



HAL
open science

Nouvelle méthodologie de conception pour les structures composites

Florian Neveu, Bruno Castanié, Philippe Olivier

► **To cite this version:**

Florian Neveu, Bruno Castanié, Philippe Olivier. Nouvelle méthodologie de conception pour les structures composites. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623257

HAL Id: hal-01623257

<https://hal.science/hal-01623257>

Submitted on 25 Oct 2017

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.

Nouvelle méthodologie de conception pour les structures composites

A new methodology for designing composite structures

Florian Neveu¹, Bruno Castanié¹ et Philippe Olivier¹

¹ : Institut Clément Ader
Université de Toulouse - INSA/UPS/ISAE/Mines Albi
3 rue Caroline Aigle, UMR 5317, 31400 Toulouse
e-mail : florian.neveu@univ-tlse3.fr

Résumé

La part d'utilisation des matériaux composites continue d'augmenter dans les domaines de transports notamment, mais aussi des loisirs. Leur intégration dans des nouveaux produits ou des produits déjà conçus initialement soulève la problématique de conception ou de re-conception des pièces ou sous-ensembles métalliques. De par la nature même des matériaux composites, des formes complexes peuvent être réalisées en "one shot" et il existe une très grande diversité de couples renfort/matrice ainsi que de nombreux procédés de fabrication. Il en résulte un hyper-choix des matériaux et des procédés pour quiconque souhaite concevoir une pièce composite remplaçant une ou plusieurs pièces métalliques, complexifiant ainsi la tâche pour converger vers une solution finale adéquate. A ce jour aucune démarche structurée de conception n'existe et cet article présente une méthodologie originale afin de créer et d'identifier rapidement les concepts les plus pertinents.

Abstract

The use of composite materials keeps growing in the transport industries as well as in the recreational industries. Their integration in brand new products or products previously designed raises the question of designing or re-designing composite parts and sub-assemblies. Due to the very nature of composite materials, complex geometries can be achieved and there is a wide variety of reinforcement/matrix couples as well as many manufacturing processes. The outcome is a hyper-choice of materials and processes for anyone designing a composite part replacing one or several metallic parts, giving the task more complex to converge towards a proper final solution. To this day no clear process for designing composite parts exists and this article aims to present an original methodology to quickly identify the most relevant concepts.

Mots Clés : conception, méthodologie, structures composites

Keywords : design, methodology, composite structures

1. Introduction

Concevoir une pièce ou un produit mécanique relève d'un processus partant de la définition du besoin et des fonctions jusqu'à la phase de fabrication, de sa maintenance et éventuellement de sa fin de vie. En général, l'expérience acquise dans un domaine donné permet d'aborder ces phases de conception avec efficacité en minimisant les risques dus aux incertitudes liées par exemple aux caractéristiques mécaniques des pièces, aux procédés de fabrication ou bien à la maturité technologique de certains procédés. Néanmoins, les méthodes qui pouvaient s'appliquer précédemment pour des matériaux homogènes et isotropes classiques (alliages métalliques, plastiques...) ne fonctionnent plus obligatoirement pour des nouvelles pièces en composites. Les géométries et les formes imposées par les procédés de fabrication, les nouvelles contraintes dues à la spécificité du matériau et de ses couples renforts/matrices, les architectures différentes... toutes ces spécificités inhérentes aux structures composites suggèrent la nécessité de revoir les processus de conception et de les adapter. Les travaux présentés dans cet article proposent une méthodologie de conception spécifique aux pièces ou sous-ensembles composites en mettant notamment l'accent sur la génération des concepts et une analyse rapide de leurs caractéristiques principales : géométrie, architecture de la structure composite, procédé de fabrication. Une évaluation d'ensemble des concepts proposés avec leurs attributs permet

dans un second temps de sélectionner les solutions les plus intéressantes et d'itérer vers la boucle de conception suivante. L'article présentera dans un premier temps un aperçu sur la génération des concepts et leur importance dans le cadre d'un projet mécanique puis abordera les spécificités des structures composites en expliquant leurs implications dans le processus de conception. Dans un deuxième temps, la méthodologie de conception sera expliquée puis suivie d'une application sur un exemple de conception générique.

2. La génération des concepts en mécanique

2.1. Définition et importance des concepts dans l'élaboration d'un produit mécanique

Un concept est une idée qui est suffisamment développée pour pouvoir évaluer les principes physiques qui gouvernent son comportement. Autrement dit, dans le cas d'une pièce mécanique, nous jugerons qu'un concept doit respecter les conditions suivantes pour qu'il puisse être intégré dans la première boucle de conception :

- Les fonctions principales doivent être remplies
- Les contraintes doivent être respectées, notamment de volume (soit l'espace de conception admissible)

Il est d'ailleurs notable qu'un concept peut se représenter matériellement de différentes façons : descriptions textuelles ou verbales, diagrammes, esquisses ou encore toute autre moyen indiquant comment les fonctions peuvent être remplies. Dans le cas ci-présent, les concepts proposés seront mis en évidence par des maquettes CAO car ces outils numériques sont majoritairement utilisés dans le domaine mécanique.

Ces concepts doivent avant tout servir de bases pour arriver in fine à un produit final qui remplira donc les objectifs et besoins définis en début de projet. Il est par conséquent important de disposer d'un large choix de concepts qui seront autant de formes et d'architectures différentes pour répondre aux besoins du cahier des charges. L'abondance de solutions à un problème donné est idéale pour se donner la possibilité d'avoir un résultat final de qualité même si cela ne garantit évidemment pas l'obtention d'une solution optimale. A l'inverse, partir sur un seul concept et le développer jusqu'au bout aura de grands risques d'aboutir à une solution peu optimale comme expliqué dans l'ouvrage de Ullman [1].

2.2. Quelques méthodes pour générer des concepts

Plusieurs méthodes et voies de travail sont connues pour favoriser l'émergence et la création de plusieurs idées de solutions. La plus connue et la plus usitée certainement de nos jours est la méthode du brainstorming consistant à faire travailler un groupe de personnes autour d'un thème et de sortir le plus d'idées possibles afin de créer des connexions et des liens logiques entre elles. Parmi les idées générées, il est crucial de ne porter aucun jugement sur celles-ci et de laisser libre court même aux idées improbables qui pourraient mener à des idées utiles. Une variante du brainstorming se nomme le brainwriting, ou méthode 6-3-5 [2], qui permet notamment une participation égale de tous les participants, contrairement au brainstorming qui peut voir émerger une domination de quelques membres. Travailler par analogies est également une bonne source d'inspiration, c'est-à-dire trouver des solutions qui sont déjà connues et remplissent des fonctions similaires. Ces analogies sont notamment la base des solutions bio-inspirées basées sur l'observation de la nature [3]. A l'opposé, réfléchir par contradictions (i.e. une pièce augmente sa résistance mais sa masse augmente également) peut aussi permettre de trouver des solutions à un problème donné. Une méthode nommée Evaporating Cloud [4] tire avantage de ces contradictions, son nom vient du fait qu'elle permet de faire disparaître ces contradictions à l'issue du processus. La méthode russe TRIZ (théorie de résolution des problèmes inventifs) [5] est aussi largement connue pour sa capacité à résoudre des problèmes techniques en

généralisant des solutions novatrices tout en se basant sur des points techniques déjà existants. Enfin, un ultime procédé de génération d'idées est la construction d'une morphologie (étude de la forme ou de la structure) : l'idée est ici de décomposer toutes les fonctions requises pour le produit, de créer beaucoup de concepts répondant à chaque fonction puis de combiner ces concepts individuels en de larges concepts regroupant toutes les fonctions.

Ces méthodes présentées très succinctement peuvent être appliquées dans n'importe quel type de projet visant à innover, et a fortiori, elles seraient aussi bien adaptées pour faire émerger des concepts de structures composites. La recherche de solutions techniques via ces méthodes ne permet pas néanmoins de statuer sur la viabilité des concepts par rapport à leur faisabilité. Pour que la méthodologie soit efficace, il faut dès lors disposer de connaissances minimales dans le domaine des composites afin d'évaluer efficacement la cohérence des concepts.

3. Les particularités de la conception des composites

3.1. Une approche structurale différente

A l'inverse des matériaux métalliques homogènes et isotropes dans une majorité des cas, les matériaux composites présentent des particularités structurales qui conduisent à des propriétés anisotropes et non-homogènes du matériau. Lorsque nous concevons un produit mécanique, nous pouvons raisonner de la manière suivante : le produit se doit de répondre aux fonctions définies tout en satisfaisant les contraintes extérieures appliquées au système. En d'autres termes, la géométrie de la pièce - et donc sa forme - doit s'intégrer dans le volume de conception limitant notamment l'encombrement et respecter les surfaces fonctionnelles, mais elle doit aussi supporter les contraintes mécaniques qui sont imposées par des sollicitations externes. Pour une pièce métallique, une approche couramment utilisée dorénavant est par exemple l'optimisation topologique [6] qui permet de déterminer la forme optimale - dans le sens d'un rapport volume/résistance minimal par exemple - d'une pièce à partir d'un bloc monolithique. Les géométries optimales obtenues sont ensuite post-traitées pour que la pièce puisse être usinée correctement. Si cette méthode peut s'avérer utile pour connaître les chemins d'efforts et orienter ainsi la conception de la pièce composite, le résultat topologique ne peut être utilisé en tant que tel pour une pièce composite. Cela est principalement dû au fait que les structures composites sont très dépendantes des procédés de fabrication et que leur géométrie ne peut donc s'adapter à ce qu'un résultat topologique pourrait proposer par défaut. De plus, il convient d'aborder plus en détails la notion d'*architecture composite* qui occupe une place centrale dans la méthodologie présentée dans cet article. Le terme *architecture* fait référence à la structure complexe et précisément conçue d'un objet ou de quelque chose. Appliquée aux structures composites, cette définition peut s'interpréter à différentes échelles et une représentation est donnée en Fig. 1.

A plus petite échelle, aux origines de la structure, il y a les matériaux constituant les fibres et la matrice, éventuellement les matériaux de l'âme pour une structure sandwich. A échelle intermédiaire, il y a les semi-produits constitués par les tissus, les préformes, parfois pré-imprégnées et qui peuvent être tissées, tressées, tricotées entre autres. Enfin la structure finale obtenue après le procédé de durcissement est caractérisée par un produit solide et fini. Il est ainsi possible de lister quelques technologies de structure composite telles que les stratifiés, les sandwich, les structures géodésiques. Même si le terme architecture renvoie à ces différentes notions, la méthodologie s'appuiera en grande partie sur la technologie finale avec des indications sur les semi-produits lorsqu'elle fera référence à l'architecture du composite. La question des matériaux est renvoyée à la problématique du dimensionnement de la structure, ce qui sort donc du champ d'application de la méthodologie.

3.2. Quelques cas d'études pour exemple

Avant de décrire la démarche de conception, nous proposons de nous intéresser très brièvement à deux cas d'études sur la conception d'une pièce en composite.

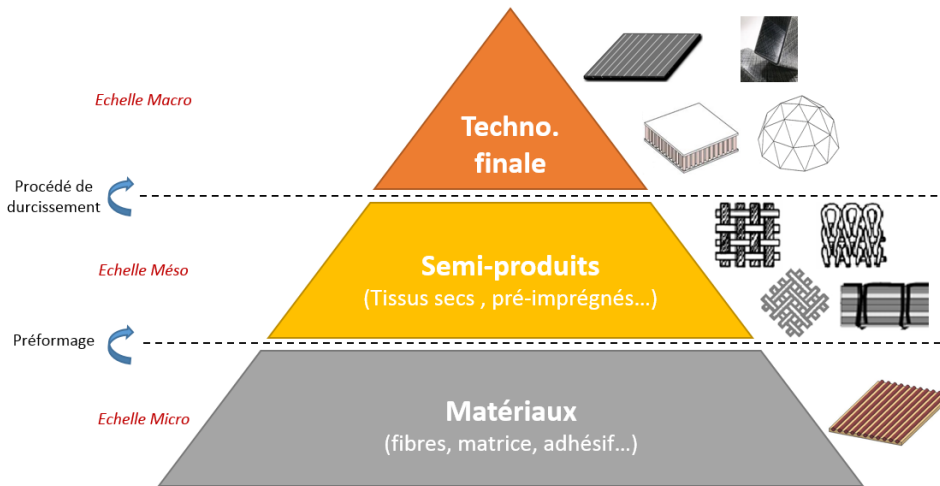


Fig. 1. Architecture d'une structure composite

Le premier cas d'étude concerne la conception du Starflex qui a été implémenté dans les rotors d'hélicoptères dans les années 1990. C'est un exemple concret de ce qu'apporte la reconception de pièces métalliques en composites : réduction de la masse de 50%, réduction de nombres de pièces de 80%, réduction d'opérations d'assemblages et donc réduction des coûts d'environ 50% pour cet exemple. Pour autant, cela ne signifie pas que passer du composite au métallique fonctionne dans tous les cas. Les pièces de structures complexes combinées aux facteurs de sécurité et aux procédés de fabrication potentiellement coûteux peuvent en effet parfois être dommageables pour le résultat final. Le cas du Starflex est néanmoins un très bon exemple des bénéfices que peut apporter la reconception d'un système en composites.

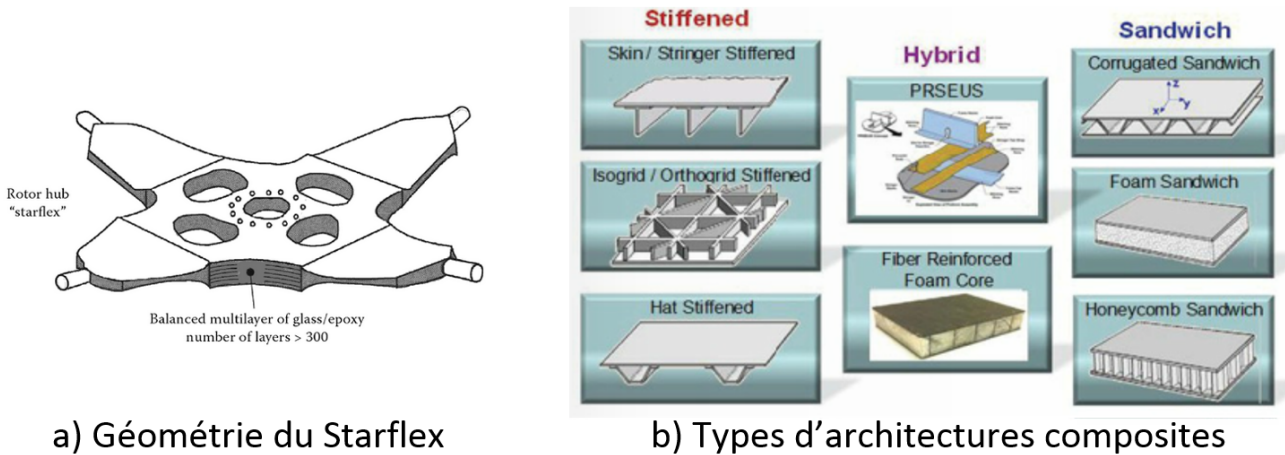


Fig. 2. Exemples du Starflex [7] et d'architectures composites proposées par la NASA [8]

Le deuxième cas a été traité par la NASA [8] et concerne le développement d'un étage de fusée contenant la charge utile. Dans ce cas d'étude, l'objectif est de comparer différentes types de technologies composites et cela met en évidence l'importance et l'abondance de solutions d'architectures lors de la conception des pièces en composite. Cet article éclaire en outre sur le processus de sélection des différentes solutions en introduisant des paramètres clés de performance (comme la masse, la tolérance aux dommages...) et en attribuant un facteur de mérite obtenu après évaluation et notation des paramètres clés. Cette méthode de sélection peut également très bien s'appliquer pour le choix des concepts en dernière étape de la méthodologie proposée dans cet article.

4. La méthodologie GAP

4.1. Philosophie et objectifs de la démarche

La méthodologie GAP (acronyme pour les attributs "Géométrie", "Architecture", "Procédés") est basée sur ce triptyque dont les attributs sont très inter-dépendants entre eux. Le cœur de la méthodologie repose donc sur cette interactivité des attributs qui sera explicitée dans la suite de cette partie.

Avant toute chose, il est essentiel de définir le cadre de cette méthodologie et ce qu'elle vise à apporter dans un processus généralisé de conception. Une schématisation simple de ce processus a été proposée par Ashby [9] (Fig. 3) : la méthodologie GAP s'inscrit tout particulièrement dans la phase de conception pour la création des concepts et vise à aborder la phase préliminaire avec une solide base de choix pour s'orienter vers les solutions les plus pertinentes par la suite.

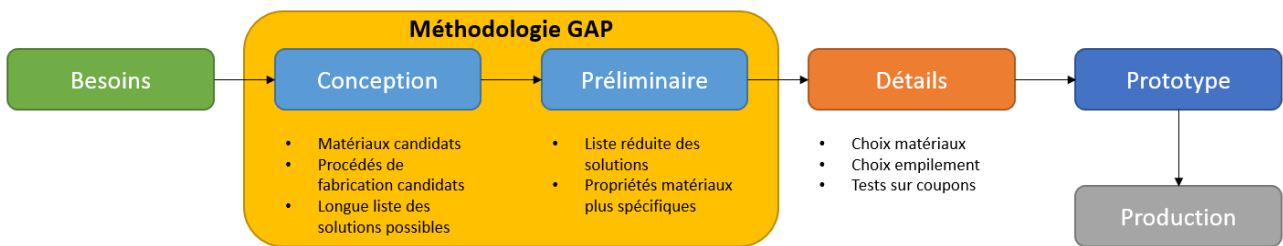


Fig. 3. Intégration de la méthodologie GAP dans le processus de création d'une pièce composite selon Ashby

Il a été vu dans les premières parties de l'article l'importance de disposer de plusieurs concepts et plusieurs "visions" pour répondre à un problème donné et il a été aussi vu que les solutions de matériaux, d'architectures et de procédés de fabrication conduisent à de nombreuses possibilités et par conséquent à un hyperchoix pour les concepteurs. L'idée directrice de la méthodologie est donc de fournir une démarche pour aboutir à un ensemble de concepts cohérents sur les trois points critiques identifiés : la géométrie, l'architecture et le procédé. La question du choix des matériaux reste secondaire à ce stade car cela pourra être statué à l'issue de la sélection des concepts pour la liste restreinte des solutions candidates pour débiter le dimensionnement des structures. La démarche de conception imaginée se réduit au final à trois principales étapes qui s'établissent dans l'ordre suivant :

1. Recherche de solutions géométriques
2. Ciblage des solutions géométriques
3. Boucles de conception sur les solutions choisies

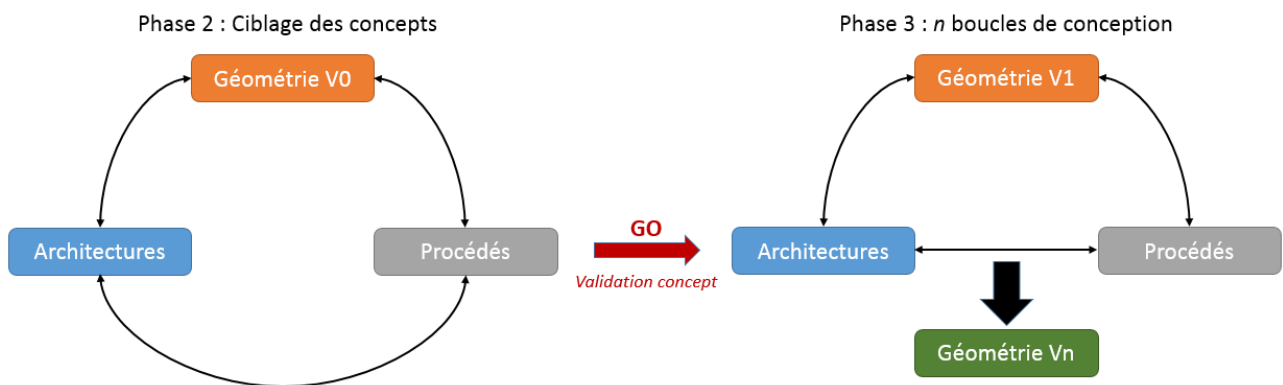


Fig. 4. Phases 2 et 3 de la méthodologie GAP

La Fig. 4 résume le raisonnement de la démarche et les boucles de conception nécessaires pour aboutir à la n-ième géométrie V_n . L'article se concentre sur les deux premières étapes uniquement

et celles-ci sont exposées dans la partie suivante. Les boucles de conception n'étant au final qu'un travail d'itération et d'optimisation qui conduira au modèle final de la pièce, il n'est pas jugé utile de les développer ici.

4.2. Génération et cohérence des concepts

Il est préférable de commencer par la géométrie de la pièce, c'est en effet cette étape qui fait intervenir le processus créatif des designers et est donc la plus à même de donner des résultats variés pour obtenir le plus large éventail de formes et de concepts. L'idée directrice est par conséquent de laisser libre court à l'imagination pour esquisser les premières ébauches sans se focaliser sur les spécificités des matériaux composites. Ces résultats peuvent donc être extravagants et irréalisables mais c'est une approche standard dans le cadre d'un brainstorming. A ce stade de la recherche de concepts, il pourrait être conseillé de réfléchir à des géométries pouvant s'intégrer dans l'une de ces trois catégories : poutre, plaque (coque), solide. Ces trois catégories sont en effet les trois grandes familles qui constituent la classification des formes selon les auteurs de la suite CES EduPack [10].

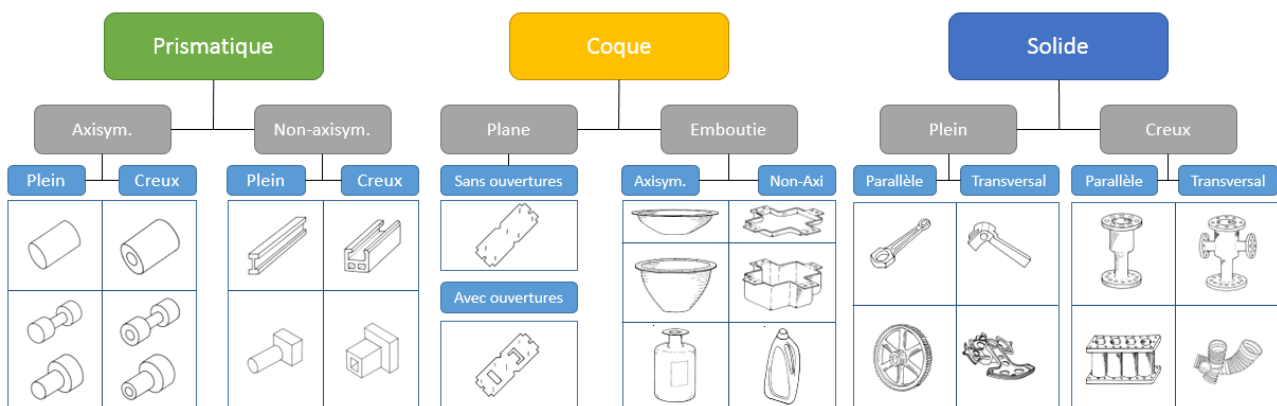


Fig. 5. Classification des formes selon CES EduPack

Cette classification fut à l'origine créée afin d'y faire des liens avec les géométries réalisables par les procédés de fabrication pour les pièces métalliques, elle s'avère néanmoins pertinente pour les procédés de fabrication des pièces en composites. Nous proposons de l'utiliser comme point de départ de la méthodologie puisque la nature des formes découle logiquement des premières géométries. A partir des formes, nous souhaitons définir quelles technologies et architectures peuvent correspondre à la géométrie dessinée. Cette étape tisse le premier lien logique et rationnel entre l'imaginaire du concept et la réalité du composite et participe à déterminer la faisabilité du concept proposé. Concernant les technologies composites, nous avons déterminé six grandes classes :

- stratifié mince ;
- stratifié épais ;
- sandwich ;
- géodésique ;
- 3D ;
- profilé.

Nous restons volontairement général dans le cadre de cet article pour les technologies et ne rentrons pas dans les détails des architectures, notamment sur la partie 3D qui pourrait être bien plus spécifique. Un tableau récapitulatif (non présenté dans cet article) listant les formes et les architectures peut servir de référence pour déterminer les relations liant les formes et les architectures. Le domaine des composites évoluant rapidement, ce tableau est aussi voué à être maintenu à jour lorsque des nouvelles technologies sont disponibles. La démarche proposée ici peut ainsi être enrichie par le concepteur qui

peut y intégrer de nouvelles technologies et architectures et faire lui-même les liens avec les formes accessibles.

Le même raisonnement est utilisé pour faire les liens entre les architectures et les procédés de fabrication. Là aussi, devant l'abondance des procédés déjà existants et de ceux qui voient et verront le jour, une veille technologique continue est essentielle pour disposer d'une liste exhaustive des procédés même s'il faut noter que certains nouveaux procédés sont parfois des variantes d'autres procédés (exemple du procédé RTM dans lequel coexistent le Light RTM, VA RTM, HP RTM, etc.). A l'aide de ces deux tableaux de correspondances, il est dès lors possible de sortir les généalogies pour chaque concept et d'avoir ainsi une représentation très claire des possibilités offertes par chaque concept. La Fig. 6 montre sur un cas générique comment naviguer de tableaux en tableaux jusqu'à pouvoir déterminer la généalogie des solutions d'architectures et de procédés envisageables pour chaque concept.

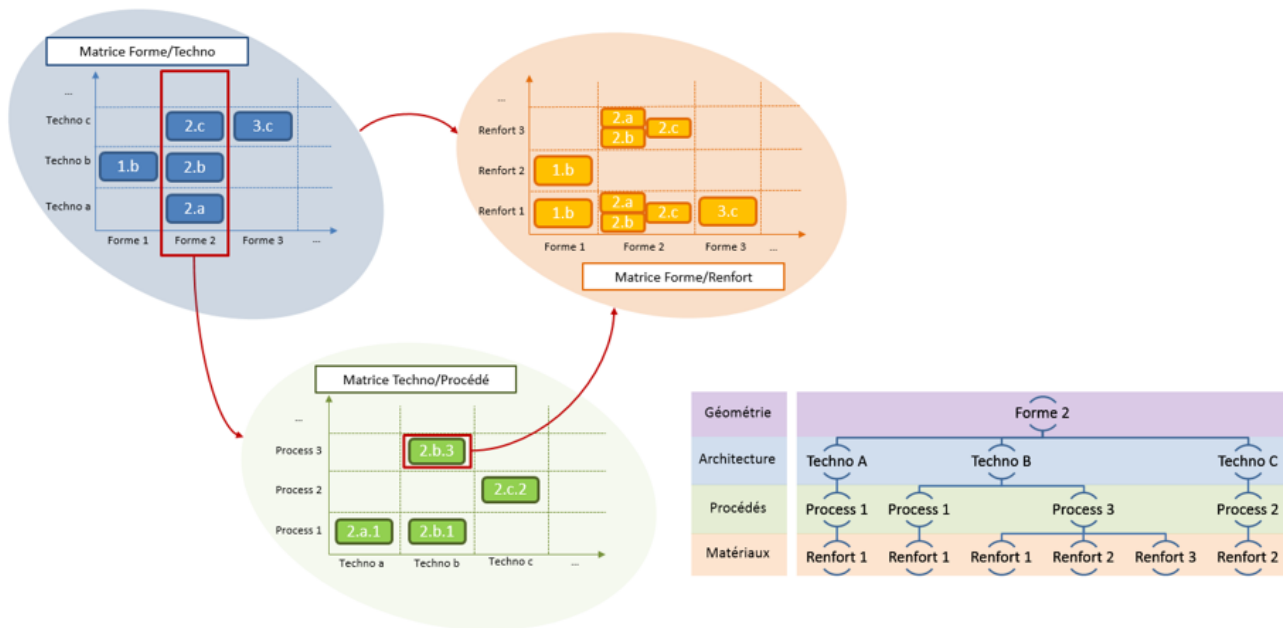


Fig. 6. a) Couplage des tableaux de correspondance b) Généalogie des solutions

Une possible intégration d'informations sur le matériau est incluse dans le processus. Le choix des matériaux est tellement vaste qu'il serait inutile de tous les lister et de les faire correspondre pour chaque procédé de fabrication. Pour intégrer cette problématique liée au matériau, nous proposons de faire les liens entre les types de renforts possibles (mats, tissus secs, UD, préimprégnés, fibres courtes) et les géométries. Chaque renfort a en effet un facteur de forme différent et certaines formes sont donc accessibles plus facilement pour un type de renfort donné.

Le concepteur détient désormais à sa disposition une vue d'ensemble explicite sur les concepts qui ont été proposés et la sélection des concepts candidats pour la boucle suivante de conception peut s'amorcer. Cette sélection peut se faire sur le modèle du projet de la NASA abordé plus haut dans l'article avec des pondérations de critères. Si les concepts ne sont pas assez matures pour noter correctement les critères de choix, d'autres itérations de design peuvent être envisagées pour faciliter cette étape de ciblage.

4.3. Application de la démarche sur un cas d'étude

Cette section se propose d'étudier à titre d'exemple un cas de conception d'une pièce composite tel qu'il pourrait survenir dans n'importe quel projet industriel. Le cas proposé ne se focalise pas

sur l'étude d'un produit ou d'un composant spécifique mais se veut en revanche très générique. Les données d'entrée du projet sont uniquement des surfaces fonctionnelles, c'est-à-dire que la géométrie des concepts doit impérativement coïncider sur ces surfaces. Les surfaces fonctionnelles pour ce cas d'études sont exposées dans la Fig. 7 ci-dessous. Afin de donner un ordre de grandeur sur la taille de la pièce composite à concevoir, précisons que les dimensions entre les coins sont de 700x400 mm.

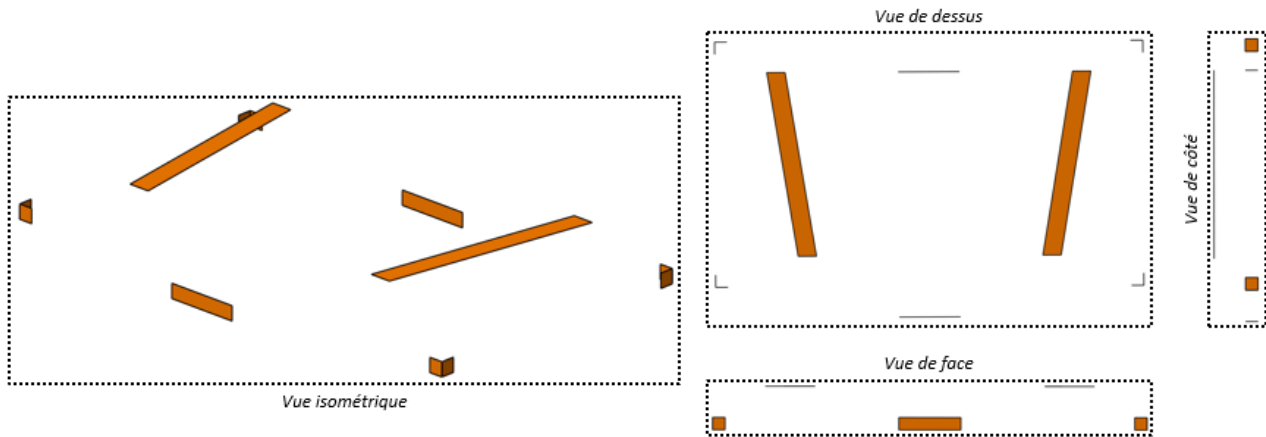


Fig. 7. Surfaces fonctionnelles de départ proposées

Les règles pour concevoir la structure sont simples, la géométrie doit impérativement coïncider avec les surfaces fonctionnelles et le volume de conception s'inscrit à l'intérieur des limites fixées par ces surfaces. La conception reste libre pour le reste et toutes les formes imaginables pour joindre ces surfaces peuvent donc être imaginées. Il n'y a pas de limite concernant le nombre de composants, c'est-à-dire que la structure peut très bien être imaginée en fabrication "one shot" ou par assemblage de plusieurs sous-parties. La génération des premiers concepts ne doit pas s'imposer de limites quant aux possibilités de fabrication, la phase suivante de ciblage pourra déterminer et évincer les géométries considérées comme difficilement ou non-fabricables. Pour illustrer la simplicité de la démarche, il a été demandé à des étudiants de niveau Master ayant eu environ 20 heures de cours sur les composites de réfléchir sur des design de structures à partir des surfaces fonctionnelles données en Fig. 7. Un aperçu des concepts imaginés en première instance est visible en Fig. 8 et Fig. 9 : il est intéressant de remarquer la diversité des architectures et des approches qui englobent les trois familles de formes définies précédemment. Une majorité de ces solutions tendent vers des solutions plaques, ce qui est compréhensible dans la mesure où les structures composites sont majoritairement orientées vers ces formes. Autre point notable, il n'y a qu'un seul concept "one shot" proposé et c'est pourtant le but principalement recherché dans une structure composite comme vu dans l'exemple du Starflex. Cela s'explique par le fait qu'il y a peu d'options possibles par rapport à la configuration donnée dans cet exemple.

Les concepts 7-a, 7-b et 7-c sont constitués en deux ou trois parties qui appartiennent à la famille "plaque". Le concept 7-d est quant à lui fabriqué en "one shot" avec une structure coque continue qui parvient à joindre toutes les surfaces fonctionnelles. Ces concepts ont chacun un bon potentiel de fabrication, plutôt adapté pour du RTM ou du moulage au contact ou sous vide.

Le concept 8-a combine une plaque plus épaisse, qui pourrait être une structure sandwich avec par-dessus une structure de type poutre en structure 3D. De même pour le concept 8-b, deux structures plutôt constituées de renforts 3D reposent l'une sur l'autre. Enfin le concept 8-c combine cinq poutres pultrudées liées entre elles par des lamelles en stratifié mince. Dans tous les cas, les technologies de jonctions entre les différentes parties doivent être définies et être prises en compte dans l'évaluation des concepts mais leur intégration n'est pas encadrée dans la méthodologie GAP.

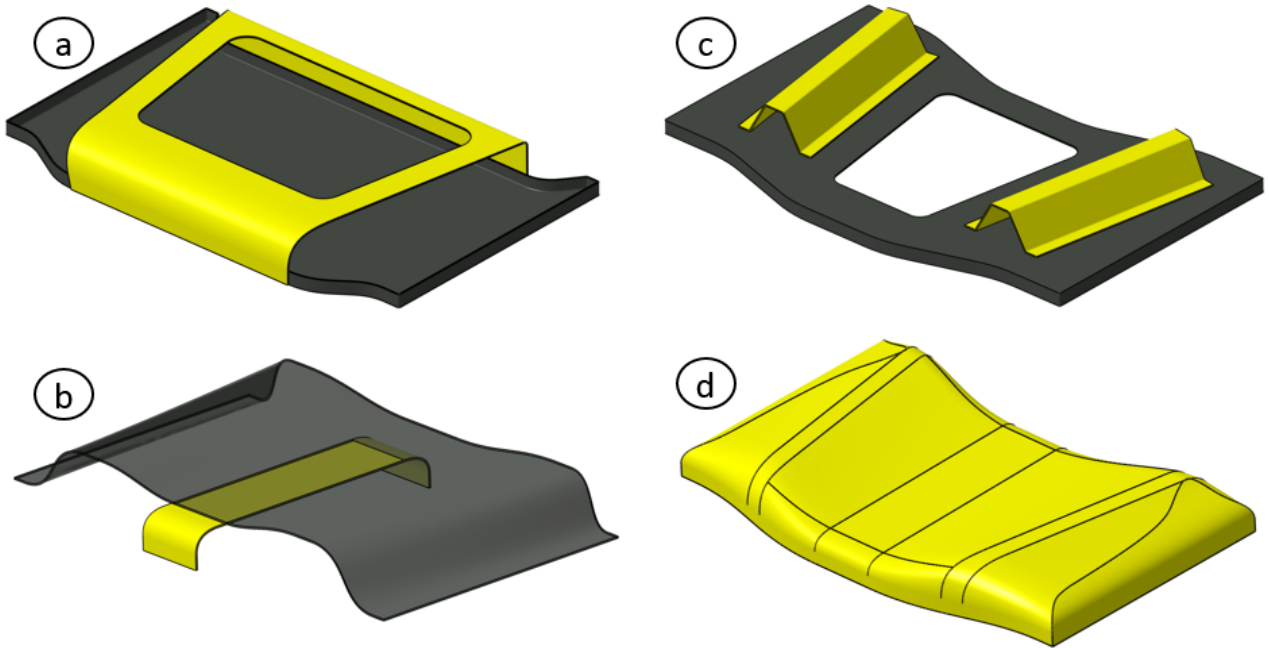


Fig. 8. Concepts à dominante plaque

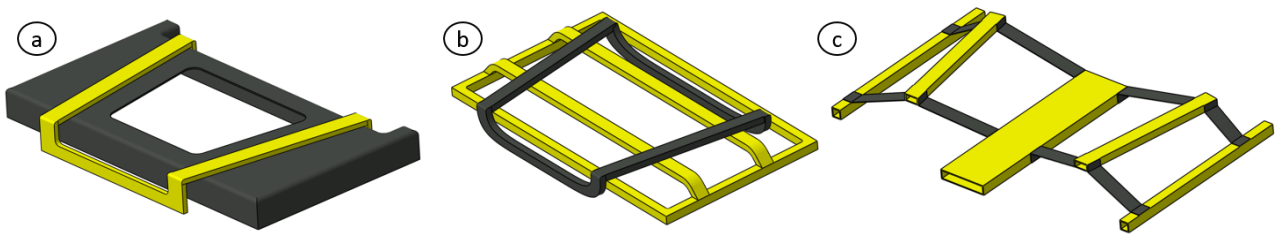


Fig. 9. Concepts incluant poutres et renforts 3D

Chaque analyse de concept permet de définir un arbre de technologie regroupant la géométrie, l'architecture et le procédé tel que présenté dans la figure ci-dessous. L'exemple est pris ici pour le concept "one shot" de la figure 7-d. Cette géométrie est entièrement constituée d'une structure coque qui peut être réalisée en stratifié mince. Les procédés de fabrication les plus adaptés pour ce type d'architecture sont le hand lay-up et le RTM, le spray lay-up si un choix de fibres courtes est envisagé par la suite. Les types de renforts possibles ont été aussi listés pour plus de précisions car les procédés ne sont pas forcément compatibles avec tous les types de renforts que l'on peut trouver.

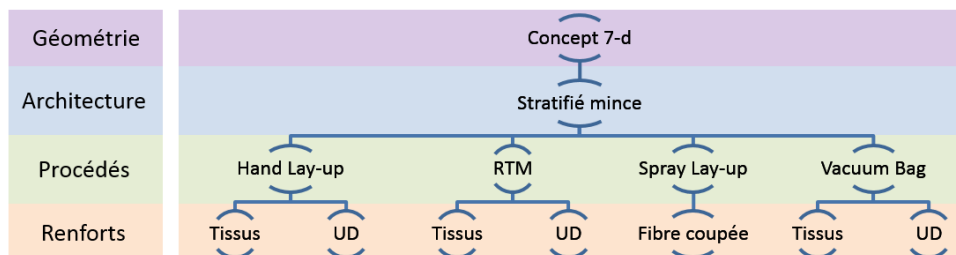


Fig. 10. Généalogie des solutions possibles pour le concept 7-d

Ce résumé technologique est à effectuer pour chaque concept proposé et, suivant les critères d'importance définis en amont du projet, l'évaluation et la sélection des concepts peut s'effectuer. L'exemple applicatif présenté dans cette partie s'arrête ici.

5. Conclusion

La méthodologie GAP présentée dans cet article fournit une approche de conception pour celui qui désire concevoir ou reconcevoir une pièce en matériau composite. Cette démarche structurée se révèle nécessaire tant les structures composites et leur mise en œuvre sont diversifiées. Il a été montré que le processus créatif de conception est le point de départ de la démarche et qu'il doit permettre de générer suffisamment de concepts aux formes différentes pour envisager un maximum de solutions possibles. À partir de là, la méthodologie apporte des outils pour générer des concepts ayant des caractéristiques cohérentes entre leur géométrie, leur architecture et leur procédé de fabrication et peut même apporter des premières indications sur les renforts à utiliser. L'approche proposée dans cet article se veut simple à appliquer et s'intègre parfaitement dans les premières boucles de conception afin d'apporter des idées de structures composites cohérentes. S'il est possible et recommandé d'être très créatif dans la géométrie des concepts, il est néanmoins nécessaire de disposer de connaissances préalables sur les matériaux composites et leur procédé de fabrication pour pouvoir déterminer les bonnes correspondances afin de progresser dans le processus de sélection des concepts.

Références

- [1] D. G. Ullman, *The Mechanical design process* Fourth Edition, McGraw-Hill, 2010.
- [2] C. Wilson, *Brainstorming and Beyond : A User-Centered Design Method*, Morgan Kaufmann, 2013.
- [3] M. S. Aziz, A. Y. El sherif « Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation », *Alexandria Engineering Journal* Vol. 55, pp. 707–714, 2016.
- [4] J. Lu « The Conflict Resolution in Product Experience Design Based on Evaporating Cloud of the Theory of Constraints », *Lecture Notes in Computer Science* Vol. 9186, pp. 53–62, 2015.
- [5] L. Chechurin, Y. Borgianni « Understanding TRIZ through the review of top cited publications », *Computers in Industry* Vol. 82, pp. 119–134, 2016.
- [6] K. D. Tsavdaridis, J. J. Kingman, V. V. Toropov « Application of structural topology optimisation to perforated steel beams », *Computers and Structures* Vol. 158, pp. 108–123, 2015.
- [7] D. Gay, *Composite Materials, design and applications*, CRC Press, 2015.
- [8] T. M. Krivanek, B. C. Yount « Composite payload fairing structural architecture assessment and selection », *Sampe Journal* Vol. 48 n° 4, pp. 40–48, 2012.
- [9] M. Ashby, K. Johnson, *Materials and design ; the art and science of material selection in product design*, Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002.
- [10] Granta Design « http://www.grantadesign.com/education/InDepth/html/indepth/shapeinfo/shape_classification.htm », 2017.