

# Application d'une méthodologie d'optimisation d'empilement sur structure stratifiée en environnement industriel

## *Stacking sequence optimization methodology application on a laminate structure in an industrial environment*

William Albouy<sup>1</sup>, David Dumas<sup>2</sup>, Samih Zein<sup>2</sup> et Michael Leborgne<sup>2</sup>

1 : Safran Tech, plateforme Composites  
76 avenue de la gare 91760 Itteville  
e-mail : william.albouy@safrangroup.com

2 : CENAERO  
Centre de Recherche en Aéronautique  
Rue des Frères Wright 29, 6041 Charleroi  
e-mail : david.dumas@cenaero.be

### Résumé

Dans l'objectif d'améliorer les temps de conception et d'utiliser pleinement les opportunités du procédé AFP, une chaîne d'optimisation d'empilement a été développée en collaboration avec CENAERO. Par la suite, cette chaîne a été appliquée sur différentes applications industrielles en prenant en compte des critères cohérents des méthodologies classiquement utilisées par SAFRAN pour dimensionner ses structures. L'application de cette chaîne d'optimisation a permis d'explorer le domaine de conception en modifiant différentes hypothèses du problème comme le nombre de zone, le nombre d'orientations utilisées ou encore la fonction « objectif » du problème. Ces travaux sont encore en cours dans le but d'améliorer l'efficacité et la capacité de la chaîne à trouver des solutions permettant d'être cohérent des contraintes mécaniques mais aussi de fabrication, spécifique à l'AFP.

### Abstract

In the frame of improving the design and conception cycles and fully use the opportunities of the AFP process, a stacking optimization chain has been developed in collaboration with CENAERO. This chain was applied on different industrial testcases taking in account criterias, in line with SAFRAN design methodologies. The structures can be optimized classically with a mass objective but also with a manufacturing cost objective. The use of this optimization chain has allowed to explore the conception domain, modifying parameters as an input of the chain, for example, the zone number, number of orientations or the problem cost function. This work is still undergoing to improve efficiency and ability to obtain solutions fulfilling mechanical criterias as well as manufacturing constraints for the AFP process.

**Mots Clés :** optimisation, méta-modélisation, empilement, dimensionnement, structure

**Keywords :** optimization, surrogate-model, stacking sequence, mechanical design, structure

## 1. Introduction

La problématique de l'optimisation de structure stratifiée avec séquences d'empilements est largement abordée dans la littérature scientifique [1]. Des différences entre les méthodologies peuvent apparaître à différents niveaux :

- Le type de paramètres à optimiser peut-être de différentes natures. Par exemple, on distinguera les paramètres discrets comme le nombre de plis par orientation et des paramètres continus comme les paramètres de stratifications [2] ou le pourcentage de plis par orientation [3]. Pour la présente étude, les variables de conception sont le nombre de plis par zone et par angle d'orientation de fibres de carbone. Toutes les variables sont de type entier et sont associées aux séquences d'empilement à définir.
- Le type d'algorithme utilisé dépend grandement du type de paramètres du problème : on pourra citer les méthodes de type « Blind search », les algorithmes heuristiques représentés par les

méthodes de type « Gradient » et les algorithmes « Meta-heuristique représenté par les algorithmes évolutionnaires. Pour la présente étude, la méthode d'optimisation utilisée est une méthode de type méta-heuristique avec un algorithme génétique assistée par métamodèles. Chaque sortie est représentée par un métamodèle et chaque itération de l'optimisation est l'optimum trouvé par un algorithme génétique utilisant les métamodèles.

- Le type de fonction objectif utilisé peut être de différentes natures [1]. On retrouve en majorité des fonctions objectif sur la minimisation de la masse [2][7] ou la maximisation ou minimisation de réponse d'ordre mécanique (raideur ou souplesse [8], flambage [3][9], contraintes, déflexion, valeurs propres [4], ...) mais aussi le coût de fabrication en fonction du procédé utilisé. En fonction des cas, le problème d'optimisation peut avoir plusieurs objectifs. Dans ce cas, le résultat de l'optimisation sera un front de Pareto.
- Les contraintes qui définissent les limites ou conditions que les solutions doivent respecter pour être considérées comme admissibles. Chaque algorithme d'optimisation pourra intégrer des méthodes spécifiques pour traiter ces contraintes. Pour les algorithmes génétiques, on retrouve les méthodes de pénalités, où les solutions violant les contraintes subissent une réduction de leur aptitude (fitness), les approches basées sur des réparations, ou encore les techniques basées sur des filtres [10]. Le choix de la méthode dépend souvent de la nature du problème, de la complexité des contraintes et de l'équilibre recherché entre exploration et exploitation dans l'espace des solutions.

De plus, l'avènement de l'IA a permis d'amplifier les recherches dans ce domaine avec des approches toujours plus innovantes dans le but de gagner en efficacité [8]. Dans la littérature, certaines méthodologies ont déjà été testées dans un environnement industriel sur des pièces structurelles de type aéronautique [1][7]. Dans ces travaux, nous allons présenter l'application d'une chaîne numérique d'optimisation adaptée aux méthodologies de dimensionnement industriels de SAFRAN.

## **2. Présentation de la chaîne d'optimisation et de ses outils**

### **2.1 MINAMO**

Minamo est une plateforme d'optimisation développé par CENAERO. C'est un logiciel qui possède une Interface Homme machine (IHM) qui permet de gérer un projet d'optimisation complet, de la définition de la spécification au post-processing en passant bien évidemment par l'évaluation. Il permet de définir l'ensemble d'un projet d'optimisation à savoir la paramétrisation du problème, la définition de l'objectif (fonction coût) et des contraintes (fonctions pénalité), ainsi que la gestion du séquençage de la chaîne (actions ou commande à lancer à la suite les unes des autres). En plus de cela, Minamo intègre plusieurs algorithmes afin de gérer les différentes étapes de l'optimisation – Design of Experiments, méta-modélisation des résultats et optimisation via algorithme génétique sur les réponses des métamodèles et enfin enrichissement de la population par des individus d'exploration. L'outil communique avec le reste de la chaîne via des fichiers input donnant la paramétrisation proposée et des fichiers outputs renvoyant les résultats (contraintes et objectifs) renvoyés par la chaîne. L'ensemble des résultats concaténés ressort sous la forme de fichier « .json » de type base de données formatée.

### **2.2 COSSMO**

#### **2.2.1 Génération d'empilements**

COSSMO est un générateur d'empilement qui est en cours de développement chez CENAERO. L'outil a fortement évolué en deux ans au cours de la collaboration entre SAFRAN et CENAERO et les différents cas d'applications qui ont été traités. COSSMO est un outil basé sur du code C++, qui a pour but de générer des empilements sur base d'un ensemble de règles de fabrication prédéfinies ou codées par l'utilisateur. La recherche des séquences d'empilement se fait par programmation par

contraintes. En résumé, la recherche des séquences admissibles se fait en construisant un arbre d'énumération et en éliminant toutes les branches qui correspondent à des parties de séquences inadmissibles [9].

Prenons l'exemple d'une génération successive d'orientations « -45 0 45 90 » et la règle ne permettant pas plus de 45° d'angles entre les plis. Cela donne l'arbre de la Figure 1-a. Pour un premier pli déposé à -45°, on autorisera les orientations -45, 0 et 90, mais pas 45° car l'angle est supérieur à 45° entre les deux plis. Cette branche disparaît donc pour la suite de la génération.

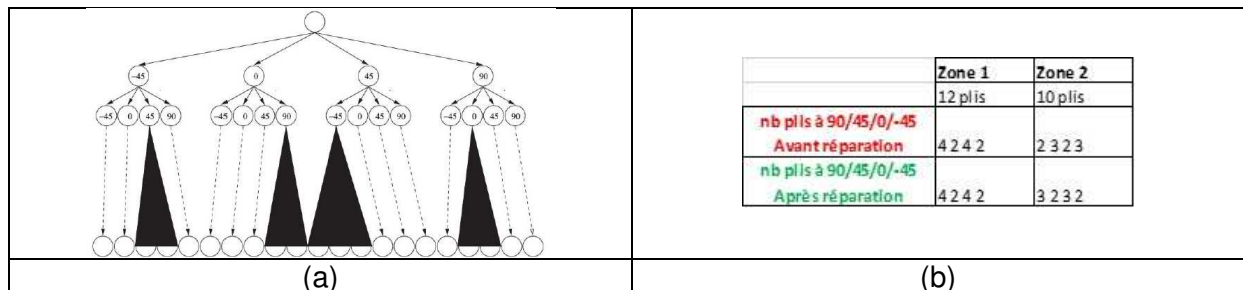


Figure 1 : Arbre de connexion à la base du principe de COSSMO [9] et exemple de réparation de solutions

La première solution trouvée respectant les règles fixées sera la solution retenue. COSSMO permet de traiter et générer des empilements avec plus d'orientations que les classiques 0/90/45/-45.

### 2.2.2 Réparation d'empilement - Règles de continuité des plis

Les règles de continuité des plis entre les zones imposent des contraintes sur les paramètres d'optimisation. Si deux zones adjacentes A et B sont telles que A est plus épaisse que B alors tous les paramètres associés à la zone A doivent être supérieurs à celles associées à B pour assurer la continuité des plis entre A et B. Ces contraintes ne sont pas intégrées à Minamo. Pour chaque point proposé par Minamo, si ces paramètres ne respectent pas ces contraintes de continuité des plis alors il est réparé en le remplaçant par le point admissible le plus proche au point initial. Un exemple est donné sur la Figure 1-b pour deux zones.

Lorsque la génération et/ou la réparation a été effectuée avec succès, COSSMO permet de réaliser une reconstruction de l'empilement par une phase de Mapping sur chaque zone de la structure, puis un export de cette solution dans un langage Eléments Finis (Samcef, Abaqus ou Nastran).

## 2.3 Présentation de la chaîne d'optimisation

Cette étude utilisera une chaîne d'optimisation intégrant différents critères et méthodologies utilisés chez SAFRAN permettant de dimensionner des structures stratifiées. Cette chaîne est constituée de plusieurs outils :

- Minamo est la plateforme d'optimisation et réalise l'ordonnancement des actions (développé par CENAERO)
- COSSMO est un générateur de séquences d'empilement (développé par CENAERO)
- Un code Eléments Finis commercial (Samcef, Abaqus, Nastran, ...) pour réaliser l'évaluation mécanique sur différents cas de charge
- Un outil de post-traitement, basé sur les APIs C++ des codes Eléments finis permettant d'extraire la donnée désirée (contraintes, déformations, force, déplacement, masse ...) en vue d'évaluer des critères de dimensionnement choisis au préalable.

La Figure 2 décrit l'enchaînement de ces outils à chaque itération de la chaîne.

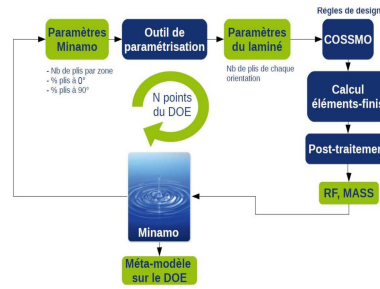


Figure 2 : Schéma de la chaîne d'optimisation MINAMO/COSSMO

La méthode d'optimisation est du type Surrogate Based Optimisation (SBO). Cette méthode consiste à construire un métamodèle de chaque sortie du code éléments finis en fonction des variables de conception. Un Design of Experiments (DoE) est d'abord généré grâce à un algorithme d'échantillonnage du type LCVT (Latin Centroidal Voronoi Tessellation). Le DoE est un ensemble de points répartis dans l'espace de conception. Chaque point de cet ensemble est à évaluer. L'évaluation passe par les étapes suivantes.

1. Le point proposé est remplacé par un autre point proche qui lui satisfait les règles de continuité des plis.
2. Les séquences d'empilement qui satisfont les règles de conception sont générées basés sur le point du DoE à évaluer.
3. Les calculs éléments finis associés à ce point sont lancés.
4. Le post-traitement est effectué pour extraire les résultats pour les passer à l'optimiseur.

Remarque : les étapes 1 et 2 peuvent échouer à générer des séquences admissibles et dans ce cas, les étapes suivantes ne sont pas poursuivies.

Une fois que le métamodèle est construit, l'algorithme d'optimisation est lancé. A chaque itération, un algorithme génétique est utilisé pour trouver l'optimum au sens des méta-modèles. Les réponses (sans erreurs d'approximation) de cet optimum sont évaluées avec le code éléments finis, après réparation et génération de séquences d'empilement. Ce point est ajouté au DoE et le métamodèle est reconstruit avec ce nouveau point ajouté. L'algorithme d'optimisation s'arrête après un nombre maximum d'itérations.

### 3 Déroulement de l'étude

#### 3.1 Hypothèses et input de la chaîne

La chaîne, telle que présentée ici, a été imaginée pour fonctionner avec des modélisations de structures à optimiser de type shell. Dans les modèles Eléments Finis d'autres type d'éléments peuvent être utilisés, mais nativement sans modification profonde, la structure optimisée se doit d'être en éléments de type coque 2D.

Le premier input à cette chaîne est de proposer une segmentation de la structure en différentes zones d'empilement. Cette cartographie de zones va permettre de définir la connectivité des zones entre elles, afin de fournir cette information à COSSMO dans le but de générer des solutions faisables. Pour la partie génération, il faut ensuite choisir les orientations que l'on souhaite générer, ainsi que les règles d'empilement qui devront être respectées. Pour la partie optimisation, il faudra décrire le problème, via la paramétrisation (nombre de plis par orientation et par zone), l'objectif (masse/coût, ...) et les contraintes du problème (critère mécanique, critère d'épaisseurs, critère fréquentiel, ...).

#### 3.2 Contraintes de l'optimisation

Dans le cadre de la chaîne, un nombre indéterminé de réponses peuvent être défini. Dans le but d'être cohérent des pratiques de dimensionnement SAFRAN, la chaîne est capable de traiter une majorité des réponses qui est prise en compte lors des étapes de conception des structures stratifiées. Ces

réponses peuvent être seulement observées (monitoring) au cours de l'optimisation ou peuvent être traitées comme des contraintes du problème. Dans ce cas, on associe à ces contraintes des valeurs seuils (minimale ou maximale), qui seront à respecter pour déterminer un optimal au cours de l'optimisation. On citera les critères de rupture mécanique d'un pli composite, coefficient de flambage de la structure, critère de matage ou de pull-through des fixations, des déplacements locaux de la structure (pouvant être relié d'une certaine façon à la souplesse de la structure), la masse, un coût associé à un empilement (via une fonction annexe – cf. 3.4) ou encore le nombre de plis total de la zone à optimiser.

### 3.3 Différents cas testés

Cette chaîne d'optimisation a été utilisée sur différentes structures stratifiées produites par le groupe SAFRAN. Dans cette optique, plusieurs optimisations en modifiant les hypothèses (nombre de cas de charges, nombre d'orientations, modification de règles de drapage et du nombre de zones) ont été proposées dans le but de comparer entre elles les solutions et les gains potentiels. De plus, l'aspect exploratoire de la méthode (méta-modélisation) mis en œuvre permet d'avoir une grande richesse dans l'exploitation et la lecture des résultats de ceux-ci.

### 3.4 Utilisation d'une fonction objectif - « Coût de fabrication »

Différemment de ce qui est généralement fait (optimisation en masse), la chaîne donne la possibilité d'optimiser le coût de fabrication (orienté AFP). Ce coût de fabrication prend en compte :

- Le coût matière, directement relié au nombre de plis
- Le coût de drapage, directement lié au temps de dépose et de la capacité du robot à déposer dans des zones singulières
- Le coût de contrôle opérateur par rapport au contrôle à chaque fin de dépose d'un pli

La spécificité de cette approche réside dans l'ajout d'une notion de coût de drapage, ainsi chaque orientation à draper n'aurait pas le même coût. Ainsi, en voulant minimiser ce coût, certaines orientations seront préférentiellement choisies en raison d'un coût moindre. Le postulat est de se baser sur les performances théoriques d'une machine AFP (phase d'accélération et de décélération en fonction de la longueur à déposer), combinés aux données expérimentales obtenues, afin d'en tirer une fonction coût de fabrication. Cette fonction sera définie pour la zone voile, c'est-à-dire la zone courante de la structure. Cenaero a développé un outil pour simuler les trajectoires prises par la tête du robot pour simuler la dépose de bandes de fibres sur la structure. Dans la Figure 3-a, chaque bande de fibres déposée est calculée et représentée par une couleur différente. La méthode utilisée suppose que les bandes ne se chevauchent pas et qu'il n'y a pas d'espace vide entre elles. Le temps de dépose total est calculé en intégrant la fonction vitesse de la tête du robot le long de chaque bande calculée.

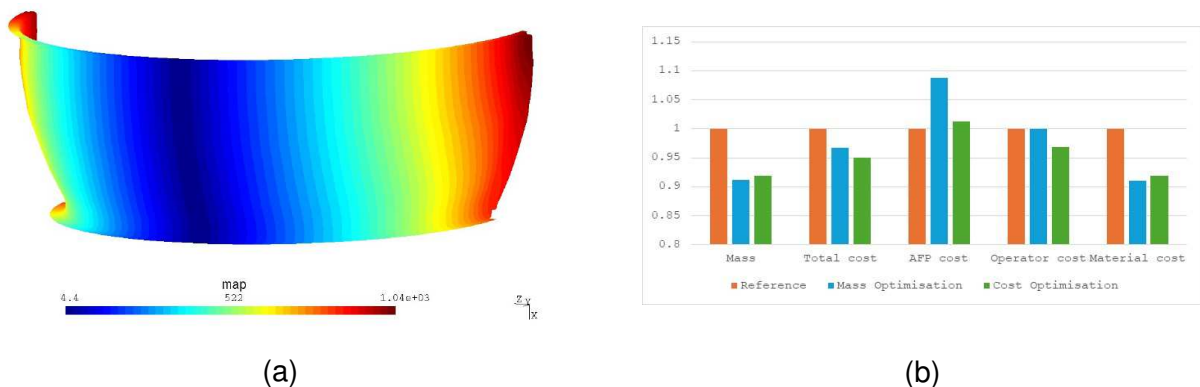


Figure 3 : Illustration des distances pour un pli à 0° sur une application Pièce moteur (a) et Comparaison des gains en masse et en coût de fabrication entre une référence et des solutions optimisée en coût ou masse (b)

Ensuite, en fonction de la géométrie de la pièce, on décidera d'appliquer une pénalité forfaitaire pour tenir compte de l'accident géométrique (par exemple une bride), plus difficile et long à draper. Ce coût de drapage s'appuie sur une définition géométrie des distances à draper et de l'emplacement des zones singulières. L'ensemble de cette fonction a été mis en relation avec des données de fabrication sur pièce structurelle pour être cohérente de la réalité. La comparaison de la méthodologie d'optimisation sur base du critère de masse et du critère de coût a été faite (cf. Figure 3-b) en partant d'une configuration de référence faisable non optimisée (qui satisfait l'ensemble des contraintes). Le processus d'optimisation aboutit sur deux solutions distinctes que l'on peut comparer via le graphe ci-dessous et qui met en évidence le gain maximum en masse trouvé dans la première approche (en bleu) à comparer avec une diminution de 1 % du gain de masse en permettant de réduire le coût de production de la pièce de 2 % (en vert) tenant compte des hypothèses du modèle de coût.

#### 4 Conclusions et perspectives

En définitive, Safran et CENAERO ont travaillé en collaboration pour mettre en place une chaîne d'optimisation de structure stratifiés, compatibles des méthodologies de dimensionnement de ces structures chez SAFRAN. Cette chaîne est basée sur une approche SBO, à partir du couplage d'outils, une plateforme d'optimisation, un générateur d'empilement et un code EF. Cette chaîne a été appliquée sur différentes applications SAFRAN dans plusieurs configurations en modifiant des paramètres d'entrées de la chaîne comme le nombre de zones à optimiser, le nombre de cas de charge, le nombre d'orientations à envisager dans les empilements. Concernant, la fonction d'optimisation, il a été proposé une fonction « objectif » prenant en compte le coût de fabrication de la structure, en particulier le coût de drapage, ayant pour conséquence de favoriser les orientations les moins coûteuses, tout en vérifiant les propriétés mécaniques. Dans une vision plus lointaine, les perspectives d'évolution de la chaîne sont de pouvoir intégrer à l'optimisation, la définition de la géométrie et l'emplacement des zones à optimiser, d'appliquer la méthodologie sur des structures sandwich, ainsi que d'intégrer au plus tôt dans la phase de dimensionnement des règles de fabricabilité compatible du procédé AFP.

#### Références

- [1] S. Nikbakht, S. Kamarian, M. Shakeri «A review on optimization of composite structures Part I : laminated composites » Composites Structures 195, pp 158-185, 2018
- [2] F.X. Irisarri, T. Macquart, C. Julien, D. Espinassou « A novel design method for the fast and cost-effective manufacture of composite parts employing the Quilted Stratum Process » Composites PartB, 2019, 158, pp.364-372
- [3] R. Wei, G. Pan, J. Jiang, K. Shen, D. Lyu « An efficient approach for stacking sequence optimization of symmetrical laminated composite cylindrical shells based on a genetic algorithm » Thin-walled Structures 142, pp160-170, 2019
- [4] Z. Jing, Q. Sun, Y. Zhang, K. Liang, X. Li « Stacking sequence optimization of composite cylindrical panels by sequential permutation search and Raileigh-Ritz method » European Journal of Mechanics / Solids 2021
- [5] Zein S., Madhavan V. , Dumas D., A Repair Operator for the Preliminary Design of a Composite Structure Using Genetic Algorithms » , Structural and Multidisciplinary Optimisation, Vol. 55, Issue 6 (2017).
- [6] Zein S., Madhavan V. , Dumas D., Ravier L., Yague I., From Stacking Sequences To Ply Layouts: an Algorithm to Design Manufacturable » Composite Structures , Vol. 141, 1 pp. 32–38 (2016).
- [7] C. Julien, F.X. Irisarri, D. Bettebghor, F. Lavelle, K. Mathis : « Optimisation of sandwich composite structures for spatial application » , JEC Composites Magazine JEC Group, 2017, 112, pp.51-53
- [8] S. Shonkwiler, X. Li, R. Fenrich, S. McMains « Deep reinforcement learning for stacking sequence optimization of composite laminates” : Manufacturing Letters 355, pp 1203-1213, 2023
- [9] S. Zein, P. Basso and S. Grihon, A Constraint Satisfaction Programming Approach For Computing Manufacturable Stacking Sequences, Computers and Structures, Vol 136, pp 56-63 (2014) .
- [10] Coello, C. A. C., Treating Constraints As Objectives For Single-objective Evolutionary Optimization, Engineering Optimization, 32(3), pp. 275–308 (2000).