



HAL
open science

Une méthodologie pour la réalisation de pièces de grandes dimensions polymères par fabrication additive

Matthieu Rauch, Jean Yves Hascoet, Luiz Bier

► To cite this version:

Matthieu Rauch, Jean Yves Hascoet, Luiz Bier. Une méthodologie pour la réalisation de pièces de grandes dimensions polymères par fabrication additive. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011659v1

HAL Id: hal-04011659

<https://hal.science/hal-04011659v1>

Submitted on 2 Mar 2023 (v1), last revised 18 Jun 2024 (v2)

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.



Une méthodologie pour la réalisation de pièces de grandes dimensions polymères par fabrication additive

Matthieu RAUCH^(a), Jean-Yves HASCOËT^(a), Luiz BIER^(a)

(a) Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

Mail : matthieu.rauch@ec-nantes.fr, jean-yves.hascoet@ec-nantes.fr, [luiz.bier@ec-nantes.fr](mailto:l Luiz.bier@ec-nantes.fr)

Résumé : La fabrication additive de composants en polymères par dépôt de fil fondu a connu de nombreux progrès au cours des dernières années. Dans le cas des pièces de grandes dimensions, de nombreux démonstrateurs fonctionnels ont été proposés avec succès dans les domaines du transport, du sport de haut niveau, Cependant, la réalisation de ceux-ci s'appuie sur des expertises et des savoir-faire qui n'ont jusqu'à présent pas été formalisés dans leur globalité. Les travaux présentés dans ce papier portent sur une méthodologie de préparation de la fabrication de composants de grande dimension par fabrication additive. Elle se base sur plusieurs indicateurs discriminants qui répartissent les composants en huit familles types auxquelles sont associées des stratégies de fabrication spécifiques. Les performances de la méthodologie proposée sont évaluées au travers de la fabrication de plusieurs cas d'usages à l'aide d'un robot 6 axes. Cette formalisation des connaissances permet également de s'appuyer sur des approches de fabrication préexistantes, d'en faire la synthèse afin de choisir celle qui sera la plus adaptée pour l'application visée.

Mots clés : Fabrication Additive, Stratégie de fabrication, Composants de grandes dimensions polymères.

1 Introduction

La fabrication additive de composants en polymères par dépôt de fil fondu a connu de nombreux progrès au cours des dernières années. En particulier une maîtrise accrue des paramètres de fabrication a significativement amélioré les caractéristiques dimensionnelles et mécaniques ; l'utilisation de moyens de fabrication performants comme par exemple les robots anthropomorphes (Grunewald, 2015; Yuan et al., 2016) a également permis de nouvelles avancées. Dans le cas des pièces de grandes dimensions, de plusieurs démonstrateurs fonctionnels ont été proposés avec succès dans les domaines du transport, du sport de haut niveau (Arevo, 2020). Cependant, il subsiste aujourd'hui un manque de formalisme autour des démonstrateurs réalisés ; alors qu'il serait pertinent d'intégrer expertises et des savoir-faire au sein d'une approche générique comme exprimé par les auteurs dans (Authelin, 2022; J.-Y. Hascoët et al., 2020).

Ainsi, ce papier introduit une méthodologie de préparation de la fabrication de composants de grande dimension par fabrication additive. Celle-ci s'appuie sur plusieurs indicateurs discriminants qui répartissent les composants en huit familles types. Chaque famille est associée à des stratégies de fabrication spécifiques. Les performances de la méthodologie proposée sont évaluées au travers de la fabrication de plusieurs cas d'usages à l'aide d'un robot 6 axes anthropomorphes. Cette formalisation des connaissances permet également de s'appuyer sur approches de fabrication préexistantes, d'en faire la synthèse afin de choisir celle qui sera la plus adaptée pour l'application visée. Le papier s'organise de la façon suivante : après avoir introduit quelques exemples de réalisations de pièces polymères de grande dimension par fabrication additive, les principaux verrous et problématiques scientifiques sont identifiés, en partie les manques en termes de méthodologie de fabrication pour formaliser les expertises en termes de choix de gammes et de stratégies de fabrication

2 Réalisation de composants de grandes dimensions en polymère par fabrication additive, un état de l'art.

En s'appuyant sur les progrès technologiques en termes de conception et commande de machines de grandes dimensions, plusieurs preuves de concept de fabrication additive polymère de grande dimension ont été proposées. Les exemples sont nombreux et vouloir être exhaustif serait déraisonnable. On peut néanmoins citer quelques projets portant sur la fabrication additive d'outillages de grandes dimensions destinés aux procédés de moulage au contact, par infusion sous vide ou par autoclave. Ainsi Kunc et al. (Kunc et al., 2017) ont réalisé un moule au contact pour la réalisation d'un capot d'une réplique du véhicule Shelby Cobra. Le poids réduit du composant fabriqué, en comparaison de celui des moules traditionnels, facilite les opérations de levage et de gréage associées au transport des outils. Post et al. (Post et al., 2019) ont fabriqué un moule de pales d'éoliennes d'une longueur de treize mètres en partenariat avec l'entreprise TPI Composites. Le moule a été conçu et réalisé de manière à pouvoir accueillir des unités de chauffage pour favoriser le procédé de moulage par infusion.

Des démonstrateurs de pièces fonctionnelles, de structure, ont également été produits par fabrication additive polymère comme des coques de bateau (Peterson, 2021) ou des coques de sous-marin (ORNL, 2016). D'autres exemples dans le domaine du sport,

(cadres de vélo (Arevo, 2020), planches de surf personnalisables (Wyve, 2019)...) ou du génie civil (passerelle piétonne (Royal Haskoning, 2020) ont également été proposés.

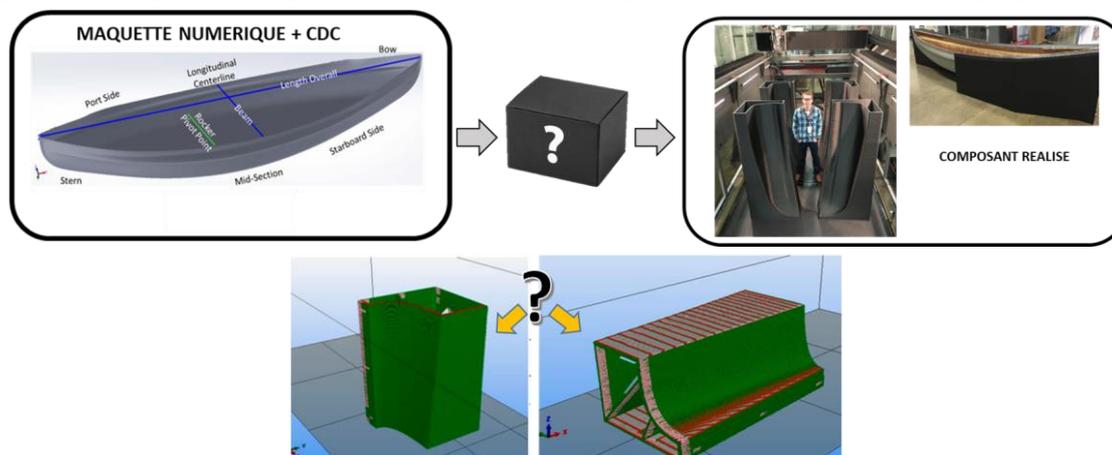


Figure 1 : Exemple d'outillage de grande dimension réalisé en FA polymère (Post et al., 2019) et de la problématique de posage associée

Ces démonstrateurs montrent la pertinence du procédé de dépôt de fil polymère fondu pour la réalisation de composants fonctionnels de grandes dimensions. Cependant, ils sont souvent réalisés par des entreprises qui ne divulguent pas les connaissances et compétences ayant servi à obtenir ces résultats, comme indiqué sur la Figure 1 ; la méthodologie appliquée pour passer de la maquette numérique au démonstrateur physique reste cachée dans une boîte noire et la capitalisation des connaissances mobilisée n'est pas accessible et la pertinence des choix effectués est difficile voire impossible à quantifier.

Pour combler ce manque, ce papier propose une méthodologie semi-automatisée pour guider la préparation à la fabrication additive de composants de grandes dimensions en polymères. Elle se base sur la proposition d'indicateurs discriminants permettant de répartir les composants selon des familles, en s'appuyant à la fois sur données topologiques du composant et sur les caractéristiques du moyen de fabrication choisi. La maîtrise de ces activités est ainsi formalisée et conduite à la réalisation de ces composants de manière systématique en s'affranchissant des choix issus des connaissances et compétences d'un expert. La validité des stratégies de fabrication proposée est illustrée par la réalisation de plusieurs preuves de concept de grande dimension, réalisées à l'aide du robot anthropomorphe du laboratoire, équipé d'un effecteur pour fabrication additive de polymères fondus à base de fil. Grâce à ses 6 degrés de liberté, il dispose de la capacité nécessaire à la réalisation de trajectoires complexes dans son espace de travail avec contrôle de l'inclinaison de l'axe outil par rapport à la direction de dépôt.

3 Identification des familles de composants et stratégies de fabrication associées

Afin de s'extraire des aspects « boîte noire » pour la réalisation de composants de grandes dimensions par fabrication additive, la méthodologie proposée dans ce papier s'appuie sur une classification des composants à fabriquer selon plusieurs familles, dont les critères d'appartenance s'appuient sur la typologie de leur maquette numérique et sur les caractéristiques des moyens de fabrication employés. Chaque famille est associée à des

choix en termes de gamme de fabrication et de moyens capables. Afin de rester le plus générique possible vis-à-vis du choix de matériau déposé, ou des trajectoires explicites de l'outil, ces paramètres de fabrication technologiques ne sont pas considérés ici. Ils sont cependant tout à fait compatibles avec les résultats de la méthodologie qui en est complémentaire.

Avant de présenter les différentes familles de composants, les critères de choix sont introduits au sein du paragraphe suivant.

3.1 *Mise en place de critères discriminants*

La méthodologie s'appuie actuellement sur deux types de critères ; d'un côté ceux liés à l'analyse géométrique du composant à fabriquer, d'un autre côté ceux liés aux caractéristiques du moyen de fabrication choisi.

Les critères géométriques portent sur trois éléments, faisant l'hypothèse d'une construction de la maquette numérique par une fonction de balayage :

- propriétés de la normale de génération : constante ou évolutive
- propriétés de la section : constante ou évolutive
- propriétés de la surface initiale d'appui, pouvant être interprétées comme le substrat : plane, non plane, ou inexistante

Cette analyse de la maquette numérique (comme étant construite par fonction balayage), est cohérente au regard du procédé de fabrication additive, la direction de fabrication étant identifiable comme direction de balayage et les couches déposées comme sections balayées.

Les critères relatifs au moyen de fabrication font référence à sa capabilité et ses caractéristiques cinématiques : forme et taille de l'espace de travail ; capacité à contrôler l'inclinaison de l'axe outil durant le process. D'autres critères pourront être introduits par la suite selon les évolutions technologiques.

Il est important de souligner ici que géométrie du composant et caractéristiques du moyen sont liées pour chaque famille, en particulier ce qui concerne le nombre de degrés de libertés disponibles pour mouvoir et orienter l'effecteur.

La méthodologie s'appuie pour ces aspects sur le concept de visibilité, introduit par l'équipe de recherche dans (J. Y. Hascoët et al., 1997) pour le choix de configurations machines-outils / posages pièces pour des applications d'usinage. Celui-ci est ainsi adapté aux opérations de fabrication additive. En s'appuyant sur le nombre de visibilités nécessaire à la réalisation d'un composant, il est possible de s'assurer que le porteur choisi est capable de réaliser le composant, mais aussi de définir les caractéristiques nécessaires au choix d'un porteur adapté au besoin.

3.2 *Caractéristiques associées à chaque famille de composants*

La Figure 2 donne la vision synthétique des huit familles de composants identifiés selon la stratégie de fabrication associée, ainsi que des critères de choix associés. Les caractéristiques de chaque famille sont explicitées dans les paragraphes suivants. Chacune d'entre elles est illustrée par la réalisation d'un composant preuve de concept dont le but est de valider la pertinence de ce choix de famille.

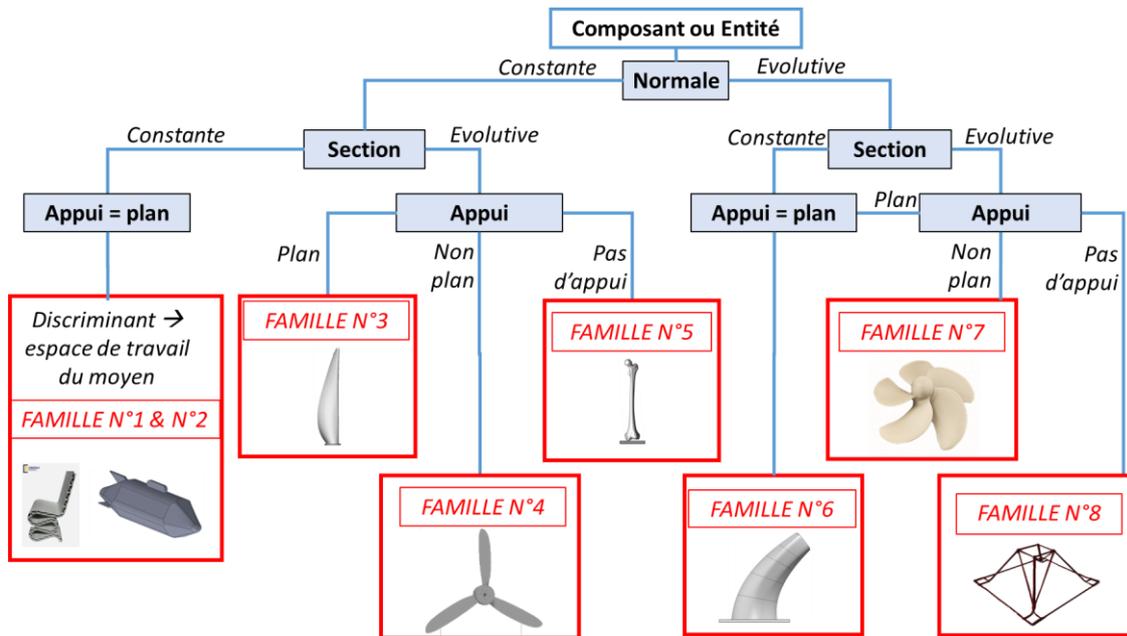


Figure 2 : Vue synthétique de l'approche proposée

3.2.1 Famille 1 et 2 : pièces extrudées de normale constante

Les familles 1 et 2 sont constituées des composants obtenus par extrusion d'une section constante selon une direction normale au plan de la section. Autrement dit, elle regroupe les composants de type profil extrudé.

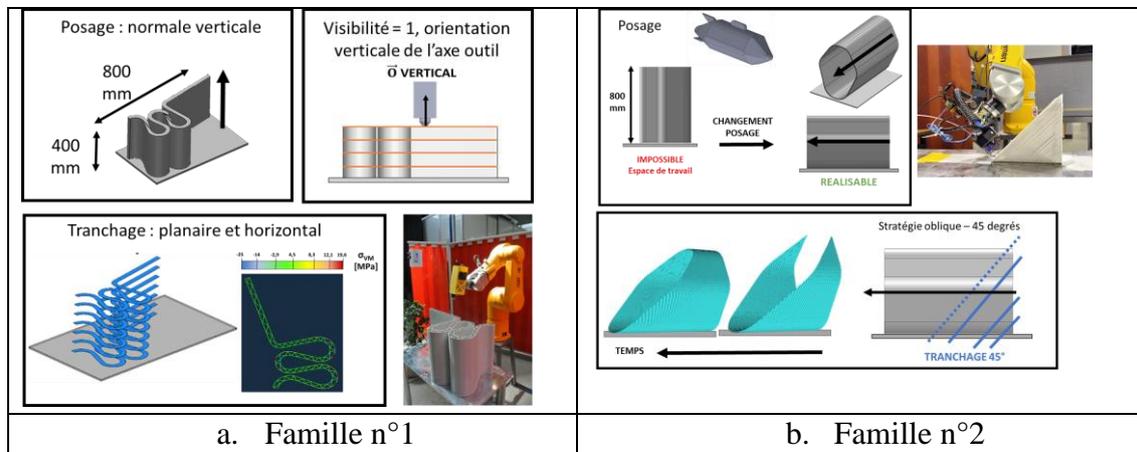


Figure 3 : Stratégies de fabrication associée aux familles 1 et 2

Le critère discriminant entre les familles 1 et 2 se situe au niveau des dimensions de l'espace de travail du moyen de fabrication choisi selon la verticale ascendante : si la longueur disponible sur le moyen de fabrication est supérieure à celle du composant selon sa normale d'extrusion, alors le composant appartient à la famille 1 et sera fabriqué selon un posage plaçant la direction d'extrusion verticale, découpé selon un tranchage planaire et horizontal et fabriqué selon une orientation verticale de l'axe outil. (visibilité = 1). La Figure 3a. illustre la stratégie fabrication d'un composant de la famille 1.

Si la longueur utile de l'axe vertical de l'équipement est inférieure à celle selon la direction d'extrusion, alors le composant sera affecté à la famille n° 2 (Figure 3b.). Il sera

placé sur le plateau de fabrication avec sa normale d'extrusion colinéaire avec l'axe machine de plus grande dimension. Dans le cas des composants pleins, ou si cette stratégie ne génère pas un volume trop important de support, une stratégie de tranchage planaire horizontal sera choisie. Dans les autres cas, il est proposé de recourir à une autre stratégie de tranchage en plan parallèle mais selon une autre direction de l'espace. (45° par rapport à la verticale par exemple). Dans les deux cas, la valeur de la visibilité reste égale à 1, avec axe outil orienté normalement à la direction de tranchage.

3.2.2 Famille 3 : pièces extrudées de section évolutive et de surface d'appui plane

La famille n°3 regroupe les composants dont les sections évoluent le long de la normale et qui bénéficient d'une surface d'appui plane. La stratégie de fabrication est la même que pour la famille n°1 à ceci près que pour les pièces minces de type coques pouvant être réalisées en dépôt monocordon, l'orientation de l'axe outil doit être orientée vers la couche précédente ; le nombre de visibilité est donc multiple et le moyen de fabrication associé capable de gérer ces visibilité multiples par un contrôle de l'orientation de l'axe de la buse durant la fabrication.

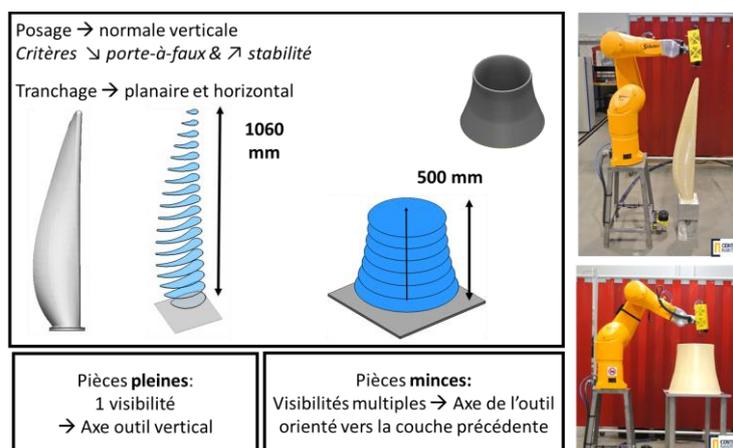


Figure 4 : Stratégies de fabrication pour la famille 3

3.2.3 Famille 4 : pièces extrudées de section évolutive et de surface d'appui non plane

Les composants de la famille 4 ne disposent pas de surface d'appui plane et la stratégie de fabrication associée s'appuie sur un tranchage non planaire, pouvant être constitué d'offsets de la surface d'appui. Ces composants présentent ainsi plusieurs visibilité du fait de la variation nécessaire de l'inclinaison de l'axe outil au cours de la trajectoire et afin de garantir une bonne orientation de l'outil durant la fabrication. Un porteur permettant de contrôler l'inclinaison de l'axe outil doit être choisi pour répondre au critère de visibilité.

Les composants ayant pour substrat une surface cylindrique appartiennent à cette famille 4.

3.2.4 Famille 5 : Pièces extrudées sans surface d'appui

Cette famille de composants ne présente pas de posage préférentiel a priori. Typiquement les pièces « organiques » font partie de cette famille (Figure 5). La stratégie de fabrication

s'appuie alors sur plusieurs critères pour choisir le posage préférentiel, en comparant par exemple le taux de support nécessaire pour différents posages. Ensuite, la maquette numérique initiale est modifiée pour ajouter une structure de soutien faisant office de surface d'appui plane et qui sera retirée après fabrication. Si l'élançement du composant est important, il est également utile d'ajouter une structure de maintien pour maîtriser les déviations par rapport à la maquette numérique (il est important de préciser que ces structures de maintien peuvent également être utilisées pour stabiliser la fabrication des composants de la famille 5). Une fois ces modifications faites, le composant peut être réalisé selon une stratégie similaire à celle de la Famille 3.

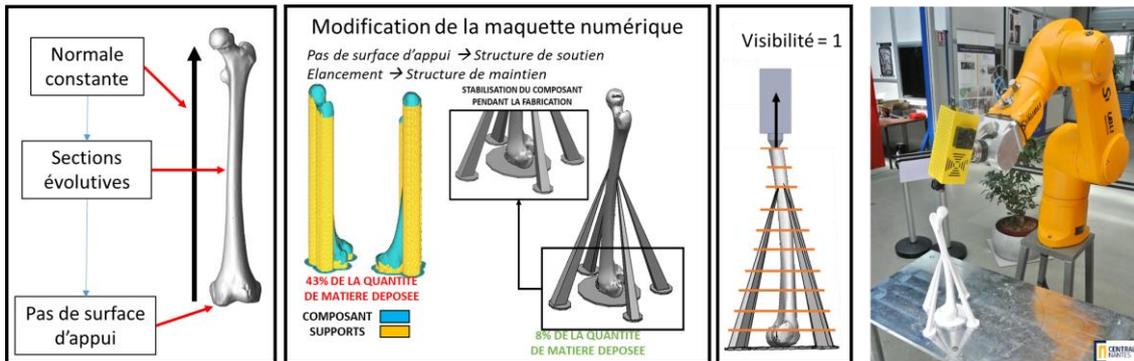


Figure 5 : Stratégies de fabrication pour la famille 5

3.2.5 Famille 6 : Pièces de normale d'extrusion évolutive avec surface d'appui plane

Cette famille est constituée de pièces obtenues par sections balayées, celles-ci pouvant être constantes ou évolutives. Si plusieurs surfaces d'appui planes sont possibles, celle offrant la plus grande stabilité sera choisie préférentiellement (Figure 6). Si plusieurs stratégies de tranchage peuvent être choisies pour ce type de composant, il est préférable de recourir à celle suivant la fibre neutre, c'est-à-dire la direction de balayage (Querard, 2019). Les visibilitées sont multiples, il peut y en avoir autant de couches déposées ; la réalisation de ces composants nécessitera donc l'emploi de porteurs offrant un contrôle multiaxe.

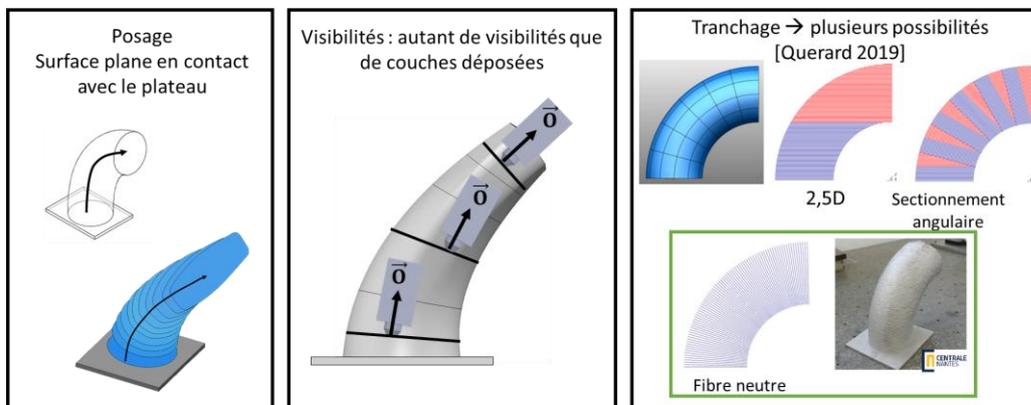


Figure 6 : Preuve de concept associée à la famille 6

3.2.6 Famille 7 : Pièces de normale et section évolutives avec surface d'appui non plane

Les composants présentant une normale et des sections évolutives associées à une surface d'appui non plus constituent la famille 7. Leur stratégie de fabrication utilise des surfaces de tranchage non planes, ce qui implique un nombre de visibilité élevé et l'emploi d'un porteur multiaxes.

3.2.7 Famille 8 : Structures autoportées

Cette dernière famille regroupe des composants spécifiques de type structures autoportées, comme indiqué sur la Figure 7 ; celles-ci sont conçues pour supporter des charges importantes au regard de leur masse propre. La fabrication de ces structures, de normale évolutive et sans surface d'appui repose sur l'utilisation d'un tranchage non planaire associé à une ou plusieurs structures de soutien. Bien qu'il dépende de la géométrie exacte de la structure, le nombre de visibilité est grand et la réalisation du composant s'appuiera sur un porteur ayant au moins 5 degrés de liberté.

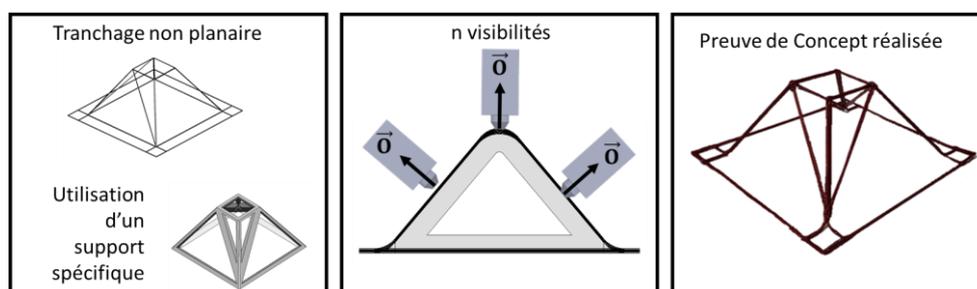


Figure 7 : Exemple de structure autoportée pour la famille 8

4 Discussion

La méthodologie proposée donne les éléments pour choisir un moyen de fabrication capable et définir la stratégie de fabrication associée. Bien que les preuves de concept introduites dans la partie précédente soient constituées d'un seul type d'entité, les principes et critères de la méthodologie sont généralisables aux composants pouvant se décomposer en plusieurs entités. Chaque entité pourra avoir sa stratégie de fabrication propre, selon sa famille d'appartenance.

Par ailleurs, pour tout composant géométrique, la question de l'unicité d'appartenance à une famille peut se poser. En effet, il peut ne pas y avoir de solution évidente, par exemple si la pièce ne présente pas de direction privilégiée pour la définition de la normale et des sections, ou si la famille sélectionnée conduit à des difficultés de réalisation.

Pour résoudre ces questionnements, la méthodologie se base sur plusieurs critères de niveau 2, et sur une analyse du cahier des charges fonctionnel du composant.

Un exemple de cas pratique est la fabrication d'une lame d'épée, pièce profilée très élancée, pour laquelle la longueur le long de la normale est très grande face aux dimensions des sections (Figure 8). On pourrait à tort classer ce composant dans la famille 3 ; cependant, cette stratégie conduit à la fabrication d'une structure de maintien imposante, nécessitant temps et quantité de matière importants. De plus, la répétition d'un très grand nombre de couches peut générer une erreur dimensionnelle importante si la

hauteur de dépôt n'est pas maîtrisée finement. L'emploi de critères de niveau 2 comme la minimisation du nombre de couches et celle de la quantité de supports nécessaire conduit à un rattachement à la famille 5 : fabrication de la lame couchée sur le plateau en ayant ajouté une structure de soutien à la maquette numérique initiale.

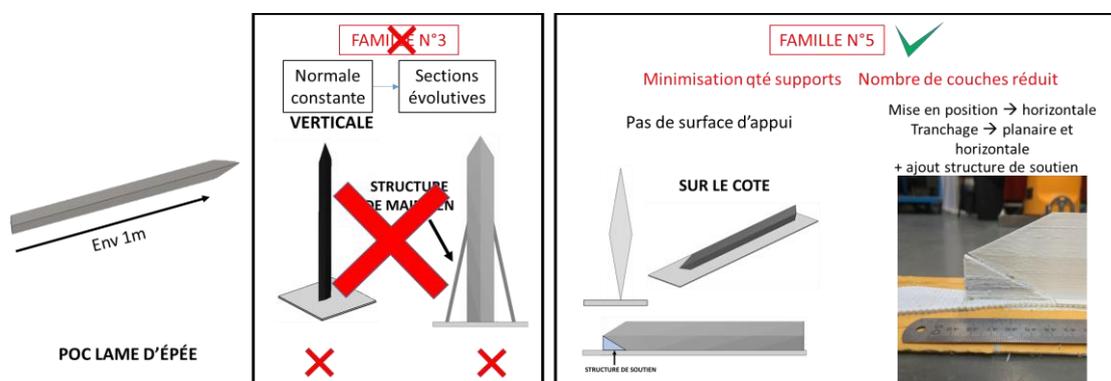


Figure 8 : Exemple de choix de famille en fonction de critères de niveau 2

D'autres critères de niveau 2 sont également disponibles au sein de la méthodologie comme par exemple la maîtrise de l'erreur maximale admissible vis-à-vis du cahier des charges (choix de la surface de posage, caractéristiques mécaniques attendues, ...). Des approches par simulation thermomécaniques sont également employées pour anticiper les variabilités possibles et disposer de critères de choix objectifs à moindre cout en plus de ceux utilisés actuellement par la méthodologie.

Une maquette informatique traite les données d'entrées du modèle numérique du composant et des caractéristiques du moyen de fabrication visé afin d'identifier la famille d'appartenance et de proposer les stratégies associées comme le posage et la gamme de fabrication.

5 Conclusions

Ce papier a introduit une méthodologie pour la fabrication de composants de grandes dimensions en polymères fondus par fabrication additive. Celle-ci donne des critères de choix de la stratégie de fabrication la plus adaptée en fonction de critères objectifs relevant de la géométrie du composant et de la capacité du moyen choisi ou potentiel. La réalisation de plusieurs pièces « preuves de concept » a montré la pertinence de l'approche. Outre les critères de niveau 1 introduits dans le papier, des critères de niveau 2, relatifs au cahier des charges fonctionnel du composant sont disponibles pour affiner le choix de la famille la plus appropriée. Un couplage à des approches plus complètes de fabrication intégrant du parachèvement, dans un contexte de fabrication hybride est également en cours de développement.

Références

- Arevo. (2020, July 14). AREVO and Superstrata reveal custom 3D printed unibody carbon fiber e-Bikes. *3D Printing Industry*. <https://3dprintingindustry.com/news/arevo-and-superstrata-reveal-custom-3d-printed-unibody-carbon-fiber-e-bikes-173572/>
- Authelin, O. (2022). *Méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus (Issue 2022ECDN0006) [Theses, École centrale de Nantes]*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03722279>
- Grunewald, S. J. (2015, November 16). Arevo Labs Takes 3D Printing 3D with New 6-Axis Composite Part Additive Manufacturing Platform. *3DPrint.Com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*. <https://3dprint.com/105787/arevo-labs-6-axis-ram-platform/>
- Hascoët, J. Y., Bennis, F., & Risacher, Ph. (1997). Choice of Machine Tool Configuration. In P. Chedmail, J.-C. Bocquet, & D. Dornfeld (Eds.), *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering* (pp. 379–387). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5588-5_38
- Hascoët, J.-Y., Authelin, O., & Rauch, M. (2020). A Generic Method to Realize Long Fibers Filled and Large Polymer Parts in Additive Manufacturing. *Journal of Machine Engineering*, 20(1), 107–116. <https://doi.org/10.36897/jme/118217>
- Kunc, V., Hassen, A. A., Lindahl, J., Kim, S., Post, B., & Love, L. (2017). Large scale additively manufactured tooling for composites. *Proceedings of 15th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition*.
- ORNL. (2016). 3D printed submarine built with ORNL's BAAM 3D printer suggests additive future for Navy. *3ders.Org*. <http://www.3ders.org/articles/20170721-3d-printed-submarine-built-with-ornl-baam-3d-printer-suggests-additive-future-for-navy.html>
- Peterson, E. (2021). Technical Challenges to Adopting Large Scale Additive Manufacturing for the Production of Yacht Hulls. In W. Karwowski, T. Ahram, D. Etinger, N. Tanković, & R. Taiar (Eds.), *Human Systems Engineering and Design III* (pp. 15–20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58282-1_3
- Post, B. K., Chesser, P. C., Lind, R. F., Roschli, A., Love, L. J., Gaul, K. T., Sallas, M., Blue, F., & Wu, S. (2019). Using Big Area Additive Manufacturing to directly manufacture a boat hull mould. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(2), 123–129. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1532798>
- Querard, V. (2019). *Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM [These de doctorat, Ecole centrale de Nantes]*. In [Http://www.theses.fr](http://www.theses.fr). <http://www.theses.fr/2019ECDN0001>
- Royal Haskoning. (2020, July 9). 'World's first 3D printed fiber reinforced polymer footbridge paves way for circular composites'. *Robotics & Automation News*. <https://roboticsandautomationnews.com/2020/07/09/worlds-first-3d-printed-fiber-reinforced-polymer-footbridge-paves-way-for-circular-composites/33903/>
- Wyve. (2019). *Wyve | Your Custom Made High Performance Surfboard*. <https://www.wyvesurf.com/>
- Yuan, P. F., Meng, H., Yu, L., & Zhang, L. (2016). Robotic Multi-dimensional Printing Based on Structural Performance. In D. Reinhardt, R. Saunders, & J. Burry (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 92–105). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_7