

Optimisation multi-échelle des structures à matériaux composites tissés 2D/3D

JP Berro¹, F-X. Irisarri², K. Throal Pierre³, H. Shakourzadeh¹

¹HyperWorks, Altair Engineering France, Antony, jpbramirez@altair.com, hossein@altair.com

²ONERA – The French Aerospace Lab, Châtillon, francois-xavier.irisarri@onera.fr

³CEDREM, Neung sur Beuvron, ktp@cedrem.fr

Résumé — Pour l'industrie automobile, la réduction de la masse constitue un levier majeur pour accroître l'efficacité énergétique des véhicules. Une méthode d'optimisation où le matériau et la structure peut être optimisé simultanément est proposé dans le cadre du projet COMPANIS-3D. En utilisant une démarche multi-échelle et des méthodes de homogénéisation, la méthode nous permet d'aller depuis les caractéristiques microscopiques des constituants et mésoscopiques (architecture des tissus) vers les propriétés macroscopiques qui seront utilisés dans les calculs EF.

Mots clefs — Optimisation, Multi-échelle, Composites

1. Introduction

On assiste aujourd'hui à une généralisation de l'utilisation des matériaux composites dans des nombreux domaines autres que l'aérospatiale. Les nouvelles normes environnementales imposent une réduction drastique des émissions de gaz à effet serre. Ces normes ont poussé les constructeurs, soit du domaine aérospatiale, soit du domaine automobile à développer des méthodes pour réduire ces émissions. Un des facteurs avec plus d'influence sur l'émission de gaz à effet serre est la réduction de masse, notamment dans le cas où la technologie propulsive reste inchangée. Dans cette situation, les matériaux composites s'avèrent comme une bonne solution grâce aux excellentes propriétés spécifiques. On trouve quelques exemples de l'utilisation des matériaux composites pour des applications automobile [1] où une structure typiquement métallique est redésignée pour être fabriquée avec des composites tissés bidimensionnelles. Ce type de matériaux intervient de plus en plus en pièces à géométrie complexe et fortement chargées comme les aubes des turbines [2] pour lesquels des nouvelles architectures sont développées. Dans ces dernières années, l'apparition des tissus 3D où l'anisotropie du composite est utilisée dans les 3 directions de l'espace a ouvert un nouveau champ d'application pour ce type de matériaux. Ces derniers présentent aussi des mécanismes et cinétiques d'endommagement différents aux composites 2D [3-4], comme une meilleure résistance aux impacts grâce à sa tenue au délaminage. Des nouvelles démarches de conception ont apparues dans le but d'atteindre cette diminution de masse, où l'utilisation de l'optimisation dès les premières phases du design permet de raccourcir les temps de développement du produit. Ces optimisations ne touchent qu'au matériau (en choisissant parmi ceux disponibles) ou à la structure. L'arrivée des composites tissés (2D/3D) permet d'envisager une méthode où le matériau lui-même puisse être optimisé en agissant sur la nature des constituants ainsi que sur l'architecture du tissu. Dans ce papier nous présentons une méthode d'optimisation où la structure et le matériau sont optimisés au même temps, grâce à l'utilisation de démarches multi-échelles.

2. Homogénéisation des tissus 2D et 3D

Les composites sont des matériaux intrinsèquement multi-échelles. Le diamètre d'une fibre de carbone ou de verre est typiquement de l'ordre du micromètre, tandis qu'une structure composite industrielle a une taille de l'ordre du mètre. Il est aujourd'hui impossible de modéliser une structure composite directement à l'échelle de ses constituants. Ce problème est généralement abordé par le biais de la modélisation multi-échelle avec l'usage de méthodes d'homogénéisation. Leur objectif consiste à

déterminer, à partir du comportement à l'échelle inférieure, le comportement homogénéisé du matériau à l'échelle supérieure sans avoir à prendre en compte tous les détails de l'échelle inférieure. La région représentée en détails à l'échelle inférieure doit constituer un Volume Élémentaire Représentatif (VER). Le volume élémentaire représentatif (VER) correspond à une partie de la microstructure d'un composite (i) pouvant être répété par périodicité pour reconstituer l'ensemble de l'architecture du matériau composite et (ii) permettant de prévoir correctement le comportement global du matériau. Le deuxième point est le plus important. Effectivement, sous certaines conditions, le VER peut être simplifié de façon à ne pas représenter exactement la géométrie du matériau, mais une structure équivalente présentant le même comportement mécanique. On parle de VER mécanique par opposition au VER géométrique. Dans le cas des composites tissés, le VER géométrique est basé sur la cellule élémentaire de tissage. En particulier, certains travaux suggèrent que le VER mécanique pour les composites tissés est le plus souvent de taille inférieure à la cellule élémentaire de tissage [5].

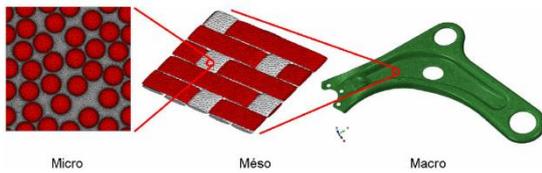


Figure 1 - Transition d'échelle.

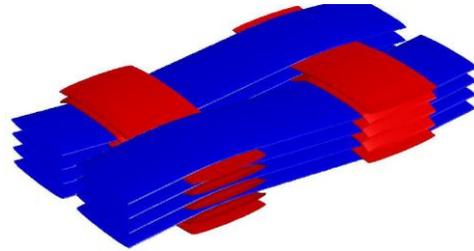


Figure 2. REV des composites 3D

Pour l'homogénéisation micro – méso, la méthode choisie est celle du Mori-Tanaka. Cette méthode s'inscrit dans le formalisme d'Eshelby [6]. Un bref descriptif de la méthode peut-être trouvé dans les travaux de [7]. Cette méthode analytique présente des fortes hypothèses, à la fois sur la géométrie et sur le matériau. Une homogénéisation par EF a été aussi réalisée. Des REV hexagonal ont été utilisés pour décrire la géométrie fibre-matrice. Enfin, une métamodèle [8] est développée pour pouvoir prédire les caractéristiques du toron imprégné avec un coût très faible et une précision comparable aux calculs EF. Le métamodèle choisi est du type « processus gaussien » ou « kriging ». Le noyau Gaussien choisi est le suivant :

$$h_j(x, \theta) = \exp\left(-\|x - x_j\|_2^2 / 2\theta^2\right)$$

Le paramètre θ , commun à toutes les fonctions h_j , définit l'étendue de l'influence d'un exemple d'apprentissage. Il est identifié simultanément avec les poids w_j par maximum de vraisemblance [9]. Pour la transition méso – macro, la méthode Mori – Tanaka est aussi employée, mais cette fois inspiré des travaux de [10, 11]. Pour la construction du métamodèle, une démarche multi-fidélité est utilisée. Dans un premier temps cela consiste à considérer un modèle de plus faible fidélité que le modèle EF mais dont la célérité d'évaluation permet de générer une plus large base d'apprentissage. Dans un deuxième temps nous recalons les métamodèles construits sur le modèle de haute-fidélité EF-voxels. Un réseau Multi-Layer perceptron [12] est choisi étant donné le nombre de variables (16) et la taille de la base d'exemples (20000). Ce réseau s'exprime de la forme suivante :

$$\hat{f}(x) = w_0 + \sum_{j=1}^{N_f} w_j h_j(x, \theta_j), \quad h_j(x, \theta_j) = \tanh\left(\theta_{j0} + \sum_{l=1}^p \theta_{jl} x_l\right)$$

Où $p = \dim(x) = 16$ est le nombre de variables d'entrée, N_f (de 10 à 11) est le nombre de fonctions non linéaires h (= sorties des neurones) constituant la base d'approximation et w les coefficients de projection linéaire à identifier. Les fonctions h , dont le nombre est minimisé, sont également adaptées par l'intermédiaire des paramètres θ . L'approche « basse fidélité » (le modèle de Mori-Tanaka adapté aux composites tissés) est assez satisfaisante en l'état pour la plupart des propriétés des tissus (E1, E2, E3, v32, v31 et G12) mais elle conduit à des résultats aberrants pour les propriétés (v12, G23, G31).

Nous devons pour celles-ci construire directement un métamodèle à partir d'exemples du modèle de haute-fidélité EF-voxels. Ceci a été réalisé à partir d'un plan d'expériences provisoire comprenant 240 exemples de calcul. Ce plan s'est avéré présenter une homogénéité discutable, ce qui est compréhensible étant donné sa faible taille au regard du nombre de variables explorées. Nous avons en conséquence dû provisoirement écarter l'utilisation d'une technique à noyau performante au profit d'une technique plus robuste devant les défauts du plan (zones peu ou trop échantillonnées). La technique élaborée pour l'occasion a consisté à mixer une approche polynomiale de faible degré à une approche par réseau de neurones. Une première analyse polynomiale a été réalisée par la technique ABFC [13] afin de ne détecter que des monômes pertinents, ce qui est indispensable avec 16 paramètres. Les polynômes obtenus ont ensuite été retravaillés et complétés pour plus de robustesse en extrapolation. Ainsi, les monômes comprenant une variable au degré 3 n'ont été retenus que lorsqu'ils décrivaient un changement d'inflexion global avéré. Les autres monômes de degré 3 ou supérieur ont été remplacés par des fonctions neuronales h éduquées spécifiquement pour cela. L'ajustement final des coefficients de chaque monôme et sortie neuronale h a été au final réalisé simultanément par une technique des moindres carrés classique. L'ensemble des 240 exemples de calcul a été utilisé pour l'apprentissage. La validation est réalisée par la technique du Leave-One-Out [14]. Elle consiste à considérer la prévision qui serait faite pour chaque exemple si celui-ci était retiré de l'ensemble d'apprentissage lors de la construction du métamodèle. Les variables dites « d'armure » ont été condensés pour réduire le nombre de variables et faciliter la démarche d'optimisation (en une seule variable pour les tissus 2D et deux variables pour les tissus 3D).

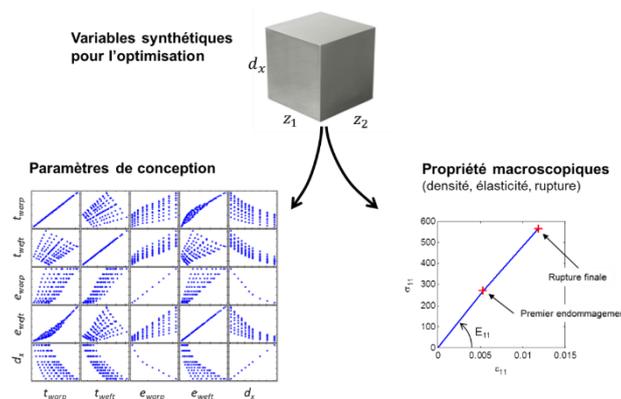


Figure 3 - Multi - Layer Perceptron avec variables synthétiques.

3. Architecture de la boucle d'optimisation

3.1 Boucle d'optimisation

La boucle d'optimisation développée dans le cadre du projet Companis3D est basée sur le dialogue entre les métamodèles correspondants à chaque matériau et le modèle EF de la structure à optimiser. Cette boucle a pour but de fournir les caractéristiques optimales du tissu soumis à un chargement donné. D'après cet objectif, on peut déduire que les variables d'optimisation doivent être celles qui définissent le matériau composite tissé optimale. Dans une première approche, les variables considérées étaient les suivantes : 1) Caractéristiques microscopiques des fibres, 2) Caractéristiques microscopiques de la matrice et 3) Caractéristiques associées à l'armure (échelle mésoscopique).

Notre première approche permettait un balayage de toutes les combinaisons possibles des caractéristiques des fibres, matrices et architectures des tissus. Malheureusement, le caractère très généraliste de cette méthode a par conséquent un très grand nombre des variables à gérer pour chaque matériau plus les variables d'optimisation correspondantes à la structure. Une autre difficulté liée à cette grande quantité des variables est l'interprétation du résultat à l'issue de l'optimisation. La boucle

d'optimisation a été donc simplifiée pour pouvoir obtenir un bon compromis entre performances et utilisations des résultats obtenus. Dans sa dernière version, les variables dits « matériau » pilotées dans ce processus d'optimisation sont :

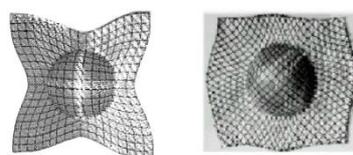
- Couple matériaux fibre/matrice
- Type de tissu : 2D/3D
- Variables d'armure : embuvages, espacements...

Avec ces paramètres d'optimisation (qui découle directement de la façon dont le métamodèle est construit), le nombre des variables est réduite jusqu'à 6. Ces variables seront utilisées par le métamodèle pour générer un jeu des propriétés mécaniques à l'échelle macroscopiques qui puissent être utilisés par un code élément fini quelconque. Ces propriétés correspondent à celles nécessaires pour définir complètement le matériau orthotrope utilisé pour modéliser le matériau composite. Ces propriétés sont injectées dans le code EF pour pouvoir lancer la simulation et donc évaluer le comportement associé au matériau composite homogénéisé.

3.2 Contraintes de fabrication

Un point important qui n'a pas encore été prise en compte est celui des contraintes de fabrication associées au tissu exploré pendant l'optimisation. Les contraintes associées à la fabrication d'une structure/pièce en matériau composite tissé sont nombreuses et leur quantification reste encore un vaste sujet de recherche. En plus, la plupart de ces contraintes sont fortement dépendantes du processus de fabrication (RTM, Infusion, compression, prepreg...) donc il faudra d'abord déterminer quel processus est le mieux adapté pour ensuite quantifier les contraintes et les injecter dans l'optimisation. Les contraintes associées au processus de fabrication qui ont été considérées dans ce cas peuvent être évalués avant l'optimisation car elles sont fortement dépendantes de la géométrie de la pièce. Après une étude des différentes contraintes existantes, nous avons choisis une de plus déterminantes, à savoir, la drapabilité.

La drapabilité est la capacité d'un tissu à couvrir une surface [15]. Cette capacité dépende directement de l'architecture du tissu et de l'orientation des renforts par rapport à la surface à couvrir. On peut voir dans la Figure 4 les différences provoquées par une différence d'orientation dans le cas du drapage d'une demi-sphère.



Test à 0/90°

Test ±45°

Figure 4 - Drapage d'une demi-sphère [15]

Pour quantifier cette drapabilité il faudra donc connaître le type de tissu ou, au moins, le tissu plus proche de celui qui est évalué par l'optimiseur ainsi que la difficulté imposée par la géométrie de la pièce. Cette double difficulté a été résolue par l'introduction d'un code auxiliaire capable d'interpréter les variables d'optimisation et donner le tissu (utilisé dans l'apprentissage du métamodèle) le plus proche du tissu évalué. Grâce à une analyse géométrique préliminaire (par exemple, analyse des courbures en utilisant les normales des éléments), on associe une note de drapabilité à chaque tissu de la base de données d'apprentissage de tel sort qu'on puisse comparer avec une valeur e drapabilité critique. Ces deux quantités nous permettront construire un critère apte qui sera évalué pendant l'optimisation et sera

utilisé pour guider l'optimisation vers de solutions faisables en pénalisant les solutions non faisables.

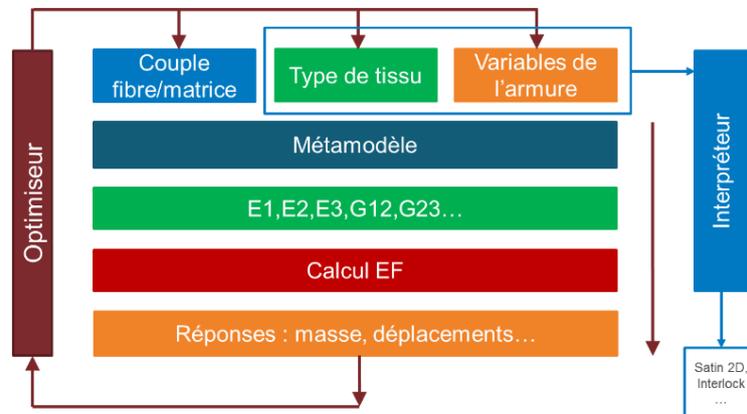


Figure 5 - Schéma global de la boucle d'optimisation avec l'introduction d'un interpréteur.

La Figure 5 montre donc l'architecture finale du processus d'optimisation avec l'introduction de l'interpréteur.

3.3 Problème d'optimisation

Le problème d'optimisation à résoudre est celui d'une optimisation sous contraintes qui peut être exprimé comme :

$$\begin{aligned} \text{Objectif} & \quad \min(f(x)) \\ \text{Contraintes} & \quad g(x) \leq 0 \end{aligned}$$

Les contraintes imposées peuvent être classifiés en deux types :

- Contraintes de drapabilité qu'on choisit d'intégrer sous forme de pénalité dans l'objectif.
- Contraintes issues du cahier de charge de la structure : déplacements, critère de ruptures, masse, etc.

L'algorithme utilisé est un algorithme de surface de réponse globale propre de l'outil Altair Hyperstudy. Cet algorithme, qui est une amélioration des méthodes ARSM [17], génère dans chaque itération une surface de réponse « global » via des DOE qui sont construit dans chaque itération. La surface de réponse est ensuite optimisée avec une méthode SQP initialisé en plusieurs points. Cette méthode montre moins de sensibilité aux minima locaux ainsi qu'une meilleure convergence que des autres méthodes.

4. Implémentation dans un code commercial

Ce processus d'optimisation a été implémenté dans le logiciel d'optimisation commercial HyperStudy® qui fait partie de la suite HyperWorks® produit par la société Altair. Ce logiciel est une plateforme d'optimisation ouverte permettant l'interaction des plusieurs modèles (modèles EF, scripts, excels...) et solveurs dans un processus d'optimisation. On montrera dans cette section l'implémentation de cette boucle d'optimisation avec un modèle EF quelconque pour ensuite l'appliquer à un cas industrielle (section 5).

L'implémentation de cette méthode dans HyperStudy demande au moins deux modèles en entrée de l'étude : le modèle EF correspondant à la structure étudiée et au minima un script du changement

d'échelle contenant le métamodèle et interpréteur. D'un part, le modèle EF doit contenir tous les cas de charge nécessaires ainsi que des variables susceptible d'être optimisées comme les épaisseurs, certaines entités géométriques dans le cas du morphing, etc. De l'autre on trouve le script du changement d'échelle qui englobe le métamodèle et interpréteur. Il est important remarquer qu'il faudra avoir un script par zone optimisé, c'est-à-dire, si-l-on a une pièce avec plusieurs zones contenant des tissus différents, chacune de ces zones doit être associé à un script de changement d'échelle qui calculera les propriétés mécaniques macroscopiques du tissu équivalente pour cette zone spécifique.

4.1 Script changement d'échelle.

Ce script remplit deux fonctions concrètes : l'homogénéisation micro – macro des propriétés du tissu et l'évaluation de la drapabilité du composite tissé calculé. Ce code est divisé en deux parties associées à chacune des fonctions nommées précédemment. La fonction de changement d'échelle est réalisée par le code développé par l'Onera, qui est composé de deux parties bien différenciées : un métamodèle orienté aux tissus 2D et autre pour les 3D. L'appelle à un de ces deux méta modèles est contrôlé par une variable discrète qui permettra de basculer vers un métamodèle ou l'autre.

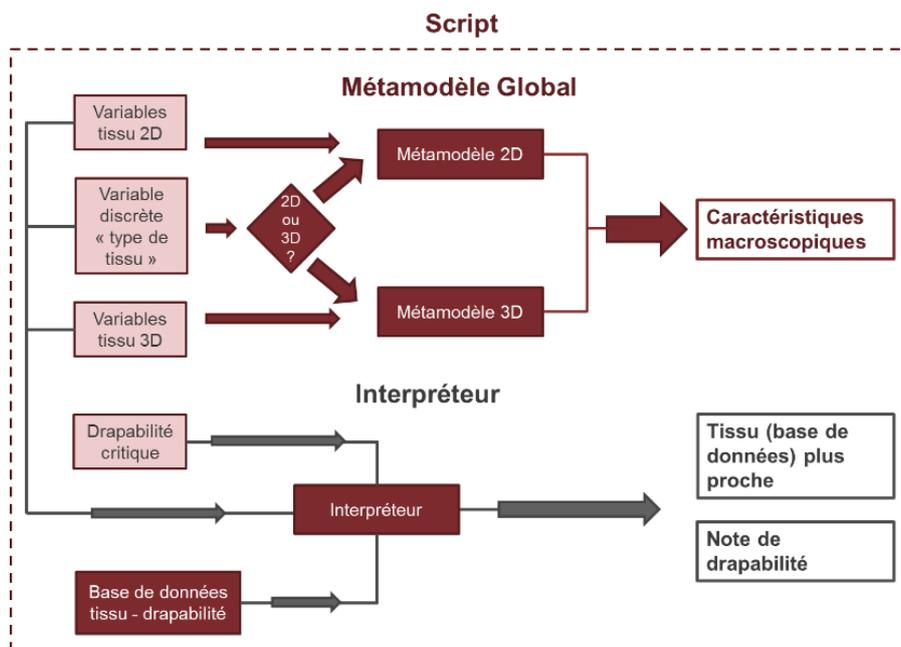


Figure 6 - Architecture du script de changement d'échelle.

La présence de cette variable de « choix » nous apporte un avantage supplémentaire : on connaît à priori la nature 2D ou 3D du tissu évalué car c'est l'optimiseur qui appellera un de deux métamodèles et donc obtiendra un résultat correspondant soit à un tissu 2D soit à un 3D. Cette variable, en conjonction avec les variables qui définissent le tissu, nous permet d'estimer le tissu plus proche à celui calculé. Cette tâche est réalisée par le deuxième code présente dans le script : l'interpréteur. Ce code prend en entrée les variables de tissu et comme paramètres la drapabilité critique identifiée sur la structure et une base de données (présente dans le script) qui associe une note de drapabilité à chaque tissu de la base de données. La sortie du code fournira le tissu le plus proche ainsi que l'estimation de drapabilité du tissu par rapport à la zone étudiée.

4.2 Liaison modèle EF et script

Grâce au logiciel HyperStudy, nous pouvons relier facilement les outputs des chaque métamodèle aux paramètres matériaux du modèle EF. Dans chaque itération, les métamodèles sont évalués et les caractéristiques macros sont injectées dans le modèle de la structure pour ensuite exécuter le calcul EF. En plus des variables « matériaux » des autres variables spécifiques de la structure pourront être aussi utilisées.

5. Application sur une structure industrielle

Ce processus a été testé avec dans un structure industrielle, un triangle de suspension automobile. Cette structure a déjà été utilisée dans le cadre des autres études menés par le CETIM et l'ONERA [1] si bien seulement les composites tissés 2D ont été considérés. La nouveauté de cette approche et la pris en compte des tissus 2D et 3D au même temps. Le but de cette optimisation est de réduire la masse tout en gardant les mêmes performances. Une première étude a été réalisée pour trouver une forme adaptée aux procédures en matériaux composites. Le triangle initial ainsi que la géométrie choisie pour la version composite sont montrés dans la Figure 7.



Figure 7 - a) Géométrie pièce initiale en Acier Haute résistance et b) géométrie conçue pour l'application composite avec zonage.

Une étude d'optimisation préliminaire de l'orientation de chaque élément a été menée sur la structure pour déterminer les zones candidates à présenter des matériaux composites différents. On retrouve donc un modèle avec 5 zones qui seront optimisées de façon indépendante. La pièce est encastree au niveau des deux trous dans les zones 1 et 5. En ce qui concerne au chargement, celui es composé d'un ensemble des forces représente 4 cas de charges différentes.

Il nous reste une dernière analyse avant de démarrer le processus d'optimisation : la drapabilité. Cette dernière est calculée grâce à une analyse des courbures sur le modèle éléments finis à l'aide d'un script. Les zones de drapabilité seront introduites sous la forme des contraintes d'optimisation. Le problème d'optimisation est formulé comme une minimisation de la somme pondéré des déplacements correspondants aux quatre cas de charges de sort à obtenir la structure la plus raide possible. L'algorithme utilisé pour cette application est le Global Response Surface Method disponible dans HyperStudy®.

6. Conclusion et perspectives

Une méthode d'optimisations de structures à matériaux composites tissés 2D/3D a été développée dans le but de créer un outil d'aide à la décision des structures à matériaux composites tissées. Une des particularités de cette méthode est la prise en compte de la nature 2D/3D du tissu composite dans l'optimisation en lien avec des contraintes de fabrication sous la forme de drapabilité. L'architecture de la méthode, basé sur un métamodèle responsable du calcul des propriétés macroscopiques du composite à partir des constituants et des paramètres associés au type d'armure, est décrite ainsi que son implémentations dans un code d'optimisation commercial (HyperStudy®). Des premiers tests de la

méthode ont été réalisés sur un démonstrateur industriel automobile avec des résultats encourageants montrant l'adéquation des composites 3D à ce genre de structures.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet COMPANIS-3D (FUI-12)

Références

- [1] D.Espinasou, A. Lemascon, C. Fagiano, F-X Irisarri, L. Rota. Conception d'un triangle de suspension composite : procédés et optimisation. Journées Optimisation SIA.
- [2] G. Grail. A Multimodel strategy for woven composites structures design. Thèse Université d'Orleans, 2013
- [3] Y. Duplessis, F. Dau, S. Heimbs, Choc mou basse énergie sur composite interlock 3X : approche expérimentale et numérique. 17^{ème} Journées Nationales sur les Composites, pp. 153, 2011.
- [4] M.Mbacke, J. Renard, A. thionnet, S. joannes. Predicting mechanical behavior and damage kinetics of a 3D interlock composite material by using multiscale approach. 15th European Conference on Composite Materials, p7. Venice 2011.
- [5] N.V Carvalho, S.T.Pinho, P. Robinson. Reducing the domain in the mechanical analysis of periodic structures, with application to woven composites. Composites Science and Technology 71, 969-979 (2011).
- [6] J.D. Eshelby. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and elated problems. Proceedings of the Royal Society of London A421 pp 376-396 (1957).
- [7] M. Bornert, T. Bretheau et P. Gilormini. Homogénéisation en mécanique des matériaux, Tome 1 : Matériaux aléatoires élastiques et milieux périodiques. Hermès <<science, traité <mim, <série alliages métalliques, 2001.
- [8] N.V. Queipo, R.T. Haftka, W.Shyy, T. Goel, R. Vaidyanathan, P. Kevin Tucker. Surrogated-based analysis and optimization. Progress in Aerospace Sciences 41(1), pp 1-48 (2005)
- [9] C.E. Rasmussen, C.K.I. Williams. Gaussian Processes for Machine Learning. Cambridge, MITPress (2006).
- [10] M.L. Dunn, H. Ledbetter, P.R. Heyliger, C.S. Choi. Elastic constants of textured short-fiber composites. J. Mech. Phys. Solids. 44(9) pp 1509-1541 (1996).
- [11] B.Gommers, I. Verpoest, P. Van Houtte. The Mori-Tanaka method applied to textile composite materials. Acta Materialia 46 pp 2223_2235 (1998).
- [12] C. M. Bishop. Pattern Recognition and machine Learning. Information Science and tatic. Springer-Verlag New York, inc (2006).
- [13] G. Jekabsons. Ensembling Adaptively COnstructed Polynomial Regression Models. World Academy of Science, Engineering and Technology 38 pp 162-167 (2008)
- [14] M. Kearns, D. Ron. Algorithmis stability and sanity-check bounds for leave-one-out cross validation. Neural computation, 11(6), pp 1427-1453 (1999).
- [15] Rozant, O., Bourban, P. E., & Månson, J. A. Drapability of dry textile fabrics for stampable thermoplastic preforms. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31(11), 1167-1177 (2000).
- [16] Gary Wang, G., Dong, Z., & Aitchison, P. Adaptive response surface method-a global optimization scheme for approximation-based design problems. Engineering Optimization, 33(6), 707-733 (2001).
- [17] A. Cherouat, Simulation numérique du preformage des tissus de fibres de verre par la méthode des éléments finis. Thèse Université Franche-Comté, 1994