., 2019) étudient simultanément les problèmes de fabricabilité, de processus et de sélection de ressources. Une méthode d'évaluation multicritères (appelée MCES) aide au choix en évaluant la possibilité de fabrication du produit.

Afin de choisir le triptyque matériau-procédé-tracé, (Hodonou et al., 2019) ont mis au point une méthodologie. Des critères tels que le ratio buy-to-fly et la masse de la pièce sont utilisés pour classer le triptyque matériau-procédé-tracé à l'aide de l'AHP. Une application dans laquelle des pièces d'un avion sont reconçues permet de montrer les différences entre les procédés conventionnels et de FA.

(Gokuldoss et al., 2017) proposent un guide de choix entre les procédés LBM, EBM et BJ, tandis que (Hoeren & Witt, 2013) comparent les limitations et possibilités de fabrication entre les procédés LBM, SLS et FDM.

(Yilmaz & Ugla, 2016) comparent les différents procédés de FA métallique et montrent les avantages du dépôt de matière sous énergie concentrée et notamment le WAAM.

A partir des banques de données sur le temps, le coût, la qualité et les caractéristiques mécaniques des pièces obtenues par les procédés de FA, (Y. Zhang et al., 2014) proposent une méthode numérique permettant de classer les procédés pour réaliser le choix optimal.

II.3.4. Conclusion

En conclusion, le lien procédé – matériaux – tracé est très étroit (Jared et al., 2017). Il est impératif de connaître l'impact de chacun de ces trois critères afin de choisir correctement le procédé, la machine, son paramétrage, le matériau et enfin les règles de tracé. De plus, le choix du procédé induit un impact environnemental qu'il faut prendre en compte. Le Tableau 9 est un récapitulatif des articles scientifiques rédigés à ce jour. Ils sont classés en fonction des procédés de fabrication et des sujets traités.

Il est possible de concevoir une pièce puis de choisir le procédé le mieux adapté, mais, en fonction du parc machine, le procédé peut être imposé et la conception sera réalisée d'après les caractéristiques et capacités machine.

Ainsi, le choix d'un procédé doit se faire en fonction des capacités machines (volume réalisable, matériaux...), des exigences du concepteur (précision, qualité...), ainsi que des exigences économique (coût par pièce, temps de fabrication...) et environnementales.

Tableau 9. Classement des articles scientifiques sur la prise en charge des défauts et sur l'impact environnemental en fonction des procédés de fabrication étudiés

Procédé de FA	Références d'articles scientifiques	Support	Enceinte	Rugosité	Défaut géométrique	Tolérancement	Orientation de fabrication	Temps	Coût	Paramétrage machine	Environnement
Pour la plupart des procédés	(Das et al., 2015)										
	(Garaigordobil et al., 2018) ;										
	(J. Jiang et al., 2018)										
	(uz Zaman et al., 2017)										
	(Lieneke et al., 2015, 2016)										
	(Pandey et al., 2007)										
	(Townsend et al., 2016)										
Photopolymérisation en cuve	(Ahn et al., 2009)										
	(Brajlih et al., 2011)										
	(Byun et al., 2006)										
	(Hu et al., 2015)										
	(Oh & Behdad, 2016)										
Projection de matière	(Faludi et al., 2015)										
	(Brajlih et al., 2011)										
Projection de liant	(Chen & Zhao, 2016)										
Extrusion de matière	(Boyard et al., 2018)										
	(Brajlih et al., 2011)										
	(Byun et al., 2006)										
	(Faludi et al., 2015)										
	(Gold & Turner, 2015)										
	(Hornus et al., 2015)										
	(Hu et al., 2015)										
	(Kuo et al., 2017)										
	(Leary et al., 2014)										
	(Reiner & Lefebvre, 2016)										
	(Thrimurthulu et al., 2004)										

		(Xie & Chen, 2017)													
		(Zwier & Wits, 2016)													
Fusion sur lit de poudre	SLS	(Allison et al., 2017)													
		(Brajlih et al., 2011)													
		(Delfs et al., 2015, 2016)													
		(Faludi et al., 2017)													
		(Gardan & Schneider, 2015)													
		(Kruth et al., 2005))													
		(Sreenivasan & Bourell, 2009)													
	LBM	(B. Zhang et al., 2019)													
		(Byun et al., 2006)													
		(Calignano, 2014) ;													
		(Calignano, 2018)													
		(Cloots et al., 2013, 2017)													
		(D. Wang et al., 2019)													
		(Fox et al., 2016)													
		(Gaynor & Guest, 2016)													
		(Järvinen et al., 2014)													
		(Kruth et al., 2005)													
		(Kuo et al., 2017)													
		(Lariviere et al., 2017) ;													
		(Mbow et al., 2019)													
		(Mumtaz & Hopkinson, 2010)													
		(O. Poyraz et al., 2015)													
		(Patterson et al., 2017)													
		(Snyder et al., 2016)													
		(Strano et al., 2013a)													
		(Strano et al., 2013b)													
(Vandenbroucke & Kruth, 2006)															
(Z. Li et al., 2018)															
(Zeng, 2015) ;															
EBM	(Cooper et al., 2015)														
Dépôt de matière sous énergie concentrée	CLAD	(Le Bourhis et al., 2014, 2013)													
	WAAM	(Lockett et al., 2017)													
		(Liberini et al., 2017)													
		(Campatelli et al., 2019)													
		(Müller et al., 2019)													
Stratification de couches	(Byun et al., 2006)														

II.4. De la liberté de forme aux méthodes de conception

II.4.1. Introduction

Tous les chapitres précédents montrent que de nombreux aspects, de nombreuses disciplines, des connaissances multiples et variées sont à prendre en compte lors de la conception d'une pièce ou d'un assemblage pour la FA (Figure 32). Du choix des pièces à faire en FA au post-traitement en passant par les optimisations, le concepteur a de nombreuses nouvelles compétences à acquérir (Durakovic & Durakovic, 2018; Thompson et al., 2016; Vaneker, 2017). Afin d'aider les concepteurs, des méthodologies globales de conception pour la fabrication additive ont été proposées dans la littérature. Ces méthodologies sont regroupées sous l'appellation DfAM pour *Design for Additive Manufacturing*. Le terme DfAM est couramment utilisé dans la littérature. Or, il regroupe différents types d'applications et d'utilisations. C'est

pourquoi, il est important d'établir la définition des différentes aides et méthodologies de conception. Dans ce mémoire, il sera établi quatre familles d'aide à la conception pour la fabrication additive dont les définitions sont décrites dans le Tableau 10.

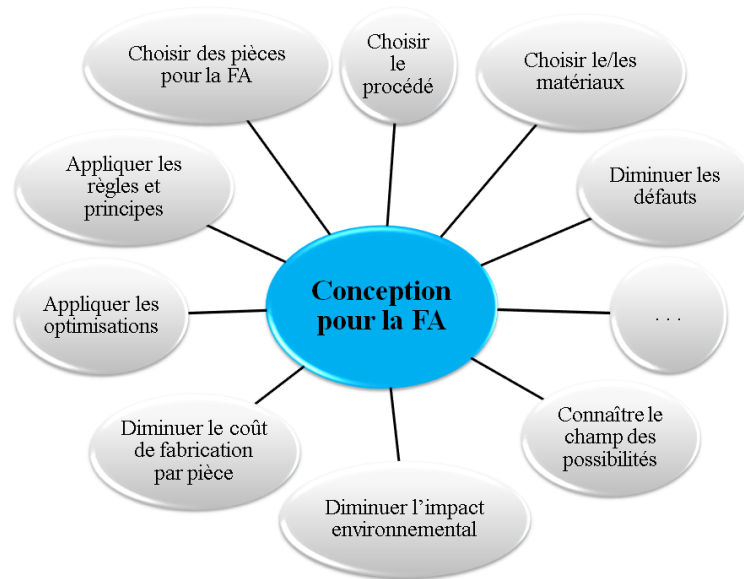


Figure 32. Les domaines interagissant avec la conception pour la FA

Certains points du Tableau 10 ont été vus dans ce mémoire :

- La fabricabilité a été traitée au chapitre II.3.3 page 37 ;
- Les règles de tracé ont été traitées au chapitre II.3.3 page 37 ;
- L'aide à la conception a été en partie traitée aux chapitres II.2.3.1 page 24, II.3 page 33 et II.3.3 page 37.

C'est pourquoi la suite de ce chapitre sera consacrée aux autres apports de la littérature scientifique concernant la conception pour la FA à savoir :

- Les règles de conception,
- Les méthodologies de conception pour la FA.

Tableau 10. Définitions concernant le domaine de la conception pour la FA

Définitions	
Données de fabricabilité	Montre les capacités machine à réaliser des formes, des états de surfaces, à atteindre une qualité spécifiée... Les tests peuvent aussi informer sur le temps de fabrication, les impacts de l'orientation de fabrication ainsi que les paramètres machines tels que la vitesse d'un laser ou l'épaisseur d'une couche. La fabricabilité est issue de tests valables par machine pour un procédé donné et un matériau. La fabricabilité permet d'aboutir au choix du procédé.
Règles et principes de tracé	Définition des formes et dimensions admissibles propres à un procédé et un matériau. Les règles sont généralement issues des tests de fabricabilité. Elles sont couramment utilisées au stade de la conception de définition pour affiner la forme ou optimiser les caractéristiques géométriques (par exemple, définir précisément les congés, les rayons, les épaisseurs de paroi, etc.) (Pradel et al., 2018). Ces règles prennent en compte la gestion des supports, de l'orientation. Un principe regroupe des règles générales et conseils, sous forme littérale, découlant du bon sens et d'expériences, pour obtenir une pièce qui répond à toutes les exigences.

Aides à la conception	Cela correspond aux aides ou principes apportés pour une étape de conception ou une application particulière, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> • l'aide à l'innovation de la conception, • le choix des pièces pour la FA et du procédé, • l'aide au concepteur pour trouver les « bonnes idées » du champ de possibilités de la FA, • concevoir pour l'environnement, concevoir pour diminuer le coût...
Méthodologies de conception	<ul style="list-style-type: none"> • Méthodologie globale (Thompson et al., 2016) définissent le DfAM comme une « pratique consistant à concevoir et à optimiser un produit en prenant en compte son système de production afin de réduire les délais et les coûts de développement, ainsi que d'accroître les performances, la qualité et la rentabilité. Ceci est fait en prenant en compte simultanément les objectifs de conception et les contraintes de fabrication ». <ul style="list-style-type: none"> • Méthodologie générique Méthodologie abstraite montrant les relations entre les domaines touchés par la conception.

II.4.2. Les règles de conception

La fabrication additive permet de réaliser des formes géométriques très complexes jusqu'alors irréalisables (ou difficilement) par des procédés conventionnels. Ainsi, que ce soit dans le domaine de la santé, de l'art, de la mode ou de la joaillerie, les réalisations dites digitales ont émergé.

Malgré une apparente liberté de tracé de forme, la fabrication additive impose des contraintes de fabrication impliquant un tracé particulier (Hague et al., 2003). Les limites de chacun des procédés montrés au chapitre II.3 peuvent être évitées voire éliminées grâce à un bon tracé.

C'est pourquoi, chaque règle de tracé est adaptée à une technologie de FA. La définition de « règles de tracé » est détaillée dans le Tableau 11 à la page 51.

Comme l'indique (Saunders, 2017b), les formes optimales d'une pièce obtenue par optimisation topologique ne seront pas adaptées exactement au procédé de fabrication (Figure 33). En effet, les formes obtenues par optimisation topologique ne prennent pas encore en compte les contraintes de fabrication (à des prix abordables) ce qui engendre des défauts présentés au sous-chapitre II.3.3.1. C'est pourquoi, en fonction du procédé choisi, des modifications de tracé doivent être réalisées.



Figure 33. Comparaison entre la pièce obtenue par optimisation topologique (à gauche) et la pièce ayant subi en plus des modifications suivant les règles de tracé adaptées au procédé LBM pour diminuer les supports et le post traitement (à droite). (Saunders, 2017b)

(Kranz et al., 2015) et (Adam & Zimmer, 2014) proposent un regroupement des règles de tracé tout comme cela a été réalisé pour la fonderie. Toutefois ces règles ne sont applicables que pour les technologies LBM pour le premier, et en plus du LBM au FDM et SLS pour le deuxième (Figure 34).

Group	Typ	Attribute	Description		Design for manufacturing		LS	LM	FDM
			Regular	Special	Unsuitable	Suitable			
Basic elements	Cylinders / Bores	Outer radius	<p>Cylinders' outer radius should be large enough to structure each part layer with a boundary-line and enclosed raster-lines to minimize dimensional deviations and to avoid defects.</p> <p>LS: $r_o > 0,6 \text{ mm}$ LM: $r_o > 0,3 \text{ mm}$ FDM: $r_o > 1,5 \text{ mm}$</p>			X	X	X	
			<p>If their curvatures are mainly approximated by layers cylinders' outer radii should be as large as possible in order to decrease the approximation error related to the nominal outer radius.</p>			X	X	X	
		Orientation	<p>Cylinders should be oriented orthogonally to the building plane to achieve the smallest possible dimensional deviations.</p>			X	X	X	
		Inner radius	<p>Bores' insides that regularly require support structures can be manufactured without support structures if the bores' inner radii are small enough.</p> <p>LM: $r_i \leq 4,5 \text{ mm}$ FDM: $r_i \leq 5,0 \text{ mm}$</p>				X	X	
		Length	<p>Bores' lengths must be short enough to enable a sufficient removal of powder which is contained insid the bores.</p> <p>LS: $l \leq 8 * r_i$ LM: $l \leq 400 * r_i$ (Maximum tested ratio)</p>			X	X		

Figure 34. Extrait de règles de tracé proposées par (Adam & Zimmer, 2015) pour les formes cylindriques

Les règles de tracé prennent en compte les capacités des procédés et leurs contraintes. Par exemple :

- Certaines technologies - comme par exemple FDM, SLA, LBM - nécessitent l'utilisation de support permettant la mise en place de surfaces en porte à faux. Chaque technologie de FA a un procédé spécifique d'enlèvement des supports. Il se fait par dissolution pour la FDM ou par usinage pour la LBM par exemple. Quelle que soit la technique d'enlèvement, il est souvent nécessaire que les supports soient accessibles.
- Pour les technologies WAAM, CLAD ou LBM, le plateau, sur lequel est fabriquée la pièce, doit être désolidarisé de cette dernière. Cette étape est effectuée par exemple par usinage, découpe au fil électroérosion ou par découpe laser.
- Pour le WAAM, des règles de tracé ont été proposées par (Greer et al., 2019; Lockett et al., 2017) avec une étude sur l'orientation de fabrication.

De nombreux constructeurs de machines proposent des règles de conception pour éviter les défauts en fonction du matériau et des procédés. Une liste de publications sur les règles de tracé est donnée dans le Tableau 11.

Tableau 11. Références sur les règles de tracé pour la FA classées par procédé

	Procédé de FA									
	Photopolymérisation en cuve	Projection de matière	Projection de liant	Extrusion de matière	Fusion sur lit de poudre			Dépôt de matière sous énergie concentrée		Stratification de couches
					SLS	LBM	EBM	CLAD	WAAM	
Références sur les règles de tracé pour la FA	(Adam & Zimmer, 2014, 2015)									
	(Ayre, 2014)									
	(BluEdge, 2018)									
	(Booth et al., 2017, 2016)									
	(EOS_GmbH, 2014)									
	(Feng et al., 2018)									
	(Greer et al., 2019)									
	(Kannan, 2017)									
	(Kranz et al., 2015)									
	(Lockett et al., 2017)									
	(Neofab, 2018)									
	(Neofab, 2019)									
	(Saunders, 2017a)									
	(Saunders, 2017b)									
	(Sells & Bowyer, 2013)									
	(Stratasys Ltd., 2018)									
	(Thomas, 2012)									
	(Vicente et al., 2015)									
(Walton & Moztarzadeh, 2017)										

A ces règles de tracé, peuvent s’ajouter quelques principes de base. De nombreuses contributions scientifiques traitent soit d’un point particulier, soit de l’ensemble des points. Des règles générales sont proposées pour adapter au mieux la conception à la fabrication additive (Gibson, Goenka, et al., 2010). Les principes sont des conseils sous forme littérale, découlant du bon sens et d’expériences, aidant le concepteur. Ces principes sont la jonction entre les règles de tracé, le coût, la production, cela permet d’adopter un nouveau paradigme. La plupart du temps, ces principes sont applicables à tous les procédés de FA. Toutefois, certains sont ciblés sur un procédé particulier. Par exemple, (Walton & Moztarzadeh, 2017) proposent une série de neuf principes pour la réalisation d’une pièce sous EBM. Tandis que (Booth et al., 2016) proposent 16 principes applicables aux procédés de photopolymérisation en cuve et d’extrusion de matière. 23 principes de conception ont été identifiés par (Perez et al., 2015) à partir d’une étude basée sur les CAO publiées sur le site Thingiverse.com. A partir de 67 CAO publiées, classées en fonction de leur nombre de « Like » et de la quantité de téléchargement, les auteurs ont étudié les améliorations apportées ainsi que les commentaires, concluant sur des principes généraux.

En se focalisant sur le procédé d’extrusion de matière (FDM), (Medellin-Castillo & Zaragoza-Siqueiros, 2019) proposent de diviser les principes de conception en quatre catégories :

- Principes sur la géométrie. Ces principes regroupent la prise en compte :
 - des supports, porte-à-faux, et cavités,
 - de la dimension des pièces,
 - des épaisseurs des parois,
 - des caractéristiques géométriques (angles vifs, détails sur surfaces...),
 - de l'orientation de fabrication,
 - de la stratégie du dépôt de fil (type de remplissage, nombre de contours...).
- Principes sur la qualité qui traitent :
 - du vrillage et de la distorsion des pièces,
 - de l'état de surface,
 - du post traitement (support, revêtement...).
- Principes sur la matière, aidant sur :
 - le choix du matériau,
 - comment obtenir des pièces avec une propriété mécanique attendue.
- Principes environnementaux départagés en trois parties :
 - coût de la pièce,
 - consommation énergétique,
 - résistance au milieu environnant.

II.4.3. Les aides à la conception pour la FA

L'aide à la conception a été en partie traitée aux chapitres :

- II.2.3.1 page 24 sur le champ des possibilités en FA,
- II.3.1 page 33 sur le choix de pièces à réaliser par FA,
- II.3.3 page 37 sur les défauts et limitations des procédés puis du choix du procédé.

A chacun de ces chapitres, une liste des références (qui se veut la plus complète possible) est proposée.

Or les aides pour la conception correspondent aux apports de la littérature sur la conception d'une pièce ou d'un produit mécanique pour la FA, quelle que soit l'étape de la conception. En effet, chacune de ces étapes, indiquées Figure 38, ont fait l'objet d'améliorations. Un état de l'art est fait dans ce sous-chapitre sur les différentes aides que ce soit pour une étape de conception, un point particulier ou englobant plusieurs étapes.

II.4.3.1. Aides pour la formation des idées et l'exploitation de la FA

(Rias et al., 2017) proposent une aide pour libérer des barrières psychologiques lors de la conception. En effet, les compétences en conception pour les procédés conventionnels peuvent être un obstacle pour l'exploitation des champs de possibilités de la FA. (Richter et al., 2018) établissent 6 points permettant de libérer le concepteur et pour utiliser tout le potentiel de la FA :

- connaître le champ des possibilités de la FA,
- re-formuler la définition de l'objectif de conception,

- modéliser le produit pour améliorer l'abstraction et l'idéation,
- prendre du large (travailler hors de son bureau),
- se créer des ressources de connaissances,
- travailler avec des équipes interdisciplinaires.

(Laverne et al., 2015) détaillent une méthodologie de conception prenant en compte les opportunités et contraintes de la FA pour stimuler une créativité adaptée à la FA.

II.4.3.2. Aides sur un point particulier

Des aides à la conception pour la FA peuvent être orientées sur l'amélioration d'un point de conception. Par exemple l'étude de (Kamps et al., 2018) aboutit à un circuit hydraulique optimisé permettant d'assurer une lubrification utilisant une puissance de pompe réduite.

L'orientation des pièces lors de la fabrication a une influence sur beaucoup de caractéristiques (la rugosité, la qualité géométrique, la quantité de support ...). C'est pourquoi, (Leutenecker-Twelsiek et al., 2016a) ont étudié l'impact effectif entre le choix d'une orientation et la conception de la pièce. Les surfaces fonctionnelles seront modifiées pour diminuer les surfaces en porte à faux, la quantité de support, les défauts géométriques etc. Cet article donne une méthode pour choisir la meilleure orientation à partir des surfaces fonctionnelles et comment adapter la forme des surfaces fonctionnelles pour diminuer la quantité de support...



Figure 35. Impact du choix de l'orientation de la pièce sur sa conception l'axe z étant celui du dépôt de matière (Leutenecker-Twelsiek et al., 2016a)

La prise en compte de tous les cas de charges pendant tout le cycle de vie d'un produit est difficile à réaliser. (Benoist et al., 2018a, 2018b) proposent la prise en compte des efforts de post-traitement tels que l'usinage des pièces. Ainsi l'optimisation topologique de la pièce sera-t-elle effective pour tout le cycle de vie.

(L. Li et al., 2019) ont opté pour la réalisation d'un algorithme informatique permettant d'optimiser la conception d'une pièce :

- en optimisant l'orientation de fabrication,
- en optimisant la génération de la trajectoire du dépôt,
- en intégrant l'optimisation du volume de support dans l'optimisation topologique.

Afin d'aider les concepteurs quels qu'ils soient (novice ou non), et de montrer le champ des possibilités de la FA, (Leutenecker-Twelsiek et al., 2016b) ont conçu et fabriqué un

démonstrateur. C'est une perceuse qui a été reconçue pour être entièrement réalisée par FA en exploitant toutes les opportunités du procédé. De nombreux ajouts de fonctions ont été effectués, la conception monolithique a été exploitée et l'optimisation topologique a permis un allègement du système. Ce démonstrateur permet de visualiser de manière concrète toutes les améliorations possibles.

(Lindemann et al., 2015) reconçoivent une pièce en exploitant quatre approches différentes (Figure 36) :

- reconception directe sous CAO des résultats de l'optimisation topologique (Figure 36 (a)),
- utilisation de règles de conception de la FA sans l'optimisation topologique (Figure 36 (b)),
- utilisation des résultats de l'optimisation topologique et reconception à partir des fonctions types de la CAO (par exemple : extrusion, révolution...) (Figure 36 (c)),
- utilisation de l'optimisation topologique, des fonctions de CAO standard et des règles de conception pour la FA (diminution des supports par exemple) (Figure 36 (d)).

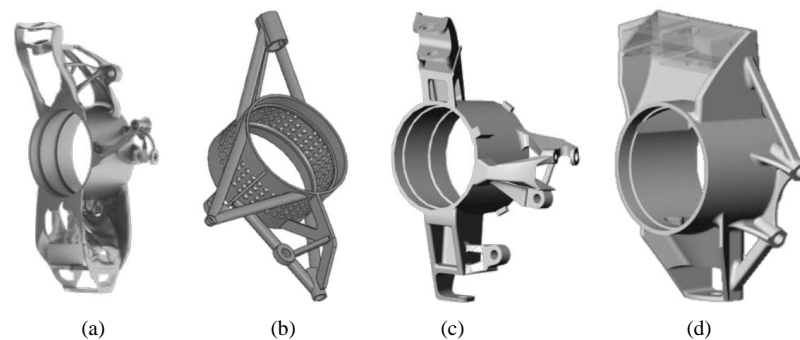


Figure 36. Différentes approches pour concevoir une pièce optimisée pour la FA (Lindemann et al., 2015). (a) CAO issue de l'optimisation topologique; (b) Application des règles de conception sans optimisation topologique ; (c) Utilisation des fonctions standards de la CAO sur l'optimisation topologique ;(d) Application des règles de conception, des fonctions standards de la CAO sur l'optimisation topologique

La comparaison entre les quatre conceptions permet de dire que la troisième approche est la plus facile à réaliser actuellement en exploitant l'avantage de l'optimisation topologique. En effet, la réduction de masse est effective tout en restant dans la « zone de confort » du concepteur (utilisation maîtrisée des outils CAO). Cela a permis aussi de souligner le manque à cette époque :

- d'outils de CAO, nécessitant un développement de nouvelles fonctionnalités tel qu'un traitement de surface de forme libre plus simple,
- ainsi que des algorithmes de TO prenant en compte les contraintes de fabrication appropriées pour la FA.

Les informations des capacités de chaque procédé et des machines de FA associées sont nombreuses. C'est pourquoi, (Bikas et al., 2019) proposent de réaliser une conception dont chaque étape est alimentée par des données de capacités (comme les épaisseurs minimales, nécessité de support ...).

II.4.3.3. Aides pendant quelques étapes de conception

Certains articles proposent des méthodologies de conception dont le point de départ et le point d'arrivée sont déjà estimés. Par exemple (Tsakiris et al., 2018) ont initialement choisi de réaliser des pièces mécaniques par FA à l'aide des procédés de fusion laser sur lit de poudre (SLS et LBM). L'orientation des pièces ainsi que leur position sur le plateau, l'épaisseur des couches et enfin le matériau sont les premiers éléments choisis. La conception et l'optimisation viennent par la suite.

(Laverne et al., 2017; Leutenecker et al., 2017) proposent un apport structuré de connaissances par des documents informatiques, tableaux interactifs, permettant au concepteur d'avoir un aperçu large de la FA, de ses opportunités et de ses limites.

(S. Renjith, 2018; S. C. Renjith & Park, 2018) proposent une méthode de conception comprenant trois étapes. La première consiste en la formulation du problème de conception par les méthodes axiomatique et TRIZ et en détaillant les possibilités de la FA. La deuxième est la conception prenant en compte les capacités du procédé de FA choisi et aboutit aux premières solutions. Puis enfin, la dernière étape consiste à réaliser le dessin de définition compatible avec le procédé de FA.

(Asadollahi-Yazdi et al., 2017) proposent une conception orientée DfM (Design for Manufacturing) dans laquelle le lien entre les contraintes de fabrication et la conception est omniprésent.

De nombreuses études mettent en avant le gain de masse, ainsi que la diminution du nombre de pièces grâce à l'optimisation topologique. Ces pièces allégées ont, pour la grande majorité, gardé leur architecture initiale (c'est-à-dire, l'emplacement des centres de liaisons). Toutefois, grâce à la FA, il est possible de réaliser des pièces répondant aux critères tout en modifiant leur architecture et par conséquent, leur encombrement. Ainsi, (Ren & Galjaard, 2015) proposent la reconception d'une pièce initialement réalisée par procédé mécano-soudé. Le résultat obtenu est une pièce dont la masse est divisée par quatre et le volume par deux (voir la Figure 23 à la page 28).

De nombreux livres sont sources d'aide à la conception. (Hällgren, 2017) détaille différents aspects du procédé de fusion laser sur lit de poudre tels que le coût, les contraintes de fabrication, les différences entre le LBM et EBM ... (Barlier & Bernard, 2016; Gibson, Rosen, et al., 2010) ont proposé des livres complets sur tous les procédés de FA, leur avantages et inconvénients...

II.4.4. Les méthodologies de conception pour la FA

(Rosen, 2007) est un des premiers à avoir proposé une méthodologie générique de conception pour la FA ouvrant l'étude aux champs des possibilités de la FA et au bio-mimétisme. La

méthodologie proposée (Figure 37 (a)) englobe la recherche de concept, la sélection du procédé, les étapes de conception ultérieures et la conception pour la fabrication.

(Salonitis, 2016) aide les concepteurs à prendre en compte tous les aspects du processus de FA grâce à la méthode de conception axiomatique. Quatre domaines sont définis (Figure 37 (b)): besoins client, exigences fonctionnelles, paramètres physiques et les paramètres de production. Afin d'améliorer la conception pour la FA, la méthodologie générique proposée introduit les directives de fabricabilité dès les premières étapes de conception, dans les domaines fonctionnel et physique.

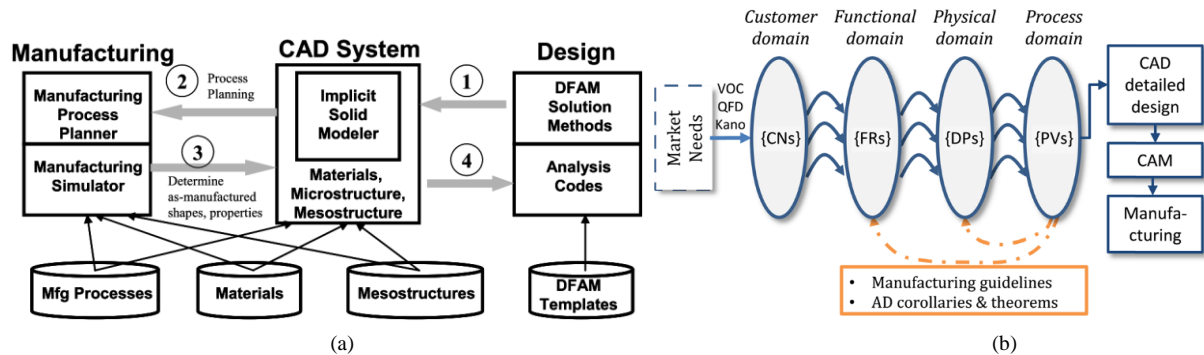


Figure 37. (a) Méthodologie DfAM proposée par (Rosen, 2007) ; (b) Méthode axiomatique pour la FA (Salonitis, 2016)

(Rodrigue & Rivette, 2010) sont les premiers à proposer une méthodologie globale de conception pour la FA. Le cas d'étude est un produit mécanique dont les pièces qui font partie de la même classe d'équivalence sont unies puis chaque composant est optimisé topologiquement.

(Ponche, 2013) a mis en place une démarche globale de DfAM prenant en compte des avantages de l'optimisation topologique et des contraintes de fabrication des procédés de dépôt de matière sous énergie concentrée et plus particulièrement le CLAD. Cette méthodologie se décompose en quatre grandes étapes :

- définition du domaine de conception,
- définition de la géométrie théorique,
- définition de la géométrie dite réaliste,
- qualification et classement des différentes solutions.

L'étude de la trajectoire du dépôt de matière est aussi effectuée pour la technologie CLAD. Cette étude est une des premières à ouvrir la conception pour la FA en exploitant ses opportunités et en appliquant les contraintes.

Une démarche globale qui prend en compte l'évolution du domaine des possibles en conception, et permet la génération de formes nouvelles tout en respectant les contraintes de fabrication de fusion sur lit de poudre par faisceau d'électron (EBM) a été rédigée par (Vayre, 2014). Les quatre étapes sont les suivantes :

- génération de forme initiale,
- choix du balançage (autrement dit de l'orientation de la pièce),

- raffinement de la géométrie,
- validation de la pièce.

Ces deux méthodologies proposées ne prennent pas tous les aspects de la FA en compte tels que :

- l'orientation de la pièce qui se base uniquement sur l'espace machine sans prendre en compte l'état de surface final de la pièce, ni la résistance mécanique de celle-ci,
- la génération du support qui est laissée au logiciel de tranchage,
- tout le champ des possibilités qui n'est pas exploité,
- la conception d'un assemblage complet.

(Boyard, 2015) propose une méthode globale dont l'étape clef est la mise en place d'un graphe des fonctions. Le graphe permet de représenter les liens entre les surfaces fonctionnelles par les tolérances géométriques. L'aspect paramétrage machine a été pris en compte tout au long de la méthodologie. La méthodologie est composée de trois étapes permettant :

- d'intégrer les supports de la pièce lors de la phase de conception,
- d'anticiper les défauts de forme,
- et de minimiser le temps et la matière consommée directement lors de la conception CAO.

La méthodologie est orientée pour le procédé FDM (malgré une volonté d'ouverture à tous les procédés de FA) pour l'adapter à la FA multi-matériaux.

Toutes ces méthodologies globales précédemment présentées ont en commun les étapes de conception suivantes, essentielles pour la FA (comme le montre la Figure 38) :

- recueil des exigences,
- optimisation,
- interprétation des résultats,
- reconception,
- analyse par éléments finis,
- conception finale.

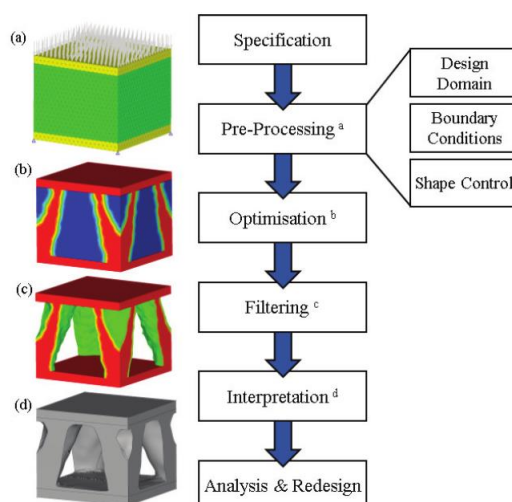


Figure 38. Etapes de l'optimisation topologique, avec l'exemple d'une réduction de masse de 75% pour un cube soumis à une charge de compression sur la face supérieure (Walton & Moztarzadeh, 2017)

Ces étapes sont nécessaires mais ne sont pas forcément suffisantes pour une conception fiable et optimisée d'une pièce. C'est pourquoi, (Salmi et al., 2018) proposent une méthodologie en intégrant dans les étapes ci-dessus la prise en compte de l'usinage des pièces fabriquées par FA. Ainsi, les surépaisseurs d'usinage, et des ajouts de fonctions telles que les guides de perçage sont réalisés dans la conception finale. De même (Schmelzle et al., 2015) suggèrent une méthodologie pour (re)concevoir une pièce en prenant en compte les contraintes de fabrication, la diminution de support, mais aussi de post-traitement et de contrôle pour le LBM.

Plusieurs approches de conception peuvent être appliquées. (Klahn et al., 2015) en ont distingué deux :

- Stratégie de conception axée sur la fabrication,
- Stratégie de conception axée sur les fonctions.

Cette réflexion peut s'apparenter à celle de (Hällgren et al., 2016) qui proposent une méthodologie de reconception de pièces pour la FA composée de deux chemins distincts :

- réduire le coût des pièces,
- améliorer les performances.

Le résultat de la conception est différent en fonction du chemin choisi d'un point de vue coût, masse, temps de conception...

(Kumke et al., 2016) distinguent deux familles de DfAM :

- Le DfAM au sens strict qui prend en compte :
 - les règles de tracé,
 - l'exploitation du champ des possibilités de la FA.
- Le DfAM au sens large qui prend en compte :
 - Le choix du procédé de FA et la stratégie de production,
 - Le choix des pièces à faire en FA,
 - La fabrication tels que les paramètres machine, la fabrication hybride (combinaison entre la FA et procédés traditionnels), le choix de l'orientation...

Suite à cette analyse, une méthodologie de conception globale (inspirée du processus normalisé de développement et de conception de produit VDI 2221) est proposée et permet de guider les concepteurs novices ou expérimentés comme le montre la Figure 39. Cette méthodologie se veut applicable à tous les procédés de FA. Le cas d'étude est la réalisation d'une pièce en exploitant les opportunités de la FA tout en appliquant les contraintes.

Dernièrement un article de (Pradel et al., 2018) montre que les connaissances à avoir pour la conception de pièce pour la FA sont très étendues. C'est pourquoi, ils proposent de classer les articles scientifiques ainsi que tous les autres apports (livres blancs, sites internet...) en fonction des apports fournis lors de la conception. La méthodologie ainsi proposée se veut applicable pour tout procédé et permet de prendre en compte tous les aspects de la FA que ce soit du choix des pièces à l'optimisation ou encore la fabrication. Cette méthodologie n'est pas validée par un

cas d'étude. De plus, il n'est pas indiqué si la méthodologie de conception peut s'appliquer sur un produit mécanique ou sur une pièce seule.

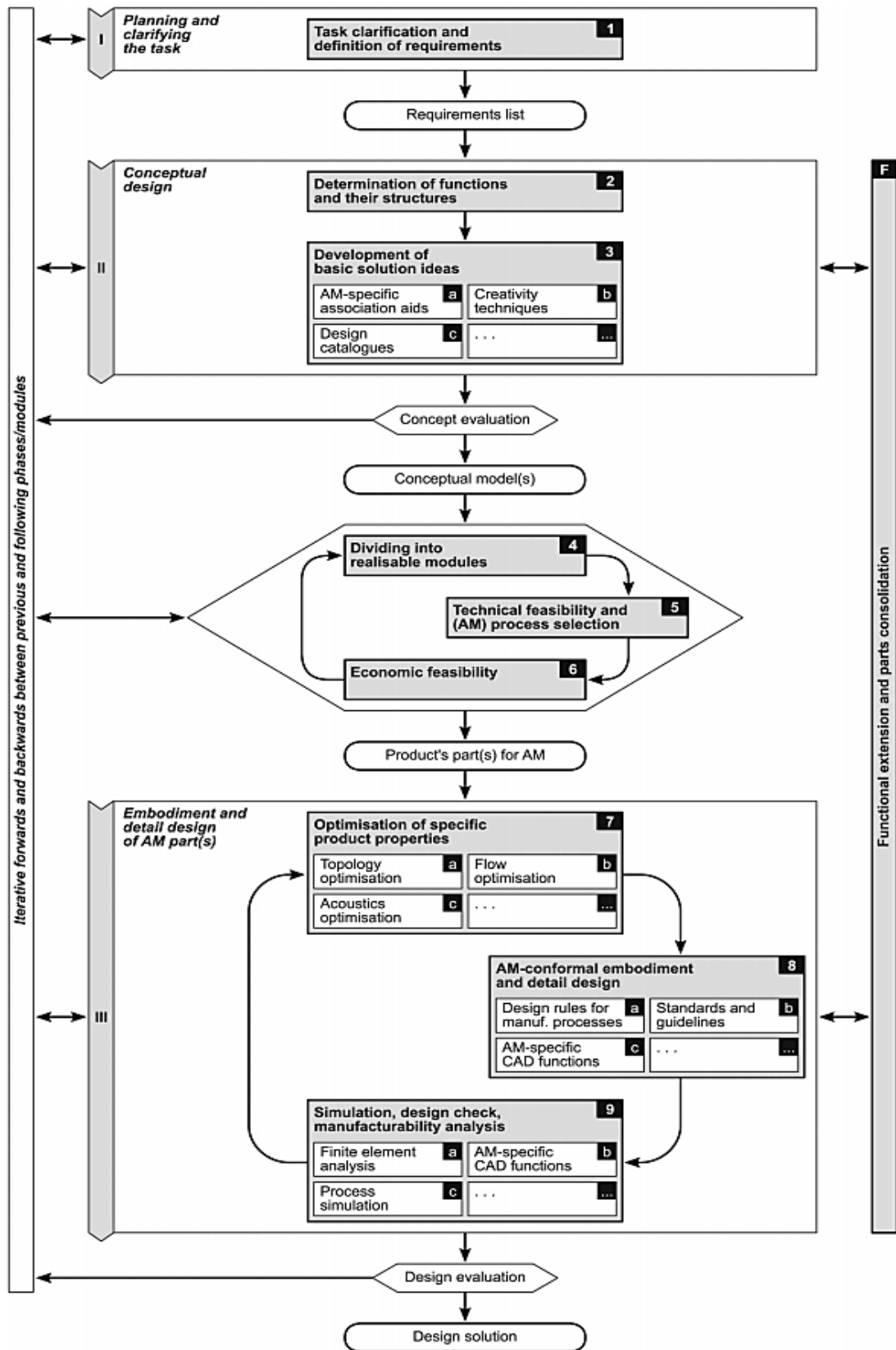


Figure 39. Méthodologie de conception d'une pièce proposée par (Kumke et al., 2016)

La plupart des méthodologies ont pour but la conception ou reconception d'une pièce. Toutefois, (Sossou et al., 2018) proposent la conception d'un mécanisme avec la fabrication directe de liaisons en prenant en compte les contraintes machine pour l'obtention des jeux nécessaires, l'enlèvement des supports...

II.4.5. Conclusion sur les méthodologies de conception pour la FA

Le Tableau 12 propose un classement d'articles scientifiques, publiés à ce jour, sur les différentes méthodes de conception pour la fabrication additive en fonction du procédé choisi.

Tableau 12. Classement d'articles scientifiques sur les différentes méthodes de conception pour la fabrication additive en fonction du procédé

		Procédés de FA								Méthode de conception d'un produit mécanique		
		Photopolymérisation en cuve	Projection de matière	Projection de liant	Extrusion de matière	Fusion sur lit de poudre			Dépôt de matière sous énergie concentrée		Stratification de couches	
						SLS	LBM	EBM				CLAD
Aides à la conception	(Bikas et al., 2019)											
	(Booth et al., 2016)											
	(Hällgren, 2017)											
	(Laverne et al., 2017)											
	(Leutenecker-Twelsiek et al., 2016a)											
	(Leutenecker-Twelsiek et al., 2016b)											
	(Ö. Poyraz & Kuşhan, 2019)											
	(Perez et al., 2015)											
	(Rias et al., 2017)											
	(Richter et al., 2018)											
	(Salmi et al., 2018)											
	(Tsakiris et al., 2018)											
	(Walton & Moztarzadeh, 2017)											
	(Y. Tang & Zhao, 2016)											
Méthodologies	(Boyard, 2015)											
	(Hällgren et al., 2016)											
	(Hodonou et al., 2019)											
	(Kumke et al., 2016)											
	(Orquera et al., 2017)											
	(Ponche, 2013)											
	(Pradel et al., 2018)											
	(Rodrigue & Rivette, 2010)											
	(Rosen, 2007)											
	(Salonitis, 2016)											
	(Sossou et al., 2018)											
	(Vayre, 2014)											
	(Weis et al., 2019)											

Les méthodologies pour concevoir pour la FA sont de plus en plus nombreuses. Toutefois, chaque méthodologie est limitée

- soit parce qu'elle n'est pas ouverte au champ des possibilités de la FA,
- soit parce qu'elle ne couvre pas toutes les étapes de conception,
- soit parce qu'elle ne s'adapte qu'à un procédé de FA,
- soit parce qu'elle n'exploite pas toutes les optimisations possibles,
- soit parce qu'elle est focalisée sur un objectif, un domaine ou une application particulière,
- soit parce qu'elle n'est pas ouverte à la conception d'un produit mécanique.

II.5. De la liberté de forme aux verrous scientifiques

II.5.1. Analyse des besoins d'évolution des méthodologies de conception pour la FA

II.5.1.1. Méthodologie globale pour une prise en compte globale

Il a été vu précédemment qu'il existe deux approches de conception proposées par (Hällgren et al., 2016; Klahn et al., 2015; Y. Tang & Zhao, 2016) :

- Stratégie de conception axée sur la fabrication,
- Stratégie de conception axée sur les fonctions.

De plus, l'état de l'art de (Y. Tang & Zhao, 2016) conclut sur une classification des méthodologies de conception dans laquelle la branche « Méthodologie pour l'amélioration fonctionnelle » est divisée en trois parties : la conception à l'échelle macroscopique, la conception à l'échelle mésoscopique et enfin la conception à l'échelle microscopique. Une méthodologie globale permettant d'englober les différentes branches afin de laisser la conception libre permettrait d'adapter au mieux la conception en fonction des besoins.

II.5.1.2. Méthodologie de conception d'un système mécanique

On entend par système mécanique, un composant mécanique dans lequel des pièces sont liées entre elles par des liaisons cinématiques et dont certaines sont en mouvement lors du fonctionnement. Peu d'articles scientifiques traitent de la conception d'un système mécanique dans sa globalité, mis à part (Jilich et al., 2019; Rodrigue & Rivette, 2010; Sossou et al., 2018). Aucun ne prend en compte l'impact de l'optimisation des classes d'équivalences entre-elles.

II.5.1.3. Méthodologie de conception pour une amélioration globale

Pour un système mécanique, les concepteurs cherchent toujours à améliorer leur concept, en perfectionnant l'étanchéité, la précision des guidages et en réduisant le frottement ou le nombre de pièces. La possibilité de produire des formes complexes (internes et externes) par FA, permet

d'atteindre ces objectifs, ces fonctions. Pour ce faire, les concepteurs doivent utiliser une méthodologie. Sans une nouvelle approche de la conception des produits, seule une petite partie du potentiel des technologies de FA sera exploitée.

II.5.1.4. Hiérarchisation de la multitude d'informations pour la conception pour la FA

La relation étroite entre produit-procédé-matériau (Jared et al., 2017) entraîne un nombre de publications d'articles scientifiques sur la fabrication additive élevé dans des domaines variés. Jusqu'à présent, tout concepteur souhaitant réaliser une pièce pour la fabrication additive doit se documenter pour rassembler toutes les astuces, règles, innovations, et connaissances sur les procédés. Une méthodologie permettant de trouver les informations en temps utile permettra au concepteur un gain de temps et d'assurer une conception exploitant tous les aspects de la FA.

II.5.1.5. Application concrète d'une méthodologie de conception pour la FA pour la plupart des procédés de FA

Chaque procédé de FA ayant une technologie de dépôt et de post traitement différents, la plupart des méthodologies de conception proposées dans la littérature sont applicables pour un procédé ciblé. C'est pourquoi, beaucoup d'industriels suivent leur propre méthodologie de conception développée à partir de leur expérience (Joseph, 2019).

II.5.2. Verrous scientifiques

De ce constat, différents verrous ont été identifiés et sont détaillés dans ce sous-chapitre

II.5.2.1. Premier verrou : conception d'un produit mécanique (ou système multicorps)

La plupart des articles scientifiques traitent de la conception pour la fabrication additive d'une pièce seule. Les seuls articles traitant d'un produit mécanique réalisent une optimisation par classe d'équivalence sans analyser ou prendre en compte l'impact des optimisations entre les différentes pièces qui sont liées entre elles.

Une méthode de conception d'un produit mécanique, prenant en compte l'impact des optimisations entre chacune des pièces, n'a pas été établie dans la littérature scientifique.

II.5.2.2. Deuxième verrou : Optimisation ou Optimisations ?

Les possibilités d'optimiser une pièce ou un produit sont multiples. Les optimisations de forme répondent à des objectifs de tenues (mécanique, thermique ou autre). Le chapitre précédent a

aussi montré que l'optimisation fonctionnelle est facilement réalisable. Enfin, il existe aussi d'autres optimisations (du type volumique ou d'orientation).

Une classification de toutes les optimisations ainsi que de leur apport, et une logique (ou un ordre hiérarchique et chronologique) de réalisation des optimisations reste à réaliser.

II.5.2.3. Troisième verrou : Etendue des connaissances à acquérir pour la conception de pièces à réaliser par FA

La quantité d'informations, de connaissances à obtenir et à maîtriser pour concevoir une pièce à réaliser par fabrication additive est très élevée, et ce, dans des champs de compétences variés (métrologie, métallurgie, connaissance des différents procédés de FA, les règles de tracé en fonction du procédé, les libertés et contraintes du procédé...).

De cette multitude d'informations naît une réelle difficulté pour le concepteur de réunir, de synthétiser, et d'exploiter au bon moment les connaissances nécessaires afin exploiter toutes les possibilités de la FA (tout en respectant les contraintes).

II.6. Conclusion et stratégie de recherche

Les trois verrous recensés ci-dessus couvrent la plupart des étapes de conception d'un produit. Il serait toutefois possible de développer séparément la solution à chacun des verrous, mais, cela augmenterait la liste d'informations dispersées dans la littérature.

C'est pourquoi, dans la suite de ce mémoire, au chapitre III, seront détaillées trois familles d'optimisation permettant de répondre au verrou 2. Il y sera développé ensuite un organigramme permettant de concevoir un produit mécanique tout en prenant en compte l'impact des optimisations entre les différentes classes d'équivalence répondant ainsi au verrou 1.

Puis, une intégration des solutions des verrous 1 et 2 sera proposée dans une vision globale. Ainsi, dans ce mémoire, une méthodologie globale de conception pour la fabrication additive est proposée au chapitre IV, permettant de répondre au verrou 3. Cette méthodologie a pour ambition d'englober les solutions aux trois verrous scientifiques recensés précédemment.

II.6.1. Solution au verrou 1

Une méthode appelée TOMS (pour Topological Optimization of a Mechanical System) permettra de réaliser l'optimisation sur un système multicorps et de prendre en compte les impacts collatéraux entre pièces. C'est-à-dire de prendre en compte l'impact de la diminution des masses et inerties entre les différentes classes d'équivalences cinématiques. Cette méthode est détaillée au sous-chapitre III.3 à la page 83.

II.6.2. Solution au verrou 2

Trois familles d'optimisations pour la conception de pièce et/ou de produit sont détaillées dans ce mémoire. Ces optimisations sont présentées avec les données d'entrée nécessaires, les apports possibles et le tout dans un ordre chronologique (sous-chapitre III.2 à la page 66). Cela permet à tout concepteur d'exploiter toutes les optimisations possibles pour réaliser soit une pièce soit un assemblage pour la FA.

II.6.3. Solution au verrou 3

Une méthodologie globale de conception est proposée dans la partie IV en page 107. Elle a pour ambition d'aider tout concepteur, tout au long du processus de conception, et applicable à la plupart des procédés de fabrication additive. Cette méthodologie englobe les solutions aux verrous 1 et 2. De plus, la plupart des articles scientifiques, livres et documents trouvés dans la littérature ont été regroupés dans des tableaux thématiques afin d'aider le concepteur à retrouver les informations utiles à chaque étape de la méthodologie.

III. Optimisations pour la conception d'un système mécanique à réaliser par fabrication additive

III.1.	Introduction	66
III.2.	Les différents types d'optimisation	66
III.2.1.	Cas d'étude	66
III.2.2.	Ordre des optimisations	67
III.2.3.	Optimisation architecturale	68
III.2.4.	Optimisation fonctionnelle	74
III.2.5.	Optimisation topologique	80
III.2.6.	Les apports des trois optimisations	82
III.3.	Optimisation topologique d'un système mécanique, le nouveau paradigme	83
III.3.1.	Introduction	83
III.3.2.	Méthode TOMS : Méthode d'optimisation topologique d'un système mécanique	85
III.3.3.	Méthodologie	87
III.3.4.	Application de la méthode TOMS	91
III.3.5.	Conclusion sur la méthode TOMS	103
III.4.	Conclusion sur les trois familles d'optimisation	105

III.1. Introduction

Lorsque l'on parle d'optimisation d'un mécanisme réalisé par FA, il lui est souvent associé l'optimisation topologique. Or au vu du chapitre précédent, il apparaît que plusieurs optimisations peuvent être effectuées. C'est pourquoi, une première partie (chapitre III.2) détaillera les **trois familles d'optimisation** qui ont été recensées. Il sera tout d'abord proposé un ordre pour réaliser ces trois optimisations. Puis, la démarche pour les appliquer et les avantages qu'elles apportent seront mis en évidence et démontrés au travers d'un cas d'étude. Ce cas d'étude est une perforatrice d'atelier dont la conception est simple et initialement prévue pour être fabriquée par les procédés conventionnels.

Le chapitre III.3 propose un apport important lors de **l'optimisation topologique d'un système multicorps**. Il sera proposé une méthodologie permettant de prendre en compte la variation des efforts de liaisons due à la diminution des inerties et masses des pièces topologiquement optimisées appartenant à un système multicorps.

Il sera mis en lumière que l'ordre d'optimisation des pièces a une influence sur la conception, le comportement mécanique et les caractéristiques mécaniques.

Ainsi à partir de ces « chemins » d'optimisation seront proposés des principes d'optimisation de systèmes multicorps en fonction des objectifs du concepteur.

Un cas d'étude permettra de valider cette méthodologie d'optimisation topologique de système multicorps appelée TOMS. Le cas d'étude exploité est un poignet de robot pour lequel la diminution des masses et inerties augmenterait sa stabilité, permettrait d'utiliser des moteurs moins encombrants ou encore nécessiterait moins de puissance pour sa mise en mouvement... Sur ce cas d'étude aucune autre optimisation ne sera réalisée.

Il est ainsi proposé dans ce chapitre des solutions pour répondre aux verrous scientifiques 1 et 2.

III.2. Les différents types d'optimisation

III.2.1. Cas d'étude

Un support d'étude simple sera présenté pour illustrer les explications. Il s'agit d'une perforatrice, montrée à la Figure 40, utilisée dans un milieu de type atelier de production. Ce mécanisme est initialement réalisé par des procédés conventionnels de type usinage. La fonction principale de ce mécanisme est de perforer des feuilles de papier, de carton et des feuilles métalliques de faibles épaisseurs. Dans cette étude de cas, il est proposé de reconcevoir la perforatrice pour la réaliser par fabrication additive. Les objectifs de cette reconception sont les suivants : obtenir une perforatrice plus légère, moins encombrante, et plus design (dans le sens esthétique).

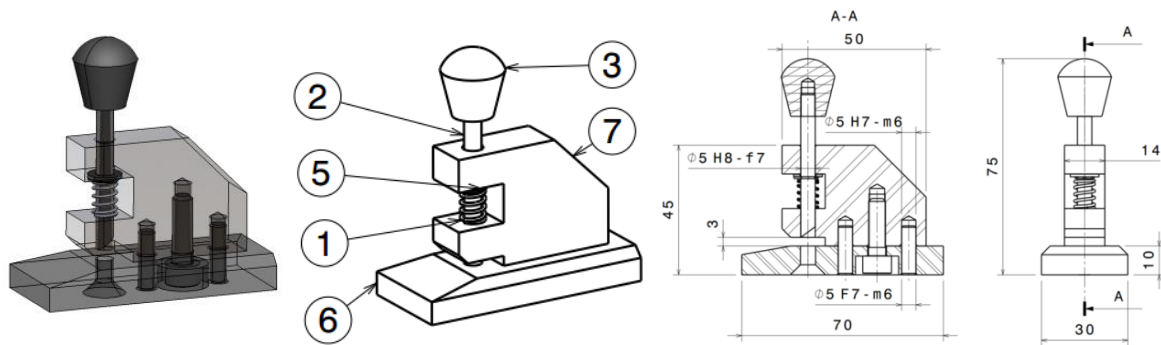


Figure 40. Version initiale de la perforatrice. Etude de cas: « la perforatrice »

III.2.2. Ordre des optimisations

Comme cela a été dit au chapitre II.2.4 à la page 32, l'état de l'art autour du thème de la conception pour la fabrication additive a permis d'extraire trois types d'optimisations. La première est l'optimisation topologique utilisée de manière courante lors de conception pour la FA. Une deuxième optimisation est d'ordre volumique et sera appelée dorénavant optimisation architecturale. Puis la dernière optimisation, permise par le champ des possibilités de la FA, est l'optimisation fonctionnelle.

Chacune de ces optimisations peuvent être réalisées seules. Toutefois, lors d'une conception d'une pièce ou d'un produit, appliquer l'ensemble des optimisations possibles permettrait d'obtenir une conception plus performante et fonctionnelle. C'est pourquoi, il est souhaitable d'appliquer l'ensemble de ces optimisations.

L'optimisation architecturale consiste à réévaluer la position des centres des liaisons dans l'espace (voir la Figure 23 à la page 28) afin de diminuer le volume du système. De cette optimisation résulte (entre autres) la position des surfaces fonctionnelles.

L'optimisation fonctionnelle permet d'améliorer toutes les fonctions d'un système et peut donc modifier / générer de nouvelles surfaces fonctionnelles d'un produit. De plus, dans cette optimisation se trouve le choix du matériau, celui-ci pouvant faire partie des matériaux innovants.

L'optimisation topologique nécessite, comme données d'entrées, le choix du matériau ainsi que le tracé des espaces de conception et de non conception découlant des surfaces fonctionnelles. Cette optimisation a pour finalité l'obtention d'un concept de répartition de matière.

Ainsi, comme le montre la Figure 41, les résultats de l'optimisation architecturale sont nécessaires pour réaliser l'optimisation fonctionnelle. De même les résultats de l'optimisation fonctionnelle sont obligatoires pour l'optimisation topologique.

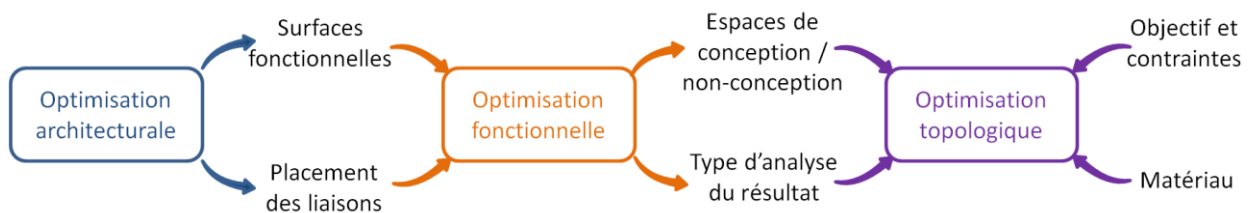


Figure 41. Ordre des optimisations en fonction des entrées utiles

De ce constat, l'ordre d'application des optimisations permettant d'appliquer toutes les optimisations en ayant toutes les données d'entrée nécessaires à chacune d'entre-elles est le suivant :

1. Optimisation architecturale,
2. Optimisation fonctionnelle,
3. Optimisation topologique.

III.2.3. Optimisation architecturale

III.2.3.1. Définition

Par optimisation architecturale, on entend une optimisation d'une pièce ou d'un produit pour atteindre l'objectif de conception (augmenter la rigidité ou diminuer la masse par exemple).

Pour un système mécanique, cela se fait en trois étapes :

- Optimiser le nombre de pièces et de matériaux par une conception monolithique.
Les avantages de cette étape sont détaillés au sous-chapitre II.2.3.2.
- Optimiser l'emplacement des liaisons cinématiques.
Cela doit permettre de diminuer le volume de l'assemblage et d'améliorer son comportement mécanique (cinématique et dynamique).
- Optimiser les liaisons d'interfaces, que ce soit pour une pièce ou un produit mécanique et ce, sans tenir compte de contraintes technologiques de réalisation.
Cette étape doit permettre de réduire les opérations de montage, le volume de la pièce ou du système et de réduire le nombre de pièces d'assemblage.

Afin de mener à bien cette optimisation plusieurs données d'entrée sont nécessaires et des choix doivent être effectués par le concepteur, comme le montre le schéma en Figure 42.

Les données d'entrée sont :

- L'analyse fonctionnelle externe et interne du mécanisme.
L'analyse et la hiérarchisation des fonctions sont primordiales pour la réalisation du schéma cinématique et pour l'étude de son amélioration. De plus, cela permet de déterminer où les surfaces fonctionnelles seront placées et ce, quel que soit l'étape du cycle de vie du produit.
- Les conditions aux limites.
Cela permet de déterminer les efforts aux liaisons avec les interfaces et d'en déduire les solutions constructives adaptées.
- Les caractéristiques pouvant modifier l'objectif.
L'objectif de conception (ou de reconception) de la pièce (ou de l'assemblage) sera influencé par différents paramètres et caractéristiques. Afin d'effectuer une amélioration spatiale du schéma cinématique, ces caractéristiques doivent être connues.

Le concepteur doit pour cette optimisation faire :

- Le choix du procédé.
Cela va conditionner les capacités de la machine ainsi que le post-traitement nécessaire.
- Le choix de l'orientation de la pièce/assemblage (pour le dépôt de matière).
Cela va induire une qualité de surface et de géométrie qu'il faudra prendre en compte.
De plus, en fonction du procédé choisi, des modifications de conception seront peut être nécessaires (concernant le diamètre des perçages par exemple).

Cette optimisation doit aboutir à l'obtention du placement des liaisons cinématiques, ainsi qu'à une première proposition de tracé des surfaces fonctionnelles suivant l'orientation de fabrication.

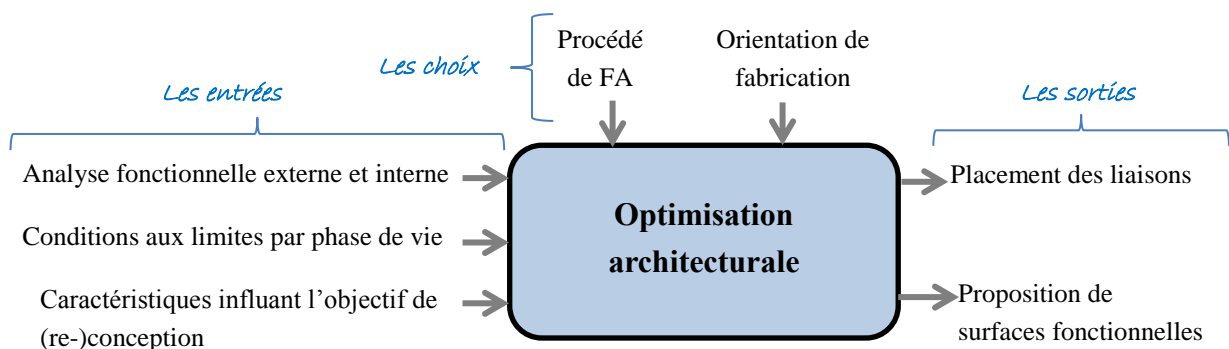


Figure 42. Schéma bloc de l'optimisation architecturale

III.2.3.2. Méthodologie

Les trois parties de l'optimisation architecturale sont détaillées à la Figure 43.

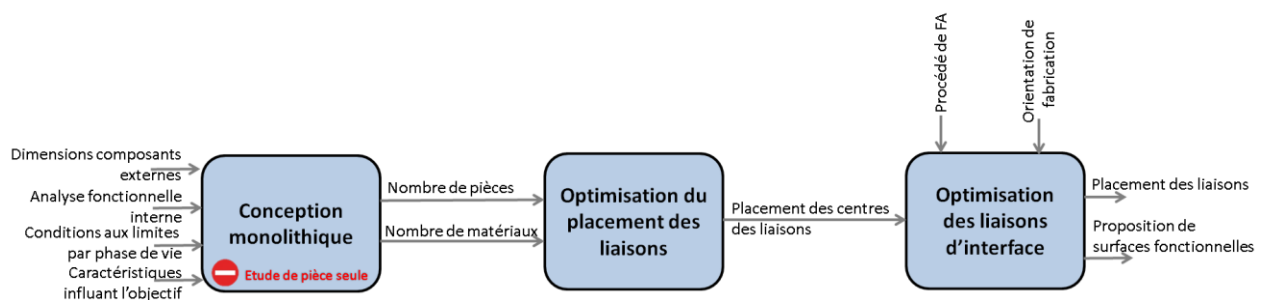


Figure 43. Sous étapes de l'optimisation architecturale

III.2.3.2.1. Conception monolithique

Si l'étude porte sur un système mécanique, il faut le reconcevoir en améliorant le regroupement des pièces entre-elles. Au chapitre II.2.3.2 à la page 25, les six critères permettant l'union des pièces ont été détaillés. Les articles traitant de ce sujet sont référencés dans le Tableau 4 à la page 32.

III.2.3.2.2. Emplacement des liaisons cinématiques

Cette étape ne concerne que les systèmes mécaniques et non l'étude d'une seule pièce. Cela concerne aussi les études où la position des liaisons n'est pas imposée a priori.

Le schéma cinématique du système peut être détaillé en schéma architectural. À partir de ce schéma et de l'objectif initial, les centres des liaisons sont placés pour obtenir les meilleures performances. On entend par performances une diminution du volume, ou encore une amélioration de la loi d'entrée-sortie.

La première étape consiste à connaître le comportement du mécanisme et à établir le lien mathématique entre le centre des liaisons et le comportement. Les principes fondamentaux de la mécanique seront exploités ainsi que la théorie des mécanismes.

Ensuite, en ne prenant en compte que les solutions réalisables et le volume alloué, le meilleur placement des liaisons sera celui qui donne le comportement souhaité.

Il faut noter que les contraintes de positions spatiales des liaisons ne doivent pas empêcher l'amélioration et/ou l'application d'une fonction principale ou contrainte.

III.2.3.2.3. Optimisation des liaisons d'interfaces

La troisième étape consiste à améliorer la position et à reconcevoir les liaisons, en général de type encastrement, entre le mécanisme étudié et les éléments annexes. L'objectif est de concevoir des solutions constructives permettant de faciliter la maintenance (s'il y a lieu), de diminuer le volume, de réduire les opérations de montage, et de réduire le nombre de pièces. Un exemple illustrant parfaitement cette étape est celui de (Ren & Galjaard, 2015) détaillé à la Figure 23 à la page 28.

III.2.3.2.4. Choix du procédé de FA

Le choix du procédé doit être effectué à partir des objectifs de conception, des connaissances du champ des possibilités atteignables par le procédé, de ses capacités, du coût... Cela a été traité au chapitre II.3.3 à la page 37.

III.2.3.2.5. Choix de l'orientation

Le choix de l'orientation de la fabrication a un impact sur différents points : la rugosité des surfaces, la qualité géométrique, la quantité de support, le temps de fabrication, le coût ... C'est pourquoi, en fonction du procédé choisi précédemment, l'orientation doit être figée à cette étape. Les surfaces fonctionnelles nécessitant une qualité géométrique suffisante seront prédominantes pour le placement sauf si un post traitement de type usinage est nécessaire. Les formes des surfaces fonctionnelles seront retravaillées pour convenir aux contraintes de fabricabilité du procédé choisi comme le montre la Figure 35 à la page 53.

De cette étape, un premier tracé de surfaces fonctionnelles sera réalisé.

III.2.3.3. Exemple d'application sur l'étude de cas « La perforatrice d'atelier »

III.2.3.3.1. Les entrées

Les caractéristiques influant l'objectif sont :

- La masse (masse actuelle : 121,1 g)
- Le volume de l'ensemble (volume actuel de la boîte englobante : 41,5 cm³)
- L'esthétique générale

Un extrait de l'analyse fonctionnelle externe pendant la phase d'utilisation du cycle de vie est proposé à la Figure 44.

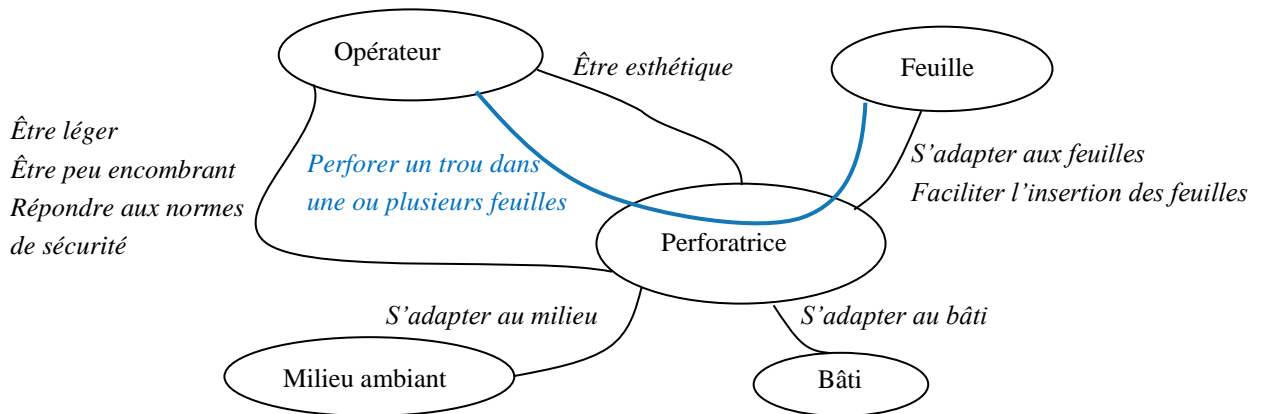


Figure 44. Diagramme des interacteurs de l'étude de cas en phase d'utilisation de la « perforatrice »

Les conditions aux limites sont les intensités d'efforts que subit chaque classe d'équivalence du produit. Pour exemple, en phase d'utilisation, la main de l'opérateur effectue une action suivant l'axe de guidage du coulisseau poinçonneur d'environ 50 N.

III.2.3.3.2. L'optimisation architecturale

- Conception monolithique

La semelle 6 et le carter 7 (voir Figure 40 à la page 67) répondent aux six critères permettant de les concevoir en une seule pièce. En effet, ces pièces n'ont pas de mouvement relatif pendant le fonctionnement, elles peuvent donc être réalisées dans le même matériau, et elles n'ont pas besoin d'être séparées pour le montage. De plus, leur union n'implique pas d'outillage supplémentaire ni d'augmentation de coût et n'empêche pas la réutilisation du matériau ou son recyclage.

La poignée 3 et le poinçon 2 répondent aussi aux six critères.

- Emplacement des liaisons cinématiques

Le système présenté peut avoir des configurations différentes (voir Figure 45) entraînant plus ou moins des variations de volume, une complexification de montage ...

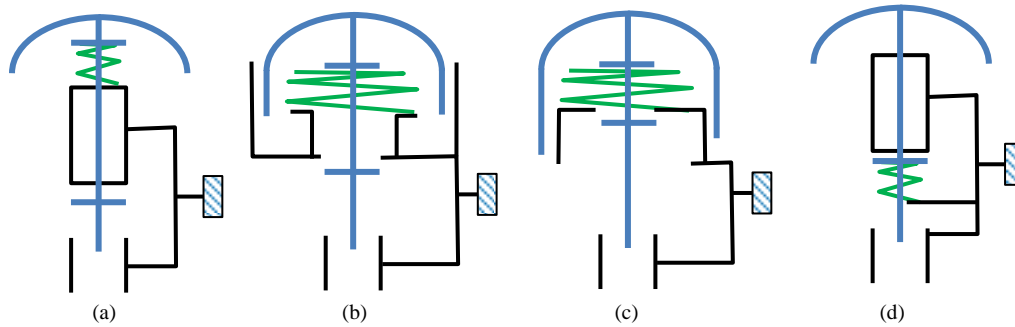


Figure 45. Différentes positions des liaisons et configurations pour le cas d'étude « perforatrice »

Les schémas cinématiques (a) et (d) ont pour différence principale l'emplacement du ressort de rappel. Cet emplacement implique un montage du ressort entre la poignée du poinçon (a) et le bâti ou entre le poinçon et le bâti (d). Le schéma (b) se diffère du schéma (c) par le guidage de la liaison pivot glissante du poinçon par rapport au bâti. Dans le schéma (b), l'alésage est réalisé par le bâti autour de la poignée alors que dans (c) l'alésage est la poignée autour du bâti. Ces deux schémas vont induire un encombrement plus grand que pour le (a) et le (d). Afin de répondre aux objectifs de reconception (détaillés à la page 66), les schémas (a) et (d) de la Figure 45 sont les plus adaptés. A titre d'exemple, le schéma (d) sera retenu.

- Les liaisons d'interfaces

Il s'agit ici du contact entre le bâti et l'établi sur lequel il sera posé. Le système actuel propose un appui plan. Il est possible de réduire la superficie de ce contact à trois ou quatre contacts ponctuels. Pour des raisons de stabilité, le nombre de quatre contacts ponctuels sera retenu.

III.2.3.3. Les sorties

- Tracé des surfaces fonctionnelles

De ces études, il est possible de tracer les premières surfaces fonctionnelles des liaisons cinématiques ainsi que des liaisons d'interfaces telle que le montre la Figure 46.

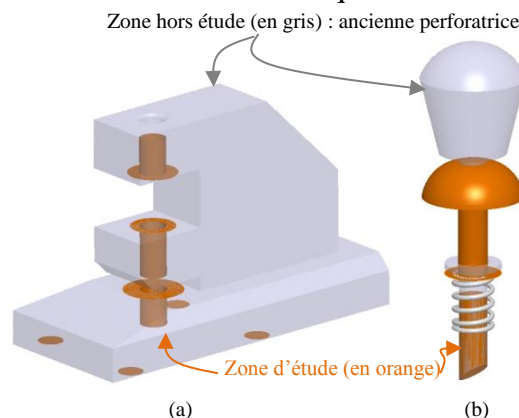


Figure 46. Les formes traditionnelles en gris et les surfaces fonctionnelles en orange du (a) carter et du (b) poinçon de la « perforatrice »

Sur cette figure la géométrie de l'ancienne perforatrice y est en filigrane gris afin de montrer l'évolution de la conception. Toutefois seules les surfaces fonctionnelles tracées en orange font partie de la zone d'étude. Les surfaces fonctionnelles sont réalisées pour satisfaire chaque liaison

du schéma cinématique préalablement tracé. Par exemple, une liaison pivot glissante aura comme surface fonctionnelle une surface cylindrique dont la longueur sera au minimum égale au diamètre.

III.2.3.3.4. Les choix

- Choix du procédé de fabrication additive

La perforatrice doit réaliser des trous dans des feuilles métalliques. Ceci permet d'exclure tout procédé utilisant uniquement des matériaux qui ne supporteront pas ces sollicitations tels que la photopolymérisation en cuve, la projection de matière ainsi que la fusion sur lit de poudre pour matière plastique (SLS). La projection de liant ainsi que l'extrusion de matière permettent depuis peu l'utilisation de matériaux métalliques. Ces deux procédés peuvent être retenus. De plus la recherche du design et les petites dimensions excluent du choix les technologies de types dépôt de matière sous énergie concentrée et la stratification de couches. Les procédés de fusion sur lit de poudre tels que le LBM ou l'EBM sont aussi des procédés qui peuvent être choisis. Le Tableau 13 montre les avantages et inconvénients des différents procédés de FA permettant de réaliser des pièces métalliques. Le procédé de fusion laser sur lit de poudre (LBM) paraît être un bon compromis entre les capacités machines et le coût. Ce procédé se trouve dans le parc machine de la plateforme MAQ-3D, ainsi il sera choisi en priorité.

Tableau 13. Classement des procédés ayant la capacité de réaliser le cas d'étude

Critères	LBM	EBM	BJ-Metal	FDM-Metal
Qualité	+++	++	++++	-
Temps de fabrication	-	-	---	---
Complexité	+++	+++	+++	---
Coût	-	--	+	+++

+++ le plus adapté ; --- le moins adapté

- Choix de l'orientation

Comme il a été vu au chapitre II.3.3, l'orientation de la pièce pour la technologie LBM influe sur plusieurs caractéristiques telles que le temps de fabrication, les défauts surfaciques et géométriques, la qualité de support. Ainsi le Tableau 14 s'appuyant sur la Figure 47 est un exemple permettant de choisir l'orientation la plus optimale pour le support d'étude en fonction de différents critères. Il faut remarquer que la partie grise transparente représentant le carter conventionnel sur la Figure 47 ne sera pas fabriquée dans cet état, le carter a été représenté ainsi pour faciliter la lecture des perspectives. Seules les surfaces fonctionnelles sont à prendre en compte lors du choix d'orientation.

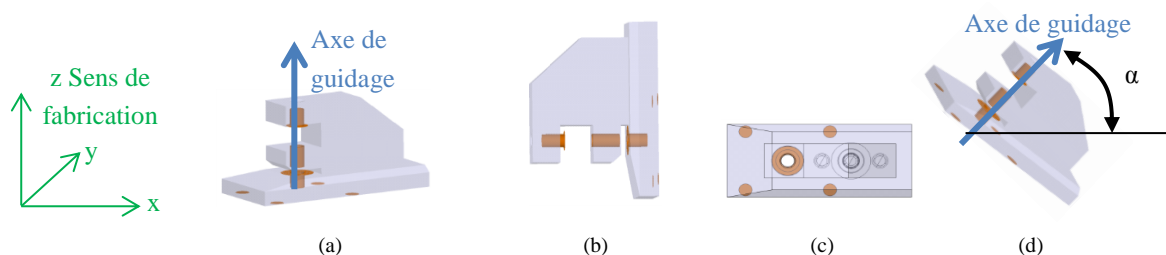


Figure 47. Différentes orientations de fabrication possibles pour le carter du cas d'étude « perforatrice »

Tableau 14. Exemple de classement des orientations de l'étude de cas en fonction des différents critères.

Position (voir Figure 47)	(a)	(b)	(c)	(d)
Temps de fabrication	4	2	1	3
Rugosité	1	2	2	4
Support /Transfert thermique	1	4	4	2
Défaut géométrique	1	2	2	4

De 1 représentant le meilleur à 4

Afin de limiter les post-traitements, les surfaces de guidage doivent avoir la rugosité la plus faible. Si les perçages sont verticaux, ils auront la rugosité minimale et les défauts géométriques les plus faibles. Malgré le fait que le temps d'impression sera le plus élevé dans cette configuration, c'est l'orientation dont l'axe de guidage est parallèle à z qui sera retenue.

- Modifications des surfaces fonctionnelles induites par le choix de l'orientation

Les surfaces en porte à faux doivent être les plus faibles possibles pour ne pas avoir de défaut de type scories ou de gauchissement expliqué au chapitre II.3.3.1. Les surfaces inclinées seront à concevoir avec un angle adéquat à la technologie LBM choisie. Pour la machine de LBM utilisée dans le cadre de cette thèse, l'angle d'inclinaison minimal avec le plateau de fabrication, permettant d'éviter le support est de 45°. En dessous de cet angle les supports sont obligatoires.

III.2.4. Optimisation fonctionnelle

III.2.4.1. Définition

L'optimisation fonctionnelle correspond à l'optimisation d'une pièce ou d'un produit mécanique en exploitant les opportunités de la FA. Il s'agit d'améliorer une pièce ou un produit en termes de performances et de fonctionnalités. Trois points doivent être améliorés pour atteindre cet objectif, et ce, quelle que soit la phase du cycle de vie en fonctionnement considérée :

- Le flux de transmission de puissance.
Cela correspond aux dispositifs mécaniques permettant de transmettre un mouvement d'une pièce à une autre.
- Le flux d'énergie (comme le carburant ou le système hydraulique).
Cela correspond aux écoulements fluides, aux transferts thermiques, aux flux magnétiques et électriques...
- Les liaisons cinématiques.
Cela correspond à la liaison entre deux classes d'équivalence.

Lors de cette optimisation, tous les outils et méthodes d'aide à la conception et à l'innovation peuvent être utilisés tels que le QFD, la méthode TRIZ ... De plus, un potentiel d'amélioration pourra être obtenu par le bio-mimétisme ou le choix de matériaux innovants qui sera un choix à établir par le concepteur.

Des données d'entrée sont nécessaires pour réaliser cette optimisation. De même, des choix doivent être effectués par le concepteur, comme le montre le schéma à la Figure 48. Les données d'entrée sont :

- L'analyse fonctionnelle externe et interne,
- Le procédé de FA choisi ainsi que ses caractéristiques et l'orientation de fabrication,
- Les caractéristiques influant l'objectif de conception,
- Le placement des liaisons,
- Les surfaces fonctionnelles.

Il est à remarquer que, mis à part les caractéristiques du procédé, dans ces données d'entrée se trouvent les données de sortie ainsi que les choix à formuler lors de l'optimisation architecturale. Les caractéristiques du procédé de fabrication peuvent être formalisées sous forme de liste relatant les contraintes et les opportunités du procédé. Il doit être mentionné :

- le volume réalisable,
- le type de support, leur utilité (évacuation thermique ou pour les porte à faux), le procédé d'enlèvement des supports,
- les matériaux possibles, le coût matière,
- le temps de fabrication,
- les post-traitements nécessaires,
- les qualités surfaciques et géométriques,
- les capacités à réaliser des liaisons, à réaliser des surfaces complexes, à réaliser des pièces multi-matériaux, des matériaux innovants,
- ...

Cette optimisation doit aboutir à l'obtention des espaces de conception et de non conception ainsi qu'au tracé des surfaces fonctionnelles qui peuvent évoluer au cours de cette étape. De plus, certaines fonctions ou caractéristiques ne pourront peut-être pas être étudiées lors de cette optimisation, notamment lors du cycle de vie de post-traitement ou du montage.

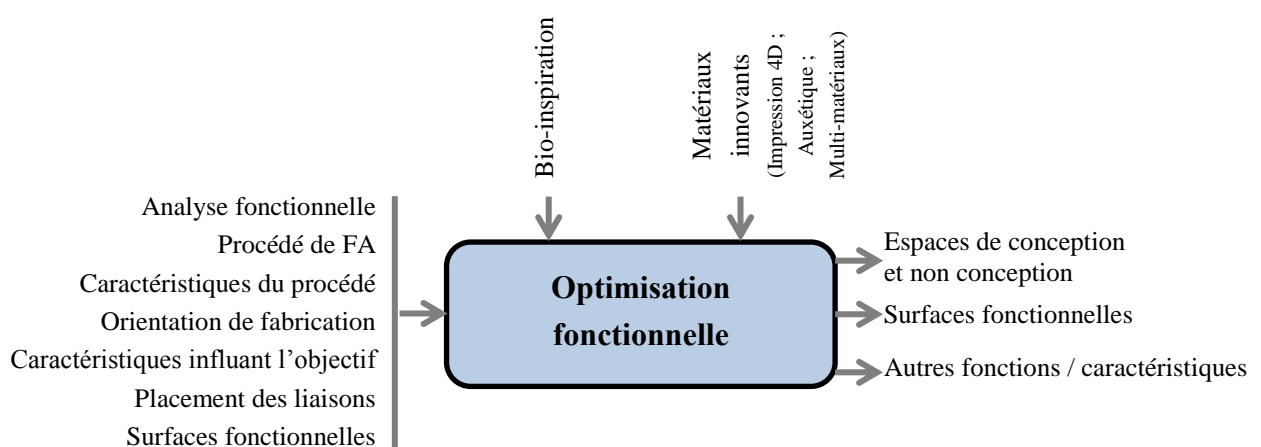


Figure 48. Schéma bloc de l'optimisation fonctionnelle

III.2.4.2. Méthodologie

Pour choisir si la conception est bio inspirée ou non, et s'il faut des matériaux innovants de types Impression-4D, Auxétique ou Multi-matériaux, il faut au préalable déterminer si les fonctions établies lors de l'analyse fonctionnelle interne ont un potentiel d'amélioration. Le potentiel peut être en termes de gain de masse, de comportement ou autre. Les apports du biomimétisme, ou des matériaux innovants et l'aide au choix, sont détaillés dans les références du Tableau 4 à la page 32.

L'optimisation fonctionnelle consiste à améliorer toutes les fonctions, pour cela, deux étapes sont nécessaires. Tout d'abord, sur le même graphique, appelé graphe des liaisons et des flux seront représentés :

- le graphe des liaisons,
- le flux de transmission de puissance,
- le flux d'énergie.

Puis, à chaque liaison, et tout au long des flux (passant par une classe d'équivalence ou la traversant), il faut se poser la question « Comment améliorer ? ». Cette question doit autant s'appliquer sur les liaisons que sur chaque étape des flux. Les améliorations sont en termes de précision de guidage, amélioration de l'étanchéité... Toutes les solutions sont à prendre en compte, il faut donc s'affranchir des règles de conception apprises jusqu'à présent de type :

- « ce n'est pas montable »,
- « cette forme n'est pas réalisable »,
- « cette solution est trop coûteuse »,
- ...

Il faut retrouver son sens créatif, innovant. La conception biomimétique et le comportement particulier des matériaux (matériaux innovants) peuvent aider les concepteurs.

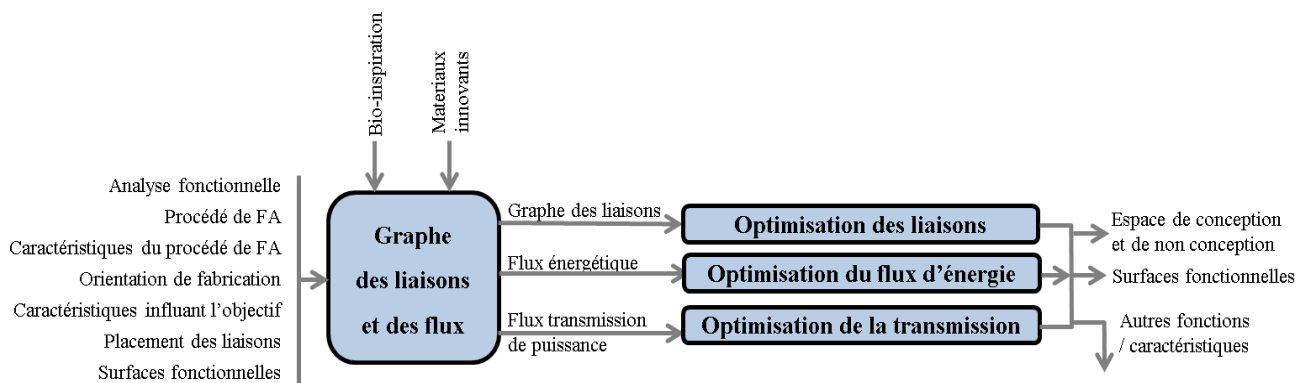


Figure 49. Sous étapes de l'optimisation fonctionnelle

III.2.4.2.1. Optimisation des liaisons

Pour chaque liaison, le choix de la solution constructive doit être effectué. Ce choix dépend des conditions de fonctionnement du mécanisme, de l'expérience et des connaissances des concepteurs. Par exemple, le choix d'une liaison pivot est le résultat d'une comparaison de

comportement entre un contact direct, un palier lisse, un roulement, un palier hydrostatique ou encore un palier hydrodynamique. Le choix de la solution constructive sera amélioré grâce aux capacités de fabrication additive tout en répondant aux contraintes du procédé.

III.2.4.2.2. Optimisation de la transmission de puissance

L'application des efforts, le cycle thermodynamique, le transfert de chaleur ou la transmission de couple peuvent être améliorés afin d'améliorer la transmission de puissance. Par exemple, pour un moteur thermique, rendre la détente adiabatique, permettrait d'en augmenter le travail.

III.2.4.2.3. Optimisation du flux d'énergie

L'énergie peut avoir plusieurs sources: pression d'air ou de liquide, carburant... Leur flux doit être amélioré en réduisant par exemple les pertes de charge, les fuites...

III.2.4.3. Exemple d'application sur l'étude de cas « La perforatrice »

III.2.4.3.1. Les entrées

Le procédé de FA choisi est la fusion laser sur lit de poudre (LBM). Voici un extrait de la liste des caractéristiques de la machine appartenant au parc machine de la plateforme MAQ-3D :

- Caractéristiques de la ProX100 de 3D-Systems :
 - Volume net de fabrication : $100 \times 100 \times 80$ mm
 - Epaisseur minimale : 0,4 mm sur 15 mm de hauteur
 - Champ des possibilités : Fabrication directe de liaison, lattice
 - Hors champ des possibilités : cavités fermées, pièces massives
 - Support nécessaire pour transfert thermique
- Caractéristiques de la matière :
 - Chrome-cobalt
 - Coût matière : 220 €/kg
 - Densité=7,5 g/cm³
 - R_{pe}=750 MPa (sans traitement thermique)
 - E=170 GPa (sans traitement thermique)
- Qualité de fabrication :
 - La rugosité la plus faible est de Ra=16 μm
 - Pour plus de détails concernant les défauts de surface et géométriques, voir les références du Tableau 7 à la page 41
- Post-traitement :
 - TTH : Plateau + composants : 20 minutes au four à 800°C
 - Extraction des pièces du plateau par découpe électroérosion à fil
 - Grenailage, usinage, soudage, perçage possibles

- Les surfaces nécessitant un Ra inférieur à 16 μm doivent être usinées.

III.2.4.3.2. Graphe des liaisons et des flux

La Figure 50 montre le graphe des liaisons et de la transmission de puissance. Dans cet exemple, il n'y a pas de flux d'énergie.

- Comment améliorer les liaisons ?
 - Il est possible de diminuer le frottement dans les liaisons pivot glissant en réalisant un graissage entre le poinçon et le carter. Cela peut se faire grâce à une gorge hélicoïdale sur le poinçon.
 - Le risque d'arc-boutement doit être éliminé en réalisant une longueur de guidage suffisante (supérieure à 1.5 fois le diamètre) et en éliminant le couple lors de la coupe par une forme biseautée symétrique ou circulaire.
- Comment améliorer la transmission d'effort ?
 - La transmission d'effort s'effectue entre la main de l'utilisateur et le poussoir du poinçon. Plus la surface est importante et plus l'ergonomie sera propice à récupérer tout l'effort de l'utilisateur et ainsi qu'à la transmission d'un effort important. La surface doit donc être plus importante.
 - Un cisaillement progressif permettrait aussi d'améliorer la transmission d'effort. Ainsi, plutôt qu'une forme circulaire du poinçon, il sera préféré une forme biseautée.
 - Afin d'éviter un effort de coupe radial entraînant un couple et un possible arc-boutement, à la forme biseauté sera préférée une forme biseautée symétrique.

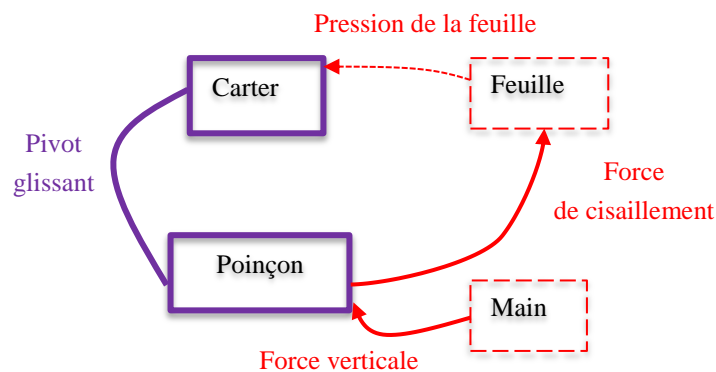


Figure 50. Graphe des liaisons (en violet) et du flux de puissance (en rouge) de l'étude de cas « la perforatrice »

La Figure 51 montre les évolutions des surfaces fonctionnelles prenant en compte les améliorations précédemment proposées.

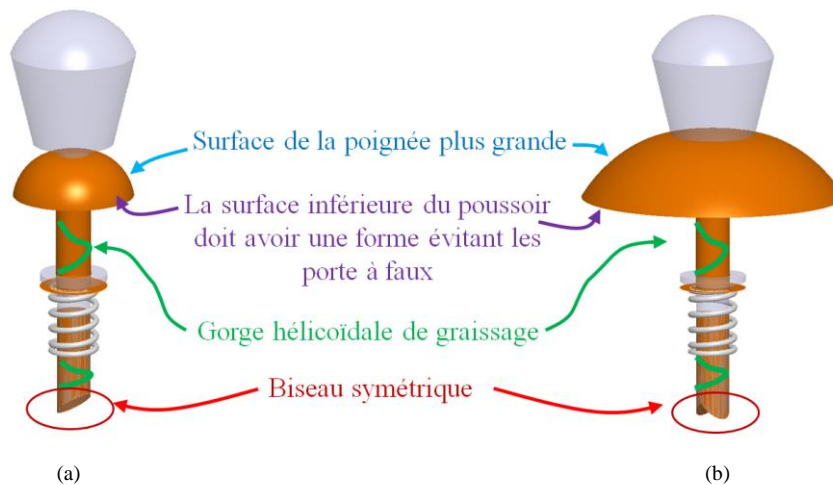


Figure 51. (a) Résumé des améliorations sur le poinçon ; (b) Modifications des surfaces fonctionnelles. Etude de cas « la perforatrice »

III.2.4.3.3. Les choix

- Le bio-mimétisme

Chaque fonction relatée dans l'analyse fonctionnelle peut être réalisée en s'inspirant de la nature. Le cas d'étude étant un cas très simple, il ne comporte pas des fonctions nécessitant un rapprochement biomimétique.

- Matériaux innovants

Il est possible de choisir à présent l'utilisation de matériaux tels que : l'impression 4D, les matériaux à comportement auxétique ou les multi-matériaux. Ce choix doit être en correspondance avec le choix du procédé de FA et ses caractéristiques. Concernant l'impression 4D, le cas d'étude ne nécessite pas de comportement particulier dans le temps. Pour le choix effectué de la machine LBM, les multi-matériaux sont exclus d'office. Enfin, la perforatrice pourrait perforeur une feuille en exploitant des matériaux auxétiques. Toutefois, la simplicité du mécanisme ainsi que son utilisation dans un milieu qui peut être estimé comme hostile, entraîne un retrait de cette solution.

III.2.4.3.4. Les sorties

- Les surfaces fonctionnelles

Suites aux améliorations proposées, les surfaces fonctionnelles établies en entrée ont été modifiées telle que le montre la Figure 51 (b).

- Les espaces de conception et de non conception

A partir de ces surfaces fonctionnelles, le tracé des espaces de conception et de non conception tels qu'ils ont été définis au chapitre II.2.2.1 à la page 16 doivent être réalisés.

La Figure 52 (a) montre le tracé des espaces de non conception sur fond de l'ancienne perforatrice (en transparence). La Figure 52 (b) intègre ces ENC dans le nouvel espace de conception.

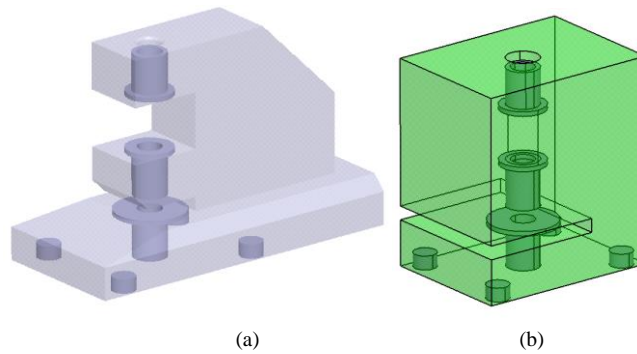


Figure 52. (a) Espaces de non conception du carter visible sur le carter traditionnel ; (b) Espace de conception en vert transparent avec les espaces de non conception. Etude de cas « la perforatrice »

- Autres fonctions

Ici, les fonctions telles que « Faciliter l'insertion des feuilles » de la Figure 44, ou encore « Permettre le post-traitement de dépoudrage » (lors cycle de vie de fabrication) n'ont pas été étudiées et devront être ultérieurement prises en compte pour terminer la conception.

III.2.5. Optimisation topologique

III.2.5.1. Définition

La définition de l'optimisation topologique a été donnée au chapitre II.2 de la page 11. La Figure 53 montre les entrées et les sorties de l'optimisation topologique ainsi que les choix que le concepteur doit faire.

En plus des entrées usuelles de l'optimisation topologique, le concepteur doit faire des choix concernant :

- Le post traitement.
Cela permet de prédire les efforts qui seront nécessaires pour le post traitement, et de les prendre en compte lors de l'optimisation.
- La famille de matériau.
Le choix du matériau doit être en corrélation avec le choix du procédé de FA. Ses caractéristiques mécaniques seront nécessaires pour l'optimisation topologique
- Le type de matériau innovant (Matériau architecturé, matériau à gradient ou les deux).
C'est une donnée nécessaire à connaître avant même de lancer le calcul de l'optimisation topologique. Le choix d'un matériau architecturé ou à gradient doit non seulement être en adéquation avec le procédé de FA choisi, mais aussi apporter une valeur ajoutée au

mécanisme. Les références données dans le Tableau 4 à la page 32 sont une source d'aides pour le choix du type de matériau.

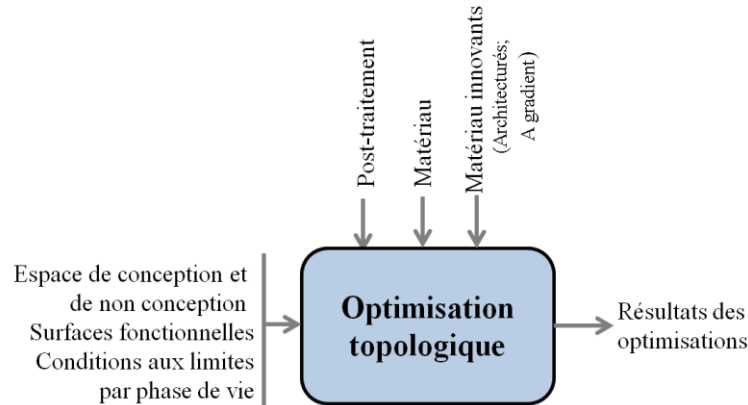


Figure 53. Schéma bloc de l'optimisation topologique

Il est attendu à la fin de cette optimisation les résultats de la répartition de densité de matière au format STEP ou STL qui devront être reconçus.

III.2.5.2. Méthodologie

Il s'agit ici de réaliser les optimisations topologiques par classes d'équivalence en suivant la même démarche que celle proposée au chapitre II.2.2.1 de la page 12. Les 9 étapes sont à nouveau détaillées en Figure 54 avec les entrées, les choix et les sorties.

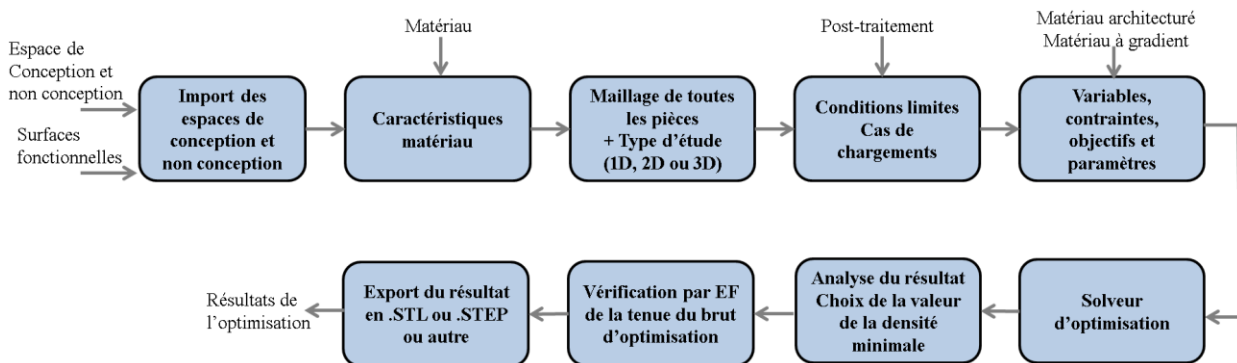


Figure 54. Sous étapes de l'optimisation topologique

III.2.5.3. Exemple d'application sur l'étude de cas « La perforatrice »

Le logiciel d'optimisation topologique utilisé dans ce mémoire est la suite HyperWorks de la société ALTAIR. Le pré-processeur est Hypermesh, le solveur est Optistruct 2018, et le post-processeur est HyperView.

Les espaces de conception et non conception de la Figure 52 sont importés dans le pré-processeur Hypermesh. Les caractéristiques de la matière y sont aussi renseignées. Une fois la pièce maillée, on définit les conditions aux limites et les cas de charges suivants :

- utilisation,

- portage,
- pose scénario 1 (action sur la poignée),
- pose scénario 2 (action sur le carter).

Remarque : Le dépoudrage et l'enlèvement du plateau n'imposent pas des efforts particuliers sur le mécanisme.

L'objectif de l'optimisation est de minimiser la masse avec une contrainte sur la résistance élastique (l'optimisation doit permettre une répartition de matière permettant aux contraintes d'être inférieures à la résistance élastique du matériau).

Le réglage du facteur de pénalité, ou encore la mise en place d'un plan de symétrie sont définis. L'analyse du résultat doit prendre en compte les remarques écrites dans le chapitre II.2.2.1 à la page 12. Il sera ainsi déterminé la densité minimale paraissant la plus viable.

A partir des résultats « bruts » de l'optimisation et en appliquant la valeur de la densité minimale, il faut vérifier le comportement, puis modifier en conséquence les EC et ENC si le comportement n'est pas correct.

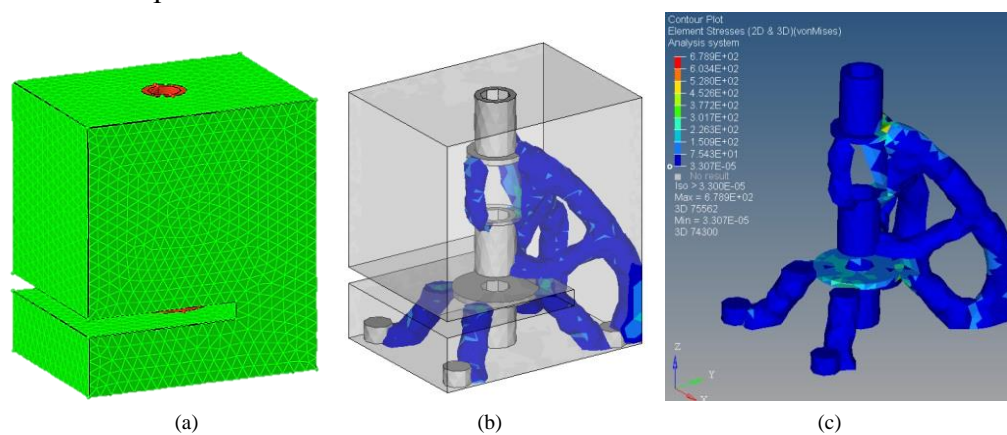


Figure 55. Quelques étapes lors de l'optimisation topologique du carter de la « Perforatrice ». (a) Maillage des volumes ; (b) Choix du seuil de densité ; (c) Vérification du comportement du résultat non re-conçu. Etude de cas « la perforatrice » sous la suite HyperWorks

III.2.6. Les apports des trois optimisations

Suite aux trois optimisations présentées et appliquées sur le cas d'étude, une conception par pièce doit être effectuée :

- à l'aide d'un logiciel de CAO,
- à partir du résultat d'optimisation,
- en prenant en compte les contraintes du procédé de fabrication,
- en répondant aux autres fonctions / caractéristiques qui n'ont pas été prises en compte lors de l'optimisation fonctionnelle,
- en améliorant les caractéristiques influant sur l'objectif.

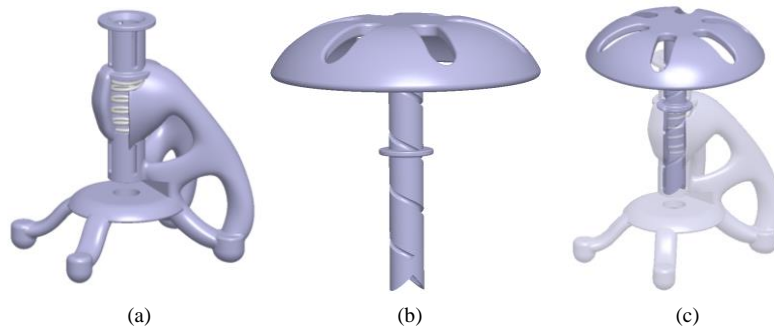


Figure 56. (a) Reconception du carter ; (b) Reconception du poinçon ; (c) Assemblage fini de la « perforatrice »

Il est à présent possible d'estimer les gains apportés par ces trois optimisations comme le montre le Tableau 15.

Tableau 15. Gain de l'application des trois optimisations sur le cas d'étude « la perforatrice »

Caractéristiques	Version		Gain
	Perforatrice conventionnelle	Perforatrice optimisée	
Masse (g)	121,1	56,4	53,4%
Encombrement (cm ³)	41,5	7,5	82%

Ainsi, l'optimisation architecturale a permis d'obtenir un gain volumique, tandis que l'optimisation topologique a permis d'obtenir un gain de masse. Les apports de l'optimisation fonctionnelle sont difficilement quantifiables. Toutefois, le fonctionnement, l'agrément d'utilisation ou encore l'esthétique devraient être améliorés.

III.3. Optimisation topologique d'un système mécanique, le nouveau paradigme

III.3.1. Introduction

Comme cela a été dit au chapitre II.2, la fabrication additive offre l'opportunité de réaliser des pièces de formes complexes non fabricables par les procédés conventionnels. En effet, la fabrication couche par couche octroie une liberté de placer le juste nécessaire au bon endroit. L'optimisation topologique est basée sur des algorithmes de calcul permettant de déterminer où doit se trouver la matière.

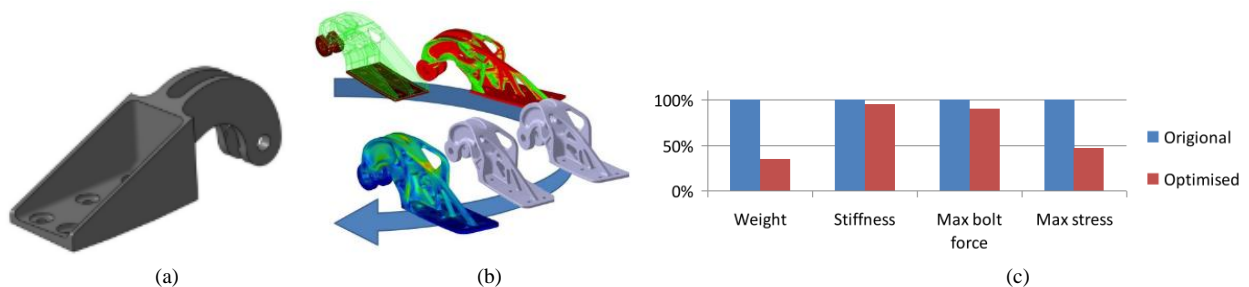


Figure 57. (a) Charnière obtenue par procédés conventionnels ; (b) les différentes étapes de l'optimisation ; (c) comparaison entre la charnière optimisée et la conventionnelle. (Tomlin & Meyer, 2011)

Ainsi les pièces optimisées deviennent plus légères tout en gardant leur tenue aux sollicitations mécaniques (Figure 57). Optimiser une pièce d'un système mécanique influe sur le comportement dynamique de ce dernier. Prenons l'exemple d'un moteur thermique (Figure 58) dans lequel diminuer les effets d'inertie d'un piston, lors des points mort haut et bas, par une optimisation topologique de celui-ci, serait bénéfique. Les efforts de liaison, déterminés avec les caractéristiques du piston initial, influent sur le dimensionnement des axes de guidages et des pièces de transmission. Optimisation faite, le dimensionnement des pièces de guidage et de transmission peut à nouveau être effectué, ce qui entrainera des résultats différents.

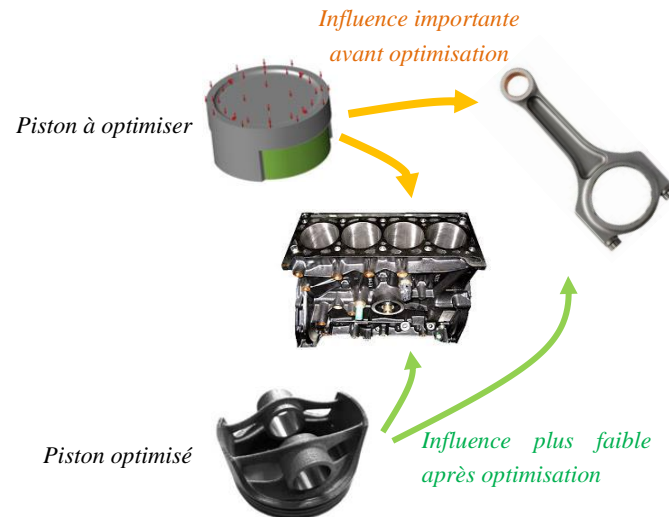


Figure 58. Influence de l'optimisation topologique d'une pièce dans un système mécanique. Source du piston optimisé : Solidthinking.com

A ce jour, la littérature exploite l'optimisation topologique des pièces sans prendre en compte l'impact du nouveau comportement des pièces optimisées sur le système mécanique. Or, comme le montre la Figure 59, l'optimisation de la pièce $\underline{1}$ donne une pièce $\underline{1}'$ de masse, d'inertie et de volume plus faible. Cela a un impact sur les efforts subis par la pièce $\underline{2}'$. Il est ainsi possible de réaliser une nouvelle optimisation sur $\underline{2}'$ entrainant à son tour des modifications des conditions aux limites (CL) de $\underline{3}'$. Cette opération consistant à réaliser à nouveau une optimisation topologique sera appelée une boucle d'optimisation topologique.

De plus, l'ordre d'optimisation a peut-être une influence sur le résultat. C'est-à-dire que le choix entre optimiser simultanément les pièces $\underline{1}$ et $\underline{2}$ ou appliquer directement les nouvelles conditions aux limites de $\underline{1}'$ sur la pièce $\underline{2}$ a peut-être une incidence sur la conception.

Dans les sous-chapitres suivants, sera tout d'abord définie l'optimisation topologique d'un système mécanique en détaillant les différences par rapport à une optimisation topologique usuelle. Puis un organigramme expliquant comment réaliser les boucles d'optimisation sera proposé. Pour ce faire, une discussion sur le choix des espaces de conception sera nécessaire afin de clarifier une des étapes de l'organigramme.

Enfin, l'application sur l'étude de cas « le poignet de robot » sera effectuée. Elle permettra d'illustrer les conséquences de différents chemins d'optimisation et de conclure sur comment

choisir le chemin en fonction des objectifs du concepteur. Pour finir, la présentation des résultats mettra en avant les apports de cette optimisation.

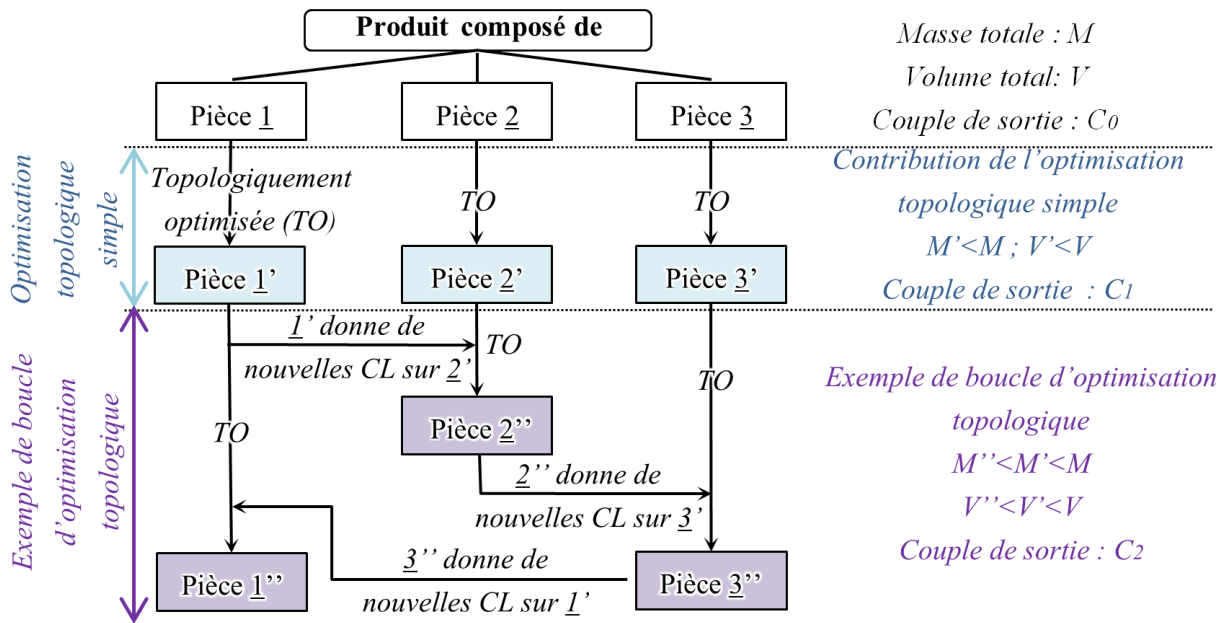


Figure 59. Prise en compte de l'impact des pièces optimisées pour l'optimisation du mécanisme

III.3.2. Méthode TOMS : Méthode d'optimisation topologique d'un système mécanique

L'optimisation topologique d'un système mécanique TOMS (Topological Optimization of a Mechanical System) correspond à l'optimisation topologique de chacune des classes d'équivalence du produit mécanique en prenant en compte les impacts des optimisations entre les classes d'équivalence (voir le schéma bloc à la Figure 60) (Orquéra et al., 2019).

Cela correspond à :

- choisir des chemins d'optimisation adéquats.
On entend par chemin d'optimisation l'ordre des pièces à optimiser. Pour cela, il faudra choisir des critères permettant d'établir quelle pièce ou quel ensemble de pièces sera optimisé en premier puis en second....
- quantifier l'impact d'une optimisation sur une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.
On détermine ainsi si une optimisation nécessite une nouvelle boucle ou non.
- réaliser des boucles d'optimisation.

Une boucle d'optimisation est la réalisation d'une nouvelle optimisation topologique sur une ou sur plusieurs pièces avec des conditions aux limites ainsi que des espaces de conception correspondant aux résultats de l'optimisation précédente. Ainsi la boucle d'optimisation d'un produit mécanique permet de réaliser l'optimisation topologique de chaque classe d'équivalence du produit tout en prenant en compte les impacts collatéraux des optimisations de chacune des optimisations topologiques.

Ces boucles d'optimisation permettront de diminuer :

- les efforts entre les pièces, ce qui augmente la durée de vie des liaisons,
- la masse totale,
- les vibrations,
- les résistances au mouvement,
- le coût matière,
- ...

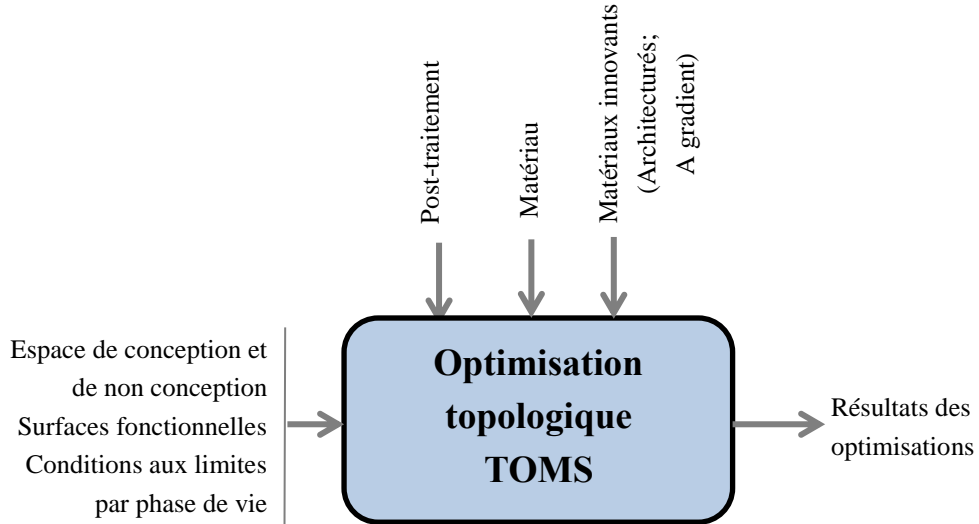


Figure 60. Schéma bloc de l'optimisation topologique d'un produit mécanique (TOMS)

Dans une boucle d'optimisation est réalisée une optimisation topologique dont les étapes sont détaillées à la Figure 61. Cette figure est une adaptation de la Figure 54 de la page 86 qui reçoit une étape supplémentaire. Il est à noter que cette nouvelle étape ne s'applique que pour l'étude d'un système mécanique. C'est pourquoi le symbole du sens interdit y figure indiquant que pour une pièce seule, cette étape est inutile.

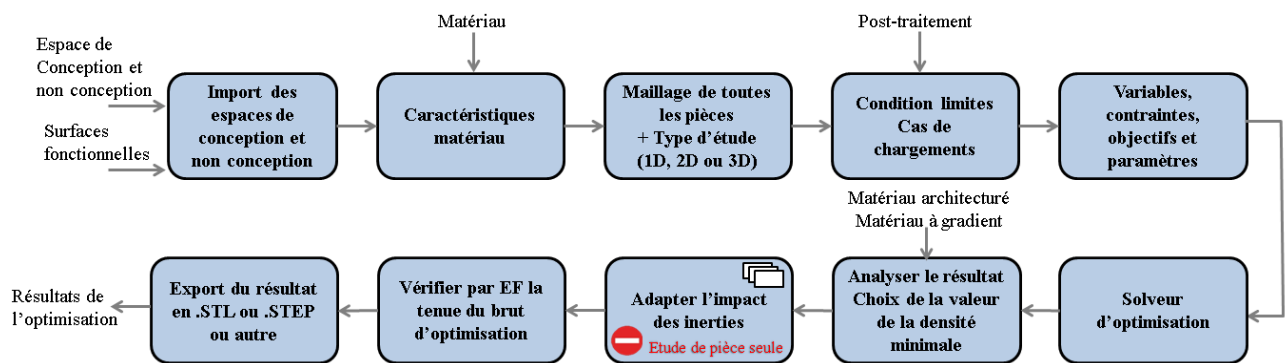


Figure 61. Sous étapes de l'optimisation topologique d'un produit mécanique

Dans les sous-chapitres suivants, seule l'étape rajoutée à la Figure 61 sera détaillée.

III.3.3. Méthodologie

III.3.3.1. Chemins d'optimisation

La première étape de l'optimisation par la méthode TOMS consiste à déterminer la première pièce ou le premier ensemble de pièces à optimiser puis l'ordre des autres pièces du produit. Cet ordre peut influencer les résultats de la conception. Par conséquent, à partir de certains critères, différents chemins doivent être identifiés.

Avant de définir ces critères, une ou plusieurs caractéristiques de comportement mécanique (notée CM_B) du système doivent être choisies. CM_B peut être par exemple la masse d'un système. Pour une pompe ou un moteur, le couple d'entrée ou de sortie peut être la caractéristique sélectionnée.

Deuxièmement, un brainstorming pour établir différents critères d'identification de chemin doit être fait. Par exemple:

- Critère 1 : La pièce dont l'inertie (ou la masse) a le plus d'impact sur le comportement mécanique sera optimisée en premier,
- Critère 2 : La pièce qui, dans le graphe de structure, présente le plus de liaisons cinématiques avec les autres classes d'équivalences du système, sera optimisée en premier,
- Critère 3 : Début de l'optimisation avec la pièce ayant un paramètre dans le plus grand nombre d'équations,
- Critère 4 : Toutes les pièces seront optimisées simultanément,
- Critère 5 : Réaliser des chemins dérivés, par exemple en mélangeant le critère 1 avec le critère 2.

Pour déterminer quelle pièce a le plus grand impact sur le comportement mécanique CM_B , le coefficient de sensibilité réduit S^* (Petit & Maillet, 2008) est utilisé comme le montre l'Équation 6. Cela permet de comparer les effets de coefficients n'ayant pas la même unité.

Équation 6

$$S^*(CM_B/C_i) = C_i \cdot \frac{\partial CM_B}{\partial C_i}$$

CM_B représente la caractéristique mécanique et C_i la caractéristique de la pièce i . La pièce dont la caractéristique conduit à maximiser $S^*(CM_B/C_i)$ sera optimisée en premier pour le critère 1.

Pour le critère 2, à partir du graphe de structure, le nombre de liaisons entre la pièce étudiée et les autres classes d'équivalence devra être établi.

Pour le critère 3, les équations mécaniques statiques et/ou dynamiques doivent être écrites afin de déterminer quelle pièce a un paramètre qui se trouve dans le plus grand nombre d'équations.

III.3.3.2. Estimation de l'impact de l'optimisation

L'estimation de l'impact de l'optimisation consiste à quantifier le besoin d'une nouvelle optimisation topologique. Par exemple, sur la Figure 59 à la page 85, le produit a un couple de sortie C_0 . Suite à l'optimisation topologique, le nouveau couple est C_1 . Si les deux couples sont assez identiques, une optimisation supplémentaire n'est pas utile, et dans le cas contraire, elle est nécessaire.

La question importante est de savoir à partir de quelle valeur de C_1 doit-on réaliser une nouvelle optimisation topologique. À cette fin, le ratio de comportement mécanique (noté R_{CM}) entre les espaces de conception - incluant les espaces de non-conception - avant et après une optimisation topologique, est calculé conformément à l'Équation 7.

Équation 7

$$R_{CM} = \frac{CM_{B-1}}{CM_B}$$

CM_{B-1} et CM_B sont respectivement la caractéristique de comportement mécanique avant et après l'optimisation. B (pour boucle) désigne le numéro de la boucle d'optimisation.

Si R_{CM} est plus faible que $1-\varepsilon$ ou plus élevé que $1+\varepsilon$ alors, l'impact est estimé comme important ce qui nécessite une nouvelle optimisation. Cette boucle sera à nouveau effectuée, jusqu'à ce que le ratio R_{CM} appartienne à l'intervalle $[1-\varepsilon, 1+\varepsilon]$.

ε est appelé le coefficient de convergence. C'est une constante qui doit être imposée dès le début de l'étude. Plus le coefficient de convergence est faible, plus l'impact de l'optimisation sera estimé comme important. Cela engendrera aussi un nombre de boucles qui sera plus élevé et donc un temps de calcul et d'étude plus important. Une discussion sur la valeur d' ε sera proposée à la suite de l'étude de cas « Poignet de robot » au chapitre III.3.4.6.1 à la page 100.

III.3.3.3. Boucle d'optimisation topologique

L'Organigramme des Boucles d'Optimisation Topologique de la Figure 62, appelé OBOT, détaille les étapes des boucles d'optimisation topologique. Il doit être appliqué pour un système mécanique, et ce, par classe d'équivalence.

En fonction du choix du chemin, l'OBOT est appliqué sur la pièce à optimiser en premier (pour les critères 1, 2 et 3) ou sur toutes les pièces simultanément pour le critère 4.

La première boucle d'optimisation topologique correspond aux étapes usuelles de l'optimisation, telle que le montre la Figure 54 en page 81. Un espace de conception et, si nécessaire, un espace de non conception sont intégrés dans le logiciel. Ils sont désignés par $(EC + ENC)_{B=1, p \in [1, n]}$ pour la première boucle. B et n sont respectivement le numéro de la boucle et le nombre de classes d'équivalence ; p est le numéro de la pièce ou de la classe d'équivalence.

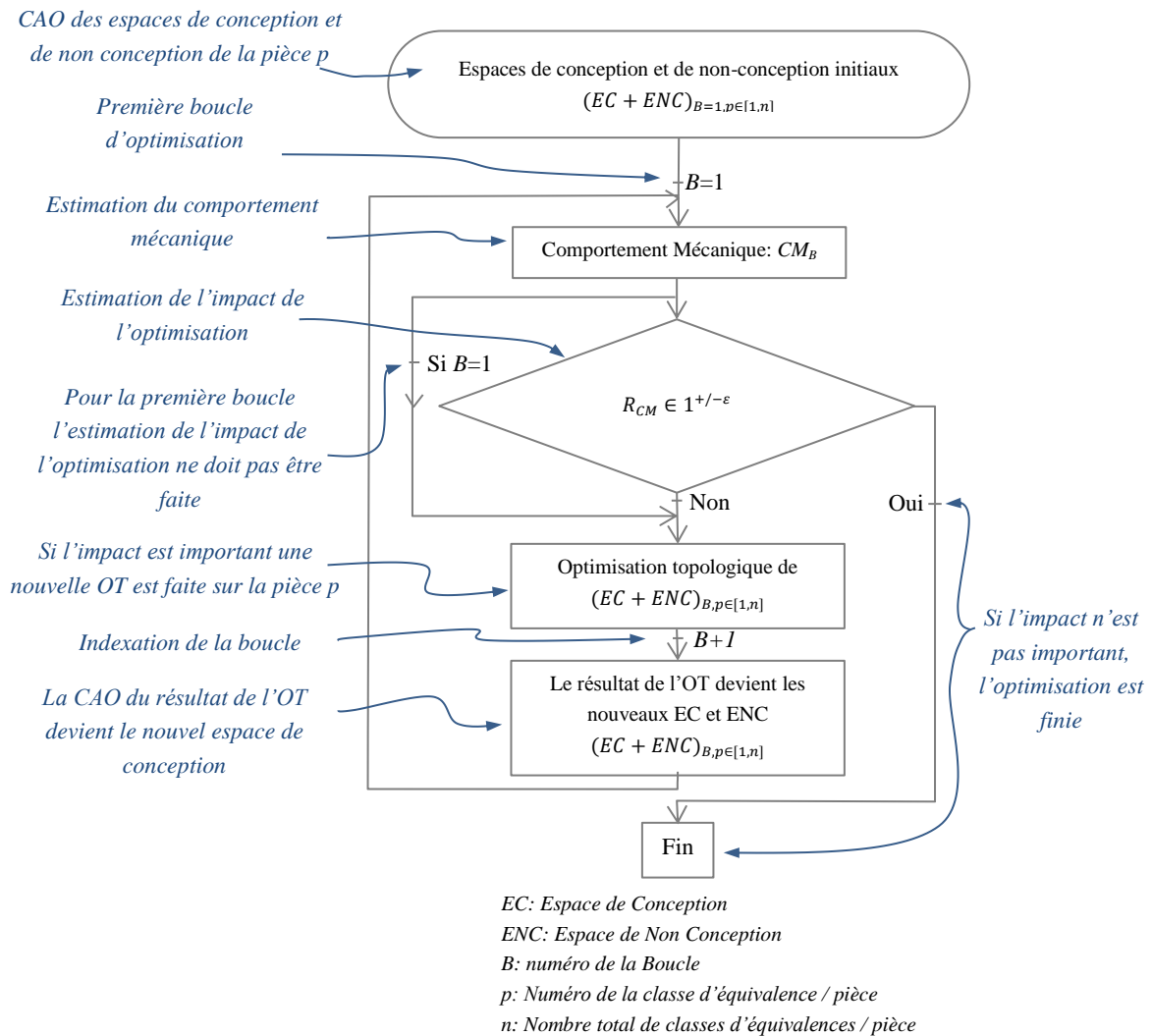


Figure 62. Organigramme de la boucle d'optimisation topologique pour l'optimisation d'un produit mécanique (OBOT)

Le résultat de cette optimisation sera analysé pour choisir le seuil de densité, puis reconçu sous CAO. Cette nouvelle conception sera utilisée comme nouveaux espaces de conception et de non conception. Les raisons sont détaillées ci-dessous. Appelée $(EC + ENC)_{B=2,p \in [1,n]}$, cette nouvelle conception a de nouvelles masses et inerties qui impactent les autres pièces. Afin d'estimer l'impact de ces nouvelles inerties, un ratio de comportement mécanique R_{CM} est calculé.

En général, les espaces de conception doivent être les moins restrictifs possibles afin de laisser plus de liberté au logiciel pour lui permettre de proposer la solution optimale.

Ainsi, normalement, le volume de l'EC sera le plus important possible. À la fin de la première boucle de l'OBOT, comme expliqué précédemment, la masse et l'inertie de chaque pièce sont diminuées, de sorte que les intensités des efforts sont inférieures à celles de la première boucle.

Une deuxième boucle doit être appliquée dans laquelle deux espaces de conception peuvent être exploités:

- le résultat de la première boucle,
- l'espace de conception initial.

Afin de donner plus de possibilités au logiciel, il semblerait judicieux d'imposer les nouvelles conditions aux limites à l'espace de conception initial. Mais, comme le montre la Figure 63, utiliser l'EC initial, conduit à une masse plus élevée que d'utiliser l'EC reconçu à partir du résultat de l'optimisation précédente avec un temps de calcul similaire à la première boucle.

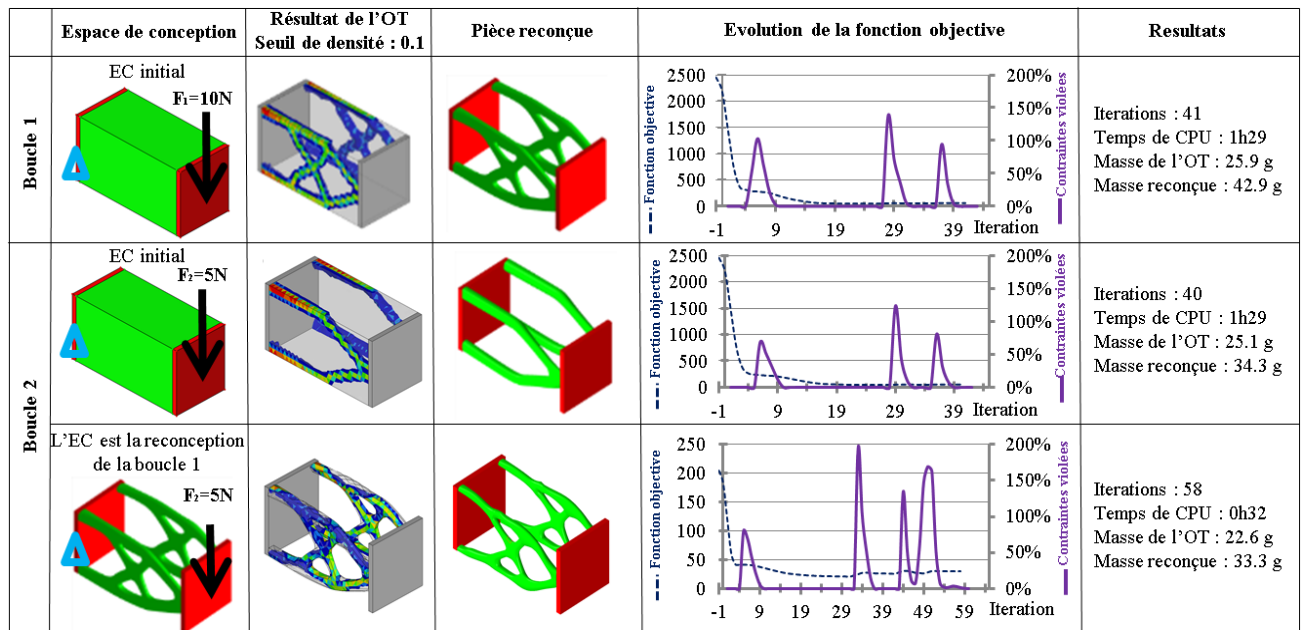


Figure 63. Impact du choix des espaces de conception sur la seconde boucle d'optimisation

De plus, si la première boucle d'optimisation donne un résultat de répartition de la densité sous des efforts conséquents, ce même résultat supportera d'autant plus facilement des efforts plus faibles. L'utilisation de l'EC de la boucle précédente a donc une grande probabilité de converger avec une masse inférieure et un temps de calcul plus court.

En conclusion, pour la première optimisation topologique, l'espace de conception devra être le moins restrictif possible. Ensuite, pour les boucles suivantes, l'utilisation du résultat précédent avec des efforts plus faibles permet d'obtenir de meilleurs résultats.

Sur la Figure 63, deux masses sont proposées. La valeur "Masse de l'OT" est la masse du résultat indiquée par le logiciel. La «valeur de masse de reconception» est obtenue après la reconception de l'optimisation. Les valeurs de masse sont différentes pour deux raisons.

La première concerne le choix de la valeur du seuil de densité. La solution de l'optimisation est un volume maillé rempli d'éléments ayant chacun une densité spécifique (cf. Équation 5 de la page 14). L'analyse de cette solution consiste à choisir une valeur seuil de densité pour laquelle la pièce semble viable. Ce seuil de densité élimine tous les éléments ayant une densité inférieure à ce seuil et impose une densité de 100% pour tous les autres, comme le montre la Figure 63 où le seuil est de 0.1 pour chaque boucle afin de permettre la comparaison. La masse finale est donc supérieure à la masse donnée par le logiciel obtenue pour l'espace de conception avec la distribution de densité.

La deuxième raison est due à la phase de reconception. L'outil de CAO utilisé ici consiste à "englober" manuellement le matériau de la pièce par la fonction PolyNURBS du logiciel Inspire

d'Altair. Cette opération est réalisée en englobant toute la matière et en réalisant des congés et arrondis de rayons plus importants que ceux proposés par l'OT (cf. Figure 19 page 21).

III.3.4. Application de la méthode TOMS

III.3.4.1. Cas d'étude

Un support d'étude est exploité pour démontrer les apports des boucles d'optimisation et les influences des choix des chemins d'optimisation. L'étude de cas va être menée sur l'optimisation d'un poignet de robot montré en Figure 64 et dont le comportement mécanique a été préalablement détaillé dans le livre (Bône et al., 1984). Un outil est guidé en rotation par le porte outil 3 du poignet de robot.

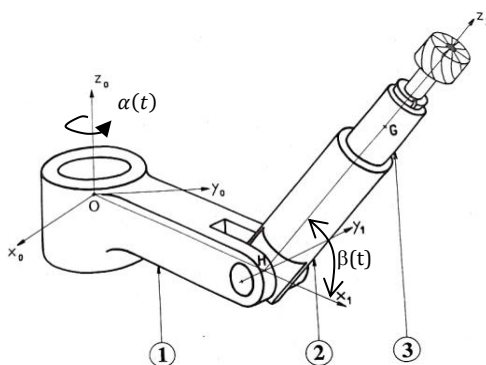


Figure 64. Etude de cas : « poignet de robot » (Bône et al., 1984)

Le support 1 est entraîné en rotation autour de \vec{Z}_0 par le moteur M_{01} (voir la Figure 64). Ce support est lié au bras 2 par une liaison pivot de centre H et d'axe \vec{y}_1 . Le porte outil 3 est en liaison pivot avec le bras 2 suivant (G, \vec{Z}_2).

L'étude sera menée dans le cas d'utilisation critique du robot. La position du bras 2 sera telle que $\beta = 0$ rad. Le support tournant 1 a une accélération égale à $\ddot{\alpha}(t) = \frac{\pi}{6}$ rad/s². Les distances HG et OH sont égales à 0,2 m et l'outil ne tourne pas autour de son axe. Les équations mécaniques traduisant le comportement dynamique du poignet sont détaillées en annexe à la page 170.

Les hypothèses suivantes sont émises :

- les frottements dans les liaisons ainsi que le frottement de l'air sur les pièces mobiles sont négligés,
- les accélérations et les décélérations sont considérées au $t=2s$,
- toutes les pièces sont en acier (Module de Young $E=210\ 000\text{MPa}$; Densité $\rho = 7.8$; Coefficient de Poisson $\nu = 0.3$; Résistance pratique à l'extension $R_{pe} = 210\ \text{MPa}$),
- un coefficient de sécurité $s=2$ est appliqué.

Des espaces de conception et de non conception par classes d'équivalence ont été définis et dessinés sous CAO telle que le montre la Figure 65. La CAO des espaces de conception et non conception du robot en acier, avant optimisation et sans les moteurs, fait au total 16,2 kg et nécessite un couple de moteur M_{01} pour tourner autour de \vec{Z}_0 de 634 N.mm.

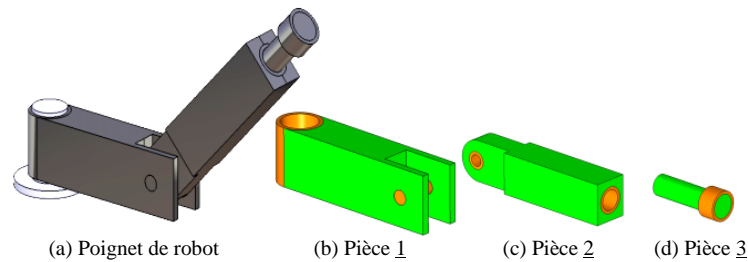


Figure 65. (a) Poignet de robot sous CAO ; (b) Support ; (c) Bras ; (d) Outil. Les espaces de conception sont en vert et ceux de non conception en orange

Chaque pièce sera optimisée à l'aide du solveur Optistruct et re-conçue à l'aide de Inspire d'ALTAIR.

L'objectif de l'optimisation topologique est de minimiser la masse avec une contrainte sur le déplacement et la tenue mécanique.

Les conditions aux limites sont détaillées sur les perspectives en coupe de la Figure 66. La contrainte de déplacement statique est imposée aux points A, B et C de chacune des pièces. Le déplacement ne doit pas dépasser 0,3 mm. Pour les pièces 1 et 2, (\vec{x}_1, \vec{z}_0) est utilisé comme plan de symétrie. Le porte-outil 3 est une pièce tournant autour de l'axe \vec{z}_2 . Or, les efforts s'exerçant sur cette pièce gardent le même sens et la même direction tout au long du fonctionnement, c'est pourquoi une répétition circulaire (7 répétitions) de l'optimisation sera imposée.

Afin de pénaliser les densités intermédiaires, le facteur de pénalité sera imposé à 3 (voir chapitre II.2.2.1 à la page 12) et le filtre de sensibilité appelé « mindim » imposant une dimension minimale est égal à 6, correspondant à 2 fois la pénalité comme cela est imposé par le logiciel. La dimension du maillage est de 2 mm sauf pour la pièce 3 qui, de par ses petites dimensions nécessite un maillage plus petit de 1 mm.

Enfin, toutes les optimisations topologiques ont été réalisées sur le même cluster. Il est composé de 2 processeurs Xeon E5-2690/v2, utilisant chacun 2 cœurs de 25 Mo L3 avec une fréquence de 3 GHz. La mémoire RAM est de 256 Go.

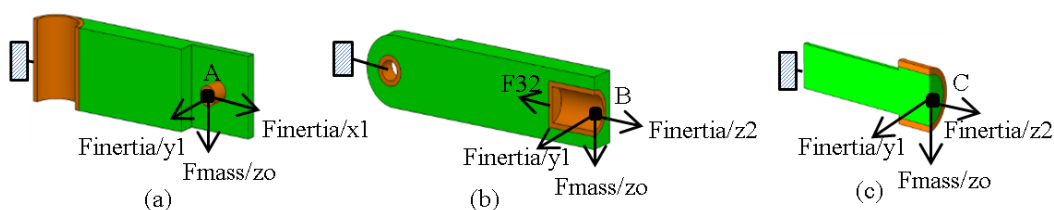


Figure 66. Conditions aux limites de l'étude de cas « poignet de Robot »

III.3.4.2. Choix des chemins d'optimisation

Pendant le fonctionnement, le robot subit différents types d'efforts tels que les efforts d'utilisation ou encore les efforts d'inertie. Les erreurs de trajectoires dues à ces efforts sont une source de défauts dans le cas d'usinages de types surfaciques et géométriques (Mejri, 2016). C'est pourquoi, dans cette étude, l'optimisation topologique du bras sera exploitée pour diminuer les effets d'inertie. Ainsi, l'objectif de cette étude sera d'utiliser l'OBOT pour diminuer les inerties des pièces. Pour cela, il sera proposé 3 chemins :

- Chemin 1 : appliquer l'OBOT sur la pièce ayant l'impact mécanique le plus important,
- Chemin 2 : appliquer l'OBOT sur la pièce qui influe le plus grand nombre d'équations mécaniques du comportement du système,
- Chemin 3 : appliquer l'OBOT sur toutes les classes d'équivalence en même temps.

Quel que soit le chemin, le coefficient de convergence ε sera imposé à 0,1. Cette valeur est choisie afin de valider l'organigramme des boucles et sera discutée par la suite. La caractéristique choisie pour déterminer le rapport de comportement mécanique R_{CM} est le couple moteur permettant de mettre en rotation tout le poignet robot par le support $\underline{1}$ (voir Équation 20 à la page 170 du couple T_{01}). Le couple moteur a été choisi car il est estimé que l'optimisation topologique permettra la diminution des inerties de toutes les pièces composant le poignet de robot et ainsi permettra de dimensionner un moteur M_{01} de plus petite taille et capacité. Ainsi le rapport se déterminera d'après l'Équation 8 :

Équation 8

$$R_{CM} = \frac{T_{01,B-1}}{T_{01,B}}$$

III.3.4.2.1. Détermination de la pièce ayant l'impact mécanique le plus important

Dans ce sous chapitre, la caractéristique permettant d'avoir un effet le plus important possible sur le couple du moteur est recherchée. L'étude de la sensibilité réduite S^* (Petit & Maillet, 2008) sera effectuée afin de déterminer quelle pièce a le plus fort impact. Le coefficient de sensibilité réduite S^* est déterminé pour chaque caractéristique, à partir de l'Équation 6 de la page 87, tel que le montre le Tableau 16.

Il ressort de cette étude que la masse du bras $\underline{2}$ est la caractéristique ayant l'influence la plus élevée sur le couple T_{01} .

Tableau 16. Evaluation de l'influence des masses et inerties de chacune des pièces du « poignet de robot »

Caractéristiques C_i	m_2	m_3	$I_{1(0,z0)}$	$I_{2(H,z2)}$	$I_{2(H,z2)}$
$S^*(T_{01}/C_i) = C_i \cdot \frac{\partial T_{01}}{\partial C_i}$ (N.mm)	0.34	0.21	0.03	0.05	0.03

III.3.4.2. Détermination de la pièce qui influe sur le plus grand nombre d'équations mécaniques

T_{ij} et F_{ij} représentent respectivement le moment et la force entre les pièces i et j . $I_{p(L,\bar{m})}$ représente l'inertie de la pièce (ou classe d'équivalence) p au point L suivant l'axe \bar{m} . Le Tableau 17 récapitule les caractéristiques mécaniques et le nombre de formules dans lesquelles elles sont utilisées. La classe d'équivalence $\underline{3}$ impacte le plus grand nombre d'équations mécaniques.

Tableau 17. Nombre d'équations impactées par les caractéristiques des pièces du « poignet de robot »

Caractéristiques	Nombre d'équations utilisant les caractéristiques	Equations concernées
$I_{1(O,z_0)}$ (kg.m ²)	1	T_{01}
$I_{2(H,x_2)}$ (kg.m ²)	2	$T_{12}; T_{01}$
$I_{2(H,z_2)}$ (kg.m ²)	2	$T_{12}; T_{01}$
m_2 (kg)	2	$F_{12}; T_{01}$
m_3 (kg)	4	$F_{23}; F_{12}; T_{12}; T_{01}$
$I_{3(G,x_3)}$ (kg.m ²)	2	$T_{12}; T_{01}$
$I_{3(G,z_2)}$ (kg.m ²)	3	$T_{23}; T_{12}; T_{01}$

III.3.4.3. Application de l'OBOT suivant le chemin 1

L'OBOT sera appliqué en premier sur la pièce ayant la plus grande influence sur le comportement mécanique. Cette pièce est le bras $\underline{2}$. Le chemin 1 est décrit à la Figure 67.

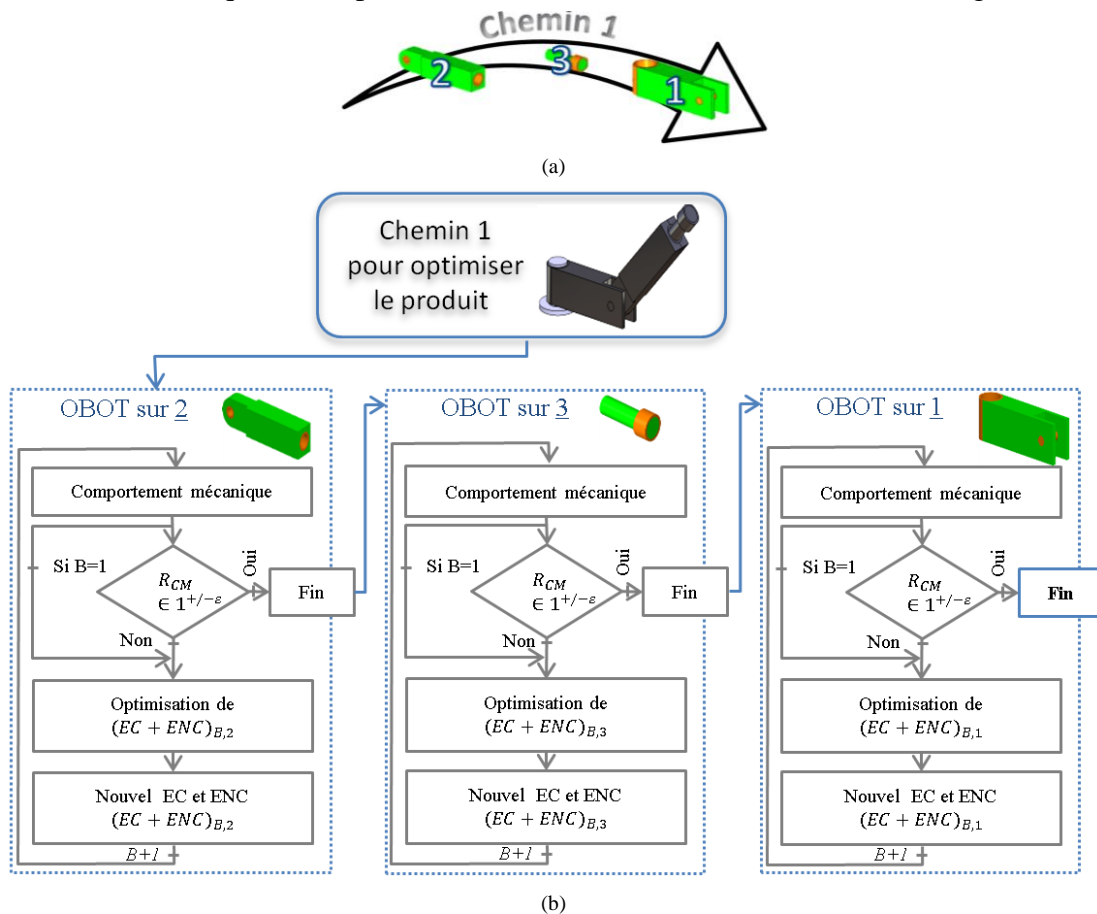


Figure 67. (a) Ordre d'optimisation des classes d'équivalences pour le chemin 1 ; (b) Détail de l'application de l'OBOT suivant le chemin 1 sur le cas d'étude « poignet de robot »

Toutes les boucles d'optimisation sont d'abord effectuées sur le bras 2. Puis, lorsque le comportement a convergé, toutes les boucles OBOT sont appliquées sur le porte outil 3 et enfin sur le support 1. Les résultats sont reportés dans le Tableau 18.

Tableau 18. Résultats de l'application de l'OBOT suivant le chemin 1

	OBOT sur la pièce <u>2</u>		OBOT sur la pièce <u>3</u>		OBOT sur la pièce <u>1</u>	
Masse initiale (g)	8000		1264		6970	
Numéro de la boucle	Boucle 1	Boucle 2	Boucle 1	Boucle 2	Boucle 1	Boucle 2
R_{CM}	2.12	1.05	2.43	1.04	1.23	1.02
Masse de la reconception (g)	1055	768	274	246	1466	1130
Couple T_{01} (N.mm)	299	285	117	112	91	89
Temps de la boucle (h:min)	8:37	0:26	19:28	0:45	8:58	1:02
Temps total (h:min)	39:19					

- OBOT sur la pièce 2, boucle 1

La première boucle a convergé et toutes les contraintes ont été satisfaites après 44 itérations. Le ratio R_{CM} entre le comportement mécanique précédent et le nouveau comportement égal à 2,12 a dépassé les limites spécifiées précédemment (pour rappel, le coefficient de convergence ϵ est égal à 0,1). Ainsi, une nouvelle boucle doit être réalisée.

- OBOT sur la pièce 2, boucle 2

La deuxième boucle a convergé et toutes les contraintes ont été satisfaites après 39 itérations. Le ratio R_{CM} est de 1.05, il appartient à l'intervalle $[1- \epsilon ; 1+ \epsilon]$. Les boucles d'optimisation de la pièce 2 sont donc terminées.

Comme expliqué précédemment, l'espace de conception utilisé pour la deuxième boucle est le résultat reconçu de la première boucle. La Figure 68 montre les deux applications possibles de la deuxième boucle de l'OBOT. La première application se fait à partir du résultat de la boucle précédente, et la deuxième à partir des EC et ENC initiaux. Dans le premier cas, la masse de la pièce 2 reconçue à la fin de la boucle 2 est de 12% moins élevée que dans le deuxième cas. Cela confirme donc le choix de l'utilisation du résultat de la boucle précédente comme nouvel espace de conception (cf. le sous-chapitre III.3.3.3).

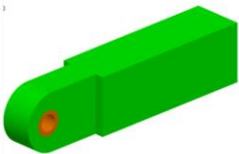
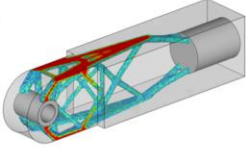
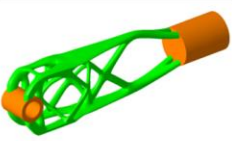
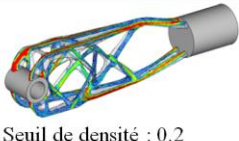
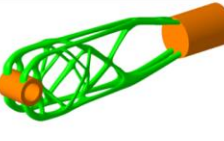
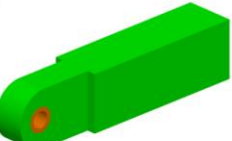
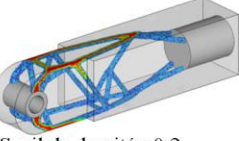
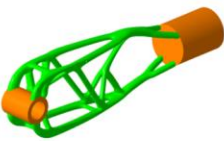
EC + ENC initiaux	Résultat de la boucle 1	EC+ENC de la boucle 1	Résultat de la boucle 2	Re-conception finale
		 Masse : 1055 g	 Seuil de densité : 0.2 Masse de l'OBOT : 574 g	 Masse : 768g
EC+ENC initiaux	Résultat de la boucle 2	Re-conception finale		
	 Seuil de densité : 0.2 Masse de l'OBOT : 675 g	 Masse : 870,6 g		
Masse initiale : 8000 g	Seuil de densité : 0.3 Masse de l'OBOT: 815 g			

Figure 68. Comparaison de résultats en fonction du choix de l'espace de conception sur le « poignet de robot »

- OBOT sur la pièce 3, boucles 1 et 2

La première boucle a donné un rapport R_{CM} égal à 2,43 ce qui sort de l'intervalle de convergence. Le rapport R_{CM} de la deuxième boucle est compris dans l'intervalle.

- OBOT sur la pièce 1, boucles 1 et 2

Le ratio R_{CM} a nécessité deux boucles pour rentrer dans les limites imposées par le coefficient de convergence.

La Figure 69 montre les résultats des répartitions des densités suite à l'optimisation topologique de chacune des pièces et ce pour chacune des boucles du chemin 1. Les re-conceptions des espaces de conception y sont aussi montrant l'évolution de la conception.

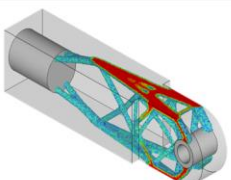
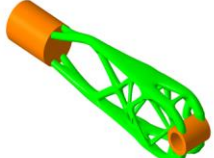
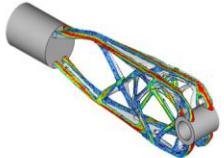
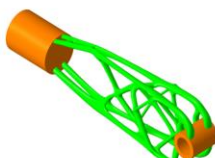
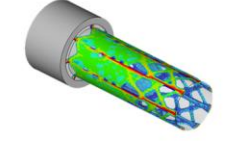
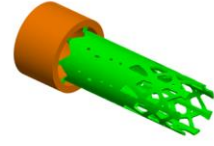
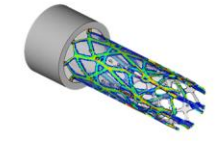
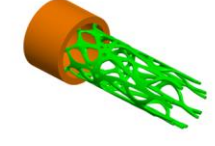
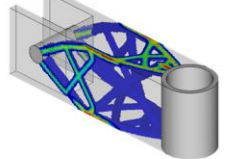
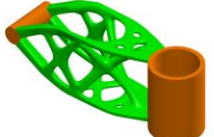
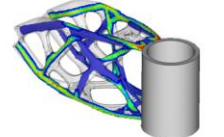
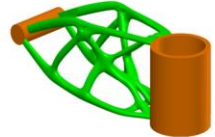
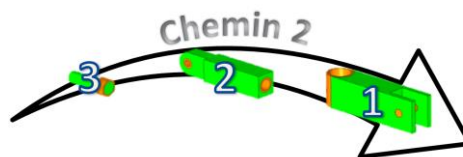
	Résultat de l'optimisation Boucle 1	Reconception des Ec	Résultat de l'optimisation Boucle 2	Reconception des Ec
Bras <u>2</u>				
Porte outil <u>3</u>				
Support <u>1</u>				

Figure 69. Résultats de la répartition des densités et de la reconception sous CAO pour le chemin 1. Etude de cas « poignet de robot »

III.3.4.4. Application de l'OBOT suivant le chemin 2

L'OBOT est appliqué en premier lieu sur la pièce influençant le plus grand nombre d'équations mécaniques. Il a été déterminé précédemment que le porte outil 3 influe sur le plus grand nombre d'équations car il est situé en bout de chaîne. Le détail du chemin 2 ainsi que les résultats sont montrés respectivement à la Figure 70 et au Tableau 19.



(a)

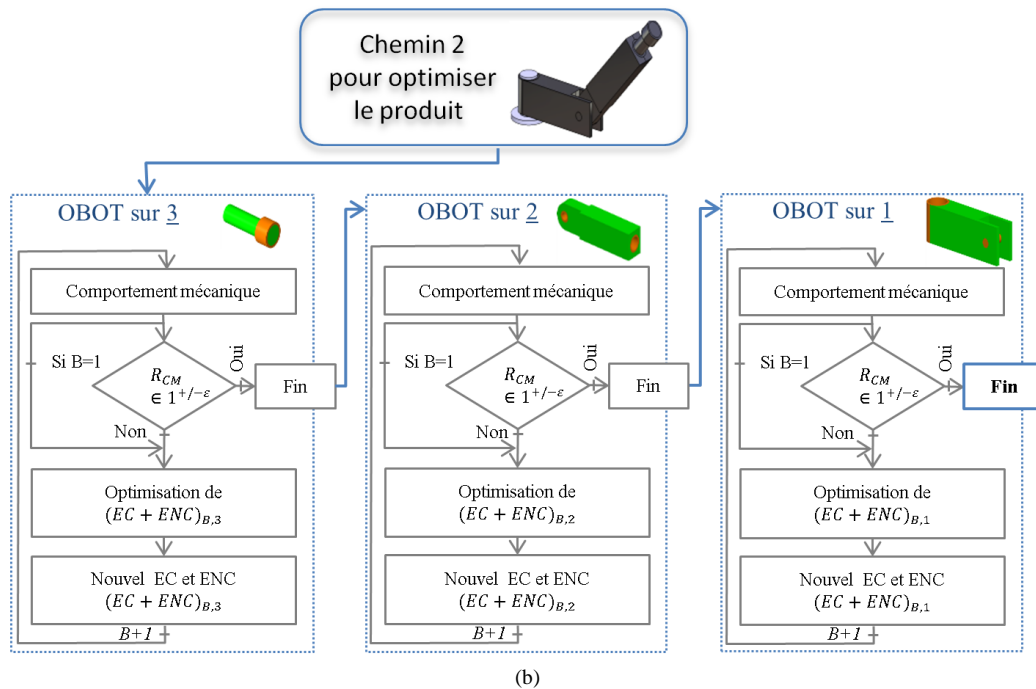


Figure 70. (a) Ordre d'optimisation des classes d'équivalences pour le chemin 2 ; (b) Détail de l'application de l'OBOT suivant le chemin 2 sur le cas d'étude « poignet de robot »

Tableau 19. Résultats de l'application de l'OBOT suivant le chemin 2

Masse initiale (g)	OBOT sur la pièce 3		OBOT sur la pièce 2		OBOT sur la pièce 1	
	1264		8000		6970	
Numéro de la boucle	Boucle 1	Boucle 2	Boucle 1	Boucle 2	Boucle 1	Boucle 2
R_{CM}	1.36	1.01	3.84	1.08	1.23	1.04
Masse de la reconception (g)	274	246	926	749	1434	912
Couple T_{01} (N.mm)	466	461	120	112	91	88
Temps de la boucle (h:min)	19:28	0:45	10:20	0:32	7:48	1:09
Temps total (h:min)	40:04					

	Résultat de l'optimisation Boucle 1	Reconception des Ec	Résultat de l'optimisation Boucle 2	Reconception des Ec
Porte outil 3 Masse : 1264 g T_{01} : 634 N.mm	 Temps de calcul : 19h28min	 Masse : 274 g Couple T_{01} : 466 N.mm	 Temps de calcul : 0h45min	 Masse : 246 g Couple T_{01} : 461 N.mm
Bras 2 Masse : 8000 g T_{01} : 461 N.mm	 Temps de calcul : 10h20min	 Masse : 926 g Couple T_{01} : 120 N.mm	 Temps de calcul : 0h32min	 Masse : 749 g Couple T_{01} : 112 N.mm
Support 1 Masse : 6970 g T_{01} : 112 N.mm	 Temps de calcul : 7h48min	 Masse : 1434 g Couple T_{01} : 91 N.mm	 Temps de calcul : 1h09min	 Masse : 912 g Couple T_{01} : 88 N.mm

Figure 71. Résultats de la répartition des densités et de la reconception sous CAO pour le chemin 2. Etude de cas « poignet de robot »

Toutes les boucles d'optimisation ont convergé et toutes les contraintes ont été satisfaites. En tenant compte du rapport de comportement mécanique R_{CM} , chaque pièce a nécessité deux

boucles, comme indiqué dans le Tableau 19. Pour chaque pièce, l'espace de conception obtenu lors de la première boucle a été utilisé pour la deuxième boucle, comme expliqué à la section III.3.3.3. La Figure 71 montre les résultats obtenus lors de l'optimisation topologique ainsi que la mise en volume.

III.3.4.5. Application de l'OBOT suivant le chemin 3

Le chemin 3 est celui pour lequel l'OBOT est appliqué sur les trois pièces en même temps. Le détail est montré à la Figure 72. La première boucle correspond à l'optimisation topologique de chaque pièce en même temps. Suite à la reconception du résultat obtenu, le rapport R_{CM} est calculé. La vérification de l'appartenance du rapport R_{CM} à l'intervalle $[1 - \varepsilon ; 1 + \varepsilon]$ permet de déterminer s'il est nécessaire de réaliser une nouvelle boucle ou si l'optimisation a convergé. Les résultats du chemin 3 sont résumés dans le Tableau 20.

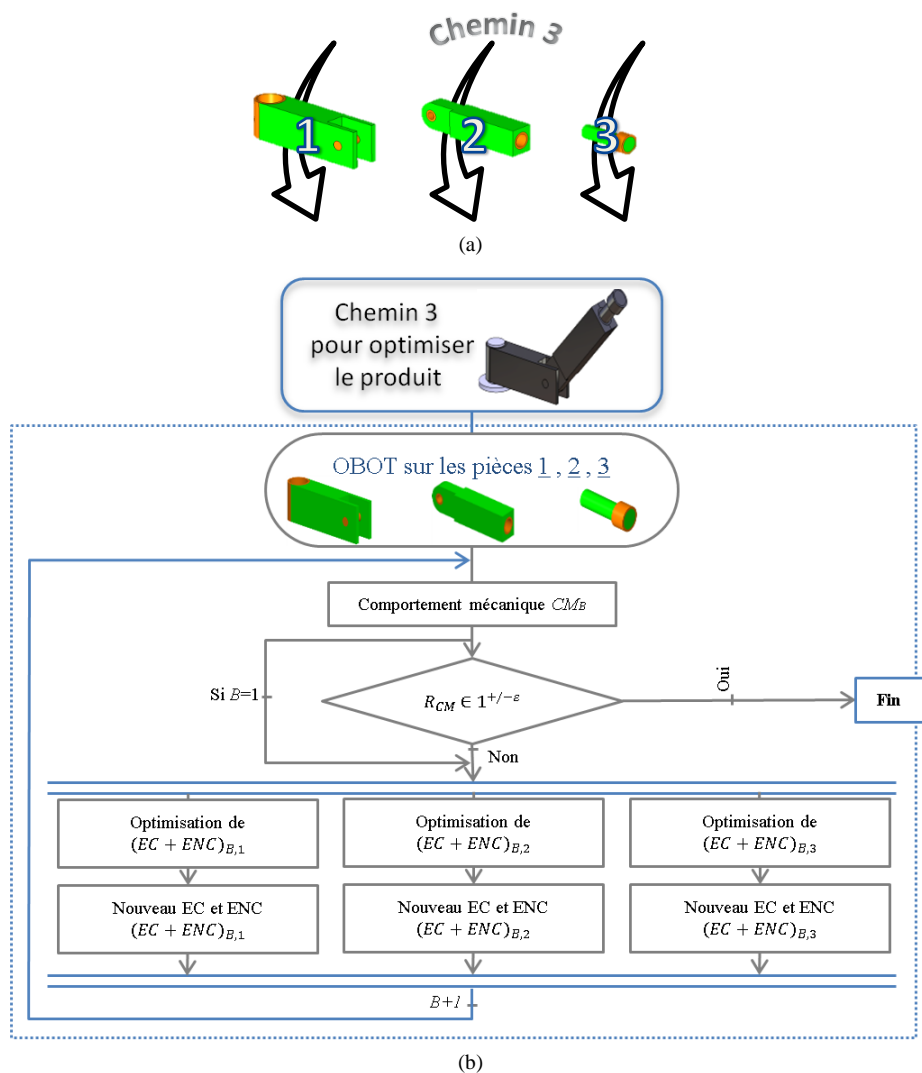


Figure 72. (a) Optimisation simultanée des classes d'équivalences pour le chemin 3 ; (b) Détail de l'application de l'OBOT suivant le chemin 3 sur le cas d'étude « poignet de robot »

Trois boucles ont été nécessaires pour que l'OBOT converge. Toutefois, le temps total de calcul logiciel est inférieur aux deux chemins précédents. En effet, comme les pièces ont été optimisées simultanément, le temps CPU total n'est pas la somme du temps de calcul du logiciel pour

chaque optimisation, mais la somme du temps maximal pour chaque boucle, comme expliqué à la Figure 73. La Figure 74 montre les résultats obtenus lors de l'optimisation topologique ainsi que la mise en volume.

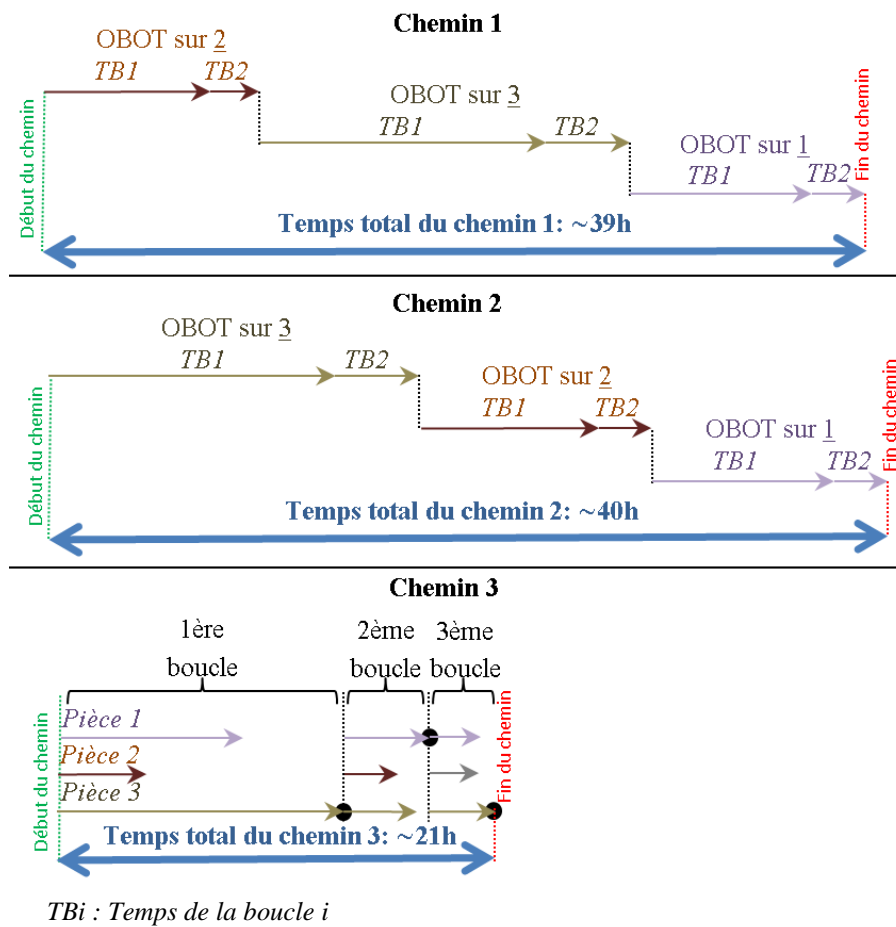


Figure 73. Comparaisons du temps de calcul logiciel pour les trois chemins d'optimisation pour le « poignet de robot »

	Reconception des Ec Boucle 1	Reconception des Ec Boucle 2	Reconception des Ec Boucle 3
Support 1 Masse : 6970 g	 Masse : 1616 g	 Masse : 1287 g	 Masse : 1133 g
Bras 2 Masse : 8000 g	 Masse : 1055 g	 Masse : 801 g	 Masse : 735 g
Porte outil 3 Masse : 1264 g	 Masse : 274 g	 Masse : 246 g	 Masse : 234 g
	Couple T_{01} : 110 N.mm RCMB : 5,74	Couple T_{01} : 92 N.mm RCMB : 1,2	Couple T_{01} : 86 N.mm RCMB : 1,07

Figure 74. Résultats de la répartition des densités et de la reconception sous CAO pour le chemin 3. Etude de cas « poignet de robot »

Tableau 20. Résultats de l'application de l'OBOT suivant le chemin 3

	Initial	Boucle 1	Boucle 2	Boucle 3
R_{CM}		5.74	1.20	1.07
OBOT sur la pièce 1. Masse (g)	6970	1616	1287	1133
OBOT sur la pièce 2. Masse (g)	8000	1055	801	735
OBOT sur la pièce 3. Masse (g)	1264	274	246	234
Couple T_{01} (N.mm)	634	110	92	86
Temps total (h:min)	20:54			

III.3.4.6. Discussions

III.3.4.6.1. Discussion à propos du coefficient de convergence

Le coefficient de convergence utilisé pour l'étude de cas est égal à 0,1. Cela signifie que le comportement mécanique de la nouvelle boucle ne doit pas dépasser plus ou moins 10% de la précédente. Les résultats des différents chemins montrent que cette valeur est correcte et donne une bonne convergence.

Le choix d'un coefficient de convergence proche de zéro augmentera considérablement le nombre de boucles sans résultats effectifs. De plus, la diminution des charges réduira le gain d'optimisation topologique en masse.

Au contraire, choisir un coefficient de convergence élevé réduira le nombre de boucles, mais les résultats risquent de ne pas être optimaux.

Par exemple, utiliser ϵ égal à 0,3 pour le troisième chemin ne génère que deux boucles au lieu de trois (Tableau 21). La masse totale du robot est supérieure de 11% par rapport au résultat obtenu pour $\epsilon=0.1$. De même, le couple moteur a augmenté de 7%. Par contre, il n'y a qu'une économie de temps de 3%.

Tableau 21. Influence du coefficient de convergence sur le chemin 3

Chemin 3	$\epsilon=0.3$	$\epsilon=0.1$	$\epsilon=0.05$
Couple T_{01} (N.mm)	92	86	85
Masse totale (g)	2334	2102	2051
Temps total (h:min)	20:15	20:54	21:05
Nombre de boucles	2	3	4

La Figure 75 montre l'évolution de la masse totale et du rapport R_{CM} du Poignet de robot en fonction du nombre de boucles pour le chemin 3. On remarque que plus le coefficient de convergence est faible et plus les courbes du rapport de comportement ainsi que de la masse totale tendent vers une asymptote (en orange pour le rapport R_{CM} sur le graphe de la Figure 75). Or il y a un gain significatif lorsque la pente est importante. En conclusion il faut choisir une valeur raisonnable de ϵ pour obtenir un gain significatif sans perte de temps. Ainsi il semble que le coefficient de convergence doit être compris dans l'intervalle $[0,1 ; 0,2]$.

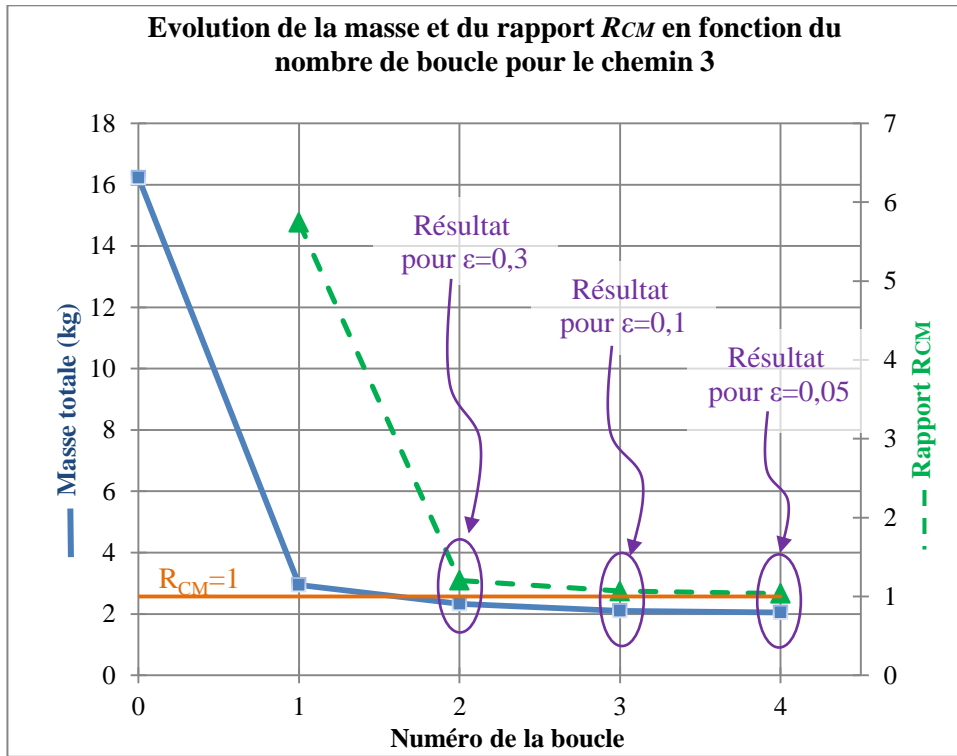


Figure 75. Graphe de l'évolution de la masse totale et du rapport R_{CM} du « poignet de robot » en fonction du nombre de boucles pour le chemin 3

III.3.4.6.2. Discussions sur les chemins dérivés

L'étude de cas a été optimisée en appliquant trois chemins d'optimisation. D'autres chemins peuvent en être dérivés. La Figure 76 montre deux autres chemins possibles.

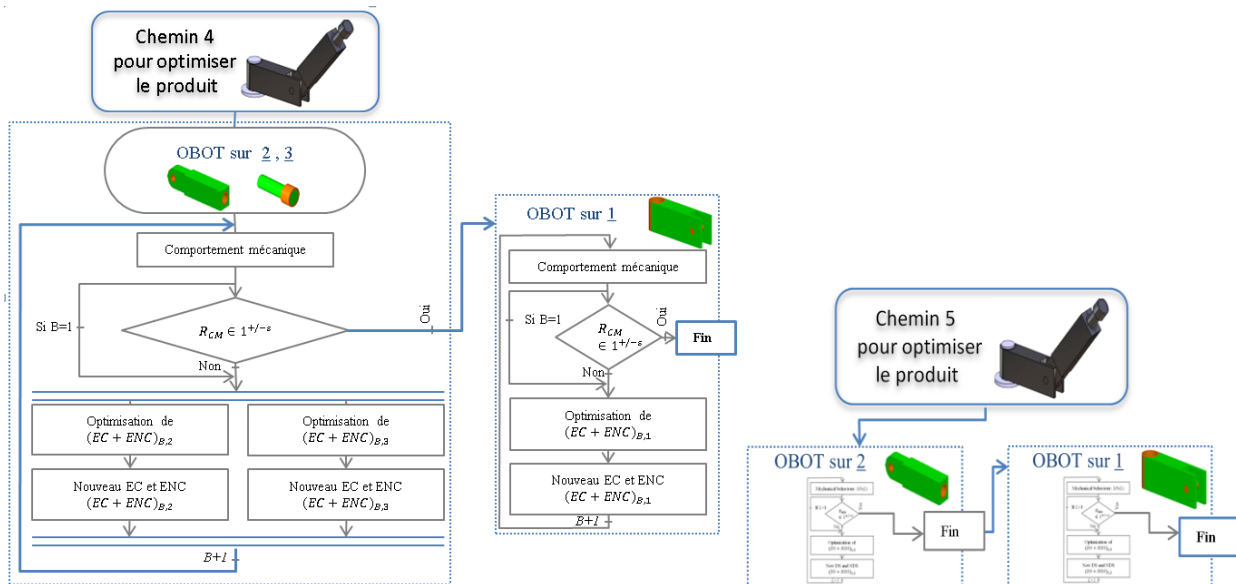


Figure 76. Chemins dérivés pour optimiser le produit « poignet de robot »

Le support 1 est la pièce qui doit supporter les masses et les effets d'inertie de bras 2 et du porte outil 3. Ainsi, il est possible pour un nouveau chemin numéroté 4 d'appliquer simultanément l'OBOT sur les pièces 2 et 3, puis sur la pièce 1.

Le dernier chemin a été défini en faisant le constat que la masse de la pièce 3 peut être négligée devant l'importance des masses des autres pièces. Ainsi, cette pièce ne sera pas optimisée dans le chemin 5. Cela peut correspondre à un critère supplémentaire dans lequel, il sera retiré de l'étude d'optimisation les pièces qui ont peu d'impact.

III.3.4.7. Les résultats

La Figure 77 montre les reconceptions des pièces pour chaque chemin et les résultats sont résumés dans le Tableau 22. Sans l'application de l'organigramme des boucles d'optimisation topologique proposé précédemment, une seule optimisation serait réalisée. Pour vérifier le gain de l'OBOT, le Tableau 22 montre les différences entre une optimisation topologique unique et les résultats de l'OBOT. En ce qui concerne ces résultats, l'OBOT présente des gains importants avec à peu près le même temps de calcul.

Tableau 22. Résultats de chaque chemin et comparaison avec une seule boucle d'optimisation sur le cas d'étude « poignet de robot »

	Sans OBOT	Chemin 1	Chemin 2	Chemin 3	Chemin 4	Chemin 5	Gain entre le chemin 3 et sans OBOT
Couple T_{01} (N.mm)	110	89	88	86	89	91	22%
Masse totale (g)	2945	2143	1906	2102	1925	2668	29%
Temps total (h:min)	19:28	39:19	40:04	20:54	28:37	18:52	-7%
Nombre de boucles	1	2	2	3	2	2	

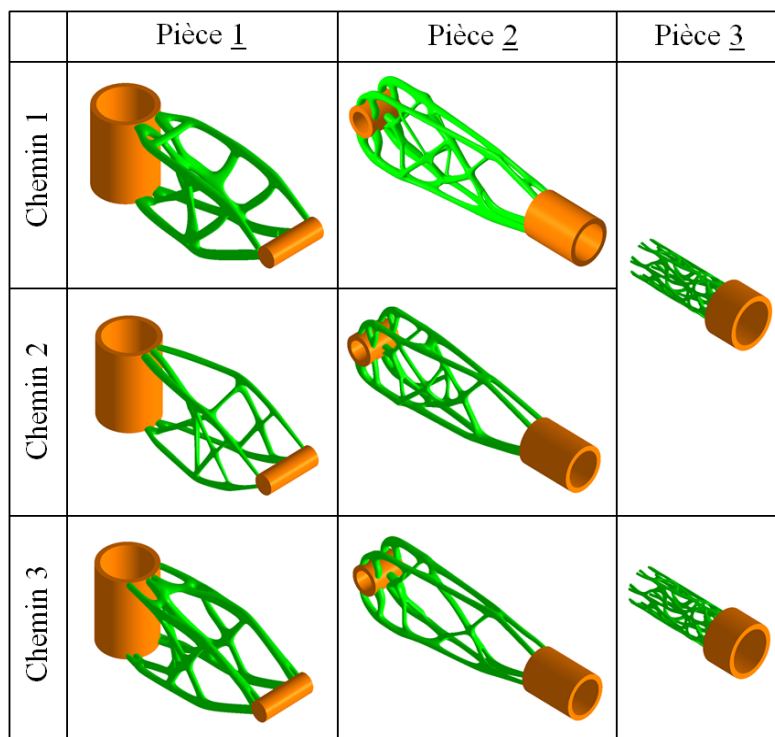


Figure 77. Reconception du poignet de robot suite aux trois chemins d'optimisation

III.3.4.8. Conclusion sur les résultats : principes de choix des chemins d'optimisation

Tout d'abord, on peut remarquer que le chemin 1 n'a que peu d'avantage. Au contraire, le chemin 3 semble avoir les meilleurs résultats, en particulier pour obtenir un couple moteur le plus faible.

Le chemin 4 présente des résultats quasi identiques au chemin 2. Les deux permettent la plus grande diminution de la masse mais avec un temps de calcul plus long.

Enfin, si l'objectif principal est de gagner du temps, il faudra utiliser le chemin 5.

Grâce à ces résultats, classés dans le Tableau 23, le chemin le plus efficace peut être choisi pour atteindre les objectifs du concepteur. Pour cette raison, pour les mécanismes à graphe de liaison ouvert dont l'objectif d'optimisation est de minimiser la masse avec pour contrainte le déplacement, trois principes peuvent être dégagés :

- Pour optimiser un produit avec un minimum de temps :
 - La ou les pièces ayant le moins d'influence sur le comportement mécanique ne doivent pas être optimisées.
 - La pièce la plus influente doit être optimisée en premier.
- Pour optimiser un produit afin d'obtenir le meilleur comportement mécanique :
 - Toutes les pièces ayant un impact sur le comportement mécanique doivent être optimisées simultanément.
- Pour optimiser un produit afin d'obtenir la masse la plus faible :
 - La pièce dont la masse est impliquée dans le plus grand nombre d'équations doit d'abord être optimisée.
 - Pour réduire le temps de calcul, il est possible d'optimiser simultanément la pièce dont la masse est la plus élevée.

Tableau 23. Classement des chemins en fonction des objectifs du concepteur

	L'objectif est de réduire		
	La masse	Le couple	Le temps
Chemin 1	3	3	4
Chemin 2	1	2	5
Chemin 3	2	1	2
Chemin 4	1	3	3
Chemin 5	4	4	1

1 représente le meilleur chemin, 5 représente le moins bon

III.3.5. Conclusion sur la méthode TOMS

Ainsi des principes de choix de chemin d'optimisation ont été établis en fonction des objectifs des concepteurs. Trois principes d'optimisation ont été définis, en fonction de l'objectif : minimiser le temps de calcul, obtenir le meilleur comportement mécanique ou encore obtenir la masse la plus faible. Le respect de ces recommandations devrait aider les concepteurs à optimiser un système mécanique.

La méthode présentée est un outil pratique pour concevoir des systèmes statiques ou dynamiques.

Pour l'étude de cas traitée, l'utilisation de l'OBOT avec le chemin 2 d'optimisation conduit à un gain de masse supplémentaire de 35% par rapport à une optimisation topologique unique.

L'intégration de l'OBOT dans une méthodologie de conception pour la fabrication additive (DfAM) fournira un outil rationnel et utile pour obtenir un système mécanique dans lequel :

- des économies de matière seront réalisées,
- la masse sera inférieure,
- le comportement dynamique sera meilleur,
- les liaisons cinématiques entre les classes d'équivalences subiront moins de contraintes mécaniques,
- la puissance d'entrée pourra être diminuée,
- ...

Le choix de l'espace de conception pour les boucles d'optimisation successives a également été étudié. L'utilisation du résultat de l'optimisation de la boucle précédente améliore les résultats.

Même si la topologie des résultats peut légèrement différer, la démarche TOMS présentée ne dépend pas du logiciel ni du modèle mathématique utilisé. En effet, la boucle de l'optimisation topologique sera appliquée de la même manière, quel que soit le logiciel, et la conclusion sera identique.

La méthode TOMS doit être utilisée pour un produit multi-composants dans lequel la masse et l'inertie ont un impact sur le comportement mécanique.

Le cas d'étude exploité pour montrer l'apport de la méthode TOMS est un système à graphe de liaisons ouvert. Il serait intéressant de compléter cette recherche en étudiant un système d'architecture complexe, par exemple un produit avec un graphe de liaisons comportant des boucles fermées. Les liens entre les pièces n'étant plus « hiérarchiques », cela entraînera des conclusions certainement complémentaires.

Enfin, l'étude menée sur les gains du TOMS est réalisée pour des objectifs (minimiser la masse, ou compliance index) et des contraintes spécifiques. Des objectifs autres que ceux proposés dans cette thèse pourraient avoir une incidence sur les résultats.

III.4. Conclusion sur les trois familles d'optimisation

Il a été montré tout au long de ce chapitre que trois familles d'optimisation distinctes (optimisations architecturale, fonctionnelle et TOMS) peuvent être appliquées sur un système mécanique. Chacune d'entre-elles peut s'appliquer indépendamment l'une de l'autre. Toutefois, lors d'une conception d'un système mécanique il semblerait opportun d'exploiter ces trois optimisations afin d'obtenir la pièce ou l'assemblage répondant au mieux aux exigences. Pour cela, un ordre d'application ainsi qu'une proposition méthodologique ont été proposés. Leurs définitions ainsi que la méthodologie d'application des trois familles d'optimisation ont été détaillées. Puis, un cas d'étude a permis de mettre en lumière les apports de ces optimisations.

Il a été aussi montré la pertinence de faire subir plusieurs boucles d'optimisation à un système mécanique qui comporte des pièces mobiles. Cela permet d'obtenir un gain plus important que ce soit sur les objectifs fixés par le concepteur, mais aussi sur le temps de calcul, la quantité de matière, le comportement mécanique... Des résultats obtenus, trois principes de conception ont été énumérés permettant au concepteur de choisir le chemin le plus adapté à ses objectifs.

Une méthodologie de conception globale, prenant en compte ces optimisations permettrait de répondre simultanément aux verrous 1, 2 et 3. Ainsi, dans le chapitre suivant sera présentée l'intégration des trois familles d'optimisation au sein d'une méthodologie globale de conception d'un système mécanique réalisé par fabrication additive.

IV. Méthodologie de conception de systèmes mécaniques multibords pour la fabrication additive

IV.1.	Introduction et ambitions de la méthodologie	108
IV.2.	Présentation de la méthodologie proposée	108
IV.2.1.	Présentation générale	108
IV.2.2.	Présentation détaillée	112
IV.3.	La méthodologie pas à pas	117
IV.3.1.	Cas d'étude	117
IV.3.2.	Etape 1.1 Spécifications générales	119
IV.3.3.	Etape 1.2 Spécification du produit	120
IV.3.4.	Etape 2.1 Optimisation architecturale	121
IV.3.5.	Etape 2.2 Optimisation fonctionnelle	123
IV.3.6.	Etape 2.3 Optimisation topologique	129
IV.3.7.	Etape 3.1 Mise en volume, (Re)Conception	132
IV.3.8.	Etape 3.2 Conception du brut de fabrication	134
IV.3.9.	Etape 4.1 Validation en phases de fonctionnement	135
IV.3.10.	Etape 4.2 Validation en phases de fabrication-post traitement	137
IV.4.	Essais sur le cas d'étude	137
IV.4.1.	Stratégie des essais	137
IV.4.2.	Mise en place des essais	138
IV.4.3.	Résultats des essais	143
IV.5.	Conclusion	146
IV.5.1.	Conclusion sur les résultats	146
IV.5.2.	Conclusion sur la méthodologie	148

IV.1. Introduction et ambitions de la méthodologie

Comme cela a été écrit dans la conclusion à la fin du chapitre précédent, regrouper tous les conseils de conception et d'optimisations pour concevoir un système mécanique multicorps, paraît indispensable. Cette partie est donc la présentation d'une méthodologie de conception de systèmes mécaniques multicorps pour la fabrication additive. La méthodologie proposée est la solution mise en place lors de cette thèse pour répondre au verrou 3.

Le premier chapitre (chapitre IV.2) sera dédié à la description générale de la méthodologie. Une présentation des différents niveaux de lecture de cette méthodologie permettra aux débutants comme aux initiés d'appréhender les quatre grandes phases qui seront par la suite découpées en neuf étapes de conception.

Dans le chapitre suivant (chapitre IV.3) seront détaillées chacune des neuf étapes en spécifiant les données nécessaires pour alimenter la méthodologie, les actions à réaliser, ainsi que les données d'entrée. Cette méthodologie sera illustrée pas à pas par un cas d'étude : le moteur à air comprimé.

Afin de montrer les apports des optimisations dans un contexte complet de conception, le cas d'étude sera conçu de quatre manières différentes. Le premier moteur est issu de la conception pour les procédés traditionnels et sera le moteur de référence pour toute comparaison. Puis deux moteurs seront conçus pour la FA en appliquant sur l'un l'optimisation topologique et sur l'autre les optimisations fonctionnelle et topologique. Enfin un dernier moteur sera issu de la méthodologie complète proposée dans ce mémoire. Sur ce moteur seront appliquées les optimisations architecturale, fonctionnelle et TOMS.

Le chapitre IV.4 présente finalement les expérimentations menées avec quatre moteurs fabriqués afin de réaliser des tests comparatifs de différents résultats de conception.

IV.2. Présentation de la méthodologie proposée

IV.2.1. Présentation générale

La méthodologie proposée a pour objectifs :

- de concevoir (ou reconcevoir) un système mécanique (ou une pièce) à réaliser par fabrication additive,
- d'utiliser toutes les optimisations possibles (détaillées au chapitre III) pour améliorer le mécanisme et d'exploiter toutes les opportunités de la fabrication additive, présentées au chapitre II.2, pour améliorer le fonctionnement d'un mécanisme,

- de capitaliser les connaissances / découvertes / astuces /... à ce jour de la conception pour la FA,
- de pouvoir s'appliquer au plus grand nombre de technologies de fabrication additive,
- de guider le concepteur tout au long des étapes de conception, pour la plupart des procédés de FA, et ce pour des novices ou des confirmés en FA.

Les étapes usuelles de conception pour la fabrication additive sont au nombre de quatre comme le montre la Figure 78.

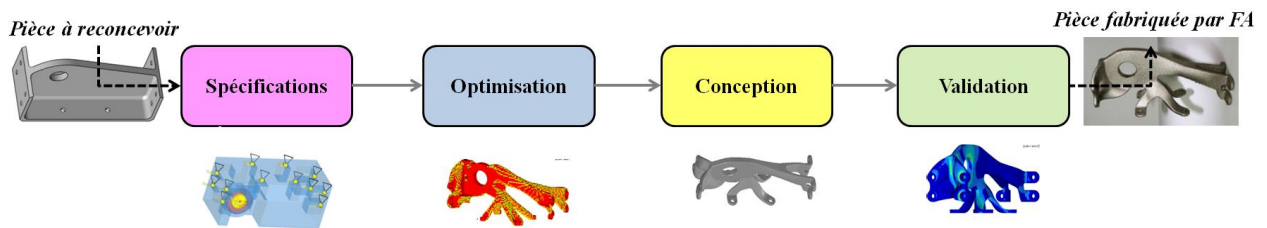


Figure 78. Etapes de conception usuelles illustrées par l'étude de (Seabra et al., 2016)

La méthodologie développée dans ce mémoire suit cette logique. Toutefois, chacune de ces grandes étapes est décomposée en sous-étapes. Cette méthodologie a trois niveaux d'exploration.

Le premier niveau de lecture, sous forme d'organigramme simple, montre les quatre grandes phases de la méthodologie (Figure 79). A cette figure est associé un tableau détaillant chacune des étapes et complète cette lecture. A chaque étape le concepteur est invité à :

- effectuer des actions (comme par exemple, réaliser l'analyse fonctionnelle),
- faire des choix (comme par exemple, quelle pièce doit être réalisée par FA),
- fournir des livrables et documents annexes (tels que les dessins de définition).

Le deuxième niveau d'exploration (Figure 80) est réalisé en s'inspirant des diagrammes SADT. Chacune des étapes est détaillée en sous-étapes. La méthodologie est composée de 9 sous-étapes qui regroupent la plupart des aides et des avancées de la littérature scientifique sur la fabrication additive écrites à ce jour. Certaines sous-étapes reçoivent le symbole :

Etude de pièce seule . Ce symbole signifie que l'étape ne doit se faire que pour l'étude d'un produit.

Le troisième niveau d'exploration correspond aux détails des sous-étapes dans lesquelles figure le symbole

Etape	A choisir	Actions à effectuer	Livrables
1	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces à faire en FA • Composants externes • Fabrication directe de liaisons 	<ul style="list-style-type: none"> • Définir les objectifs principaux de la conception • Caractéristiques des fonctions influant sur l'objectif • Analyse fonctionnelle par phase de vie • Schématisation • Analyse mécanique • Analyse fonctionnelle interne • Dimensionnement des composants externes 	<ul style="list-style-type: none"> • Schéma cinématique • Liste des caractéristiques influant l'objectif • Analyse fonctionnelle • Analyse fonctionnelle interne • Cas de chargements (conditions aux limites) • Dimensions des composants externes
2	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé de FA, post traitements • Orientation de fabrication des pièces • Bio-Inspiration • Choix du matériau innovant (architecture, à gradient, impression 4D, auxétique, multimatériaux) • Choix du matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Lister les caractéristiques, contraintes et défauts du procédé de FA • Optimisation architecturale • Optimisation fonctionnelle • Définir les espaces de conception et de non conception • Optimisation topologique (TOMS pour un produit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats des optimisations • Liste des caractéristiques, contraintes et défauts du procédé de FA • Fonctions non traitées pendant les optimisations • Post-traitements nécessaires
3	<ul style="list-style-type: none"> • Trajectoires pour les procédés FDM et DED 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception CAO en prenant compte : <ul style="list-style-type: none"> ○ Des caractéristiques des fonctions influant l'objectif ○ Des contraintes et des défauts du procédé de FA • Conception pour la fabrication (mise en place des supports, surpasseurs d'usinage, surfaces de reprises ...) • Estimer le coût par pièce • Estimer les gains (si re-conception) • Estimer le temps de fabrication 	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces et assemblage sous CAO • Premières estimations des gains et des coûts • Trajectoires pour la FDM et le DED
4	<ul style="list-style-type: none"> • Réglage du paramétrage machine 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation cinématique • Vérification du comportement dynamique • Vérifications par éléments finis • Vérification fonctionnelle • Vérification de la tenue des pièces en fabrication et post-traitement (usinage, enlèvement des supports ...) • Estimation de l'impact environnemental 	<ul style="list-style-type: none"> • Dessins de définition • Dessin d'ensemble • CAO des bruts de fabrication • Estimation de l'impact environnemental

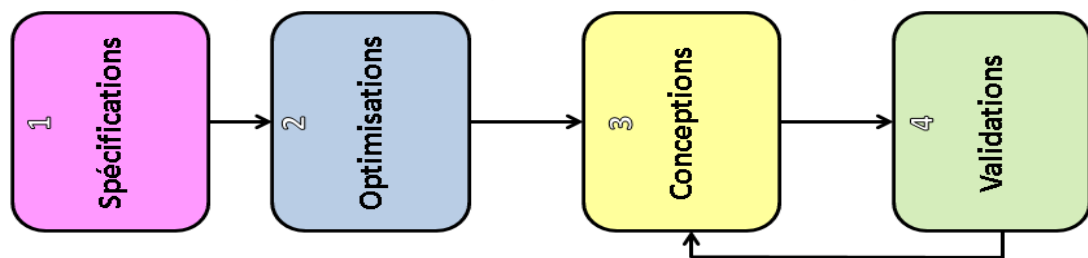


Figure 79. Méthodologie de conception d'un système mécanique pour la fabrication additive

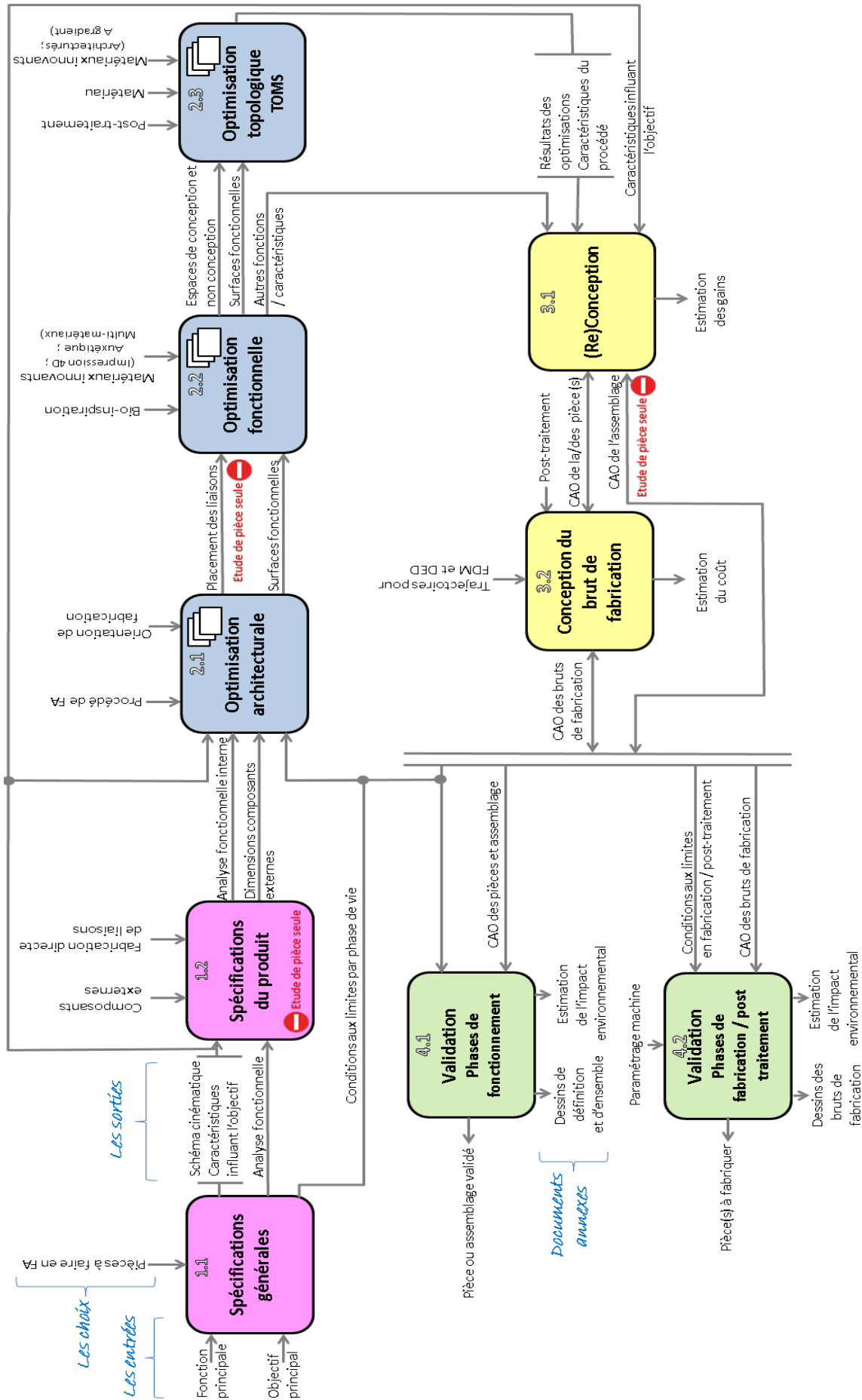


Figure 80. Détails des sous-étapes de la méthodologie de conception d'un produit mécanique pour la fabrication additive

IV.2.2. Présentation détaillée

IV.2.2.1. Etape 1.1 : Les spécifications générales

Cette première étape consiste à recueillir les exigences et les spécifications.

Cela correspond tout d'abord à la définition de(s) objectif(s) de la (re)conception pour la FA. Cela signifie qu'il faut justifier le choix de concevoir (ou de reconcevoir) la pièce ou le système mécanique pour la FA. Cet objectif peut par exemple être :

- Avoir un système plus léger,
- Avoir un système unique et individualisé,
- Diminuer les effets d'inerties pour diminuer le dimensionnement de la motorisation,
- Augmenter la fréquence propre du système,
- ...

L'objectif de conception (ou de reconception) de la pièce (ou de l'assemblage) sera influencé par différents paramètres et caractéristiques. Les caractéristiques permettant de vérifier et de valider l'objectif (ou les objectifs) de conception et sur lesquelles la conception peut apporter une plus-value seront citées. Ces caractéristiques permettront tout au long de la conception de cibler les points à améliorer et à contrôler. Cette liste sera une donnée de sortie de cette étape.

La fonction principale du produit sera explicitée en amont. Puis l'analyse fonctionnelle externe devra soigneusement être décrite et les spécifications détaillées (spécification du besoin, diagramme des interacteurs...) et ce, pour chaque étape du cycle de vie (post-traitement, usinage, montage, utilisation ...). A chaque fonction principale ou de contrainte correspondra une ou plusieurs caractéristiques permettant de valider la fonction. Cette liste sera utilisée dans une prochaine étape.

S'il s'agit d'un système mécanique, il faudra réaliser le tracé du schéma cinématique. Afin de tracer la cinématique du concept, les diverses méthodologies de créativité et d'innovation doivent être utilisées. A partir du schéma cinématique, il faut déterminer la loi d'entrée-sortie.

A chacune des phases de vie du produit, il faudra déterminer les conditions aux limites. Les conditions aux limites précisent l'action du milieu extérieur sur le contour du système. Elles définissent les déplacements et les contraintes imposées.

Le concepteur doit, dès cette première étape choisir les pièces à réaliser par fabrication additive. Elles seront choisies en s'appuyant sur les critères donnés au chapitre II.3 (page 33) et des références citées.

IV.2.2.2. Etape 1.2 : Les spécifications du produit

Cette étape ne doit se réaliser que s'il s'agit de la conception d'un système mécanique et non d'une pièce.

A partir des caractéristiques influant sur l'objectif de (re)conception, de l'analyse fonctionnelle externe ainsi que du schéma cinématique, le concepteur doit déterminer si :

- des liaisons cinématiques entre classes d'équivalences doivent directement être fabriquées par FA,
- il faut insérer des composants externes. Ils doivent assurer des fonctions telles que le guidage (roulement, coussinet...), le positionnement (pion de centrage) ou autre (câble, capteur...),
- des pièces appartenant à la même classe d'équivalence peuvent être unies pour n'en faire qu'une.

Ces choix se font sans connaître encore le procédé de fabrication additive. Cela permettra de choisir plus tard le procédé le mieux adapté aux exigences du concepteur au lieu d'adapter la conception aux contraintes du procédé choisi.

Un pré-dimensionnement des composants externes sera fait afin de connaître leurs caractéristiques dimensionnelles et mécaniques.

L'analyse fonctionnelle interne est effectuée sur chaque classe d'équivalence. Des surfaces fonctionnelles pour remplir chaque fonction seront proposées. Si nécessaire ces surfaces fonctionnelles seront dimensionnées (pression de Hertz, longueur de guidage...).

Les études de type mécanique (statique, dynamique et énergétique) seront effectuées si l'objectif de conception l'exige. Cette analyse mécanique permet d'écrire les équations de la statique et de la dynamique qui seront utilisées dans les étapes ultérieures (notamment lors de l'optimisation TOMS).

IV.2.2.3. Etape 2 : Les optimisations

Les optimisations seront à appliquer sur la pièce ou sur le produit. Il est à noter que les différentes familles d'optimisation, présentées au chapitre III.2, sont utilisées dans cette méthodologie. Les optimisations seront appliquées dans l'ordre proposé dans ce chapitre.

Pour un système mécanique, l'optimisation TOMS décrite dans le chapitre III.3 est appliquée.

Cette étape aboutit à :

- un concept issu de l'optimisation topologique (ou TOMS),
- un choix du procédé de FA,
- un choix de matériau.

IV.2.2.4. Etape 3.1 : (Re)Conception

La troisième étape correspond à la mise en volume ou reconception du système mécanique. A partir des résultats de l'optimisation, la première conception est réalisée sous CAO. C'est une interprétation qui, dans un premier temps, doit être au plus proche du résultat de l'optimisation.

A cette étape, les caractéristiques à améliorer proposées lors de l'étape 1.1, doivent être analysées pour que la conception puisse y répondre. Ainsi, par exemple, une canalisation peut être tracée afin d'améliorer le refroidissement.

Les contraintes de fabrication (et les caractéristiques du procédé) doivent être prises en compte lors de la conception. L'épaisseur minimale de paroi, le vrillage des pièces, le jeu minimal pour les liaisons directes, le dépoufrage sont quelques exemples de contraintes de fabrication à prendre en compte.

Une fois le système conçu, il est possible d'effectuer une première analyse des gains. S'il s'agit d'une reconception, une estimation des gains en termes de masse et volume ou encore de caractéristiques peut être effectuée. Chaque fonction optimisée améliore une ou plusieurs caractéristiques. Afin de déterminer le gain d'amélioration du système mécanique en prenant en compte toutes les caractéristiques, un taux d'amélioration de fonctions (Functional Improvement Rate) appelé le FIR (Orquéra et al., 2017) a été défini. Il permet de quantifier l'amélioration d'une ou d'un ensemble de fonctions en affectant un poids à chaque fonction. De plus, il permet de déterminer le sens de l'amélioration. Le sens de l'amélioration indique si la diminution ou l'augmentation de la caractéristique est considérée comme une valeur ajoutée ou non.

Les caractéristiques doivent être listées avec le sens de l'amélioration (positif si l'augmentation de la caractéristique est considérée comme une valeur ajoutée ou négatif dans le cas contraire).

L'Équation 9 montre le calcul du FIR :

Équation 9

$$FIR_{(Nouveau\ Produit / Ancien\ Produit)} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{f_i} \cdot G_{f_i} \%}{n}$$

Équation 10

$$G_{f_i} \% = \delta \cdot \left(\frac{f_{i\text{Nouveau Produit}}}{f_{i\text{Ancien Produit}}} - 1 \right)$$

Avec :

- $FIR_{(Nouveau\ produit / Ancien\ produit)}$: Taux d'amélioration de la caractéristique f_i de la fonction i pour la comparaison d'un nouveau produit par rapport à un ancien,
- n : nombre de caractéristiques,

- f_i : caractéristique de la fonction i ,
- W_{f_i} : poids de la fonction f_i avec $\sum_{i=1}^n W_{f_i} = 1$,
- $G_{f_i} \%$: gain de la caractéristique i ,
- $\delta = \pm 1$: +1 pour l'augmentation attendue d'une caractéristique, - pour dans le cas contraire.

IV.2.2.5. Etape 3.2 : Conception du brut de fabrication

En prenant en compte les caractéristiques du procédé choisi, des post-traitements nécessaires, cette étape entraîne des modifications du modèle afin d'obtenir le modèle de la pièce à fabriquer dans lequel seront prises en compte :

- les surépaisseurs d'usinage,
- la diminution des portes à faux,
- les ouvertures permettant d'enlever la poudre (dépend du procédé de FA choisi),
- la mise en place des supports si nécessaire.

Ce modèle doit correspondre à la pièce sortant du plateau de la machine de FA et ce modèle CAO est la principale sortie de cette étape.

Il est intéressant à ce stade de connaître approximativement le coût engendré par la fabrication des pièces. Pour cela on peut utiliser l'Équation 11 proposée par (Molcho et al. 2014) :

Équation 11

$$C_{pièce} = C_{matière} + C_{procédé} + C_{additionnels}$$

$C_{pièce}$ est le coût d'une pièce. Le coût matière $C_{matière}$ est déterminé à l'aide de l'Équation 12. $C_{procédé}$ correspond au coût de fabrication obtenu à l'aide de l'Équation 13. Enfin, $C_{additionnels}$ est le coût hors production et sera estimé égal à zéro euro pour la première estimation

Équation 12

$$C_{matière} = 1,1 \cdot V \cdot \rho \cdot C_{brut} \cdot K_{manutention}$$

Avec :

$1,1 \cdot V$: 110% du volume de la pièce

ρ : masse volumique

C_{brut} : prix matière par kg

$K_{manutention}$: coût de la manutention matière (120 % pour un premier calcul)

Équation 13

$$C_{procédé} = T_{fabrication} \cdot C_{MO}$$

Avec :

$T_{fabrication}$: temps de fabrication + temps de préparation machine

C_{MO} : Coût horaire de machine (main d'œuvre comprise)

Si le procédé choisi est l'extrusion de matière FDM (Griffiths et al., 2016), ou encore le dépôt de matière sous énergie concentrée de type CLAD (Ponche, 2013) ou WAAM (Venturini et al., 2016), alors la trajectoire de dépôt de matière peut être choisie pour optimiser la tenue, la qualité, la quantité de matière etc...

IV.2.2.6. Etape 4.1 : Validation en phases de fonctionnement

Avant de lancer la production, des phases de validation sont nécessaires. Une validation en phase de fonctionnement permettra de valider le produit dans les phases de vie d'utilisation. Cette validation est nécessaire car la reconception diffère de l'optimisation topologique proposée, il faut donc vérifier sa tenue aux sollicitations mécaniques. Cette vérification peut être réalisée par analyse sous éléments finis en statique mais aussi en dynamique à l'aide de logiciels tels que ADAMS, SolidThinking Inspire ou autre.

La CAO de l'assemblage du système mécanique doit permettre de vérifier :

- La montabilité,
- La non-interférence entre pièces,
- La bonne intégration des composants extérieurs,
- La possibilité de maintenance,
- La conformité avec le comportement cinématique recherché lors de l'étape 1 (détaillée par la loi d'entrée-sortie),
- Enfin et surtout vérifier que le mécanisme obtenu a atteint l'objectif de conception (ou de reconception) établi en entrée de l'étape 1.

De l'étude mécanique et cinématique menées à l'étape 1, les différences de comportement entre l'assemblage et la théorie vont permettre de vérifier la bonne corrélation ou non. Le modèle recevra tous les correctifs nécessaires pour répondre aux sollicitations mécaniques. C'est pourquoi des allers-retours entre les étapes 3 de conception et 4 de validation seront à effectuer (cf. Figure 80 de la page 111).

Le modèle ainsi obtenu est celui représentant le mécanisme complet tel qu'il devra être une fois réalisé, post traité et monté. Ainsi, les dessins de définition et le dessin d'ensemble du mécanisme seront établis.

Il est possible à cette étape de réaliser une estimation de l'impact environnemental en phases de fonctionnement du produit ainsi qu'une estimation du gain.

IV.2.2.7. Etape 4.2 : Validation en phases de fabrication / post-traitement

Une validation en phases de fabrication ainsi que de post-traitement permettra de valider la qualité de sa fabrication et assemblage.

La simulation de fabrication permettra de vérifier la fabricabilité de la pièce, les distorsions de matière possibles, le bon choix de l'orientation. Les correctifs des distorsions devront être appliqués sur le modèle CAO. Le dessin du brut de fabrication sera modifié pour prendre en compte les correctifs pour réduire les distorsions.

Lors de cette dernière étape, le comportement mécanique du modèle à fabriquer doit être vérifié par éléments finis pour qu'il puisse supporter les efforts de coupe et d'assemblage (comme un montage à la presse par exemple). Le modèle CAO doit être modifié pour que le comportement soit satisfaisant.

Une estimation de l'impact environnemental et du coût en phase de fabrication peuvent être effectués. Pour cela, les références citées au chapitre II.3.2.3 à la page 36 et au chapitre II.3.3.3 à la page 44 seront utiles. (Yosofi, 2018) propose une méthodologie qui prend en compte l'ensemble des flux consommés lors de la phase de fabrication ainsi que de l'ensemble des étapes de production afin de pouvoir prédire les informations sur les aspects techniques, économiques et environnementaux du couple pièce-procédé.

En fonction de la technologie de FA utilisée, les paramètres machine peuvent être modifiés et choisis afin d'améliorer la tenue mécanique des pièces, de diminuer le temps de fabrication, ou encore l'impact environnemental. Les références traitant du paramétrage machine se trouvent dans le Tableau 9 à la page 46.

IV.3. La méthodologie pas à pas

IV.3.1. Cas d'étude

Un cas d'étude sera exploité afin de montrer comment s'applique la méthodologie. Le cas d'étude est un moteur à air comprimé. La version initiale a été conçue suite à une optimisation topologique soumise à des contraintes de fabrication. Réalisé par procédés conventionnels, ce moteur sera dénommé Ec (Conventional Engine). Le principe de fonctionnement est expliqué à la Figure 81 avec cette version Ec utilisée comme illustration. Le moteur à air comprimé comporte quatre classes d'équivalences cinématiques. Sur le carter se trouvent les orifices d'admission et de refoulement. La chemise oscillante ouvre et obstrue les orifices d'admission et de refoulement du carter grâce à son mouvement pendulaire. Le piston et la bielle sont une seule et même pièce. Le piston est en liaison pivot glissant avec la chemise.

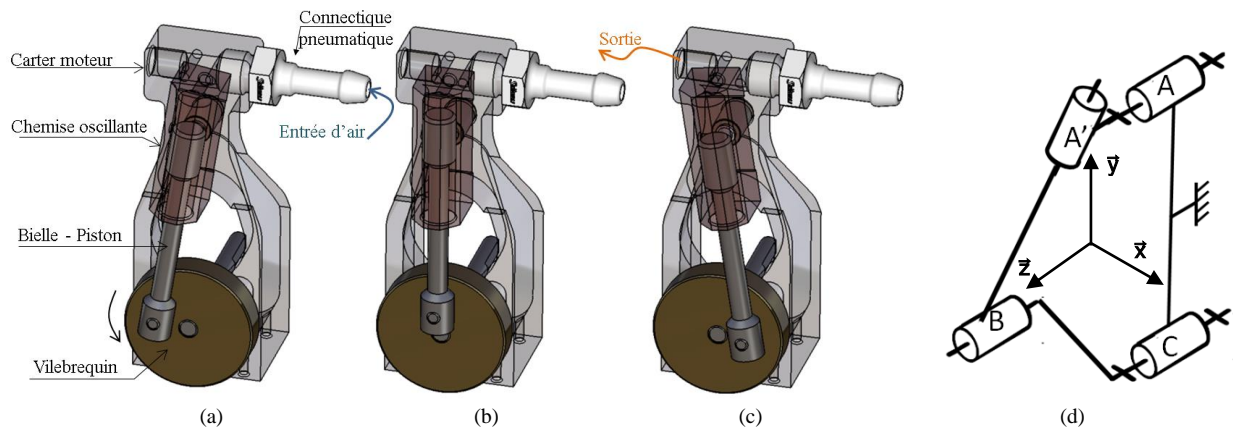


Figure 81. Phases : d'admission (a), point mort (b), d'échappement (c) du moteur E_c. Schéma cinématique (d). Etude de cas « moteur à air »

L'objectif de ce cas d'étude est de reconcevoir le moteur pour la FA en appliquant la méthodologie présentée à la Figure 80, en exploitant toutes les opportunités de la FA et conseils regroupés dans la méthodologie et de le comparer au moteur réalisé par procédés conventionnels.

Afin de montrer les apports des optimisations, trois moteurs (Figure 82) ont été conçus. Le premier appelé Eam1 (Engine Additively Manufactured 1), est réalisé en exploitant l'optimisation topologique sur chacune de ses classes d'équivalence. C'est la méthode usuelle de conception. Le deuxième moteur Eam2, en plus de l'optimisation topologique, reçoit des améliorations grâce à l'optimisation fonctionnelle. Enfin, le moteur Eam3 est obtenu en appliquant les trois optimisations.

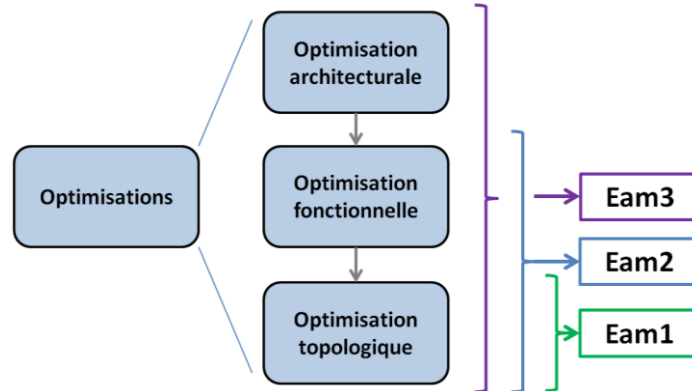


Figure 82. Les optimisations permettant d'obtenir les différents moteurs. Etude de cas « moteur à air »

Afin de pouvoir caractériser expérimentalement les différences apportées par les optimisations pour chacun des moteurs, tous les moteurs ont été réalisés à partir du même procédé de fabrication additive. La technologie choisie fait partie du parc machine de la plateforme MAQ-3D. Il s'agit de la projection de matière pour sa rapidité d'exécution ainsi que de post traitement. La machine utilisée est la Connex Objet 350 de Stratasys et aucun usinage n'a été effectué mis à part des taraudages manuels.

Pour réaliser les comparaisons, le moteur Ec sera le moteur de référence. Les tests de comportements réalisés afin de quantifier les différences de résultat entre les différents moteurs sont présentés au sous-chapitre IV.4.2 (page 138).

Les caractéristiques telles que la cylindrée et l'excentricité sont identiques quel que soit le moteur.

Les caractéristiques du moteur Ec, à formes conventionnelles, réalisé par projection de matière (les valeurs sont données en prenant en compte les appareils de mesure et la connectique) sont les suivantes :

- masse mesurée du moteur à formes conventionnelles : 174g,
- volume de la boîte englobante : 357 cm³,
- cylindrée : 1,57 cm³,
- excentricité : 20 mm.

Certaines étapes de cette méthodologie sont des étapes courantes de conception. Afin d'alléger la lecture de ce mémoire et de cibler les apports de la méthodologie, seuls les nouveaux apports seront détaillés.

IV.3.2. Etape 1.1 Spécifications générales

L'analyse fonctionnelle, le tracé de la loi d'entrée-sortie ainsi que l'étude du comportement mécanique ne sont pas de nouveaux apports de la méthodologie, c'est pourquoi, ils sont placés dans l'annexe VII.2.1.1 de la page 171.

IV.3.2.1. Objectif de reconception

L'objectif de la reconception est d'obtenir un système plus performant et ce en termes :

- de puissance de sortie,
- d'autonomie,
- d'encombrement,
- de masse.

IV.3.2.2. Liste des caractéristiques influant l'objectif

La liste des caractéristiques (imposées par l'objectif de reconception) correspond aux points sur lesquels les différents moteurs seront comparés :

- La puissance de sortie du vilebrequin en fonction de la pression d'entrée,
- l'autonomie,
- le volume du moteur,
- la masse totale du moteur.

IV.3.2.3. Fonction principale

La fonction principale du moteur à air est de transformer l'énergie pneumatique en énergie mécanique de rotation.

IV.3.2.4. Choix des pièces à faire en FA

Enfin, cette étape nécessite de choisir les pièces à réaliser en FA. Les pièces cylindriques ne seront pas réalisées par FA. Ainsi, le vilebrequin et les axes de guidage seront réalisés par usinage. Les éléments d'assemblage comme les vis seront des composants achetés dans le commerce.

Les pièces massives (comme le carter) ou ayant une inertie parasite seront réalisées par FA. Ainsi le carter, la bielle et la chemise seront les pièces à réaliser par FA.

IV.3.3. Etape 1.2 Spécification du produit

IV.3.3.1. Composants externes

- Le vilebrequin doit avoir une inertie suffisante afin d'obtenir des résultats satisfaisants. Ainsi il sera en laiton, de diamètre 40 mm et d'épaisseur 9 mm. La masse du volant du vilebrequin sera donc d'environ 93 g et le moment d'inertie (par rapport à son axe de rotation) de $18,58 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$.
- La connectique pneumatique sera un composant extérieur (Désignation : Connectique Prevost IRP 066151 à embout fileté mâle conique R1/4 gaz, voir Figure 111 de l'annexe VII.2.1.1 page 173). Ce composant peut faire partie intégrante du carter (union des pièces), mais pour des raisons de tenue mécanique et de fréquence d'utilisation, il est préférable de l'intégrer comme composant extérieur. Les dimensions de ce composant sont connues (A=39,5 mm ; B=13 mm ; ϕ passage = 6 mm).
- Les vis seront aussi achetées (désignation : Vis CS M3-12).
- L'axe de guidage en rotation de la chemise sera un axe usiné en acier. La fixation entre l'axe et la chemise doit être facile et rapide pour effectuer des montages et démontages fréquents. Dans la chemise sera inséré et collé un insert (Figure 112 de l'annexe VII.2.1.1) pour garantir la durée de vie du système dans lequel viendra se fixer l'axe.
- Dans le but d'analyser expérimentalement les gains liés à l'optimisation de la conception, un encodeur (Figure 113 de l'annexe VII.2.1.1) sera monté afin de mesurer la vitesse de rotation du vilebrequin (désignation : codeur optique 3 voies 30000 rpm, 500 cpr ; Fabricant: Broadcom limited).

IV.3.3.2. Fabrication directe de liaisons

La fabrication directe de liaisons n'apporte pas ici d'amélioration sur les caractéristiques listées pour améliorer les objectifs. De plus, chaque classe d'équivalence doit être démontable pour réaliser des essais. C'est pourquoi les classes d'équivalence seront fabriquées séparément.

IV.3.4. Etape 2.1 Optimisation architecturale

IV.3.4.1. Conception monolithique

Chaque classe d'équivalence étant composée d'une seule pièce, la question d'union des pièces n'est pas nécessaire dans cette étude de cas.

IV.3.4.2. Optimisation du placement des liaisons

Comme cela a été spécifié au chapitre IV.1 (Figure 82 page 118) seul le moteur Eam3 recevra cette optimisation. Il s'agit de l'optimisation des positions des liaisons du schéma cinématique pour qu'il réponde aux objectifs de reconception établis à l'étape 1.1. Les objectifs de reconception pour le cas d'étude sont d'augmenter la puissance de sortie et l'autonomie et de diminuer le volume et la masse.

La position des liaisons doit répondre à des contraintes géométriques afin d'assurer le bon fonctionnement du moteur. Par exemple (voir Figure 81 (d)) :

- La distance suivant \vec{Z} [AA'] est contrainte par la liaison appui plan et l'épaisseur matière nécessaire et suffisante pour l'admission de l'air.
- L'entraxe [AC] est de 65 mm pour le moteur d'origine. Sa valeur minimale se définit à l'aide de la condition géométrique assurant l'insertion de l'encodeur.
- La longueur de guidage du piston sera comprise entre le diamètre du piston et 1,5 fois le diamètre.
- ...

L'ensemble des équations utilisées pour obtenir le meilleur placement des liaisons se trouve dans l'annexe VII.2.1.2 à la page 174.

La modification principale résultant de cette étude est la diminution de l'entraxe [AC] à 45 mm.

La Figure 83 montre la différence de placement des liaisons entre le moteur Ec et le moteur Eam3 ainsi que le tracé des surfaces fonctionnelles.

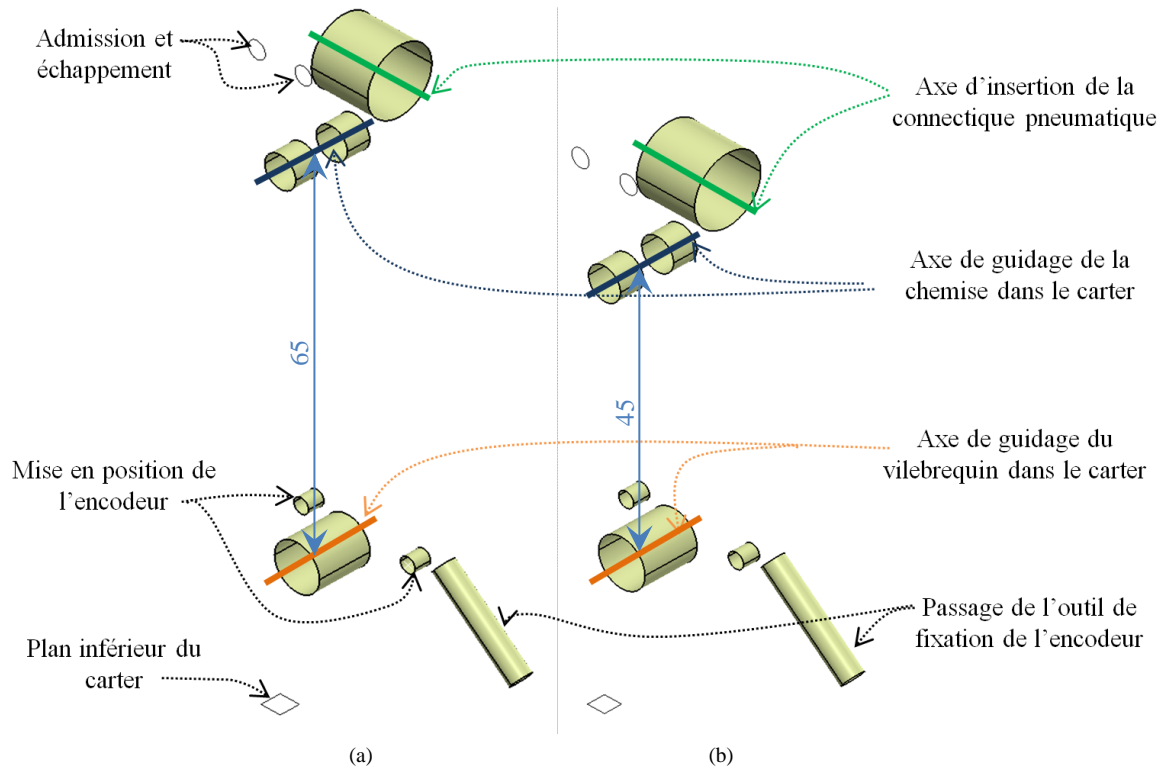


Figure 83. (a) Placement des liaisons et surfaces fonctionnelles des moteurs Ec, Eam1 et Eam2 ; (b) Placement architecturalement optimisé des liaisons et surfaces fonctionnelles du moteur Eam3. Etude de cas « moteur à air »

IV.3.4.3. Optimisation des liaisons d'interfaces

Les liaisons d'interfaces correspondent ici à l'encastrement par assemblage vissé (Vis CS M3) entre le carter et l'établi. Cette solution constructive et la position de chacune des vis pourraient être améliorées pour faciliter les montages/démontages fréquents. Toutefois cela ne permettrait pas d'améliorer une caractéristique mécanique influant un des objectifs (diminution de la masse, volume). De plus, l'entraxe entre les vis permet une bonne stabilité du moteur et ne doit pas être diminué. C'est pourquoi, aucune amélioration de cette liaison ne sera effectuée.

IV.3.4.4. Choix du procédé de FA

Les différents moteurs seront réalisés sur une même machine appartenant à la plateforme de fabrication additive MAQ-3D de l'Université de Toulon. La technologie choisie est la projection de matière (PolyJet) sur la machine Connex Objet 350 de Stratasys.

Les surfaces fonctionnelles ne seront pas postraitées hormis les taraudages.

Le support, utilisé par le procédé de FA choisi, est une résine qui s'enlève à la main et par jet d'eau. Lors de la fabrication, il est possible de choisir de couvrir toutes les surfaces des pièces ou de laisser la surface de dessus sans support. Une surface sans résine support n'a pas la même rugosité que celle qui a de la résine. C'est pourquoi, toutes les surfaces recevront du support afin d'avoir une rugosité quasi identique.

Les pièces ne doivent pas être plus fines que 0,6 mm et ni trop élancées (pour supporter la pression de l'eau lors du post traitement).

Voici un extrait des contraintes de la machine :

- Epaisseur minimale : 0,6 mm en vertical sur 20 mm maximum
- Volume maximal : 342*342 mm – hauteur 200 mm
- Impossibilité d'enlever la matière support dans les enceintes fermées
- Support obligatoire pour la face se trouvant côté plateau
- Support obligatoire pour toutes les surfaces en porte à faux
- Diamètre minimal (pour extraire le support) : 2 mm
- Epaisseur de couche = 16 μm en monomatière ; 32 μm en bimatière
- ...

IV.3.4.5. Orientation de fabrication

Dans le cadre de l'utilisation de la machine Connex, quel que soit le sens de fabrication, du support est appliqué sur toutes les surfaces des pièces. Ce n'est donc pas une contrainte influençant l'orientation. Toutefois, l'orientation influe sur la qualité des formes géométriques. C'est pourquoi une étude de l'influence de l'orientation de fabrication a été menée et est détaillée à l'annexe VII.2.3.2 page 182.

Les tests menés ont montré des variations de dimensions en fonction de l'orientation. Les formes cylindriques ont des défauts de cylindricité importants (jusqu'à 0,2 mm sur le diamètre). La variation des écarts est moins importante pour une orientation des axes des cylindres parallèle à \vec{Z} , la normale au plateau, que lorsque l'axe des cylindres est perpendiculaire au sens de fabrication \vec{Z}

C'est donc pour cette raison que l'orientation suivante a été choisie : toutes les formes cylindriques réalisant des guidages en rotation sont orientées suivant l'axe \vec{Z} de la machine, c'est-à-dire, suivant le sens du dépôt.

De plus, toutes les pièces ont été fabriquées dans les mêmes conditions (matière, support et orientation).

IV.3.5. Etape 2.2 Optimisation fonctionnelle

Comme il a été spécifié au chapitre IV.1 à la Figure 82, page 118, seuls les moteurs Eam2 et Eam3 recevront cette optimisation.

Cette étape nécessite de suivre les sous-étapes détaillées à la Figure 49 de la page 76. Cette étape ne traite que de l'optimisation fonctionnelle en phase de fonctionnement du moteur.

IV.3.5.1. Tracé des graphes

Le graphe des liaisons du moteur à air est tracé en vert à la Figure 84. Sur ce dernier est superposé le flux énergétique en bleu ainsi que le flux de transmission de puissance en rouge.

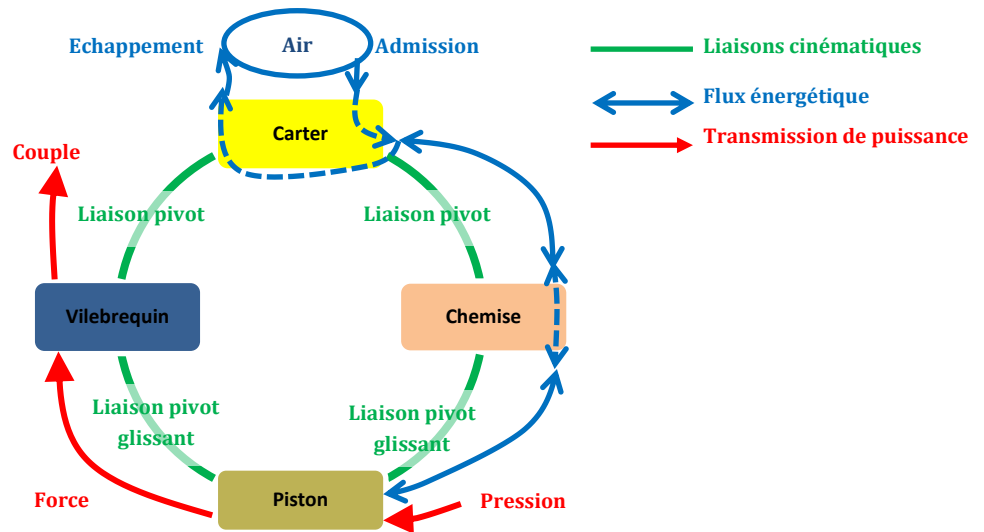


Figure 84. Graphe de liaisons / du flux d'énergie / de la transmission de puissance du « moteur à air »

IV.3.5.2. Optimisation des liaisons

Il faut à présent répondre à la question « Comment améliorer ? » chacune des liaisons.

☞ Comment améliorer la liaison pivot entre le carter et la chemise

Cette liaison sera réalisée par coussinets. Cela a pour avantages d'avoir un faible encombrement tout en supportant les sollicitations aux vitesses de rotations du moteur, d'être léger et peu coûteux.

☞ Comment améliorer la liaison pivot entre le carter et le vilebrequin

Cette liaison est sollicitée par les efforts pendulaires du système bielle manivelle ainsi que par la vitesse élevée de rotation. Les solutions technologiques peuvent être :

- Palier lisse :
 - Avantages : peu encombrant, léger, facilité de montage, peu coûteux, adapté aux conditions de fonctionnement du mécanisme, pièce d'usure pouvant être rapidement changée
 - Inconvénients : réalise une résistance au mouvement supérieure aux solutions suivantes
- Roulement à aiguilles :
 - Avantages : peu encombrant, très bon guidage en rotation, supporte les efforts pendulaires, Pièce d'usure pouvant être rapidement changée
 - Inconvénients : coûteux, lourd, ne réalise pas d'arrêt axial

- Palier hydrostatique (voir Figure 85) :
 - Avantages : peu encombrant, très bon guidage en rotation, supporte les efforts pendulaires, résistance au mouvement la plus faible des solutions proposées, possibilité d'utiliser l'air d'échappement du moteur
 - Inconvénients : conception et dimensionnement complexe, nécessite un réservoir d'alimentation qui ne sera pas plein au démarrage, et des coussinets pour les phases de démarrage et d'arrêt. Entre l'échappement et le guidage, des canalisations devront être dessinées et le support devra être enlevé.

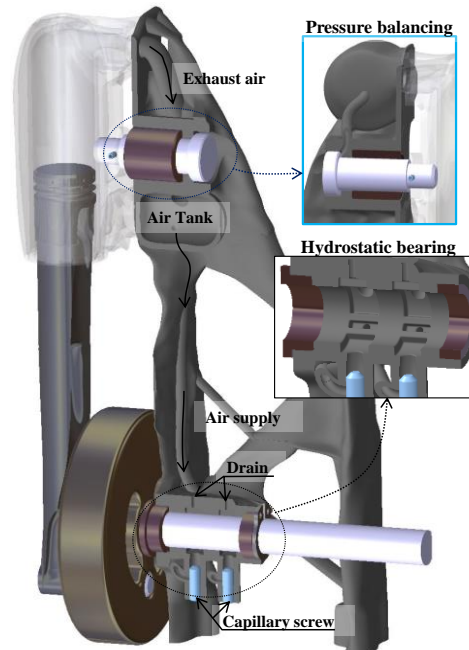


Figure 85. Amélioration de la liaison pivot entre l'arbre moteur et le carter par palier hydrostatique (Orquéra et al., 2017)

Pour des raisons de masse, d'encombrement et de coût le roulement est éliminé, et pour les difficultés de nettoyage et sa complexité, le palier hydrostatique ne sera pas retenu. La solution choisie est le guidage par paliers lisses. Les coussinets sont dimensionnés pour supporter une vitesse maximale de 5000 tr/min (1,57 m/s pour un diamètre de 6 mm). Le palier retenu est un coussinet à collerette de diamètre 6 mm de désignation JFM.

☞ Comment améliorer la liaison pivot glissant entre la bielle et le vilebrequin

En appliquant le même raisonnement que pour les liaisons précédentes, cette liaison sera réalisée par deux coussinets en polymère pour le moteur Ec. Il en sera de même pour Eam1. Pour les moteurs Eam2 et 3 la liaison sera réalisée par un seul coussinet. Cela permet un gain en volume et en masse. La liaison entre la bielle et le vilebrequin s'apparentera à une sphérique.

☞ Comment améliorer la liaison pivot glissant entre la bielle et la chemise

Cette liaison sera réalisée par la surface cylindrique de la jupe du piston et celle de l'alésage de la chemise. La longueur de guidage sera au moins égale à 1.5 fois le diamètre de l'alésage afin d'assurer un guidage correct.

IV.3.5.3. Optimisation du flux de l'énergie

Le flux de l'énergie, correspond à l'entrée au flux de l'air. Que ce soit au démarrage ou en fonctionnement nominal, le flux de l'air est identique. Afin de l'améliorer, le chemin parcouru par l'air durant les phases d'admission et d'échappement doit être étudié.

En phase d'admission, l'air fourni par le compresseur à air passe (voir le dessin d'ensemble du moteur Ec Figure 115, à la page 176) :

- par la connectique d'admission vissée sur le carter,
- dans le carter par deux perçages sécants à 90° avec un changement de diamètre à l'intersection,
- entre le carter et la chemise où une fuite se crée,
- dans la chemise par deux perçages sécants à 90° avec un changement de diamètre à l'intersection.

En phase d'échappement l'air comprimé lors de la montée du piston passe :

- dans la chemise par un perçage coudé à 90° à changement de diamètre,
- entre le carter et la chemise où une fuite se crée,
- puis dans le carter par un perçage coudé à 90° à changement de diamètre.

De cette analyse du flux, deux points peuvent être améliorés :

- Les pertes de charges, dues aux variations de géométrie,
- Les fuites, dues aux jeux fonctionnels.

Afin d'améliorer le flux, il faut diminuer les pertes de charge générées par les changements brusques de géométrie. Pour cela les canalisations peuvent être conçues en réalisant des changements de direction et de géométries adaptées à une meilleure circulation des fluides, comme le montre la Figure 86 pour la chemise.

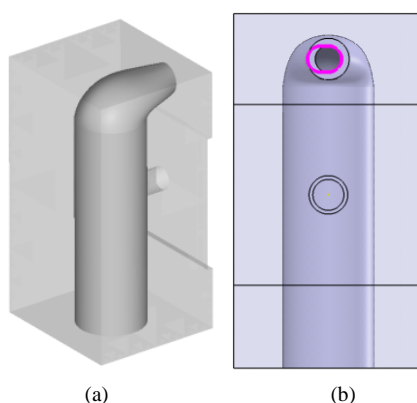


Figure 86. (a) Espace de conception (gris transparent) et de non conception (gris non transparent) permettant de diminuer les pertes de charge dans la chemise ; (b) Agrandissement de l'admission pour réaliser une avance à l'admission. Etude de cas « moteur à air »

IV.3.5.4. Optimisation de la transmission de puissance

En suivant le flux de transmission de puissance du graphe de la Figure 84, la pression d'entrée est celle exercée par l'air sur le ciel du piston lors de l'admission, puis le piston transmet l'effort au vilebrequin qui, grâce à l'excentrique, transforme les efforts en couple de sortie. Lors du démarrage du moteur la position du piston est primordiale pour permettre la mise en mouvement. En effet, la position verticale du piston entraînera un blocage.

Les améliorations fonctionnelles de la transmission de puissance peuvent donc être :

- Au démarrage :
 - Eviter les positions de blocage,
 - Optimiser la position de démarrage.
- Lors de la phase d'admission :
 - Améliorer l'admission de l'air, c'est-à-dire le moment où l'air est admis par rapport à la position du piston,
 - Améliorer la surface d'accueil de la pression de l'air,
 - Améliorer la puissance créée par la détente de l'air,
 - Améliorer le rendement volumétrique,
 - Diminuer les fuites entre le piston et la chemise.
- Lors du refoulement : Diminuer la résistance au mouvement lors de la remontée du piston.

Pour éviter la position de blocage du moteur au démarrage, le piston ne doit pas être au point mort haut ou bas. Pour cela, il faut que la chemise soit positionnée sur l'admission. Cela peut se faire manuellement en positionnant correctement les composants mobiles du moteur. Des marqueurs visuels seront donc réalisés.

Le moment où l'air est admis dans la chambre de combustion peut être choisi en fonction de la position du piston. C'est-à-dire autour de son point mort haut. L'admission d'un carburant pour un moteur thermique peut bénéficier de la dynamique du flux d'échappement et permet ainsi un meilleur remplissage de la chambre (Bosch, 2000). Pour cela, il est préférable que l'admission se fasse avant le point mort haut du piston.

Toutefois, la technologie permettant l'ouverture et la fermeture de l'admission ainsi que de l'échappement n'est pas dissociée. Et pour ne pas diminuer l'autonomie du mécanisme, les orifices d'échappement et d'admission ne doivent pas être ouverts en même temps.

Pour augmenter le temps d'admission et de remplissage de la chambre, la lumière d'admission de la chemise peut être agrandie, passant d'une forme circulaire à une forme oblongue (voir forme en violet sur la Figure 86) réalisant ainsi une avance à l'admission. Ceci a été appliqué pour les moteurs Eam2 et Eam3.

Afin d'augmenter le rendement volumétrique, il faut diminuer le volume mort. Ainsi, le ciel des pistons Eam2 et Eam3 ont une forme de ciel épousant le fond du perçage de la chemise et

diminuant le volume mort (voir Figure 88 (g) et (h)). Cette forme sphérique augmente la surface d'accueil du piston et ainsi la force résultante de la pression.

Afin d'obtenir le travail thermodynamique le plus élevé de la détente de l'air, il faut que ce dernier soit adiabatique. On pourrait ainsi réaliser une chemise à double paroi afin d'isoler la chambre de détente de l'extérieur. Cette solution ne sera pas retenue pour des raisons de difficulté d'enlèvement de la matière support.

Afin d'augmenter la pression dans la chambre au-dessus du piston, il faut diminuer les fuites entre la chemise et le piston. Pour cela, des gorges peuvent être réalisées sur le piston. Celles-ci pourraient avoir une forme courbée en forme de bec (Orquéra et al., 2017) telle que le montre la Figure 87. Ces formes réalisent un renvoi de l'air vers la chambre au-dessus du piston. De plus, des lumières de « turbulence » peuvent être rajoutées. Ces lumières permettent à l'air se trouvant dans le jeu entre la chemise et le piston d'être dévié dans les gorges. L'objectif est que le flux ainsi provoqué remonte l'air vers la chambre au-dessus du piston.

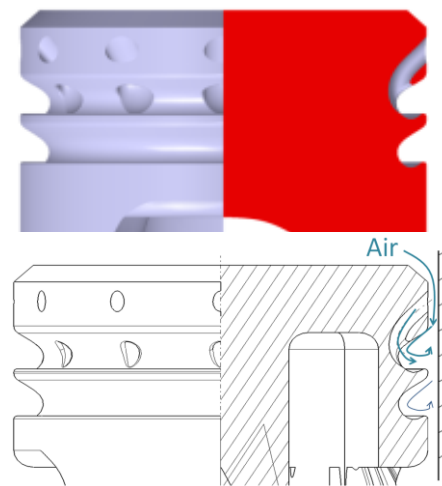


Figure 87. Demi-coupe d'un piston pour l'exemple de solution d'augmentation de l'étanchéité entre le piston et la chemise (Orquéra et al., 2017). Etude de cas « moteur à air »

Le refoulement de l'air est une phase pendant laquelle aucune puissance n'est transmise par le piston. Seule l'inertie du vilebrequin permet une continuité de rotation de l'arbre de sortie. Si la pression de refoulement est trop importante, alors le piston freine l'inertie du vilebrequin. Il faut donc ouvrir le conduit d'échappement au plus tôt lors de la montée du piston. L'orifice d'échappement du carter sera ainsi décalé pour qu'il soit ouvert plus tôt.

IV.3.5.5. Espace de conception et de non conception

De ces optimisations, des surfaces fonctionnelles, des éléments extérieurs ainsi que de l'analyse fonctionnelle, les espaces de conception et de non conception peuvent être définis (Figure 88). Cela est effectué sur chaque pièce à optimiser topologiquement.

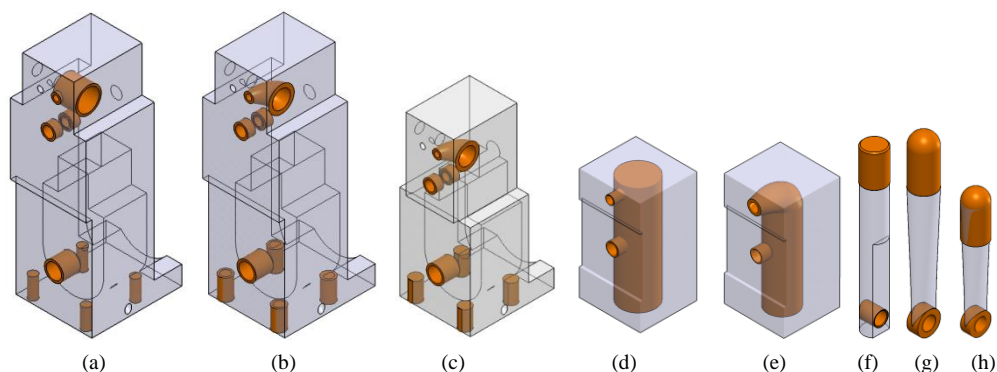


Figure 88. Espaces de conception (en gris) et de non conception (en orange). Pour le moteur Eam1 : (a) le carter, (d) la chemise, (f) le piston. Pour le moteur Eam2 : (b) le carter, (e) la chemise, (g) le piston. Pour le moteur Eam3 : (c) le carter, (e) la chemise, (h) le piston. Etude de cas « moteur à air »

IV.3.6. Etape 2.3 Optimisation topologique

Comme cela a été spécifié au chapitre IV.1 à la Figure 82 de la page 118, tous les moteurs font l'objet d'une optimisation topologique. Cette étape nécessite de suivre les sous-étapes détaillées à la Figure 61 de la page 86. Le moteur à air étant un système mécanique dont les inerties des pièces peuvent avoir une influence sur le comportement mécanique, l'optimisation topologique TOMS, présentée au chapitre III.3, sera effectuée.

IV.3.6.1. Choix du matériau

Le procédé de FA choisi propose une large gamme de photopolymères. Le matériau dont le nom commercial est VeroWhite a été sélectionné. Les caractéristiques sont les suivantes :

- Coût matière : 215.3 €/Kg
- Coût support : 112 €/Kg
- Masse volumique : 1.18 g/cm³
- R_{pe} = 50 MPa (Donnée fabricant)
- E = 2000 Mpa (Donnée fabricant)

Afin de caractériser le matériau proposé, des essais mécaniques ont été effectués pour la matière VeroWhite et ce, en traction et flexion pour des éprouvettes fabriquées suivant trois directions. Les résultats ainsi que des mesures de rugosité se trouvent à l'annexe VII.2.3.1 à la page 181.

IV.3.6.2. Post-traitement

Le post traitement nécessaire pour ce procédé de fabrication est l'enlèvement de la résine support. Celle-ci recouvre entièrement les pièces. La résine s'enlève à l'aide d'un jet d'eau de forte pression. Cela induit :

- qu'il faut avoir accès à tous les endroits où le support se trouvera,
- que les pièces subiront à tout endroit une pression du jet d'eau.

De plus, l'insertion de la connectique d'admission de l'air se fait par vissage. Un taraudage doit donc être effectué à cet endroit. Le couple correspondant devra être pris en compte pour le calcul d'optimisation topologique.

Enfin, la liaison entre le carter et le bâti se fait aussi par élément visé. Quatre taraudages seront nécessaires et effectués à la main à l'aide d'un taraud.

IV.3.6.3. Optimisation topologique TOMS

La démarche de l'optimisation TOMS, expliquée au chapitre III.3 (page 83) est composée de trois étapes. Il faut tout d'abord déterminer le chemin d'optimisation. Le choix d'une caractéristique permettant d'estimer l'impact de l'optimisation doit ensuite être fait. Enfin, les boucles d'optimisations topologiques sont réalisées.

Les principes de choix des chemins établis au sous-chapitre III.3.4.8 page 103 ont été établis pour un système à graphe de structure ouvert, ce qui n'est pas le cas ici. Toutefois, comme cela a été montré (chapitre III.3.4.8 à la page 103), réaliser la boucle d'optimisation topologique de toutes les pièces simultanément permettra un gain de temps. C'est pourquoi, ce chemin sera choisi.

La détermination du rapport de comportement mécanique R_{CM} est basé sur le calcul du couple de sortie C_s de l'Équation 27 page 173. Ainsi le rapport de comportement mécanique de la boucle 1 se détermine de la manière suivante : $R_{CM} = \frac{C_{s1}}{C_{s2}}$

Avec :

C_{s1} le couple de sortie du moteur à air élaboré à partir des espaces de conception et de non-conception obtenus à la fin de l'étape 2.2.

C_{s2} le couple de sortie du moteur à air élaboré à partir des résultats de l'optimisation topologique

Enfin, le coefficient de convergence ε est de 0,1.

Les conditions aux limites sont définies pour chaque phase de vie du mécanisme. Par exemple pour le carter, les trois phases de vie étudiées seront, l'admission, l'échappement, et le post traitement (l'insertion de la connectique, ainsi que les taraudages).

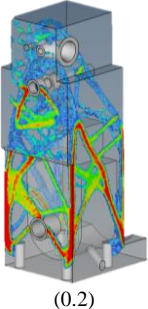
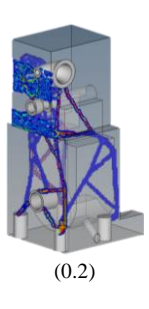
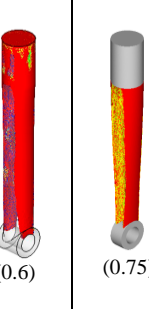

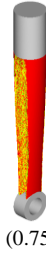
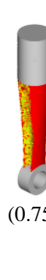
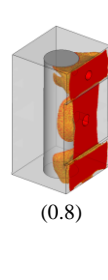
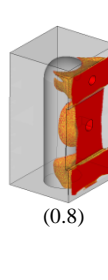
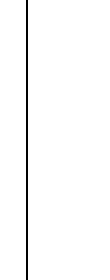
Les résultats de la boucle d'optimisation topologique OBOT sont détaillés dans le Tableau 24.

Tableau 24. Résultat de l'optimisation TOMS du « moteur à air »

	Ec	Eam1		Eam2		Eam3	
		C _{s1}	C _{s2}	C _{s1}	C _{s2}	C _{s1}	C _{s2}
Couples de sortie (N.mm)	1029	1032	1055	1177	1198	1192	1212
R _{CM}		1,022		1,018		1,015	

Il est à remarquer qu'une seule boucle est nécessaire pour atteindre la convergence de la boucle OBOT. Cela est dû aux faibles masses et inerties des pièces en mouvement. Les résultats des optimisations de chacun des moteurs sont présentés au Tableau 25.

Tableau 25. Détails et résultats de l'optimisation TOMS du « moteur à air »

Pièce	Carter			Piston			Chemise		
Objectif	Minimiser la masse			Compliance Index			Compliance Index		
Contrainte - Paramètres	Contrainte sur la résistance élastique Le déplacement normé d'un nœud au niveau du perçage d'admission ne doit pas être supérieur à 0.2 mm			Volfrac 0.5 Fo1 poids 2 Fo2 poids 1			Massfrac 0.2 Minimiser l'inertie Io		
Moteur	Eam1	Eam2	Eam3	Eam1	Eam2	Eam3	Eam1	Eam2	Eam3
Résultat (seuil de densité)	 (0.2)	 (0.2)	 (0.2)	 (0.6)	 (0.75)	 (0.75)	 (0.8)	 (0.8)	 (0.8)

Lors des calculs d'optimisation, le ciel des pistons Eam2 et Eam3 est plat et non sphérique (comme il a été déterminé au chapitre IV.3.5), car la répartition des mailles lors du maillage n'est pas systématiquement symétrique. Cela peut engendrer une poussée non verticale sur un piston sphérique. De plus le chargement sur la bielle n'étant pas symétrique un plan de symétrie ne peut être imposé. C'est pourquoi, afin d'assurer une poussée verticale, simulant la pression de l'air, le ciel du piston est plan.

IV.3.6.4. Choix de l'architecture matière

Les pièces du moteur étant de faibles dimensions, les structures de type lattice seraient aussi de faibles dimensions. Or, le support est déposé sur toutes les surfaces des pièces nécessitant ainsi un nettoyage. Ce dernier serait complexe et fastidieux en présence d'un matériau architecturé. C'est pourquoi il a été choisi de ne pas utiliser les structures de type lattice.

IV.3.7. Etape 3.1 Mise en volume, (Re)Conception

IV.3.7.1. Prise en compte des autres fonctions

Cette partie s'applique sur les moteurs Eam2 et Eam3 sauf pour la partie instrumentation qui doit être la même pour les quatre moteurs.

Chaque moteur est conçu pour répondre aux fonctions énumérées lors des analyses fonctionnelles. Ainsi, si une fonction n'a pas été prise en compte précédemment, elle doit être analysée à cette étape afin d'être conçue.

- En phase de post-traitement

Comme cela a été décrit dans le chapitre IV.3.6, des taraudages doivent être réalisés pour le vissage de la connectique ainsi que des pieds du moteur.

- Il est ainsi possible de réaliser sous CAO un pré-taraudage pour la connectique. Afin de maintenir le moteur lors de cette opération, deux méplats sont ajoutés de part et d'autre de la tubulure de réception de la connectique.
- Pour faciliter les taraudages des pieds du moteur, des formes hexagonales sont dessinées pour pouvoir les maintenir.

- En phase d'assemblage

L'encodeur qui se monte sur le vilebrequin aura une mise en position sur le carter composée de deux pions de centrage et d'un appui plan. Pour le maintien en position :

- sur le moteur Ec, l'encodeur sera maintenu par deux vis radiales,
- pour les moteurs Eam1, Eam2 et Eam3 une pièce clipsée sur le carter réalisera une pression de maintien.

IV.3.7.2. Mise en volume ou reconception sous CAO

A partir des résultats des optimisations et lorsque toutes les fonctions ont été optimisées, la mise en volume peut se faire à l'aide d'un logiciel de CAO. La Figure 89 montre la reconception des carters avec la prise en compte de toutes les fonctions et les règles de tracé répondant aux contraintes du procédé.

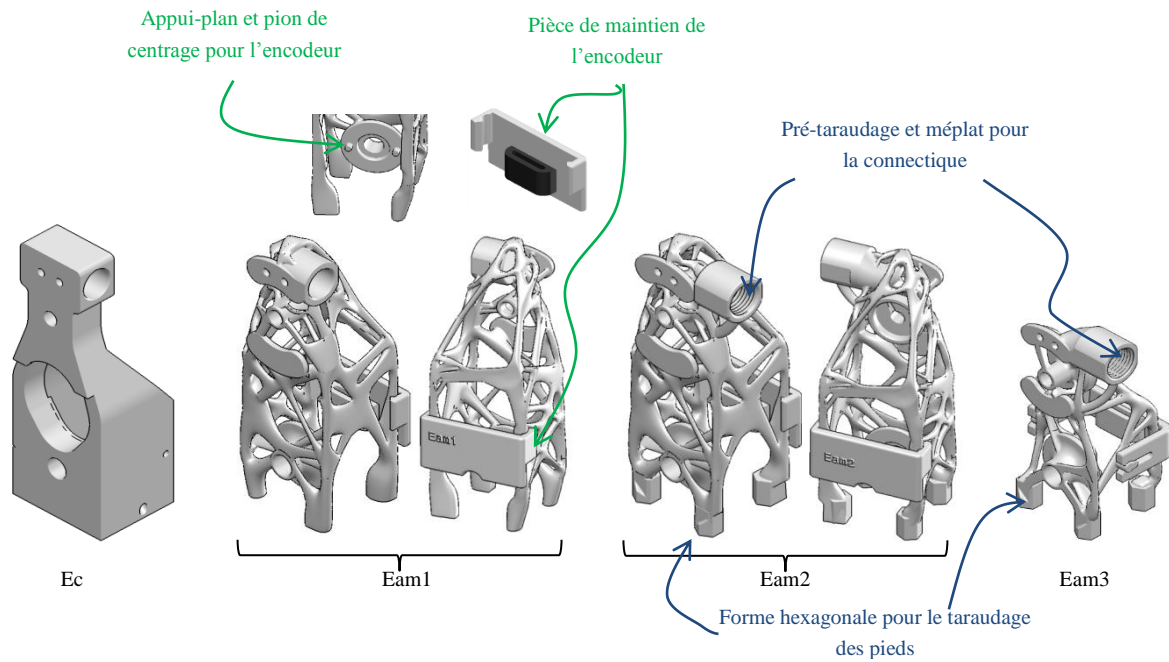


Figure 89. Résultats de la mise en volume des carters des « moteurs à air »

La CAO de l'assemblage du moteur à air a permis de vérifier :

- la montabilité des composants,
- la non-interférence entre les pièces,
- la bonne intégration des composants extérieurs.

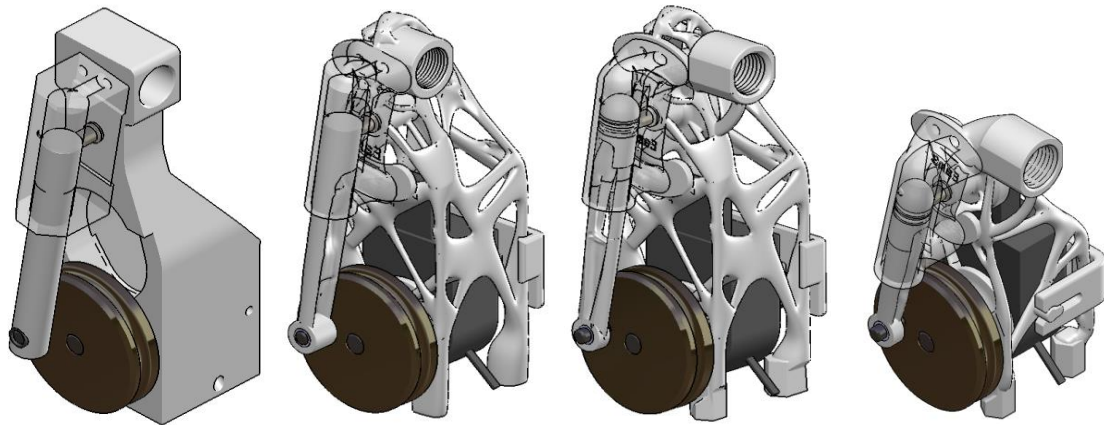


Figure 90. Les assemblages des moteurs. De gauche à droite : le moteur Ec, Eam1, Eam2 puis Eam3

IV.3.7.3. Estimation des gains

Afin d'estimer les gains, nous prendrons le moteur à formes usinées Ec comme référence. Les gains sont calculés sur la masse (récapitulées dans le Tableau 26), le volume et les inerties tel que le montre le Tableau 27. Les gains lors du fonctionnement (sur l'autonomie par exemple) ont été déterminés pendant les tests présentés ultérieurement (chapitre IV.4.3).

Tableau 26. Résultats des masses des composants des « moteurs à air »

Masse (g)	Ec	Eam1	Eam2	Eam3
carter 0	47,31	19,90	22,84	15,11
piston 2	5,66	2,35	2,46	2,10
chemise 3	11,81	6,46	5,82	6,30
Masse totale	174	169	150	137

Tableau 27. Gain en pourcentage sur les masses, volumes et inerties des « moteurs à air »

Gain en %				
		Eam1	Eam2	Eam3
Masse totale		55,7	52,0	63,7
Volume	Carter	57,9	51,7	68,1
	Piston	58,5	56,6	63,0
	Chemise	45,2	50,7	46,6
Inertie	Piston	46,4	42,5	78,1
	Chemise	41,9	53,2	53,4

IV.3.8. Etape 3.2 Conception du brut de fabrication

IV.3.8.1. Brut de fabrication

Cette étape permet de prendre en compte les caractéristiques du procédé de fabrication et d'adapter la conception à ce dernier. Or, dans ce cas d'étude, le support s'appliquera sur toutes les surfaces. De plus le logiciel machine n'est pas ouvert aux modifications d'emplacement de support. Il n'y a pas besoin d'en rajouter pour le surplomb car il est automatiquement réalisé.

Afin de réaliser des taraudages, une surépaisseur matière est nécessaire au niveau des pieds du carter des quatre moteurs, ainsi que sur le filet ébauché pour la connectique des moteurs Eam2 et Eam3.

IV.3.8.2. Estimation des coûts, du temps de fabrication et des gains

A partir de l'Équation 11 de (Molcho et al., 2014), les estimations ainsi que les gains de coût sur la quantité de matière utilisée ont été résumés dans le Tableau 28. Cette estimation permet de mettre en évidence un gain sur le coût matière. Mais, non seulement la quantité de matière estimée ne prend pas en compte la matière support, mais en plus le support de la technologie employée est un mélange entre la résine support et la matière première. Les résultats obtenus sont de ce fait optimistes. Dans le Tableau 29, le coût matière a été établi à partir de l'estimation du logiciel Objet Studio de la machine Connex. L'estimation prend ainsi en compte le coût de la matière ainsi que celle du support.

Tableau 28. Estimation des coûts et des gains de coût matière pour l'étude de cas « moteur à air »

	Ec	Eam1	Eam2	Eam3
Coût matière €	21,7	11,2	12,0	9,2
% Gain sur le coût		48,27	44,55	57,54

Le logiciel permet également d'estimer le temps de fabrication. Une comparaison des quantités de matières et de temps d'impression est réalisée dans le Tableau 29. Chaque plateau

d'impression est configuré de la même manière (position et orientation des pièces moteurs), comme le montre la Figure 91, afin d'obtenir une comparaison viable.

Tableau 29. Estimation des coûts de fabrication et du temps de production. Quantité matière et temps estimés par le logiciel Objet Studio alloué à la machine de FA Connex 350 pour l'étude de cas « moteur à air »

	Ec	Eam1	Eam2	Eam3
Coût matière €	23,5	18,3	19,6	15,1
Coût support €	7,4	14,4	15,3	11,6
Coût (matière + support) €	30,9	32,7	34,9	26,7
% Gain sur le coût		-6,12	-13,21	13,42
Temps de fabrication h:min	3:17	3:30	4:37	4:47

La quantité totale de matière utilisée pour les Eam1 et Eam2 est supérieure à celle utilisée pour le moteur Ec. Cela est dû à la quantité de support nécessaire pour combler tous les vides des pièces optimisées. Seul le moteur Eam3 réalise un gain de coût de matière de 13,42%. Son optimisation architecturale ayant permis une diminution de volume considérable, il y a moins besoin de matière support.

Les temps de fabrication des moteurs Eam sont plus élevés que pour le moteur à formes conventionnelles. Une des raisons est la présence d'une pièce supplémentaire, la pièce de clipsage pour le maintien de l'encodeur, à réaliser pour les moteurs Eam.

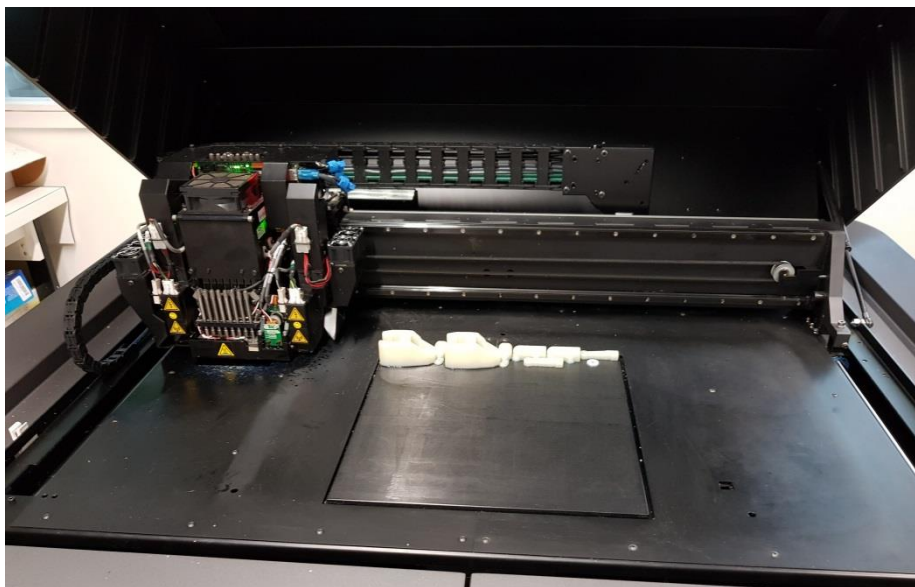


Figure 91. Plateau de fabrication de la Connex Objet 350 de Statasys avec les pièces du moteur Eam3 emplies de support. Etude de cas « moteur à air »

IV.3.9. Etape 4.1 Validation en phases de fonctionnement

IV.3.9.1. Validation de la tenue mécanique

L'étape précédente a abouti à un mécanisme dont les formes diffèrent du résultat de l'optimisation topologique. Il faut donc vérifier sa tenue aux sollicitations mécaniques. Cette vérification peut être faite par une analyse aux éléments finis telle que le montre la Figure 92.

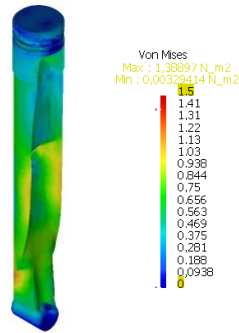


Figure 92. Vérification de la tenue mécanique en phase de fonctionnement du piston Eam1 par éléments finis pour l'étude de cas « moteur à air »

Une analyse modale permet de mettre en évidence les fréquences propres des pièces. La pièce structurante dans ce moteur est le carter qui subira des sollicitations composées (torsion, flexion...). Or, les optimisations topologiques, dans ce cas d'étude, ont pour objectif de minimiser la masse sans prendre en compte le comportement dynamique du carter. C'est pourquoi, une analyse modale est nécessaire pour vérifier la bonne tenue des carters. Cette analyse modale est faite en prenant en compte l'encastrement des pieds. Les résultats se trouvent dans le Tableau 30 et les images correspondantes à la Figure 93.

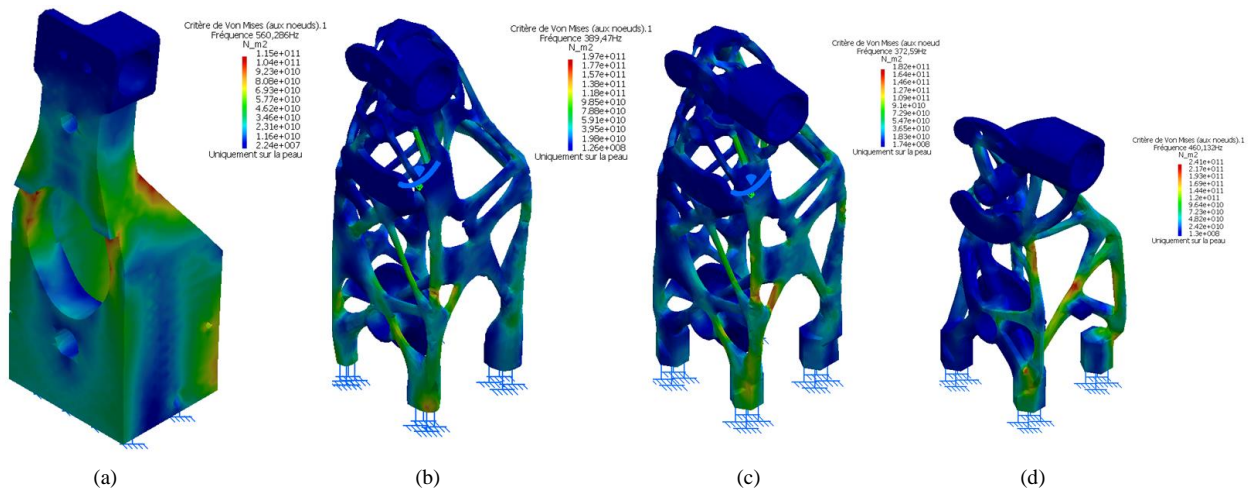


Figure 93. Contraintes de Von Mises à la première fréquence propre des carters (a) Ec, (b) Eam1, (c) Eam2, (d) Eam3. Etude de cas « moteur à air »

Tableau 30. Analyse modale des carters de l'étude de cas « moteur à air »

Carter du moteur	Ec	Eam1	Eam2	Eam3
Fréquence propre f_{01} (Hz)	560,3	389,5	372,6	460,3
Vitesse correspondante ω_{01} (tr/min)	33617,2	23368,2	22355,4	27619,6

Suite à des essais préliminaires, les vitesses de rotation du vilebrequin sont estimées au maximum égales à 6000 tr/min pour une pression d'entrée de 4 bar. Quel que soit le moteur, cette vitesse de rotation est très inférieure à la première pulsation de résonance qui, comme le montre la Figure 93 serait déféctueuse.

A partir de l'assemblage numérique du moteur à air, la conformité entre le comportement cinématique et la loi d'entrée-sortie établie à l'étape 1.1 est vérifiée par des simulations à l'aide d'un logiciel d'analyse dynamique de systèmes multicorps.

IV.3.9.2. Dessins de définition et d'ensemble

Les moteur à air étant validés, les dessins d'ensembles et de définitions peuvent être réalisés si nécessaire (voir annexe VII.2.1.3 à la page 175)

IV.3.10. Etape 4.2 Validation en phases de fabrication-post traitement

De la même manière que l'étape 4.1, une validation en phase de post traitement peut se faire afin de valider la tenue mécanique des pièces lors des taraudages par exemple.

L'apport thermique dans la technologie projection de matière (PolyJet) est très faible entrainant peu voire pas de distorsion. Il n'y a pas lieu dans ce cas d'étude d'appliquer un correctif.

La machine Connex 350 ne permet pas la modification des paramètres. Ce point n'est donc pas étudié.

IV.4. Essais sur le cas d'étude

IV.4.1. Stratégie des essais

L'objectif de ces essais est de montrer l'apport de la méthodologie. Pour cela, les résultats des essais du moteur Ec servent de références.

Pour chaque moteur, les données suivantes ont été mesurées :

- la vitesse de sortie en fonction de la pression d'entrée,
- la puissance de sortie en fonction de la pression d'entrée,
- l'autonomie en fonction de la pression d'entrée.

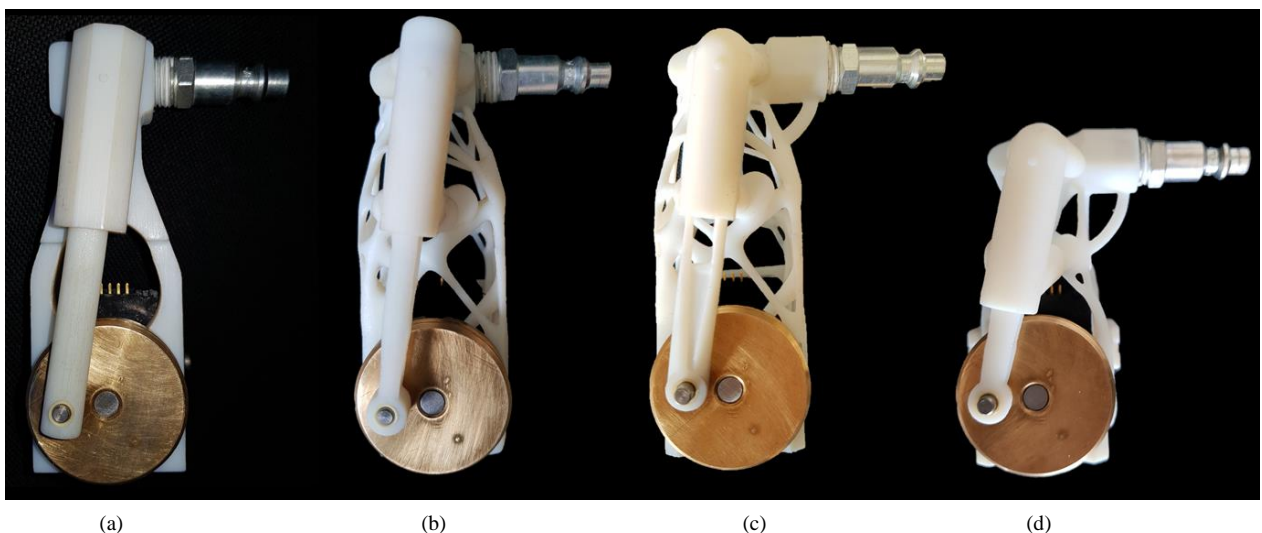


Figure 94. Les quatre moteurs fabriqués et assemblés en position d'admission. (a) Ec, (b) Eam1, (c) Eam2, (d) Eam3. Etude de cas « moteur à air »

IV.4.2. Mise en place des essais

IV.4.2.1. Les bancs d'essais

Trois bancs d'essais ont été mis au point.

Afin de mesurer la vitesse de rotation du vilebrequin en fonction de la pression d'entrée, le banc d'essai de la Figure 95 est composé d'un compresseur à air muni d'un manomètre permettant de donner la valeur de la pression d'arrivée d'air en bar. Un encodeur, placé sur le vilebrequin, envoie l'information de position de l'arbre du vilebrequin au logiciel LabView sur lequel a été réalisé un exécutable pour mesurer la vitesse de rotation en fonction du temps.

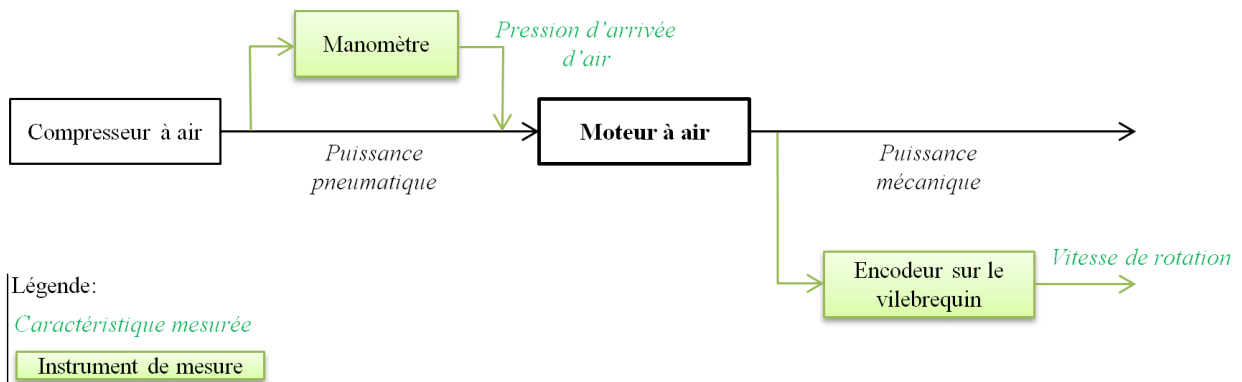


Figure 95. Schéma bloc du banc d'essais pour la mesure de la vitesse des « moteurs à air »

Pour la mesure de l'autonomie (voir les Figure 96 et Figure 97), un réservoir de 14 litres est rempli à une pression donnée. Alimenté par ce réservoir, le temps de fonctionnement du moteur est mesuré pour chacune des pressions d'entrée.

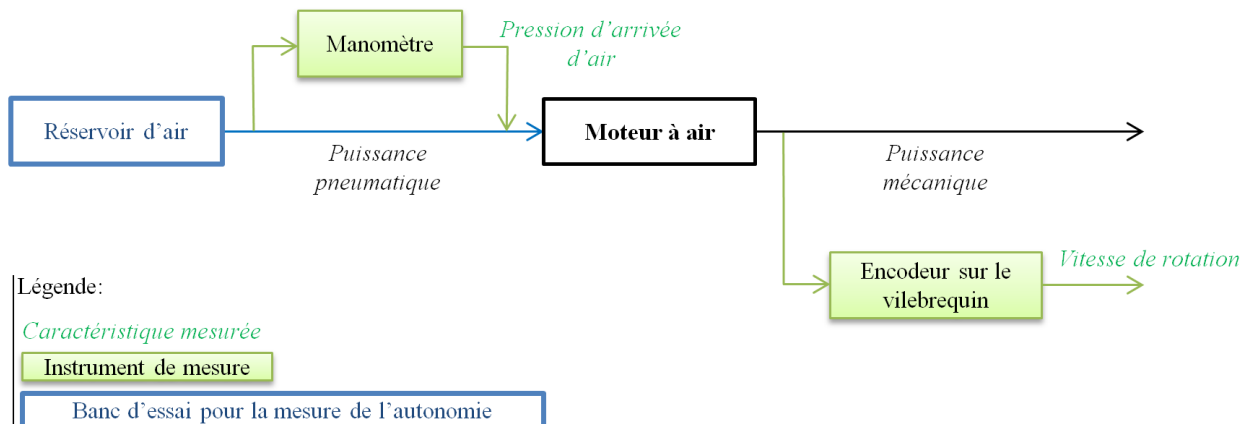


Figure 96. Schéma bloc du banc d'essais pour la mesure de l'autonomie des « moteurs à air »

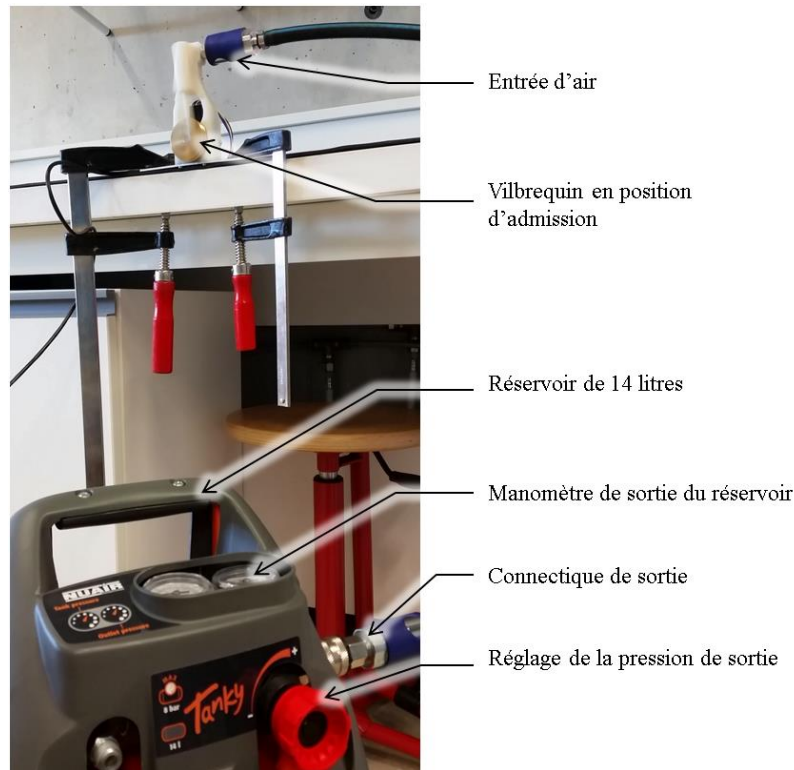


Figure 97. Mise en place des essais de mesure d'autonomie des « moteurs à air »

La mesure de la puissance se fait sur le même banc d'essai utilisé pour la mesure de la vitesse. Un frein est rajouté sur le vilebrequin comme le montre la Figure 98. Les mesures du couple de freinage et de la vitesse de rotation du vilebrequin permettront d'obtenir la puissance de sortie en fonction de la pression d'entrée du moteur. La mesure du couple est réalisée par l'ajout d'une ficelle autour de la gorge du vilebrequin (voir la Figure 99). Deux ressorts, fixés d'un côté au sol et de l'autre à chaque brin de la ficelle, mettent la ficelle en tension réalisant ainsi un couple résistant sur le vilebrequin.

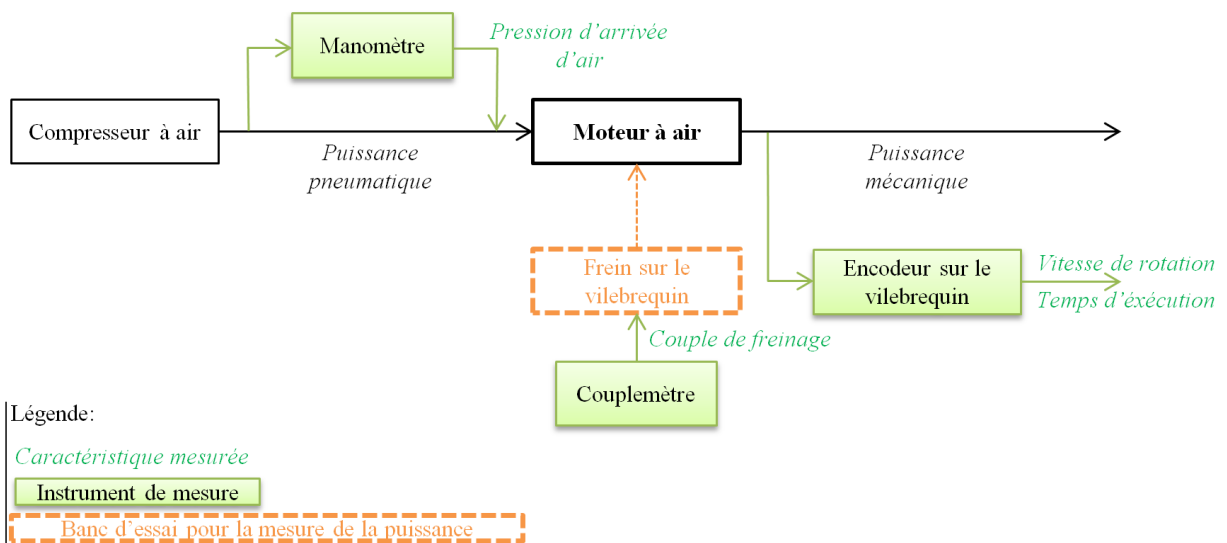


Figure 98. Schéma bloc du banc d'essais pour la mesure de la puissance des « moteurs à air »

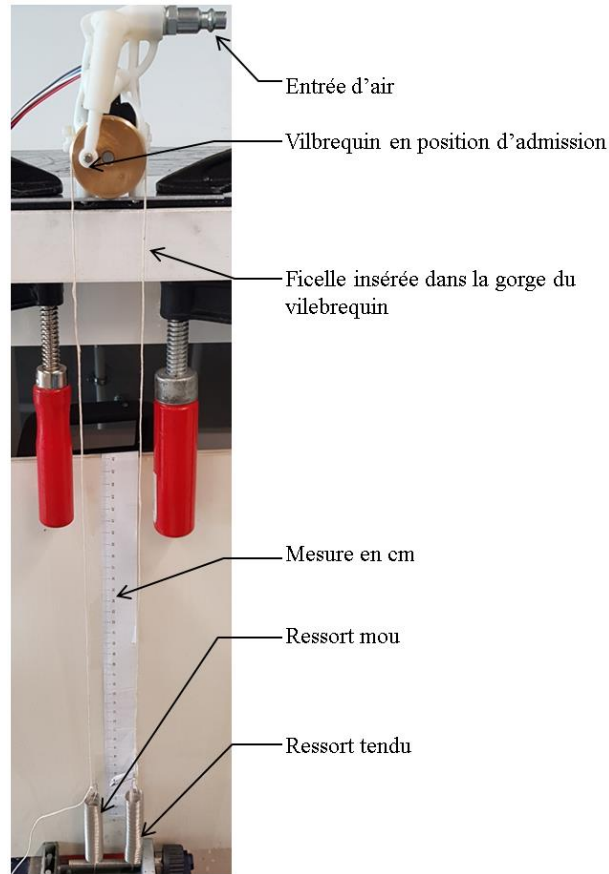


Figure 99. Mise en place des essais pour la mesure de la puissance des « moteurs à air »

IV.4.2.2. Protocole des essais

Pour chaque essai un protocole a été rédigé afin d'assurer une rigueur de manipulation et de répétabilité. Suite à 10 minutes de rodage, chaque essai est répété trois fois et ce, pour des pressions d'admission variant de 0,5 à 3 bar (augmentées par tranche de 0,5 bar). Les essais se font dans l'ordre suivant : mesure de la vitesse, puis de l'autonomie et enfin de la puissance.

Les protocoles des essais sont détaillés dans l'annexe VII.2.2 à la page 178.

Pour la mesure des vitesses, les graphes de la vitesse en fonction du temps sont tracés pour chacune des pressions Figure 100. Puis, une moyenne de la vitesse en régime établi est effectuée. Enfin, la moyenne de ces trois vitesses ainsi que l'estimation de l'écart type sont calculés.

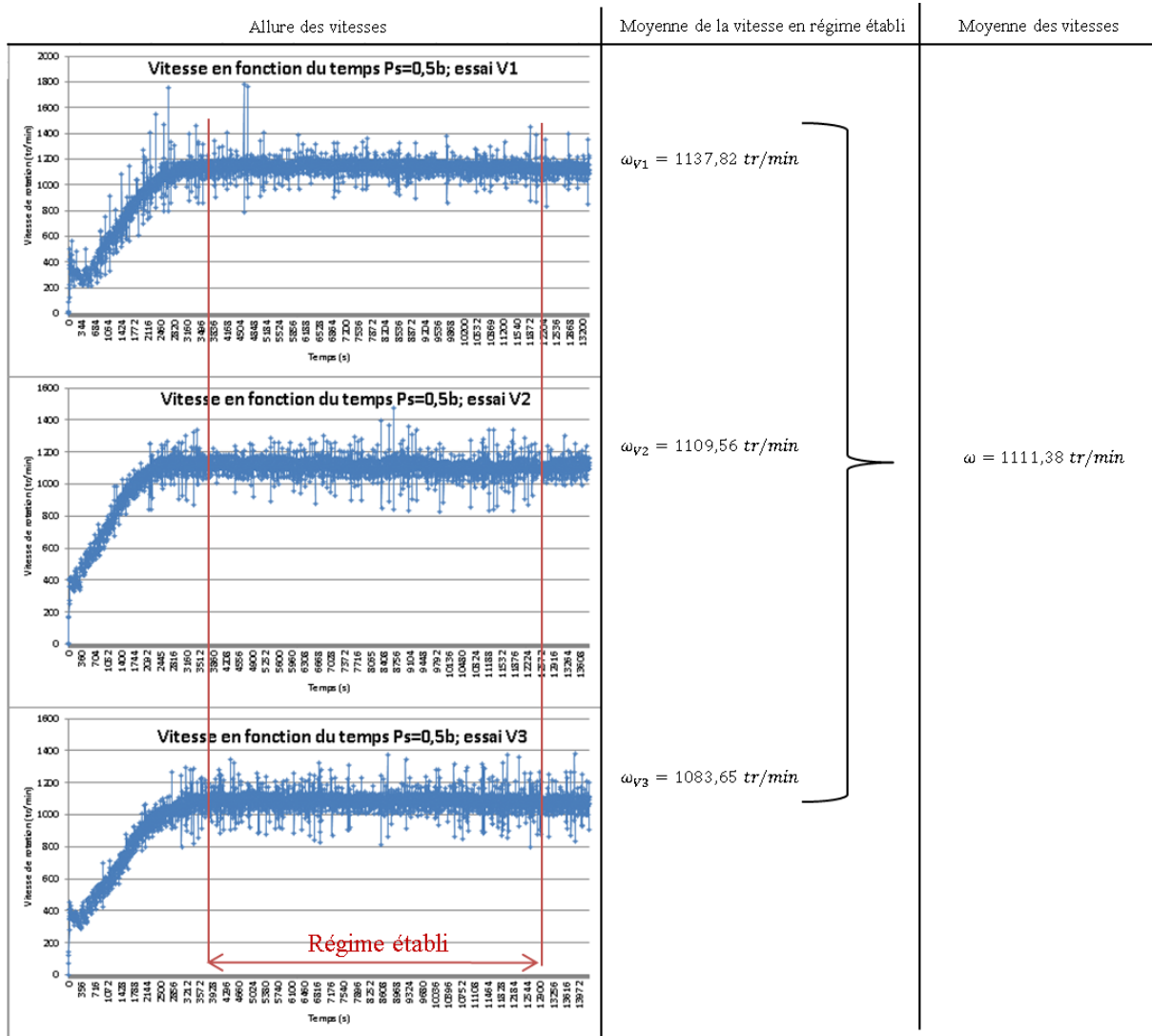


Figure 100. Analyse de la mesure de la vitesse du moteur Eam1 pour une pression de 0,5 bar

La mesure de l'autonomie est l'estimation du temps écoulé entre le moment où la vitesse du vilebrequin devient supérieure à zéro et où elle retombe à zéro. A chaque pression, trois essais sont effectués. Enfin, la moyenne de temps ainsi que l'estimation de l'écart type sont calculés.

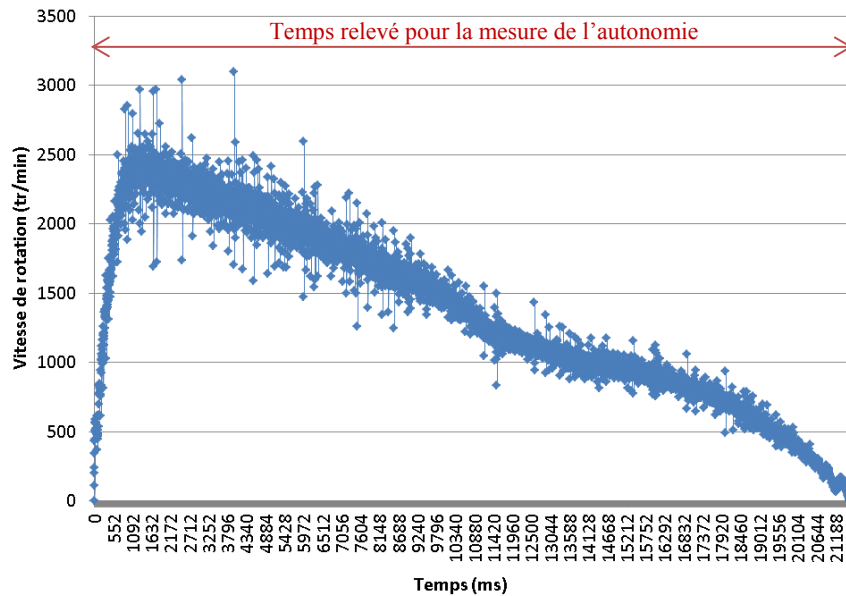


Figure 101. Allure de l'autonomie du moteur Eam1 pour une pression de 0,5 bar

La détermination de la puissance en fonction de la pression d'entrée est effectuée à partir de deux mesures : les longueurs de déplacement des ressorts tendu et mou (voir Figure 99) ainsi que de la valeur de la moyenne des vitesses de rotation du vilebrequin. Cette moyenne de vitesse est estimée de la même manière que pour la mesure de la vitesse en fonction de la pression d'entrée comme le montre la Figure 100.

A partir de ces mesures, la puissance se détermine à l'aide de l'Équation 14 :

Équation 14

$$\wp = \frac{K \cdot D \cdot \omega}{2} \cdot \Delta l$$

Avec :

K : raideur des ressorts $K=1,7 \text{ N/m}$

D : diamètre du fond de la gorge du vilebrequin $D=38 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

ω : moyenne des vitesses des 3 essais pour une pression donnée (en rad/s)

Δl : différence d'élongation entre le ressort tendu et le ressort mou (mm).

IV.4.3. Résultats des essais

Les résultats sont montrés sous forme de courbes. Cela permet une comparaison aisée entre les moteurs. A chaque résultat une analyse est proposée.

IV.4.3.1. Tracé des courbes de la vitesse moyenne en fonction de la pression d'entrée

Les courbes des mesures de la vitesse en fonction de la pression d'entrée sont tracées à la Figure 102.

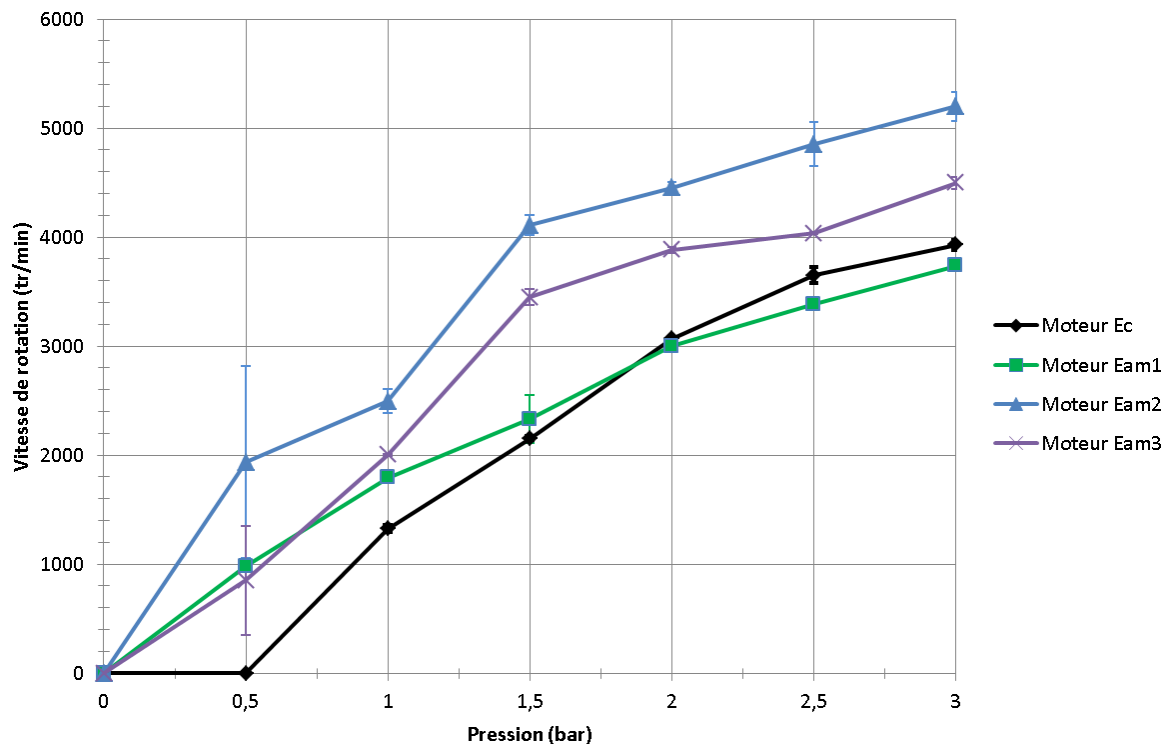


Figure 102. Courbes des vitesses de rotation de sortie en fonction de la pression d'entrée des « moteurs à air »

Nous remarquons que les quatre courbes ont une allure croissante en fonction de la pression. Toutefois, la pente des quatre courbes diminue au fur et à mesure de l'augmentation de la pression. Cela peut s'expliquer lorsque la pression augmente :

- par le rendement volumétrique qui diminue,
- par les fuites qui augmentent,
- les frottements.

Le moteur présentant des vitesses angulaires les plus élevées est le moteur Eam2, puis ensuite le moteur Eam3. Le moteur Ec ne démarre pas à une pression inférieure à 1 bar. Cela peut être dû à la résistance au mouvement des pièces à forte inertie. A partir de 2 bar, la vitesse de sortie d'Ec devient légèrement supérieure à Eam1.

Les moteurs Eam2 et Eam3 ont les vitesses les plus élevées. Cela peut s'expliquer par les améliorations effectuées lors de l'optimisation fonctionnelle. En effet, ces deux moteurs ont

bénéficié tout d'abord d'une diminution des pertes de charges au niveau de l'admission du carter ainsi que dans la chemise. Puis une augmentation de l'étanchéité a été réalisée par les gorges en forme de bec sur le piston. Enfin, l'avance à l'admission ainsi qu'à l'échappement permettent vraisemblablement dans un premier temps, une amélioration du remplissage de la chemise, et dans un deuxième temps, une diminution de la résistance à la montée du piston lors du refoulement.

Le moteur Eam2 a une vitesse de sortie supérieure (de 700 tr/min pour 3 bars) à celle de Eam3. Cette différence est due à la modification architecturale effectuée sur le moteur Eam3.

Le Tableau 31 indique le gain de vitesse obtenu par rapport au moteur Ec pour une pression de 3 bar.

Tableau 31. Gains obtenus par les moteurs sur la vitesse de rotation pour une pression d'entrée de 3 bars

Moteur	Vitesse en tr/min pour 3 bar	Gain sur la vitesse
Ec	3931	
Eam1	3736	-5 %
Eam2	5200	32 %
Eam3	4500	14.5 %

IV.4.3.2. Tracé des courbes de l'autonomie en fonction de la pression d'entrée

Les courbes de la Figure 103 montrent une augmentation de l'autonomie en fonction de la pression du réservoir, ce qui est cohérent. Cependant, les différentes optimisations n'ont pas un impact très significatif sur l'autonomie.

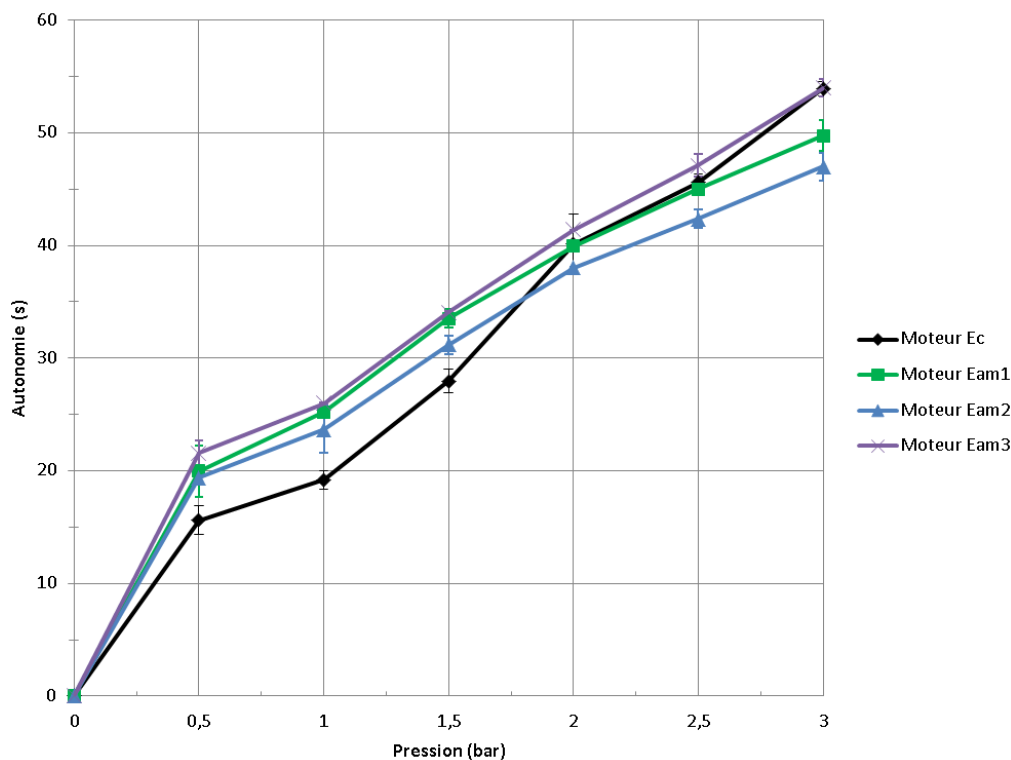


Figure 103. Courbes de l'autonomie de sortie en fonction de la pression d'entrée des « moteurs à air »

Le moteur Eam2 a l'autonomie la plus faible. Cela peut s'expliquer par sa vitesse de rotation qui est la plus élevée.

Le Tableau 32 montre les différentes autonomies pour 3 bar par rapport au moteur Ec.

Tableau 32. Gains obtenus par les moteurs sur l'autonomie des « moteurs à air »

Moteur	Autonomie en secondes pour 3 bars	Gain sur l'autonomie
Ec	53.92	
Eam1	49.77	-7.7 %
Eam2	47	-12.8 %
Eam3	54	0.15 %

IV.4.3.3. Tracé des courbes de la puissance en fonction de la pression d'entrée

D'après la Figure 104, chaque optimisation supplémentaire, permet une augmentation de la puissance. L'optimisation topologique simple sur chacune des classes d'équivalence permet un gain de 48.3% par rapport au moteur à formes conventionnelles comme le montre le Tableau 33. L'ajout de l'optimisation fonctionnelle (en plus de l'optimisation topologique) permet un gain de 128.25% et enfin l'optimisation architecturale (en plus des deux autres) permet d'atteindre 152.2% de gain.

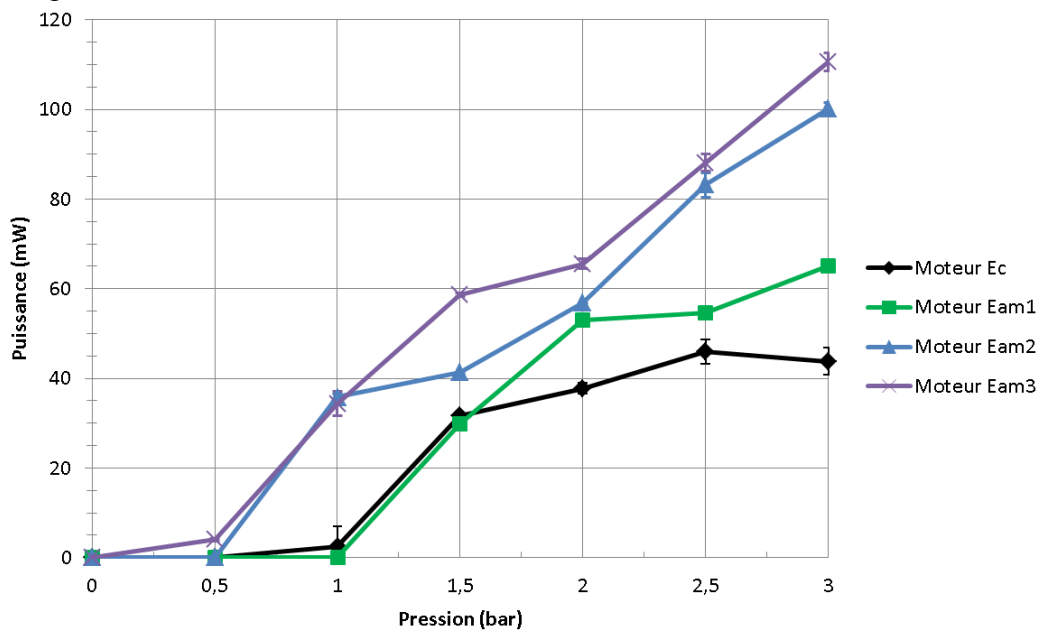


Figure 104. Courbes de la puissance de sortie en fonction de la pression d'entrée des « moteurs à air »

Tableau 33. Gains obtenus par les moteurs sur la puissance de sortie des « moteurs à air »

Moteur	Puissance en mW pour 3 bar	Gain sur la puissance
Ec	43.82	
Eam1	65	48.3 %
Eam2	100.02	128.25 %
Eam3	110.52	152.2 %

IV.5. Conclusion

IV.5.1. Conclusion sur les résultats

Les résultats des essais montrent un gain sur les différentes spécifications citées au chapitre IV.3.2 à la page 119, sauf sur l'autonomie. En effet, les objectifs de conception du moteur à air exigeaient une diminution de la masse, du volume, une augmentation de la puissance et de l'autonomie.

Le Functional Improvement Rate permet de comparer l'apport d'une conception sur une (ou un ensemble de) caractéristique(s) en imposant un poids W_i et en prenant en compte le sens d'amélioration δ . Les courbes comparatives entre chacun des moteurs sont tracées en Figure 105 en utilisant l'Équation 15 et l'Équation 16 du FIR dont le principe a été détaillée à la page 114. Le sens d'amélioration δ est indiqué dans le Tableau 34. En fonction de l'importance d'une caractéristique f_i , le poids W_i qui lui sera alloué dans le FIR sera plus ou moins important. Afin de comparer les moteurs en donnant une importance pour chacune des caractéristiques influant l'objectif, un FIR sera calculé pour chacune d'entre-elles. Pour cela tous les poids des caractéristiques seront imposés à 0,05 sauf le poids de la caractéristique mise en avant qui sera à 0,75. A l'abscisse « Poids identiques » de la Figure 105, tous les poids sont identiques.

Équation 15

$$FIR_{(Nouvel\ Produit / Ancien\ Produit)} = \frac{1}{6} \cdot (W_{vitesse} \cdot G_{vitesse} \% + W_{coût} \cdot G_{coût} \% + W_{autonomie} \cdot G_{autonomie} \% + W_{puissance} \cdot G_{puissance} \% + W_{encombrement} \cdot G_{encombrement} \% + W_{masse} \cdot G_{masse} \%)$$

Équation 16

$$G_{f_i} \% = \delta \cdot \left(\frac{f_{i\text{Nouvel\ Produit}}}{f_{i\text{Ancien\ Produit}}} - 1 \right)$$

Tableau 34. Valeur du sens d'amélioration δ pour chacune des caractéristiques de l'étude de cas « moteur à air »

Caractéristique	Sens d'amélioration δ
Vitesse	1
Coût	-1
Autonomie	1
Puissance	1
Encombrement	-1
Masse	-1

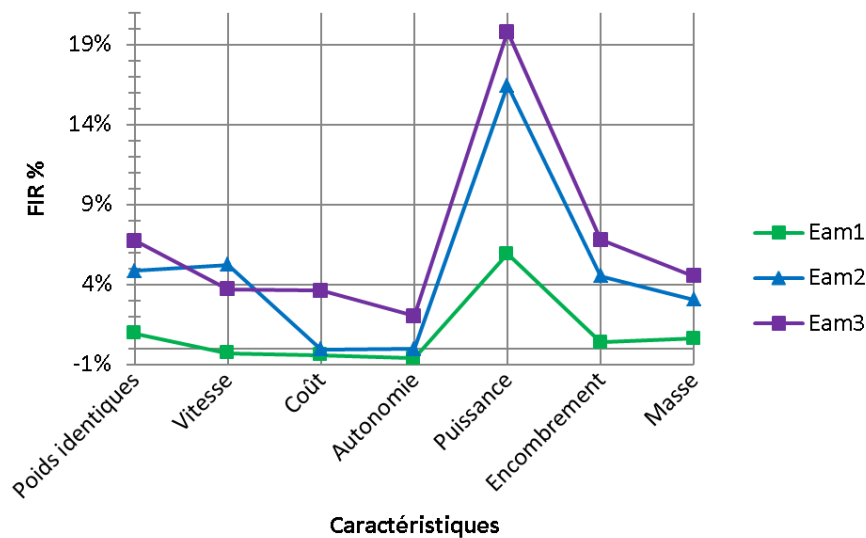


Figure 105. Courbes comparatives du FIR des « moteurs à air »

Quelle que soit la caractéristique prise en compte en imposant un poids important, le moteur Eam3 a toujours un FIR positif ce qui montre un gain quelle que soit la caractéristique. Mis à part pour la vitesse de sortie, le moteur Eam3 propose un gain toujours supérieur. Enfin, ces courbes indiquent que les caractéristiques sur lesquelles les optimisations ont le plus d'impact sont la puissance puis l'encombrement et enfin la masse. Le gain en puissance est surtout apporté par l'optimisation fonctionnelle tandis que les gains sur l'encombrement et la masse sont réalisés d'une part par l'optimisation topologique et d'autre part par l'optimisation architecturale.

Ainsi la méthodologie a permis d'obtenir un moteur dont la plupart des caractéristiques mécaniques spécifiées lors des objectifs de reconception ont été améliorées.

Toutefois l'optimisation architecturale qui a conduit à une diminution du volume (par une diminution de l'entraxe chemise/vilebrequin) est autant applicable pour la FA que pour les procédés conventionnels de fabrication.

L'optimisation fonctionnelle a permis d'obtenir des gains en termes :

- d'étanchéité entre le piston et la chemise,
- la diminution des pertes de charges,
- d'agrément d'utilisation et de montage.

L'optimisation topologique a permis des gains en masse et inertie. Sans la fabrication additive, la réalisation des formes complexes obtenues par l'optimisation topologique n'aurait pas pu être possible.

IV.5.2. Conclusion sur la méthodologie

La méthodologie présentée dans ce chapitre, permet d'aider le concepteur à concevoir un système mécanique multicorps qui va être fabriqué par FA. La méthodologie englobe toutes les étapes de conception d'un produit et permet la capitalisation des connaissances et savoir-faire pour concevoir un produit pour la FA.

Cette méthodologie contient quatre étapes qui ont été appliquées sur un cas d'étude le « moteur à air ».

La première étape permet d'établir la liste des exigences et des spécifications mais aussi d'identifier les pièces du mécanisme qui seront fabriquées par FA ou encore d'estimer si la fabrication directe de liaison apporte une valeur ajoutée.

La deuxième étape regroupe les trois familles d'optimisations recensées dans ce mémoire. Ces optimisations permettent entre autre de diminuer le volume du système, d'augmenter sa fonctionnalité et de diminuer sa masse.

La troisième partie est la mise en volume du concept de répartition de matière obtenu lors de l'étape précédente. Divisée en deux parties, cette étape aboutit à la CAO du système mécanique ainsi qu'à la CAO des bruts de fabrication.

Enfin la quatrième partie est la validation du système conçu aussi bien en phase de fonctionnement qu'en phase de fabrication.

Les optimisations proposées lors de l'étape 2 sur le moteur à air sont adaptées au choix du procédé de fabrication additive, la projection de matière (Polyjet). (Orquéra et al., 2017) proposent, à partir du même support d'étude, d'autres solutions lors de l'optimisation fonctionnelle pour le procédé fusion laser sur lit de poudre (LBM).

Des astuces de conception apparaissent chaque jour. Pour que cette méthodologie continue à capitaliser les connaissances, il est ainsi nécessaire de l'alimenter régulièrement par une veille technologique.

La méthodologie présentée a été appliquée pour un cas d'étude. Afin de généraliser ses apports, une expérimentation avec différents cas d'études et différents procédés de fabrication doit être effectuée.

De plus, cette étude est basée sur la reconception d'un produit. Une conception « à partir de la feuille blanche » permettrait d'éprouver la méthodologie

Enfin, une étude comparative doit être réalisée entre les résultats issus de cette méthodologie et d'autres méthodologies existantes.

V. Conclusions générales et perspectives

V.1.	Les apports de la thèse _____	150
V.2.	Les perspectives de recherche _____	150
V.2.1.	Ouverture de la méthodologie de conception pour toute architecture de systèmes mécaniques _____	151
V.2.2.	Méthodologie inversée _____	152
V.2.3.	Adapter la méthodologie _____	152
V.2.4.	Recherche dans le laboratoire et partenariat industriel _____	153
V.3.	Autour de cette thèse _____	153
V.4.	Publications et communications _____	154

V.1. Les apports de la thèse

A partir des trois verrous scientifiques mis en évidence au chapitre II.5 à la page 61, trois apports majeurs ont été proposés : une différenciation et une hiérarchisation des optimisations de systèmes pour la FA, une démarche d'optimisation topologique d'un système multicorps, et enfin, une méthodologie globale de conception pour la FA.

Il a été mis en évidence que la conception d'une pièce ou d'un produit peut être améliorée grâce à trois optimisations. En plus de l'optimisation topologique il est proposé de rajouter des optimisations fonctionnelle et architecturale. Le gain de volume et de masse que cela apporte et les ajouts de fonctions permettent d'améliorer le produit quelle que soit sa phase de vie.

Puis, une démarche d'optimisation topologique d'un système multicorps (appelée TOMS) permet de prendre en compte l'impact des masses et inerties des pièces, sur les efforts de liaisons, lors de leur optimisation. Des chemins d'optimisation, c'est-à-dire l'ordre d'optimisation des différentes pièces, a une influence sur les résultats et ainsi des principes de choix de chemin d'optimisation ont été proposés pour répondre aux besoins du concepteur.

Enfin, une méthodologie globale de conception pour la FA est proposée dans la dernière partie de ce mémoire. Cette méthodologie permet de concevoir ou de reconcevoir une pièce ou un mécanisme. Elle se veut ouverte à la plupart des procédés de FA. Tous les apports de cette thèse sont intégrés dans cette méthodologie. Cette méthodologie a permis la capitalisation des connaissances et du savoir-faire en conception pour la FA. Ainsi, les différents articles et références traitant d'un point d'une étape de conception sont proposés sous forme de tableaux permettant à un concepteur, novice ou initié, de cibler directement l'information utile sans être noyé par la multitude de nouveautés autour de la FA.

Pour chacun de ces apports, un cas d'étude a été proposé. Une perforatrice d'atelier est un système simple sur lequel l'ordre et la méthode d'application des trois optimisations ont pu être établis. L'optimisation des systèmes mécaniques est appliquée sur le poignet d'un robot. Les résultats montrent un bénéfice tant sur les caractéristiques mécaniques que sur le comportement du poignet. Enfin, la méthodologie de conception est expliquée pas à pas lors de la reconception d'un moteur à air. Les différentes versions de ce dernier, qui ont pu être fabriquées et testées expérimentalement, montrent les apports de la capitalisation des connaissances et des optimisations.

V.2. Les perspectives de recherche

Cette thèse m'a permis de découvrir le monde de la recherche et plus particulièrement la recherche autour de la conception pour la fabrication additive. Non seulement, les travaux de cette thèse peuvent continuer à être développés, mais en plus d'autres perspectives me poussent

à vouloir continuer dans la recherche. Trois perspectives de recherche découlant de cette thèse ont été identifiées :

- développer la méthodologie pour tout type de système mécanique (architectures ouvertes, fermées ou complexes),
- réaliser une méthodologie « inversée » pour adapter la conception à un contexte, à un objectif de comportement ciblé,
- adapter la méthodologie en fonction du procédé, du choix de l'analyse de l'optimisation topologique.

V.2.1. Ouverture de la méthodologie de conception pour toute architecture de systèmes mécaniques

Cette étude de thèse ainsi que les conclusions obtenues sont valables à ce jour pour un mécanisme dont le graphe des liaisons est ouvert. Il serait intéressant de réaliser une étude semblable sur un mécanisme à chaîne fermée voire complexe.

Une première perspective est l'élargissement des principes de choix des chemins d'optimisation (lors de l'application de la méthode TOMS). Ainsi il sera étudié l'optimisation d'un système complexe et des principes de conception en seront extraits. La Figure 106 montre l'exemple d'un système multicorps complexe dont l'application de l'optimisation TOMS pourrait être intéressante.

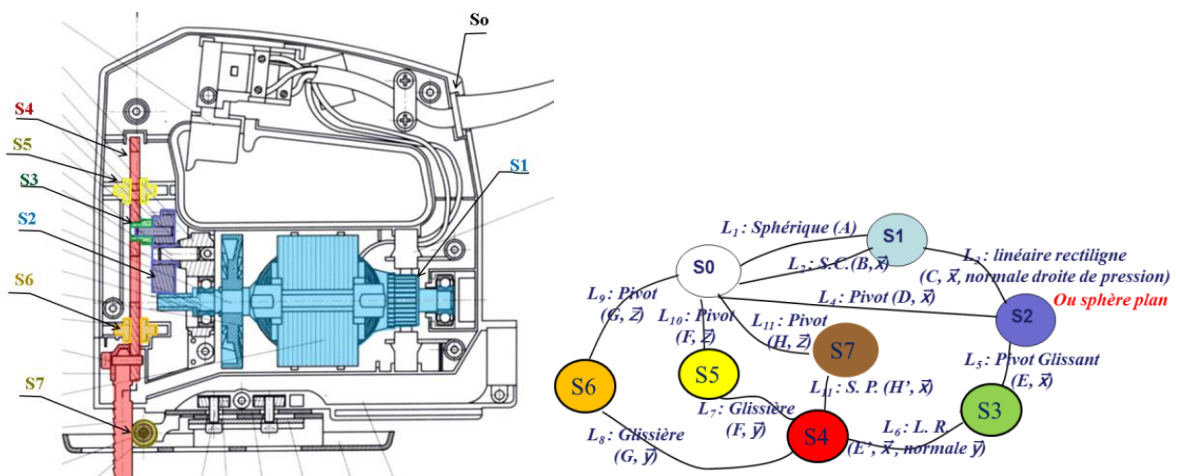


Figure 106. Exemple de système à architecture complexe: Scie sauteuse

Cette étude, ajoutée à celle effectuée sur le système ouvert « poignet de robot », permettrait un début de généralisation des principes de choix de chemin d'optimisation.

Une deuxième perspective serait de comparer l'impact de la méthodologie de conception proposée à des systèmes mécaniques reconçus pour la FA et existant dans la littérature. Malheureusement, à ce jour, il n'existe pas de nombreux systèmes mécaniques étudiés dans la littérature. La pince pour la manipulation de vêtement reconçue par (Jilich et al., 2019) serait un des rares supports permettant de réaliser une étude comparative.

V.2.2. Méthodologie inversée

La méthodologie de conception proposée dans cette thèse permet d'obtenir un système mécanique dont les performances sont découvertes a posteriori. Une méthodologie inversée pourrait être envisagée pour concevoir le système mécanique pour la fabrication additive à partir d'un objectif de comportement. Par exemple, pour le moteur à air utilisé comme cas d'étude au chapitre IV.3.1, l'objectif de conception peut être d'obtenir une valeur de puissance. Les trois optimisations proposées dans ce mémoire, seraient adaptées pour atteindre cette puissance.

De plus, le cas d'étude proposé n'est pas contextualisé. La démarche de conception ainsi proposée répond à des objectifs couramment utilisés comme un gain de masse et une amélioration de performances. Toutefois, si le mécanisme doit être utilisé dans un contexte particulier, par exemple, pour un bateau réputé écologique, pour l'aviation, pour la course automobile ou autre (voir Figure 107) il serait intéressant de voir si la méthodologie proposée doit évoluer globalement ou partiellement.

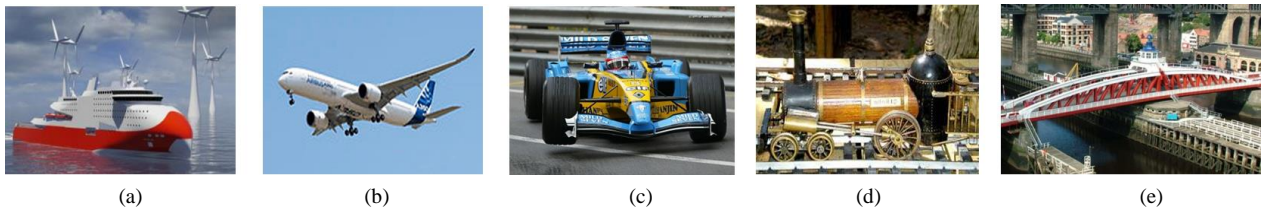


Figure 107. Différents contextes de conception. (a) <http://www.lemarin.fr/etiquettes/navire-du-futur>; (b) <https://fr.wikipedia.org/>; (c) <http://www.maxisciences.com/> (d) <http://www.hobbydownloads.com/>; (e) https://en.wikipedia.org/wiki/Swing_Bridge,_River_Tyne

V.2.3. Adapter la méthodologie

On entend par adapter la méthodologie, la réalisation d'une méthode adaptée à certain choix comme par exemple :

- adapter la méthodologie en fonction du procédé,

Chaque procédé possède ses propres limitations de conception et ses propres caractéristiques. La méthodologie mise en place dans ce mémoire a pour ambition de s'adapter à tout type de procédé. Toutefois, il existe quelques particularités pour certains d'entre eux qui n'ont pas été prises en compte comme par exemple la mise en place des inserts pour la stratification de couches. C'est pourquoi, le développement de la méthodologie pourrait être poursuivi. Ce développement peut être réalisé par l'élaboration d'un outil informatique d'aide au choix du procédé et de proposition d'actions à réaliser à chaque étape de la méthodologie.

- adapter la méthodologie en fonction du type de matériau innovant,

Le choix d'un matériau de type treillis peut demander une étape supplémentaire. En effet, suite à l'étape de l'optimisation topologique TOMS, une étape d'optimisation paramétrique peut être réalisée afin d'obtenir, par exemple, les diamètres des barres permettant de résister aux efforts tout en diminuant la masse de l'ensemble.

- adapter la méthodologie en fonction du choix de l'analyse de l'optimisation topologique,

Au chapitre II.2.2.2.6 page 18 différentes interprétations du résultat de l'optimisation topologique ont été présentées. Au cours de cette thèse l'interprétation utilisée est celle à matériau à densité $\rho=1$. La méthodologie peut être adaptée à une autre interprétation de l'optimisation.

V.2.4. Recherche dans le laboratoire et partenariat industriel

Le laboratoire COSMER (EA7398) comporte deux axes de recherche :

- Robotique Mobile Marine, Amphibie et Terrestre,
- Ecoconception et optimisation de Systèmes Mécaniques Durables.

Les activités de recherche en fabrication additive visent à développer des méthodes et des outils relatifs à la chaîne numérique en fabrication additive (conception, génération de trajectoires et pilotage de machines).

Cette thèse pourrait permettre de lier les activités des deux équipes. Par exemple, le gain de masse qui serait obtenu par la reconception des éléments constituant des robots mobiles, en appliquant la méthodologie, pourrait augmenter leur autonomie.

D'autre part, l'utilisation optimisée de la FA implique une diminution de l'impact environnemental lors de l'utilisation des systèmes mécaniques. Cette thèse pourrait être le début d'une étude d'impact environnemental des systèmes mécaniques conçus et réalisés par FA.

L'intérêt des industriels pour la FA est grandissant. Toutefois, les ingénieurs ayant pour compétence la conception pour la FA ne sont pas encore très nombreux. C'est pourquoi, les partenariats industriels sont sous deux formes : la formation des ingénieurs et techniciens, et d'autre part la réalisation de projets de recherche.

Sur le premier point, l'entreprise Expleo (anciennement Assystem) a sollicité le laboratoire pour réaliser des formations de conception pour la FA. La formation a été mise au point et se renouvelle chaque année.

Sur le second point, des industriels nous ont contactés afin que nous puissions étudier et concevoir une pièce ou un système pour la FA.

De plus, une thèse en conception pour la FA, avec Naval Group, débute cette année sur le thème de la conception.

V.3. Autour de cette thèse

Cette thèse a été bénéfique autant professionnellement que personnellement.

Dès la première année de ma thèse, un module d'enseignement sur la conception pour la fabrication additive a été mis en place en troisième année de l'école SeaTech. La méthodologie élaborée dans ce mémoire y est enseignée en s'appuyant sur des logiciels d'optimisation topologique (Inspire, Optistruct). Un projet d'optimisation de conception est réalisé par les étudiants. La Figure 108 montre quelques exemples de résultats obtenus pour la conception d'un décapsuleur porte-clefs.



Figure 108. (a) Projet d'optimisation d'un système bielle manivelle réalisé par les étudiants de l'école d'ingénieurs SeaTech en appliquant la méthode TOMS pour la LBM ; (b) Travaux de conception optimisée d'un décapsuleur à réaliser par FA

La plateforme MAQ-3D ainsi que les principaux acteurs qui s'en occupent ou qui l'utilisent sont aussi monté en compétence. En effet, les contraintes de fabrication des trois procédés ont été étudiées pendant cette thèse et enfin maîtrisées. L'orientation de fabrication, la mise en place des supports sont des exemples d'acquis obtenus.

Enfin, j'ai eu la joie de participer au concours « ma thèse en 180 secondes » où j'ai pu exposer le sujet et les objectifs de ma thèse en 3 minutes. J'ai eu l'honneur d'obtenir le prix du public ainsi que le 3^{ème} prix du jury de l'Université de Toulon.

V.4. Publications et communications

Divers articles et conférences ont été réalisés au cours de cette thèse. Les références des publications et actes de communications sont détaillés ci-dessous.

- Article dans un journal avec comité de lecture :
 - Myriam Orquera, Sébastien Campocasso & Dominique Millet (2019) Some principles to optimise an additively manufactured multi-component product, *Journal of Engineering Design*, DOI: 10.1080/09544828.2019.1699034
- Conférence internationale avec acte :
 - M. Orquera*, S. Campocasso, D. Millet. Design for additive manufacturing method for a mechanical system downsizing. 27th CIRP Design Conference, May 10-12, Cranfield (UK). *Procedia CIRP*, Vol. 60, pp. 223-228, 2017.
- Conférences nationales
 - M. Orquera*, S. Campocasso, D. Millet. Méthodologie de conception d'un système mécanique pour la fabrication additive. Assises Européennes de la Fabrication Additive, 27-29 Juin, Châtenay-Malabry (France), 2017.

- M. Orquera*, D. Millet, S. Campocasso. Optimisation environnementale d'un système résultant d'une fabrication additive. Journées Manufacturing'21, 20-22 Janvier, Grenoble (France), 2016.
- Vulgarisations
 - Avril 2017 : Participation au concours MT180S. Lauréate du 3^{ème} prix du jury, et du prix public de l'université de Toulon.
 - Septembre 2017 : Conférence devant le Réseau Des Mécaniciens du CNRS, lors de la « 3ème Ecole technologique du RDM : Procédés de fabrication additive : règles et méthodes » à Carqueiranne (83).

VI. Références

- Adam, G. A. O., & Zimmer, D. (2014). Design for additive manufacturing-element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(1), 20–28.
- Adam, G. A. O., & Zimmer, D. (2015). On design for additive manufacturing: evaluating geometrical limitations. *Rapid Prototyping Journal*, 21(6), 662–670.
- AFNOR. (2015). *NF ISO 17296-2 Fabrication additive - Principes généraux - Partie 2 : Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matériaux de base*. 1–11.
- Agustí-Juan, I., & Habert, G. (2017). Environmental design guidelines for digital fabrication. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2780–2791.
- 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.
- Allaire, G., & Schoenauer, M. (2007). *Conception optimale de structures*.
- Allen, J. (2006). An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs. Machine from solid for aero engine parts. In *ROLLS-ROYCE PLC DERBY (UNITED KINGDOM)*.
- Allison, J., Sharpe, C., Seepersad, C. C., & Kubiak, S. (2017). Powder bed fusion metrology for additive manufacturing design. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2737–2756.
- Altair. (2018). Gradient-based optimisation method.
- Alting, L., Kimura, F., Hansen, H. N., & Bissacco, G. (2003). Microengineering. A status report on microelectronic fabrication and micromachining technology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(2), 635–657.
- Aremu, A., Ashcroft, I., Hague, R., Wildman, R., & Tuck, C. (2010). Suitability of SIMP and BESO topology optimization algorithms for additive manufacture. *Twenty First Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 679–692.
- Asadollahi-Yazdi, E., Gardan, J., & Lafon, P. (2017). Integrated Design for Additive Manufacturing Based on Skin-Skeleton Approach. *Procedia CIRP*, 60(2212), 217–222.
- Ashby, M. (2013). Designing architected materials. *Scripta Materialia*, 68(1), 4–7.
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5), 677–688.
- Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P., & Salmi, A. (2010). Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), 308–317.
- Ayre, M. (2014). 3D printing for manufacture : a basic design guide. *Oxford: Crucible Design Ltd*.
- Bächer, M., Whiting, E., Bickel, B., & Sorkine-Hornung, O. (2014). Spin-it: optimizing moment of inertia for spinnable objects. *ACM Transactions on Graphics*, 33(4), 96.
- Bahnini, I., Rivette, M., Rechia, A., Siadat, A., & Elmesbahi, A. (2018). Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Bâlc, N., & Vilău, C. (2017). Design for additive manufacturing, to produce assembled products, by SLS. *MATEC Web of Conferences*, 121, 1–6.
- Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 129, 1–16.
- Barbieri, L., Calzone, F., & Muzzupappa, M. (2019). Form and function: functional optimization and Additive Manufacturing. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II* (pp. 649–658). Springer, Cham.
- Barbieri, S. G., Giacomini, M., Mangeruga, V., & Mantovani, S. (2017). A design strategy based on topology optimization techniques for an additive manufactured high performance engine piston. *Procedia Manufacturing*, 11, 641–649.
- Barlier, C., & Bernard, A. (2016). *Fabrication additive : Du prototype rapide à l'impression 3D* (Technique; Dunod, Ed.).
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., & Hague, R. (2016). The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 193–201.
- Belova, O. V., & Vulf, M. D. (2017). New to power equipment design approaches with additive manufacturing prospects. *Journal of Physics: Conference Series*, 891, 012211. IOP Publishing.
- Bendsøe, M. P. (1995). *Optimization of structural topology, shape, and material* (Springer, Ed.).
- Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (1999). Material interpolation schemes in topology optimization. *Archive of*

- Applied Mechanics*, 69(9–10), 635–654.
- Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology optimization: theory, methods, and applications*.
- Benoist, V., Arnaud, L., Baili, M., & Faye, P. (2018a). Improved design methodology for additive manufacturing including machining load cases: application to an aeronautical. *Conférence MUGV 2018 et Manufacturing'21*.
- Benoist, V., Arnaud, L., Baili, M., & Faye, P. (2018b). Topological optimization design for additive manufacturing, taking into account flexion and vibrations during machining post processing operations. *14th International Conference on High Speed Machining*. San Sebastian, Spain.
- Berglund, L., Ivarsson, F., & Rostmark, M. (2019). *Crucial parameters for additive manufacturing of metals a study in quality improvement*.
- Bikas, H., Lianos, A. K., & Stavropoulos, P. (2019). A design framework for additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (Table 1).
- BluEdge. (2018). *3D Printing Design*.
- Bône, J.-C., Morel, J., & Boucher, M. (1984). *Mécanique générale: cours et applications*.
- Booth, J. W., Alperovich, J., Chawla, P., Ma, J., Reid, T., & Ramani, K. (2017). The design for additive manufacturing worksheet. *Journal of Mechanical Design*, 139(10), 100904.
- Booth, J. W., Alperovich, J., Reid, T. N., & Raman, K. (2016). The design for additive manufacturing worksheet. *Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 1, 15.
- Boothroyd, G. (1994). Product design for manufacture and assembly. *Computer-Aided Design*, 26(7), 505–520.
- Bosch, R. (2000). *Mémento de technologie automobile* (R. B. GmbH, Ed.).
- Bouaziz, O., Bréchet, Y., & Embury, J. D. (2008). Heterogeneous and architected materials: A possible strategy for design of structural materials. *Advanced Engineering Materials*, 10(1–2), 21–36.
- Boyard, N. (2015). *Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive*. Thèse. Arts et Métiers ParisTech.
- Boyard, N., Christmann, O., Rivette, M., Kerbrat, O., & Richir, Si. (2018). Support optimization for additive manufacturing : application to FDM. *Rapid Prototyping Journal*, 24(1), 69–79.
- Brackett, D., Ashcroft, I., & Hague, R. (n.d.). Topology optimization for additive manufacturing. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX.*, 348–362.
- Brajlih, T., Valentan, B., Balic, J., & Drstvensek, I. (2011). Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. *Rapid Prototyping Journal*, 17(1), 64–75.
- Brechet, Y., & Embury, J. D. (2013). Architected materials: Expanding materials space. *Scripta Materialia*, 68(1), 1–3.
- Breteau, T., Margueray, C., Vollard, L., & Barbe, F. (2015). *Fabrication additive métallique : technologies et opportunités, report*. INSA Rouen.
- Buonamici, F., Volpe, Y., Furferi, R., Carfagni, M., Signorini, G., Goli, G., Governi, L., & Fioravanti, M. (2019). Bamboo's bio-inspired material design through additive manufacturing technologies. *Digital Wood Design*, 809–826.
- Burkhart, M., & Aurich, J. C. (2015). Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle. *Procedia CIRP*, 29, 408–413.
- Byun, H.-S., & Lee, K. H. (2006). Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(1), 69–80.
- Cali, J., Calian, D. A., Amati, C., Kleinberger, R., Steed, A., Kautz, J., & Weyrich, T. (2012). 3D-printing of non-assembly, articulated models. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(6), 130.
- Calignano, F. (2014). Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials and Design*, 64, 203–213.
- Calignano, F. (2018). Investigation of the accuracy and roughness in the laser powder bed fusion process. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(2), 97–104.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Pavese, M., & Fino, P. (2014). Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys. *Procedia CIRP*, 21, 129–132.
- Campatelli, G., Montevecchi, F., Venturini, G., Ingarao, G., & Priarone, P. C. (2019). Integrated WAAM-subtractive versus pure subtractive manufacturing approaches: an energy efficiency comparison. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1–11.
- Campbell, R. I., Jee, H., & Kim, Y. S. (2013). Adding product value through additive manufacturing. *The Design Society*.
- Casarini, C., Tiller, B., Mineo, C., MacLeod, C. N., Windmill, J. F., & Jackson, J. C. (2018). Enhancing the sound absorption of small-scale 3d printed acoustic metamaterials based on helmholtz resonators. *IEEE Sensors Journal*, 18(19), 7949–7955.
- Cavazzuti, M., Baldini, A., Bertocchi, E., Costi, D., Torricelli, E., & Moruzzi, P. (2011). High performance automotive chassis design: A topology optimization based approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 44(1), 45–56.

- Cazacu, R., & Grama, L. (2014). Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structures. *Annals of the University of Oradea*, (3), 17–22.
- Chalvin, M., Campocasso, S., Baizeau, T., & Hugel, V. (2019). Automatic multi-axis path planning for thinwall tubing through robotized wire deposition. *Procedia CIRP*, 79, 89–94.
- Chen, H., & Zhao, Y. F. (2016). Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 527–538.
- Cheng, L., Zhang, P., Biyikli, E., Bai, J., Pilz, S., & To, A. (2015). Integration of topology optimization with efficient design of additive manufactured cellular structures. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1370–1377.
- Choong, Y. Y. C., Saeed, M., Eng, H., & Su, P.-C. (2016). Curing behaviour and characteristics of shape memory polymers by uv based 3D printing. *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016)*, 349–354.
- Chougrani, L., Pernot, J. P., Véron, P., & Abed, S. (2018). Parts internal structure definition using non-uniform patterned lattice optimization for mass reduction in additive manufacturing. *Engineering with Computers*, 35(1), 277–289.
- Christiansen, A. N., Schmidt, R., Bærentzen, J. A., & Bærentzen, J. A. (2015). Automatic balancing of 3D models. *Computer-Aided Design*, 58, 236–247.
- Chu, S., Xiao, M., Gao, L., Li, H., Zhang, J., & Zhang, X. (2019). Topology optimization of multi-material structures with graded interfaces. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 346, 1096–1117.
- Cloots, M., Spierings, A. B. B., & Wegener, K. (2013). Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 131–139.
- Cloots, M., Zumofen, L., Spierings, A. B., Kirchheim, A., & Wegener, K. (2017). Approaches to minimize overhang angles of SLM parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 362–369.
- Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof, A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C., & Limperos, J. W. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*, 1, 64–76.
- Cooper, K., Steele, P., Bo, C., & Chou, K. (2015). Contact-free support structures for part overhangs in powder-bed metal additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 1, 9–20.
- Cosma, C., Cluj- napoca, U. T., Moldovan, C., Cluj- napoca, U. T., Campbell, R. I., & Cosma, A. (2018). Theoretical analysis and practical case studies of powder- powder-based additive manufacturing. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, 61(3).
- Cotteleer, M. J. (2014). 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. *SIMT Additive Manufacturing Symposium*, 23.
- Cuellar, J. S., Smit, G., Plettenburg, D., & Zadpoor, A. (2018). Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. *Additive Manufacturing*, 21, 150–158.
- Cunico, M. W. M., & De Carvalho, J. (2015). Feasibility study of small scale production based on additive manufacturing technologies. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1570–1590.
- Das, P., Chandran, R., Samant, R., & Anand, S. (2015). Optimum part build orientation in additive manufacturing for minimizing part errors and support structures. *Procedia Manufacturing*, 1, 343–354.
- Davoudinejad, A., Perez, L. C. D., Quagliotti, D., Pedersen, D. B., & Albajez, J. A. (2018). Geometrical and feature of size design effect on direct stereolithography micro additively manufactured components. *Procedia Structural Integrity*, 13, 1250–1255.
- De Laurentis, K. J., & Mavroidis, C. (2004). Rapid fabrication of a non- assembly robotic hand with embedded components. *Assembly Automation*, 24(4), 394–405.
- de Lima, C. R., & Paulino, G. H. (2018). Auxetic structure design using compliant mechanisms: A topology optimization approach with polygonal finite elements. *Advances in Engineering Software*, (December), 1–12.
- Delfs, P., Töws, M., & Schmid, H.-J. (2015). Surface roughness optimized alignment of parts for additive manufacturing processes. *Proceedings of the 25th International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1334–1344.
- Delfs, P., Töws, M., & Schmid, H. J. (2016). Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time. *Additive Manufacturing*, 12, 314–320.
- Diegel, O., Singamneni, S., Reay, S., & Withell, A. (2010). *Tools for sustainable product design: additive manufacturing*. 3(3), 68–75.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 545–554.
- Doutre, P. (2015). Conception pour la fabrication additive. *20e Assises Européennes de Fabrication Additive*.
- du Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., Hands, C. H., Kunju, R., & Bhate, D. (2019). Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27(March), 408–427.
- Durakovic, B., & Durakovic, B. (2018). *Design for Additive Manufacturing: Benefits, Trends and Challenges*.

- EDAG_Engineering. (2018). LightHinge+, AM manufactured.
- Emmelmann, C., Petersen, M., Kranz, J., & Wycisk, E. (2011). Bionic lightweight design by laser additive manufacturing (LAM) for aircraft industry. *SPIE Eco-Photonics. International Society for Optics and Photonics*, 80650L-80650L.
- Emmelmann, C., Sander, P., Kranz, J., & Wycisk, E. (2011). Laser additive manufacturing and bionics: Redefining lightweight design. *Physics Procedia*, 12(PART 1), 364–368.
- EOS_GmbH. (2014). *Additive Manufacturing (AM) basic design rules for additive manufacturing*.
- Eschenauer, H. A., & Olhoff, N. (2001). Topology optimization of continuum structures: A review. *Applied Mechanics Reviews*, 54(4), 331.
- Fagade, A. A., & Kazmer, D. (1999). Optimal component consolidation in molded product design. *Design Engineering Technical Conference, Las Vegas*. Nevada.
- Faludi, J., Baumers, M., Maskery, I., & Hague, R. (2017). Environmental impacts of selective laser melting: do printer, powder, or power dominate? *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S144–S156.
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., & Iribarne, M. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 14–33.
- Fayemi, P.-E. (2017). *Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances*. Thèse. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.
- Felber, R. A., Rudolph, N., & Nellis, G. F. (2016). Design and simulation of 3d printed air-cooled heat exchangers. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, 8–10.
- Feng, C., Kanny, T. B. K., & Hue, C. M. (2018). *Review of metal additive manufacturing technologies*. Singapore Polytechnic.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587.
- Ford, S., Despeisse, M., & Viljakainen, A. (2015). Extending product life through additive manufacturing : the sustainability implications. *Global Cleaner Production and Consumption Conference*.
- Fox, J. C., Moylan, S. P., & Lane, B. M. (2016). Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 45, 131–134.
- Frechard, J. (2015). CLAD process to build and repair aeronautic parts. *Assises Européennes de La Fabrication Additive*. Châtenay-Malabry.
- Fu, K., Moreno, D., Yang, M., & Wood, K. L. (2014). Bio-inspired design: An overview investigating open questions from the broader field of design-by-analogy. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 136(11), 111102.
- Galimberti, G., Doubrovski, E. L., Verlinden, J. C., Previtali, B., & Guagliano, M. (2016). Investigating the Links between Process Parameters and Their Influence on the Aesthetic Evaluation of Selective Laser Melted Parts 1. *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2367–2386.
- Galjaard, S., Hofman, S., Perry, N., & Ren, S. (2015). Optimizing structural building elements in metal by using additive manufacturing. *International Association for Shell and Spatial Structures*.
- Galjaard, S., Hofman, S., & Ren, S. (2015). New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. In *Advances in Architectural Geometry 2014* (Springer, pp. 79–93).
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89.
- Garaigordobil, A., Ansola, R., Santamaría, J., & Fernández de Bustos, I. (2018). A new overhang constraint for topology optimization of self-supporting structures in additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(5), 2003–2017.
- Gardan, N., & Schneider, A. (2015). Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 417–425.
- Gaynor, A. T., & Guest, J. K. (2016). Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(5), 1157–1172.
- Gaynor, A. T., Meisel, N. A., Williams, C. B., & Guest, J. K. (2014). Multiple-material topology optimization of compliant mechanisms created via polyjet three-dimensional printing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 061015.
- Gebeshuber, I. C., & Gordon, R. (2011). Bioinspiration for tribological systems on the micro- and nanoscale : dynamic, mechanic, surface and structure related functions. *Micro and Nanosystemse*, 3(4), 271–276.
- Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2017a). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *Materials Science and Engineering Conference Series*, 276(1), 012026.
- Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2017b). Design for manufacturing to design for additive manufacturing: analysis of implications for design optimality and product sustainability. *Procedia Manufacturing*, 13, 724–731.
- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing

- technologies. *Energy Policy*, 74(C), 158–167.
- Geim, A. K., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Novoselov, K. S., Zhukov, A. A., & Shapoval, S. Y. (2003). Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature Materials*, 2(7), 461–463.
- Gibson, I., Goenka, G., Narasimhan, R., & Bhat, N. (2010). Design rules for additive manufacture. *21st Annual International Solid Free Form Fabrication Symposium, Austin, TX*, 705–716.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Additive Manufacturing Technologies. *Springer Science + Business Media, LLC*, 17–40.
- Goelke, M. (2016). 5 ways to rethink optimization.
- Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines. *Materials*, 10(6).
- Gold, S. A., & Turner, B. N. (2015). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), 250–261.
- Greer, C., Nycz, A., Noakes, M., Richardson, B., Post, B., Kurfess, T., & Love, L. (2019). Introduction to the design rules for metal big area additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 159–166.
- Griffiths, C. A., Howarth, J., De Almeida-Rowbotham, G., Rees, A., & Kerton, R. (2016). A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, 139, 74–85.
- Grimmelsmann, N., Meissner, H., & Ehrmann, A. (2016). 3D printed auxetic forms on knitted fabrics for adjustable permeability and mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 137(1), 012011.
- Guo, X., & Cheng, G.-D. (2010). Recent development in structural design and optimization. *Acta Mechanica Sinica*, 26(6), 807–823.
- Hague, R., Campbell, I., & Dickens, P. (2003). Implications on design of rapid manufacturing. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 217 Part C, 25–30.
- Hällgren, S. (2017). *Some aspects on designing for metal Powder Bed Fusion*.
- Hällgren, S., Pejryd, L., & Ekengren, J. (2016). (Re)Design for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 50, 246–251.
- Han, P. (2017). Additive design and manufacturing of jet engine parts. *Engineering*, 3(5), 648–652.
- Harris, I. D. (2017). Development and implementation of metals additive manufacturing. In *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry* (pp. 215–224).
- Hoang, T., Doutre, P., Prudhomme, G., Marin, P., Pourroy, F., & Vignat, F. (2015). Place du prototype dans l'étape d'analyse d'un processus de reconception de pièce pour une fabrication additive. *14ème Colloque National AIP PRIMECA.*, (73), 1–6.
- Hodonou, C., Balazinski, M., Brochu, M., & Mascle, C. (2019). Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(1–4), 1509–1517.
- Hoeren, K. P. J., & Witt, G. (2013). Design-opportunities and limitations on additive manufacturing determined by a suitable test-specimen. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 411, 138–152.
- Hofmann, D. C., Roberts, S., Otis, R., Kolodziejska, J., Dillon, R. P., Suh, J. O., Shapiro, A. A., Liu, Z. K., & Borgonia, J. P. (2014). Developing gradient metal alloys through radial deposition additive manufacturing. *Scientific Reports*, 4.
- Hopkinson, N., & Dicknes, P. (2003). Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production. *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 31–39.
- Hornus, S., Lefebvre, S., Dumas, J., & Claux, F. (2015). Tight printable enclosures for additive manufacturing. *[Research Report] RR-8712, Inria. 2015*, 22.
- Hsu, M.-H., & Hsu, Y.-L. (2005). Interpreting three-dimensional structural topology optimization results. *Computers and Structures*, 83(4–5), 327–337.
- Hu, K., Jin, S., & Wang, C. C. L. (2015). Support slimming for single material based additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 65, 1–10.
- Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., & Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1559–1570.
- Inovar Communications Ltd. (2016). FIT AG: Laying the foundations for high-volume metal Additive Manufacturing. *Magazine for Metal Additive Manufacturing Industry*, 2(3), 49–58.
- Iqbal, T., Wang, L., Li, D., Dong, E., Fan, H., Fu, J., & Hu, C. (2019). A general multi-objective topology optimization methodology developed for customized design of pelvic prostheses. *Medical Engineering and Physics*.
- Ivanova, O. O., Williams, C. C., & Campbell, T. T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyping Journal*, 19(5), 353–364.
- Jared, B. H., Aguilo, M. A., Beghini, L. L., Boyce, B. L., Clark, B. W., Cook, A., Kaehr, B. J., & Robbins, J. (2017). Additive manufacturing: Toward holistic design. *Scripta Materialia*, 135, 141–147.
- Järvinen, J. P., Matilainen, V., Li, X., Piili, H., Salminen, A., Mäkelä, I., & Nyhälä, O. (2014). Characterization of

- effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 56(C), 72–81.
- Jiang, C., Moreau, D., & Doolan, C. (2017). Acoustic absorption of porous materials produced by additive manufacturing with varying geometries. *Proceedings of ACOUSTICS 2017 Perth: Sound, Science and Society - 2017 Annual Conference of the Australian Acoustical Society, AAS 2017*, (1), 1–8.
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). Support structures for additive manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 64.
- Jilich, M., Frascio, M., Avalle, M., & Zoppi, M. (2019). Development of a gripper for garment handling designed for additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 095440621985776.
- Joseph, F. W. (2019). Design for additive manufacturing - a review. *International Journal of Applied Engineering Research ISSN*, 14(14), 16–21.
- Kadkhoda-ahmadi, S., Hassan, A., & Asadollahi-Yazdi, E. (2019). Process and resource selection methodology in design for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–17.
- Kamps, T., Biedermann, M., Seidel, C., & Reinhart, G. (2018). Design approach for additive manufacturing employing Constructal Theory for point-to-circle flows. *Additive Manufacturing*, 20, 111–118.
- Kamps, T., Gralow, M., Schlick, G., & Reinhart, G. (2017). Systematic biomimetic part design for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 65, 259–266.
- Kannan, T. R. (2017). Design for additive manufacturing. *GeometricTech by HCL Technologies*.
- Kantareddy, S. N. R., Roh, B. M., Simpson, T. W., Joshi, S., Dickman, C., & Lehtihet, E. A. (2016). Saving weight with metallic lattice structures: design challenges with a real-world example. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2139–2154.
- Kessler, J., Balc, N., Gebhardt, A., & Abbas, K. (2017). Basic design rules of unit cells for additive manufactured lattice structures. *MATEC Web of Conferences*, 137, 02005.
- Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang, S., An, J., Leong, K. F., & Yeong, W. Y. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 103–122.
- Kim, H., Querin, O. M., & Steven, G. P. (2002). On the development of structural optimization and its relevance in engineering design. *Design Studies*, 23(1), 85–102.
- Kirsch, U. (1990). On singular topologies in optimum structural design. *Structural Optimization*, 2(3), 133–142.
- Klahn, C., Leutenecker-Twelsiek, B., & Meboldt, M. (2014). Design for additive manufacturing - Supporting the substitution of components in series products. *Procedia CIRP*, 21, 138–143.
- Klahn, C., Leutenecker-Twelsiek, B., & Meboldt, M. (2015). Design strategies for the process of additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 36, 230–235.
- Kong, Y. L., Gupta, M. K., Johnson, B. N., & McAlpine, M. C. (2016). 3D printed bionic nanodevices. *Nano Today*, 11(3), 330–350.
- Kranz, J., Herzog, D., & Emmelmann, C. (2015). Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27(S1), S14001.
- Krishna, L. S. R., Mahesh, N., & Sateesh, N. (2017). Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1414–1422.
- Krivec, M., Roshanghias, A., Abram, A., & Binder, A. (2017). Exploiting the combination of 3D polymer printing and inkjet Ag-nanoparticle printing for advanced packaging. *Microelectronic Engineering*, 176, 1–5.
- Kruth, J.-P., Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., & Mercelis, P. (2005). Benchmarking of different SLS / SLM processes as rapid manufacturing techniques. *Laser*, 1, 3D.
- Kumar Bohidar, S., Sharma, R., & Mishra, P. R. (2014). Functionally Graded Materials: A Critical Review. *International Journal of Scientific Footprints*, 2(4), 18–29.
- Kumke, M., Watschke, H., & Vietor, T. (2016). A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(1), 3–19.
- Kuo, Y.-H., Cheng, C.-C., Lin, Y.-S., & San, C.-H. (2017). Support structure design in additive manufacturing based on topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, (168).
- Labonnote, N., R?nnquist, A., Manum, B., & R?ther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366.
- Lariviere, V., Deltombe, R., Montagne, A., Vansteenkiste, G., & Bigerelle, M. (2017). Homogénéité des surfaces de pièces obtenues par Fabrication Additive. *23ème Congrès Français de Mécanique*.
- Laverne, F., Segonds, F., Anwer, N., & Le Coq, M. (2015). Assembly based methods to support product innovation in design for additive manufacturing: an exploratory case study. *Journal of Mechanical Design*, 137(12), 121701.
- Laverne, F., Segonds, F., D'Antonio A., G., & Le Coq, Marc. (2017). Enriching design with X through tailored additive manufacturing knowledge: a methodological proposal. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 11(2), 279–288.
- Le Bourhis, F. (2014). *Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière. Application à la projection de poudres métalliques*.
- Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Dembinski, L., Hascoet, J.-Y., & Mognol, P. (2014). Predictive model for

- environmental assessment in additive manufacturing process. *Procedia CIRP*, 15, 26–31.
- Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Hascoet, J.-Y., & Mognol, P. (2013). Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9–12), 1927–1939.
- Le Néel, T. A., Mognol, P., & Hascoët, J.-Y. (2018). Design for additive manufacturing : multi material sand mold. *Rapid & TCT*.
- Leary, M., Mazur, M., Elambasseril, J., McMillan, M., Chirent, T., Sun, Y., Qian, M., Easton, M., & Brandt, M. (2016). Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design*, 98, 344–357.
- Leary, M., Merli, L., Torti, F., Mazur, M., & Brandt, M. (2014). Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. *Materials and Design*, 63, 678–690.
- Leutenecker-Twelsiek, B., Klahn, C., & Meboldt, M. (2016a). Considering part orientation in design for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 50, 408–413.
- Leutenecker-Twelsiek, B., Klahn, C., & Meboldt, M. (2016b). Designing a power tool to show the potentials of additive manufacturing - effects of additive manufacturing on the product development process. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1900–1909.
- Leutenecker, B., Ferchow, J., Klahn, C., & Meboldt, M. (2017). The experience transfer model for new technologies - application on design for additive manufacturing. In C. Springer (Ed.), *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications* (pp. 337–346).
- Li, L., Liu, J., Ma, Y., Ahmad, R., & Qureshi, A. (2019). Multi-view feature modeling for design-for-additive manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 144–156.
- Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., Shi, G., & Blackburn, J. (2018). Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, 35(2), 242–269.
- Li, Y., & Chen, Y. (2017). Physical rigging for physical models and posable joint designs based on additive manufacturing technology. *Procedia Manufacturing*, 11, 2235–2242.
- Li, Z., Zhang, D. Z., Dong, P., Kucukkoc, I., & Peikang, B. (2018). Incorporating draw constraint in the lightweight and self-supporting optimisation process for selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1–4), 405–412.
- Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevecchi, F., Venturini, G., Durante, M., Boccarusso, L., Minutolo, F. M. C., & Squillace, A. (2017). Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 62, 470–474.
- Lieneke, T., Adam, G. A. O., Leuders, S., Knoop, F., Josupeit, S., Delfs, P., Funke, N., & Zimmer, D. (2015). Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. *26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin*.
- Lieneke, T., Denzer, V., Adam, G. A. O., & Zimmer, D. (2016). Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP*, 43, 286291.
- Lindemann, C., Reiher, T., Jahnke, U., & Koch, R. (2015). Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 216–227.
- Lindwall, A., Dordlofva, C., & Öhrwall Rönnbäck, A. (2017). Additive manufacturing & the product development process: Insights from the space industry. *21st International Conference on Engineering Design, ICED 2017*, 5(DS87-5), 345–354.
- Liu, K., & Jiang, L. (2011). Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*, 6(2), 155–175.
- Liu, Y., Zhang, J., Yang, Y., Li, J., & Chen, J. (2017). Study on the influence of process parameters on the clearance feature in non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, 98–107.
- Lockett, H., Ding, J., Williams, S., & Martina, F. (2017). Design for Wire + Arc Additive Manufacture: design rules and build orientation selection. *Journal of Engineering Design*, 4828, 1–31.
- Loh, G. H., Pei, E., Harrison, D., & Monzón, M. D. (2018). An overview of functionally graded additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, 34–44.
- Lu, Z., Wang, Q., Li, X., & Yang, Z. (2017). Elastic properties of two novel auxetic 3D cellular structures. *International Journal of Solids and Structures*, 124, 46–56.
- Luo, Z., Yang, J., & Chen, L. (2006). A new procedure for aerodynamic missile designs using topological optimization approach of continuum structures. *Aerospace Science and Technology*, 10(5), 364–373.
- Maier, M., Siegel, D., Thoben, K. D., Niebuhr, N., & Hamm, C. (2013). Transfer of natural micro structures to bionic lightweight design proposals. *Journal of Bionic Engineering*, 10(4), 469–478.
- Mançanares, C. G., de S. Zancul, E., Cavalcante da Silva, J., & Cauchick Miguel, P. A. (2015). Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5–8), 1007–1014.
- Martínez, J., Dumas, J., Lefebvre, S., & Wei, L.-Y. (2015). Structure and appearance optimization for controllable shape design. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 34(6), 229.
- Mashhadi, A. R., & Behdad, S. (2017). Measuring the complexity of additive manufacturing supply chains. *ASME*

- 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2017 Collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing, 2, 1–10.
- Mbow, M. M., Vignat, F., Marin, P. R., & Perry, N. (2019). Calcul d'orientation en fabrication additive métallique sur lit de poudre. *16ème Colloque National S-Mart*.
- Medellin-Castillo, H. I., & Zaragoza-Siqueiros, J. (2019). Design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 32(1), 53.
- Meisel, N. A. (2015). *Design for additive manufacturing considerations for self-actuating compliant mechanisms created via multi-material polyjet 3D printing*. Thèse. Virginia Polytechnic Institute.
- Mejri, S. (2016). *Identification et modélisation du comportement dynamique des robots d'usinage* (Thèse. Université BLAISE PASCAL- Clermont II). Thèse. Université BLAISE PASCAL- Clermont II.
- Micheletti, S., Perotto, S., & Soli, L. (2019). Topology optimization driven by anisotropic mesh adaptation: Towards a free-form design. *Computers and Structures*, 214, 60–72.
- Molcho, G., Cristal, A., & Shpitalni, M. (2014). Part cost estimation at early design phase. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(1), 153–156.
- Morretton, E., Vignat, F., Pourroy, F., & Marin, P. (2017). Optimisation topologique : l'impact des choix du concepteur sur la géométrie obtenue. *15e Colloque National AIP-Priméca*.
- Morretton, E., Vignat, F., Pourroy, F., & Marin, P. (2019). Impacts of the settings in a design for additive manufacturing process based on topological optimization. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(1), 295–308.
- Müller, J., Grabowski, M., Müller, C., Hensel, J., Unglaub, J., Thiele, K., Kloft, H., & Dilger, K. (2019). Design and Parameter Identification of Wire and Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars for Use in Construction. *Metals*, 9(7), 725.
- Muller, P. (2013). *Fabrication additive de pièces multimatériaux*. Mechanical engineering. Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- Mumtaz, K. A., & Hopkinson, N. (2010). Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2), 279–287.
- Munk, D. J., Auld, D. J., Steven, G. P., & Vio, G. A. (2019). On the benefits of applying topology optimization to structural design of aircraft components. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60(3), 1245–1266.
- Nanoscribe. (2017). *Spectrum of applications. Innovative solutions for microfabrication on the nano-, micro- and mesoscale*. <https://www.nanoscribe.de/>.
- Neofab. (2018). *Éléments clés à prendre en compte pour l'impression 3D*. www.neofab.fr.
- Neofab. (2019). *Design Guide Metal X*. www.neofab.fr.
- Niaki, M. K., Torabi, S. A., & Nonino, F. (2019). Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 222, 381–392.
- Noh, K. S., Seo, H. W., & Lee, Y. G. (2016). 3D printing structures that exhibit torsions. *Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing, Part F1290*, 501–506.
- Nyamekye, P., Leino, M., Piili, H., & Salminen, A. (2015). Overview of sustainability studies of CNC machining and LAM of stainless steel. *Physics Procedia*, 78(August), 367–376.
- Oh, Y., & Behdad, S. (2016). Assembly based part design to improve the additive manufacturing productivity : process time, cost and surface roughness. *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.*, V004T05A015-V004T05A015. American Society of Mechanical Engineers.
- Orquéra, M., Campocasso, S., & Millet, D. (2017). Design for additive manufacturing method for a mechanical system downsizing. *Procedia CIRP*, 60, 223–228.
- Orquéra, M., Campocasso, S., & Millet, D. (2019). Some principles to optimise an additively manufactured multi-component product. *Journal of Engineering Design*, DOI: 10.1080/09544828.2019.1699034.
- Ou, J., Ma, Z., Peters, J., Dai, S., Vlavianos, N., & Ishii, H. (2018). KinetiX - designing auxetic-inspired deformable material structures. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 75, 72–81.
- Ovsianikov, A., Viertl, J., Chichkov, B., Oubaha, M., MacCraith, B., Sakellari, I., Giakoumaki, A., Gray, D., Vamvakaki, M., Farsari, M., & Fotakis, C. (2008). Ultra-low shrinkage hybrid photosensitive material for two-photon polymerization microfabrication. *ACS Nano*, 2(11), 2257–2262.
- Pandey, P. M., Reddy, N. V., & Dhande, S. G. (2007). Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1), 125–131.
- Park, J., & Sutradhar, A. (2015). A multi-resolution method for 3D multi-material topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 285, 571–586.
- Patterson, A. E., Messimer, S. L., & Farrington, P. A. (2017). Overhanging features and the SLM / DMLS residual stresses problem : review and future research need. *Review and Future Research Need. Technologies*, 5(2), 15.
- Peko, I., Bajić, D., & Veza, I. (2015). Selection of additive manufacturing process using the AHP method. *International Conference Mechanical Technologies and Structural Materials*, 119–129. Split.
- Perez, K. B., Anderson, D. S., & Wood, K. L. (2015). Crowdsourced design principles for leveraging the capabilities of additive manufacturing. *International Conference of Engineering Design*, 1–10.

- Petit, D., & Maillet, D. (2008). Techniques inverses et estimation de paramètres. Partie 1. *Techniques de l'ingénieur*, 33, 1–18.
- Pinna, C., Ramundo, L., Sisca, F. G., Angioletti, C. M., Taisch, M., & Terzi, S. (2016). Additive manufacturing applications within food industry : an actual overview and future opportunities. *Scopus*, 6.
- PIPAME. (2017a). *Futur de la fabrication additive, Synthèse*. Pole Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations.
- PIPAME. (2017b). *Prospective de la fabrication additive, Études économiques*. Pole Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations.
- Ponche, R. (2013). *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres* (Thèse. Ecole Centrale de Nantes). Thèse. Ecole Centrale de Nantes.
- Ponginan, R. (2015). *Practical aspects of structural optimization: A Study Guide* (2nd ed. E-; Altair University, Ed.).
- Porter, M. M., Ravikumar, N., Barthelat, F., & Martini, R. (2016). 3D-printing and mechanics of bio-inspired articulated and multi-material structures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*.
- Posser, T., & Freitas de Oliveira, B. (2019). Design for additive manufacturing applied for mass reduction of a two-stroke engine cylinder for portable machine. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1–9.
- Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2019). Design for additive manufacturing with case studies on aircrafts and propulsion systems. *The 21st Edition of the International Conference AFASES 2019, Scientific Research and Education in the Air Force*.
- Poyraz, O., Yasa, E., Akbulut, G., Orhangül, A., & Pilatin, S. (2015). Investigation of support structures for direct metal laser sintering (DMLS) of IN625 parts. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium*, 560–574.
- Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R., & Moultrie, J. (2018). A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design. *Journal of Engineering Design*, 29(6), 291–326.
- Prem, A., Bastien, C., & Dickison, M. (2015). Multidisciplinary design optimisation strategies for lightweight vehicle structures. *10th European LS-DYNA Conference*, (June 2015).
- Prévost, R., Whiting, E., Lefebvre, S., & Sorkine-Hornung, O. (2013). Make it stand. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4), 81.
- Primo, T., Calabrese, M., Del Prete, A., & Anglani, A. (2017). Additive manufacturing integration with topology optimization methodology for innovative product design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1–4), 467–479.
- Reap, J., Baumeister, D., & Bras, B. (2005). Holism, biomimicry and sustainable engineering. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 423–431. American Society of Mechanical Engineers.
- Reeves, P. (2009). Additive manufacturing – A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability. *7th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies*.
- Reiner, T., & Lefebvre, S. (2016). Interactive modeling of support-free shapes for fabrication. *EURO-GRAPHICS*. Lisbonne, Portugal.
- Ren, S., & Galjaard, S. (2015). Topology optimisation for steel structural design with additive manufacturing. In *Modelling Behaviour* (pp. 35–44). Springer Cham.
- Renjith, S. (2018). *A design framework for additive manufacturing based on the integration of axiomatic design approach, inverse problem-solving and an additive manufacturing database*.
- Renjith, S. C., & Park, K. (2018). A design framework for additive manufacturing through the synergistic use of axiomatic design theory and triz. *Proceedings of the 2018 IISE Annual Conference*, 1126.
- Rias, A.-L., Bouchard, C., Segonds, F., Vayre, B., & Abed, S. (2017). Design for additive manufacturing: supporting intrinsic-motivated creativity. *Emotional Engineering*, 5(February), 99–116.
- Richter, T., Watschke, H., Schumacher, F., Vietor, T., Watschke, H., & Vietor, T. (2018). Exploitation of potentials of additive manufacturing in ideation workshops. *DS 89: Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC 2018), University of Bath, Bath, UK. 2018*, (February), 354–361.
- Rodrigue, H., & Rivette, M. (2010). An assembly-level design for additive manufacturing methodology. *IDMME - Virtual Concept*, 1–9.
- Rosen, D. W. (2007). Design for additive manufacturing: a method to explore unexplored regions of the design space. *18th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, 402–415.
- Rozvany, G. I. N., Zhou, M., & Birker, T. (1992). Generalized shape optimization without homogenization. *Structural Optimization*, 4(3–4), 250–252.
- Rui, Y., Subic, A., Takla, M., Wang, C., Niehoff, A., Hamann, N., & Brueggemann, G. P. (2013). Biomimetic design of lightweight vehicle structures based on animal bone properties. *Advanced Materials Research*, 633, 3–14.
- Rumpf, R. C. R., Pazos, J., Garcia, C. R., Ochoa, L., & Wicker, R. (2013). 3d printed lattices with spatially variant self-collimation. *Progress In Electromagnetics Research*, 139(2 April), 1–14.
- Ruszaj, A. (2016). Some aspects of bioinspirations in energy production and consumptions. *Procedia Engineering*,

- Saadlaoui, Y., Milan, J. L., Rossi, J. M., & Chabrand, P. (2017). Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. *Journal of Manufacturing Systems*, *43*, 178–186.
- Salmi, A., Calignano, F., Galati, M., & Atzeni, E. (2018). An integrated design methodology for components produced by laser powder bed fusion (L-PBF) process. *Virtual and Physical Prototyping*, *13*(3), 191–202.
- Salonitis, K. (2016). Design for additive manufacturing based on the axiomatic design method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *87*(1), 989–996.
- Sanders, E. D., Aguiló, M. A., & Paulino, G. H. (2018). Multi-material continuum topology optimization with arbitrary volume and mass constraints. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *340*, 798–823.
- Saunders, M. (2017a). Design for metal AM - a beginner's guide. *Renishaw*.
- Saunders, M. (2017b). Is topological optimisation really optimal? *Renishaw*.
- Schmelzle, J., Kline, E. V., Dickman, C. J., Reutzel, E. W., Jones, G., & Simpson, T. W. (2015). (Re)Designing for part consolidation: understanding the challenges of metal additive manufacturing. *ASME Journal of Mechanical Design*, *137*(11), 111404.
- Schmidt, V., & Belegatis, M. R. (2013). *Laser Technology in Biomimetics*.
- Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., ... Pedro Mortágua, J. (2016). Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components. *Procedia Structural Integrity*, *1*, 289–296.
- Sells, E., & Bowyer, A. (2013). *Design for FDM rapid prototyping manufacture (basic)*. Manual. University of Bath.
- Sigmund, O., & Petersson, J. (1998). Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. *Structural Optimization*, *16*(1), 68–75.
- Sing, S. L., An, J., Yeong, W. Y., & Wiria, F. E. (2016). Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopaedic Research*, *34*(3), 369–385.
- Sisca, F. G., Angioletti, C. M., Taisch, M., & Colwill, J. A. (2016). Additive manufacturing as a strategic tool for industrial competition. *2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow, RTSI 2016*.
- Smardzewski, J., Kłos, R., & Fabisiak, B. (2013). Design of small auxetic springs for furniture. *Materials and Design*, *51*, 723–728.
- Snyder, J. C., Stimpson, C. K., Thole, K. A., & Mongillo, D. (2016). Build direction effects on additively manufactured channels. *Journal of Turbomachinery*, *138*(5), 051006.
- Sossou, G., Demoly, F., Montavon, G., & Gomes, S. (2018). An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies. *Journal of Computational Design and Engineering*, *5*(1), 3–18.
- Sreenivasan, R., & Bourell, D. L. (2009). Sustainability study in selective laser sintering – an energy perspective. *Minerals, Metals and Materials Society/AIME*, 257–265.
- Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2013a). A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *66*(9–12), 1247–1254.
- Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2013b). Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, *213*(4), 589–597.
- Stratasys Ltd. (2018). *Design Considerations for FDM Additive Manufacturing Tooling Introduction and Background*. 1–13.
- Su, X., Yang, Y., Xiao, D., & Chen, Y. (2013). Processability investigation of non-assembly mechanisms for powder bed fusion process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *64*(5–8), 1193–1200.
- Sun, C. N., Choy, S. Y., Leong, K. F., & Wei, J. (2016). Design and fabrication of functionally graded components by selective laser melting. *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Tang, L., Wu, C., Zhang, Z., Shang, J., & Yan, C. (2016). A lightweight structure redesign method based on selective laser melting. *Metals*, *6*(11).
- Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2014). Design method for lattice-skin structure fabricated by additive manufacturing. *ASME. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 2B, V02BT02A030*. Montreal, Quebec, Canada.
- Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2016). A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal*, *22*(3), 569–590.
- Teoh, J. E. M., Chua, C. K., Liu, Y., An, J., & Li, Y. (2016). Preliminary investigation of 4d printing technology for deployable UAV development. *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016)*, 288–293.
- Thomas, D. (2012). *The development of design rules for selective laser melting* (Thèse. University of Wales

- Institute, Cardiff). Thèse. University of Wales Institute, Cardiff.
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *65*, 737–760.
- Thrimurthulu, K., Pandey, P. M., & Reddy, N. V. (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *44*(6), 585–594.
- Tomlin, M., & Meyer, J. (2011). Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. *Proceeding of the 7th Altair CAE Technology Conference*, 1–9.
- Townsend, A., Senin, N., Blunt, L., Leach, R. K., & Taylor, J. S. (2016). Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precision Engineering*, *46*, 34–47.
- Tsakiris, A., Salpistis, C., & Mihailidis, A. (2018). Design right once for additive manufacturing. *MATEC Web of Conferences*, *03020*, 1–8.
- Ulu, E., Huang, R., Kara, L. B., & Whitefoot, K. S. (2018). Concurrent structure and process optimization for minimum cost metal additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, *141*(6), 061701.
- uz Zaman, U. K., Siadat, A., Rivette, M., Baqai, A. A., & Qiao, L. (2017). Integrated product-process design to suggest appropriate manufacturing technology: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *91*(1–4), 1409–1430.
- Vaezi, M., Chianrabutra, S., Mellor, B., & Yang, S. (2013). Multiple material additive manufacturing - Part 1: A review: This review paper covers a decade of research on multiple material additive manufacturing technologies which can produce complex geometry parts with different materials. *Virtual and Physical Prototyping*, *8*(1), 19–50.
- Vaezi, M., Seitz, H., & Yang, S. (2013). A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *67*(5–8), 1721–1754.
- Vaithilingam, J., Laoboonmee, K., Saleh, E., Hague, R., Wildman, R. D., & Tuck, C. J. (2016). Optimisation of substrate angles for three dimensional inkjet printing of multi-functional and multi-material parts. *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, (August).
- Vandenbroucke, B., & Kruth, J.-P. (2006). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, *13*(4), 196–203.
- Vaneker, T. H. J. (2017). The role of design for additive manufacturing in the successful economical introduction of AM. *Procedia CIRP*, *60*, 181–186.
- Vayre, B. (2014). *Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM*. Thèse. Université de Grenoble.
- Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., & Campatelli, G. (2016). Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features. *Procedia CIRP*, *55*, 95–100.
- Vicente, M. F., Canyada, M., & Conejero, A. (2015). Identifying limitations for design for manufacturing with desktop FFF 3D printers. *International Journal of Rapid Manufacturing*, *5*(1), 116.
- Vo, T. H., Museau, M., Vignat, F., Villeneuve, F., Ledoux, Y., & Ballu, A. (2018). Typology of geometrical defects in Electron Beam Melting. *Procedia CIRP*, *75*, 92–97.
- Vogiatzis, P., Chen, S., Wang, X., Li, T., & Wang, L. (2017). Topology optimization of multi-material negative Poisson's ratio metamaterials using a reconciled level set method. *CAD Computer Aided Design*, *83*, 15–32.
- Vyatskikh, A., Delalanted, S., Kudo, A., Zhang, X., Portela, C. M., & Greer, J. R. (2018). Additive manufacturing of 3D nano-architected metals. *Nature Communications*, *9*(1), 593.
- Walachowicz, F., Bernsdorf, I., Papenfuss, U., Zeller, C., Graichen, A., Navrosky, V., Rajvanshi, N., & Kiener, C. (2017). Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing. *Journal of Industrial Ecology*, *21*(S1), S203–S215.
- Walton, D., & Moztarzadeh, H. (2017). Design and development of an additive manufactured component by topology optimisation. *Procedia CIRP*, *60*, 205–210.
- Wang, D., Wang, Y., Yang, Y., Lu, J., Xu, Z., Li, S., Lin, K., & Zhang, D. (2019). Research on design optimization and manufacturing of coating pipes for automobile seal based on selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, *273*, 116227.
- Wang, K., Chang, Y. H., Chen, Y. W., Zhang, C., & Wang, B. (2015). Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing. *Materials and Design*, *67*, 159–164.
- Wang, M. Y., & Wang, X. (2004). “Color” level sets: A multi-phase method for structural topology optimization with multiple materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *193*(6–8), 469–496.
- Wang, X. T., Li, X. W., & Ma, L. (2016). Interlocking assembled 3D auxetic cellular structures. *Materials and Design*, *99*, 467–476.
- Weis, P., Großmann, A., Clemen, C., & Mittelstedt, C. (2019). Optimization and re-design of a metallic riveting tool for selective laser melting – A case study. *Additive Manufacturing*, *31*, 100892.
- Wildman, R. A., & Gaynor, A. T. (2017). Topology optimization for reducing additive manufacturing processing distortions. *Weapons and Materials Research Directorate, US Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground United States*, (n° ARL-TR-8242).

- Wits, W. W., García, J. R. R., & Becker, J. M. J. (2016). How additive manufacturing enables more sustainable end-user maintenance, repair and overhaul (MRO) strategies. *Procedia CIRP*, 40, 693–698.
- Wu, W., Hu, W., Qian, G., Liao, H., Xu, X., & Berto, F. (2019). Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. *Materials & Design*, 180(June), 107950.
- Xiao, Z., Yang, Y., Wang, D., Song, C., & Bai, Y. (2018). Structural optimization design for antenna bracket manufactured by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 539–547.
- Xie, Y., & Chen, X. (2017). Support-free interior carving for 3D printing. *Visual Informatics*, 1(1), 9–15.
- Yang, L., Harrysson, O. L. A., Cormier, D., West, H., Zhang, S., Gong, H., & Stucker, B. (2016). Design for additively manufactured lightweight structure: a perspective. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International*.
- Yang, Li, Harrysson, O., West, H., & Cormier, D. (2015). Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and Structures*, 69–70, 475–490.
- Yang, S., Min, W., Ghibaud, J., & Zhao, Y. F. (2019). Understanding the sustainability potential of part consolidation design supported by additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 232, 722–738.
- Yang, S., Santoro, F., & Zhao, Y. F. (2018). Towards a numerical approach of finding candidates for additive manufacturing-enabled part consolidation. *Journal of Mechanical Design*, 140(4), 041701.
- Yang, S., Talekar, T., Sulthan, M. A., & Zhao, Y. F. (2017). A generic sustainability assessment model towards consolidated parts fabricated by additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 10, 831–844.
- Yang, S., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2015). A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 444–449.
- Yang, S., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2016). Assembly-level design for additive manufacturing: issues and benchmark. *Volume 2A: 42nd Design Automation Conference*, (June), V02AT03A028.
- Yang, S., & Zhao, Y. F. (2016). Conceptual design for assembly in the context of additive manufacturing. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International*, 1932–1944.
- Yilmaz, O., & Ugla, A. A. (2016). Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(10), 1781–1798.
- Yosofi, M. (2018). *Méthodologie de caractérisation prédictive des procédés de fabrication additive avec une approche technique, économique et environnementale*. Thèse. École centrale de Nantes.
- Yuan, S., Shen, F., Bai, J., Chua, C. K., Wei, J., & Zhou, K. (2017). 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization. *Materials and Design*, 120, 317–327.
- Zakaria, M. H. (2017). Fabrication of aluminium internally cooled cutting tool by means of selective laser melting (SLM). *Journal of Mechanical Engineering*, 3(1), 187–200.
- Zegard, T., & Paulino, G. H. (2016). Bridging topology optimization and additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(1), 175–192.
- Zeng, K. (2015). *Optimization of support structures for selective laser melting*. Thèse. University of Louisville.
- Zhang, B., Goel, A., Ghalsasi, O., & Anand, S. (2019). CAD-based design and pre-processing tools for additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 1–15.
- Zhang, Y., Xu, Y., & Bernard, A. (2014). A new decision support method for the selection of RP process: knowledge value measuring. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(8), 747–758.
- Zhao, L., Ma, J., Wang, T., & Xing, D. (2010). Lightweight design of mechanical structures based on structural bionic methodology. *Journal of Bionic Engineering*, 7(4), S224–S231.
- Zhou, M., Pagalapati, N., Thomas, H. L., & Shyy, Y. K. (2004). An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(5), 308–317.
- Zhou, M., & Rozvany, G. I. N. (1991). The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89(1–3), 309–336.
- Ziegler, T., Jaeger, R., & Koplín, C. (2017). A design, mechanical rating, and load adaptation method for cellular components for additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9–12), 2875–2884.
- Zwier, M. P., & Wits, W. W. (2016). Design for additive manufacturing: automated build orientation selection and optimization. *Procedia CIRP*, 55, 128–133.

VII. Annexes

VII.1.	Comportement mécanique de l'étude de cas « Poignet de robot » _____	170
VII.2.	Etude de cas « Moteur à air » _____	171
VII.2.1.	Compléments sur les étapes de conception _____	171
VII.2.2.	Les protocoles d'essais sur le moteur à air _____	178
VII.2.3.	Caractérisation de la machine Connex Objet 350 de Stratasys _____	181

VII.1. Comportement mécanique de l'étude de cas « Poignet de robot »

Dans cette section, les équations utilisées pour l'étude de cas sont détaillées. Comme expliqué précédemment, le modèle mathématique utilisé est proposé par (Bône et al., 1984). Tij et Fij représentent respectivement le couple et la force appliqués entre les parties i et j. Ip (L, m) représente l'inertie de la partie p au point L autour de l'axe m

Équation 17

$$(\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = \alpha$$

Équation 18

$$(\vec{z}_0, \vec{z}_2) = (\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \beta$$

Équation 19

$$(\vec{x}_2, \vec{x}_3) = (\vec{y}_1, \vec{y}_3) = \gamma$$

Équation 20

$$T_{01} = \frac{d}{dt} \left[\{I_{1(O, \vec{z}_0)} + (I_{2(H, \vec{x}_2)} + I_{3(G, \vec{x}_3)}) \cdot \sin^2 \beta + (I_{2(H, \vec{z}_2)} + I_{3(G, \vec{z}_2)}) \cdot \cos^2 \beta + m_2 \cdot h^2 + m_3 \cdot (h + r \cdot \sin \beta)^2\} \cdot \dot{\alpha} + I_{3(G, \vec{z}_2)} \cdot \dot{\gamma} \cdot \cos \beta \right]$$

Équation 21

$$T_{12} = (I_{2(H, \vec{y}_2)} + I_{3(G, \vec{x}_3)} + m_3 \cdot r^2) \cdot \ddot{\beta} + \{(I_{2(H, \vec{z}_2)} + I_{3(G, \vec{z}_2)} - I_{2(H, \vec{x}_2)} - I_{3(G, \vec{x}_3)}) \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \beta + I_{3(G, \vec{z}_2)} \cdot \dot{\gamma}\} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin \beta - m_3 \cdot r \cdot [(h + r \cdot \sin \beta) \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \cos \beta + g \cdot \sin \beta]$$

Équation 22

$$T_{23} = \frac{d}{dt} [I_{3(G, \vec{z}_2)} \cdot (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \cdot \cos \beta)]$$

Équation 23

$$F_{23} = m_3 \cdot [g \cdot \cos \beta - r \cdot \dot{\beta}^2 - (h + r \cdot \sin \beta) \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin \beta]$$

Équation 24

$$F_{21} = (\ddot{\alpha} \cdot t)^2 \cdot h \cdot \left(\frac{3 \cdot m_2}{2} + 2 \cdot m_3 \right)$$

Équation 25

$$\overrightarrow{OH} = h \cdot \vec{x}_1 \overrightarrow{HG} = r \cdot \vec{z}_2$$

h et r sont constants.

VII.2. Etude de cas « Moteur à air »

VII.2.1. Compléments sur les étapes de conception

VII.2.1.1. Etape 1 : Spécifications

☞ Analyse fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle du moteur à air permet d'établir la liste des fonctions principale et de contraintes. Lors du fonctionnement du moteur, il faut distinguer le démarrage puis la phase de vie pendant son fonctionnement. Cette dernière phase (voir Figure 109) est détaillée ci-dessous.

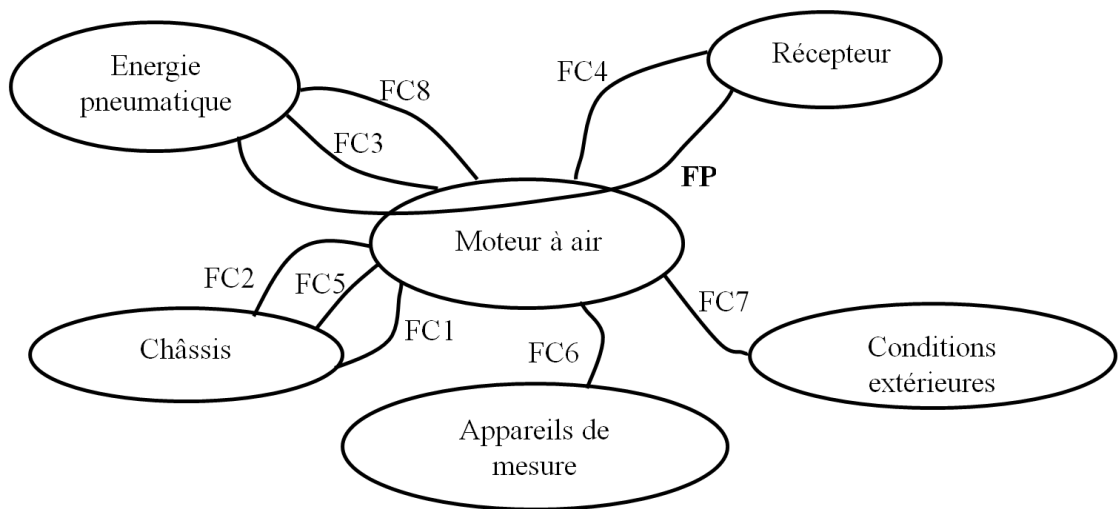


Figure 109. Analyse fonctionnelle lors de la phase d'utilisation du « moteur à air »

Détail des fonctions :

FP : Transformer l'énergie pneumatique en énergie mécanique de rotation

FC1 : Le moteur doit être peu encombrant

FC2 : Le moteur doit être léger

FC3 : Le moteur doit s'adapter à la source énergétique

FC4 : Le moteur doit s'adapter au récepteur

FC5 : Le moteur doit s'adapter au châssis

FC6 : Le moteur doit permettre de recevoir des appareils de mesure

FC7 : Le moteur doit résister aux conditions extérieures

FC8 : Le moteur doit avoir une consommation réduite

Tableau 35. Extrait du tableau des spécificités

Fonctions	Critères	Niveau	Flexibilité
FP	Transformer l'énergie pneumatique en énergie mécanique de rotation	Débit entrée Pression entrée Puissance de sortie	0<Débit<2 L/s 0.5<Pression<4 bar Pression usuelle : 2 bar 60 mW mini +/-20% +/-25% +/-30%
FC1	Etre le moins encombrant possible	Volume	76 cm ³ max Largeur 40 mm max Hauteur 120 mm max +/-20%
FC2	Etre le plus léger possible	Masse	175 g maxi aucune
...			
FC8	Avoir une consommation réduite	Volume/seconde	260 cm ³ /s maxi +10%

☞ Schéma cinématique et loi d'entrée-sortie

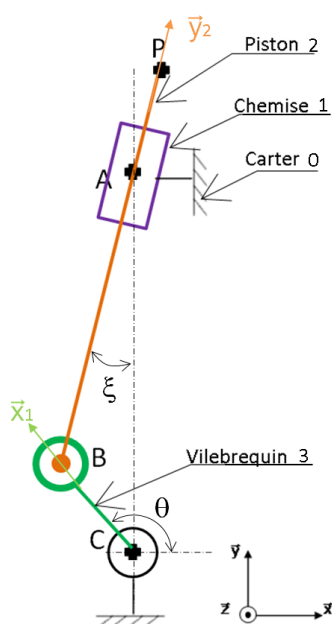


Figure 110. Schéma cinématique et paramétrage du cas d'étude « moteur à air »

Le repère $R_1=(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z})$ est obtenu par la rotation du repère $R=(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ autour de \vec{z} d'un angle θ . Le repère $R_2=(O, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z})$ est obtenu par la rotation du repère $R=(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ autour de \vec{z} d'un angle ξ .

A partir de ce schéma cinématique paramétré de la Figure 110, la loi d'entrée-sortie peut être déterminée telle que :

Équation 26

$$\lambda = l - \sqrt{E^2 + e^2 - 2.E.e.\sin(\theta)}$$

Avec

$\vec{AC} = -E.\vec{y}_0$ où E est une constante qui correspond à l'entraxe entre l'axe de rotation de la chemise 3 et l'axe de rotation du vilebrequin 1

$\vec{CB} = e.\vec{x}_1$ où e est la valeur constante de l'excentricité (ou la demi course)

$\vec{BP} = l.\vec{y}_2$ où l étant la longueur de la bielle. l est une constante

$\vec{PA} = -\lambda.\vec{y}_2$ où λ est une variable

☞ Comportement mécanique

Le comportement dynamique du moteur doit être établi et servira notamment pour l'optimisation TOMS. L'Équation 27 montre la relation entre le couple de sortie du moteur à air et les paramètres de ce dernier. Les hypothèses de solides parfaits et de liaisons parfaites ont permis d'établir cette équation.

Équation 27

$$C_s = -I_{3z} \cdot \ddot{\theta} - e \cdot [X_{23} \cdot \sin(\theta - \xi) + Y_{23} \cdot \cos(\theta - \xi)]$$

Avec :

C_s : Couple de sortie du moteur à air,

I_{3z} : moment d'inertie du vilebrequin,

$\ddot{\theta}$: accélération angulaire du vilebrequin,

X_{23} : Effort sur x du piston 2 sur le vilebrequin 3,

Y_{23} : Effort sur y du piston 2 sur le vilebrequin 3.

☞ Composants externes

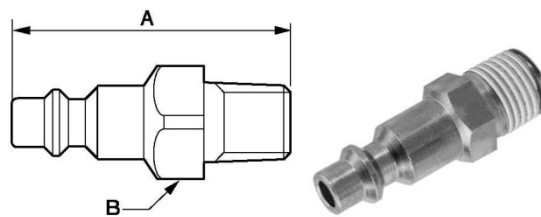


Figure 111. Connectique d'admission pneumatique. Etude de cas « moteur à air »



Figure 112. Insert taraudé. Etude de cas « moteur à air »

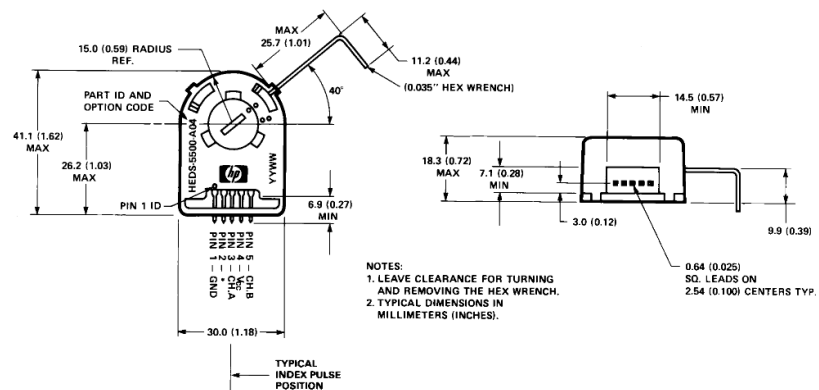


Figure 113. Encodeur optique. Etude de cas « moteur à air »

☞ Analyse fonctionnelle interne (extrait)

Les phases de vie étudiées sont les suivantes :

- Assemblage.

Le moteur sera fixé sur l'établi par 4 vis FS M3. Les taraudages seront effectués à la main.

L'encodeur sera mis en position grâce à 2 pions de centrage et maintenu soit par des vis soit par un cache sur le carter.

Le moteur sera fixé sur un bâti à l'aide de 4 vis CS M3. Tous les taraudages seront réalisés à la main à l'aide d'outils taraud.

Le taraudage $\frac{3}{4}$ recevant la connectique d'admission d'air, sera réalisé à la main à l'aide d'un taraud.

Seuls les coussinets ont des contraintes de montage car ils seront montés serrés.

- Fonctionnement.

- Démarrage.

Le système étant irréversible, il faut que le mécanisme puisse être placé à la main en position de démarrage.

VII.2.1.2. Etape 2 : Optimisations

☞ Optimisation architecturale du moteur à air : détails de contraintes géométriques pour le placement des liaisons

Le schéma cinématique plan de la Figure 114 montre le moteur en position point mort haut et point mort bas. Sur ces schémas sont tracées les chaînes de cotes permettant d'établir les relations entre les différentes dimensions et la position du ciel du piston (point P) par rapport au centre de rotation de la chemise oscillante (point A).

Les chaînes de cotes permettent d'obtenir les équations

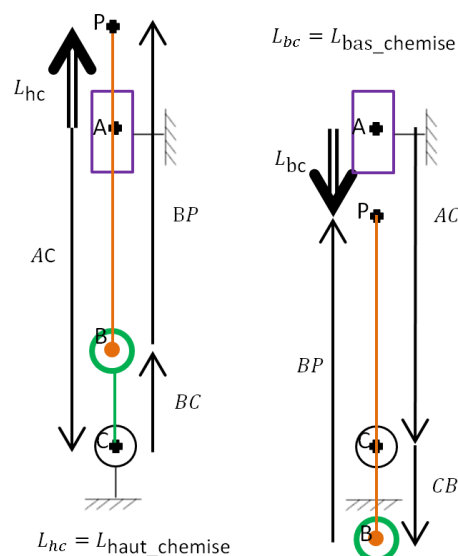


Figure 114. Chaines de cotes pour la longueur de guidage de la chemise au point mort haut (à gauche), au point mort bas (à droite)

Équation 28

$$\begin{cases} L_{hc} = BC + BP - AC \\ L_{bc} = AC + CB - BP \\ L_{bc} + L_{hc} = 2 \cdot BC \text{ (à } + \text{ ou } - 2 \text{ mm)} \end{cases}$$

Les données imposées sont :

Hauteur de la jupe du piston : $11 \leq \text{Hauteur} \leq 15$ mm

BC=10 mm

Rayon_vilebrequin=20 mm

Hauteur_Encodeur + raccord=40,5 mm

$\emptyset \frac{\text{Coussinet}}{2} = 2,75$ mm

$\text{Epaisseur}_{\text{enveloppe}} = 1,75$ mm environ (épaisseur de matière du palier)

L'Équation 29 est la condition géométrique assurant l'insertion de l'encodeur, et l'Équation 30 celle assurant un jeu entre le diamètre extérieur du vilebrequin et le bas de la chemise.

Équation 29

$$\text{Hauteur}_{\text{Encodeur}} + \text{raccord} + \emptyset \frac{\text{Coussinet}}{2} + \text{Epaisseur}_{\text{enveloppe}} \leq AC$$

Équation 30

$$L_{bc} + \text{Rayon}_{\text{vilebrequin}} < AC$$

A partir de toutes ces données et équations les dimensions suivantes sont déterminées :

$$\begin{cases} L_{hc} = 13 \text{ mm} \\ L_{bc} = 7 \text{ mm} \\ BP = 48 \text{ mm} \end{cases}$$

VII.2.1.3. Etape 4 : Validation

En fin de l'étape 4, les dessins d'ensemble des moteurs sont réalisés. Les extraits des quatre dessins d'ensemble sont de la Figure 115 à la Figure 118.

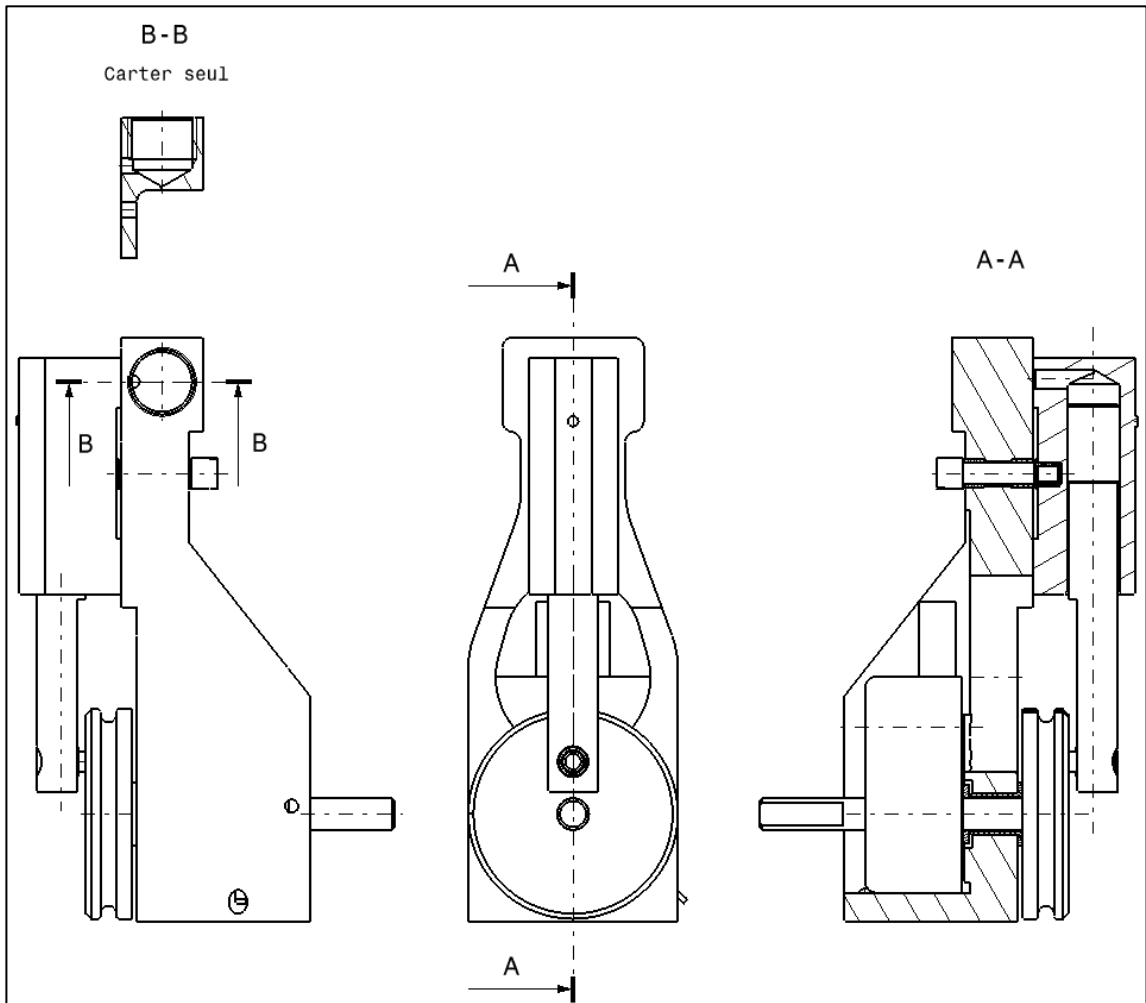


Figure 115. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Ec de l'étude de cas « moteur à air »

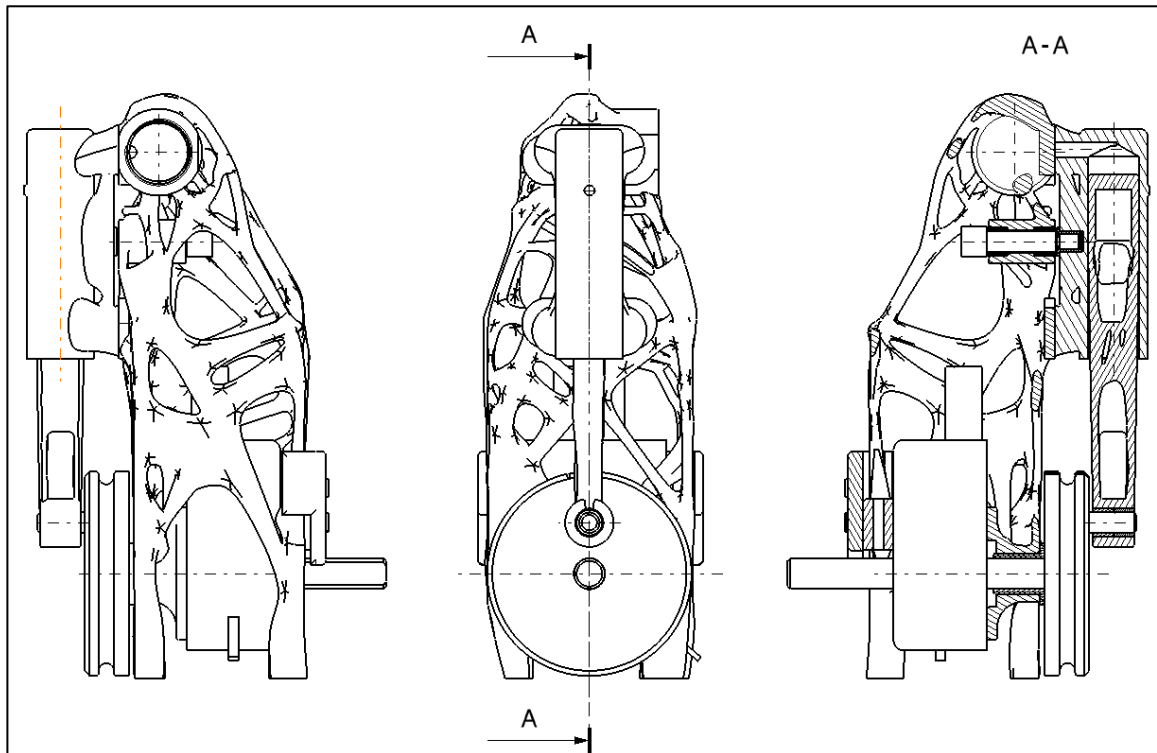


Figure 116. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Eam1 de l'étude de cas « moteur à air »

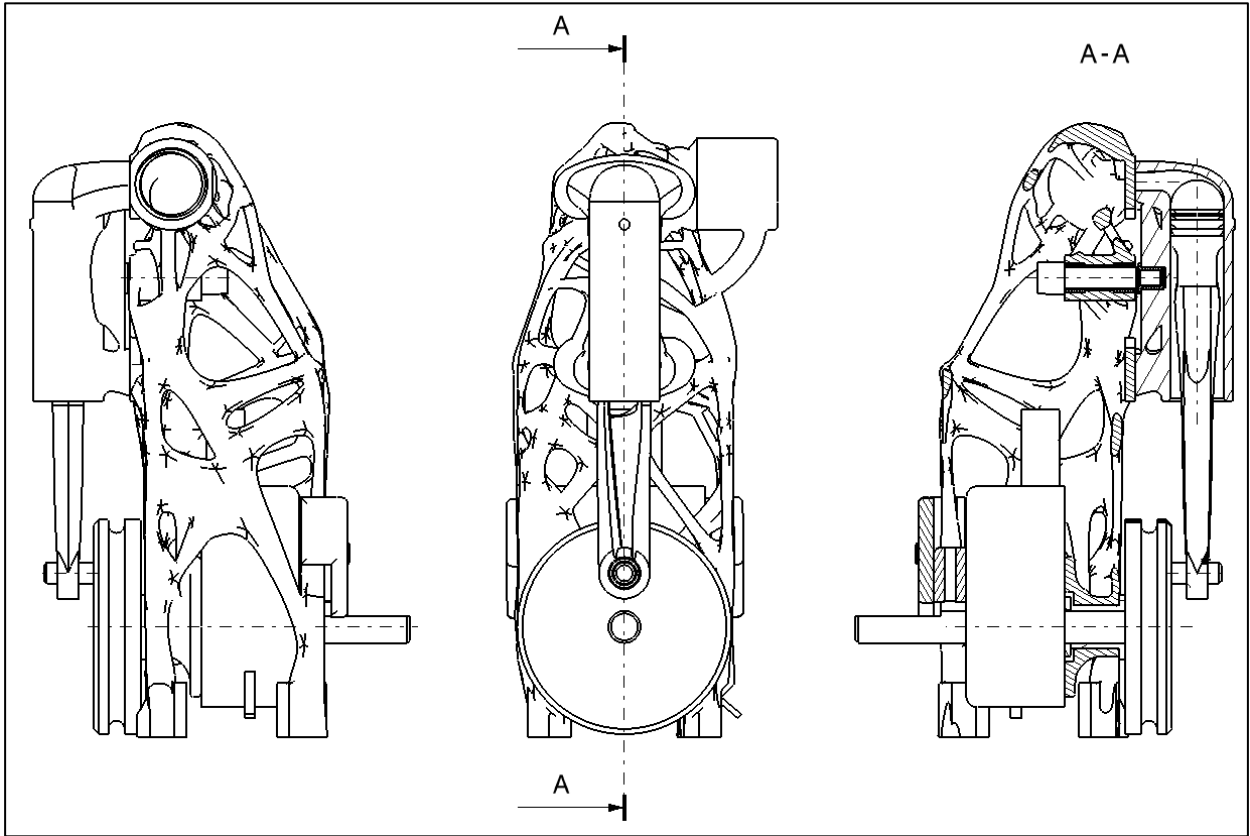


Figure 117. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Eam2 de l'étude de cas « moteur à air »

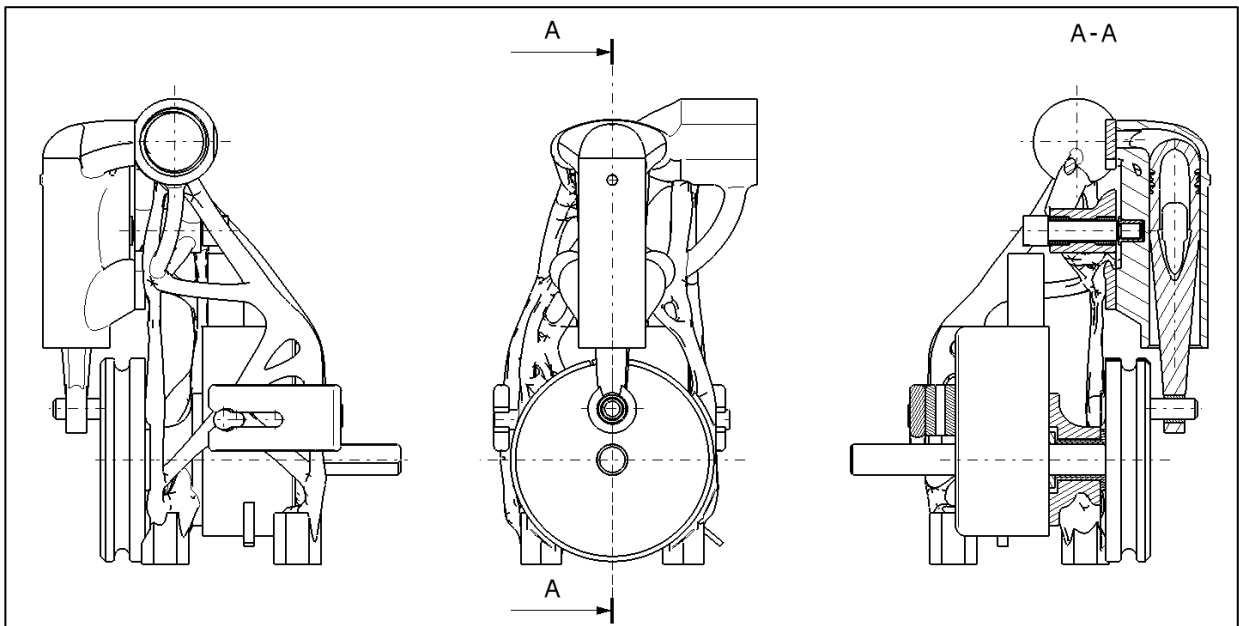


Figure 118. Extrait du dessin d'ensemble du moteur Eam3 de l'étude de cas « moteur à air »

VII.2.2. Les protocoles d'essais sur le moteur à air

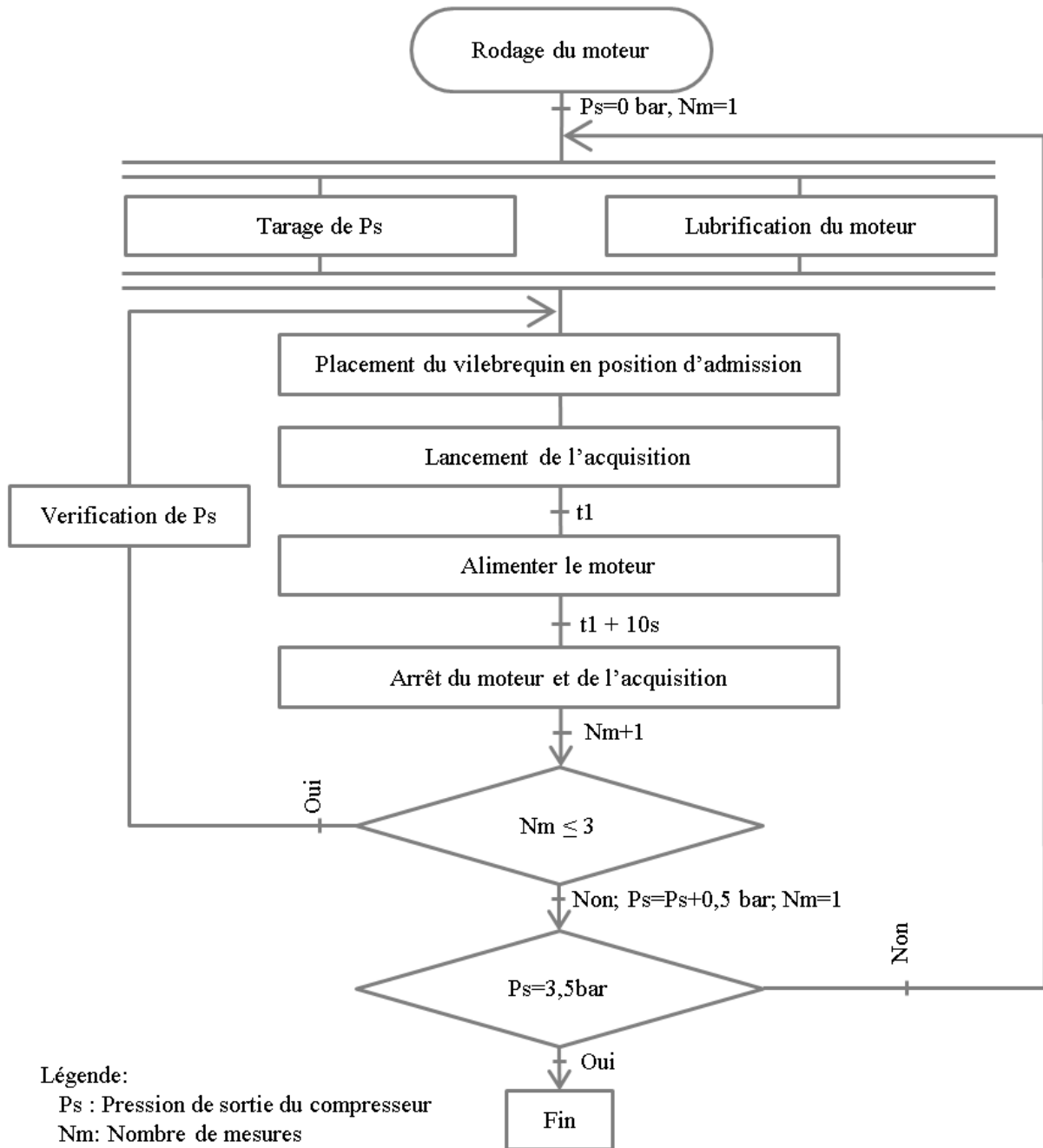


Figure 119. Protocole de mesure de la vitesse de sortie du moteur à air en fonction de la pression d'entrée

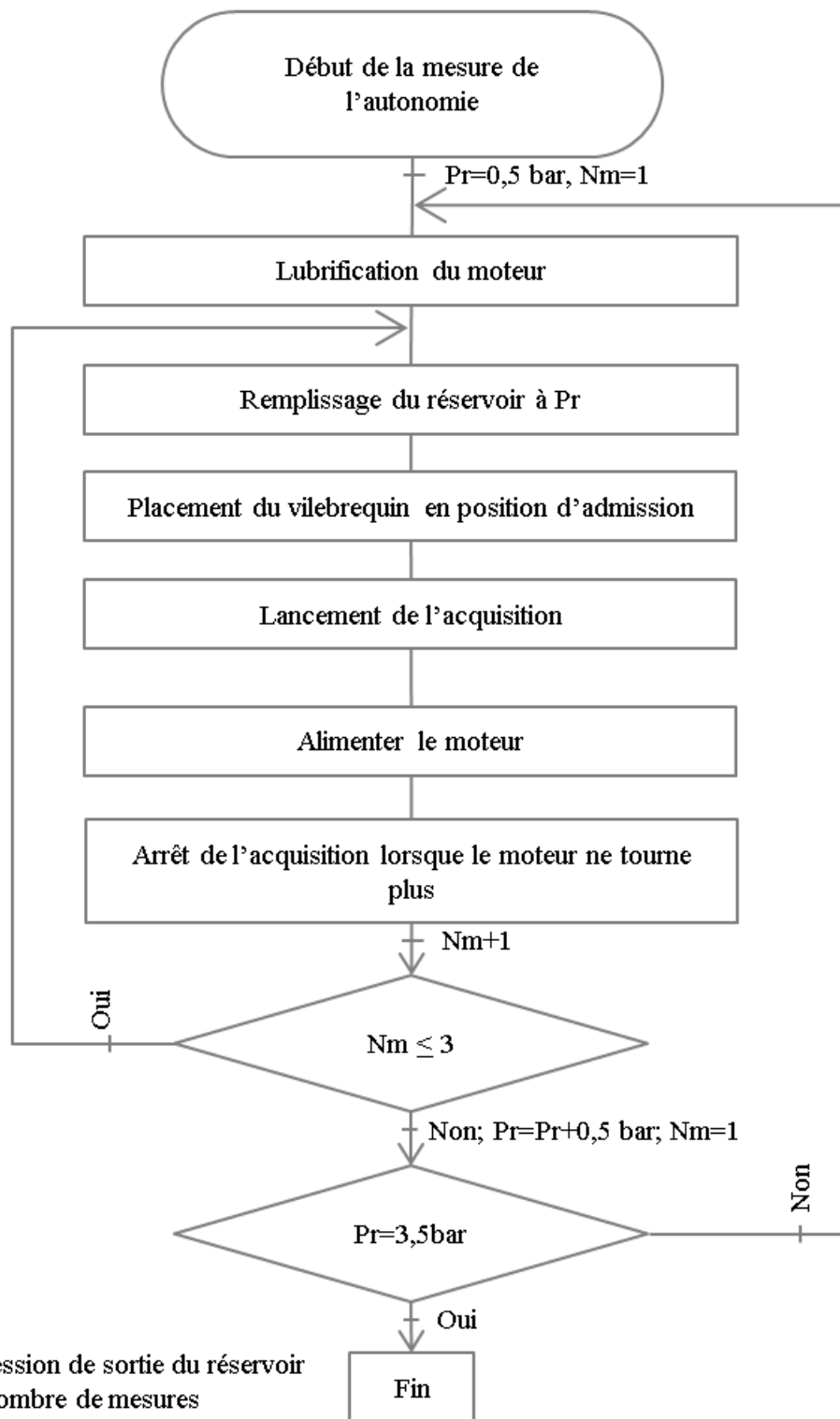


Figure 120. Protocole de mesure de l'autonomie du moteur à air en fonction de la pression d'entrée

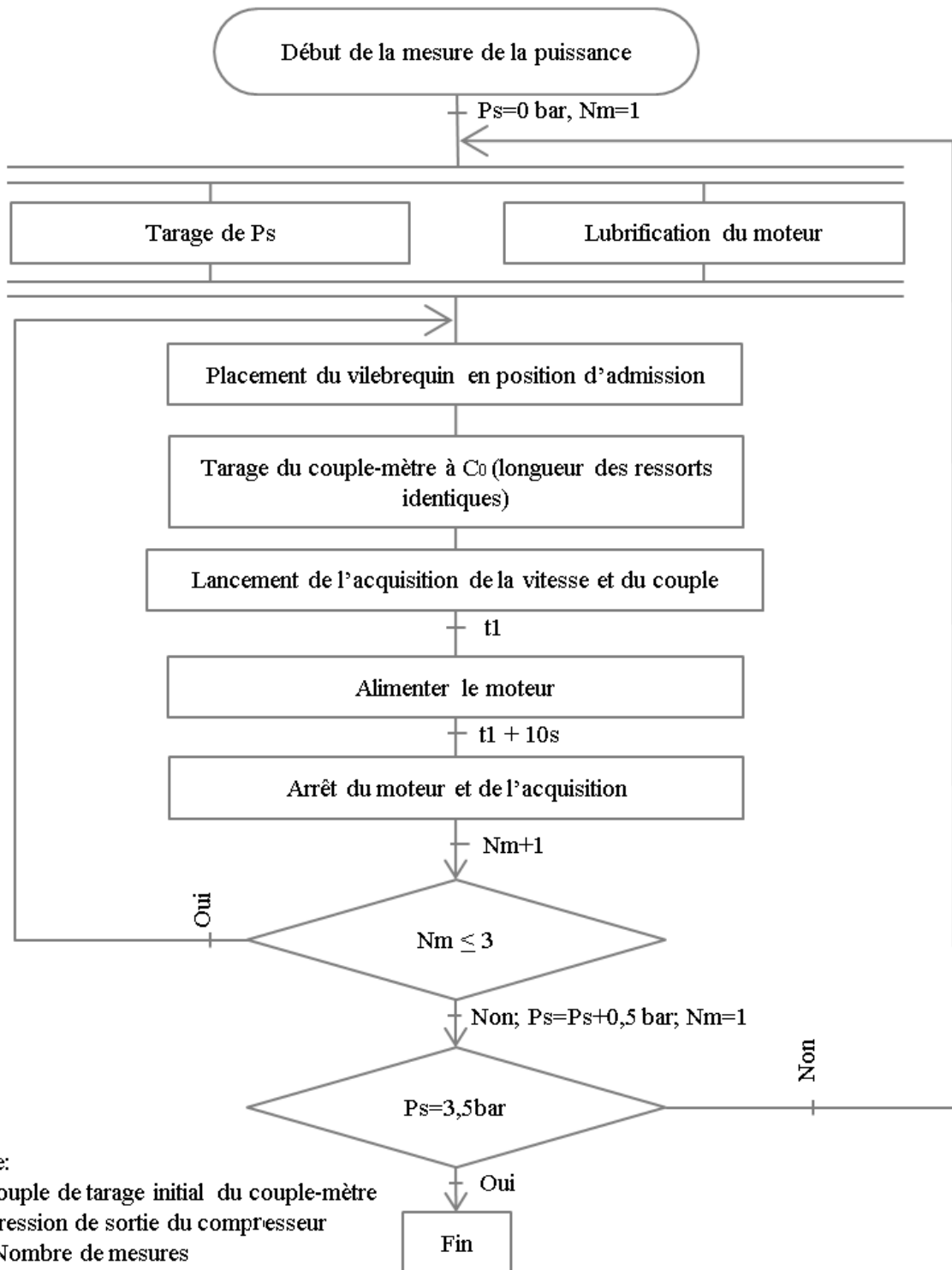


Figure 121. Protocole de mesure de la puissance du moteur à air en fonction de la pression d'entrée

VII.2.3. Caractérisation de la machine Connex Objet 350 de Stratasys

Afin de connaître l'impact de l'orientation de fabrication des pièces, des tests de comportement mécanique et de qualité géométrique ont été réalisés.

VII.2.3.1. Tests de comportement mécanique

Les tests de comportement mécanique ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées, fabriquées suivant des orientations différentes comme le montre la Figure 122. La matière testée a l'appellation commerciale VeroWhite. Les résultats obtenus sont résumés dans les Tableaux 36 à Tableau 38. Les impressions ont été réalisées avec l'option mate permettant de recouvrir toutes les pièces de support. La rugosité (Tableau 38) est mesurée sur la surface de dessus pour les pièces inclinées et sur une surface de côté pour l'éprouvette imprimée verticalement.

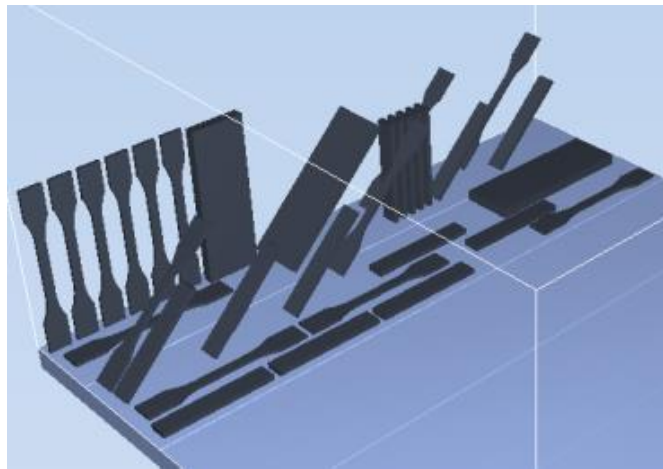


Figure 122. Orientation de fabrication des éprouvettes sur le plateau de la Connex Objet 350

Tableau 36. Caractéristiques en traction du VeroWhite

	VEROWHITE		
	Impression horizontale	Impression à 45°	Impression verticale
Contrainte maximale (MPa)	59,8 ± 1,2	45,2 ± 3,8	22,1 ± 1,9
Déformation à la rupture (%)	6,3 ± 1,9	2,9 ± 0,6	1,5 ± 0,4
Module de Young (MPa)	2308,4 ± 60,3	2216,7 ± 176,7	2002,3 ± 157,4
Allongement à la rupture (mm)	1,6 ± 0,5	0,73 ± 0,14	0,37 ± 0,1
Contrainte à la rupture (MPa)	55 ± 4,1	43,2 ± 4,00	21,3 ± 2,2

Tableau 37. Caractéristiques en flexion du VeroWhite

	VEROWHITE		
	Impression horizontale	Impression à 45°	Impression verticale
Module de flexion (MPa)	531,9 ± 31,5	496,6 ± 51,3	283,4 ± 22
Force à la rupture (N)	Pas de rupture	100,3 ± 5,0	60,5 ± 9,3
Contrainte à rupture (MPa)	Pas de rupture	44,7 ± 4,2	24,8 ± 3,4
Allongement à la rupture (mm)	Pas de rupture	9,7 ± 0,8	7,2 ± 3,4
Déformation à la rupture (%)	Pas de rupture	17,5 ± 1,5	12,5 ± 6,6

Tableau 38. Caractéristiques d'état de surface du VeroWhite. L'impression horizontale a été faite sans support

VEROWHITE			
	Impression horizontale	Impression à 45°	Impression verticale
Ra (μm)	1,4 ± 0,2	16,6 ± 0,9	18,1 ± 0,8
Rz (μm)	9,4 ± 1,4	120,2 ± 4,2	134,7 ± 9,7



Figure 123. Images des profils de rupture pour une éprouvette imprimée (a) à 45° (b) horizontalement (c) verticalement

VII.2.3.2. Influence de l'orientation de fabrication sur la qualité géométrique

Les tests suivants ont permis de déterminer quelle orientation de fabrication permettrait d'obtenir une surface la plus cylindrique possible. Pour cela, des pistons ont été fabriqués suivant des orientations différentes. Les diamètres au bas et en haut de la jupe ont été mesurés et comparés au diamètre nominal. Il en résulte que la jupe du piston a un défaut de cylindricité assez important et ce quel que soit le sens de fabrication. Les écarts du défaut sont moins importants lorsque l'axe de la jupe est parallèle au sens de fabrication, c'est-à-dire suivant l'axe \vec{Z} .

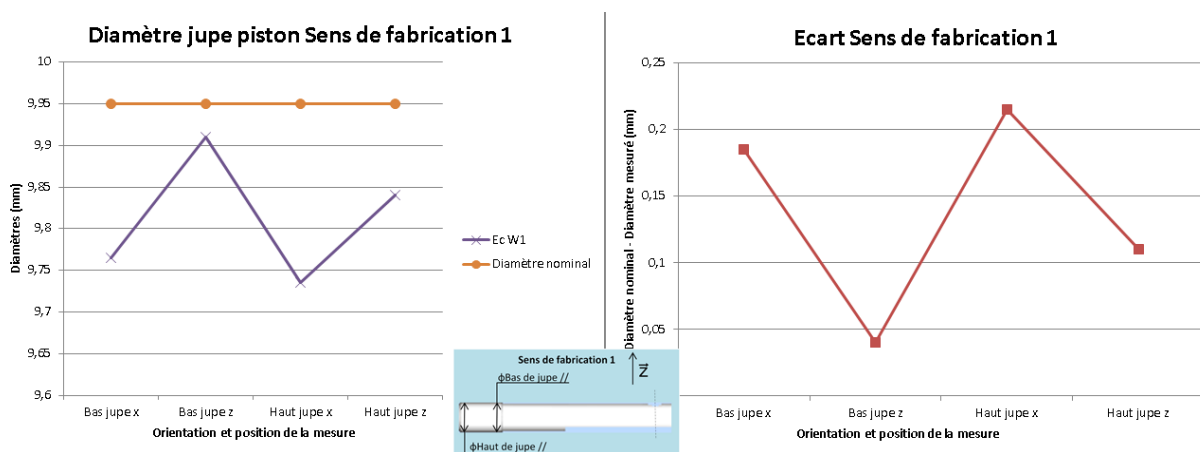


Figure 124. Mesure des diamètres de la jupe du piston pour le sens de fabrication 1

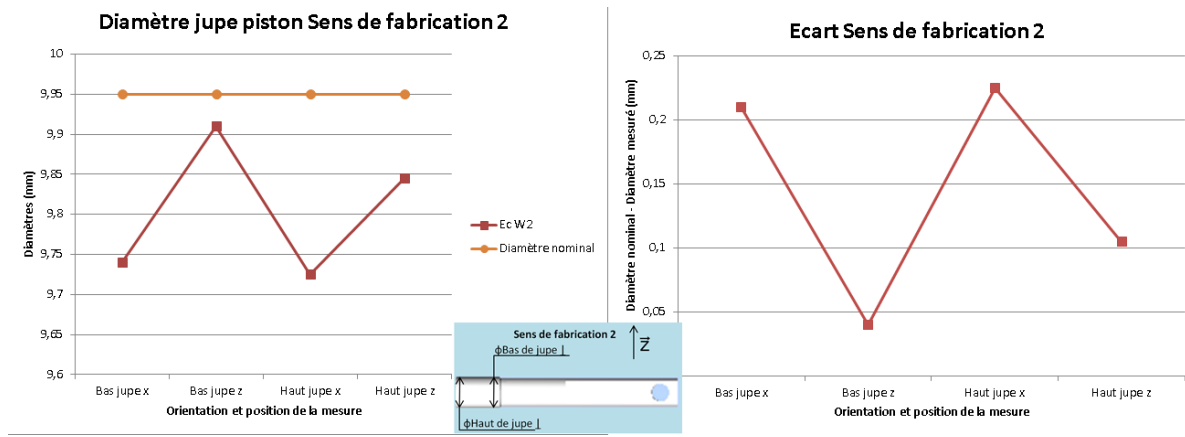


Figure 125. Mesure des diamètres de la jupe du piston pour le sens de fabrication 2

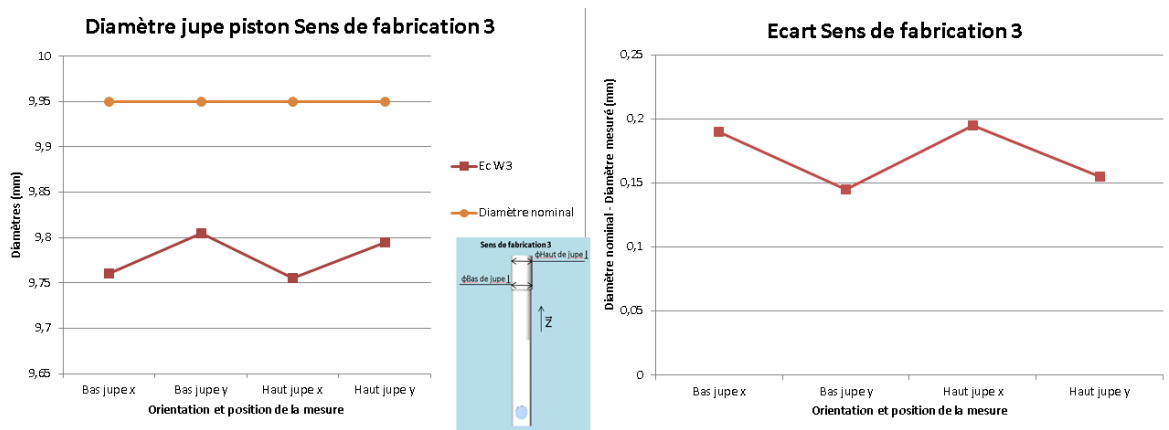


Figure 126. Mesure des diamètres de la jupe du piston pour le sens de fabrication 3

PhD abstract

Myriam ORQUERA

Lab. COSMER, University of Toulon

Design for additive manufacturing : Method for multibody mechanical systems

Topological optimization (TO) is a mathematical tool used to obtain an optimal distribution of material density. From a given volume, subjected to loads, the TO leads to a concept of part fulfilling an objective and respecting constraints. The optimized part shapes are often too complex to be manufacturable thanks conventional processes.

Additive manufacturing (AM) allows the material to be deposited where it is needed. Consequently, the choice of AM to manufacture topological optimized parts is often wise. In scientific literature, published design methods often remain applied to a single mechanical part, with few articles dealing with the design optimization of a product.

The purpose of this PhD is to suggest a design method of an additively manufactured multibody mechanical system. It is composed of parts linked together and have relative motions.

For this purpose, and in order to take advantage of all the possibilities of the AM, this manuscript suggests in a first step a classification of the optimizations achievable during the design of a product. Three optimizations are identified: architectural optimization, functional optimization and topological optimization. Both the application timeline and a demonstration of the contributions of each optimization are established.

In a second step, a topology optimization methodology of multibody systems (denoted TOMS for Topological Optimization of a Mechanical System) is developed to take into account the interaction of the mass and inertia decrease on each part of the system. An organization chart is introduced. It presents a method of loop optimization in order to take into account new boundary conditions. Then, different paths for managing the impact of inertia are shown. Finally, a path ranking taking into account the objectives of the designer is proposed and some optimization principles are suggested.

At last, these three optimizations are one step in the process of designing a product. In order to achieve this step with all the skills and knowledge in AM, a global design methodology is proposed. This methodology helps designers to design a single part as well as a multi-body mechanical system, from the specifications to final product.

Keywords : Product design, Additive manufacturing, Design for additive manufacturing, DfAM, Topological optimization

Résumé de la thèse

Myriam ORQUERA

Laboratoire COSMER, Université de Toulon

Conception pour la fabrication additive : Approche méthodologique pour les systèmes mécaniques multicorps

L'optimisation topologique (OT) est un outil mathématique permettant d'obtenir une répartition optimale de matière. A partir d'un volume donné, soumis à des chargements, l'OT aboutit à un concept de pièce répondant à un objectif et respectant des contraintes. En règle générale, ce concept, de forme très complexe, est irréalisable par des procédés de fabrication conventionnels.

Les procédés d'obtention par fabrication additive (FA), relativement récents, permettent de déposer le matériau là où il est nécessaire et rendent ainsi possible la fabrication de pièces topologiquement optimisées ne pouvant pas être obtenues par des procédés traditionnels.

Dans la littérature scientifique, les méthodologies de conception pour la fabrication additive sont souvent appliquées à une seule pièce mécanique et peu d'articles traitent de la conception optimisée d'un système mécanique multicorps.

Ce travail de thèse a donc pour thématique générale la conception de systèmes mécaniques multicorps pour la FA. Ceux-ci sont composés de pièces liées entre elles par des liaisons cinématiques et ayant des mouvements relatifs. L'objectif de la thèse est de proposer une méthodologie de conception permettant d'obtenir un produit fabricable par FA et optimisé à l'échelle du système par rapport aux besoins fonctionnels.

Dans ce but, et afin de tirer profit de toutes les possibilités de la FA, ce mémoire propose, dans un premier temps, une classification des optimisations réalisables lors de la conception d'un produit. Trois optimisations sont identifiées : l'optimisation architecturale, l'optimisation fonctionnelle puis l'optimisation topologique. La chronologie d'application et une démonstration des apports de chacune de ces optimisations sont établies.

Dans un deuxième temps, une méthodologie d'optimisation topologique de systèmes multicorps (TOMS Topological Optimization of a Mechanical System) est développée afin de prendre en compte l'impact de la diminution des masses et inerties de chacune des pièces du système sur les autres. Pour cela, une boucle d'optimisation est proposée pour réaliser des itérations d'OT. Puis, l'impact de l'ordre dans lequel sont optimisées les pièces (appelé un chemin d'optimisation) sur le résultat de conception est étudié. Des principes de choix de chemin d'optimisation ont ainsi pu être établis afin d'obtenir le mécanisme répondant au mieux aux besoins du concepteur.

Enfin, les trois optimisations (architecturale, fonctionnelle et TOMS) sont intégrées au processus global de conception d'un produit. Une méthodologie globale de conception, intégrant chaque étape du processus avec toutes les données nécessaires, est ainsi proposée. Cette méthodologie permet de concevoir aussi bien une seule pièce qu'un système mécanique multicorps, de la rédaction du cahier des charges à la conception du brut fabricable par FA.

Mot clés : Conception de produit, Fabrication additive, Conception pour la fabrication additive, DfAM, Optimisation topologique