

Meilleure efficacité énergétique et mécanique des matériaux cellulaires - De l'échelle de la microstructure à l'échelle de la structure

P.M. Michaud^a, D. Baillis^b

a. EC2-Modélisation, 66 bd Niels Bohr, 69603 Villeurbanne Cedex, France

b. LaMCoS, INSA-Lyon, CNRS UMR 5259, 18-20 Rue des Sciences, 69621 Villeurbanne cedex, France

Résumé :

Les requêtes sur l'allègement des structures, l'économie de matière conduisent à chercher des matériaux multifonctionnels, ayant à la fois des propriétés mécaniques et thermiques optimisées. Pour répondre à ces objectifs, les matériaux cellulaires présentent de très bonnes performances à la fois thermiques et mécaniques pour certaines applications. Une approche de modélisation multi-échelle est proposée afin de mieux comprendre et de modéliser le comportement thermomécanique des mousses cellulaires isolantes à pores fermés polymères.

Cette démarche repose sur trois niveaux d'échelle. A l'échelle de la phase locale (quelques microns), la connaissance des propriétés thermo-mécaniques de la phase solide des mousses est recherchée. Par la suite, le comportement à l'échelle mésoscopique d'un nombre restreint de cellules (quelques millimètres) est quant à lui prédit par une modélisation réaliste de la structure de la mousse (via la tomographie au rayon X). Ce modèle éléments finis est sollicité thermo-mécaniquement afin de fournir les paramètres d'entrée nécessaires à la construction d'un modèle de comportement à l'échelle macroscopique (quelques centimètres) pour le dimensionnement de structure.

Si la méthode a été développée pour la conception des réservoirs cryogéniques des lanceurs ARIANE, l'approche ouvre des perspectives dans de nombreux domaines en termes de dimensionnement et d'optimisation de structures composites sandwich avec une âme mousse.

Abstract :

The requests for the lightening of the structures and material saving lead to the development of multifunctional materials, having optimized mechanical and thermal properties. The idea is to replace complex systems by a unique material possessing the required multifunctional properties. The cellular polymer materials present, not only high thermal insulating properties but also interesting mechanical strength. A multi-scale modeling is then proposed to analyze the thermal and mechanical performances for the concerned applications.

This approach is based on three scale levels. At the local phase scale (few microns), the knowledge of the thermal and mechanical properties of the solid phase is required. Then, the behavior of a limited number of cells (few millimeters; denoted as "mesoscopic" scale) can be predicted from a realistic representation of the porous structure of the foam obtained from tomographic characterizations. A

Finite Element method is used to model thermal and mechanical properties of the limited number of cell (Representative Elementary Volume). The results of this modeling give the entrance parameters for the characterization of the thermo-mechanical behavior at the “macroscopic” scale (several centimeters) useful for the dimensioning of the structures.

The method was developed to design the cryogenic tanks of the ARIANE launchers. And it opens perspectives in numerous domains interested in sizing and optimization of sandwich structured composites with a foam core.

Mots clefs : Modélisation, approche multi-échelle, mousse polymère, mécanique, thermique

1 Introduction

Le travail proposé est basé sur une problématique relative à l'isolation thermique des réservoirs cryogéniques des lanceurs ARIANE. Cette fonction est assurée par des mousses polymères rigides à pores fermés de faible densité qui sont soumises à de fortes sollicitations thermiques et mécaniques.

Les enjeux du projet portent donc sur le développement d'une approche de modélisation multi-échelle permettant de sélectionner les matériaux cellulaires multifonctionnels ayant des propriétés à la fois thermiques et mécaniques les mieux appropriées pour l'application concernée. Une étape fondamentale de la démarche porte sur la modélisation du comportement thermique et mécanique des mousses cellulaires isolantes à pores fermés polymère à partir de leur architecture.

2 Approche multi échelles

Le projet repose sur une approche multi-échelles schématisée sur la figure 1 :

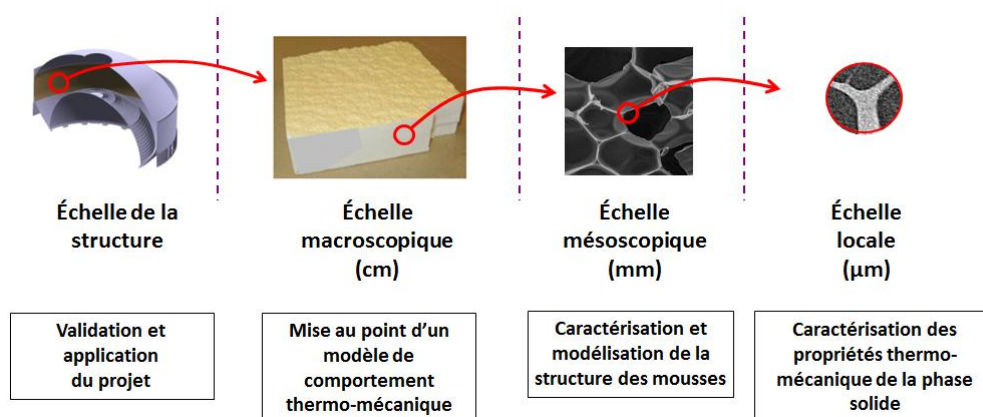


Figure 1. Schématisation de l'approche multi-échelle

A l'échelle de la phase locale (quelques microns), la connaissance des propriétés thermo-mécaniques de la phase solide des mousses est recherchée. L'association de ces propriétés avec la connaissance réaliste de l'architecture de la mousse (image tomographique 3D) permet de générer un modèle éléments finis à l'échelle mésoscopique. Ce modèle éléments finis est sollicité thermo-mécaniquement

afin de fournir les paramètres d'entrée nécessaires à la construction d'un modèle de comportement à l'échelle macroscopique (quelques centimètres) pour le dimensionnement de structure.

A partir de la modélisation structurelle éléments finis à l'échelle mésoscopique, des modélisations éléments finis mécaniques et thermiques ont été réalisées (figures 2 et 3). Les résultats numériques ont été confrontés à des résultats expérimentaux à différentes températures.

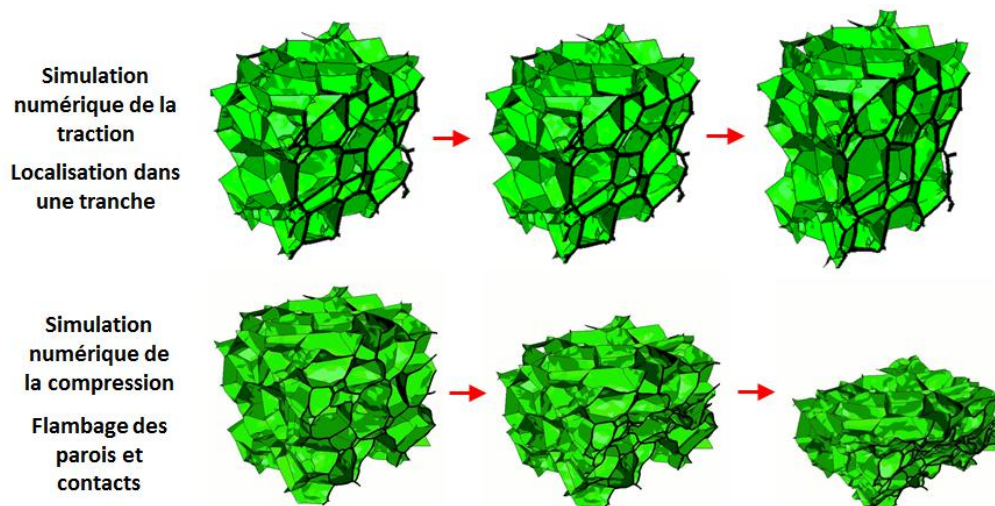


Figure 2. Sollicitation mécanique du modèle mésoscopique

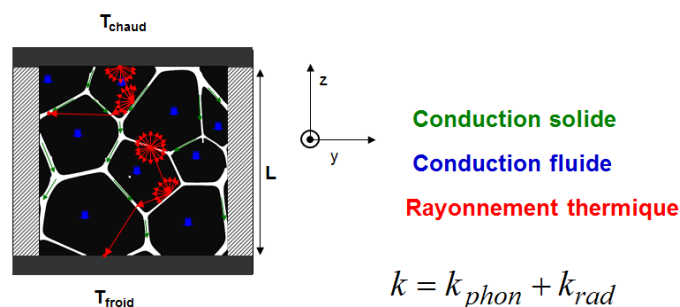


Figure 3. Sollicitation thermique du modèle mésoscopique

Sachant que les résultats expérimentaux ne sont disponibles que pour des chargements « simples », le modèle numérique mésoscopique permet de prédire le comportement mécanique macroscopique d'une mousse pour n'importe quelle sollicitation (cisaillement avec traction/compression, bi-axialité, tri-axialité, effet de la déformation sur la thermique ...). Cette prédiction effectuée sur plusieurs mousses à différentes températures permet de construire le modèle macroscopique qui est utilisé à l'échelle d'une structure.

2 Intérêts de l'approche

Cette approche multi-échelles permet d'analyser le comportement thermo-mécanique des mousses avec :

- La prise en compte de la géométrie réelle de la mousse
- Un comportement macroscopique piloté par la géométrie et les propriétés du bulk

- L'implantation d'un modèle macroscopique dans un code de calcul permettant l'analyse du comportement thermo-mécanique dans une structure réelle
- L'analyse de la thermique aussi bien que la mécanique

3 Remerciement

The authors acknowledge gratefully the support of the French National Research Agency through the MATETPRO project No. ANR-08-MAPR-0009