



HAL
open science

La fabrication additive open source: un levier d'innovation pour répondre aux grands enjeux sociétaux.

Hakim Boudaoud

► To cite this version:

Hakim Boudaoud. La fabrication additive open source: un levier d'innovation pour répondre aux grands enjeux sociétaux.. Génie des procédés. Université de Lorraine (Nancy), 2019. tel-03652128

HAL Id: tel-03652128

<https://hal.science/tel-03652128>

Submitted on 26 Apr 2022

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.



Université de Lorraine

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

***La Fabrication additive open source : un
levier d'innovation pour répondre aux
grands enjeux sociétaux.***

HAKIM BOUDAUD

Maître de Conférences à l'ENSGSI et à l'ERPI depuis septembre 2009

2019

Section CNU 60



Soutenance prévue le 27 novembre 2019

JURY

Peggy Zwolinsky	Professeur à Grenoble INP	Rapporteur
Nicolas Perry	Professeur à l'ENSAM de Bordeaux-Talence	Rapporteur
David Ruch	Docteur-HDR Group Leader LIST Luxembourg	Rapporteur
Joshua Pearce	Professeur à Michigan Tech	Examineur
Marion Martiny	Professeur à l'UL UFR MIM de Metz	Examineur
Salim Belouettar	Docteur-HDR Group Leader LIST Luxembourg	Examineur
El Mostafa Daya	Professeur à l'UL UFR MIM de Metz	Invité
Mauricio Camargo	Professeur à l'UL ENSGSI de Nancy	Parrain Scientifique

ERPI- Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs

EA-UL 3767

ENSGSI-Nancy

8, rue Bastien Lepage, BP 90647, 54010 Nancy cedex

*A Steph,
Cyane et
Eden*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Peggy Zwolinsky, Nicolas Perry et David Ruch d'avoir accepté de relire ce mémoire et d'en être les rapporteurs. La version finale de ce mémoire a bénéficié en outre de la lecture particulièrement attentive et des remarques nombreuses et précieuses de Mauricio Camargo. Je remercie également tous les autres membres du jury: Marion Martiny, Joshua Pearce, Salim Belouettar et El Mostafa Daya d'avoir accepté d'assister à la présentation de ce travail.

Je voudrais remercier tout particulièrement Mauricio Camargo sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Il m'a permis d'élargir ma vision de la recherche et d'explorer des domaines scientifiques nouveaux, répondant à toutes mes questions et sollicitations avec un trait de caractère que je lui envie: sa bienveillance. Il a en outre accepté de relire ce mémoire, qui a bénéficié de ses nombreuses remarques. Je tiens à remercier aussi Laure Morel qui a vu très tôt le potentiel des FabLabs et de la Fabrication Additive Open Source et soutenu mes projets sur ces thématiques alors que beaucoup n'y croyaient pas.

Je voudrais également remercier El Mostafa Daya et Michel Potier Ferry qui m'ont pendant ma thèse, donné le goût de la recherche et permis de développer la rigueur scientifique qu'elle nécessite. Je remercie aussi Salim Belouettar pour m'avoir permis de découvrir l'importance des collaborations nationales et internationales dans le domaine de la recherche, son réseau et aussi pour son aide souvent précieuse.

Je tiens à remercier toute l'équipe du LorraineFabLivingLab et je souhaite qu'elle ne cesse de s'agrandir. Et dans cette équipe, je remercie plus particulièrement Fabio Cruz en qui j'ai une confiance aveugle et qui m'apporte son aide quotidiennement sur de nombreux projets.

Je remercie également l'équipe des « MANeurs », Arnaud Lejeune, Fabien Béchet et Norman Mathieu pour les centaines d'heures passées à se poser des questions de régularité, de différenciation et de développement en série pour finir par la méta-programmation et le grand « MANITOO », bravo !

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été souvent réalisés en collaboration avec des collègues d'autres laboratoires. Les résultats obtenus n'auraient pas été possibles sans eux et je souhaite donc les remercier, en espérant n'avoir oublié personne: Sandrine Hoppe, Cécile Nouvelle, Richard Lainé, Sylvain Lefebvre, Samuel Kenzari, Guillaume Robin, Patrick Moll, Farid Abed Meraim, Erasmo Carrera, Ayech Benjeddou, Hamid Zahrouni, Fessal Kpeky, Laetitia Duigou, Claude Barlier, Isabelle Charpentier, Hocine Chalal, Denis Roizard, Eric Favre, Komlan Akoussan, Komla Gaboutou Lougou.

Je remercie tous les membres du laboratoire ERPI qui sont mes collègues de travail depuis dix ans et tous les membres des laboratoires LEM3, LRGP, IJL et LEMTA que je côtoie régulièrement. Je remercie aussi tous mes collègues de l'ENSGSI. Je souhaite remercier Cindy Neves pour toute l'aide qu'elle m'apporte au niveau de la gestion administrative et budgétaire ainsi que Christine Fivet pour son aide dans la gestion des doctorants et sa sympathie.

Je remercie également les amis-collègues partis travailler dans des contrées plus ensoleillées, Sylvain Zézé pour ses actions favorisant l'éducation en Afrique et la plateforme de Xerya, Hu Heng pour ses conseils au poker, Ali Daouadji pour la découverte des grands peintres Lorrains, ah Migette.

Je remercie également mes amis qui m'ont permis d'oublier momentanément le travail lors de différentes activités de loisirs, sportives ou récréatives, mais toujours très cultur.... euh non pas trop culturelle en fait. Johan, Francis et Julie, Lionel et Véro, Arnaud et Camille, Laetitia et Gaël, Greg, Bestmarmotte et Julie.

Enfin, je remercie la machine à café et ma famille pour leur soutien permanent: Sab, Sam, Mman, Eden et Cyane, avec une pensée spéciale pour Steph, mon rayon de soleil, pour son aide précieuse dans la relecture.

AVANT PROPOS

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches présente le résultat de dix années d'activité en tant que Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure en Génie des Systèmes industriels (ENSGSI-ERPI) de l'Université de Lorraine. Il s'agit d'explicitier le chemin de recherche parcouru, lequel, à l'image de mon parcours professionnel, a été construit via de nombreuses interactions et collaborations.

Depuis le doctorat en 2007, mes recherches se sont toujours situées dans le domaine de la mécanique tout en s'ouvrant peu à peu à d'autres domaines tels que le génie industriel et le génie chimique. Suite à mon doctorat, j'ai poursuivi mes activités de recherche au sein de l'Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs (ERPI, EA 3767). Les projets de recherche auxquels j'ai participé, pour la plupart en collaboration avec des équipes nationales et internationales, ont orienté une partie de mes thèmes de recherche vers la fabrication additive open source, les matériaux composites et l'amortissement des structures.

Au travers de ces expériences, j'ai pris conscience de l'importance de la prise en compte de l'ensemble des étapes du processus de conception afin d'obtenir des modèles robustes et utilisables à différents niveaux par les décisionnaires. Des nouveaux points de vue sur la conception des produits en Génie mécanique sont en train de voir le jour, notamment au travers d'une vision plus intégrée et qui va au-delà des seules modélisations aux dimensions de la structure et à un instant t donné. Si ceci ouvre un champ très important de recherche, il va de soi que de nouvelles complexités devront être prises en compte.

Parcours professionnel détaillé

Suite à ma formation de base d'ingénieur généraliste, j'ai toujours été vivement intéressé par de nombreux domaines. Après un passage dans une entreprise de conseil et actuariat et des travaux sur l'évaluation des produits dérivés à l'aide de méthodes de pricing par différences finies j'ai repris une thèse en méthode numérique appliquée à la mécanique et aux structures composites. Plus précisément dans le cadre de mes travaux de thèse, je me suis principalement intéressé à la formulation analytique et éléments finis pour la modélisation simple du comportement modal des structures composites à amortissement actif-passif. J'ai ainsi développé un modèle analytique de type poutre pour les structures de type sandwich piézoélectrique/élastique/ viscoélastique/ élastique/ piézoélectrique. Deux lois de contrôle, proportionnelle directe et en vitesse ont été considérées. De même, différents niveaux d'approximation ont été considérés et discutés ainsi que le traitement du problème électrostatique dans le capteur. La prise en compte de conditions d'équipotentialité, afin de modéliser la réalité physique dans le cas où l'on applique des électrodes sur les couches piézoélectriques, a aussi été discutée. Pour l'ensemble des différents modèles obtenus, j'ai validé ceux-ci par comparaison à des modèles éléments finis obtenus au moyen de codes

commerciaux (environnement Abaqus) lorsque cela était possible. J'ai par ailleurs observé l'effet des deux types d'amortissement sur les propriétés modales des structures et ce en prenant en compte ou non l'effet des électrodes [ACL1].

Dans un second temps, j'ai considéré une extension du modèle analytique et j'ai développé un élément fini de type coque. Sa formulation utilise les hypothèses classiques de calcul des sandwichs et les théories de coques de Kirchhoff et de Mindlin. Ce dernier résulte de l'assemblage des éléments de coques suivant l'épaisseur. L'utilisation des conditions de continuité du champ de déplacement aux interfaces réduit le nombre de degrés de libertés à 8 en déplacements et 2 degrés électriques qui ont été condensés. Le comportement en poutre de cet élément a été validé en le comparant au modèle analytique développé ultérieurement. Dans le cas des plaques j'ai donné les propriétés modales obtenues avec les deux lois de contrôles et pour différents cœurs viscoélastiques [ACL2].

Enfin j'ai proposé un algorithme numérique pour résoudre de manière précise et directe le problème aux valeurs propres non linéaires auxquelles j'avais été confronté précédemment. Cet algorithme utilise les techniques usuelles de la méthode asymptotique numérique (MAN), à savoir l'association des techniques d'homotopie et de perturbation, couplé si besoin aux approximations de Padé pour améliorer le domaine de validité des séries [ACL3].

Par la suite, j'ai co-encadré de manière « non officielle » les travaux de Komla Akoussan et Komla Gaboutou Lougou. Avec le premier, nous avons exploré le comportement des structures sandwich composites à face orthotrope [ACL7], développé un modèle d'analyse de sensibilité pour la conception de structures composites à amortissement contrôlé [ACL10] et enfin développé une méthode de type MAN à 2 paramètres de chemin et qui permet ainsi d'explorer de manière analytique un espace plan de solution [ACL12]. Avec Komla Gaboutou Lougou, nous nous sommes intéressés à des modèles de structures répétitives. Nous avons pu résoudre le problème aux valeurs propres complexes en couplant la méthode asymptotique numérique à une technique d'homogénéisation et aux approximations de Padé. Nous avons étendu récemment ces travaux et avons développé une technique similaire pour résoudre le problème aux valeurs propres complexes pour des structures amortissantes hétérogènes et ce au moyen d'une méthode multi-échelle. Un article illustrant ces avancées a été soumis cette année [ACLS1].

Entre 2007 et 2009 dans le cadre d'un post-doctorat, je me suis intéressé à l'intégration de différents types de non-linéarité (matériel, contact, frottement...) dans un code métier destiné à la simulation globale des phénomènes de transport de bandes minces dans les usines sidérurgiques avec la prise en compte de l'ensemble du procédé de fabrication ou de finition.

Dans un premier temps j'ai implanté un élément coque de type 8 nœuds de type EAS sous environnement C++, j'y ai adjoint une formulation pour la prise en compte du contact au moyen du lagrangien augmenté, et nous avons développé avec l'équipe une méthode couplant l'utilisation de la Différentiation Automatique et de la MAN afin de pouvoir considérer tout type de surface géométrique de contact sous une formulation implicite [ACL4]. Au moyen de

cet outil, j'ai travaillé sur des formulations de loi de contact à convergence exponentielle [ACL5]. J'ai validé l'ensemble des modèles développés sous logiciel élément fini Abaqus.

Actuellement, nous développons avec l'équipe MENU du Lem3, l'équipe DMA de FEMTO et le LAMIH des modèles afin de pouvoir prendre en compte la plasticité et le frottement. Nous avons mis en place une formulation Arbitraire Lagrange Euler (ALE) qui permet de limiter la taille des maillages et le nombre d'itérations. Nous réfléchissons par ailleurs à une approche multi-modèles couplant un modèle fin basé sur des éléments finis de types coques dans les zones de plissement potentiel avec des modèles simplifiés dans les zones moins sensibles. L'ensemble de ces avancées ont été mises en accès libre et implémenté dans le logiciel MANITOO qui a été présenté à la communauté des numériciens lors de Giens 2019 [C-ACTN3].

En 2009, j'ai été recruté à l'ERPI où après quelques temps d'adaptation je me suis investi particulièrement dans la fabrication additive open source et plus particulièrement dans l'impression de type dépôt de filaments fondus. A travers les travaux de master de Fabio Cruz, nous avons exploré les possibilités et évalué les capacités des machines d'impression 3D de type FFF open source. Après avoir validé le potentiel de ces machines [ACL6], nous avons travaillé plus précisément, dans le cadre des travaux de thèse de Fabio Cruz, sur la matière première, à savoir le filament, et avons prouvé que ce dernier, lorsqu'il était en PLA, pouvait être réutilisé plusieurs fois dans une boucle de recyclage tel que présenté dans la Figure 1. A la suite de quoi nous nous intéressons actuellement à la partie logistique de cette boucle de recyclage et ce principalement dans les travaux de thèse de Pavlo Santander.

Pavlo, S., Fabio, C., Hakim, B., & Mauricio, C. (2018). 3D-Printing Based Distributed Plastic Recycling: A Conceptual Model for Closed-Loop Supply Chain Design. In 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) (pp. 1–8). IEEE.

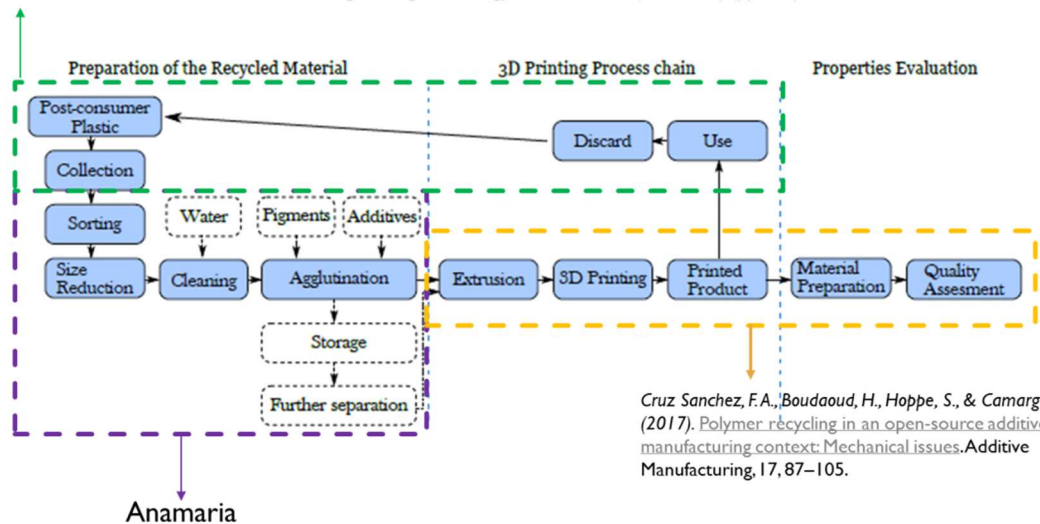


Figure 1: Boucle de recyclage de thermoplastiques destinée à être utilisée par la FFF [11].

Un modèle et une approche distribuée du circuit ont été proposés dans [C-ACTI8]. Par la suite nous avons développé un modèle générique permettant d'optimiser les aspects économiques

et environnementaux du circuit court de recyclage de plastique par impression 3D, ceci est détaillé dans [ACL14]. Pour la partie préparation du matériau à recycler, nous avons évalué la maturité des technologies pour passer de systèmes propriétaires centralisés à des systèmes open-source décentralisés. Les travaux de master d'Anamaria Bogoya ont permis d'aller un peu plus loin en proposant des solutions technologiques tel que proposé dans un article soumis dernièrement [ACLS3].

En parallèle de l'axe recyclage j'ai mené plusieurs travaux exploratoires autour de l'utilisation de la FA open source :

Echangeurs membranaires :

En collaboration avec le LRGP (UL) et l'équipe membrane nous avons réalisé la conception et l'évaluation de plusieurs types d'échangeurs de chaleur obtenus par des procédés de FA open source et semi-open source différents. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet région qui consistait plus précisément à évaluer le potentiel de la technologie d'impression 3D à fabriquer des modules membranaires à géométrie complexe et/ou innovante et tester les performances de transfert de matière et de chaleur dans différentes applications, allant des échangeurs de chaleur aux séparateurs membranaires de gaz. Les résultats des travaux de master de Bilal Cheihabou et Peter Thanés doivent être valorisés prochainement par une publication et un dépôt de brevet.

Application médicale :

En collaboration avec le LERMAB (UL) et le CHU nous avons réalisé la conception et l'évaluation de plusieurs types de fentes olfactives. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet PEPS qui consistait à la conception de fente olfactive représentative de modèles humains obtenue par tomographie. Par ailleurs, depuis janvier 2019 et ce dans le cadre du projet LUE Orthosis 4D, je travaille en collaboration avec différents laboratoires lorrains sur la réalisation d'orthèses par fabrication additive. Les pièces ainsi produites sont en interaction avec le corps humain et requièrent des fonctions ainsi que propriétés physiques très bien définies d'un point de vue du comportement mécanique. Il s'agit par exemple d'immobiliser partiellement ou totalement une articulation tout en épousant parfaitement une morphologie. La fabrication additive ouvre des perspectives uniques dans ce domaine : la possibilité de produire des formes complexes et de combiner plusieurs matériaux permet de produire au sein même des pièces des gradients de propriétés, et de modifier par exemple la rigidité, l'amortissement ou la porosité le long d'une forme.

Matériau composite pour l'amortissement des vibrations :

En collaboration avec le LRGP, nous avons réalisé des preuves de concept pour la réalisation de structures par FA pour l'amortissement spatialement contrôlé. Ces travaux ont été réalisés

dans le cadre d'un PEPS DGA. Une partie publiable de ces travaux a été présentée à EMI Lyon 2019 [C-ACTI9] et une autre partie sera présentée à la SFGP 2019 [C-ACTN4].

Comme on peut le voir à travers les études que j'ai présentées précédemment et résumées Figure 2, j'ai pu développer mes recherches à différentes échelles et coupler des approches complémentaires qui vont de l'amélioration de solveur numérique, en passant par la modélisation de structures et de procédés, de l'expérimentation sur des pièces de structures et jusqu'à la modélisation de circuit logistique. J'ai choisi ces projets de recherche en fonction des opportunités qui se sont présentées à moi tout en m'intéressant à explorer et intégrer peu à peu dans mes études l'ensemble des étapes permettant de mieux définir la mise en œuvre des structures. Pour ce faire, j'ai dû privilégier les travaux en mode projet, l'interdisciplinarité, ainsi que de nombreuses collaborations tel que l'on peut le voir Figure 2.

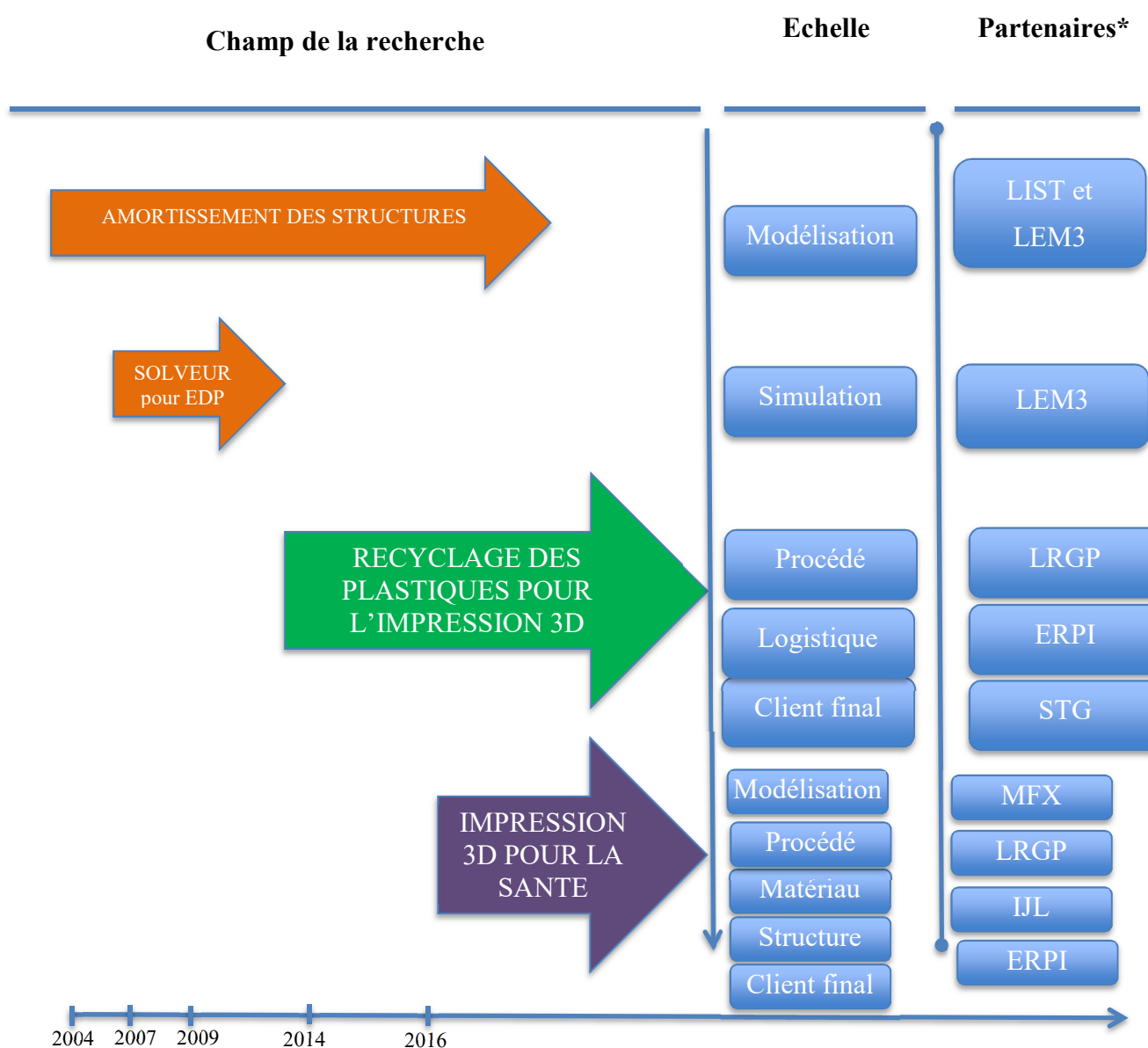


Figure 2 : Principaux projets développés et équipes partenaires. * Des précisions sur les équipes partenaires

peuvent être trouvé en p 13

En effet, aujourd’hui les problèmes posés aux chercheurs s’intéressant au comportement en mécanique des structures sont de plus en plus complexes: influence du procédé d’élaboration, des couplages multi-physiques, microstructure multi-échelle, niveau d’observation de plus en plus faible, phénomène de plus en plus fin ... Ils ne peuvent donc plus être abordés par une personne seule.

L’alliance de plusieurs chercheurs issus de communautés scientifiques différentes est nécessaire. Leur complémentarité permet d’additionner les compétences et de croiser les points de vue. Mon parcours au sein de l’ERPI, mes affinités intellectuelles et les projets accomplis m’ont permis, sur certaines actions, d’établir des passerelles entre des champs d’expertise très différents. Désormais je suis convaincu que la conception de structure doit être étudiée d’une manière plus intégrale, englobant simultanément les domaines de modélisation, simulation, matériau, procédé d’élaboration, produit et client final. Cette vision, qui couple le génie mécanique, le génie des procédés et le génie industriel demeure peu étudiée par la communauté mais a je pense un très fort potentiel pour fournir des solutions concrètes aux grands enjeux sociétaux auxquelles nous sommes confrontés de nos jours.

Dans le cadre de ce mémoire, je vais appliquer plus particulièrement cette vision au domaine de la **Fabrication Additive Open Source** et illustrerai par la suite comment cette technologie peut être un levier pour répondre plus particulièrement à quatre enjeux à savoir: **l’Efficacité énergétique, l’Economie circulaire, la Santé** et la **Lutte contre les inégalités sociales**. Je détaillerai ici pour les deux premiers enjeux mes contributions et les perspectives de recherche, et pour les deux derniers je présenterai les projets initiés et les pistes de recherche pour les années à venir.

Ainsi, le présent manuscrit est structuré en 5 grands chapitres comme suit.

Un *premier chapitre* fait une description détaillée des activités d’enseignement, administratives et autres responsabilités collectives.

Dans un *chapitre 2*, j’introduirai et expliciterai les notions de **Fabrication Additive** et d’**Open Source** et clarifierai l’apport de chacune pour l’industrie, le grand public et le domaine de la recherche. Dans un second temps je proposerai une définition au sens large de **l’Innovation** et de l’évolution de cette définition durant les dernières décennies. Les potentiels d’innovation de la FA Open Source seront alors précisés et je proposerai pour mes travaux passés et à venir une grille de lecture globale et un cadre multi-échelle abordant les différentes étapes du processus de conception d’une structure.

Une fois les termes clarifiés et la grille de lecture précisée, nous traiterons dans un *chapitre 3* des apports de la FA Open Source pour deux enjeux sociétaux : **l’Efficacité Energétique**, enjeu pour lequel nous préciserons les apports théoriques puis expérimentaux ;

Puis au *chapitre 4* nous précisons les apports de la FA Open Source pour l'**Economie Circulaire**.

Enfin, dans un *chapitre 5*, nous concluons puis proposerons quelques perspectives suite aux actions récemment entreprises en FA Open Source pour le domaine de la **Santé**, ainsi que les projets en cours de préparation pour la **Lutte contre les inégalités sociales**.

Chapitre 1	Synthèse des activités	
Chapitre 2	FA & le concept d'Open Source	La FA un levier d'innovation
Chapitre 3	Modélisation et simulation	Du modèle à la structure : expérimentation & tests
Chapitre 4	GreenFabLab	GreenLocal3D
Chapitre 5	Conclusion	Perspectives

Sommaire

CHAPITRE 1

1 CURRICULUM VITAE	17
1.1. FORMATION ET DIPLOMES	18
1.2. PARCOURS PROFESSIONNEL	18
2 ACTIVITES D’ENSEIGNEMENT ET DE VALORISATION PEDAGOGIQUE ...	20
2.1 DESCRIPTION DES ENSEIGNEMENTS EFFECTUES.....	20
2.2 ENSEIGNEMENTS CLASSIQUES	21
2.3 ENSEIGNEMENTS DE TYPE FORMATION CONTINUE	22
2.4 NOUVELLES FORMES D’ENSEIGNEMENT	23
3 ACTIVITES D’ADMINISTRATION ET AUTRES RESPONSABILITES COLLECTIVES	25
3.1 RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES LIEES A LA PEDAGOGIE	25
3.2 RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES LIEES A LA RECHERCHE	25
4 ACTIVITES DE RECHERCHE ET DE VALORISATION SCIENTIFIQUE	26
4.1 PROJETS DE VALORISATION SCIENTIFIQUE.....	26
4.2 LISTE DES THESES CO-DIRIGEES ET MASTERS ENCADRES	28
4.3 PARTICIPATION A DES JURYS.....	30
4.4 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE.....	31
5 PRODUCTION SCIENTIFIQUE	33

CHAPITRE 2

1 FABRICATION ADDITIVE ET LE CONCEPT D’OPEN SOURCE	41
1.1 LA FABRICATION ADDITIVE	41
1.2 LA FABRICATION ADDITIVE DITE ‘OPEN SOURCE’	44
1.3 FABRICATION ADDITIVE SEMI ‘OPEN SOURCE’	46
2 LA FABRICATION ADDITIVE UN LEVIER D’INNOVATION	48
2.1 D’UNE INNOVATION TOP DOWN À UNE INNOVATION BOTTOM UP	48
2.2 POTENTIELS D’INNOVATION DE LA FABRICATION ADDITIVE	50
3 CONCLUSION	54
4 REFERENCES	55

CHAPITRE 3

1 INTRODUCTION	60
2 MODELISATION & SIMULATION	62

2.1	CONTROLE ACTIF PASSIF DES VIBRATIONS	64
2.2	MODELE SOLIDE COQUE POUR LE CONTROLE PASSIF DES VIBRATIONS	66
2.3	CONTROLE PASSIF DES VIBRATIONS AU MOYEN DE STRUCTURES COMPOSITES.	68
3	DU MODELE A LA STRUCTURE : EXPERIMENTATION & TESTS.....	70
3.1	LA FABRICATION ADDITIVE POUR DES STRUCTURES AUX FORMES COMPLEXES.....	71
3.2	NOUVELLES STRUCTURES HIERARCHIQUES AMORTISSANTES	72
4	PERSPECTIVES.....	77
5	REFERENCES	79

CHAPITRE 4

1	INTRODUCTION.....	85
2	NOTIONS CLES DES PROJETS	86
2.1	ECONOMIE CIRCULAIRE.....	86
2.2	RECYCLAGE DES THERMOPLASTIQUES.....	86
2.2	CIRCUIT EN BOUCLE FERME.....	87
3	LE PROJET GREENFABLAB	88
3.1	RECUPERATION ET PREPARATION	89
3.2	TRANSFORMATION	89
3.3	EVALUATION DE LA QUALITE	90
3.4	BILAN	91
4	LE PROJET GREENLOCAL3D	91
4.1	FACTEURS D'INFLUENCE.....	93
4.2	MODELISATION ET SIMULATION.....	93
4.3	MATERIAU ET PROCEDES.....	93
4.4	STRUCTURE	95
5	CONCLUSION	96
6	REFERENCES	97

CHAPITRE 5

1	UNE CONCEPTION DE VEHICULE MOINS ENERGIVORE.....	103
2	UN RECYCLAGE EN CIRCUIT COURT DES PLASTIQUES	112
3	DES OPPORTUNITES POUR LA SANTE ET LE SOCIALE.....	116
4	PROJET PEDAGOGIQUE.....	119
5	REFERENCES	122

Liste de Figures

Figure 1: Boucle de recyclage de thermoplastiques pour la FFF (Sanchez et al, 2016).	IX
Figure 2: Principaux projets développés et équipes partenaires.	XI
Figure 3: Familles de procédés de fabrication additive (Norme ISO 17296-2) [3]	42
Figure 4: Type de matériaux utilisables par familles de procédés de FA [1]	42
Figure 5: Etapes clés et champs d’expertise connexes à la FA	43
Figure 6: Principaux types de production en FA inspiré de [5].	44
Figure 7: Evolution du mouvement des « makers » [7]..	46
Figure 8 : Evolution du coût des machines de type SLA dites de « bureau ».	47
Figure 9: Evolution du nombre d’article traitant de la FA (scopus).....	48
Figure 10: Différents « types » d’innovation admis.....	49
Figure 11: Différents niveaux de notre recherche.	52
Figure 12: Coût machine pour les différents utilisateurs de techno FA	53
Figure 13: Consommation énergétique par secteur en Europe en 2015.....	60
Figure 14: Positionnement des travaux effectués (Efficacité Energétique).	61
Figure 15: Sandwich à cœur viscoélastique [3].	63
Figure 16: Apport des solutions développées.....	64
Figure 17: Contrôle actif passif des vibrations.	65
Figure 18: Élément fini de type coque-solide	66
Figure 19: Premier mode de déformation d’un rail [ACL9].....	67
Figure 20: Exemple de structure modélisable par l’EF SHB8PSE [ACL13].	68
Figure 21: Exemple de stratifiés unidirectionnel [9]	69
Figure 22: Evolution du facteur de perte (R 1, B 2, J 3) [ACL10].....	69
Figure 23: Evolution du facteur de perte pour les premiers modes	70
Figure 24: Enjeux d’adoption de la FA selon un panel de 30 experts [10].	71
Figure 25: Degré de maturité des pièces conçues en FA [11].....	72
Figure 26: Sandwich type nid d’abeilles, (a) classique [15], (b) hiérarchique [16]	73
Figure 27: Structure composite amortissante par impression 3D.....	73
Figure 28: Problématiques de recherches abordées aux différents niveaux.....	74

Figure 29: Modélisation à 2 échelles de matière à propriétés amortissantes [20].....	75
Figure 30: Principe de la technique FDM (ou FFF) [22].....;	75
Figure 31: Benchmark proposé pour la qualification des imprimantes FDM [ACL6].....	76
Figure 32: Conception de filament aux propriétés amortissantes	76
Figure 33: Nouvelle machine d'impression pour les structures amortissantes.....	77
Figure 34: Boucle de recyclage pour la revalorisation par FA de TP [14].....	88
Figure 35: Paramètres du circuit court [C-ACTI8].....	89
Figure 36: Etapes pour la qualification du recyclage des TP [ACL11].....	90
Figure 37: Evolution de la limite d'élasticité du PLA suite à 5 étapes de recyclage.....	90
Figure 38: Boucle de recyclage pour le projet GreenLocal3D [14]	91
Figure 39: Positionnement des travaux effectués (Economie Circulaire)	92
Figure 40: Circuit nécessaire au pré-traitement des thermoplastiques usagés	94
Figure 41: Extrusion de 4 types de plastique usagés [RM8].....	95
Figure 42: Défaillance en cisaillement des éprouvettes d'essai de la norme ASTM D638	96
Figure 43: Impact sur le poids des structures des thermoplastiques ARKEMA [3]	104
Figure 44: Structure architecturée à différentes échelles [4].....	108
Figure 45: Bandes d'arrêts suite à l'utilisation de méta-matériaux [5].....	111
Figure 46: Publications des laboratoires français sur la notion d'EC (Elsevier Scopus)...	112
Figure 47: Contexte de recherche projet GreenFabLab [7].....	115
Figure 48: Evolution de la recherche du laboratoire ERPI.....	118

Acronymes des Partenaires

LRGP : Le Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (UMR 7274) est une unité mixte de l'Université de Lorraine.

INRIA (MFX): Laboratoire lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7503), commune à plusieurs établissements.

IJL : Institut Jean Lamour, il rassemble, au sein d'une unité mixte de recherche (UMR 7198) CNRS et Université de Lorraine, des scientifiques de différentes disciplines couvrant les domaines suivants : matériaux, métallurgie, plasmas, surfaces, nanosciences, électronique.

CHU : Centre Hospitalier Régional Universitaire de référence dans la région Grand Est, le CHRU de Nancy regroupe les Hôpitaux Urbains au centre de Nancy.

IRR : L'Institut Régional de Réadaptation (IRR) est identifié comme l'établissement hospitalo-universitaire de Médecine Physique et de Réadaptation (MPR) de la Lorraine.

LEM3 : Le LEM3 est une Unité Mixte de Recherche n° 7239. Les domaines d'activité du LEM3 concernent les Matériaux, la Mécanique, l'étude des Microstructures et des Procédés.

LIST MRT : « Materials Research and Technology ». Laboratoire luxembourgeois qui cible ses travaux de recherche sur les matériaux avancés et les nanotechnologies.

STG Fribourg : Societal Transition Group : Laboratoire de science humaines engagé dans la recherche sur la gouvernance des flux de ressources inter et transnationaux et leurs impacts biophysiques.

Liste de Tableaux

Tableau 1	Récapitulatif des enseignements.....	20
Tableau 2	Récapitulatif de la production scientifique.....	33
Tableau 3	Caractéristiques de la FA favorisant l'innovation.....	51
Tableau 4	Terminologie pour le recyclage des plastiques [10].....	87
Tableau 5	Filaments composites recyclés	95

CHAPITRE 1

Synthèse des activités d'enseignement, administratives et autres responsabilités collectives

1 CURRICULUM VITAE.....	17
1.1. FORMATION ET DIPLOMES.....	18
1.2. PARCOURS PROFESSIONNEL.....	18
2 ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET DE VALORISATION PEDAGOGIQUE ...	20
2.1 DESCRIPTION DES ENSEIGNEMENTS EFFECTUES.....	20
2.2 ENSEIGNEMENTS CLASSIQUES.....	21
2.3 ENSEIGNEMENTS DE TYPE FORMATION CONTINUE	22
2.4 NOUVELLES FORMES D'ENSEIGNEMENT	23
3 ACTIVITES D'ADMINISTRATION ET AUTRES RESPONSABILITES COLLECTIVES.....	25
3.1 RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES LIEES A LA PEDAGOGIE.....	25
3.2 RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES LIEES A LA RECHERCHE.....	25
4 ACTIVITES DE RECHERCHE ET DE VALORISATION SCIENTIFIQUE	26
4.1 PROJETS DE VALORISATION SCIENTIFIQUE.....	26
4.2 LISTE DES THESES CO-DIRIGEES ET MASTERS ENCADRES	28
4.3 PARTICIPATION A DES JURYS.....	30
4.4 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE	31
5 PRODUCTION SCIENTIFIQUE	33

1 CURRICULUM VITAE

Docteur en Mécanique

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure en Génie des Systèmes et de l'Innovation ENSGSI-ERPI

Identité

Nom : BOUDAOU
Prénom : Hakim
Age : 43 ans
Date de naissance : 20 juillet 1976
Lieu de naissance : Pont-à-mousson (France)
Nationalité : Française

Adresses

Professionnelle : ENSGSI
8, Rue Bastien Lepage
BP 90647
54010 Nancy Cedex

Téléphone prof. : 03 83 37 52 49
Téléphone personnel : 03 83 19 32 39
Téléphone mobile : 06 20 74 71 61
Adresse électronique : hakim.boudaoud@univ-lorraine.fr
Adresse personnelle : 14 rue du pont de morts, 57000 Metz

1.1 Formation et Diplômes

- **Doctorat en Mécanique de l'Université de Metz devenue Université de Lorraine (UL)**
(soutenu le 30 novembre 2007)

2004 / 2007 **Doctorat de Mécanique. (Section 60)**
Université Paul Verlaine Metz.
Intitulé de la thèse: Modélisation de l'amortissement actif-passif des structures sandwichs
Date et lieu de soutenance: 30 novembre 2007 à Metz
Rapporteurs:
- Etienne Balmès (Ecole Centrale Paris)
- Erasmo Carrera (Politecnico di Turino)
Examineurs:
- Michel Potier Ferry (LPMM Metz)
- Lahcen Azrar (Département de Mathématiques, FSTT Tanger)
- Benoît Petitjean (EADS Suresnes)
Directeurs:
- El Mostafa Daya (LPMM Metz)
- Salim Belouettar (CRP Henri Tudor Luxembourg)

2003 / 2004 **DEA Matériaux, mécanique, structures et procédés à Metz.**

1997 / 2000 **Ingénieur de l'école Centrale de Lille. Option : Génie Mécanique.**

1.2 Parcours professionnel

- **Recherche et enseignement**

2007-2009 Chercheur CNRS. **Post-Doctorat** sur contrat ANR Instabande.
Mise en œuvre d'un logiciel métier dédié à la simulation globale des phénomènes de transport de bandes minces.

2004 Laboratoire de physique et matériaux de Metz. Stage de DEA 5 mois.
Etude par éléments finis des contraintes résiduelles en usinage.
Simulation sous environnement Abaqus **des effets thermiques de l'UGV.** Mise en place de modèle via des sous-routines permettant de caractériser le comportement thermomécanique du matériau.

- 2000** IRSID (Arcelor). Stage de 6 mois.
Optimisation des moyens de contrôle des défauts de l'acier. Elaboration de modèles pour la caractérisation de la propreté inclusionnaire in-situ lors de la coulée continue. Caractérisation par spectrométrie optique.
- 1999-2000** Laboratoire de mécanique de Villeneuve d'Ascq. Projet recherche (200 h).
Régulation d'un four autoclave, conception de matériaux composites.

- **Expérience industrielle**

- 2001-2002** AINBAIDA. (1an)
Responsable de production dans une entreprise de fabrication de lessive, gestion de la chaîne et de l'équipe.
- 2000-2001** ANDERSEN. (1 an)
Consultant pour l'industrie. Principaux clients : Arcelor-Mittal, Vallourec et PSA. (1 an)
- Optimisation de la commande d'un laminoir à froid tandem. (Arcelor Mittal)
- Planification de la norme ISO 14001. (Vallourec)
- Intégration et formation des équipes PSA à hyper/shape CATIA afin d'améliorer la conception pilotée par simulation. (PSA)
- 1998-1999** Darty logistique Réalisation d'un système de réapprovisionnement automatique de type EDI sous environnement visual Basic et Access.

2 ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET DE VALORISATION PEDAGOGIQUE

2.1 Description des enseignements effectués

De septembre 2009 à ce jour

Maître de Conférences

Poste section 60

Ecole Nationale Supérieure en Génie des Systèmes Industriels

ENSGSI-UL-Nancy

Code	Matière	Etablissement	Niveau	CM	TD	TP
GME6	RDM	ENSGSI	1AI	8h	12h	8h
GME6-B	MMC	ENSGSI	2AI	8h	12h	12h
GME2	Thermique	ENSGSI	1AI		20h	
GME9	Vibration	ENSGSI	2AI	16h	12h	12h
GME4	RDM	ENSGSI	1AI			24h
MMI3	Modélisation	ENSGSI	1AI			16h
CI3	Conception	ENSGSI	1AI	4h	12h	
PI	Projet industriel	ENSGSI	1AI	10h	4h	
Méca	Mécanique du Solide Indéformable	Polytech Nancy	2 AP		20h	
Formation continue						
Introduction à la Fabrication additive		Divers	Master 2 et +	4h	4h	
Premier pas en Fabrication additive		LF2L	Master 2 et +	2h	4h	16h
Nouvelles Formes d'enseignement						
Functionnal Material and Design		LF2L	Master 2 +		15h	
Material Resistance Escape Game.		ENSGSI	1AI		20h	

Tableau 1 : Récapitulatif des enseignements (en h éq. TD/étudiant)

2.2 Enseignements classiques

Enseignement : ENSGSI, Masters Design Global et Polytech Nancy

Dès mon arrivée à l'ENSGSI, il m'a été demandé de reprendre, suite au départ à la retraite d'un collègue, le pôle Enseignement Mécanique de l'école ainsi que de collaborer aux Pôles Thermiques et enfin, dans une moindre mesure, de créer des passerelles avec le pôle Ingénierie de la Conception.

L'ensemble des enseignements récurrents que j'effectue à l'ENSGSI peut être synthétisé comme suit:

Code Matière Etablissement niveau CM TD TP

Pôle GME (Génie mécanique et énergétique)

GME6 Résistance des matériaux (RDM), ENSGSI 1AI **8h CM, 12h TD et 24h TP**

Ce cours s'intéresse à l'approche analytique, il fait le lien entre l'expérimentation et une théorie simple de modélisation de la mécanique. Les différentes hypothèses simplificatrices sont explicitées et la notion de modèle est détaillée. Pour la validation par simulations numériques : nous présentons la méthode des Eléments finis et différences finies et enfin proposons une application sur le logiciel EF Abaqus.

GME4-TP mécanique, ENSGSI 1AI réalisé sur les bancs de l'ENSEM, Flexion simple, Flexion composée et étude de système réticulé. **24h TP**

Dans ce module de TP, il s'agit de compléter l'approche conceptuelle acquise dans les modules de mécanique du solide déformable et de thermique et de mettre en relation, sur le terrain, ces disciplines acquises de façon nécessairement un peu dissociée dans chacun de ces modules.

GME6-B Mécanique des milieux continus (MMC), ENSGSI 2AI **8h CM, 12h TD et 24h TP**

Dans ce module, il s'agit de présenter les outils de base de la mécanique des milieux continus. L'étudiant doit pouvoir modéliser et résoudre un problème simple de mécanique du solide couplant élasticité et plasticité. De plus, il doit être apte à utiliser la méthode des éléments finis pour simuler le comportement d'une structure soumise à des sollicitations quasi-statiques.

GME9 Vibrations, ENSGSI 2AI **16h CM, 12h TD et 12h TP**

Ce module vise à faire comprendre les aspects fondamentaux liés aux phénomènes de vibrations (aspects énergétiques, transmission, réflexion).

Il permet aux étudiants d'être aptes à modéliser un système discret ou continu, en faire l'analyse vibratoire et étudier sa réponse temporelle ou fréquentielle. Enfin, à titre d'expérimentation au moyen de la méthode des éléments finis, ils simulent le comportement d'une structure soumise à des sollicitations harmoniques.

GME2 Thermique, ENSGSI 1AI **20h TD**

Ce module permet d'identifier et d'expliquer les principaux modes de transfert de chaleur et de masse, ainsi que d'expliquer et d'appliquer les notions de bilan et de conservation et

enfin, d'interpréter simplement un système thermique simple et de résoudre les échanges thermiques au sein de ce système (conductif, convectif, radiatif)

Pôle MMI (Mathématiques et Modélisation pour l'Ingénieur)

MMI3-Modélisation et calcul scientifique, ENSGSI 1AI **16h TP**

Dans ce module, il s'agit de simuler analytiquement et/ou numériquement un problème direct issu des sciences de l'énergie ou de la matière, en ayant au préalable écrit les équations du modèle utilisé. Ceci passe donc par une sensibilisation à la simulation numérique. L'acquisition des méthodes d'analyse numérique de base et des techniques modernes de programmation scientifique (le logiciel support est Maxima) est effectuée dans un contexte orienté utilisateur.

Pôle CI (Conception Innovation)

CI3-Conception Fabrication, ENSGSI 1AI **4h CM 12h TD**

Ce cours de construction mécanique vise à faire aborder un langage (le dessin industriel) et les moyens de communication associés. Il propose ainsi de répondre à quatre objectifs: maîtriser les outils et modes de représentation industriels, utiliser les principales méthodes d'analyse de mécanismes, connaître les mécanismes de base et leur détermination et être en mesure de proposer des évolutions des ensembles mécaniques.

Le cours trouve une application à travers la (re) conception d'un mécanisme simple avec un logiciel de CAO, et sa réalisation en prototypage rapide (FabLab)

PI-Projets Industriels, ENSGSI 1AI **10h CM 4h TD**

On peut ajouter à cet ensemble de la gestion de projets et des encadrements de stage de dernière année, ainsi que d'étudiants issus du master IDEAS pour un service annuel d'environ 300 h TD. Je suis aussi par ailleurs intervenu quelques années à Polytech Nancy pour dispenser des enseignements en mécanique du solide indéformable, cinématique et dynamique pour les étudiants de 2^{ème} année prépa pour des services d'environ 20h annuelles.

2.3 Enseignements de type formation continue

A partir de 2011 j'ai soutenu le développement de la fabrication additive open source au sein de l'ENSGSI et ce dans un objectif initial d'apport pour le design. (<https://fr.scribd.com/document/57269270/Fabrication-Additive-Et-Open-Design-Article-Complet-web>). Très vite, le développement des imprimantes 3D grand public, de la fabrication additive en entreprise et des FabLabs, a mené à de nombreux questionnements sur ces technologies au sein des communautés de chercheurs et des ingénieurs de bureaux d'études. J'ai dès lors développé deux enseignements s'adressant à des publics plus professionnels et permettant de répondre le premier à travers une méthodologie de type QQOCP à une large définition de la fabrication additive et le deuxième à l'application directe et concrète de cette technologie dans un environnement de type FabLab.

“The 5 W from the Additive Manufacturing”

Formation continue, école d’été INRA. Niveau M2, Doctorat.

4h CM 4hTD

J’ai développé un module en anglais pour introduire et préciser la notion de fabrication additive et permettre l’utilisation de cette technologie par des chercheurs, ingénieurs ou spécialistes d’un domaine précis.

Objectifs :

- Comprendre ce qu’est la fabrication additive de manière précise.
- Historique, personnes, technologie, opportunités, moyens financiers, etc ...
- Etre capable de définir une problématique scientifique et de la confronter aux potentiels de la fabrication additive.
- Pouvoir redéfinir le ou les cahiers des charges liés au besoin.
- Estimer le coût et les solutions technologiques applicables.

“How to 3D Print almost anything?”

Formation continue, école d’été CNRS et INRA. Niveau M2, Doctorat. **2h CM 4hTD 16h TP**

J’ai réalisé un support de cours sous forme PowerPoint de 60 diapositives et articles de référence, ainsi qu’une interface numérique sous plateforme GitHub de l’ensemble du processus permettant de mener à la création d’une pièce en Fabrication Additive open source.

Objectifs :

- Comprendre les différents éléments de la chaîne de fabrication additive.
- Etre capable de créer un fichier source STL par une méthode de numérisation directe (guide sur le potentiel et l’utilisation des scanners 3D) ou indirecte (au moyen d’un logiciel Pro [Solidworks] ou open source SketchUp ...)
- Etre capable d’évaluer les besoins d’un point de vue propriétés géométriques, matérielles et autres d’une pièce destinée à être imprimée.
- Comprendre les possibilités des différentes technologies Open Source à savoir FDM, (Filament fondu), SLA (stéréographie laser par lumière UV) et SLS (frittage laser de poudre).
- Réaliser leur pièce au LF2L.

2.4 Nouvelles formes d’enseignements

Depuis quelques années l’ENSGSI est leader au sein de l’UL pour le développement de nouvelles méthodes d’enseignement (classe inversée, Mooc, etc...). Dans cet esprit, j’ai développé, aidé de Fabio Cruz et Brunelle Marche, deux enseignements reposant sur des approche « **Do It Yourself** » et « **Serious Game** » .

Functional Material and Design.

Master IDEAS, niveau M2. J’ai développé et réalisé un module complet d’enseignement (**12h TD**) basé sur une approche Do It Yourself. Celui-ci utilise la plateforme LF2L comme

support et permet aux étudiants d'aborder des notions telles que les matériaux intelligents, les propriétés des structures, les fonctions de secondaires des produits et ce tout en montant en compétence sur l'impression 3D, l'Arduino, les capteurs et le contrôle.

Le but du module est de permettre aux étudiants de comprendre les différentes échelles permettant d'introduire des propriétés dites « intelligentes » dans un produit, et ce en analysant l'ensemble de la chaîne de conception depuis le matériau, en passant par la structure et jusqu'au pilotage électronique ; le tout allant jusqu'à la réutilisation en fin de vie.

Material Resistance Escape Game.

ENSGSI 1AI (20h TD). J'ai encadré et aidé Brunelle Marche (ATER ENSGSI) pour la mise en place d'un enseignement en Résistance des Matériaux reposant sur une trame de fond de type Escape Game (jeux d'évasions en grandeur réelle). Ce support de type « serious game » permet d'aborder différentes notions de la RDM, à savoir les notions de poutres, efforts, contrainte calcul de structure et dimensionnement sous les hypothèses d'Euler Bernoulli. Ce support met l'accent sur la partie modélisation d'un système dans un environnement réel et permet aux étudiants de mieux percevoir les finalités de l'enseignement (un travail complémentaire en autonomie reste cependant nécessaire pour la prise en main des calculs routiniers de type torseur ou équation de la déformée).

J'envisage l'année prochaine de développer une version numérique de cet enseignement, à savoir concevoir cet enseignement en monde isométrique 3D, puis en réalité virtuelle. Pour ce faire, je bénéficierai d'une aide issue du projet européen INEDIT dont l'ERPI est partenaire, ainsi que des nombreux outils de développement du LF2L (Oculus, environnement immersif ...).

3 ACTIVITES D'ADMINISTRATION ET AUTRES RESPONSABILITES COLLECTIVES

3.1 Responsabilités Administratives liées à la pédagogie

2017-... **Membre élu du conseil d'école**, représentant du collège MCF aux différentes décisions concernant la vie de l'école; élection du directeur, approbation des comptes et de la gestion financière, validation et propositions pour les grandes orientations de l'école...

2009-2017 **Responsable des projets industriels en première année ingénieur à l'ENSGSI**, collaboration avec les PME-PMI de Lorraine, principalement sur Nancy et Epinal, suivi des projets innovants et de leur valorisation, OSEO, ANVAR. Développement d'un pôle d'entreprises partenaires dans le cadre Inno-PME et à travers le pôle Matérialia.

3.2 Responsabilités Administratives liées à la recherche

2018-... **Correspondant** de l'institut Carnot Iceel, participation aux différentes réunions et ateliers scientifiques, à la gestion des moyens financiers et humains, intervention aux rendez-vous Carnot principalement sur l'axe Fabrication additive.

2014-... **Responsable Scientifique de l'axe Fabrication Additive** de la plateforme LF2L. Supervision des différents travaux réalisés en fabrication additive, suivi de l'investissement, équipement.

2006-2007 **Co-organisateur** de la journée des doctorants (école doctorale EMMA), mise en place du planning de la journée, regroupement des résumés et posters, réservation des salles, écriture d'un mini-proceeding.

4 ACTIVITES DE RECHERCHE ET DE VALORISATION SCIENTIFIQUE

4.1 Projets de valorisation scientifique

Participation au montage de dossiers, coordination et suivi :

Efficacité énergétique:

Projet 1 (PEE1):

Contrat de Recherche avec l'IRT-M2P (Mars 2015- Sept 2016): « Faisabilité technico-économique d'une pièce de structure composite pour l'automobile dans le cadre du projet de recherche propre Fast RTM ». Responsabilité : Pilotage avec M. Camargo (porteur).

Budget: 94 000€.

Projet 2 (PEE2):

Projet CNRS Région (2016-2018): « Potentiel de la technologie d'impression 3D dans la conception de modules membranaires innovants ». Responsabilité : Porteur du projet pour ERPI.

Budget: 40 000 €

Partenaires : LRGP (coordinateur).

Projet 3 (PEEx): déposé en cours d'évaluation

Projet ANR-PRCI (2020-2024) : « Mechanical Metamaterials Modelling, Design and Fabrication: Application to Spectral Damping » Projet portant sur une meilleure compréhension des aspects micro-structuraux des matériaux composites émergents obtenus par fabrication additive. Le projet comprend la création, la conception et le développement de ces structures permettant des avancées pour l'amortissement du bruit et des vibrations. Responsabilité: Porteur pour ERPI.

Budget demandé: 92 000€.

Partenaires: LEM3 (coordinateur), LIST.

Economie circulaire:

Projet 1 (PEC1):

Appel à projets intra-CARNOT (2016): « GREEN_COMPO_3D. Valorisation en circuit court de déchets thermoplastiques pour la conception par impression 3D de structures composites ». Responsabilité: Porteur du projet avec M. Camargo.

Budget: 14 000 €.

Projet 2 (PEC2):

Projet Région Alsace, Champagne Ardenne Lorraine (2016): « GREENFAB-LAB - Recyclage de polymères en circuit court pour la fabrication additive open source: caractérisation des matières, du processus et de l'environnement usager. » Responsabilité: Porteur du projet avec M. Camargo.

Budget: 44 000 €.

Projet 3 (PEC3):

Contrat de recherche collaborative avec l'entreprise PLASTIF (2019-2020): « Qualification d'un plastique usagé pour son recyclage par impression 3D. Discrimination des plastiques usagés destinés à être revalorisés, caractérisation des propriétés mécaniques et dimensionnelles. » Responsabilité: Porteur du projet.

Budget: 17 000 €.

Partenaire: Plast'if

Projet 4 (PECx): déposé en cours d'évaluation

Projet ANR-PRCI : « GREENLOCA3D - Short circuit recycling for additive manufacturing ». Le projet GreenLocal3D se concentre sur le recyclage en court-circuit des déchets plastiques post-consommation à récupérer et à valoriser par des procédés de fabrication additifs. Responsabilité: Porteur et coordinateur.

Budget demandé: 977 000€ dont 142 000€ pour ERPI.

Partenaires: LRGP, INRIA, LIST.

Santé :

Projet 1 (PES1) :

Projet LUE dans le cadre du programme IMPACT PIA 2 : « ORTHOSIS 4D - Passive and Active 3D printed orthosis: modeling, simulation and applications ». Responsabilité: Porteur du projet pour ERPI.

Budget: 70 404 €

Partenaires: INRIA (MFX), IJL, LRGP, CHU.

4.2 Liste des thèses co-dirigées et masters, ingénieur et post-doc encadrés

4.2.a. Thèses co-dirigées

Au cours de la période écoulée, j'ai « officiellement » (avec demande d'ACT) co-encadré 2 thèses inscrites à l'école doctorale RP2EE ainsi que 2 autres thèses sans demande d'ACT inscrites à l'école doctorale EMMA. J'ai par ailleurs encadré des stages de masters inscrits dans différents départements de l'U.L.

Efficacité énergétique:

Komlan Akoussan : « Modélisation et conception de structures composites viscoélastiques à haut pouvoir amortissant » Soutenue le 09-11-2015.

Directeurs : El Mostafa Daya. LEM3 Université de Lorraine. Erasmo Carrera Politecnico di Torino

Co-Directeur : Hakim Boudaoud. ERPI université de Lorraine.

Komla Gaboutou Lougou : « Méthodes multi-échelles pour la modélisation des vibrations de structures à matériaux composites viscoélastiques » Soutenue le 20-03-2015.

Directeur : El Mostafa Daya. LEM3 U.L.

Co-Directeur : Hakim Boudaoud. ERPI U.L.

Economie circulaire:

Fabio Alberto Cruz Sanchez : “Methodological proposition to evaluate polymer recycling in open-source additive manufacturing contexts” Soutenue le 09-12-2016.

Directeur : Mauricio Camargo. ERPI U.L.

Co-Directeur : Hakim Boudaoud. ERPI U.L.

Sandrine Hoppe LRGP U.L.

Pavlo Santander Tapia : “Valorisation en circuit court de déchets thermoplastiques pour la conception par impression 3D de structures composites.” En cours, commencée le 01-10-2017.

Directeur : Mauricio Camargo. ERPI U.L.

Co-Directeur : Hakim Boudaoud. ERPI U.L.

Co-encadrement de deux thèses débutant en 2019.

Efficacité énergétique:

Lara Garcia :

"Structures multi-matériaux à zones d'amortissements spatialement contrôlées par impression 3D".

Financement Agence D'innovation de la Défense, DGA. En cours, commencée le 01-10-2019
Directeur : Cécile Nouvel. LRGP U.L.
Co-Directeur : Hakim Boudaoud. ERPI U.L.

Economie circulaire:

Candidat à recruter :

"Modélisation et caractérisation des propriétés amortissantes des structures composites obtenues par fabrication additive à base de matériaux issus des déchets".

Financement ministère.

Directeur : Hakim Boudaoud. ERPI U.L.

Co-Directeur : El Mostafa Daya. LEM3 U.L.

4.2.b. Master, ingénieur et Post-doc encadrés

Nomenclature:[RM]: Rapport de master, [RI]: Rapport Ingénieur, [RP]: Rapport de post-doctorat.

Efficacité énergétique:

Master :

[RM1] "Conception de produits mécanique dans environnement immersif" (2011). **Ahmad El Khatib.**

[RM2] "Conception d'un outil de modélisation. Projet industriel composite pour l'automobile" (2015). **Guillermo Pizarro.**

[RM3] "Potentiel de l'impression 3D pour la conception de contacteurs membranaires à fibres creuses" (2017). **Bilal Cheihabou.**

[RM4] "Conception and 3D Printing of Hollow Fiber Heat Exchanger" (2018). **Peter Thanos.**

[RM5] "Elaboration de structures multi-polymères par impression 3D" (2018). **Ali el Akroud.**

Ingénieur :

[RI1] "Conception d'un outil de modélisation. Projet industriel composite pour l'automobile" (2015-2016) 18 mois. **Guillermo Pizarro.**

Economie circulaire:

Post-doctorat :

[RP1] " Le concept du Green Fablab : Une approche distribuée pour le recyclage de polymères en circuit-court dans le cadre de la fabrication additive open-source " (2017-2018). 12 mois. **Fabio Cruz.**

Master :

[RM6] "Prototypage rapide et fabrication additive" (2011). **Emmanuel Gilloz.**

[RM7] "Proposition d'un protocole d'expérimentation standard pour la fabrication additive Open Source" (2013). **Fabio Cruz.**

[RM8] “Analysis of the recycling of different thermoplastics for 3d printing” (2017). **Antônio Luís Araújo**.

[RM9] “Model of Reverse Logistic for the compilation of plastic to recycling for the Impression 3D in the context of a Fab Lab” (2017). **Pavlo Santander Tapia**.

[RM10] “A smart grid of plastics. Technical conditions for the sorting and pre-step evaluation for a “factory of the future”” (2019). **Anamaria Barrera Bogoya**.

[RM11] “Characterization and evaluation of a direct extrusion system of pellets for 3d printing of recycled materials” (2019). **Arthur Alexandre**.

Santé:

Post-doctorat :

[RP2] “Amélioration des propriétés d’interfaces pour la conception d’orthèses par fabrication additive ” (2019-2020). 14 mois. **Juliana Serna Rodas**.

Master :

[RM12] “Développement d’un modèle expérimental 3D de fente olfactive” (2018). **Kleitton Higor Lima dos Santos**.

[RM13] “Formulation des filaments TPE pour l’amélioration de l’adhésion interfaciale avec le PLA pour l’impression 3D” (2019). **Jennifer Andrea Villamil Jimenez**.

4.3 Participation à des Jurys

Outre mes étudiants en thèse et en Masters, j’ai été membre de jury et rapporteur de différents Masters de la mention « Design Global » spécialité Management de l’innovation et du design industriel. En moyenne, je participe depuis 2006 à deux jurys de master par an et 5 jurys de diplôme d’ingénieur.

Participation à des jurys de thèse en tant qu’examineur.

Nom du diplômé : Fessal Kpeky, Date : 15 février 2016.

Titre de la thèse : « Formulation et modélisation des vibrations par éléments finis de type solide-coque : application aux structures sandwichs viscoélastiques et piézoélectriques. »

4.4 Rayonnement Scientifique

Co-développement d’un logiciel libre pour la recherche.

Je participe depuis une dizaine d'années au développement du logiciel MANITOO. Développé en C++, il permet la résolution de problèmes non linéaires par la Méthode Asymptotique Numérique. Les problèmes sont donnés sous forme élémentaire discrète par utilisation de la Méthode des Éléments Finis (Base d'éléments 2D, 3D et coque). Les termes d'ordre élevés peuvent être calculés manuellement ou par Différentiation Automatique en mode direct par surcharge d'opérateurs. Plus récemment, l'automatisation de la résolution de problèmes non linéaire en dynamique des structures a été ajoutée et les dernières avancées ont été présentées au CSMA 2019. A ce jour le logiciel dispose d'un riche panel de fonctionnalités et a prouvé sa capacité à simuler de nombreux problèmes issus de l'ingénierie. En perspective nous prévoyons d'intégrer un langage de type UFL afin de pouvoir travailler directement avec des formulations faibles.

<https://csma2019.sciencesconf.org/270923>

<https://www.projet-plume.org/fr/relier/manitoo>

Participation à des sociétés savantes

NIDAGROUP : Groupe de recherche sur la Caractérisation Mécanique des Matériaux Composites de type sandwichs: Approches numériques et expérimentales

FNR Foresight Young Researchers. Groupe de travail regroupant les jeunes chercheurs ayant bénéficié de thèses financées par le ministère luxembourgeois.

Evaluateur de projets Scientifiques Internationaux

1. Avril 2019. Evaluateur pour l'ANR sur les thématiques composite et Fabrication Additive.

Participation à des Comités de sélection pour des postes de Maître de Conférences

2015- UL – ENSGSI – ERPI (Section 60)

2016- UL – ENSGSI – LEMTA, Nancy (Section 62)

Participation à des réseaux scientifiques

Participation au Réseau des Mécaniciens

Participation au Réseau Français des Fablabs

Participation à l'association en Calcul des Structures et Modélisation (CSMA)

Participation à des comités de programme congrès, comité de lecture, présidence de session dans congrès

Membre du comité scientifique du congrès ESA-COMP 2019. Thématique matériau et structures composites. (<https://sites.google.com/view/esa-comp/home>)

Présidence de session à EMI conference Lyon 2019. Thématique "Additive manufacturing and recycling".

(<https://emilyon2019.sciencesconf.org/resource/page/id/1>)

Présidence de session à ESA-COMP 2019 sur la thématique “Composites by Additive Manufacturing”. (<https://sites.google.com/view/esa-comp/home>)

Relecture d’articles pour des revues internationales

Relecture d’article pour différentes revues telles que :

MAMS. Mechanics of Advanced Materials and Structures. (1 à 2 par an depuis 2009)

Composite structures. (6 depuis 2011)

Additive Manufacturing. (3 par an depuis 2016)

5 PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Production/année	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019 (soumis)	Total
Revue Internationale			1	2		1	1	1	2	2	1	2	1, (4)	18
Chapitre d'Ouvrage										1				1
Communications avec actes Internationale	2	1			1		1	1	1				1	8
Communications avec actes Nationale				1					1				2	4

Tableau 2 : Récapitulatif de la production scientifique

Articles dans des journaux internationaux avec comité de lecture indexés (ACL)

[ACL1] [“A shell finite element for active-passive vibration control of composite structures with piezoelectric and viscoelastic layers”](#) H Boudaoud, S Belouettar, EM Daya, M Potier-Ferry. **Mechanics of Advanced Materials and Structures** 15 (3-4), 208-219 (2008).

[ACL2] [“A numerical method for nonlinear complex modes with application to active-passive damped sandwich structures”](#). H Boudaoud, S Belouettar, M Potier-Ferry. **Engineering Structures** 31 (2), 284-291 (2009).

[ACL3] [“Damping analysis of beams submitted to passive and active control”](#) H Boudaoud, EM Daya, S Belouettar, L Duigou, M Potier-Ferry. **Engineering Structures** 31 (2), 322-331 (2009).

[ACL4] [“Object-oriented design to automate a high order non-linear solver based on asymptotic numerical method”](#) A Lejeune, F Béchet, H Boudaoud, N Mathieu, M Potier-Ferry. **Advances in Engineering Software** 48, 70-88 (2012).

[ACL5] [“Automatic solver for non-linear partial differential equations with implicit local laws: Application to unilateral contact”](#). A Lejeune, H Boudaoud, M Potier-Ferry, I Charpentier, H Zahrouni. **International Journal for Numerical Methods in Engineering** 94 (9), 850-867 (2013).

[ACL6] [“Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing”](#). Fabio Cruz Sanchez, Hakim Boudaoud, Laurent Muller et Mauricio Camargo. **Virtual and Physical Prototyping** 9 (3), 151-167 (2014).

[ACL7] [“Vibration modeling of multilayer composite structures with viscoelastic layers”](#). K Akoussan, H Boudaoud, EM Daya, E Carrera. **Mechanics of Advanced Materials and Structures** 22 (1-2), 136-149 (2015).

- [ACL8] [“Modeling of viscoelastic sandwich beams using solid–shell finite elements”](#). F Kpeky, H Boudaoud, F Abed-Meraim. **Composite Structures** 133, 105-116 (2015)
- [ACL9] [“Vibration modeling of large repetitive sandwich structures with viscoelastic core”](#). KG Lougou, H Boudaoud, EM Daya, L Azrar. **Mechanics of Advanced Materials and Structures** 23 (4), 458-466 (2016)
- [ACL10] [“Sensitivity analysis of the damping properties of viscoelastic composite structures according to the layers thicknesses”](#). K Akoussan, H Boudaoud, Y Koutsawa, E Carrera. **Composite Structures** 149, 11-25. (2016)
- [ACL11] [“Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues”](#). FAC Sanchez, H Boudaoud, S Hoppe, M Camargo. **Additive Manufacturing** 17, 87-105. (2017)
- [ACL12] [“Numerical method for nonlinear complex eigenvalues problems depending on two parameters: Application to three-layered viscoelastic composite structures”](#). K Akoussan, H Boudaoud, EM Daya, Y Koutsawa, E Carrera. **Mechanics of Advanced Materials and Structures** 25 (15-16), 1361-1373 (2018)
- [ACL13] [“Linear and quadratic solid–shell finite elements SHB8PSE and SHB20E for the modeling of piezoelectric sandwich structures”](#). F Kpeky, F Abed-Meraim, H Boudaoud, EM Daya. **Mechanics of Advanced Materials and Structures** 25 (7), 559-578 (2018).
- [ACL14] [“Closed Loop Supply Chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: A MILP-based optimization approach”](#) P. Santander, F. Cruz, H. Boudaoud, M. Camargo. *Accepté à Resources, Conservation and Recycling.* (2019)

Pour Information, articles soumis (ACLS)

- [ACLS1] [“A multiscale methodological approach for damping prediction and vibration analysis of viscoelastic heterogeneous materials and beam structures”](#) K.G. Lougou, E.M. Daya, H Boudaoud soumis à **Mechanics of Advanced Materials and Structures**. (2019)
- [ACLS2] [“Plastic recycling in additive manufacturing: a systematic literature review and opportunities for the circular economy”](#). F. A. Cruz, H. Boudaoud, M. Camargo, J. M. Pearce soumis à **Journal of cleaner Production**. (2019)
- [ACLS3] [“Open Source Technology Readiness Level Assessments: Application to Distributed Recycling for Additive Manufacturing”](#) A. B. Bogoya, F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, J.M. Pearce, M. Camargo En révision soumis à **Technology Analysis & Strategic Management**. (2019)
- [ACLS4] [“Mechanical Properties of Direct Waste Printing of Polylactic Acid with Universal Pellets Extruder: Comparison to Fused Filament Fabrication on Open Source Desktop 3D Printers”](#) A. Alexandre, F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, J.M. Pearce, M. Camargo En révision soumis à **3D Printing and additive manufacturing**. (2019)

Participation à des chapitres de livres et ouvrages collectifs (OS)

[OS-1] [“Démocratisation de la fabrication additive: impression 3D et FabLabs.”](#) H Boudaoud, V Boly. « Fabrication additive: Du prototype rapide à l'impression 3D. » Edition Dunod. C. Barlier et A. Bernard.

Communications avec actes dans des congrès internationaux (C-ACTI)

[C-ACTI 1] [“Analytical and numerical modal properties of sandwich viscoelastic and piezoelectric beams submitted to active control.”](#) H. Boudaoud, E.M. Daya, S. Belouettar DeMEASS, Turin (2006)

[C-ACTI 2] [“A new shell element for hybrid vibration control of sandwich structures.”](#) H. Boudaoud, EM Daya, S. Belouettar. Conference on Computational Structures Technology, Las Palmas de Gran Canarias. (2006)

[C-ACTI 3] [“Analytical evaluation of the effective emcc of sandwich beams with a shear-mode piezoceramic core”](#) H Boudaoud, A Benjeddou, EM Daya, S Belouettar. Proceedings of Second International Conference on Design and Modelling of Mechanical Systems, Monastir, Tunisia (2007).

[C-ACTI 4] [“Una Aproximación para la generación de Motores de Scheduling.”](#) D. Diaz, H. Boudaoud, S. Oviedo, R. Forradellas, ICPR Americas. Bogota Colombie (2010).

[C-ACTI 5] [“Automatic solver for computational plasticity based on Taylor series and automatic differentiation.”](#) A Lejeune, H Boudaoud, N Mathieu, M Potier-Ferry . XII International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications (COMPLAS XII) (2013)

[C-ACTI 6] [“Vibration modeling of sandwich structures using solid-shell finite elements.”](#) F Kpeky, H Boudaoud, H Chalal, F Abed-Meraim. 11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM 2014, the 5th European ... (2014).

[C-ACTI 7] [“Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source context: Optimization of processes and methods”.](#) F Cruz, S Lanza, H Boudaoud, S Hoppe, M Camargo. Proceedings of the 2015 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference, Austin, TX, USA (2015)

[C-ACTI 8] [“3d-printing based distributed plastic recycling: A conceptual model for closed loop supply chain design.”](#) Pavlo Santander, Fabio Cruz, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo. IEEE International Conference on Engineering. (2018)

[C-ACTI 9] [“Specific adhesion test definition for 3D printed composite structures.”](#) H. Boudaoud, A. Villamil, A el Akroud, S. Hoppe et C. Nouvel. EMI Lyon. (2019)

Communications orales nationales avec actes (C-ACTN)

[C-ACTN1] “Différentiation automatique et MAN: Application au contact unilatéral”

H. Boudaoud, A. Lejeune, M. Potier-Ferry, H Zahrouni, I Charpentier. 9e Colloque national en calcul des structures. Giens. (2009)

[C-ACTN2] “Modélisation par éléments finis de type solide-coque de structures piézoélectriques” F Kpeky, H Boudaoud, F Abed-Meraim, E.M. Daya. 22 ème Congrès français de mécanique Lyon. Association Française de Mécanique. (2015)

[C-ACTN3] “MANITOO : Solveur Orienté Objet d’Equations Non Linéaires par Méthode Asymptotique Numérique.” A. Lejeune, F. Béchet, H. Boudaoud, Y. Gaillard, N. Mathieu, F. Richard, E. Sadoulet-Reboul , P. Ventura, M. Potier-Ferry. CSMA 14ème Colloque National en Calcul des Structures. (2019)

[C-ACTN4] “Elaboration de filaments élastomère thermoplastiques pour l’impression de structures multi-polymères par dépôt de fil fondu.” A. Villamil, H. Milagres, A. el Akroud, S. Hoppe, H. Boudaoud et C. Nouvel. SFGP Nantes. (2019)

Rapports de recherche et d’expertise (AP)

[AP1] Rapport final du projet « Faisabilité technico-économique d’une pièce de structure composite pour l’automobile dans le cadre du projet de recherche propre Fast RTM», rapport remis à l’entreprise PPE (devenu IS). (Décembre 2016). Participation à la rédaction pour ERPI de Pizarro G. Camargo M, Boudaoud H.

[AP2] Rapport final du projet « « Potentiel de la technologie d’impression 3D dans la conception de modules membranaires innovants »- Partie : étude du processus, conception réalisation. (septembre 2018). Participation à la rédaction pour ERPI Boudaoud H.

[AP3] Rapport final du projet « Valorisation en circuit court de déchets thermoplastiques pour la conception par impression 3D de structures composites.». Rapport remis à l’institut Carnot ICEEL (Mars 2009). Participation à la rédaction pour ERPI de F. Cruz, H. Boudaoud, Camargo M.

[AP 4] Rapport final du projet « GREENFAB-LAB - Recyclage de polymères en circuit court pour la fabrication additive open source : caractérisation des matières, du processus et de l’environnement usager. » Rapport remis à la région Alsace, Champagne Ardenne Lorraine. Participation à la rédaction de F. Cruz. Camargo M, H. Boudaoud.

CHAPITRE 2

Fabrication additive open source un levier d'innovation

1	FABRICATION ADDITIVE ET LE CONCEPT D'OPEN SOURCE	41
1.1	LA FABRICATION ADDITIVE	41
1.2	LA FABRICATION ADDITIVE DITE 'OPEN SOURCE'	44
1.3	FABRICATION ADDITIVE SEMI 'OPEN SOURCE'	46
2	LA FABRICATION ADDITIVE UN LEVIER D'INNOVATION	48
2.1	D'UNE INNOVATION TOP DOWN A UNE INNOVATION BOTTOM UP	48
2.2	POTENTIELS D'INNOVATION DE LA FABRICATION ADDITIVE	50
3	CONCLUSION	54
4	REFERENCES	55

1 Fabrication additive et le concept « d’open source »

Si ce document avait été rédigé ne serait-ce que 5 ans auparavant, nous aurions dû certainement introduire l’ensemble des concepts de la fabrication additive. Mais voilà aujourd’hui la fabrication additive (FA) a envahi l’ensemble des secteurs d’activités et il ne se passe pas un jour sans que cette technologie ne repousse ses limites. Bon nombre de documents très fournis existent sur la FA [OS1], [1] et pour notre part nous ne rappellerons dans un premier paragraphe que quelques notions-clés qui nous serviront dans les chapitres suivants, plus précisément nous soulignerons les **spécificités** de la FA ainsi que les **usages** principaux actuels pour différents acteurs : secteur privé, citoyens et secteur public. Dans les trois sous-paragraphe suivants, nous avons choisi de manière qui peut sembler abusive de limiter l’accès de chacun des acteurs à la FA par un coût d’acquisition des machines mais nous rediscuterons de ce point dans le deuxième paragraphe.

1.1 Fabrication additive

1.1.a Définition

La fabrication additive, appelée parfois impression 3D, ou encore fabrication par dépôt successif de couches, repose sur la création de profils bidimensionnels empilés les uns sur les autres pour créer une forme physique tridimensionnelle. Cette technique a connu des développements très importants depuis sa conception par 3 Français (Alain le Méhauté, Olivier de Witte et Jean-Claude André) et son exploitation industrielle par Chuck Hull grâce à un brevet déposé en 1984.

En effet, depuis ses premiers pas où la construction de pièces se faisait à l’aide d’une résine polymère photosensible, de nombreux processus ont été mis en place et on voit aujourd’hui régulièrement émerger de nouveaux procédés. Face au nombre croissant de techniques de F.A., une classification par famille normalisée est souvent utilisée comme précisé dans [OS1].

Si l’on considère les normes ISO/ASTM 52900:2015, il y aurait sept catégories d’après lesquelles on peut classer ce large éventail de procédés (ISO/ASTM 52900:2015 [ASTM F2792]). Chacune des différentes catégories s’appuie sur des caractéristiques physiques et des phénomènes différents, et est souvent associée à des approches avec des états de la matière première spécifiques comme on peut le voir Figure 3. Plus de détails sur ces différents procédés peuvent être obtenus dans [OS1] pages 23 à 28 et nous détaillerons les principes des procédés FDM et SLS aux chapitres 3 et 4.

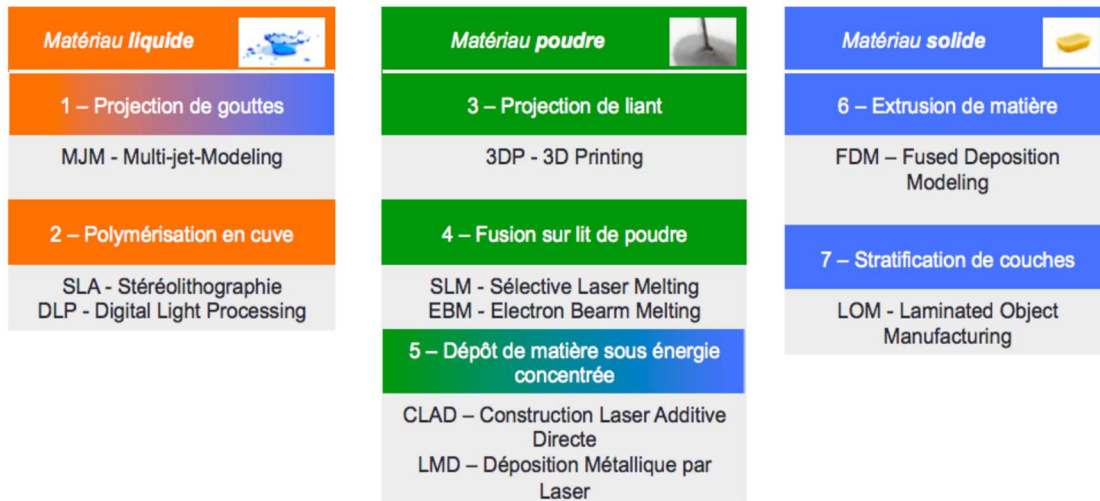


Figure 3: Familles de procédés de fabrication additive (Norme ISO 17296-2) [3]

Pour ce qui est des matériaux dits « imprimables », leur nombre ne cesse d’augmenter et il est difficile d’en dresser une liste exhaustive car pour chaque procédé une recherche intense est menée afin d’élargir la gamme de matériaux. Cette dynamique s’explique par, d’une part, un besoin croissant des consommateurs de performances mécaniques, et d’autre part, par un modèle économique des fabricants de machines qui souvent réalisent la majeure partie de leurs bénéfices au moyen de la vente de matière première. Toutefois, les procédés ne sont pas égaux quant à la diversité des matériaux utilisables ; en effet, si les méthodes 3DP par nature acceptent tout type de matière à partir du moment où cette dernière est sous une forme de poudre calibrée, les techniques de type SLA ou DLP se limitent aux résines photo-polymérisables. Pour aller au-delà des limites en matériaux utilisables, on note aujourd’hui une tendance forte, comme le précise Li et al [2], à l’utilisation de matière composite permettant d’améliorer les performances des structures imprimées. Nous présentons Figure 4 les matériaux usuellement utilisés par les techniques présentées Figure 3.

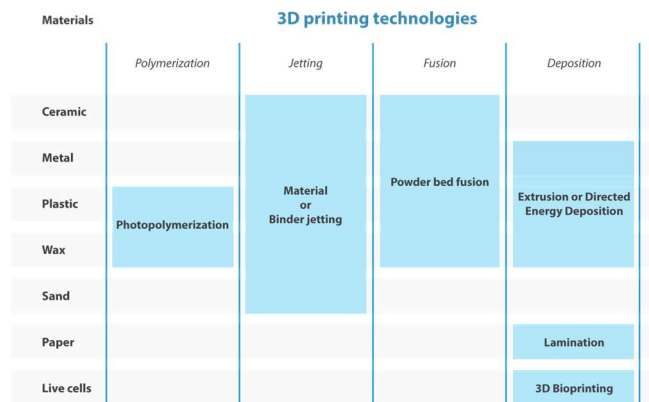


Figure 4: Type de matériaux utilisables par familles de procédés de FA [1]

Bien qu'il existe de nombreux procédés de FA tels qu'illustrés sur la Figure 3, on retrouve généralement des étapes-clés communes à chacun de ces procédés. La première concerne la conception et la modélisation jusqu'à l'obtention d'une description numérique de l'objet et d'un fichier au format STL (ce format est le standard actuel, mais des travaux visent à développer d'autres standards plus riches en information). La deuxième étape est le choix du matériau et du procédé d'impression qui se fait souvent simultanément. Enfin, on effectuera des finitions ou post-traitement si nécessaire. On propose Figure 5 une représentation de ces étapes importantes ainsi que des champs d'expertises connexes devant être pris en compte.

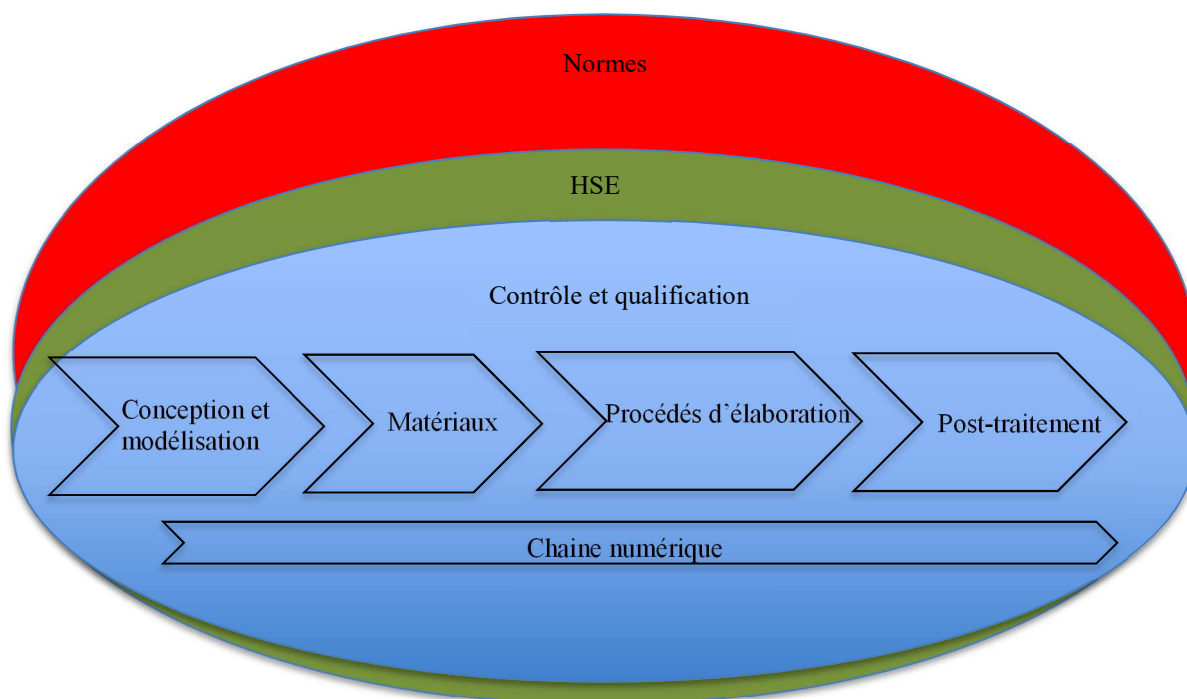


Figure 5: Etapes clés et champs d'expertise connexes à la FA

1.1.b Fabrication additive et industrie

L'utilisation des technologies de FA illustrées dans la Figure 3 ne cesse d'augmenter depuis les 20 dernières années et ce dans de nombreuses industries. En effet, en combinant les avantages des approches de production tels que l'artisanat et la fabrication à grande échelle, ainsi que la personnalisation de masse, la FA a le potentiel de transformer non seulement les moyens de fabrication et leurs business modèles associés, mais aussi comme le signale Abel et al [4] les relations « produits utilisateurs ». Au cours de la dernière décennie, l'utilisation de la FA en milieu industriel a évolué. En effet, on est passé d'un usage initial exclusivement réservé au prototypage rapide à un mode de fabrication à part entière, bien qu'aujourd'hui encore réservé à la production en petites séries. Nous

illustrons Figure 6 les principales applications de la FA et donnons une idée du taux d'utilisation par application en 2017 (ce taux étant très difficile à estimer, nous avons admis que l'étude indirecte menée par Wholers 2017 était représentative du marché de la FA [5]).

Si l'on se concentre sur son appropriation par le secteur privé, on peut voir qu'aujourd'hui la FA est déjà largement répandue dans des domaines d'application tels que l'aérospatiale, la défense, l'industrie automobile, l'électronique, et le secteur médical pour des applications de type prothèse ou pour des applications dentaires [6]. Même les industries de consommation telles que l'industrie du sport, de l'ameublement ou de la bijouterie prennent conscience des avantages de la technologie FA pour leur activité. Cependant, la montée en puissance de la FA demeure lente dans la plupart des industries précédemment citées hormis 2 niches du milieu médical qui ont à ce jour totalement intégré la FA, à savoir la production de couronnes, bridges et autres implants dentaires et par ailleurs la conception d'aide auditive.

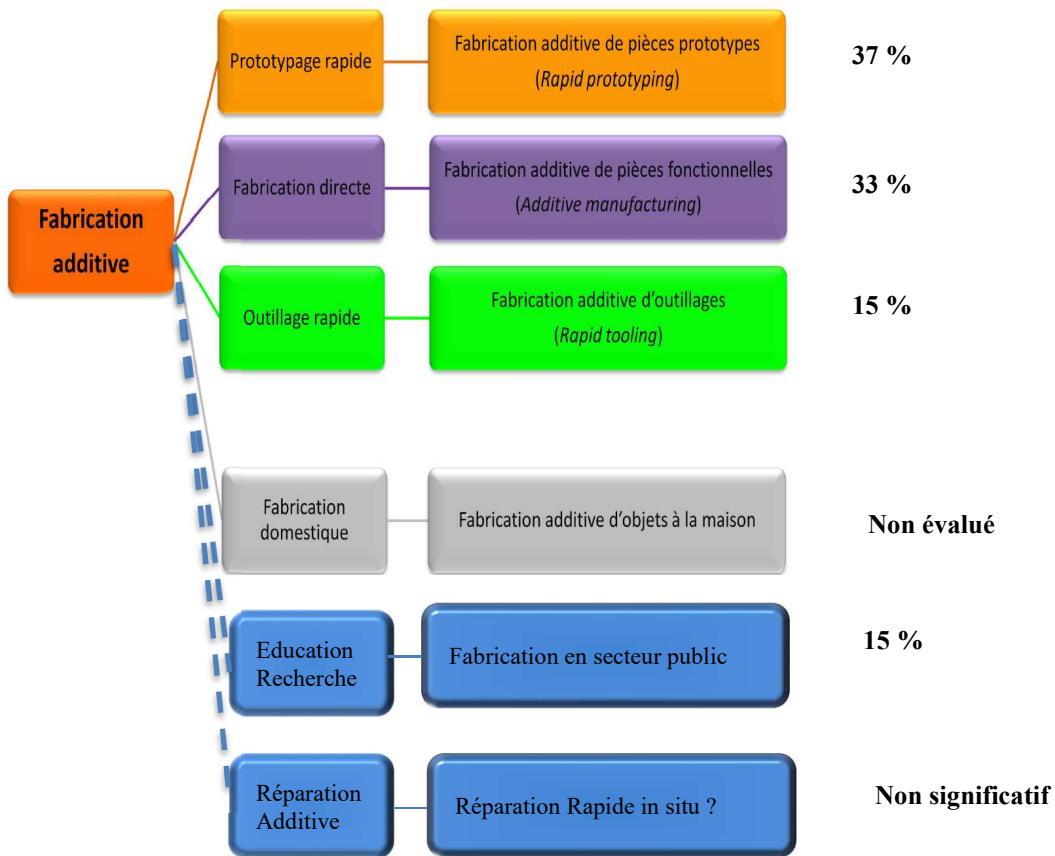


Figure 6: Principaux types de production en FA inspiré de [5].

1.2 Fabrication additive dite open source

1.2.a Définition

La désignation d'open source, ou en français de « code source ouvert », s'appliquait pendant longtemps uniquement aux logiciels qui présentaient certaines caractéristiques telles qu'une libre redistribution, un accès au code source et le libre droit de créer des travaux dérivés.

A partir des années 2000, la notion d'open source va s'étendre à des objets physiques sous de nombreuses initiatives dans le monde, dont entre autres le concept de FabLab avec Neil Gershenfeld au MIT ou encore le projet RepRap avec Adrian Bowyer et son équipe de l'Université de Bath. Ce dernier projet, dont le concept est de créer des machines auto-reproductrices (plus exactement capables de fabriquer une partie de leurs propres pièces par elles-mêmes ; entre 50 et 60% pour certaines), est le premier à démocratiser la fabrication additive open source. Un peu plus tard, Vallance et al dans [7] vont préciser les conditions générales d'une licence de conception ouverte : la documentation d'une conception est disponible gratuitement, n'importe qui est libre d'utiliser ou de modifier la conception en modifiant la documentation de conception, n'importe qui est libre de distribuer les dessins originaux ou modifiés (à titre onéreux ou gratuit), et enfin les modifications apportées à la conception doivent être retournées à la collectivité.

Dès lors le grand public va voir accès à la FA à travers une multitude de machines d'impression qui vont voir le jour et dont on peut voir l'évolution à travers un arbre généalogique sur le site https://reprap.org/wiki/RepRap_Family_Tree. On peut voir sur cet arbre que la plupart des machines d'impression (près de 500 référencées) qui ont vu le jour était de type extrusion de matière (FFF). Ceci s'explique principalement par l'expiration en 2009 de la technologie FDM détenue par Stratasys. Pour expliquer l'évolution structurelle des types de machines (sélection naturelle, survie des « espèces », mutation etc....) nous invitons le lecteur à se référer aux travaux d'Emmanuel Gilloz [RM6] avec qui nous avons travaillé sur ce point.

En 2014 c'est autour du brevet de la technologie SLA (photo-polymérisation) détenu par 3D Systems de tomber dans le domaine public. Enfin quelques mois après c'est le brevet sur le SLS (frittage sélectif) aussi détenu par 3D Systems qui expire. Bien que les deux dernières technologies soient libres de droit, peu de systèmes totalement open source utilisant ces deux procédés sont apparus sur le marché, du fait de la complexité à maîtriser le laser nécessaire dans les deux technologies et des différents risques liés à la résine et aux poudres.

1.2.b Fabrication additive et grand public

Comme nous l'avons précisé précédemment, les particuliers vont avoir accès aux différentes technologies de FA du fait du caractère « open source » de ces machines ; cependant il faut bien noter ici que le développement auprès du grand public passe par l'apparition de communautés dites de « makers ». Ce mouvement s'appuyant sur l'open source mais orienté vers les objets physiques prône l'idée du « Do It Yourself » ou « faire par soi-même ». Depuis un peu plus de 10 ans ces communautés de « makers » ne cessent

de croître sous des formes plus ou moins structurées qui peuvent aller de l'appartenance à un Fab Labs jusqu'à la simple participation à des « maker faire » tel qu'illustré à la Figure 7. D'après [5], les acquisitions de ces communautés sont passées de près de 4 000 imprimantes achetées en 2010 à près de 250 000 achetées en 2017 soit près de la moitié des imprimantes 3D dites de bureau vendues cette année-là.

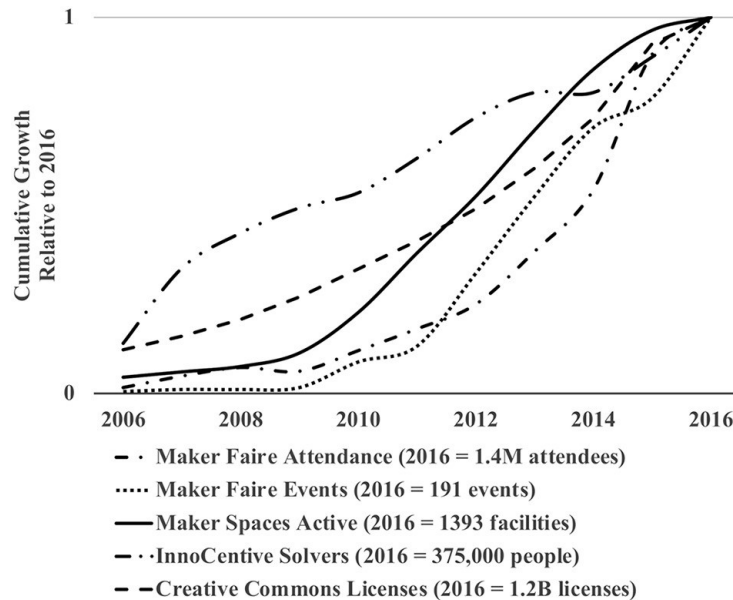


Figure 7: Evolution du mouvement des « makers » [7].

1.3 Fabrication additive « semi-open source »

1.2.a Définition

Nous avons défini en 1.1 et 1.2 les notions de FA et FA open source. Nous nous proposons ici d'introduire une nouvelle notion intermédiaire que nous qualifions de **FA « semi-open source »**. En effet, suite aux expirations des brevets des différentes techniques de FA, nous assistons à l'apparition de nombreux acteurs se positionnant entre les grands acteurs de la FA et les particuliers. Un bon exemple, pour les technologies de type FDM, est l'entreprise Alchimies (<http://www.alchimies.eu/>), spin-off issue de l'ERPI, et dont à l'origine les produits étaient totalement open source. Au fondement de l'entreprise, celle-ci n'était qu'un simple « assembleur » intermédiaire, mais aujourd'hui de plus en plus de parties de leurs machines d'impression sont fermées.

Pour ce qui est des technologies SLS et SLA dont le développement sous une forme totalement open source reste mineur pour les raisons évoquées au paragraphe 1.2, on peut observer que cette notion de « semi-open source » est encore plus importante car elle permet, en profitant des avantages de l'open source, de voir des évolutions de machines très rapides (passage de la technique SLA à la technologie DLP pour une plus grande

vitesse d'impression, et bientôt à la technologie CDLP) et des prix d'acquisition qui chutent très vite tel que l'on peut le voir sur la Figure 8 pour la technologie SLA.

Au-delà des aspects coûts, l'appellation « semi-open source » offre une grande latitude quant au degré d'ouverture des technologies et présente pour le domaine de la recherche des avantages indéniables.

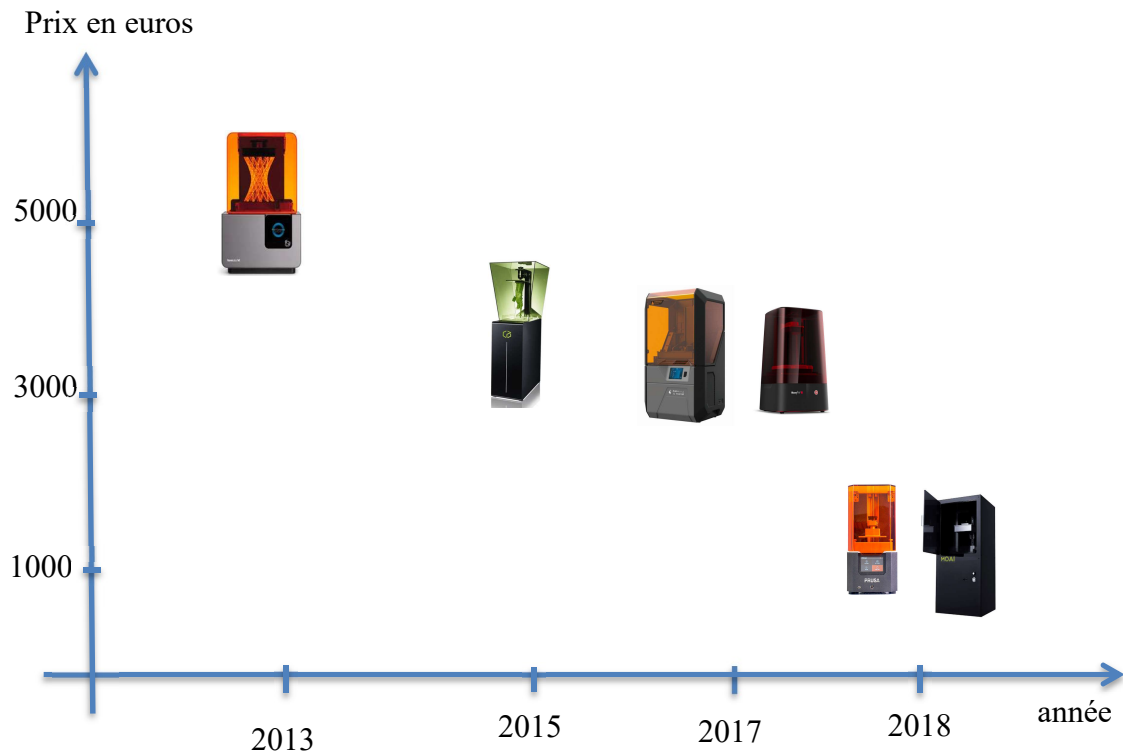


Figure 8: Evolution du coût des machines de type SLA dites de « bureau ».

1.2.b Fabrication additive et recherche

En 1982 parut le premier article scientifique sur la fabrication additive. Aujourd'hui, une simple recherche bibliométrique autour du terme « Fabrication additive » dans la base de données Scopus nous permet d'observer Figure 9 la croissance exponentielle du nombre d'articles portant sur cette thématique. Si l'on affine cette recherche sur l'année 2019, on se rend compte que plus de 300 articles (par journal) ont paru dans des journaux portant sur des thématiques très différentes, à savoir : les matériaux, l'énergie, la construction, l'environnement, la production, les céramiques, les alliages, etc... Il semble clair que la recherche sur la FA explose dans de nombreux domaines ; cependant, nous allons ici réduire le champ à la recherche effectuée au moyen de machines de FA open source ou « semi-open source ». En effet, nous ne considérerons dans ce document que les

opportunités de systèmes de fabrication additive suffisamment ouverts afin de pouvoir tester et expérimenter aux différentes étapes clés, tel que présenté Figure 4.

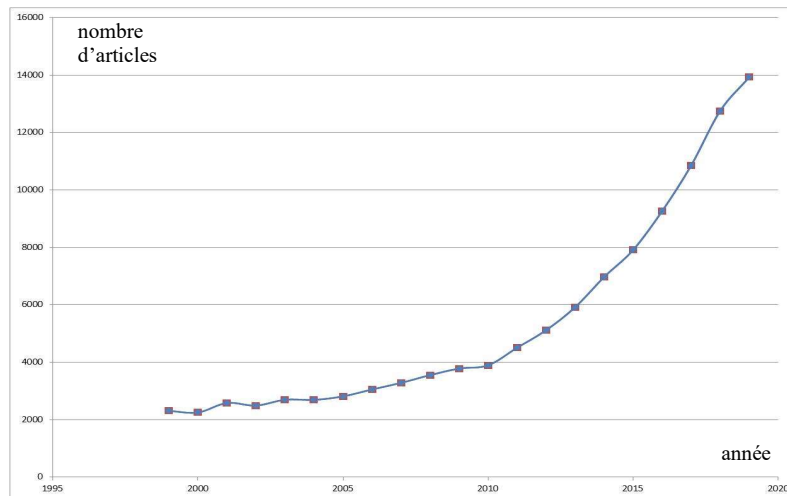


Figure 9: Evolution du nombre d'article traitant de la FA (scopus)

2 La Fabrication additive un levier d'innovation

Depuis près de 30 ans, l'innovation est vue comme le facteur clé de la croissance de nos sociétés. Face aux grands défis sociétaux de demain, on voit qu'à des niveaux de pilotage tels que la Commission européenne cette approche stratégique de l'innovation est très soutenue. Nous présenterons dans ce chapitre la notion d'innovation au sens large, puis nous montrerons comment les acteurs de l'innovation ont évolué, et nous convergerons vers la vision de Von Hippel et la notion d'innovation ascendante ou de l'utilisateur. Dans un second temps, nous présenterons les potentiels d'innovation de la fabrication additive en général, puis nous y adjoindrons les potentiels qu'apporte l'aspect open source. Enfin nous conclurons en précisant nos champs de recherche.

2.1 D'une innovation top down à une innovation bottom up.

2.1.a Caractéristiques de « l'innovation ».

Malgré l'abondance de la littérature, il est très difficile de donner une définition complète au terme « **innovation** » et d'en décrire clairement la nature. L'innovation est un concept **multidimensionnel** qui comprend des significations et des définitions très variées selon que l'on se place dans telle ou telle communauté scientifique. De plus, on voit apparaître régulièrement de nouvelles définitions qui vont faire suite à l'évolution sociétale, et aujourd'hui selon [9] l'innovation n'est pas seulement "technologique", mais aussi "sociale", "culturelle", "institutionnelle", "inclusive", "verte", "écologique", "ouverte",

"axée sur l'utilisateur", "légère", "à faible coût", "populaire", "publique" et "transformative". Certains auteurs [10] vont chercher à préciser et « typer » l'innovation mais le terme est encore aujourd'hui un terme générique qui englobe une myriade de types d'innovation. De manière non exhaustive, bon nombre d'auteurs [11] s'accordent sur les différentes **typologies** proposées Figure 10. (Nous avons ici volontairement réduit les typologies à celles couramment utilisées en Europe et en Amérique, mais d'autres types tels que l'innovation « indigène », « Jugaad », « de convergence », « d'imitation » etc.. peuvent être trouvés en Asie [12].)

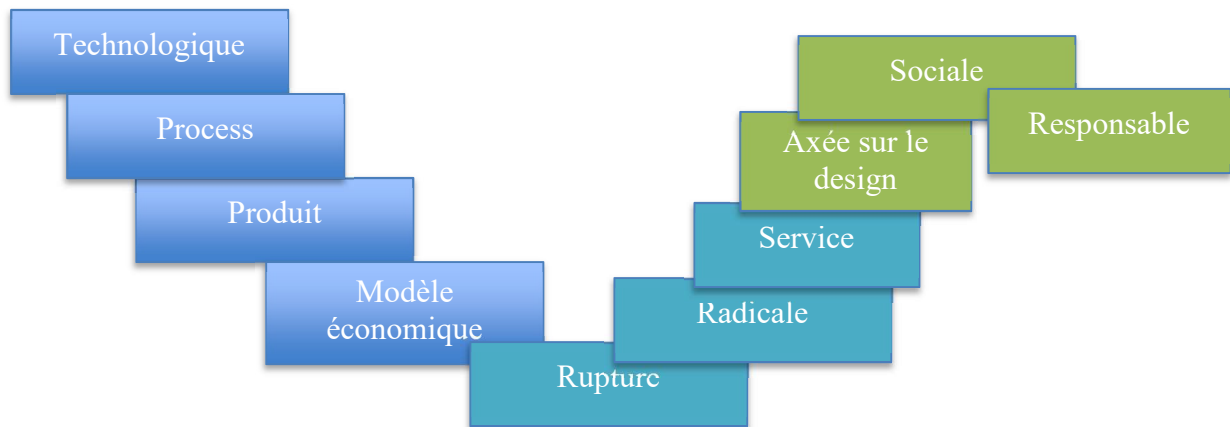


Figure 10: Différents « types » d'innovation admis.

2.1.b De Schumpeter à Von Hippel

Pendant près d'un siècle, le modèle d'innovation de Schumpeter, dit du « technology push », va être la référence. Ce modèle linéaire, qui considère que l'innovation est le résultat de la recherche scientifique ou technique, demeure aujourd'hui applicable dans bon nombre d'industries de pointe [13]. Pour Schumpeter, l'innovation est la source d'un ou plusieurs facteurs tels que l'introduction d'un produit, une nouvelle méthode de production, l'apparition de nouveaux marchés, un changement managérial, etc... Dans ces travaux, il va considérer comme **acteur de l'innovation** tout d'abord des **entrepreneurs** qui agissent au niveau d'entreprises dites « familiales », puis 30 ans plus tard les acteurs de l'innovation seront principalement les ingénieurs issus des départements de recherche et développement des grandes entreprises.

A la fin des années 1970, Von Hippel va, pour sa part, remettre en cause cette vision et identifier **quatre acteurs** de l'innovation, dont trois proviennent de l'extérieur de l'entreprise: les **clients**, les **fournisseurs** et les **tiers** (universités, consultants, etc.). Bien qu'il ne soit pas le premier à mettre en évidence l'existence d'acteurs de l'innovation en dehors des limites de l'entreprise, ses nombreux travaux vont déboucher sur une vision « démocratisée de l'innovation » [14]. Il va ainsi mettre en évidence le rôle des **utilisateurs** comme **innovateurs**. En effet, aujourd'hui les évolutions technologiques des trente dernières années ont considérablement accru les opportunités d'innover offertes aux utilisateurs. C'est pourquoi, comme nous l'évoquons au paragraphe 1.2.b on voit à travers

le monde se développer fortement les mouvements de « maker » dans les tiers-lieux tels que les Fab-labs [OS1]. Dans cette nouvelle approche, où les utilisateurs des innovations vont être ceux qui les conçoivent, voire les produisent eux-mêmes, il faut complètement repenser l'approche économique, managériale et politique. Pour illustrer l'ampleur de ce mouvement, je donnerai deux exemples : le premier est la volonté du gouvernement américain dans son récent programme de développement économique « Manufacturing USA » (<https://www.manufacturingusa.com/>) de voir les « maker » devenir des acteurs à part entière de l'économie en passant de « maker to manufacturer » ; le second réside dans les moyens donnés par la Commission Européenne à la recherche à l'open science pour permettre « d'ouvrir le processus d'innovation à des personnes ayant de l'expérience dans d'autres domaines que le monde universitaire et scientifique. » (https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/goals-research-and-innovation-policy_fr).

2.2 Potentiels d'innovation de la fabrication additive

Le développement de notre monde repose sur la fabrication. Depuis l'âge de pierre, la société va se transformer profondément à chaque révolution des moyens de productions. On verra tour à tour les techniques de coupe, d'enrobage, de moulage, de formage ... se développer et contribuer à une croissance continue et répartie spatialement et ce jusqu'à la révolution industrielle. Cette dernière, grâce à la mécanisation et aux nouvelles formes d'énergie, va apporter un changement dans la façon dont les biens étaient fabriqués. Au lieu de produire des articles à la main à la maison, les fabricants ont commencé à utiliser des machines pour produire de multiples quantités en moins de temps. Aujourd'hui, nous sommes peut être à l'aube d'un nouveau changement de paradigme. En effet, la fabrication additive offre de nombreuses possibilités de concevoir et produire différemment, ce que nous précisons ici dans une première partie. Dans un second temps, nous positionnerons le cadre de notre recherche en FA à travers une grille de lecture multi-niveaux et un positionnement économique.

2.2.a Potentiels de la Fabrication Additive

Les solutions innovantes fournies par les technologies de FA peuvent générer des externalités positives significatives sur l'industrie. En effet, la FA a la capacité de bouleverser toute la chaîne d'approvisionnement [15]. On prévoit que la diffusion des technologies de la FA conduira à la mise en place d'un certain nombre de technologies nouvelles dans de nombreuses industries, ainsi qu'à l'émergence de nouvelles configurations, à des changements dans la localisation de la production et à l'évolution de la demande des consommateurs [16]. Par suite de l'adoption de la FA, la structure globale de l'industrie manufacturière pourrait être totalement bouleversée et passer d'une production centralisée à une production décentralisée [17]. Nous avons identifié, au moyen

d'une petite revue bibliographique récente, un peu plus d'une dizaine de caractéristiques de la FA qui ont le potentiel de favoriser l'innovation. Ces caractéristiques sont précisées dans le Tableau 3. Nous indiquons pour chacune d'elles le type d'innovation suivant la « typologie » proposée Figure 10, ainsi que si cette spécificité a été abordée dans nos travaux et, le cas échéant, précisons dans quel chapitre elle sera étudiée.

Caractéristique	Référence	Type d'innovation	Axe concerné
Accélération des processus de développement de nouveaux produits	[18]	- Process - Modèle économique	
Produits personnalisés	[17]	- Produit - Modèle économique	Chapitre 5
Pièces innovantes	[16]	- Technologique - Produit	Chapitre 3
Pièces aux formes complexes	[16]	- Technologique - Axée sur le design	Chapitre 3 Chapitre 5
Procédé plus durable	[19]	- Responsable	Chapitre 4
Procédé moins énergivores	[20]	- Responsable	
Production décentralisé	[20]	- Responsable	Chapitre 4
Complexité sans coûts rattachés	[21]	- Produit - Modèle économique	
Réduction de la logistique	[22]	- Organisationnelle	
Production en temps réel	[22]	- Service	
Flexibilité du procédé	[23]	- Process	Chapitre 3
Procédé transformant le mode de consommation	[24]	- Sociale	Chapitre 5
Nouvelle catégorie de produit	[16]	- Radicale	Chapitre 3
La FA dans sa globalité	[15]	- Rupture	

Tableau 3 : Caractéristiques de la FA favorisant l'innovation

2.2.a Positionnement de la recherche

Grille de lecture :

Nos travaux de recherche vont concerner les différentes potentialités de la FA comme indiqué sur le Tableau 3. Quel que soit les travaux présentés, nous proposons une représentation de l'étude à **différents niveaux de lecture** comme illustré sur la Figure 11. Au niveau le plus bas, nous présenterons les **expérimentations** menées au niveau des matériaux, du procédé et des pièces imprimées. Le second niveau sera celui de la **modélisation et de la simulation**. Enfin pour les concepts d'usage nous préciserons nos travaux menés sur les facteurs influençant le développement ou l'utilisation d'un système, ceci incluant les facteurs environnementaux, les facteurs organisationnels, les facteurs techniques et les facteurs sociaux.

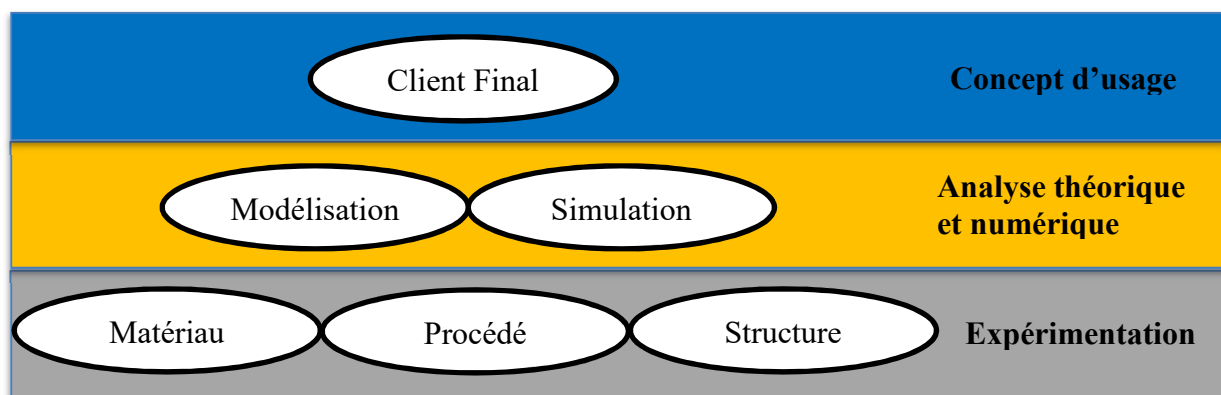


Figure 11: Différents niveaux de notre recherche

Equipement :

D'un point de vue technologique, nous avons considéré dans ce chapitre que les trois acteurs d'innovation proposés (les industriels, les « users » et enfin les acteurs publics avec principalement les chercheurs) avaient accès à des technologies de FA principalement en fonction du coût d'acquisition des machines et du coût du consommable (des modèles plus évolués incluant les coûts de post processing, main d'œuvre, amortissement, etc... ont été proposés dans [25] mais nous ne souhaitons ici qu'un positionnement approché afin de positionner notre recherche).

Pour les **industriels** nous supposons 4 types d'utilisation de la FA :

- en bureau d'étude et de recherche :
- * Prototype géométrique: entre 3 et 40 k€.
- * Prototype fonctionnel: entre 30 et 80 k€.
- * Prototype technologique: entre 30 et 300 k€.

- production en petite série : machine entre 50 k€ et plus de 3M€. (source EOS, 3D Systems, SLM Solutions, Realizer, Concept Laser, Arcam)

Pour les « users » type maker :

- production de pièces : de 0,5 à 5 k€ .

Pour les chercheurs :

- Recherche appliquée sur les procédés de FA métallique : entre 1 et 2ME

- Recherche fondamentale sur la FA polymère et procédés associés. Jusqu'à 500 k€ (coût machine de type MJM hautes performances)

- Recherche sur les possibilités et potentiels de la FA. Entre 2 et 80 k€.

Nous positionnons Figure 12 les coûts d'équipements accessibles par chacun des acteurs.

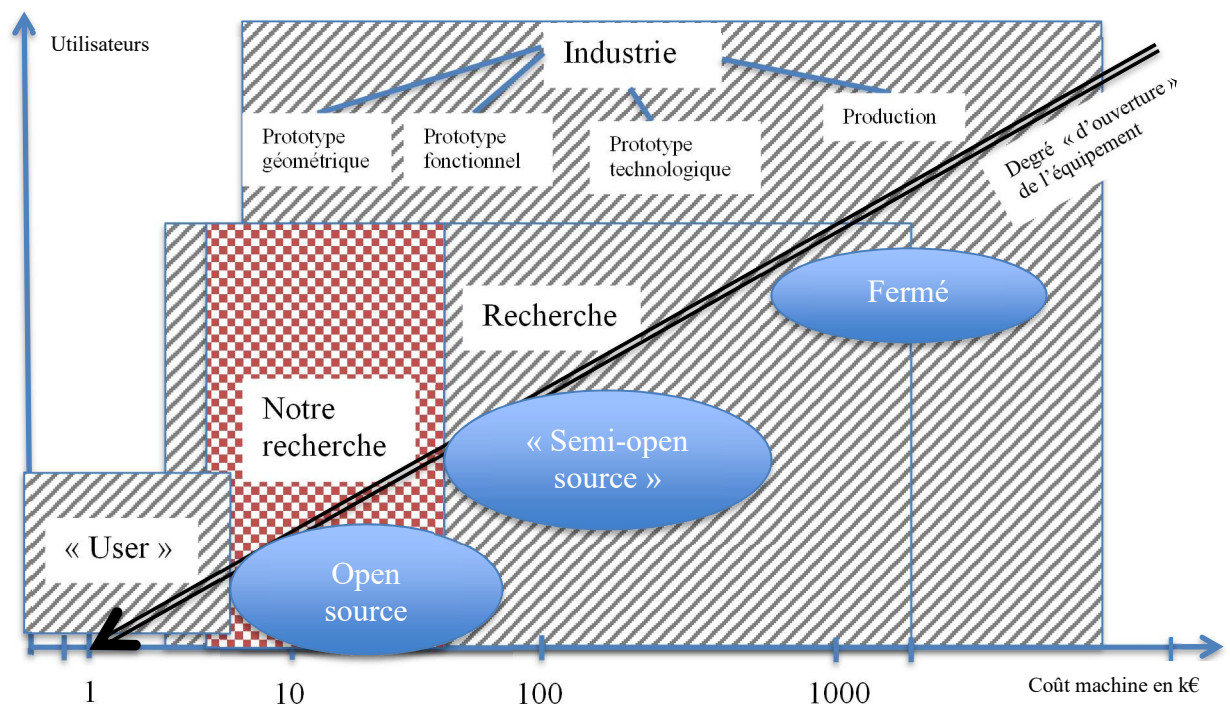


Figure 12: Coût machine pour les différents utilisateurs de techno FA

Dans le cadre de notre recherche, nous nous positionnerons sur des technologies « semi-open source » avec des coûts d'équipement variant de 2 à 60 k€. Les différents équipements utilisés ainsi que leur degré d'ouverture seront précisés aux chapitres suivants.

3 Conclusion

Au cours de ces dernières années, la **fabrication additive** et son environnement ont énormément évolué, positionnant les technologies d'impression 3D comme un **pilier de l'industrie 4.0**. Elle n'est plus, dans le secteur manufacturier, limitée à la réalisation de prototypes mais permet de plus en plus la **production** de petites et moyennes séries. Les nombreux travaux sur les matériaux composites, que ce soit en FDM, en SLS ou en SLA accroissent ses utilisations possibles. D'un point de vue impact sur les services des entreprises, elle est en passe de révolutionner non seulement les bureaux d'études, de recherche et développement, mais aussi les services marketing, la maintenance et qualité et surtout la production [26]. Au-delà des industries, les gouvernements ont clairement identifié son intérêt dans la promotion de l'**innovation** de manière globale [26] et ce en permettant des **innovations** par les **usagers** principalement dans les **tiers-lieux**. Ces derniers bénéficiant de la diminution des coûts d'acquisition des machines open source et « semi open source » voient augmenter leur capacité à **accélérer les processus de collaborations et d'innovations** [27].

Du point de vue de notre recherche, nous considérerons les apports de la **fabrication additive** et ce dans un cadre **open source et semi open source**. Bien que nos travaux soient pour la plupart réalisés dans un espace de co-innovation, le Lorraine Fab Living Lab (<http://lf21.fr/>), nous ne développerons pas d'aspect portant sur l'**open innovation** et nous présenterons principalement les apports de la FA pour:

- **l'innovation technologique et axée sur le design** au chapitre 3, à travers le développement de structures composites à haut pouvoir amortissant.
- **l'innovation responsable** au chapitre 4, à travers la mise en place d'une économie circulaire autour de la réutilisation de plastiques usagés par la FA.
- **l'innovation sociale et produit** qui seront proposés comme axes futurs de recherche au chapitre 5.

4 Références

- [OS1] C. Barlier et A. Bernard. « Fabrication additive: Du prototype rapide à l'impression 3D. » Edition Dunod. (2015)
- [RM6] Emmanuel Gilloz “Prototypage rapide et fabrication additive” (2011).
- [1] Jing Zhang Yeon-Gil Jung “Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications” Jing Zhang Yeon-Gil Jung. Elsevier. 1st edition. (2018)
- [2] Neng Li, Shuai Huang, Guodong Zhang, Renyao Qin, Jon Blackburn. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. Journal of Materials Science & Technology, Volume 35, Issue 2, Pages 242-269. (2019)
- [3] NF ISO 17296-2:2015 - Fabrication additive - Principes généraux - Partie 2 : Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières de base, AFNOR
- [4] Abel, B. V., L. Evers, R. Klaasen, and P. Troxler. Open design now—Why design cannot remain exclusive. Amsterdam: Bis. (2011)
- [5] Wohlers Report 2017 – 3DPrinting and Additive Manufacturing State of the Industry. Wohlers Associates Inc., 695 United States of America, (2017)
- [6] Craig A. Giffi, Bharath Gangula & Pandarinath Illinda, 3D opportunity for the automotive 749 industry, Deloitte University Press, (2014)
- [7] Vallance, R., Kiani, S. and Nayfeh, S.. Open Design of manufacturing equipment. In:Proceedings of the CHIRP 1st International Conference on Agile, Reconfigurable Manufacturing. Michigan, MA: MIT. (2001)
- [8] Russell E. Browder, Howard E. Aldrich, Steven W. Bradley. The emergence of the maker movement: Implications for entrepreneurship research Journal of Business Venturing, Volume 34, Issue 3, Pages 459-476 (2019)
- [9] L. Al-Hakim, X. Wu, A. Koronios, Y. Shou (Eds.), Challenges for firms' collaborative innovation in the innovation babel tower. Handbook of research on driving competitive advantage through lean and disruptive innovation, IGI Global, US, pp. 204-227. (2016)
- [10] R. Garcia, R. Calantone A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: A literature review Journal of Product Innovation Management, 19 (2) , pp. 110-132. (2002)
- [11] B.R. Martin Twenty challenges for innovation studies Science and Public Policy, 43 (3) , pp. 432-450. (2016)
- [12] Jin Chen, Ximing Yin, Liang Mei. Holistic Innovation: An Emerging Innovation Paradigm. International Journal of Innovation Studies, Volume 2, Issue 1, Pages 1-13. (2018)
- [13] Mónica Edwards-Schachter The nature and variety of innovation International Journal of Innovation Studies, Volume 2, Issue 2, Pages 65-79. (2018)

- [14] Eric von Hippel. Chapter 9: Open User Innovation. *Handbook of the Economics of Innovation*, Volume 1, Pages 411-427. (2010)
- [15] Jiang, R., Kleer, R., Piller, F.T.,. Predicting the future of additive manufacturing: a Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technol. Forecast. Soc. Change* 117, 84–97. (2017)
- [16] Despeisse, M., Ford, S. The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pp. 129–136. (2015)
- [17] Bogers, M., Hadar, R., Bilberg, A. Additive manufacturing for consumer-centric business models: implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technol. Forecast. Soc. Change* 102, 225–239. (2016)
- [18] D. Chen, S. Heyer, S. Ibbotson, K. Salonitis, J.G. Steingrímsson, S. Thiede. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications *J. Clean. Prod.*, 107, pp. 615-625. (2015)
- [19] M. Khorram Niaki, F. Nonino. *The Management of Additive Manufacturing: Enhancing Business Value* Springer, Cham. (2018)
- [20] S. Ford, M. Despeisse Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *J. Clean. Prod.*, 137, pp. 1573-1587. (2016)
- [21] M. Khorram Niaki, F. Nonino Additive manufacturing management: a review and future research agenda. *Int. J. Prod. Res.*, 55 (5), pp. 1419-1439. (2017)
- [22] P.C. Priarone, G. Ingarao. Towards criteria for sustainable process selection: on the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production* 144. (2017)
- [23] M. Gebler, A.J.S. Uiterkamp, C. Visser. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, pp. 158-167. (2014).
- [24] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67 (5–8) , pp. 1191-1203. (2013)
- [25] Aditya Mahadik, Dale Masel. Implementation of Additive Manufacturing Cost Estimation Tool (AMCET) Using Break-down Approach. *Procedia Manufacturing*, Volume 17, Pages 70-77. (2018)
- [26] *Futur de la fabrication additive. Rapport Pipame DGE.* (2017).
- [27] Flavie Ferchaud and Marc Dumont. Are Spaces of Digital Fabrication and Experimentation Third Places? An Analysis of the Case of Fab labs in Rennes and Toulouse.” *The digital revolution: third places, tops places and territorialisation.* Edited by Christine Liefoghe and Divya Leducq. 34. (2017)

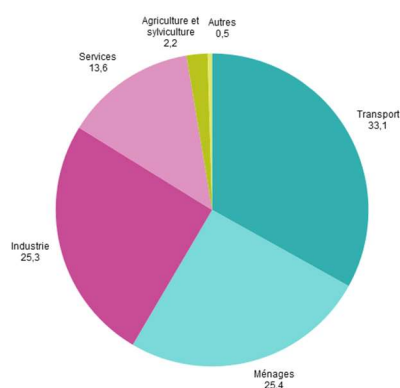
CHAPITRE 3

Potentiel de la FA open source pour la conception de structures composites à haut pouvoir amortissant

1	INTRODUCTION	60
2	MODELISATION & SIMULATION.....	62
2.1	CONTROLE ACTIF PASSIF DES VIBRATIONS	64
2.2	MODELE SOLIDE COQUE POUR LE CONTROLE PASSIF DES VIBRATIONS.....	66
2.3	CONTROLE PASSIF DES VIBRATIONS AU MOYEN DE STRUCTURES COMPOSITES.	68
3	DU MODELE A LA STRUCTURE : EXPERIMENTATION & TESTS.....	70
3.1	LA FABRICATION ADDITIVE POUR DES STRUCTURES AUX FORMES COMPLEXES.....	71
3.2	NOUVELLES STRUCTURES HIERARCHIQUES AMORTISSANTES	72
4	CONCLUSION	77
5	REFERENCES	79

1 Introduction

L'**efficacité énergétique** est désormais l'un des piliers de la stratégie de l'Union Européenne dans le domaine de l'énergie [1]. Elle représente un moyen très efficace d'améliorer la compétitivité économique, la durabilité de l'économie européenne, de réduire les émissions, de réduire la dépendance énergétique, d'accroître la sécurité de l'approvisionnement, et enfin de créer des emplois [1]. Si l'on regarde plus en détail Figure 13 la consommation énergétique actuelle, on peut s'apercevoir que le secteur le plus consommateur et dont la part ne cesse d'augmenter est le secteur du transport. Ce dernier, avec une consommation de plus de 33 % de la demande globale, est le secteur prioritaire où doivent être concentrés les efforts [2].



Remarque: la somme des chiffres n'est pas égale à 100,0 % car les valeurs ont été arrondies.
Source: Eurostat (code des données en ligne: nrg_100a)

Figure 13: Consommation énergétique par secteur en Europe en 2015

Afin de réduire la consommation dans le domaine du transport, un moyen efficace est l'allègement des structures et, poursuivant ce but, de nombreux domaines d'activités industrielles tels que l'automobile, l'aéronautique ou le naval, intègrent de plus en plus les **matériaux composites** dans la fabrication des structures. Cependant, cet allègement s'accompagne d'un raidissement local de la matière qui va entraîner des problèmes de **vibrations structurales**. Ces dernières sont fortement indésirables puisqu'elles sont à l'origine de problèmes divers comme la fatigue structurale, la transmission de vibrations à d'autres systèmes, le bruit interne ou externe (rayonnement acoustique), etc.

Trois types de méthodes existent afin de diminuer les vibrations ou le bruit rayonné [3]:

- La première est **la technique d'annulation** (ou suppression), utilisée surtout pour éliminer le bruit engendré par la vibration et non la vibration elle-même. Elle se fait par la production d'une source de bruit secondaire émettant le négatif du bruit primaire afin d'aboutir à une annulation des deux sources.

- La seconde est **l'isolation** qui consiste à éviter la transmission des vibrations d'un système à un autre sans pour autant éliminer les vibrations du système émetteur.

- La troisième est **l'atténuation**, elle est utilisée pour diminuer l'amplitude des vibrations d'un système en cas d'échec ou d'impossibilité de son isolation, ou pour réduire le rayonnement acoustique en cas d'impossibilité de production ou d'inefficacité d'une source secondaire d'anti-bruit.

Cependant, ces techniques et plus particulièrement les deux premières, vont souvent augmenter de manière significative la masse, ce qui va à l'encontre de l'objectif initial d'**allègement** des structures mobiles.

Partant de ce constat, nous avons au cours de nos travaux amélioré et proposé différentes solutions de type **atténuation** afin que ces dernières garantissent tout à la fois des performances **amortissantes élevées** sur une **large gamme de fréquences** et un **poids faible** de la structure.

Niveaux de la recherche

Si l'on considère la grille de lecture proposée Figure 11, nous allons ici présenter nos travaux pour les trois niveaux comme détaillé Figure 14.

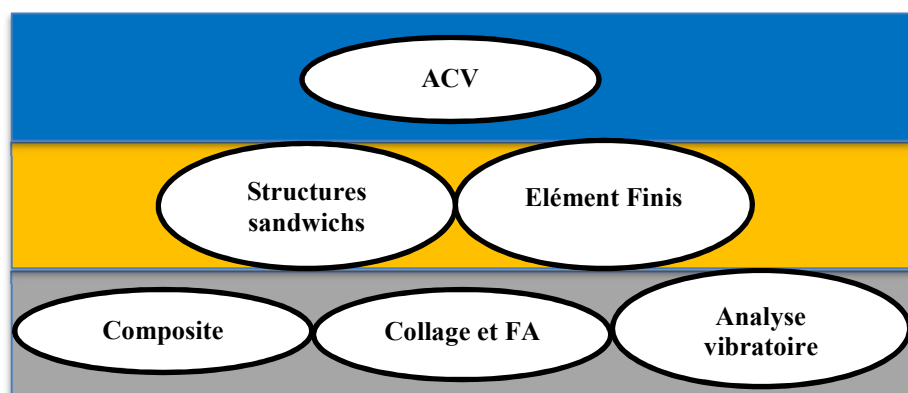


Figure 14: Positionnement des travaux effectués (Efficacité Energétique)

Au niveau du Concept d'usage : Nous proposerons le développement d'une Analyse Cycle de Vie du produit en perspective.

Au niveau Modélisation & Simulation: Nous allons présenter notre démarche d'amélioration pour les **Structures Sandwich** ainsi que les modélisations par la méthode des **Eléments Finis** de ces structures. Les différents travaux menés à ce niveau sont détaillés au paragraphe 2.

Au niveau Matériau, Procédé & Structure: Nous présenterons une nouvelle solution de conception par FA pour les structures composites amortissantes ainsi que les travaux réalisés pour le développement de **nouveaux matériaux**, les travaux de **qualification du procédé** d'impression et les axes de développement futurs pour la **qualification vibratoire** de la structure sandwich imprimée. Les différents travaux menés à ce niveau sont détaillés au paragraphe 3.

2 Modélisation & Simulation

En près de dix ans nous avons été amenés à considérer successivement de nombreuses solutions afin de répondre au besoin d'obtention de structures légères et amortissantes.

Comme nous l'avons précisé auparavant, toutes les solutions que nous avons développées sont de type **atténuation**. Ces dernières consistent à diminuer l'amplitude des vibrations structurales dont les fréquences sont dans le voisinage des fréquences propres de la structure. Par conséquent, ces techniques permettent d'atténuer, ou même d'éliminer, les résonances de la structure [3].

Industriellement, les **techniques** dites **passives** d'amortissement des vibrations sont le plus répandues. Elles utilisent l'intégration ou l'ajout de matériaux ou systèmes, possédant des propriétés amortissantes, couplés à la structure de telle façon que les vibrations de la structure sont amorties passivement, c'est-à-dire sans aucune intervention extérieure supplémentaire. Parmi ces solutions, on trouve depuis près de 100 ans l'utilisation dans le domaine du transport des **structures sandwichs** avec un cœur en matériaux polymères viscoélastiques tel qu'illustré Figure 15.

Ce genre de structure offre d'importants avantages technologiques (fort pouvoir amortissant, faible poids, grande rigidité, automatisation facile de la fabrication...). Une revue complète de la modélisation des propriétés vibratoires de ce type de structure a été

proposée au cours de mes travaux de thèse [3]. Il ressort de cette revue 2 difficultés majeures à considérer lors de l'étude:

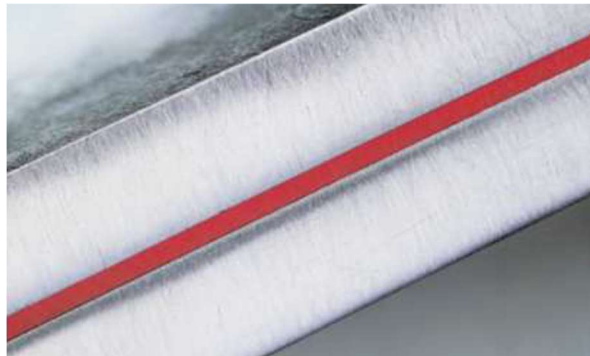


Figure 15: Sandwich à cœur viscoélastique [3]

- la **définition de la cinématique** dans la structure multicouche. **{Pb1}**

- la **résolution du problème aux valeurs propres complexes** avec prise en compte de la non-linéarité du comportement de la couche viscoélastique. **{Pb2}**

Partant de la structure sandwich présentée Figure 14, nous avons dès lors considéré successivement de nombreuses améliorations de cette solution afin de répondre au besoin d'obtention de structures plus légères et ou plus amortissantes. Pour chacune des solutions nous précisons comment nous avons résolu les problématiques de cinématique et de résolution du problème aux valeurs propres complexes.

Solution 1 : Contrôle actif passif de vibrations au moyen de structures isotropes. **{PB1}** et **{PB2}**

Solution 2 : Contrôle passif de vibrations avec une modélisation par élément solide coque. **{PB1}**

Solution 3 : Contrôle passif de vibrations au moyen de structures composites. **{PB1}** et **{PB2}**

Solution 4 : Contrôle passif de vibrations au moyen de structures hiérarchiques amortissantes. **{Perspective}**

Nous présentons Figure 16 l'apport des différentes solutions étudiées d'un point de vue réduction du poids et effet sur l'amortissement.

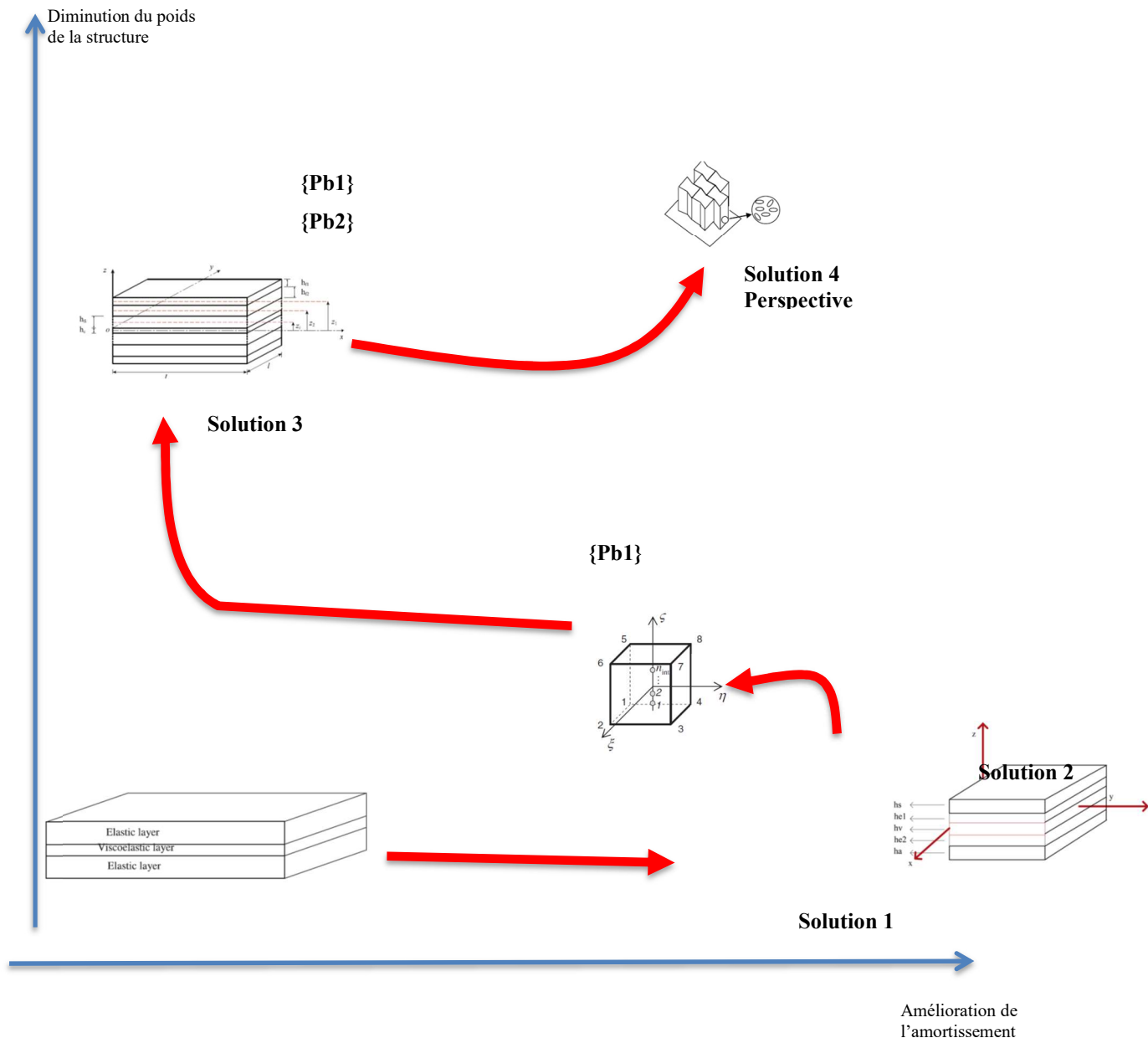


Figure 16: Apport des solutions développées

3.2.1 Contrôle actif-passif des vibrations

Notre première proposition d'amélioration concerne ici l'étude de structures sandwich à faces isotropes auxquelles on ajoute 2 couches piézoélectriques tel que décrit sur la Figure 17. Dans le cas présent, on couple un amortissement passif au cœur apporté par l'effet de cisaillement de la couche viscoélastique et efficace pour les moyennes et hautes fréquences, à un amortissement actif apporté par une boucle de contrôle reliant les faces extérieures et très efficace pour le contrôle des basses fréquences. La **{Pb1}** a été résolue dans le cas d'un modèle analytique de type poutre, puis nous avons développé un élément

fini de types coques pour les sandwichs à 5 couches. La $\{Pb2\}$ sera résolue par une méthode numérique basée sur la Méthode Asymptotique Numérique (MAN).

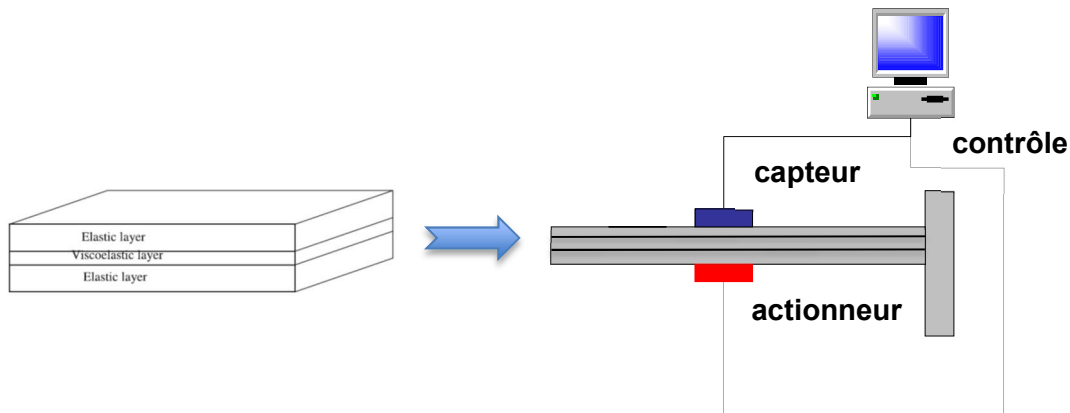


Figure 17: Contrôle actif passif des vibrations

Modèle analytique

Nous avons ici tout d'abord proposé un modèle analytique simple pour les structures de types poutres. Le modèle a été choisi de la manière la plus simple possible incluant une cinématique de type Euler-Bernoulli et de type Timoshenko ainsi que l'hypothèse d'un champ électrique purement transverse. Différents niveaux d'approximation ont été considérés et le traitement du problème électrostatique dans le capteur a été discuté dans [ACL3]. L'analyse conduit à une approche modale simplifiée permettant le calcul des propriétés amortissantes de ces structures. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus à l'aide de la modélisation par éléments finis 2D en utilisant le code de calcul Abaqus [4].

Élément coque pour les sandwichs 5 couches

Afin de modéliser les structures sandwichs à 5 couches de type piézoélectrique/élastique/viscoélastique/élastique/piézoélectrique de forme quelconque, nous avons développé un élément fini sandwich de type coque. Sa formulation utilise les hypothèses classiques de calcul des sandwichs et les théories de coques de Kirchhoff et de Mindlin. Il résulte de l'assemblage des éléments de coques suivant l'épaisseur. A l'aide des conditions de raccord aux interfaces, le nombre de degrés de liberté (DDL) par nœud a été réduit à 10 DDL: 8 en déplacements et 2 DDL électriques [ACL1]. L'élément proposé a alors été validé au moyen de comparaisons avec des résultats obtenus analytiquement et numériquement en utilisant le code commercial Abaqus [ACL1].

Méthode numérique pour les sandwichs 5 couches

Afin de résoudre le problème aux valeurs propres complexes non linéaires de manière exacte, nous avons proposé un algorithme numérique s'appliquant aux sandwichs coques à amortissement hybride 5 couches [ACL2]. Cet algorithme est basé sur la MAN qui permet le calcul direct des quantités modales. Les résultats ont été validés par comparaison à un modèle analytique et à ceux obtenus en utilisant la méthode des énergies modales complexes (MSEC). Comme conclusion, nous avons montré que la MAN est bien plus efficace que la MSEC, particulièrement pour de grandes valeurs d'amortissement passif ou d'un contrôle important [ACL2]. Par ailleurs, la mise en œuvre des approximations de Padé ont permis d'accélérer la convergence.

Bilan

Les différents travaux menés sur le contrôle actif passif des structures ont permis d'observer que l'on avait un contrôle des phénomènes vibratoires sur une plage de fréquence plus élevée et pour un apport massique, dû à l'ajout de patchs, relativement faible. **Cependant ces solutions se sont révélées difficilement applicables à une échelle industrielle sur des objets de taille relativement importante. En effet, à la fois l'énergie pour le contrôle actif ainsi que le coût des patchs piézoélectriques rendent cette solution peu réaliste. Par ailleurs, nous avons pu observer dans les différents modèles que la dissipation se faisait en grande partie grâce à la présence du cœur viscoélastique.**

3.2.2 Modèle solide coque pour le contrôle passif de vibrations

Notre deuxième proposition d'amélioration concerne ici l'étude d'éléments finis solides coques pour les structures sandwich. Ce travail consistait principalement à améliorer les modèles éléments finis en proposant des éléments plus polyvalents permettant d'étudier tout à la fois des structures épaisses et des structures plus élancées.

Ces modèles appelés solide-coques sont basés sur une formulation purement tridimensionnelle, c'est-à-dire qu'aussi bien au niveau de la géométrie que pour la loi de comportement, ils ne nécessitent que des degrés de liberté en déplacement comme on peut le voir Figure 18.

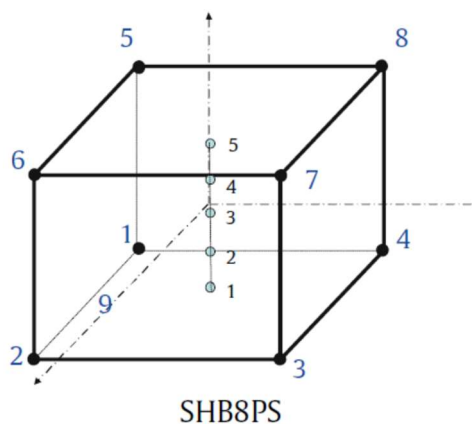


Figure 18: Élément fini de type coque-solide

Ils permettent de modéliser de façon satisfaisante des structures en grandes transformations, avec une actualisation de la configuration plus aisée que dans le cas de présence de DDLs en rotation, et peuvent être facilement connectés à des éléments finis 3D ayant les mêmes nombres de degrés de liberté [ACL8].

Cependant, tout comme pour les éléments coques, ils peuvent être sujets à certains verrouillages qui peuvent être de type cisaillement, membrane ou volumique. Il convient alors, pour leur assurer une formulation robuste et efficace, de trouver un moyen d'éviter ou d'éliminer d'éventuels problèmes de verrouillage que l'on peut être amené à rencontrer. Le traitement de ces verrouillages s'est fait ici par méthode EAS [6].

La **{Pb1}** a été résolue en considérant dans l'élément un modèle de type zig-zag tel que proposé par Carrera dans [7] assemblage de dans le cas d'un modèle analytique de type poutre, puis nous avons développé un élément fini de types coques pour les sandwichs à 5 couches. La **{Pb2}** a été résolue par une méthode numérique générique que nous avons développée dans [ACL4]. Cette dernière couple la Méthode Asymptotique Numérique avec la méthode de Différentiation Automatique.

Elément fini solide coque pour l'amortissement passif

Dans le cas présent, on a uniquement un amortissement passif au cœur et le sandwich est constitué de faces élastiques et d'un cœur viscoélastique. Nous avons développé dans le cadre des travaux de thèse de Fessal Kpeky [5] un élément de type SHB8PS pour la prise en compte de l'amortissement passif. De très bons résultats ont été obtenus par comparaison au logiciel de référence Abaqus [4]. A titre illustratif, on peut voir dans [ACL9] qu'il nous faut 5 fois moins d'éléments pour obtenir les trois premiers modes complexes d'une structure sandwich tel qu'on peut le voir Figure 19.

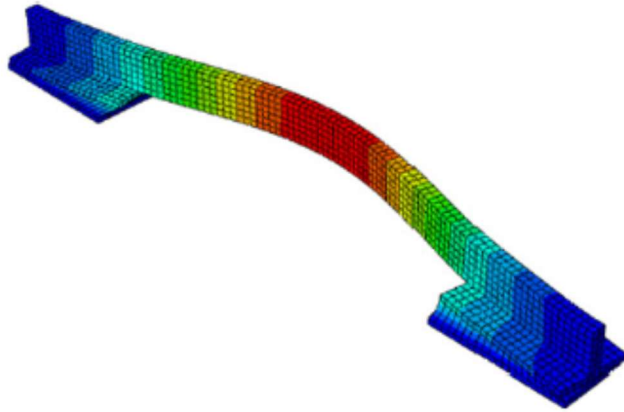


Figure 19: Premier mode de déformation d'un rail [ACL9]

Elément finis solide coque pour l'amortissement actif-passif

Dans le cas présent on a ajouté des DDL électriques à un élément solide coque sandwich afin de pouvoir modéliser des patches piézoélectriques. Ces développements ont donné d'excellents résultats, et cet élément, le SHB8PSE, a été introduit dans le logiciel Abaqus [ACL13]. A titre illustratif, on peut voir Figure 20 deux structures qui peuvent être modélisées à partir de cet élément.

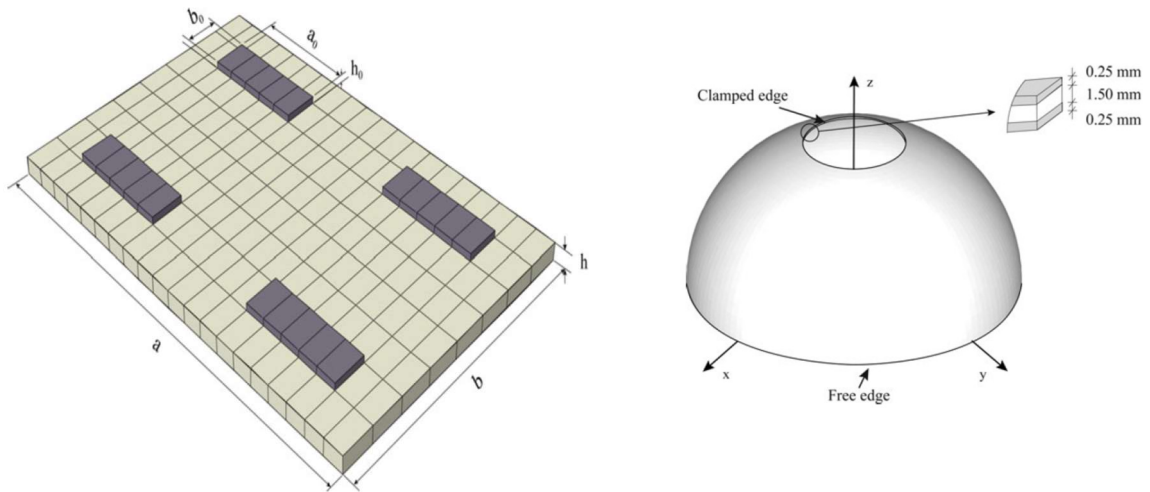


Figure 20: Exemple de structure modélisable par l'EF SHB8PSE [ACL13]

Bilan

Les différents travaux menés sur les éléments coque solide ont permis d'améliorer grandement la modélisation élément fini de structure composite amortissante, et ce à la fois pour la prise en compte de l'amortissement passif avec des temps de calcul réduits pour l'obtention des modes et fréquences propres, mais aussi pour la prise en compte d'amortissement actif grâce au développement du SHB8PSE.

D'un point de vue industriel, ces résultats sont très exploitables car l'élément formulé a été implémenté dans le logiciel Abaqus.

3.2.3 Contrôle passif de vibrations au moyen de structures composites

Notre troisième proposition d'amélioration concerne ici l'étude de structures sandwich à faces composites. Dans le cas présent, on a uniquement un amortissement passif au cœur apporté par l'effet de cisaillement de la couche viscoélastique. Les faces élastiques sont quant à elles obtenues à partir de stratifiés orientés différemment comme on peut le voir Figure 20. La {Pb1} a été résolue en prenant un modèle de type zigzag appliqué aux composites. La {Pb2} a été résolue en enrichissant la méthode DIAMANT [8].

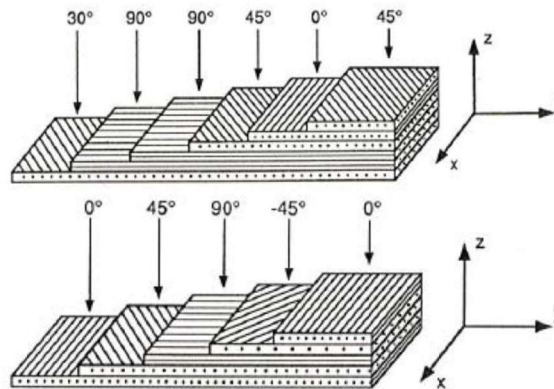


Figure 21: Exemple de stratifiés unidirectionnel [9]

Elément plaque composite

Dans un premier temps, un modèle éléments finis a été développé pour l'analyse vibratoire d'une plaque sandwich (orthotrope élastique)/(orthotrope viscoélastique)/(orthotrope élastique). Une étude numérique de la variation des propriétés amortissantes des structures a été réalisée en fonction de l'orientation des fibres des matériaux des faces [ACL7]. Ces différents résultats ont permis par la suite de réaliser une étude de sensibilité de l'effet d'amortissement en fonction des paramètres géométriques et des propriétés physiques des

matériaux [ACL10]. A titre illustratif, on peut voir Figure 21 la variation du facteur de perte en fonction de l'évolution de l'épaisseur de la couche visqueuse.

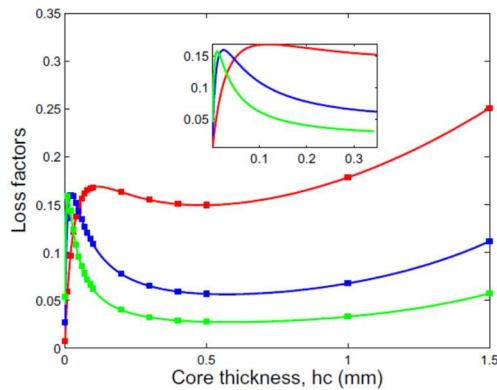


Figure 22: Evolution du facteur de perte pour les trois premiers modes d'une plaque sandwich à cœur viscoélastique. (R 1, B 2, J 3) [ACL10]

Méthode numérique pour les sandwichs à faces composite orthotrope

Dans un second temps, nous avons dans le cadre de la thèse d'Akoussan [9] développé une méthode numérique pour étudier la variation des propriétés amortissantes en fonction d'un paramètre de modélisation choisi. L'étude se fait par la résolution d'un problème générique, résiduel, complexe et non linéaire de valeurs propres ayant une dépendance en fréquence et un paramètre de modélisation qui décrit un intervalle d'étude. Cette méthode est basée sur la MAN, la différenciation automatique, la technique de l'homotopie et la continuation. Une application est proposée et réalisée dans [ACL12] pour étudier la variation des propriétés amortissantes d'une plaque sandwich viscoélastique symétrique à trois couches en fonction de l'orientation des fibres et de leurs faces orthotropes. Ces travaux sont dans un grand intérêt théorique car c'est le premier cas d'utilisation de la MAN avec une dépendance selon 2 paramètres de chemin. On peut voir Figure 23 une comparaison entre les résultats obtenus par cette nouvelle méthode et les résultats obtenus par itérations successives dans la littérature.

Bilan

La modélisation des structures composites proposées ici dans [ACL7] ainsi que la méthode numérique à 2 paramètres de chemin proposée dans [ACL12] ont permis de simuler le comportement des structures sandwich à cœur viscoélastique. **Les différents travaux menés ici sont exploitables industriellement, en effet ils ont permis l'obtention de solutions plus légères (faces stratifiées) tout en garantissant un amortissement suffisamment élevé (choix des paramètres géométriques au moyen de la méthode proposée).**

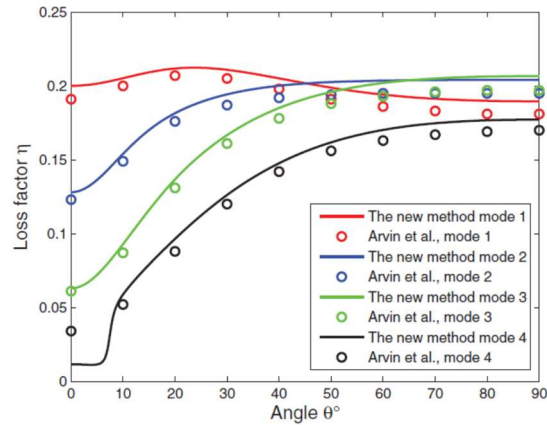


Figure 23: Evolution du facteur de perte pour les premiers modes d'une plaque sandwich à cœur viscoélastique obtenus directement par la nouvelle méthode proposée. [ACL12]

3 Du modèle à la structure: expérimentation & tests

Nous avons vu au paragraphe précédent le cheminement de nos travaux pour l'obtention de structures composites à fort pouvoir amortissant. L'ensemble de ces solutions sont constituées d'un assemblage de couches très souvent collées entre elles pour des raisons liées aux moyens de fabrication et d'élaboration. Nous proposons aujourd'hui d'explorer le potentiel de la FA pour aller vers une nouvelle solution qui minimise le poids de la structure tout en garantissant un amortissement important sur une large bande de fréquence (Solution 4 proposée sur la Figure 14). Nous allons tout d'abord préciser le degré de maturité des nouvelles possibilités de conception et d'élaboration qu'apporte la FA. Puis nous proposerons un projet de conception de structure globale et préciserons les travaux réalisés, ceux en cours et ceux à développer.

3.3.1 La Fabrication Additive pour des structures aux formes complexes

Comme nous l'avons détaillé au chapitre 2 et synthétisé dans le Tableau 3, la FA peut être à la source d'innovations de types très différents. Parmi ces potentiels d'innovation, les capacités à réaliser des géométries nouvelles, à alléger les pièces et réduire les assemblages sont des leviers d'action considérés comme très importants par de nombreux experts du secteur de la FA pour l'adoption de cette technologie.

En effet, comme on peut le voir sur la figure 24, l'ensemble des capacités à transformer la conception des pièces recueille la plus grande importance juste après la capacité de personnalisation qu'apporte la FA. De manière synthétique, on peut dire pour la **conception de structure composite** que la FA permet de « **concevoir par rapport à une performance attendue et non plus par rapport aux techniques de fabrication et/ou d'assemblage** » [10].

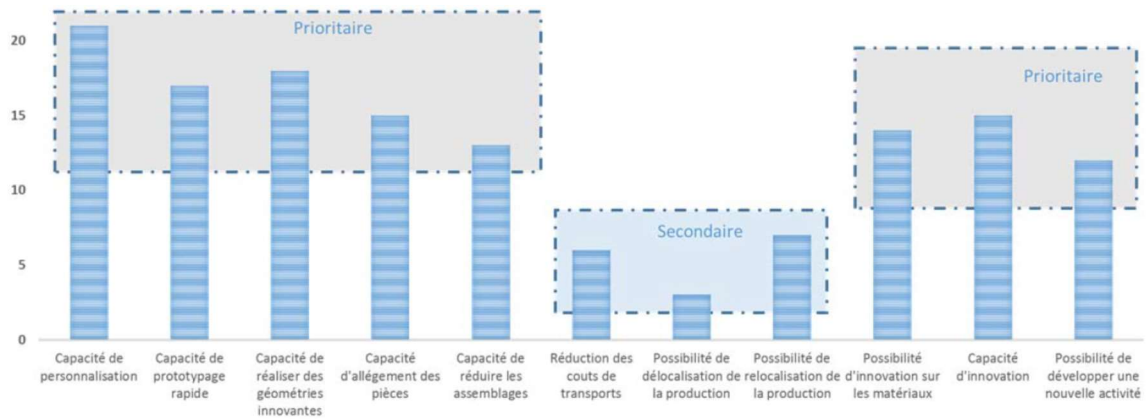


Figure 24: Enjeux d'adoption de la FA selon un panel de 30 experts [10]

Toutefois, bien que les opportunités de «re-conception» ou plus exactement de «nouvelles conceptions» semblent nombreuses, nous sommes, comme on peut le voir sur la Figure 25 à travers le degré de maturité des techniques, encore au début de la mise en œuvre de ces solutions. En effet, nous concernant, nous travaillerons par la suite sur des **formes de composite dites hiérarchiques** qui, comme on peut le voir Figure 25, sont encore en cours de développement au stade théorique.

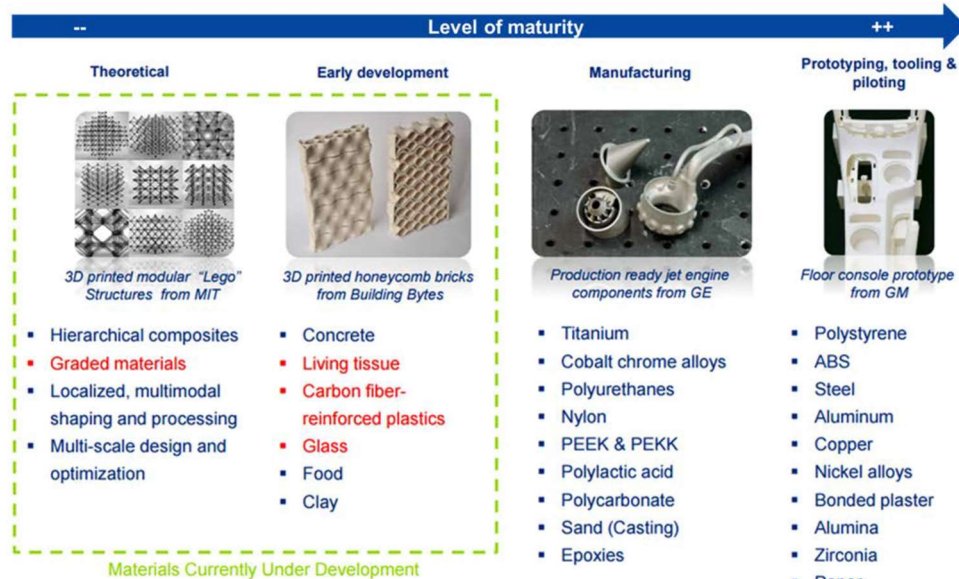


Figure 25: Degré de maturité des pièces conçues en FA [11]

3.3.2 Nouvelles structures hiérarchiques amortissantes

Comme nous l'avons précisé au paragraphe 3.3.1, ces dernières années, les industriels du transport (automobile, aéronautique,...) souhaitent alléger de plus en plus les structures pour diminuer la consommation énergétique lors de leurs utilisations. Pour ce faire ils intègrent très souvent en amont la fonction anti-vibratoire dans les matériaux constituant

les pièces structurales pour éviter tout traitement curatif (par ex. : triangle de suspension en composites thermoplastiques développé par l'ONERA, CETIM et Peugeot [12]).

Afin de garantir des performances amortissantes élevées sur une large gamme de fréquences, nous avons vu au paragraphe 3.2 que l'utilisation de polymères viscoélastiques composites est particulièrement indiquée [13,14]. La quantification des performances amortissantes de ce type de matériau passe à la fois par la construction d'un modèle numérique adapté tel que ceux développés au paragraphe 3.2, ainsi que par la validation expérimentale. En ce qui concerne l'allègement, une des structures les plus performantes est la structure de type sandwich « nid d'abeilles », illustrée Figure 26 (a), qui est très souvent intégrée.

En effet, d'un point de vue de la tenue mécanique, elle allie de manière excellente rigidité et légèreté et offre de plus de très bonnes caractéristiques thermiques d'isolation. Ces dernières années, de nombreux travaux ont été entrepris afin de définir des structures avec des formes nouvelles d'âme afin d'optimiser le rapport rigidité/poids de la structure.

Les travaux de l'équipe d'Ashkan Vaziri [17, 18] ont clairement montré que les structures de type nid d'abeilles hiérarchique (Figure 26 (b)) offraient de meilleures performances que les structures classiques.

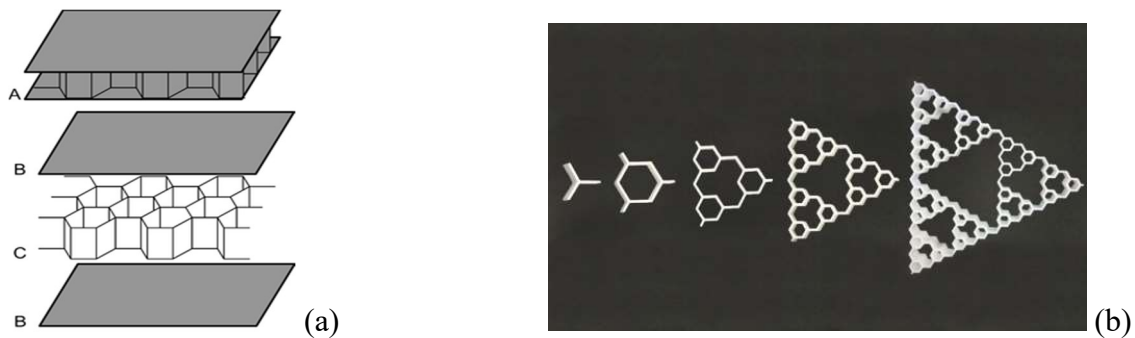


Figure 26: (a) Sandwich type nid d'abeilles, (a) classique [15], (b) hiérarchique [16]

Les deux types de structures présentées précédemment répondent chacune à des besoins et fonctionnalités différentes. En effet comme nous l'avons vu au paragraphe 1, le sandwich à cœur viscoélastique offre la meilleure source d'amortissement alors que la structure « nid d'abeilles » optimise le ratio rigidité/poids.

A ce jour, il n'existe pas de solutions qui intègrent ces deux caractéristiques dès la phase amont de conception. En effet, d'après la revue bibliographique récente de Aumjaud *et al* [19], la prise en compte de l'amortissement dans les structures de type nid d'abeilles se fait souvent par ajout d'amortisseur externe en aval de la conception.

Afin de répondre à ce manque, j'ai lancé la conception d'une structure sandwich hiérarchique amortissante au moyen de procédé de FA de type FDM. Cette recherche à plusieurs niveaux se fait en collaboration avec deux autres laboratoires à savoir : le LRGP pour la conception du filament composite viscoélastique et le LEM3 pour la modélisation,

ainsi que pour la partie caractérisation des performances vibratoires de la structure finale. L'idée est de développer la structure présentée Figure 27, en utilisant une approche globale multi-échelle.

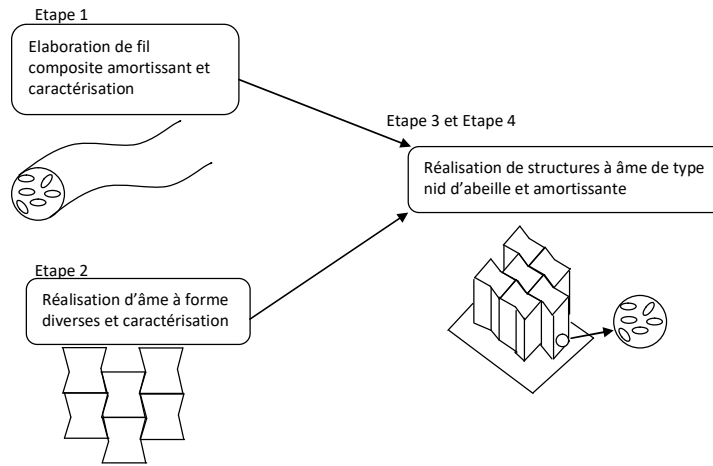


Figure 27: Structure composite amortissante par impression 3D

Figure 28, nous positionnons à l'aide du canevas proposé au chapitre 2 les différentes étapes clés et problématiques de recherche à développer afin d'aboutir à la conception par FA de la structure proposée précédemment et illustrée Figure 27.

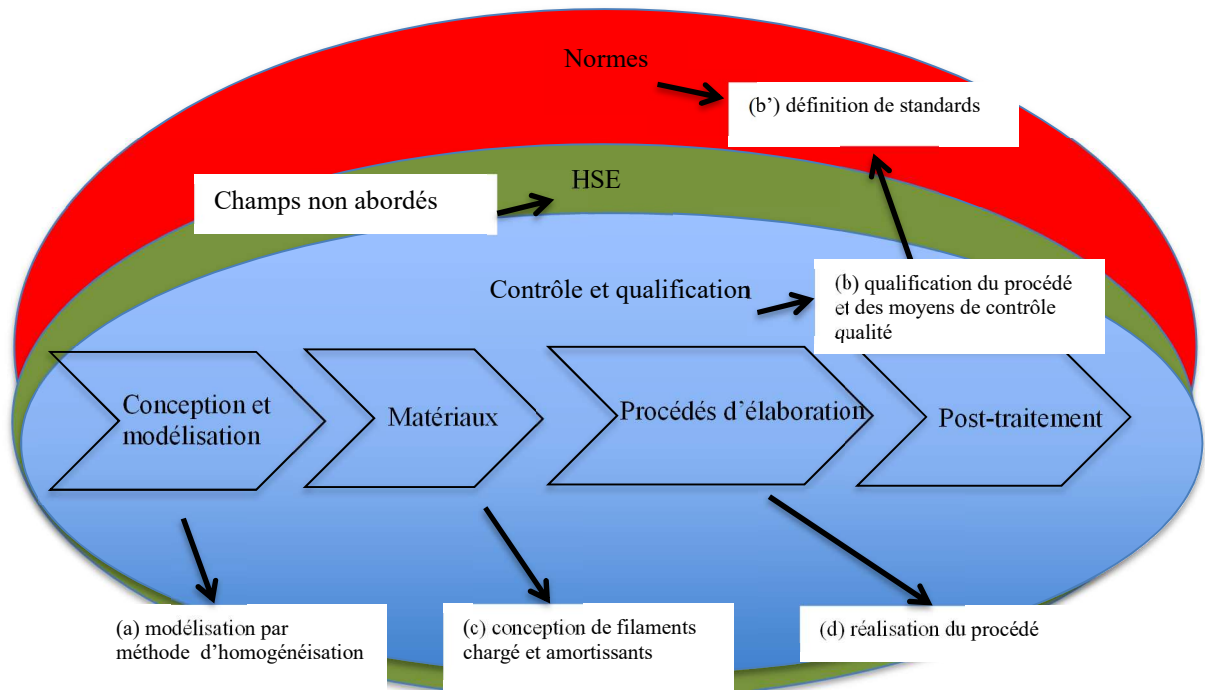


Figure 28: Problématiques de recherches abordées aux différents niveaux pour la conception de structure composite amortissante par impression 3D

(a) Modélisation par méthode d'homogénéisation

Afin de modéliser l'amortissement obtenu dans les structures imprimées avec des filaments contenant des inclusions de matériau viscoélastique, nous avons dans le cadre des travaux de thèse de Lougou [20] développé des méthodes Eléments Finis multi-échelles ou multi-niveaux (EF2) [21].

La méthode des éléments finis multi-échelles est une méthode d'homogénéisation qui permet de déterminer le comportement du matériau composite à l'échelle macroscopique, à partir des comportements de ses constituants à l'échelle microscopique, et à travers la résolution d'un problème aux limites sur un VER soigneusement choisi, par la méthode des éléments finis. On peut voir sur la Figure 29 une représentation du modèle et de la structure. En présence de matériaux viscoélastiques dont les modules d'Young varient en fonction des fréquences de vibration, le problème à l'échelle microscopique devient non linéaire et le principe de superposition qui n'est applicable que pour des problèmes linéaires ne peut plus s'appliquer pour construire le tenseur de localisation. Dans ces travaux, nous avons combiné la méthode des éléments finis multi-échelles à la MAN couplée à la différentiation automatique tel que présenté dans [ACL4].

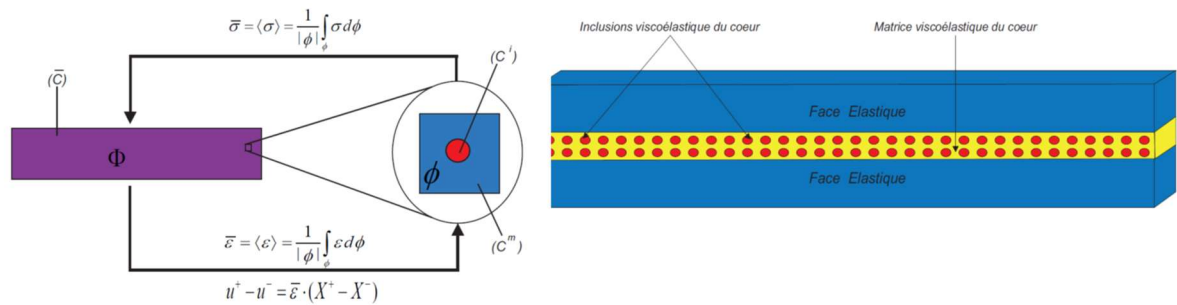


Figure 29: Modélisation à 2 échelles de matière à propriétés amortissantes [20]

Les résultats de ces travaux ont été soumis à publication et devraient bientôt être disponibles [ACLS1]. Nous prévoyons par ailleurs de continuer et d'affiner ces travaux dans le cadre de la thèse de Lara Garcia qui a débuté en octobre 2019 et qui porte sur les "Structures multi-matériaux à zones d'amortissements spatialement contrôlés par impression 3D".

(b) Qualification du procédé et des moyens de contrôle qualité, définition de standards

Au cours des travaux de thèse de Fabio Cruz [30], nous avons mené d'importants travaux sur la mise en place de moyens de mesure de la qualité d'impression pour les pièces obtenues par FA Open Source de type FDM. Un premier travail fut de mesurer le niveau de qualité obtenu par les machines FDM issues de l'important développement Open

Source tel que nous l'avons précisé dans le deuxième chapitre. Figure 30 nous rappelons le principe simple du procédé FDM à savoir la déposition de plastique fondu couche par couche via une extrudeuse mobile venant se charger d'un filament thermoplastique.

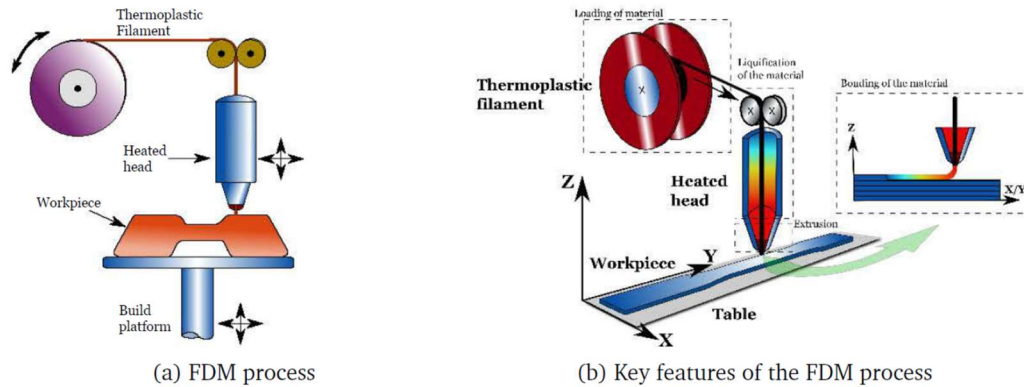


Figure 30: Principe de la technique FDM (ou FFF) [22]

Figure 31 nous présentons un modèle de benchmark géométrique que nous avons proposé afin de mesurer la qualité d'impression des machines [ACL6]. A partir de ce dernier et d'une étude poussée impliquant plus de 3 500 mesures nous avons pu positionner les technologies FDM Open source à un IT grade compris entre 14 et 16 selon la norme iso 286. Ce positionnement a permis de prouver que les machines Open source atteignaient les standards des machines professionnelles.

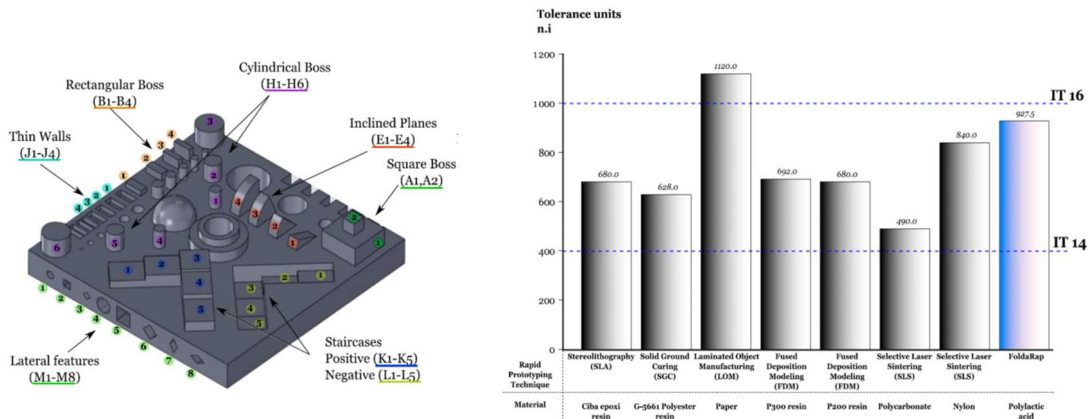


Figure 31: Benchmark proposé pour la qualification des imprimantes FDM [ACL6]

Depuis cette année une norme est apparue pour mesurer plus spécifiquement les performances des machines de FA. Nous pensons retravailler sur cette définition principalement pour la qualification d'un nouveau procédé d'impression que nous expérimentons actuellement, à savoir le FGF ou FPF (dépôt de particule ou granulé fondu).

(c) Conception de filaments chargés et amortissants

En collaboration avec le LRGP nous avons au cours des travaux de master de Jennifer Andrea Villamil conçu des filaments chargés à propriétés amortissantes (et imprimables) tels que visibles Figure 32. Ces travaux devraient être publiés si nous obtenons l'accord de la DGA pour la partie opératoire. Pour la partie qualification, nous avons pu proposer dans [C-ACTN4] un nouveau test de qualification énergétique de la liaison inter faciale. La modification de la nature des filaments va être continuée dans le cadre des travaux de thèse de Lara Garcia.



Figure 32: Conception de filament aux propriétés amortissantes

(d) Réalisation du procédé

Dans le cadre d'un achat région nous avons conçu sur mesure, en collaboration avec l'équipe du LF2L et l'entreprise Tobeca, une machine d'impression 3 D open source permettant l'impression de filaments ainsi que de matériaux viscoélastiques et de polysiloxanes. Cet équipement en phase de test est présenté Figure 33. Nous envisageons la qualification de cet équipement à travers un master prévu pour février 2020.

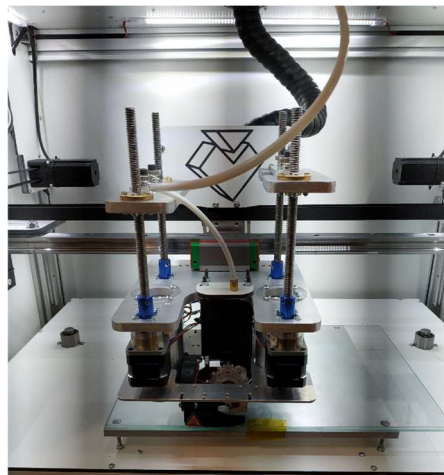


Figure 33: Nouvelle machine d'impression pour les structures amortissantes.

4 Conclusion

L'efficacité énergétique dans le secteur des **transports** mérite une attention particulière d'un point de vue économique et pour l'environnement. Ce secteur qui dépend presque exclusivement d'un seul combustible, le pétrole, représente un peu plus de 30 % de la consommation d'énergie et est responsable d'environ un quart des émissions à effet de serre en France. Aujourd'hui, les dépenses de carburant représentent le coût d'exploitation le plus élevé pour la plupart des compagnies aériennes et on comprend le besoin d'**allègement** croissant dans ce secteur. L'intégration de **matériaux composites** dans la fabrication des structures répond bien à ce besoin, toutefois on ne doit pas oublier que ces structures mobiles in-situ sont confrontées aux **phénomènes vibratoires** qu'il faut **contrôler et amortir**. De par les nombreuses possibilités offertes par **la FA** pour la conception de nouvelles structures aux formes optimisées, on comprend l'immense **potentiel de développement** qui émerge. La **FA open source** nous permet d'aller encore plus loin en recherche dans ce domaine grâce à la souplesse et aux **infinies possibilités** de modifier tous les éléments de la chaîne de valeurs à savoir l'objet numérisé (ex : définition de surfaces paramétrées et tranchage différent grâce au logiciel IceSL), les matériaux utilisés (conception de nouveaux filaments souple et chargés), le process de FA (modification et conception d'une machine à façon adapté au besoin).

5 Références

- [ACL1] H Boudaoud, S Belouettar, EM Daya, M Potier-Ferry. “A shell finite element for active-passive vibration control of composite structures with piezoelectric and viscoelastic layers” *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 15 (3-4), 208-219 (2008).
- [ACL2] H Boudaoud, S Belouettar, M Potier-Ferry. “A numerical method for nonlinear complex modes with application to active–passive damped sandwich structures”. *Engineering Structures* 31 (2), 284-291 (2009).
- [ACL3] H. Boudaoud, EM Daya, S Belouettar, L Duigou, M Potier-Ferry. “Damping analysis of beams submitted to passive and active control”. *Engineering Structures* 31 (2), 322-331 (2009).
- [ACL4] A Lejeune, F Béchet, H Boudaoud, N Mathieu, M Potier-Ferry “Object-oriented design to automate a high order non-linear solver based on asymptotic numerical method”. *Advances in Engineering Software* 48, 70-88 (2012).
- [ACL6] “Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing”. MC Fabio Alberto Cruz Sanchez, Hakim Boudaoud, Laurent Muller. *Virtual and Physical Prototyping* 9 (3), 151-167 (2014).
- [ACL7] K Akoussan, H Boudaoud, EM Daya, E Carrera. “Vibration modeling of multilayer composite structures with viscoelastic layers”. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 22 (1-2), 136-149 (2015).
- [ACL8] F Kpeky, H Boudaoud, F Abed-Meraim. “Modeling of viscoelastic sandwich beams using solid–shell finite elements”. *Composite Structures* 133, 105-116 (2015)
- [ACL9] KG Lougou, H Boudaoud, EM Daya, L Azrar. “Vibration modeling of large repetitive sandwich structures with viscoelastic core”. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 23 (4), 458-466 (2016)
- [ACL10] K Akoussan, H Boudaoud, Y Koutsawa, E Carrera. “Sensitivity analysis of the damping properties of viscoelastic composite structures according to the layers thicknesses”. *Composite Structures* 149, 11-25. (2016)
- [ACL12] K Akoussan, H Boudaoud, EM Daya, Y Koutsawa, E Carrera. “Numerical method for nonlinear complex eigenvalues problems depending on two parameters: Application to three-layered viscoelastic composite structures”. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 25 (15-16), 1361-1373 (2018)
- [ACL13] F Kpeky, F Abed-Meraim, H Boudaoud, EM Daya. “Linear and quadratic solid–shell finite elements SHB8PSE and SHB20E for the modeling of piezoelectric sandwich structures”. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 25 (7), 559-578 (2018).
- [C-ACTN4]“Elaboration de filaments élastomère thermoplastiques pour l’impression de structures multi-polymères par dépôt de fil fondu.” A. Villamil, H. Milagres, A. el Akroud, S. Hoppe, H. Boudaoud et C. Nouvel. SFGP Nantes. (2019)
- [1] Directive 2012/27/EU of the European parliament and of the council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing directives 2004/8/EC and 2006/32/EC text with EEA relevance OJ L 315, 14112012, pp. 1–56 (2012)

- [2] Erik Dahlquist, Iana Vassileva, Eva Thorin, Fredrik Wallin. How to save energy to reach a balance between production and consumption of heat, electricity and fuels for vehicles *Energy*, Volume 46, Issue 1, October 2012, Pages 16-20
- [3] H Boudaoud Modélisation de l'amortissement actif-passif des structures sandwichs Université Paul Verlaine-Metz (2007)
- [4] Abaqus Standard. Version 5.8. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, 1998.
- [5] Fessal KPEKY. Formulation et modélisation des vibrations par éléments finis de type solide-coque : application aux structures sandwichs viscoélastiques et piézoélectriques. Université de Lorraine (2016)
- [6] Abed-Meraim F, Combescure A. An improved assumed-strain solid-shell element formulation with physical stabilization for geometric nonlinear applications and elastic-plastic stability analysis. *Int J Numer Methods Eng*;80:1640–86. (2009)
- [7] Carrera E. An assessment of mixed and classical theories on global and local response of multilayered orthotropic plates. *Composite Structures*, 50 :183–198, (2000)
- [8] Y. Koutsawa, I. Charpentier, E.M. Daya et M. Cherkaoui : A generic approach for the solution of nonlinear residual equations. Part I : The Diamant toolbox. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(3-4):572–577, (2008)
- [9] Komlan AKOUSSAN. Modélisation et conception de structures composites viscoélastiques à haut pouvoir amortissant. Université de Lorraine (2015).
- [10] Futur de la fabrication additive. Rapport Pipame DGE. (2017).
- [11] Yassine Saadlaoui, Jean-Louis Milan, Jean-Marie Rossi, Patrick Chabrand. Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 43, Part 1, Pages 178-186. (2017)
- [12] <http://www.onera.fr/fr/actualites/onera-et-cetim-realisent-une-rupture-dans-domaine-production-pieces-composites> (consulté le 26/08/2019).
- [13] F.T. Fisher, L.C. Brinson, Viscoelastic interphases in polymer-matrix composites: theoretical models and finite-element analysis, *Composites Science and Technology* 61 (2001) 731–748.
- [14] H.H. Zhang ,L.X. Li, Modeling inclusion problems in viscoelastic materials with the extended finite element method, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 45, Issue 10, August 2009, Pages 721–72.
- [15] M. Hamdaoui, G. Robin, M. Jrad, E.M. Daya, Optimal design of frequency dependent three-layered rectangular composite beams for low mass and high damping, *Composite Structures*, Volume 120, February 2015, Pages 174-182
- [16] Y. Koutsawa, M. Cherkaoui, E.M. Daya, Multicoating inhomogeneities problem for effective viscoelastic properties of particulate composite materials, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 131 (2009), pp. 2–11.
- [17] A. Ajdari, B.H. Jahromi, J. Papadopoulos, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, Hierarchical honeycombs with tailorable properties, *Int J Solids Struct*, 49 (2012), pp. 1413–1419
- [18] R. Oftadeh, B. Haghpanah, D. Vella, A. Boudaoud, A. Vaziri, Optimal Fractal-Like Hierarchical Honeycombs, *Phys. Rev. Lett.* 113, (2014)

- [19] Aumjaud P, Smith CW, Evans KE. A novel viscoelastic damping treatment for honeycomb sandwich structures, *Composite Structures*, volume 119, pages 322-332. (2015)
- [20] Lougou Komla Gaboutou . Méthodes multi-échelles pour la modélisation des vibrations de structures à matériaux composites viscoélastiques (2015).
- [21] F. Feyel and J-L. Chaboche. Fe2 multiscale approach for modeling the elasto-viscoplastic behaviour of long fiber sic/ti composite materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 183:309330, 2000.
- [22] Fabio Cruz. Methodological proposition to evaluate polymer recycling in open-source additive manufacturing contexts. Université de Lorraine. (2016)

CHAPITRE 4

Potentiel de la fabrication additive open source pour l'Economie Circulaire

1	INTRODUCTION	85
2	NOTIONS CLES DES PROJETS	86
2.1	ECONOMIE CIRCULAIRE	86
2.2	RECYCLAGE DES THERMOPLASTIQUES	86
2.2	CIRCUIT EN BOUCLE FERME	87
3	LE PROJET GREENFABLAB	88
3.1	RECUPERATION ET PREPARATION	89
3.2	TRANSFORMATION	89
3.3	EVALUATION DE LA QUALITE.....	90
3.4	BILAN	91
4	LE PROJET GREENLOCAL3D	91
4.1	FACTEURS D'INFLUENCE.....	93
4.2	MODELISATION ET SIMULATION	93
4.3	MATERIAU ET PROCEDES	93
4.4	STRUCTURE	95
6	CONCLUSION	96
7	REFERENCES	97

1 Introduction

Le concept de "l'usine du futur" existe depuis dix ans. Cependant, les changements introduits dans les procédés de production des usines ont eu jusqu'à présent peu d'impact sur les questions environnementales [1]. En parallèle, on assiste aujourd'hui à un bouleversement dans les moyens de production manufacturière. L'un des facteurs clés de ces transformations est l'émergence de la FA qui permet comme nous l'avons vu au chapitre 2 de produire en petites séries de manière plus économique, plus rapide et à une échelle locale. Compte tenu des différentes spécificités des procédés de FA, un large champ d'opportunités se dessine pour développer des moyens de production plus durables à différents niveaux de la chaîne de valeur [2] :

- Au stade de la conception des pièces : la conception est plus libre et les formes peuvent être optimisées par rapport aux pièces modélisées pour des procédés plus traditionnels et permettre aussi, comme proposé au chapitre 3, la création de nouvelles pièces plus performantes tout en étant plus légères.

- Au stade de la production, selon le principe fondamental de la FA, qui rappelons-le consiste en une fabrication couche par couche, il y a donc moins de déchets produits au cours de la production qu'avec les technologies basées sur l'enlèvement ou la déformation du matériau.

- En cours d'utilisation, la durée de vie des pièces est augmentée par des techniques de réparation in situ comme nous l'avons spécifié Figure 6.

- Enfin, avoir une production plus proche du consommateur final réduit l'empreinte carbone de la pièce.

C'est sur la base de cette dernière opportunité offerte par la FA que nous avons dans un premier temps développé le projet **GreenFabLab**, puis nous l'avons étendu et proposons désormais le projet **GreenLocal3D**. Ces deux projets visent, à des échelles différentes, à développer dans le cadre de l'économie circulaire le recyclage des matériaux thermoplastiques dans de nouveaux procédés, distribué en circuit fermé plus proche des sites de production de FA, et ainsi répondre aux défis du traitement des déchets plastiques.

Nous présentons dans un premier paragraphe les fondamentaux de ses projets, à savoir les notions **d'Economie Circulaire (EC)**, de recyclage des matériaux **Thermoplastiques (TP)** et de **Circuit fermé (CLCP)**.

Dans un deuxième chapitre, nous présentons le projet **GreenFabLab** et les différents travaux menés dans ce cadre.

Enfin, au troisième chapitre, suite aux « limites » du projet **GreenFabLab**, nous présentons les développements réalisés et à venir d'un projet plus large, le projet **GreenLocal3D**.

4.2 Notions clés des projets

4.2.1 Economie Circulaire (EC)

De nos jours, les systèmes économiques modernes peuvent être classés selon deux paradigmes principaux : les systèmes linéaires et les systèmes circulaires.

Le modèle linéaire est un archétype conçu sur une vue statique des flux de production et de logistique qui va de la fourniture en passant par la transformation des matières premières, à l'utilisation, puis au rejet du produit fini [1]. Cette approche linéaire est très limitée et se révèle catastrophique pour la durabilité économique et environnementale.

Si l'on considère l'état de l'art [3][4], on constate que les systèmes circulaires ou EC attirent de plus en plus l'attention en Europe et dans le monde entier comme un moyen potentiel pour notre société d'accroître sa prospérité, tout en réduisant sa dépendance vis-à-vis des matières premières et de l'énergie. Différentes définitions de l'EC sont données dans la littérature. L'une des plus admises est celle de la Fondation Ellen MacArthur, qui définit l'EC comme " an industrial system that is restorative or regenerative by intention and design "[5]. Récemment, de nombreux autres auteurs ont réduit la définition de l'EC. Parmi eux, Geissdoerfer et al [6] le définissent comme " a regenerative system in which resource input and waste, emission, and energy leakage are minimized by slowing, closing, and narrowing material and energy loops ", tandis que Saidani et al [7] déclarent que l'EC correspond au contraire du modèle linéaire " make-take-waste ". En résumé, l'objectif du concept d'EC est d'avoir un processus et une gestion intégrés qui minimiseront ou élimineront les déchets.

4.2.2 Recyclage des thermoplastiques (TP)

Historiquement, le recyclage du plastique a été orienté vers des installations centralisées afin de profiter d'économies d'échelle grâce à la production de produits de faible valeur. Cependant, cette approche doit faire face aux défis de la collecte et du transport de polymères à haut volume et à faible poids, ce qui génère un manque de rentabilité du recyclage du plastique dans ce contexte centralisé [8]. En 2014, sur 25,8 millions de tonnes de déchets plastiques collectés dans l'Union Européenne, 29,7 % ont été recyclés, 39,5 % ont servi à la valorisation énergétique et 30,8 % ont été mis en décharge [9]. Ces chiffres démontrent que l'élimination et la réutilisation du plastique est un problème qui est loin d'être résolu. Par conséquent, de nouvelles façons de réaliser ce recyclage devraient être explorées. Lorsque l'on parle d'activités de recyclage et de récupération du plastique, de nombreuses méthodes sont disponibles. Afin de faciliter la classification de ces méthodes,

l'ISO et l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ont normalisé la classification et la définition terminologique en quatre catégories comme on peut le voir sur le Tableau 4:

Le recyclage primaire correspond au recyclage des plastiques décontaminés et monotypes, afin d'obtenir du plastique recyclé ayant des caractéristiques similaires au plastique vierge.

Le recyclage secondaire correspond au recyclage des plastiques contaminés pour obtenir des plastiques recyclés dont les performances sont inférieures aux exigences initiales.

Termes utilisées par ASTM D7209-0	Termes utilisés par ISO 15270	Termes équivalents
Recyclage primaire	Recyclage mécanique	Recyclage, Re-extrusion, réutilisation, recyclage en boucle fermée
Recyclage secondaire	Recyclage mécanique	Reclassement
Recyclage tertiaire	Recyclage chimique	Recyclage en matière première
Recyclage quaternaire	Récupération d'énergie	Valorisation

Tableau 4: Terminologie pour le recyclage des plastiques [10].

Un recyclage tertiaire est effectué lorsque le recyclage primaire ou secondaire ne peut être réalisé en raison des difficultés à identifier et trier le matériau dans le déchet plastique. Le recyclage tertiaire est lié à la récupération des monomères par dépolymérisation des déchets plastiques, généralement par recyclage chimique ou thermique. Enfin, lorsqu'il n'est pas possible d'effectuer un des procédés de recyclage précédents en raison du nombre de cycles de recyclage et de la perte des propriétés du plastique, le recyclage quaternaire est effectué.

Le recyclage quaternaire correspond à la récupération d'énergie par incinération.

4.2.3 Circuit en boucle fermé (CLSC)

Si l'on considère la littérature [11], on peut voir que le recyclage est une activité qui peut être présente dans deux types de réseaux: les chaînes d'approvisionnement inversée (RSC) (ou logistique inversée (RL)) et les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée (CLSC). Le RSC est le réseau de récupération des produits mis au rebut pour recyclage ou réutilisation dans d'autres produits. Quant au CLSC, il correspond à un réseau qui intègre la chaîne d'approvisionnement en aval et en amont. Le flux de marchandises du fournisseur au client est réalisé par la chaîne d'approvisionnement directe, tandis que la

chaîne d’approvisionnement inverse récupère les produits auprès du client pour leur recyclage ou leur réutilisation. Lorsque les deux types de réseaux agissent en même temps, ils forment ce qu’on appelle un réseau en boucle fermée [12]. Peu d’études ont été menées dans le contexte des plastiques dont le recyclage est principalement centralisé, mais quelques auteurs ont proposé des pistes exploratoires et précisé les formes que devraient prendre un réseau type [11]. Ces pionniers effectuent une analyse exploratoire des pratiques de recyclage de l’industrie dans un réseau de type CLSC, afin de trouver des questions de recherche qui peuvent guider la recherche future dans ce domaine.

4.3 Le projet GreenFabLab

Le projet **GreenFabLab** se concentre sur le recyclage en circuit court des déchets plastiques post-impression 3D à récupérer et à valoriser par des procédés de FA. Sous un nouveau paradigme de "recyclage distribué", ce processus doit être réalisé en petites quantités, en utilisant des technologies abordables et flexibles et en couvrant une zone géographique limitée pour constituer l’unité de base d’un "réseau intelligent de recyclage". Plus précisément, l’objectif est de développer de manière plus efficace le recyclage des thermoplastiques par l’impression 3D. (<http://lf2l.fr/projects/green-fablab/>).

Dans le projet, nous nous concentrons sur le recyclage primaire et secondaire. En effet, comme expliqué dans [13], ces deux catégories sont économiquement viables et ont les meilleurs résultats si l’on considère les déchets plastiques qui ne sont pas "très chers à traiter et à séparer" [13]. Ainsi, pour conclure, le projet **GreenFabLab** est un projet CLCP portant sur le recyclage mécanique des déchets plastiques de type PLA très utilisé pour la FA. La Figure 34 représente les principales étapes du CLCP nécessaires pour assurer la chaîne de recyclage des TP utilisés dans la fabrication des filaments fondus (FFF) : (1) **récupération**, (2) **préparation**, (3) **transformation** et (4) **évaluation de la qualité**.

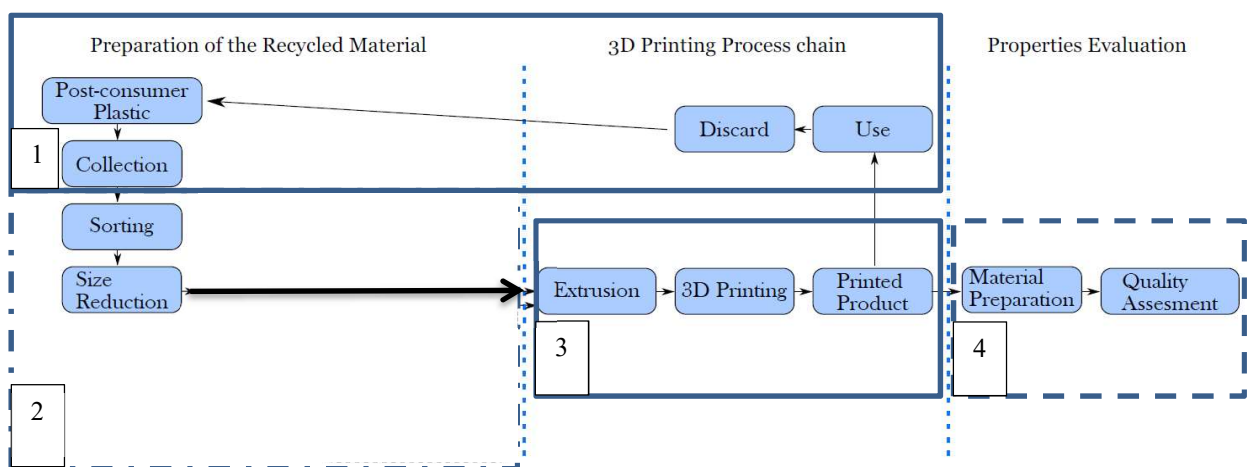


Figure 34: Boucle de recyclage pour la revalorisation par FA de TP [14]

4.3.1 Récupération et préparation.

Pour la partie récupération (1) de la Figure 34 nous avons, au cours de la thèse de Pavlo Santander, proposé un modèle de circuit distribué pour le recyclage du PLA [C-ACTI8]. Une optimisation économique et environnementale de la collecte a été proposée en fonction des paramètres clés visibles à la Figure 35.

Ces travaux ont prouvé la faisabilité économique d'un tel circuit et nous avons appliqué ce modèle à une vingtaine d'établissements scolaires de Lorraine, avec un retour sur investissement de moins d'un an si l'on considère les quantités de TP utilisés aujourd'hui dans ces établissements [ACL14].

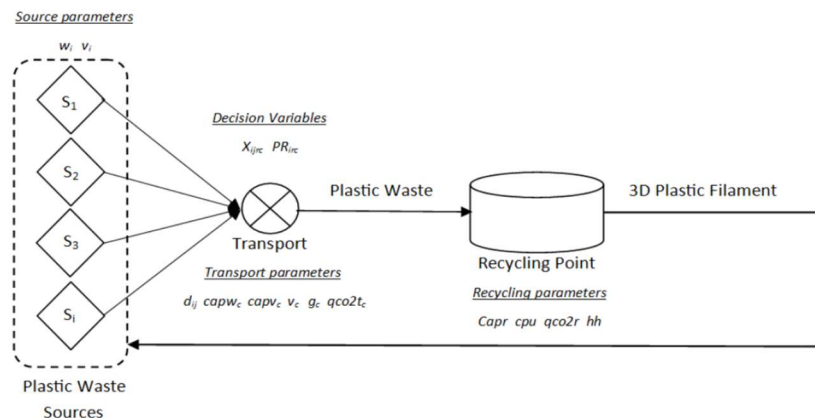


Figure 35: Paramètres du circuit court [C-ACTI8]

Afin d'améliorer les résultats nous avons développé un questionnaire en ligne participatif sur la quantité de PLA usagés dans les lycées avec à ce jour 74 réponses (<http://lf21.fr/green-fablab/logistic/>). Pour la partie préparation (2) Figure 33, nous avons considéré que dans le cadre d'un circuit fermé concentré sur le PLA et réservé aux établissements scolaires nous n'avons que la partie broyage à prendre en compte.

4.3.2 Transformation

Pour cette partie, de nombreux travaux ont été menés en collaboration avec le LRGP (Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, UMR 7274). Dans les travaux de thèse de Fabio Cruz, axés sur l'aspect procédé, nous avons pu démontrer la faisabilité technique du recyclage et de la réutilisation des TP pour l'impression par dépôt de filaments [ACL11]. Dans ce travail, un protocole de qualification des TP et plus particulièrement du PLA pour l'impression 3D a été proposé.

Nous illustrons Figure 36 les différents tests menés afin d'aboutir à une qualification de l'influence de chacune des étapes du process. La stratégie expérimentale mise en œuvre consistait à comparer la dégradation des matériaux au moyen de quatre boucles de recyclage proposées : Référence, Matières premières, Référence 3DP et 3DP. Pour chaque boucle, 5 cycles de recyclage complets ont été effectués.

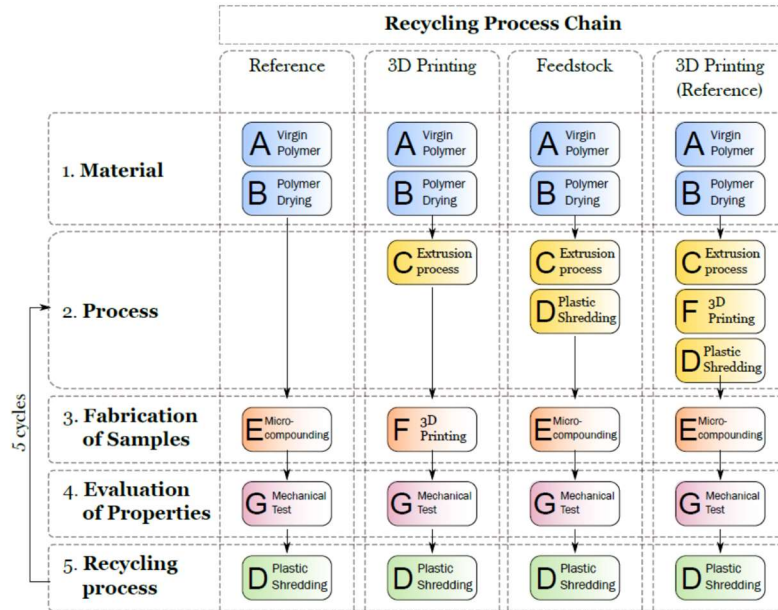


Figure 36: Etapes pour la qualification du recyclage des TP [ACL11]

4.3.3 Evaluation de la qualité

Afin de mesurer la qualité nous avons mis en place différents tests et ce principalement à deux niveaux. Le premier est un test de la qualité des filaments post extrusion. En effet l'obtention d'un diamètre de filament constant est une condition nécessaire pour une bonne impression [15]. Le deuxième est un test de traction mécanique uni axiale standard (ISO 527-1) avec des pièces imprimées tel que visible sur la Figure 37 (a).

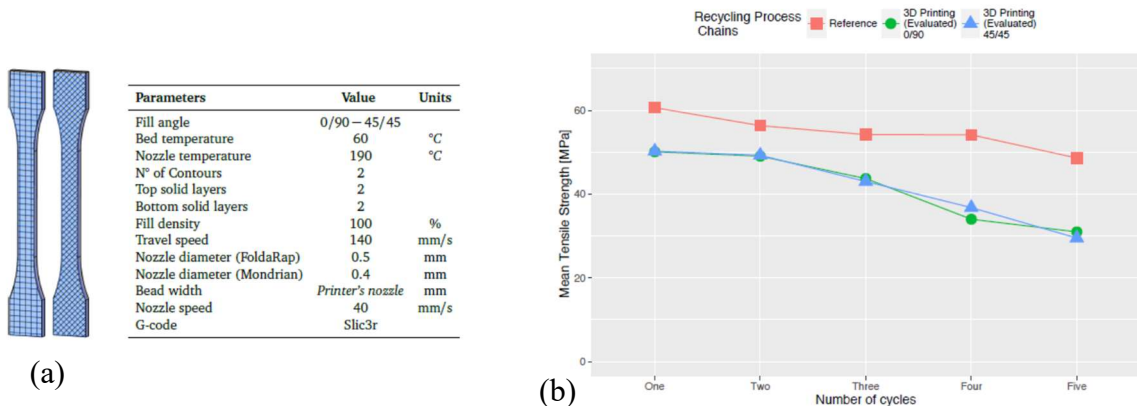


Figure 37: (b) Evolution de la limite d'élasticité du PLA suite à 5 étapes de recyclage pour des échantillons imprimés à 0/90 et 45/45 tel que décrit dans (a) [ACL11]

A partir de ces travaux nous avons pu quantifier la dégradation des propriétés mécaniques du PLA due au process de ré-extrusion ainsi que la dégradation due au process d'impression 3D Figure 36 (b).

4.3.4 Bilan

A travers le projet **GreenFabLab**, nos différents travaux de recherche ont abouti à la mise en place d'une **Economie Circulaire** autour du recyclage du PLA dans les différents établissements scolaires. Les apports qui ont été faits aux différents niveaux de la chaîne de valeur illustrée à la Figure 34 permettent d'envisager de dupliquer ce dernier dans d'autres régions où l'usage de l'impression 3D dans les établissements scolaires se développe aussi. Lors du développement du projet nous avons noté quelques limitations :

- Pour le circuit (1) Figure 34, nous nous sommes limités à un réemploi provenant de source avec le même usage à savoir l'impression 3D. Seul le PLA a été étudié.
- La partie préparation (2) Figure 34 était uniquement réduite au broyage.
- Pour la partie (3) nous recyclons à 100 % le produit et avons de fortes pertes de propriétés mécaniques.
- Les tests mécaniques de la partie (4) ne sont pas spécifique au procédé d'impression 3D et en général plus adaptés pour des échantillons testés isotrope.

Afin de répondre à ces différentes lacunes nous avons proposé un projet plus large le projet **GreenLocal3D**.

4.4 Le projet GreenLocal3D

Le projet **GreenLocal3D** propose de développer un nouveau **circuit court distribué** permettant une réutilisation significative de différents **thermoplastiques usagés** comme matière première pour les imprimantes 3D FFF. Nous avons dans ce projet considéré que les thermoplastiques provenaient directement des sites où ils étaient utilisés avec, de plus, un premier usage qui pouvait être autre que celui de l'impression 3D (packaging, alimentaire, etc...). Cette hypothèse forte nous a fait modifier le circuit en celui proposé Figure 38.

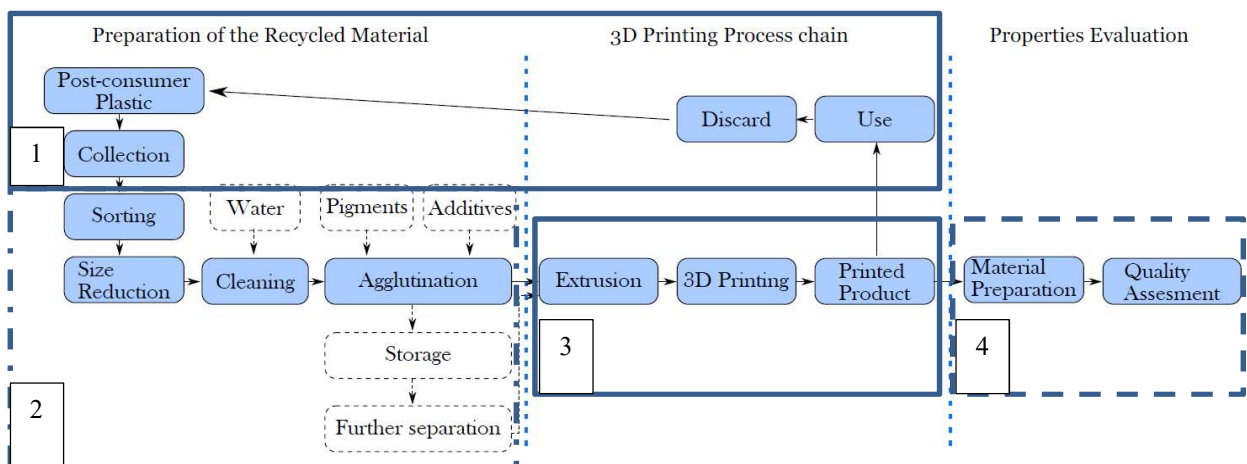


Figure 38: Boucle de recyclage pour le projet GreenLocal3D [14]

Tout comme le projet **GreenFabLab**, il s'agit d'un projet pluridisciplinaire traité dans sa globalité. Le projet **GreenLocal3D** implique des domaines d'expertise très différents (logistique, chimie, procédés, mécanique, automatisation, informatique, ergonomie, sciences humaines, etc). De plus, nous travaillons à différentes échelles suivant le canevas proposé au chapitre 2 à travers la grille de lecture proposée Figure 11. Nous allons présenter nos travaux pour les trois niveaux comme détaillé Figure 39.

Au niveau du Concept d'usage : Nous proposons une analyse du comportement et des facteurs d'influence pour initier l'acte de tri des déchets.

Au niveau Modélisation & Simulation :

Nous allons présenter des modèles et simulations à 2 échelles :

- (1) **A l'échelle d'un territoire :** Développement de modèles de récupération et retraitement décentralisés.
- (2) **A l'échelle matériau :** modélisation du comportement rhéologique.
Etude du comportement thermomécanique de la structure par EF.

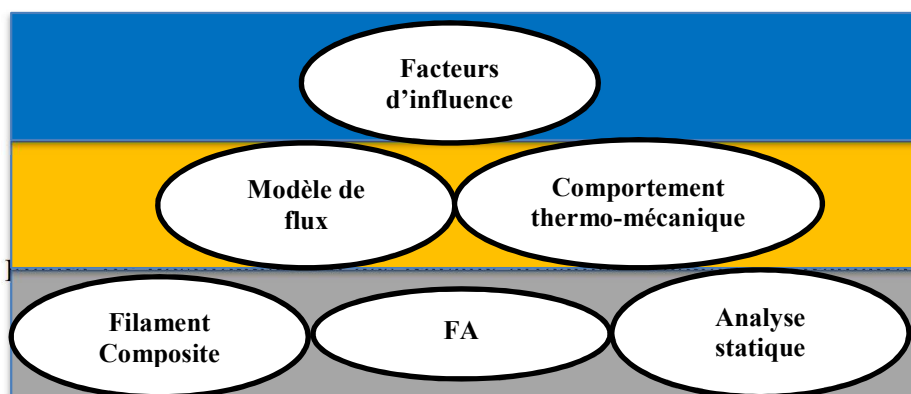


Figure 39: Positionnement des travaux effectués (Economie Circulaire)

Au niveau Matériau, Procédé & Structure:

Matériau Nous proposons une étude des propriétés du filament obtenu par extrusion ainsi qu'une amélioration des propriétés de ce dernier par différentes méthodes. Par ailleurs, nous évaluerons l'influence des paramètres de la pré-étape (Figure 38 (2)).

Procédé Nous proposons une étude de l'influence des paramètres d'impression 3D de manière spécifique aux matériaux issus du recyclage.

Structure Etude des propriétés mécaniques post impression à partir de tests statiques spécifiques à la FA.

4.4.1 Facteurs d'influence

Nous avons réalisé un état de l'art relativement détaillé autour du concept de recyclage des thermoplastiques et nous avons pu observer que pour la partie (1) Figure 38 les aspects les plus étudiés étaient les impacts financiers et sociaux [16-23]. Dans notre cas, pour effectuer ces travaux, j'ai initié une collaboration avec le laboratoire de Fribourg, et plus précisément le département « Circulus : Societal Transition and Circular Economy ». Dans les travaux de master d'Anamaria Bogoya, nous avons évalué, à l'aide de plusieurs théories comportementales : la théorie de l'action raisonnée (TRA) [24], la théorie du comportement planifié (TPB) [24] et le modèle de comportement altruiste [25] ; les facteurs humains influençant la collecte et le tri. Ces travaux devraient faire prochainement l'objet d'une publication.

4.4.2 Modélisation et simulation

(a) A l'échelle d'un territoire

Modélisation : Si l'on considère l'aspect logistique Figure 38 (1), seuls 3 auteurs [18, 22, 26] ont étudié et proposé des réseaux distribués adaptés. Dans le cadre du projet **GreenLocal3D**, nous avons déjà proposé un modèle CLCP pour les thermoplastiques [ACL14] et nous allons maintenant, à partir de la dynamique des systèmes, intégrer l'effet des paramètres sociaux, financiers et politiques.

Simulation : Nous avons pu tester un circuit local de recyclage au cours de la Foire Expo Internationale de Nancy (110 000 personnes sur 2 semaines, <http://lf21.fr/projects/green-fablab/>)

(b) A l'échelle matériau

Modélisation et Simulation : Nous prévoyons d'étudier prochainement le comportement thermomécanique des structures lors de l'impression 3D par FFF.

4.4.3 Matériau et Procédés

Matériau :

Etape de pré-traitement Figure 38 (2)

Si l'on considère l'état de l'art, très peu d'articles [19] et [23] ont intégré l'étape de pré-traitement Figure 38 (2). Pourtant cette étape est primordiale lorsque l'on souhaite développer un recyclage en circuit court. En effet, au vu de la complexité des étapes telles que précisées Figure 40, on voit que la mise en place de systèmes adaptés au pré-traitement des plastiques usagés peut être coûteuse, complexe et nécessiter un espace important.

Nous avons réalisé une analyse détaillée de l'ensemble de ces étapes dans [ACLS3]. Il ressort de cette étude que le facteur le plus contraignant est l'étape de Tri. En effet, la mise en œuvre d'un tri automatique à une échelle locale et open source est loin d'être atteinte [ACLS3].

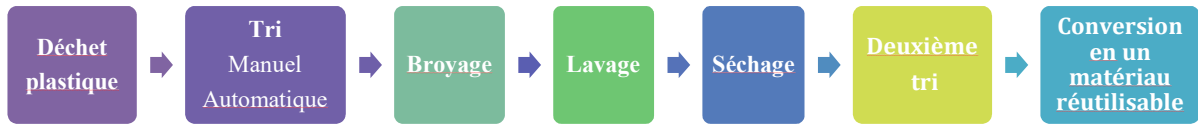


Figure 40 : Circuit nécessaire au pré-traitement des thermoplastiques usagés

Etape de mise en œuvre Figure 38 (3)

Mise sous forme de filament mono-matériau

Nous avons, au cours des travaux de master d'Antonio Luis Araujo [RM8], travaillé sur l'élaboration des filaments pour plusieurs matériaux différents provenant d'une usine française de récupération de déchets mélangés (Broplast <http://www.aurea-france.com/fr/presentation-groupe-aurea/produits-derives-du-petrole/broplast.html>).

Quatre types de matières thermoplastiques (ABS: Acrylonitrile butadiène styrène, PS-Choc: polystyrène choc (HIPS), PS-Crystal: Polystyrène (GPPS) et Surlyn: résine ionomère) ont été obtenus et testés pour l'impression 3D comme on peut le voir Figure 41.

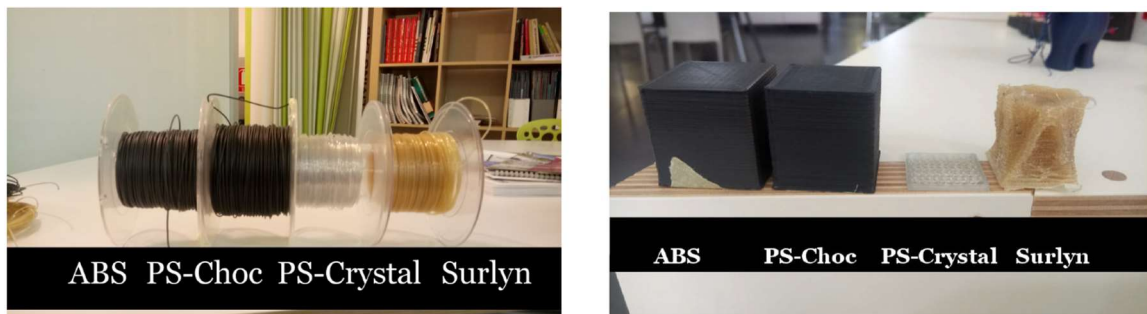


Figure 41 : Extrusion de 4 types de plastique usagés [RM8]

Il ressort de [RM6] que l'on peut assez facilement mettre sous forme de filament la plupart des thermoplastiques suivants :

Avec une simple extrudeuse mono-vis :

PP: Polypropylène

PS: Polystyrène

PC: Polycarbonate

ABS: Acrylonitrile butadiene styrene

PLA: Polylactic acid

Avec des conditions opératoires plus importantes (refroidissement ...) et des extrudeuses bi-vis :

PETG: Polyethylene terephthalate glycol,

PEF: Polyethylene furanoate,

HDPE: High-density polyethylene,

LDPE: Low-density polyethylene (non concluant)

Mise sous forme de filament composite

Dans le cadre du projet **GreenFablab**, nous avons observé une forte dégradation des propriétés mécaniques des pièces imprimées suite au recyclage. C'est pourquoi nous proposons d'étudier dans le projet **GreenLocal3D** plusieurs pièces hybrides mélangeant des matériaux recyclés et vierges à base du même plastique telles que visibles dans le Tableau 5. Si l'on considère l'état de l'art, la stratégie de réutilisation Tableau 5 (a) n'est pas encore complètement étudiée ; seuls 2 auteurs [ACL11, 27] ont étudié les filaments avec 100 % de matériaux recyclés. La stratégie de réutilisation Tableau 5 (b) a été étudiée pour élaborer divers filaments composites [28-30]. Toutefois, les études se sont limitées à l'inclusion de poudres de métaux nanocristallins dans le nylon recyclé 6.

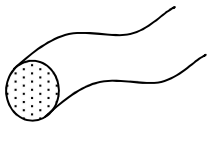
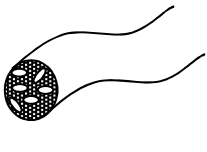
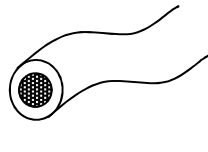
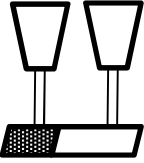
			
a) Mélange de matériau vierge et recycle du même PP.	b) Matériau recyclé chargé en particules minérales ou autre.	c) Cœur recyclé recouvert de matériau vierge.	d) Impression avec deux têtes: filament recyclé et vierge.

Tableau 5: Filaments composites recyclés

Enfin, à notre connaissance, les deux dernières stratégies de réutilisation Tableau 5 (c) et (d) n'ont jamais été proposées ou étudiées.

4.4.4 Structure

Etape de tests Figure 38 (4)

Si l'on considère l'étude de Dizon et al [31], on constate qu'il n'existe pas de méthodes d'essai standard spécifiques pour la caractérisation des pièces polymères élaborées en FA. En effet, un problème important, amplifié par la technique FFF, est l'anisotropie des

parties imprimées [31]. Afin de qualifier le thermoplastique recyclé, nous avons dans le projet **GreenFabLab** utilisé le test ISO 527-1 (ou son homologue américain, l'ASTM D638) pour l'essai de traction. Cependant, comme l'indique la littérature [31], [32] l'échantillon échoue parfois prématurément en raison de la géométrie de l'échantillon comme on peut le voir sur la Figure 42. Nous nous proposons par la suite d'étudier l'influence de plusieurs trajectoires d'impression 3D pour obtenir une éprouvette de traction plus fiable.

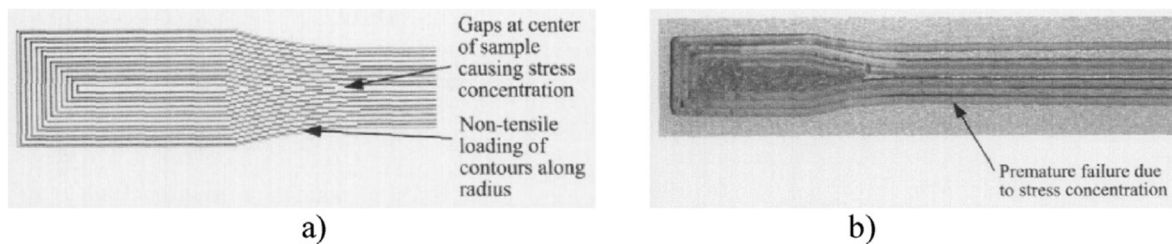


Figure 42 : a) Entrefers dans l'échantillon ASTM D638; b) Défaillance prématurée en cisaillement des éprouvettes d'essai de la norme ASTM D638 [31]

4.5 Conclusion

Le modèle économique industriel roi du XXème siècle touche à sa fin. En effet, cette concentration des moyens de production, qui a permis de nombreuses économies d'échelle et une croissance continue, n'est plus envisageable face à la raréfaction des ressources et des matières premières. A l'opposé de ce modèle, la **production décentralisée** semble aujourd'hui une voie d'innovation très importante. En effet, un tel mode de production est plus respectueux de l'environnement et des besoins locaux. Les technologies de FA open source permettent aux consommateurs d'**imprimer** la plupart des produits **localement**, à la demande, en téléchargeant des informations de conception sur les sites de partage en ligne. Mais ce qui est peut-être le plus important, c'est que les technologies de FA sont particulièrement capables de promouvoir des cycles de vie des produits respectueux de l'environnement. En mettant en place deux **Economies Circulaires** pour le recyclage en circuit court des déchets plastiques post-consommation, nous avons, à travers le projet **GreenFabLab** puis le projet **GreenLocal3D**, illustré le potentiel d'innovation responsable de la FA open source.

4.6 Références

- [ACL11] FAC Sanchez, H Boudaoud, S Hoppe, M Camargo. “Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues”. *Additive Manufacturing* 17, 87-105. (2017)
- [ACL14] P. Santander, F. Cruz, H. Boudaoud, M. Camargo. “Closed Loop Supply Chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: A MILP-based optimization approach”. *Accepté à Resources, Conservation and Recycling*. (2019)
- [ACLS3] . B. Bogoya, F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, J.M. Pearce, M. Camargo. “Open Source Technology Readiness Level Assessments: Application to Distributed Recycling for Additive Manufacturing”. *En révision soumis à Technology Analysis & Strategic Management*. (2019)
- [C-ACTI 8] Pavlo Santander, Fabio Cruz, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo. “3d-printing based distributed plastic recycling: A conceptual model for closed loop supply chain design.”. *IEEE International Conference on Engineering*. (2018)
- [RM8] Antônio Luís Araújo “Analysis of the recycling of different thermoplastics for 3d printing” (2017).
- [1] Deloitte, “Increased EU Plastics Recycling Targets: Environmental, Economic and Social Impact Assessment” june 2015.
- [2] S. Ford, M. Despeisse. “Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges” *Journal of Cleaner Production*. Volume 137, 20 November 2016, Pages 1573-1587.
- [3] N. Singh, D. Hui, R. Singh, I. P. S. Ahuja, L. Feo, and F. Fraternali, “Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 115, pp. 409–422, 2017.
- [4] F. Vilaplana and S. Karlsson, “Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: A review,” *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 293, no. 4, pp. 274–297, 2008.
- [5] Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy,” *Ellen MacArthur Found.*, vol. 1, pp. 1–96, 2013.
- [6] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, “The Circular Economy e A new sustainability paradigm?,” *J. Clean. Prod.*, vol. 143, no. 0, pp. 757–768, 2017.
- [7] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, and F. Cluzel, “How to Assess Product Performance in the Circular Economy ? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework,” *Recycling*, Vol 2, Issue1, 2017.
- [8] M. A. Kreiger, M. L. Mulder, A. G. Glover, and J. M. Pearce, “Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament,” *J. Clean. Prod.*, vol. 70, pp. 90–96, 2014.
- [9] PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) / Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, “Plastics – the Facts 2016,” 2016.
- [10] J. Hopewell, R. Dvorak, E. Kosior, *Plastics recycling: challenges and opportunities*, *Philos. Trans. R. Soc. Lond B Biol. Sci.* 364 (1526) (2009) 2115–2126.

- [11] French, M. L. and Laforge, R. L. (2006) ‘Closed-loop supply chains in process industries: An empirical study of producer re-use issues’, *Journal of Operations Management*, 24(3), pp. 271–286.
- [12] Kannan, G., Sasikumar, P. and Devika, K. (2010) ‘A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling’, *Applied Mathematical Modelling*, 34(3), pp. 655–670. doi: 10.1016/j.apm.2009.06.021.
- [13] S.M. Al-Salem *, P. Lettieri, J. Baeyens, “Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review” *Waste Management* 29 (2009) 2625–2643.
- [14] Fabio Cruz. Methodological proposition to evaluate polymer recycling in open-source additive manufacturing contexts. Université de Lorraine. (2016)
- [15] Q. Sun et al. “Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments”. In: *Rapid Prototyping Journal* 14.2 (2008), pp. 72–80.
- [16] S. R. Feeley, BasWijnen, and Joshua M. Pearce. “Evaluation of Potential Fair Trade Standards for an Ethical 3-D Printing Filament”. *Journal of Sustainable Development* 7.5 (2014), pp. 1–12.
- [17] Steffen Heyer et al. “Enabling of local value creation via openness for emergent synthesis”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 15.7 (2014), pp. 1489–1493.
- [18] Bernd Muschard and Günther Seliger. “Realization of a Learning Environment to Promote Sustainable Value Creation in Areas with Insufficient Infrastructure”. *Procedia CIRP* 32.C1f (2015), pp. 70–75.
- [19] Nebojsa I. Jaksic. “Sustainable Undergraduate Engineering 3-D Printing Lab”. 2016 ASEE Annual Conference & Exposition 1984 (2016), p.25992.
- [20] Jukka Pakkanen et al. “About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing”. ed. by Giampaolo Campana et al. Vol. 68. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 776–785.
- [21] Megan Kreiger and Joshua M. Pearce. “Environmental Impacts of Distributed Manufacturing from 3-D Printing of Polymer Components and Products”. *MRS Proceedings* 1492 (2013), mrsf12–1492–g01–02.
- [22] M.a. Kreiger et al. “Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament”. *Journal of Cleaner Production* 70 (2014), pp. 90–96.
- [23] Emily J. Hunt et al. “Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers”. *Resources, Conservation and Recycling* 97 (2015), pp. 24–30.
- [24] Janette Davies, Gordon R Foxall, and John Pallister. “Beyond the intention-behaviour mythology”. In: *Marketing Theory* 2.1 (2002), pp. 29–113.
- [25] Shalom H. Schwartz and Judith A. Howard. “Internalized values as motivators of altruism”. In: *Development and maintenance of pro-social behavior. Critical issues in social justice*. Ed. by E. Staub et al. Springer, Boston, MA, 1984, pp. 229–255.
- [26] M.a. Kreiger et al. “Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament”. *Journal of Cleaner Production* 70 (2014), pp. 90–96.

- [27] I. Anderson. “Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid”. *3D Printing and Additive Manufacturing* 4.2 (2017), pp. 110–115.
- [28] Rupinder Singh, Jagdeep Singh, and Sunpreet Singh. “Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament”. *Measurement* 78 (2016), pp. 253–259.
- [29] K. S. Boparai et al. “Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications”. *Composites Part B: Engineering* 106 (2016), pp. 42–47.
- [30] Guan Ting Pan et al. “The Effects of Iron, Silicon, Chromium, and Aluminum Additions on the Physical and Mechanical Properties of Recycled 3D Printing Filaments”. *Advances in Polymer Technology* (2016), pp. 1–9.
- [31] John Ryan C. Dizon, Alejandro H. Espera Jr., Qiyi Chen, Rigoberto C. Advincula. “Mechanical characterization of 3D-printed polymers”. *Additive Manufacturing* 20 (2018) 44–67.
- [32] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher, “Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation” *J. Fail. Anal. Prev.* 16 (3) (2016) 467–481.

CHAPITRE 5

Conclusions et perspectives de recherche

1	UNE CONCEPTION DE VEHICULE MOINS ENERGIVORE.....	103
1.1	MODELISATION ET SIMULATION DES STRUCTURES SANDWICHS COMPOSITES	105
1.2	CONCEPTION DES STRUCTURES SANDWICHS COMPOSITES	108
2	UN RECYCLAGE EN CIRCUIT COURT DES PLASTIQUES	112
2.1	RECYCLAGE DES THERMOPLASTIQUES A L'ECHELLE MATERIAU	113
2.2	RECYCLAGE DES THERMOPLASTIQUES A L'ECHELLE DU TERRITOIRE.....	114
3	DES OPPORTUNITES POUR LA SANTE ET LE SOCIALE.....	116
3.1	FA OPEN SOURCE POUR LA SANTE	116
3.2	FA OPEN SOURCE POUR LA LUTTE CONTRE LES INEGALITES SOCIALES	117
4	PROJET PEDAGOGIQUE.....	119
5	REFERENCES	122

5 Conclusions et perspectives de recherche

Le contexte mondial actuel de crises multiples et interdépendantes est à la base d'une inquiétude, d'une curiosité et d'un intérêt généralisés pour l'avenir et ses défis. Il ne se passe un jour sans que les médias ne diffusent l'image de tel ou tel défenseur de l'environnement, un jour c'est le prix Nobel de littérature J.M.G Le Clézio qui interpelle les pouvoirs publics, le lendemain c'est Greta Thunberg du haut de ses 16 ans qui mobilise des millions de jeunes dans le monde sur la question du climat.

Aujourd'hui, les gouvernements européens ont bien pris en compte ces revendications et mettent en place des programmes de recherche pour trouver des solutions susceptibles d'assurer un avenir commun plus durable (COP21, H2020). Parmi ces programmes, H2020 définit 7 axes principaux : **la santé, la sécurité alimentaire, l'énergie, le transport, le climat et l'efficacité des ressources, les sociétés innovantes et enfin les sociétés sûres.**

Afin de résoudre les défis auxquels il est confronté, l'Homme n'a cessé d'innover au cours des siècles passés. Nous avons connu successivement la mécanisation de la production, l'énergie électrique et la production de masse, l'électronique et l'informatique pour l'automatisation de la production. Aujourd'hui, nous sommes à l'aire de **l'industrie 4.0** avec la convergence du virtuel et de la conception numérique avec les produits et objets du monde réel. Selon Wholers [1], une des technologies clés de cette industrie du futur est la **Fabrication Additive** pour sa capacité à « **mieux produire** » et « **produire plus intelligemment** ».

Par ailleurs, au-delà de l'évolution technologique favorisant **l'innovation**, on assiste à une révolution dans les acteurs du changement. Finie l'époque où les entreprises développaient leurs projets jalousement gardés et de manière autonome. Les services de recherche et développement ne sont plus le seul lieu privilégié des innovations de demain et comme le dit Von Hippel [2], nous sommes à l'aube de la « **démocratisation de l'innovation** ».

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressés au potentiel d'innovation porté par la **Fabrication Additive Open Source** et avons proposé deux axes de recherche répondant aux enjeux du **Transport** et de **l'Efficacité des ressources**. Pour le premier, nous avons exploré le domaine des **structures composites** et pour le second, le domaine du **recyclage des thermoplastiques**.

5.1 Une conception de véhicule moins énergivore.

Afin d'atteindre les objectifs européens sur la réduction des émissions de CO2 et améliorer **l'empreinte environnementale** des véhicules, **l'allègement** des structures est nécessaire. Face à cette pression croissante, les différentes filières, aéronautique, automobile, etc...

intègrent de plus en plus les structures **composites**. Dans ce domaine, les plastiques et plus particulièrement les thermoplastiques ont un potentiel énorme pour la conception de pièces plus légères, réparables, recyclables... A titre d'illustration, on peut voir Figure 43 le gain en poids obtenu par les thermoplastiques hautes performances développées par Arkema.



Figure 43 : Impact sur le poids des structures des thermoplastiques ARKEMA [3]

Cependant, tout comme nous l'avons évoqué tout au long de ce document, la **réduction de poids va accroître les phénomènes vibratoires**. On se retrouve ainsi face à un besoin de conception de structures plus légères mais qui doivent aussi minimiser les phénomènes vibratoires. Les matériaux composites, utilisés dans le domaine du transport, sont classés généralement en trois catégories: matériaux non structuraux, semi-structuraux et structuraux [4]. Alors que les deux premières catégories sont depuis longtemps incorporées dans les chaînes de production, l'utilisation de composites pour les parties dites de structure nécessite encore de nombreux travaux [5]. Pour cette dernière catégorie, nous nous sommes concentrés dans ce document sur les **structures sandwichs composites** parce qu'elles offrent de belles perspectives de par leur bon rapport performances sur poids [6].

Afin de concevoir efficacement ces structures, la communauté des mécaniciens travaille principalement à deux niveaux successifs de la boucle de valeurs: la **modélisation et simulation numérique** puis au niveau du **procédé d'élaboration**. Nous décrivons par la suite les différentes voies de recherche actuelles à ces deux niveaux et précisons nos apports et perspectives de recherche futures.

5.1.1 Modélisation et simulation numérique des structures sandwichs composites

Afin de modéliser convenablement le comportement des structures sandwichs composites nous avons montré au chapitre 3 que deux problématiques devaient être traitées simultanément, à savoir la **formulation de la cinématique et la résolution du problème aux valeurs propres complexes**.

5.1.1 a) Formulation de la cinématique

Positionnement scientifique

D'un point de vue de la **cinématique** et de la **modélisation statique**, la communauté des numériciens a développé, au cours des dernières décennies, un grand nombre de théories afin de pouvoir simuler le plus précisément possible, et avec un temps de simulation minimal, le comportement des structures sandwichs composites. La théorie de l'élasticité tridimensionnelle, les théories équivalentes sur une seule couche (ESL), les théories en zig-zag et les théories sur les couches en sont des exemples notables [7]. En général, le calcul des solutions d'élasticité 3D nécessite un temps de calcul considérable [8], les théories ESL ne peuvent fournir des résultats satisfaisants pour les stratifiés épais ou les stratifiés avec des propriétés distinctes entre les couches, et les théories zig-zag ne peuvent obtenir directement les champs de contraintes transversales du modèle constituant [9]. Enfin, la théorie par couches traite chaque couche individuellement et la continuité est satisfaite dès le début ; par conséquent, elle donne des résultats comparables aux solutions d'élasticité 3D. Cette dernière est actuellement la théorie qui concentre les travaux de la communauté comme le précise Abrate et al [8].

Dans le cadre de nos travaux, nous avons toujours considéré la théorie couche par couche et proposé différents modèles permettant de considérer des structures de plus en plus évoluées allant de la poutre aux coques et intégrant différentes formes d'amortissement.

Apports

Comme on peut le voir figure 16, nous avons proposé et validé successivement plusieurs modèles à cinématique de type couche par couche. **Nos travaux ont permis de considérer des structures à amortissement passif, actif et couplant de l'amortissement passif et actif. Nous avons apporté à la communauté tout à tour des modèles de type poutre, plaque, coque et coque-solide afin de pouvoir simuler le comportement d'un spectre large de structures sandwichs composites amortissantes.** Plus précisément nous avons développé :

- **un modèle analytique simple pour les structures de type poutre 5 couches.** [ACL3]

Il permet d'estimer à un coût de calcul minimal les fréquences propres et l'amortissement (propriétés modales) d'une structure de type poutre.

- **un modèle élément fini pour les structures de type coque 5 couches.** [ACL4]

Il permet de déterminer, au moyen d'un nombre d'éléments réduits, les propriétés modales d'une structure de type coque couplant un cœur viscoélastique et des faces piézoélectriques.

- **un modèle de type coque-solide pour les structures 3 couches à amortissement passif.** [ACL8]

Il permet une jonction entre des éléments de type 3D et coque et de déterminer les propriétés modales d'une structure à amortissement passif.

- **un modèle pour les structures poutre dites à formes répétitives.** [ACL9]

Il permet d'obtenir à un coût de calcul très faible les propriétés modales de structures répétitives couplant des matériaux viscoélastiques et élastiques.

- **un modèle pour les structures sandwichs à faces composites.** [ACL7]

Il permet de déterminer les propriétés modales pour des structures sandwichs à faces laminés composites.

5.1.1 b) Résolution du problème aux valeurs propres complexes (PVPC)

Positionnement scientifique

Afin de réduire les phénomènes vibratoires dans les structures en mouvement, on introduit généralement une dissipation au moyen d'un cœur viscoélastique visible Figure 15. L'efficacité de cette couche viscoélastique dans l'augmentation du facteur de perte des structures a été prouvée par de nombreux auteurs [10], [11], [12]. Afin de pouvoir simuler le comportement de ces structures amorties, la communauté a développé différentes méthodes. Ces dernières, plus ou moins exactes, permettent de déterminer les propriétés modales. La plus simple, très utilisée lors des essais, est la méthode dite de la bande passante [13]. Cette dernière permet d'obtenir une estimation de l'amortissement à partir de la courbe de réponse temporelle. Toutefois cette dernière va donner de mauvais résultats si on a une superposition des modes. Une autre méthode mise en avant depuis les travaux de Johnson et al. [14] est la méthode dite des énergies modales (Modal Strain Energy, MSE). Elle consiste à estimer les amortissements modaux à travers une relation entre les facteurs de perte et les énergies modales de déformation de la structure et du matériau viscoélastique. Néanmoins, cette dernière, pour donner de bons résultats, doit être utilisée dans de faibles bandes de fréquence. Enfin les méthodes les plus utilisées aujourd'hui lors des simulations sont les méthodes directes de résolution du PVPC. Ces vingt dernières années, plusieurs méthodes vont voir le jour : les méthodes asymptotiques [15], les

méthodes d'itération-réduction [15] et enfin la méthode asymptotique numérique [16] (MAN).

Dans l'ensemble de nos travaux, nous avons utilisé la méthode de la bande passante lors de l'utilisation de codes commerciaux, la MSE lors des formulations analytiques et enfin nous avons principalement développé des méthodes de résolution basées sur la MAN.

Apports

Ces dix dernières années nous avons apporté à la communauté, différents algorithmes et méthodes de résolution du problème aux valeurs propres complexes basées sur la MAN.

Plus précisément nous avons développé :

- un algorithme numérique s'appliquant aux sandwichs coques à amortissement hybride 5 couches [ACL2].

Il permet de résoudre directement le PVPC lorsque l'on a de l'amortissement passif, des parties piézoélectriques et des lois de contrôle associées.

- une méthode numérique générique formulée pour les éléments coque-solide [ACL8].

Elle permet de résoudre le PVPC de structures à amortissement passif maillées à l'aide d'éléments solide-coque.

- un algorithme numérique pour les structures sandwichs à faces composites [ACL10].

Il permet de déterminer directement les propriétés modales de structures à cœur viscoélastique et faces composites.

- un algorithme numérique pour les structures sandwichs à motif répétitif [ACL].

Il permet de déterminer de manière approchée les propriétés modales de structures de type poutre à cœur viscoélastique constituées d'un motif de design répétitif.

- une méthode numérique générique à deux paramètres de chemin pour les sandwichs à faces composites [ACL12].

Cette méthode est très efficace car elle permet de parcourir l'espace de solutions du PVPC tout en introduisant de la variabilité sur un paramètre de conception de la structure.

5.1.1 c) Conclusions et perspectives

Nos différents apports, présentés précédemment, ont permis la modélisation et la simulation numérique du comportement vibratoire de nombreuses formes de structures sandwichs à faces orthotropes et cœur homogène isotrope. Au niveau de la communauté française impliquée dans cette thématique, nos travaux se différencient principalement par

le fait que nous obtenons de **manière directe les propriétés modales pour les n premières fréquences propres**. En effet, si l'on regarde du côté du PIMM et de l'équipe DYSCo (travaux de Balmès, Chinesta, Lorong) ou du CNAM et de l'équipe LMSSC (travaux de Deu, Blanzé...) on voit que leurs travaux considèrent généralement l'approche temporelle pour l'obtention des fréquences propres et des facteurs de perte. Pour le LVA (travaux de Parizet, Antoni ...), leurs travaux couplent vibration et acoustique, pour le LAMCOS et l'équipe DCS (travaux de Dufour, Remond ...), leurs travaux se concentrent sur les vibrations non linéaires et le contrôle.

Concernant les perspectives, nous souhaitons pouvoir déterminer **les propriétés modales des structures à cœur de type nid d'abeille ou architecturée** telles que visible Figure 26 ou Figure 44. A ce jour, il n'y a pas encore à notre connaissance de modèles performants en vibratoire sur ce type de structure ; notons toutefois les travaux récents de Minh Phuc Hoang [17] pour ce qui est de la modélisation statique. Afin d'avoir une bonne représentation du comportement vibratoire du cœur nous envisageons par la suite de :

- **développer des algorithmes adaptés aux structures à formes complexes**. Nous travaillerons principalement à partir des techniques d'homogénéisation comme nous l'avons fait avec les structures poutres répétitives.
- **coupler les techniques d'homogénéisation et la méthode numérique à deux paramètres de chemin proposées dans [ACL12]**. En effet, cette dernière permet de prendre tout type de facteur taille en considération du moment que l'on a une formulation analytique du problème, dans notre cas nous considérerons, ce qui est une première, la dimension du VER comme paramètre de chemin.

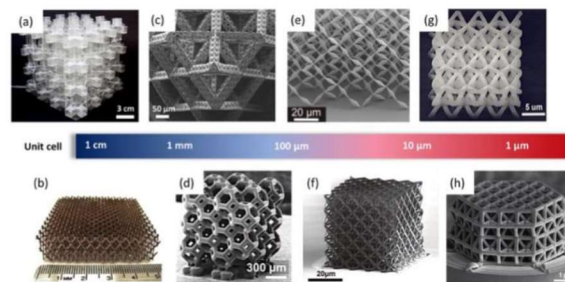


Figure 44 : Structure architecturée à différentes échelles [18]

5.1.2 Conception des structures sandwichs composites

La recherche pour la conception de structures sandwichs se focalise sur l'assemblage de deux parties distinctes, à savoir l'âme et les faces qui sont généralement en métal ou en matériau composite. Les travaux menés par la communauté sur ces structures concernent principalement **l'étude du comportement de l'âme pour des sollicitations statiques, dynamiques ou alors le comportement de l'interface âme/face**.

5.1.2 a) Ame des structures sandwichs composites

Positionnement scientifique

Les travaux de recherche sur les structures sandwichs composites ont porté successivement sur les conceptions : homogènes appuyées, appuyées localement, appuyées régionalement, appuyées uni-directionnellement et enfin, ces dernières années de plus en plus de travaux sont faits sur les conceptions appuyées bi-directionnellement [19]. Ce dernier groupe est représenté par une structure en nid d'abeilles telle que présentée Figure 26. Cette dernière ayant un rapport performance/poids optimal est typiquement utilisée dans les applications les plus exigeantes, y compris l'aérospatiale. Actuellement, la mise en œuvre des âmes se fait principalement par liaison adhésive au moyen de 2 procédés, à savoir le processus d'expansion ou d'ondulation. Avec le développement de la FA, on dispose aujourd'hui d'une grande flexibilité sur les formes du nid d'abeilles et on voit apparaître de nombreuses études sur les possibilités de structures aux formes optimisées. Parmi ces travaux, nous avons toutes les études qui vont évaluer les capacités en compression des structures : à maille triangulaire dans [20], à maille tube alvéolaire [20]. Les études de flexion : à maille treillis et hexagonale réentrant [21], et les études d'impact sur des structures à faible vitesse : à maille hexagonale réentrant [22], à maille hexagonale irrégulière et chirale [23]. Enfin, concernant les structures nid d'abeilles flexibles, seuls les travaux de Robinson et al [24] sont disponibles et ont permis l'analyse des propriétés viscoélastiques d'un TPE.

Dans notre cas nous souhaitons nous concentrer sur les propriétés modales de structures à mailles diverses (triangulaire, hexagonale réentrant (Figure 27)) et contenant des zones amortissantes.

Apports

- Nous avons jusqu'à présent réalisé des filaments composites à propriétés amortissantes variables, caractérisés ces derniers et évalué leur imprimabilité [C-ACTN4].

Cette première étape est essentielle pour le développement des structures composites à cœur amortissant obtenu par FDM.

5.1.2 b) Interface âme / face

Positionnement scientifique

Lors de la conception de structures sandwichs, le second problème très étudié par la communauté est la propension au décollement des faces avec l'âme [25]. Le problème du délaminage le long de l'interface entre face et cœur est beaucoup plus compliqué dans le

composite sandwich que dans son homologue laminé en raison des différences de géométrie et de matériaux sur les deux parties de l'interface [26]. De nombreuses études sont menées pour pouvoir quantifier les effets d'interfaces et améliorer la liaison entre les différents matériaux constituant du cœur et de l'âme.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons considéré des âmes et faces imprimées par procédé FDM, les matériaux mis en œuvre sont principalement le PLA, des polyuréthanes thermoplastiques (TPU) et des composites obtenus en intégrant de la lignine ou de la carboxyméthylcellulose (CMC).

A ce jour, les travaux de la communauté s'orientent vers l'étude de différents facteurs sur les propriétés mécaniques. Parmi les travaux notables, nous avons l'effet de la température sur la qualité de l'interface avec Bajai et al [27], l'effet du traitement de surface avec Chan et al [28], des comptabilisants chez Li et al [29] et de l'humidité sur les propriétés mécaniques.

Apports

Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de l'énergie inter faciale entre des couches obtenues par différents matériaux imprimés par FDM. A ce jour, à notre connaissance, seul Xie et al [30] a utilisé une approche similaire mais a pour sa part principalement étudié l'effet de l'adjonction de glycérol et de citrate de tributyle comme plastifiant.

- Définition d'un protocole de mesure de l'énergie inter faciale de structure imprimée par FDM. (Article en rédaction) [C-ACTI9].

- Qualification des propriétés inter faciales entre : PLA/PLA, TPU/TPU, PLA/TPU, PLA+CMC/TPU+CMC [C-ACTN4].

5.1.2 c) Conclusions et perspectives

Nos différents apports ont permis l'obtention de

- filaments imprimables avec des propriétés amortissantes variables

- définition de test permettant de qualifier l'adhésion inter-filament de natures différentes.

Au niveau de la communauté française impliquée dans cette thématique, nos travaux se différencient principalement par le fait que nous souhaitons concevoir des **structures en nid d'abeilles obtenues totalement par procédé FDM**. Peu de laboratoires développent la technologie FDM pour la conception de structures composites néanmoins citons les travaux de l'équipe IMT Lille Douai (travaux de Roger, Nouri...), de l'INRA Paris (travaux de Lourdin, Geussasma..).

D'un point de vue perspective, nous souhaitons profiter des possibilités de la **FA Open Source** pour explorer plus précisément 2 pistes très prometteuses qui devraient permettre de coupler allègement et amortissement des vibrations :

- une **structure architecturée** telle que visible sur la Figure 44 et obtenue à partir de filaments chargés incorporant des matériaux amortissants. Cette partie a été développée au paragraphe 3.3.2 et fait l'objet des travaux de thèse de Lara Garcia en co-encadrement avec le LRGP.
- la **conception de méta-matériaux** permettant de réaliser des « bandes d'arrêts » tels que visible à la Figure 45.

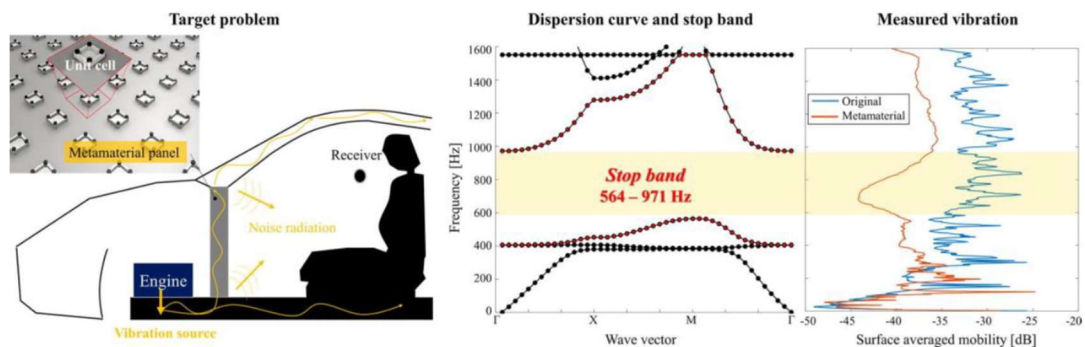


Figure 45 : Bandes d'arrêts suite à l'utilisation de méta-matériaux [31]

Sur la Figure 45, la plage de fréquences entre deux paquets est appelée bande d'arrêt en ce sens qu'une excitation de la structure à une fréquence appartenant à cette bande provoque une déformation localisée à la cellule excitée afin de préserver le reste de la structure. Il est préférable pour une structure que les excitations provoquent des déformations localisées plutôt que celles-ci se propagent à toute la structure [31].

Au cours des travaux de thèse de Komla Lougou [32], nous avons déjà exploré analytiquement et numériquement l'apport de cette méthode pour des structures de type « poutres répétitives » [ACL9].

Nous nous proposons dès lors de valider nos études et développer des structures tridimensionnelles présentant des bandes d'arrêt les plus larges possible. Pour toutes les nouvelles solutions composites que nous développerons nous chercherons à trouver un compromis environnemental entre les bénéfices de l'allègement et la "recyclabilité" des matériaux composites.

Actions engagées ou envisagées pour poursuivre nos recherches :

2019-2021 Dans le cadre d'une coopération avec le LRGP: thèse ADI-DGA de Lara Garcia en Co-direction avec le professeur Cécile Nouvel, 1 master recherche est prévu.

2020-2023 Un projet ANR PRCI, le projet « MATILD » a été déposé autour de ce thème. Nous pensons élargir le projet en un projet européen avec des collègues luxembourgeois et italiens.

5.2 Un recyclage en circuit court des plastiques

La transition vers une **Economie Circulaire** est un élément clé de la transition écologique et solidaire. Le modèle linéaire « fabriquer, consommer, jeter » se heurte fatalement à l'épuisement des ressources de la planète. Du point de vue de la communauté scientifique, de nombreux auteurs s'accordent pour segmenter les pratiques en EC sous ce que l'on appelle les 3, 4 ou 6 R, à savoir « **Réduire, Réutiliser, Recycler ; Récupérer ; Redesigner, Remanufacturer** » [33], [34]. Au niveau des institutions françaises, l'ADEME, suite au Grenelle de l'environnement en 2007, définit pour sa part 3 domaines d'actions : la consommation, l'offre économique et la gestion des déchets. La notion d'EC apparaît au niveau publication de la recherche (Base Elsevier Scopus) en France à partir de 2013-2014 comme on peut le voir sur la Figure 46.

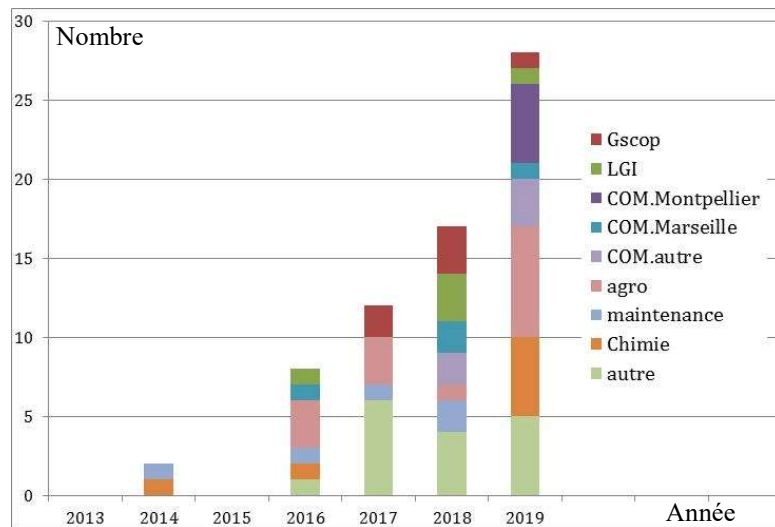


Figure 46 : Publications des laboratoires français sur la notion d'EC (Elsevier scopus)

Au niveau du génie industriel, les laboratoires les plus investis dans cette thématique sont le LGI et le G-Scop. Au niveau science de gestion, on voit principalement les Ecoles de commerce Kedge de Montpellier et Marseille, s'ensuivent des travaux de diverses équipes qui se placent dans un contexte d'EC orienté vers l'agronomie, la maintenance et la chimie.

Pour notre part, nous n'avons pas étudié de manière spécifique les attributs de l'EC mais utilisé son cadre dans nos projets.

Au niveau de la recherche sur l'EC, les notions abordées sont : la consommation responsable, le réemploi, la réparation, l'écoconception, l'approvisionnement durable, l'économie de la fonctionnalité, l'écologie industrielle et le recyclage [34].

Dans nos travaux, nous n'avons considéré que l'aspect recyclage des thermoplastiques et nous avons proposé 2 projets:

- le projet GreenFabLab où nous avons étudié la faisabilité de créer un recyclage de déchets plastiques en circuit court dans le cadre d'un espace d'innovation ouvert tel que les Fablabs.

- le projet GreenLocal3D où nous étudions le recyclage de plastiques localement dans des mini unités de recyclage.

Nos apports se sont faits à deux échelles, à savoir : l'échelle du matériau et celle du territoire.

5.2.1 Recyclage des thermoplastiques à l'échelle matériau.

Positionnement scientifique

Les thermoplastiques après usage peuvent être revalorisés par différentes voies allant du recyclage mécanique jusqu'à l'incinération. Cependant, le défi majeur consiste à garantir que les performances des matériaux au cours de leur durée de vie in-situ ne sont pas compromises lors de la dégradation et ou du retraitement en fin de vie [35].

La communauté scientifique à l'échelle du matériau travaille principalement sur les procédés et technologies appropriés pour améliorer les propriétés des déchets, afin de les rendre aptes à de nouvelles applications. La voie principale dans ce cas consiste à ajouter de nouveaux composants au cours du processus de fusion, tels que des polymères vierges [36], des charges [37], des fibres [38], des agents de compatibilité ou divers additifs (peroxydes, agents de couplage, polymères réactifs, stabilisants et/ou antioxydants [39]) pour améliorer leurs propriétés et leur donner des caractéristiques qui facilitent leur utilisation comme nouveaux matériaux dans l'industrie.

Ces dernières années l'apparition des technologies de type FDM ont permis un nouveau débouché pour les thermoplastiques usagés. Ces derniers sont transformés en filaments destinés à être imprimés. Au niveau de l'élaboration des filaments, plusieurs matériaux différents, ABS, HDPE, TPU, Nylon-6 et PP ont été étudiés [40-46]. Pour un recyclage à 100%, seul Anderson et al [47] a étudié les propriétés du filament. Pour l'adjonction de nouveaux composants, les études se sont limitées aux poudres de nylon 6 et aux poudres métalliques nanocristallines [43-45].

Apports

Nos travaux présentés dans ce document portent sur le recyclage des plastiques revalorisés par le procédé FDM. Nous avons plus précisément apporté à la communauté scientifique :

- **Une méthodologie pour le recyclage à 100% des thermoplastiques destinés à être imprimés par FDM [ACL11].**
- **Les conditions opératoires nécessaires pour le recyclage du PLA [C-ACTI7].**
- **Une évaluation du potentiel de recyclage de l'ABS, PS, et Surlyn issu de déchets industriels.**

5.2.2 Recyclage des thermoplastiques à l'échelle du territoire.

Positionnement scientifique

A l'échelle des territoires, le procédé de recyclage du plastique s'effectue généralement par le biais de réseaux centralisés afin de tirer parti des économies d'échelle dans la production de produits de base de faible valeur [48]. Cette approche a été longuement étudiée par la communauté qui considère généralement des plastiques suivant 2 sources : post-industrielle et post-consommateur [49]. Du point de vue de la logistique, l'activité de recyclage peut être présente dans deux types de réseaux : les chaînes d'approvisionnement inversée (RL) et les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée (CLSC). Ces deux types de réseaux font l'objet de nombreuses études approfondies dans la littérature scientifique [50]. Pour le premier réseau de type RL, les auteurs ne se concentrent que sur la récupération des déchets eux-mêmes [50], sans tenir compte de la manière dont les déchets plastiques seront réutilisés. Les études sur le recyclage du plastique dans les réseaux de type CLSC couvrent différents aspects du processus : conception et planification [51], évaluation du réseau [52], enjeux et pratiques [53] et incertitudes [54]. Cependant tous ces travaux ont une approche de réseaux centralisés, à orientation industrielle et au niveau national.

Pour notre part nous avons considéré la conception, la planification et l'optimisation de réseau de type CLSC pour le recyclage du plastique à une échelle locale et à orientation post-consommateur.

Apports

Afin de répondre à la problématique de recyclage distribué du plastique nous avons apporté à la communauté scientifique :

- **un modèle de circuit distribué pour le recyclage du PLA en circuit court [C-ACTI8].**
- **un modèle d'optimisation économique et environnementale pour des réseaux distribués [ACL14].**

5.2.3 Conclusions et perspectives

Dans le cadre de l'économie circulaire, nous avons étudié **le potentiel de recyclage de polymères dédiés à la fabrication additive open-source**. Figure 47, nous illustrons le contexte de cette recherche à l'interface entre FA, monde de l'open source et durabilité. Au-delà des apports scientifiques évoqués aux paragraphes précédents, nous avons, d'un point de vue technique et opérationnel, apporté à la communauté l'ensemble des éléments nécessaires pour réaliser dans un espace de type FabLab le recyclage du PLA.

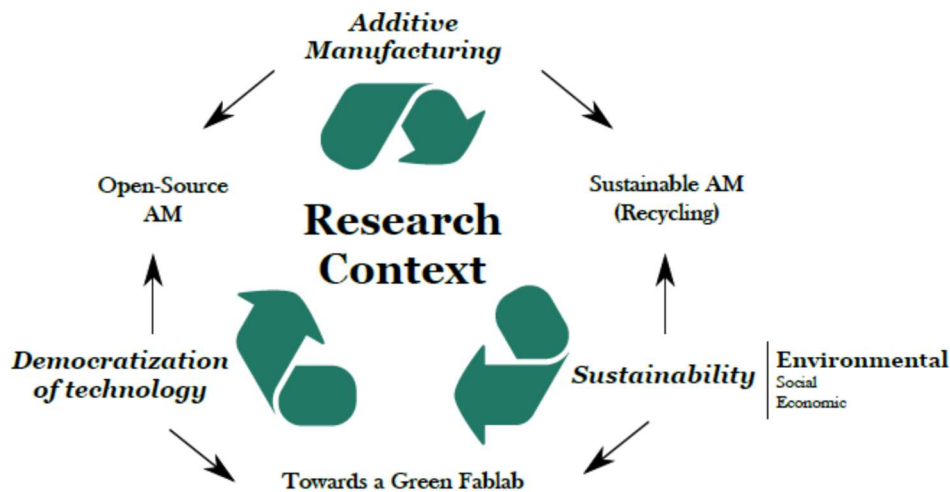


Figure 47 : Contexte de recherche projet GreenFabLab [55]

Du point de vue de la logistique, nous avons étudié et développé un modèle permettant de concevoir le réseau logistique autour de l'unité de recyclage dans une zone géographique permettant de minimiser simultanément le coût et l'impact environnemental. Ces deux apports ont été partagés en open source et sont disponibles sur le site lf2l.fr.

Du point de vue des perspectives, le projet **Greenlocal3D** entend aller plus loin. En effet, nous envisageons, dans le cadre de ce projet, le recyclage et la revalorisation de nombreux thermoplastiques issus cette fois-ci directement de déchets ménagers. Les aspects techniques ont été en partie étudiés ; désormais, notre recherche va porter sur :

- **un nouveau modèle pour la récupération des plastiques usagés**. Celui-ci sera basé sur la dynamique des systèmes et s'inspire du modèle proposé par Alamerew et Brissaud [56]
- **sur l'amélioration des propriétés des filaments issus du recyclage par différentes techniques telles que proposées tableau 5**. Collaboration avec le LRGP.
- **sur la définition d'un circuit court, de la partie tri et collecte auprès des usagers**. Collaboration avec le STG.
- **sur l'augmentation de la capacité de production des imprimantes 3D**.

En effet, nous acquerrons prochainement dans le cadre du projet Européen Inedit, une imprimante de grande taille qui devrait permettre la conception de mobilier urbain à partir de thermoplastiques recyclés.

Actions engagées ou envisagées pour poursuivre nos recherches :

- 2017-2020 Thèse Ministère Pavlo Santander en Co-Direction avec le Professeur Mauricio Camargo
- 2019-2022 Thèse Ministère Candidat à recruter en Co-Direction avec le Professeur El Mostafa Daya
- 2019-2020 Dans le cadre d'une coopération avec l'entreprise Plast'if, nous travaillons sur le recyclage en circuit court du PET au moyen d'imprimantes à granules ou pellets.
- 2019-2022 Dans le cadre d'une coopération avec des collègues de Bath, Aston, Cambridge et du Michigan, nous pensons déposer un projet pour le recyclage du PET en circuit court dans les pays d'Afrique de l'Ouest.
- 2020-2023 Un projet ANR PRCI, le projet « MATILD » a été déposé autour de ce thème. Nous pensons élargir le projet en un projet européen avec des collègues luxembourgeois et italiens.

5.3 Des opportunités pour la santé et le social

Nous avons, dans ce document, montré quelques potentiels de la **FA Open Source** pour répondre à deux grands enjeux : **l'énergie et une meilleure utilisation des ressources**. En sus de ces deux enjeux, j'ai initié une troisième recherche portant davantage sur le domaine de la **santé** et j'espère d'ici deux ou trois ans pouvoir explorer les potentiels de la FA Open source pour répondre à des **enjeux plus sociaux**.

5.3.1) FA Open Source pour la santé

Positionnement du projet

Au chapitre 2, nous avons vu que les deux seuls domaines où l'utilisation de la FA comme moyen de production s'était totalement imposée relevaient du domaine médical. En effet, dans ce domaine, le besoin de personnalisation des objets explose. **Profitant de mes travaux concernant l'amortissement des structures en impression 3D** (dont les principaux résultats et apports ont été rappelés au paragraphe 5.1) je collabore actuellement dans le cadre d'un projet LUE Orthosis 4D à la fabrication par impression 3D d'objets de

faible épaisseur (modélisation en théorie des plaques) dans les domaines de la santé, du sport et du confort corporel (<http://lue.univ-lorraine.fr/fr/orthosis-4d>).

Positionnement scientifique

Depuis 15 ans la communauté scientifique s'intéresse aux nombreuses possibilités d'utilisation de la FA dans les domaines médicaux [57]. Cette dernière est désormais étudiée pour des applications médicales aussi diverses que des nouveaux produits orthopédiques, la fabrication de prothèses maxillo-faciales personnalisées, la conception de tissus et enfin en médecine dentaire [57]. Si les études en impression bio d'os ou de cartilage demeurent relativement faibles, on voit que les études pour des applications externes telles que les prothèses et orthèses explosent [58]. Parmi celles-ci, on peut noter la recherche sur les attelles de poignets personnalisées [58], les prothèses auriculaires [58], et les prothèses des mains et pieds. Dans l'ensemble de ces études, on se retrouve confronté à un besoin de rigidité contrôlé et un besoin de composants légers et très résistants. La tendance actuelle pour répondre à ces besoins est la conception en multi-matériaux et l'utilisation de matériaux composites [59]. Si l'on regarde plus précisément les travaux sur les orthèses, on peut voir que les challenges actuels en recherche sont : la mise au point de logiciels de scan permettant une numérisation directe, la mise au point de matériaux facilement imprimables et à bas coût, et enfin la conception de structures avec des parties rigides, semi-rigides et souples [60].

Perspectives

Afin de répondre à la problématique d'impression à bas coût et avec des parties à forts gradients de propriétés mécaniques, nous allons:

- **explorer différents domaines d'application des structures passives 3D,**
- **développer des dispositifs actifs 4D, donnant une capacité aux objets à réagir à leur environnement.** Ce projet couple des aspects modélisation de méso-structures assistée par des algorithmes (collaboration avec l'INRIA), la simulation de matériaux passifs et actifs développés en collaboration avec le LRGP et l'IJL.

5.3.2) FA Open Source pour la lutte contre les inégalités sociales

Enfin, je finirai par brièvement évoquer le potentiel de la FA Open Source pour **la lutte contre les inégalités sociales**. J'ai découvert ce dernier levier d'innovation grâce à la collaboration forte du laboratoire ERPI avec le professeur Pearce de Michigan Tech University, qui a rejoint notre équipe pour une période de trois ans, grâce au programme Lorraine Université d'Excellence (LUE). En effet, ce dernier a écrit de nombreux articles sur la FA open source et sa capacité à diviser les coûts de fabrication d'objets grand public

de manière phénoménale et par la même occasion de permettre à des personnes en situation de précarité d'avoir accès à des biens leur permettant d'améliorer leur confort de vie.

Ce dernier levier d'innovation nous permettra de travailler avec des collègues de l'ERPI sur la notion d'innovation centrée sur l'utilisateur et d'explorer cette fois-ci l'apport de « l'open Hardware » dans la conception participative et inventive. A titre informatif, je positionne cet apport à travers l'évolution des travaux du laboratoire sur la Figure 48.

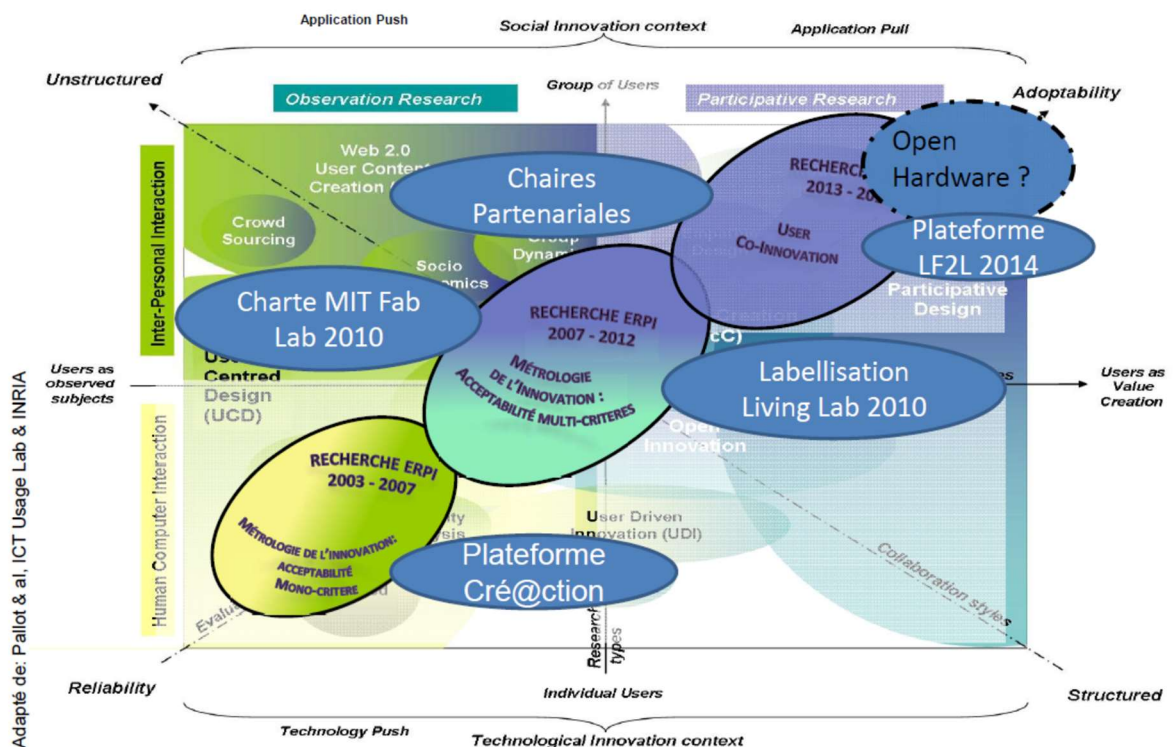


Figure 48 : Evolution de la recherche du laboratoire ERPI. (Source: rapport interne)

Actions engagées ou envisagées pour poursuivre nos recherches :

- 2019-2021 Projet LUE Orthosis. <http://lue.univ-lorraine.fr/fr/orthosis-4d> 2 masters recherche sont prévus.
- 2019-2020 Post doctorat Juliana Serna Rodas dans le cadre du projet Orthosis.
- 2020-2023 Nous envisageons le dépôt, en collaboration avec le CHU et l'INRIA d'une ANR sport de très haute performance qui visera les sportifs paralympiques.

En résumé, la figure suivante récapitule et donne une vision globale de mon projet de recherche à court et moyen termes.

	2019		2020		2021		2022		2023	
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S8	S9
Niveau Efficacité énergétique										
Thèse Lara Garcia										
1 Master										
Projet ANR PRCI Matild										
Niveau Economie Circulaire										
Thèse Pavlo Santander										
Projet ANR PRCI GreenLocal3D										
Thèse Candidat à recruter										
Projet Plast'if										
Circular Plastic Research Coalition										
Niveau Santé et développement social										
Projet LUE Orthosis 4D										
Post-Doctorat Juliana Serna Rodas										
2 Masters										
ANR Sport Haute Performance										
Circular Plastic Research Coalition										

Niveau de risque

nul



Faible



moyen/elevé



5.4 Projet Pédagogique

La diffusion permanente de connaissances, méthodes et outils entre le laboratoire et l'école fait partie des missions attendues et des valeurs partagées des enseignants chercheurs de l'ENSGSI. Je m'inscris tout à fait dans cette démarche. Ainsi, mon projet de recherche aura aussi des conséquences dans l'évolution des enseignements. Mon objectif depuis mon arrivée à l'école a été de tisser des liens entre les matières dites « scientifiques » et celles dédiées au management et au développement personnel.

Par ailleurs, l'école et le laboratoire ont la chance de disposer du **LF2L**, le Lorraine Fab Living Lab (<http://lf2l.fr/place/>), une plateforme dédiée à l'accélération de l'innovation et à la convergence entre idée, support numérique et physique. Comme je l'ai présenté au paragraphe 2.4 du chapitre 1, je souhaite **continuer à développer des enseignements de type « Do-It-Yourself » dans l'espace du LF2L.**

Je citerai ici les deux projets pédagogiques qui ont été initiés et qui continueront d'évoluer : le projet Alfa-Meta-Pi en partenariat avec l'Ecole Européenne d'Ingénieur en Génie des Matériaux (EEIGM), Polytech Nancy et le Gip-Insic et enfin une proposition de nouveau module en collaboration avec les collègues du pôle d'enseignement Innovation/Conception.

Le projet Fonctionnal Material and Design. Il s'agit d'un module complet d'enseignement basé sur une approche Do It Yourself. Celui-ci utilise la plateforme LF2L comme support et permet aux étudiants d'aborder des notions telles que les matériaux intelligents, les propriétés des structures, les fonctions secondaires des produits et ce, tout en montant en compétence sur l'impression 3D, l'Arduino, les capteurs et le contrôle. Ce projet va évoluer et être adapté prochainement afin de le rendre accessible à des étudiants en formation continue ainsi qu'à des étudiants étrangers.

Le projet Material Resistance Escape Game. Il s'agit d'un enseignement en Résistance des Matériaux qui repose sur une trame de type Escape Game. Dès l'année prochaine, j'envisage d'en développer une version numérique à travers un monde isométrique 3D, puis en réalité virtuelle.

Le projet ALFA-META-PI. Il s'agit de développer une démarche pédagogique innovante autour de la fabrication additive de pièces métalliques pour faciliter l'acquisition et l'intégration de compétences par les étudiants. Les techniques de fusion de fils métalliques par arc électrique et de Stratoconception® permettent de s'affranchir des inconvénients associés à la technique de fusion de poudres ; elles serviront de base technologique pour la mise en œuvre de ce projet. Plus précisément, à l'issue de cette action, une imprimante 3D sera élaborée en impliquant les compétences et les étudiants des écoles partenaires. Elle continuera par la suite à être un outil pédagogique d'importance : en effet, elle servira de base à la mise en place de travaux pratiques, de projets et d'enseignements spécifiques à la fabrication additive dédiés aux élèves ingénieurs des 4 écoles partenaires. Elle représentera également un exemple de réalisation issue de l'intégration de diverses compétences en ingénierie.

Un nouveau module d'Innovation Conception. Suite à l'évolution des environnements des responsables innovation (FabLab, Réalité Virtuelle, Co-design, Intégration clients ...) nous avons proposé avec les collègues du pôle Innovation, un nouveau module

d'enseignement intégrant une démarche globale. Ce dernier permettra la conception agile de produits en mode TwinFab-LivingLab.

5.5 Références

- [ACL9] KG Lougou, H Boudaoud, EM Daya, L Azrar “Vibration modeling of large repetitive sandwich structures with viscoelastic core”. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 23 (4), 458-466 (2016)
- [ACL11] FAC Sanchez, H Boudaoud, S Hoppe, M Camargo. “Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues”. *Additive Manufacturing* 17, 87-105. (2017)
- [C-ACTI7] “Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source context: Optimization of processes and methods”. F Cruz, S Lanza, H Boudaoud, S Hoppe, M Camargo. *Proceedings of the 2015 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. An Additive Manufacturing Conference*, Austin, TX, USA (2015)
- [ACL14] P. Santander, F. Cruz, H. Boudaoud, M. Camargo. “Closed Loop Supply Chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: A MILP-based optimization approach”. *Accepté à Resources, Conservation and Recycling*. (2019)
- [ACLS3] . B. Bogoya, F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, J.M. Pearce, M. Camargo. “Open Source Technology Readiness Level Assessments: Application to Distributed Recycling for Additive Manufacturing”. *En révision soumis à Technology Analysis & Strategic Management*. (2019)
- [C-ACTI 8] Pavlo Santander, Fabio Cruz, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo. “3d-printing based distributed plastic recycling: A conceptual model for closed loop supply chain design.”. *IEEE International Conference on Engineering*. (2018)
- [1] Wohlers Report 2017 – 3DPrinting and Additive Manufacturing State of the Industry. Wohlers Associates Inc., 695 United States of America, (2017)
- [2] Eric von Hippel. Chapter 9: Open User Innovation. *Handbook of the Economics of Innovation*, Volume 1, Pages 411-427. (2010)
- [3] Arkema Inside (2019)
- [4] S.N. Safri, M.T. Sultan, M. Jawaid, K. Jayakrishna Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: a review. *Compos B Eng*, 90 (2017)112-12
- [5] L. Mohammed, M.N. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, M.S. Islam. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *Int J Polym Sci* (2015)
- [6] D. Zenkert. *An introduction to sandwich construction*. EMAS Publ., Warley (1995)
- [7] E. Carrera. Historical review of zig–zag theories for multilayered plates and shells *Appl. Mech. Rev.*, 56 (2003), pp. 287-308
- [8] S. Abrate, M. di Scoiva. Equivalent single layer theories for composite and sandwich structures: A review. *Compos Struct*, 179 (2017), pp. 482-494
- [9] H. Hu, S. Belouettar, M. Potier-Ferry, A. Makradi, Y. Koutsawa Assessment of various kinematic models for instability analysis of sandwich beams *Eng. Struct.*, 33 (2011), pp. 572-579
- [10] J.E. Ruzicka. *Structural Damping*. ASME, New York (1959)

- [11] D.J. Mead, S. Markus. The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions. *Journal of sound and Vibration*, 10 (2) (1969), pp. 163-175
- [12] P. Cupial, J. Niziol. Vibration and damping analysis of a three-layered composite plate with a viscoelastic mid-layer. *J. Sound Vib.*, 183 (1) (1995), pp. 99-114
- [13] N. Kumar, S.P. Singh Experimental study on vibration and damping of curved panel treated with constrained viscoelastic layer *Compos. Struct.*, 92 (2) (2010), pp. 233-243
- [14] C.D. Johnson, D.A. Kienholz, L.C. Rogers Finite element prediction of damping in beams with constrained viscoelastic layer. *Shock Vib Bull*, 51 (1) (1981), pp. 71-81
- [15] B.A. Ma, J.F. He Finite element analysis of viscoelastically damped sandwich. plates *J. Sound Vib.*, 52 (1992), pp. 107-123
- [16] E.M. Daya, M. Potier-Ferry. A numerical method for nonlinear eigenvalue problems: application to vibrations of viscoelastic structures. *Comput. Struct.*, 79 (2001), pp. 533-541
- [17] M. P. Hoang. Homogénéisation analytique de structures de nid d'abeille pour des plaques composites sandwich. Thèse (2015)
- [18] Surjadi J. U., Gao L. , Du H. , Li X. , Xiong X. , Fang N. X., Lu, Y. *Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications. Advanced Engineering Materials.*(2019)
- [19] Mauricio F. Caliri, Antonio J. M. Ferreira, Volnei Tita. A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the Finite Element Method *Composite Structures*, Volume 156, 15 November 2016, Pages 63-77
- [20] Yanyu Chen, Tiantian Li, Zian Jia, Fabrizio Scarpa, Chun-Wei Yao, Lifeng Wang 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations. *Mater Design*, 137 (2018), pp. 226-234
- [21] Shaoyu Hou, Tiantian Li, Zian Jia, Lifeng Wang Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact *Mater Des*, 160 (2018), pp. 1305-1321
- [22] Tiantian Li, Lifeng Wang Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials *Compos Struct*, 175 (2017), pp. 46-57
- [23] J Jefferson Andrew, Jabir Ubaid, Farrukh Hafeez, Andreas Schiffer, S Kumar. Impact performance enhancement of honeycombs through additive manufacturing-enabled geometrical tailoring. *International Journal of Impact Engineering*, Volume 134, December 2019, Article 103360
- [24] Michael Robinson, Shwe Soe, Richard Johnston, Rhosslyn Adams, Peter Theobald Mechanical characterisation of additively manufactured elastomeric structures for variable strain rate applications. *Additive Manufacturing*, Volume 27, May 2019, Pages 398-407
- [25] X. Liang, H. Luo, Y. Mu Experimental study on stress attenuation in aluminum foam core sandwich panels in high-velocity impact *Mater. Lett.*, 203 (2017), pp. 100-102
- [26] H. Meng, D. Chronopoulos, A. T. Fabro, W. Elmadih, I. Maskery. Rainbow metamaterials for broadband multi-frequency vibration attenuation: Numerical analysis and experimental validation. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 465, 20 January 2020, Article 115005

- [27] P.K. Bajpai, I. Singh, J. Madaan Development and characterization of PLA-based green composites: a review *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 27 (1) (2012), pp. 52-81
- [28] D. Li, Y. Jiang, S. Lv, X. Liu, J. Gu, Q. Chen, Y. Zhang Preparation of plasticized poly (lactic acid) and its influence on the properties of composite materials
- [29] C.M. Chan, L.-J. Vandi, S. Pratt, P. Halley, D. Richardson, A. Werker, B. Laycock Composites of wood and biodegradable thermoplastics: a review *Polym. Rev.*, 58 (3) (2018), pp. 444-494,
- [30] G. Xie, Y. Zhang, W. Lin Plasticizer combinations and performance of wood flour–poly(lactic acid) 3D printing filaments. *BioResource*, 12 (3) (2017), pp. 6736-6748
- [31] Jung J., Kim H.G., Goo S., Chang K.J., Wang S. A Realisation of a locally resonant metamaterial on the automobile panel structure to reduce noise radiation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 122, 206-231. (2019)
- [32] Lougou Komla Gaboutou . Méthodes multi-échelles pour la modélisation des vibrations de structures à matériaux composites viscoélastiques (2015).
- [33] P Rosa, C Sassanelli, S Terzi. Circular Business Models versus circular benefits: An assessment in the waste from Electrical and Electronic Equipments sector. *Journal of cleaner production*. Vol 231, p 940-952. (2019)
- [34] L Milios. Advancing to a Circular Economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix. *Sustainability Science*. Volume 13, Issue 3, pp 861–878.(2018)
- [35] S.M. Al-Salem, P. Lettieri, J. Baeyens The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: from re-use to energy and chemicals *Prog. Energy Combust. Sci.*, 36 (1) (2010), pp. 103-129.
- [36] F. Vilaplana, S. Karlsson Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: a review *Macromol. Mater. Eng.*, 293 (4) (2008), pp. 274-297
- [37] M. Xanthos, J. Greci, S.H. Patel, A. Patel, C. Jacob, S. Dey, S.S. Dagli Thermoplastic composites from maleic anhydride modified post-consumer plastics *Polym. Compos.*, 16 (3) (1995), pp. 204-214
- [38] R.M. Bajracharya, A.C. Manalo, W. Karunasena, K.-T. Lau An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites *Mater. Des.*, 62 (2014), pp. 98-112
- [39] E.P.A. van Bruggen, R.P. Koster, S.J. Picken, K. Ragaert Influence of processing parameters and composition on the effective compatibilization of polypropylene–poly(ethylene terephthalate) blends *Int. Polym. Proc.*, 31 (2) (2016), pp. 179-187
- [40] Jukka Pakkanen et al. “About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing”. ed. by Giampaolo Campana et al. Vol. 68. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 776–785.
- [41] R Radharamanan. “DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 3D PRINTER WITH RECYCLING SYSTEM Design and Development of a 3D Printer with Recycling System”. 2011 ASEE Annual Conference & Exposition. Vancouver, 2011, pp. 22.424.1 – 22.424.12.

- [42] Steven Keating and Neri Oxman. “Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29.6 (2013), pp. 439–448.
- [43] Rupinder Singh, Jagdeep Singh, and Sunpreet Singh. “Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament”. *Measurement* 78 (2016), pp. 253–259.
- [44] K. S. Boparai et al. “Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications”. *Composites Part B: Engineering* 106 (2016), pp. 42–47.
- [45] Guan Ting Pan et al. “The Effects of Iron, Silicon, Chromium, and Aluminum Additions on the Physical and Mechanical Properties of Recycled 3D Printing Filaments”. *Advances in Polymer Technology* (2016), pp. 1–9.
- [46] J. F. Horta, F. J.P. Simões, and A. Mateus. “Large scale additive manufacturing of eco-composites”. *International Journal of Material Forming* (2017), pp. 1–6.
- [47] I. Anderson. “Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid”. *3D Printing and Additive Manufacturing* 4.2 (2017), pp. 110–115.
- [48] Kreiger, M.A., M.L. Mulder, A.G. Glover, and J.M. Pearce. 2014. “Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament.” *Journal of Cleaner Production* 70: 90–96.
- [49] Dekker, Rommert, Jacqueline Bloemhof, and Ioannis Mallidis. 2012. “Operations Research for green logistics – An overview of aspects , issues , contributions and challenges.” *European Journal of Operational Research* 219: 671–79.
- [50] Govindan, Kannan, Hamed Soleimani, and Devika Kannan. 2015. “Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future.” *European Journal of Operational Research* 240: 603–26.
- [51] Kannan, G., A. Noorul Haq, and M. Devika. 2009. “Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation.” *International Journal of Production Research* 47: 1175–1200.
- [52] Chavez, Ricardo, and Manish Sharma. 2018. “Profitability and environmental friendliness of a closed-loop supply chain for PET components: A case study of the Mexican automobile market.” *Resources, Conservation and Recycling* 135: 172–89.
- [53] French, Monique L., and R. Lawrence LaForge. 2006. “Closed-loop supply chains in process industries: An empirical study of producer re-use issues.” *Journal of Operations Management* 24: 271–86.
- [54] Pati, Rupesh Kumar, Prem Vrat, and Pradeep Kumar. 2010. “Quantifying bullwhip effect in a closed loop supply chain.” *OPSEARCH* 47: 231–53.
- [55] Lf2l projets : <http://lf2l.fr/projects/green-fablab/>
- [56] Alamerew YA, Brissaud D (2018) Modelling and assessment of product recovery strategies through systems dynamics. *Procedia CIRP* 69:822–826
- [57] Christopher Lunsford, Garrett Grindle, Benjamin Salatin, Brad E. Dicianno. *Innovations With 3-Dimensional Printing in Physical Medicine and Rehabilitation: A Review of the Literature.*

- [58] Mohd. Javaid, Abid Haleem. Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review Alexandria Journal of Medicine, Volume 54, Issue 4, December 2018, Pages 411-422
- [59] R. Chen, L. Chen, B. Tai, Y. Wang, A.J. Shih, J. Wensman, “Additive manufacturing of personalized ankle-foot orthosis,” Proc. NAMRI/SME, Detroit. 2014.
- [60] R. Chen, Y. Jin, J. Wensman, A.J. Shih Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses – a review Additive Manufacturing, 12 (2016), pp. 77-89