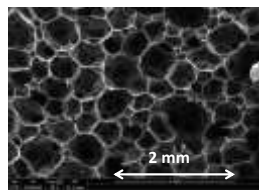
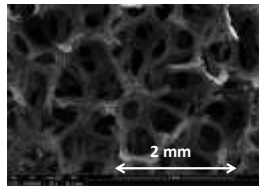


POP-FOAMS



Cellular vitreous carbon (CVC) foams



Reticulated vitreous carbon (RVC) foams

Either having different cell sizes but the same bulk density

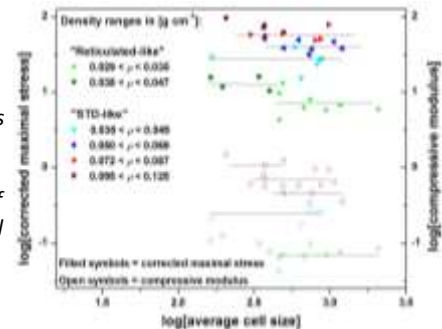
or having the same cell size but different bulk densities



Mechanically tested in quasi-static compression either with or without PMMA plates glued to their faces

Data analysis

Correction of experimental biases



Precise analysis of the impact of the porous structure on the mechanical properties of vitreous carbon foams

Mechanical Performance OPTimisation of tannin-based carbon FOAMS

Responsable scientifique : Alain CELZARD, Institut Jean Lamour – UMR UL-CNRS 7198

Partenaires Labex : Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB)

Contexte —

Les propriétés mécaniques des mousses de carbone vitreux ont été extrêmement peu étudiées en dépit du potentiel applicatif de tels matériaux : électrodes poreuses dans des dispositifs électrochimiques de conversion d'énergie, scaffolds pour l'ingénierie tissulaire, blindages ultralégers pour les ondes hyperfréquence, filtres pour fluides chauds ou corrosifs, supports de catalyseurs, isolants thermiques à haute température, précurseurs de céramiques cellulaires, etc. Les techniques de synthèse disponibles au laboratoire permettent désormais, et pour la première fois, de dissocier densité et diamètre de pores, deux paramètres inversement proportionnels l'un à l'autre dans les mousses classiques. Les mousses de carbone vitreux dérivés de tannins flavonoïdes, dont il est question ici, avaient pour but d'être utilisées comme matériaux modèles pour mieux comprendre la mécanique de ces milieux hautement poreux, et les résultats devaient permettre de les optimiser.

Objectifs —

Optimiser les performances mécaniques de carbonés vitreux cellulaires dérivés de ressources végétales en produisant des échantillons de structures contrôlées, en mesurant expérimentalement leurs propriétés mécaniques et en modélisant les résultats.

Démarche —

Nous avons préparé et étudié en détail des échantillons de carbone vitreux alvéolaire de composition chimique constante mais avec des paramètres structuraux (essentiellement porosité et taille de pores) contrôlés de manière indépendantes, ce qui n'avait jamais été fait auparavant.

Résultats marquants —

Les principaux résultats sont :

- Analyse sans précédent des propriétés mécaniques en compression de plusieurs centaines d'échantillons répartis en 9 familles de structures et 6 classes de densités
- Analyse approfondie de l'impact des conditions de mesures, notamment avec et sans plaques rigides fixées sur leurs faces, et en fonction de la vitesse de sollicitation, et détermination des conditions pertinentes pour mesurer modules et résistances à la compression
- Aucun effet de la taille des pores, toute autre chose égale par ailleurs, n'a été observé

- Le module doit impérativement être déterminé avec plaques rigides fixées sur les faces des échantillons, alors que la résistance à la compression peut être obtenue indifféremment avec ou sans plaques
- Tous les matériaux, cellulaires, réticulés voire intermédiaires, obéissent à un même raffinement de la loi de Gibson & Ashby, et avec le même exposant critique
- A partir de ce raffinement, la fraction de solide contenu uniquement dans les brins des mousses a pu être calculée et trouvée en parfait accord avec des calculs basés sur des mesures indépendantes de propriétés thermiques et acoustiques
- Une classe de mousses semi-ouvertes a été définie, i.e., dont la contrainte à la compression évolue avec la densité de façon similaire à une mousse ouverte tout en étant meilleure en valeur absolue, mais dont le module a un comportement qui s'apparente à celui des mousses fermées
- La démonstration a été faite que la densité relative et la fraction de solide contenu dans les brins sont les deux seuls paramètres clés pour obtenir le comportement mécanique souhaité.

Principales conclusions incluant des points-clés de discussion —

Sur le plan académique, la confrontation entre résultats expérimentaux et modélisation a permis d'aller bien au-delà de ce qui est habituellement fait sur les mousses rigides, car ces matériaux véritablement modèles sont des références expérimentales indispensables pour comprendre les effets des paramètres structuraux individuels. Sur le plan technologique, ces résultats permettent d'optimiser ces matériaux pour lesquels chaque application envisagée nécessite des propriétés mécaniques minimales rendant possible leur utilisation dans un contexte donné.

Perspectives —

Ces travaux ouvrent la voie à une meilleure compréhension des mousses organiques, dont les variations de composition ont des effets (élasticité accrue, ductilité) qui s'ajoutent à ceux de la structure poreuse. Des tests en cisaillement et en flexion, très difficiles à réaliser compte tenu du caractère fondamentalement fragile de ces matériaux, mériteraient d'être

Valorisation —

Ces résultats ont été diffusés :

- dans une thèse soutenue le 8 décembre 2015, qui a valu à son auteur le SFEC Award 2017 (Société Francophone d'Etude des Carbones) :

- *Maxime Letellier, Université de Lorraine : Optimisation de mousses de carbone dérivées de tannin par l'étude et la modélisation de leurs propriétés physiques*

- dans des conférences, dont 2 invitées :

- *M. Khelifa, V. Fierro, A. Celzard, M. Letellier, C. Delgado Sánchez
FE analysis of carbon foam under multiple compressive loading
18th International Conference on Composite Structures (ICCS18), Lisbon (Portugal) 15 – 18 Juin 2015*
- *M. Letellier, J. Macutkevic, D. Bychanok, P. Kuzhir, C. Delgado-Sanchez, H. Naguib, S. Ghaffari Mosanenzadeh, V. Fierro, A. Celzard
Modelling the physical properties of glasslike carbon foams
Proceedings of the International Conference Carbon 2016 Conference, State College (PA, USA) 10 – 15 Juillet 2016*
- *M. Letellier, J. Macutkevic, D. Bychanok, P. Kuzhir, C. Delgado-Sanchez, H. Naguib, S. Ghaffari Mosanenzadeh, V. Fierro, A. Celzard
Matériaux alvéolaires modèles en carbone vitreux pour la science des matériaux et les sciences de l'ingénieur (conférence invitée)
Journées Scientifiques de la Société Francophone d'Etude des Carbons (SFEC 2016), Carqueirane (Var), 20 Mai 2016*
- *M. Letellier, C. Delgado-Sanchez, J. Macutkevic, D. Bychanok, P. Kuzhir, H. Naguib, S. Ghaffari Mosanenzadeh, V. Fierro, A. Celzard
Etude des propriétés physiques de mousses modèles en carbone vitreux (conférence invitée)
Séminaire annuel du LCTS (Laboratoire des Composites Thermo-Structuraux), Bordeaux, 11 octobre 2016*
- *M. Letellier, J. Macutkevic, D. Bychanok, P. Kuzhir, C. Delgado-Sanchez, H. Naguib, S. Ghaffari Mosanenzadeh, V. Fierro, A. Celzard*
Physical properties of model, reticulated and cellular vitreous carbon foams
V France - Russia Conference NAMES'16 (New Achievements in Materials and Environmental Science), Nancy 7-9 Novembre 2016*

- dans des publications internationales :

- *M. Letellier, C. Delgado-Sánchez, M. Khelifa, V. Fierro, A. Celzard**
Mechanical properties of model vitreous carbon foams
Carbon 116 (2017) 562-571
- *M. Letellier, J. Macutkevic, D. Bychanok, P. Kuzhir, C. Delgado-Sanchez, H. Naguib, S. Ghaffari Mosanenzadeh, V. Fierro, A. Celzard*
Modelling the physical properties of glasslike carbon foams
Journal of Physics Conference Series 879 (2017) 012014-1 – 012014-8

- dans un article dans la presse :

- *La mousse du futur à l'étude dans les Vosges*
100% Vosges, N°184, 11 octobre 2016

<http://www.centpourcent-vosges.fr/actu/sengager/la-mousse-du-futur-a-letude-dans-les-vosges/>

Effet levier du projet —

Le projet a permis de mener à bien un travail de grande ampleur dans le cadre de la délégation à l'IUF d'Alain Celzard (2010 – 2015). Ces résultats ont fortement inspiré la thèse de Clara Delgado-Sanchez (soutenance prévue le 5 décembre 2017), qui avait été recrutée comme stagiaire à l'époque de ce projet, et qui est restée dans l'équipe pour y mener une thèse financée par un projet FUI dont le sujet portait aussi sur des mousses biosourcées.