

# Génération parallèle d'un matériau virtuel pour les composites à fibres de carbone

A. Pierquin, S. Lou, G. Wasselynck, D. Trichet and N. Bracikowski

Nantes Université, Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes Atlantique, IREENA, UR 4642, F-44600 Saint-Nazaire  
Email : antoine.pierquin@univ-nantes.fr

**Résumé**—Ce résumé présente une stratégie de parallélisation de génération et de simulation de matériaux composites à fibres longues de carbone, ainsi que des premiers résultats pour une comparaison des temps de calcul et des solutions obtenues.

## I. INTRODUCTION

Les matériaux composites à fibres longues de carbone sont dorénavant largement utilisés dans les industries du transport pour les avions, les navires et les automobiles, mais aussi de l'énergie notamment pour les éoliennes. Ils allient résistance mécanique et légèreté, ce qui est un avantage par rapport à des structures équivalentes en métal. Ils sont évidemment fortement étudiés en science des matériaux et en génie mécanique, mais également en génie électrique pour des applications en chauffage et en contrôle non destructif (CND). En effet, les fibres de carbones étant conductrices, le matériau composite lui-même est conducteur sous réserve que le seuil de percolation soit atteint. Il s'agit d'avoir suffisamment de fibres pour que des contacts électriques s'établissent entre elles et que le matériau présente une conductivité dans les trois directions de l'espace, ce qui se traduit par un taux de remplissage suffisant sur les fibres. Cette conductivité peut ensuite être exploitée pour du chauffage, particulièrement le chauffage par induction, et du CND résistif, par courant de Foucault ou encore par thermoinduction. Quelle que soit l'application, l'outil de simulation est particulièrement utile pour comprendre les phénomènes et aider au développement des dispositifs. Cela suppose que les modèles puissent prendre en compte la nature tensorielle de la conductivité mais aussi tout simplement de pouvoir déterminer ce tenseur.

La détermination du tenseur peut se faire de manière expérimentale par la mesure [1], mais aussi de manière numérique par l'utilisation de matériaux virtuels pour l'homogénéisation. L'intérêt des matériaux virtuels est de pouvoir faire varier les paramètres matériaux et d'en déduire une conductivité équivalente. Cette deuxième manière nécessite de pouvoir générer un matériau virtuel à fibres de carbones (MVFC) à l'échelle des fibres puis de pouvoir effectuer des simulations sur ce matériau virtuel pour en déduire la conductivité. Les approches 2D pour déterminer les conductivités transverses [2], [3], si elles permettent de générer des fibres à la répartition contrôlée, se révèlent rapidement limitées puisque la percolation est un phénomène 3D dans le matériau réel, du fait de la forte anisotropie et de la variabilité spatiale de la distribution des fibres. [4], [5] proposaient des approches tridimensionnelles, avec une approche périodique pour [4] quand [5] proposait une génération du MVFC qui laisse plus de place à l'aléa par une approche itérative et un découpage en couches dans

le sens des fibres. Néanmoins, la réorganisation des fibres dans chaque couche par l'approche itérative et le découpage conduisent à des temps de calcul rapidement importants avec l'augmentation de la taille du MVFC. Or cette dernière doit être suffisante pour obtenir un MVFC représentatif, autrement appelé volume élémentaire représentatif (VER).

Nous proposons ici de reprendre l'algorithme de [5] en y ajoutant une approche de décomposition de domaine pour la génération des fibres qui permettra la parallélisation de la génération et du calcul des sous-matrices avant l'assemblage final et la résolution.<sup>1</sup>

## II. MATÉRIAUX VIRTUELS

### A. Algorithme de génération

Pour un domaine de taille  $x_{\max} \times y_{\max} \times z_{\max}$ , nous déduisons du taux de remplissage que  $n_f$  fibres de rayon  $r_f$  peuvent être placées sur la section  $x_{\max} \times y_{\max}$ , la direction  $z$  étant celle des fibres. Un découpage est effectué selon  $z$ , avec un nombre de couches  $n_z$  fixé, la distance entre chaque couche étant de  $\frac{z_{\max}}{n_z - 1}$ . On note  $\mathbf{c}_{k,n}^{(i)}$  les coordonnées en  $(x, y)$  du centre de la fibre  $k$  de la couche  $n$  à l'itération  $i$ . L'algorithme de génération du matériau consiste, pour une couche donnée, à perturber les centres de la couche antérieure pour créer les centres de la couche actuelle, puis à corriger itérativement cette position pour éviter les chevauchements entre fibres. La correction s'effectue en repoussant les centres pour lesquels les fibres se chevauchent, la répulsion étant d'autant plus forte que le chevauchement est important. En l'absence de chevauchement, aucune correction n'est apportée. L'algorithme est résumé plus bas, avec  $\delta$  une fonction de perturbation autour de l'argument d'entrée, et  $f$  la fonction calculant le coefficient de répulsion.

- Génération aléatoire de  $\mathbf{c}_{k,0} \forall k$
- Pour  $n = 1$  à  $n_z$ 
  - $\forall k, \mathbf{c}_{k,n}^{(1)} = \mathbf{c}_{k,n-1} + \delta(\mathbf{c}_{k,n-1})$
  - Tant que des fibres se chevauchent sur la couche  $n$ 
    - $i = i + 1$
    - Pour  $k = 1$  à  $n_f$

$$\mathbf{c}_{k,n}^{(i)} = \mathbf{c}_{k,n}^{(i-1)} + \sum_{j=1}^{n_f} (\mathbf{c}_{k,n}^{(i-1)} - \mathbf{c}_{k,n}^{(i-1)}) \times f \left( \|\mathbf{c}_{k,n}^{(i-1)} - \mathbf{c}_{k,n}^{(i-1)}\| \right).$$

$$\text{— } \mathbf{c}_{k,n} = \mathbf{c}_{k,n}^{(i)}$$

1. Ces travaux ont été supportés par le programme WISE de la région Pays de la Loire.

## B. Modèle et résolution

Une fois la répartition des fibres connue, un modèle électrique est appliqué, conduisant à un système matriciel à résoudre. On considère le centre des fibres sur chaque couche comme un nœud, les nœuds étant reliés par des arêtes, systématiquement pour les nœuds d'une même fibre pour des couches successives dans le sens longitudinal ou en cas de contact entre fibres sur une couche. Ainsi, il est possible de définir un potentiel  $V_n$  aux nœuds, une résistance  $R_a$  associée pour chaque arête puis d'appliquer la loi d'Ohm et la loi de Kirchhoff pour les courants en chaque nœud pour obtenir le système

$$\mathbf{D}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

où  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{G}$  sont respectivement les matrices de divergence, résistance et gradient. Le système (1) est ensuite résolu en imposant les potentiels aux bords du domaine dans chaque direction pour déduire la conductivité équivalente dans une stratégie d'homogénéisation.

## III. STRATÉGIE DE PARALLÉLISATION

La section  $x \times y$  est divisée en  $n_x \times n_y$  cellules de manière à permettre la génération parallèle des  $n_x \times n_y$  cellules par  $n_x \times n_y$  processus, avec un processus par cellule. Tout d'abord, la génération, le traitement des interfaces pour la détection des contacts éventuels entre cellule, et la création des matrices de résistance et de gradient sont exécutées parallèlement. Ensuite, une numérotation globale des inconnues intervient de manière séquentielle, avant de revenir à une concaténation parallèle des matrices globales  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{G}$ . Finalement, l'obtention de la matrice du système globale et sa résolution sont exécutés séquentiellement.

## IV. RÉSULTATS DE SIMULATION

Des simulations sont effectuées pour différentes taille de domaines en vue de comparer les temps de calcul avec des bases carrées  $x = y$ . La simulation séquentielle est comparée à une approche parallèle avec un découpage en  $2 \times 2$  et  $3 \times 3$  cellules, soit 4 et 9 processus respectivement. Le code écrit en C est parallélisé en utilisant OpenMP, offrant une parallélisation avec mémoire partagée.

Les graphiques de la figure 1 montrent clairement un gain de temps d'autant plus important que la taille du domaine augmente. Le gain de temps est surtout notable sur la partie de la génération proprement dite, mais aussi sur l'assemblage des matrices puisque l'assemblage par cellule puis la concaténation parallélisés sont plus rapides qu'un assemblage global.

## V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La simulation électrique de matériaux composites à fibres de carbone à l'échelle des fibres nécessite de pouvoir représenter un domaine suffisamment grand pour être représentatif du comportement à l'échelle du matériau. Le recours à la programmation parallèle présente de fait un intérêt certain pour traiter la complexité de génération du matériau et la résolution du problème. La stratégie établie dans ce résumé permet, d'après les résultats présentés, une accélération des

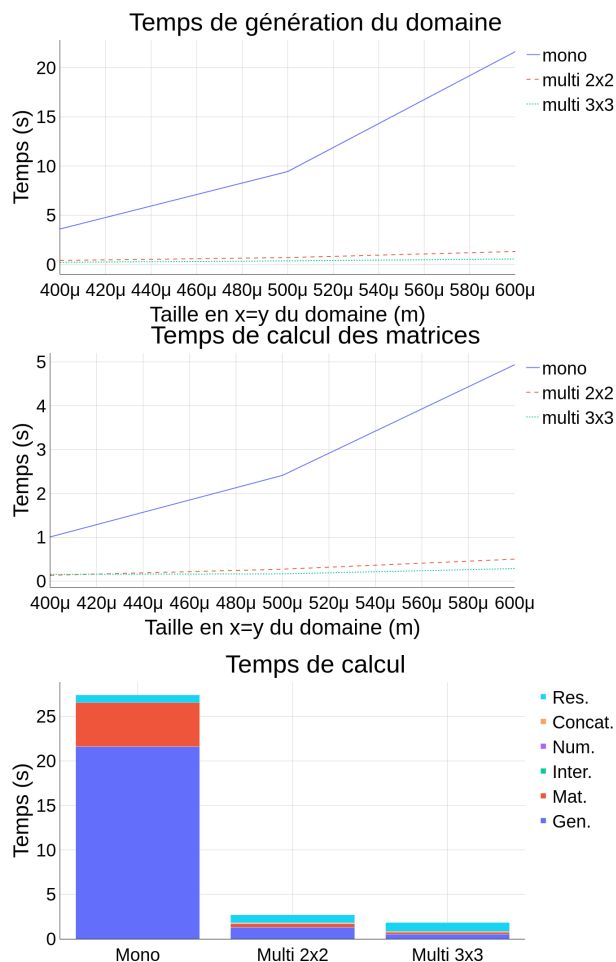


FIGURE 1. Comparaison des temps de calculs entre les approches séquentielle (mono) et parallèles (multi).

calculs de 8 à 30 selon les cas. Reste à analyser la conductivité équivalente obtenue pour vérifier que la décomposition de domaine n'induit pas de déviation du résultat. La réduction du temps de calcul permettra d'accélérer la détermination de la taille d'un volume représentatif.

## RÉFÉRENCES

- [1] F. D. Senghor, G. Wasselynck, H. K. Bui, S. Branchu, D. Trichet, G. Berthiau, "Electrical Conductivity Tensor Modeling of Stratified Woven-Fabric Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Materials", IEEE Transactions on magnetics, vol. 53, no. 6, june 2017.
- [2] A. R. Melro, P. P. Camanho, S. T. Pinho, "Generation of random distribution of fibres in long-fibre reinforced composites", Composites Science and Technology, vol. 68, 2008.
- [3] Arnaud Gillet, Philippe Olivier, Abir Al Maghribi, Ihab El Sawi, "Prédiction des propriétés électrique d'un composite aéronautique = Prediction of electrical properties of an aeronautic composite", JNC16, Jun 2009, Toulouse, France.
- [4] H. Yu, D. Heider, S. Advani, "A 3D microstructure based resistor network model for the electrical resistivity of unidirectional carbon composites", Composite Structures, vol. 134, 2015.
- [5] G. Wasselynck, D. Trichet, B. Ramdane, J. Fouladgar, "Microscopic and Macroscopic Electromagnetic and Thermal Modeling of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites", IEEE Transactions on magnetics, vol. 47, no. 5, may 2011.