

Nouveau concept d'élaboration de matériaux carbonés poreux

La synthèse par réplique

Cathie Vix-Guterl, Julien Parmentier et Pierre Delhaes

Résumé Contrôler la porosité dans un matériau carboné nécessite de développer de nouveaux concepts de synthèse. C'est dans ce contexte que le procédé de synthèse par réplique a été adapté à la préparation de matériaux carbonés à porosité organisée, en élaborant le matériau carboné dans la porosité d'un matériau hôte ultérieurement éliminé par un traitement chimique sélectif. Par un choix judicieux du matériau hôte, du précurseur carboné et des conditions de synthèse, il est possible de contrôler les caractéristiques texturales et structurales des répliques carbonées. Les propriétés de ces nouveaux matériaux peuvent être adaptées en fonction des applications potentielles visées comme l'adsorption sélective de gaz, le stockage d'énergie, l'utilisation comme matériau hôte pour la synthèse de céramiques ou d'oxydes.

Mots-clés Réplique carbonée, porosité organisée, microporosité, mésoporosité, silice mésoporeuse.

Abstract **New concept to develop porous carbon materials: the templating synthesis**

The control of the porosity in carbon materials requires to develop new synthesis strategies. In this frame, the templating approach has been adapted to prepare ordered porous carbon materials for which both the structure and the texture can be controlled. This preparation route consists to synthesize the carbon material inside the porosity of a selected host material. The final carbon is recovered after removal of the silica by acid treatment. By a judicious choice of the silica template, the carbon precursor and the impregnation route (liquid or gas phase route), it is possible to prepare ordered porous carbon replica which display controlled structural and textural characteristics. These properties are very attractive for various potential applications such as selective adsorption of gas, energy storage, use of the carbon as a host material to prepare new ceramic and oxide materials.

Keywords Ordered porous carbons, templating synthesis, microporosity, mesoporosity, mesoporous silica.

La première exploitation connue de solides poreux concerne le matériau carbone et remonte à l'Égypte ancienne. Datant de cette époque, des papyrus font référence au charbon utilisé comme adsorbant pour les applications médicales. L'intérêt pour ce type de matériau n'a cessé de croître au fil des siècles et encore actuellement, la recherche centrée autour de la synthèse et de la caractérisation de matériaux inorganiques poreux reste très active [1]. Ce fort engouement ne provient pas seulement de l'intérêt industriel pour ces matériaux, mais également de leur intérêt scientifique lié à la compréhension des mécanismes de formation, à la détermination de leurs propriétés et à leur mise en œuvre.

Les applications potentielles des matériaux carbonés poreux visent des domaines aussi variés que la catalyse hétérogène, la séparation sélective de gaz, la purification de l'eau, le stockage énergétique... Les enjeux économiques dans ces domaines sont importants et la levée de certains verrous technologiques doit passer par le développement de nouveaux matériaux pour lesquels il sera possible de contrôler d'une part, les propriétés nano/microscopiques (taille de pores, forme de pores, connectivité entre pores assurant une porosité ouverte, caractéristiques de surface...) et d'autre part, la morphologie à l'échelle macroscopique pour préparer des formes diverses (fibres, films minces, monolithes...).

Pour atteindre ces objectifs, les concepts de synthèse retenus doivent permettre de développer la texture du matériau à l'échelle nanométrique. L'activation physique ou chimique de précurseurs carbonés naturels ou synthétiques en est un excellent exemple. La maîtrise de la porosité finale est toutefois difficile si elle doit être contrôlée par seulement un procédé d'activation. Ce problème a poussé la communauté scientifique à proposer de nouvelles solutions pour passer de systèmes poreux non continus et désordonnés à des systèmes poreux organisés et interconnectés favorables pour des transferts de matières efficaces.

Les différents concepts et techniques de synthèse envisagés dans la littérature pour préparer des carbonés micro- et mésoporeux à porosité contrôlée sont regroupés dans le *tableau 1*. De manière générale, ces voies de synthèse permettent soit de modifier de manière contrôlée la texture déjà existante du carbone [2], soit de préparer des matériaux qui présentent une distribution poreuse assez large.

C'est donc dans l'objectif de pouvoir contrôler simultanément dès l'étape de synthèse les propriétés structurales et texturales du carbone et d'obtenir une distribution en taille des pores la plus étroite possible que le concept de synthèse par réplique (souvent intitulé en anglais « templating synthesis », « exotemplating synthesis » ou « nanocasting ») a été introduit. Ce concept conduit soit à une réplique de la

Tableau I - Résumé non exhaustif de concepts et techniques de synthèse utilisés pour la préparation de carbones micro- et mésoporeux à porosité contrôlée.

Concepts et techniques de synthèse	Matériaux obtenus
Méthode directe par carbonisation d'un précurseur organique (ex : alcool furfurylique, résine phénolique, polyimide, copolymère acrylonitrile, méthacrylate de méthyle...)	Tamis moléculaire carboné (MSC : « molecular sieving carbon ») sous forme de particules ou de fibres (taille de pores < 1 nm). Il existe plus de 300 références (incluant les brevets) sur les MSC Tamis moléculaire carboné sous forme de film mince Carbone mésoporeux obtenus par : - carbonisation en présence de catalyseur - carbonisation d'un mélange de polymères dont l'un est thermiquement instable
Modification de la porosité existante d'un carbone poreux par dépôt chimique en phase vapeur (DCPV) ou oxydation ménagée	Tamis moléculaire carboné Carbone micro- et mésoporeux
Carbonisation de gels organiques préparés par des procédés « sol-gel »	Aérogels de carbone, matériaux monolithiques, de surface spécifique élevée (micro, méso et macroporosité), de faible densité, et conducteurs électriques
Techniques de répliques à partir de zéolithes et de solides mésoporeux à porosité organisée et de différents précurseurs carbonés	Répliques carbonées microporeuses à porosité organisée préparées à partir de zéolithe, d'alcool furfurylique et de propylène. Surface spécifique et volume poreux élevés, distribution poreuse étroite Répliques carbonées mésoporeuses à porosité organisée préparées à partir de solides mésoporeux (MCM-48, SBA-15, MSU...) et de précurseurs carbonés très variés (sucrose, brai, propylène, divinylbenzène, alcool furfurylique, résorcinol-formaldéhyde...)

texture poreuse à l'échelle nanométrique, soit à une réplique de la morphologie à l'échelle micrométrique. Nous nous limiterons, dans cet article, au premier aspect. Le procédé de synthèse par réplique est schématisé sur la *figure 1* : un précurseur carboné est introduit sous forme liquide ou gazeuse dans la porosité d'un matériau hôte, ce précurseur est ensuite transformé en carbone par carbonisation ou pyrolyse. Le matériau carboné est récupéré après élimination du matériau hôte par un traitement sélectif. Une réplique négative du matériau hôte est attendue puisque les « parois » et les « pores » de ce matériau hôte deviennent respectivement les « pores » et les « parois » du matériau carboné. Les matériaux hôtes les plus appropriés pour obtenir des matériaux carbonés à porosité organisée et interconnectée sont les zéolithes et les solides mésoporeux [3]. A partir de zéolithes, des matériaux carbonés exclusivement microporeux ont pu être préparés [4]. Des répliques carbonées mésoporeuses ont été synthétisées simultanément par plusieurs équipes dès 1999 suite à la découverte de silices mésoporeuses à porosité organisée. La première publication concernait un matériau carboné à porosité organisée préparé à partir d'une silice de type MCM-48 imprégnée par une solution de sucrose ultérieurement carbonisée [5].

Depuis, de nombreux travaux se sont succédés avec l'utilisation de différentes silices mésoporeuses (SBA-15, SBA-16, SBA-1, MSU-X...) et de précurseurs carbonés variés (propylène, brai, alcool furfurylique, divinylbenzène, polypyrrole, polyacrylonitrile, acétonitrile, phénol...) [6-7]. Ces répliques carbonées ont été caractérisées par des techniques multi-échelles (DRX, adsorption de gaz (N₂, CO₂), SAXS, XPS, thermodesorption programmée...) [8-11] et testées pour différentes applications brièvement présentées dans le dernier paragraphe.

Exemples de matériaux carbonés à porosité organisée

A titre d'exemple, nous présentons dans cet article des matériaux carbonés préparés suivant le procédé schématisé en *figure 1* et obtenus à partir

des silices mésoporeuses MCM-48 et SBA-15 et de trois précurseurs carbonés (propylène, sucrose et brai de pétrole) [5, 12-13]. Pour un matériau hôte donné, la quantité de carbone qui peut être introduite dans sa porosité dépend de la nature du précurseur carboné et de la voie d'imprégnation choisie. L'infiltration par voie gazeuse permet un remplissage de la porosité totale de la silice qui peut être ajusté entre 20 et 60 % exprimé en volume. Un taux de remplissage minimum de 20 % en volume est nécessaire pour maintenir la cohésion du matériau carboné après élimination de la silice et observer une organisation de la porosité [11]. Un remplissage total de la porosité n'est toutefois pas possible sans avoir un dépôt de carbone sur la surface externe de la silice. Des informations sur les conditions de préparation et les caractéristiques des répliques carbonées obtenues sont données dans le *tableau II*. Ces répliques présentent les caractéristiques générales suivantes :

- une morphologie à l'échelle microscopique similaire à celle du matériau hôte silicique,
- une structure cristallographique identique à celle de la silice,
- une organisation de la porosité montrée sur la *figure 2*,
- un ordre structural faible à l'échelle atomique,
- une densité du squelette carbonée proche de 2,
- une surface spécifique et un volume poreux élevés,
- une distribution poreuse constituée de mésopores (2 < D < 50 nm), micropores (D < 2 nm) incluant des supermicropores (0,7 < D < 2 nm).



Figure 1 - Représentation schématique du procédé de synthèse de réplique à l'échelle nanométrique.

Un matériau silicique à mésoporosité organisée (SBA-15, structure hexagonale) est imprégné par un précurseur carboné carbonisé ou pyrolysé. Une réplique carbonée mésoporeuse à porosité organisée est obtenue après dissolution de la silice dans HF ou NaOH.

Tableau II - Conditions de synthèse et caractérisations de répliques carbonées préparées à partir des solides mésoporeux MCM-48 et SBA-15 et des précurseurs carbonés sucrose, brai et propylène.

a : paramètre de maille calculé à partir des diffractogrammes de rayons X ; Ssp : surface spécifique des matériaux mesurée par adsorption d'azote à 77 K par la méthode BET ; Vp : volume poreux total déterminé à partir des isothermes d'adsorption pour P/Po = 0,95 ; Vmicro : volume microporeux mesuré par adsorption de CO₂ à 273 K en appliquant la relation de Dubinin-Radushkevitch.

Matériaux		Structure	a (nm)	Ssp (m ² /g)	V _p (cm ³ /g)	Taille des pores	
Matériaux hôtes	MCM-48	cubique	8,6	1 340	1,1	2,6 nm	
	SBA-15	hexagonale	11,3	807	1,0	5,2 nm	
Répliques carbonées	Matériau hôte	Précurseur carboné	a (nm)	Ssp (m ² /g)	V _p (cm ³ /g)	Vmicro (cm ³ /g)	Conditions de synthèse
	MCM-48	Propylène	8,4	850	0,6	0,11	
		Brai	7,6	1 300	0,7	0,24	
		Sucrose	7,4	2 000	1,1	0,34	
	SBA-15	Propylène	10,5	720	0,6	0,10	
		Brai	10,3	930	0,6	0,19	
Sucrose		9,4	1 500	1,1	0,34		

Quels que soient le matériau, le précurseur carboné et la voie d'imprégnation choisies, il faut toujours bien avoir à l'esprit que la porosité du matériau carboné final a trois origines :

- la porosité issue de la dissolution des parois siliciques,
- la porosité due au remplissage partiel de la porosité de la silice ou la porosité générée lors de la carbonisation,
- la porosité résultante dans les parois carbonées liée au mécanisme de carbonisation, éventuellement de graphitisation.

Cette situation rend la caractérisation texturale du carbone complexe. L'ensemble des études que nous avons menées sur ces matériaux montre que le matériau carboné n'est pas une réplique parfaite du matériau hôte. Les caractérisations multi-échelles de ces matériaux ont mis en évidence que des modifications structurales et texturales peuvent alors lieu lors de la synthèse ou des traitements thermiques ultérieurs, modifications qui ne dépendent pas seulement du matériau hôte mais qui sont également influencées par la nature du précurseur carboné et de la méthode d'imprégnation.

A titre d'exemple, une contraction importante du paramètre de maille et une augmentation très significative de la surface spécifique avec la formation d'une microporosité additionnelle sont observées lorsque le sucrose est utilisé

comme précurseur carboné (voir *tableau II*). La surface des carbones issus du sucrose présente également un caractère moins hydrophobe que les matériaux préparés à partir des précurseurs propylène et brai. L'équilibre hydrophobe/hydrophile dépend de la teneur en surface de sites actifs. Cette teneur peut être déterminée par des méthodes chimiques de surface (chimisorption d'oxygène, XPS) et spectroscopique (diffusion Raman) [14]. Le matériau carboné obtenu à partir du brai de pétrole Ashland 204 présente des propriétés texturales intermédiaires entre celles des matériaux préparés avec le sucrose et le propylène. La cohésion du matériau carboné préparé à partir de la silice SBA-15 est assurée par la présence d'un réseau microporeux qui forme des ponts entre les canaux cylindriques (voir *figure 1*), ce qui explique le caractère micro/mésoporeux de la réplique carbonée. La taille des pores du matériau hôte SBA-15 peut être ajustée entre 2 et 10 nm en modifiant les conditions de synthèse de la silice, ce qui permet de préparer des carbones avec des tailles de pores variables. Des travaux récents sur l'imprégnation de la SBA-15 avec de l'alcool furfurylique ont montré qu'il est possible de contrôler la porosité due au remplissage partiel en faisant varier la teneur en alcool furfurylique introduite [7]. En résumé, même si le concept d'élaboration de ces matériaux « à la carte » est simple, l'obtention d'une réplique

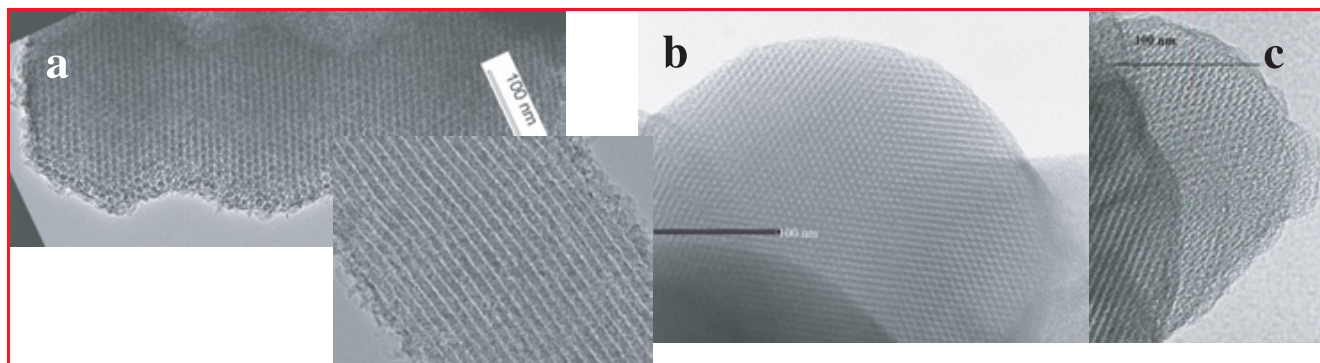


Figure 2 - Images caractéristiques en microscopie électronique en transmission de répliques carbonées.

(a) Carboné obtenu à partir du propylène et de la silice SBA-15 ; (b) carbone traité à 1 200 °C obtenu à partir du brai et de la silice SBA-15 ; (c) carbone préparé à partir du sucrose et de la silice MCM-48.

parfaite reste complexe. Néanmoins, il est possible de préparer des matériaux carbonés avec des propriétés texturales et structurales contrôlées et modulées.

Stabilité thermique des répliques carbonées

Les répliques carbonées sont préparées à des températures inférieures à 1 000 °C. Sachant que l'ordre structural d'un carbone prégraphitique peut être considérablement amélioré par traitement thermique, on peut donc se poser la question suivante : est-il possible de synthétiser un matériau carboné avec une structure poreuse organisée et des parois carbonées graphitisées ? Les résultats de nos travaux montrent que l'organisation de la porosité est maintenue jusqu'à 1 500 °C. Au-delà de cette température, la texture poreuse s'effondre progressivement. Toutefois, des surfaces spécifiques comprises entre 100 et 250 m²/g sont mesurées après traitement à 2 500 °C.

Deux observations marquantes sont à signaler. La première concerne l'évolution structurale des répliques carbonées qui est différente de celle des carbones massiques de même nature. Par exemple, le sucrose, connu pour être un précurseur non graphitisable, conduit à une réplique carbonée avec un ordre structural proche de celui du graphite [15]. L'effet inverse est observé pour le brai ; il est attribué à un effet de confinement lié à la porosité de la silice qui empêche une orientation à longue distance de la mésophase initiale. Ainsi, le milieu confiné délimité par la porosité du matériau hôte influence donc fortement le mécanisme de formation des répliques carbonées nanostructurées.

La deuxième observation marquante concerne les valeurs de densité réelle des répliques carbonées. Indépendamment du matériau hôte et du précurseur carboné, une densité de l'ordre de 1,4 est mesurée après traitement thermique à 2 500 °C. Cette valeur est souvent significative de la présence d'une microporosité fermée dans un carbone non graphitable. Nos résultats nous laissent penser qu'une fraction de la microporosité initialement présente dans la réplique carbonée s'est fermée au cours du traitement thermique.

En conclusion, le traitement thermique conduit à la formation de répliques carbonées microporeuses avec des murs partiellement graphitisés pour lesquelles le mécanisme de formation est fortement influencé par le confinement imposé par la porosité du matériau hôte.

Applications potentielles

Les répliques carbonées ainsi obtenues ont été testées pour diverses applications. Le carbone lui-même a été utilisé comme matériau hôte pour préparer des matériaux oxydes à porosité organisée ou du carbure de silicium à surface spécifique élevée (> 100 m²/g) [16-17]. Les répliques carbonées ont également été testées comme électrodes dans les supercondensateurs en milieux aqueux et organique et comme élément poreux de stockage de l'hydrogène par voie gazeuse ou électrochimique [18-20]. Les performances des répliques carbonées étant largement supérieures à celles des carbones massiques préparés à partir des mêmes précurseurs carbonés, les propriétés particulières obtenues par la synthèse en milieu confiné sont donc tout à fait bénéfiques pour les applications envisagées.

Ces matériaux, pour lesquels il est possible de contrôler et d'ajuster les propriétés structurales et texturales, nous ont également permis d'avancer de manière considérable dans la compréhension des mécanismes de stockage de l'énergie.

Nous avons ainsi pu montrer expérimentalement le rôle fondamental joué par la microporosité lors du stockage de l'hydrogène [19-20] ou par la mésoporosité existante lors de la charge de la double couche électrique dans un supercondensateur [18].

Il apparaît qu'un choix judicieux du rapport micro/mésoporosité permet d'améliorer les performances des matériaux carbonés faisant intervenir le transport de matière. L'étude du mouillage par les liquides ou celle du mécanisme d'adsorption par les gaz, associée à des mesures de perméabilité dans ces matériaux, sont des problèmes fondamentaux pour la plupart des futures applications.

Conclusion

Des matériaux carbonés à porosité organisée et à surface spécifique élevée peuvent donc être préparés par une technique de réplique. Leurs caractéristiques physico-chimiques sont alors contrôlées par un choix judicieux du matériau hôte et du précurseur carboné.

Ce concept de synthèse dépasse toutefois largement le cas des matériaux carbonés et est actuellement très utilisé pour la synthèse d'un très grand nombre de solides inorganiques poreux. Cet essor est en partie lié au développement de matériaux hôtes originaux et à la possibilité d'obtenir des matériaux à porosité hiérarchisée englobant des tailles allant du nanomètre à l'échelle macroscopique.

Ces travaux se sont largement inscrits dans le cadre de programmes nationaux soutenus par le CNRS, le Ministère de la Recherche et la Région Alsace que les auteurs remercient tout particulièrement.

Notes et références

- [1] Le terme poreux fait référence à la nomenclature IUPAC qui définit les micropores comme des pores de taille inférieure à 2 nm, les mésopores comme des pores de taille comprise entre 2 et 50 nm, et les macropores comme des pores de taille supérieure à 50 nm. Le terme nanoporeux est également souvent employé ; il n'est toutefois pas clairement défini et se réfère à des matériaux poreux avec des pores de taille nanométrique.
- [2] Py X., Guillot A., Cagnon B., Activated carbon porosity tailoring by cyclic sorption/decomposition of molecular oxygen, *Carbon*, **2003**, *41*, p. 1533.
- [3] Les zéolithes constituent une classe d'aluminosilicates cristallisés formés par un squelette rigide anionique comportant des canaux et/ou des cavités bien définis. Les cavités contiennent des cations métalliques échangeables (Na⁺, K⁺, etc.) et des molécules « invitées » échangeables (ex : l'eau dans les zéolithes naturelles). Environ 40 zéolithes naturelles existent et plus de 130 nouveaux types structuraux ont été synthétisés. La découverte par les chercheurs de Mobil Oil de la synthèse de silices mésoporeuses organisées a permis de développer un grand nombre d'autres matrices siliciques à mésoporosité organisée avec des tailles de pores ajustables entre 2 et 10 nm et des surfaces spécifiques de l'ordre de 1 000 m²/g. Ces matériaux sont préparés à partir d'un précurseur silicique, d'un tensioactif et d'autres réactifs servant à contrôler le pH et la force ionique de la solution. Une fois le gel bien séché et réticulé, la phase contenant le tensioactif est éliminée (Patarin J., Lebeau B., Zana R., *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, **2002**, *7*, p. 107).
- [4] Ma Z., Kyotani T., Tomita., Synthesis methods for preparing microporous carbons with a structural regularity of zeolite Y, *Carbon*, **2002**, *40*, p. 2367.
- [5] Ryoo R., Joo S.H., Jun S., Synthesis of highly ordered carbon molecular Sieves via template-mediated structural transformation, *J. Phys. Chem. B*, **1999**, *103*, p. 7743.
- [6] Lee J., Han S., Hyeon T., Synthesis of new nanoporous carbon materials using nanostructured silica materials as template, *J. Chem. Mat.*, **2004**, *14*, p. 478.
- [7] Schüth F., Endo- and exotemplating to create high surface area inorganic materials, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2003**, *42*, p. 3604.
- [8] Kaneda, M., Tsubakiyama T., Carlsson A., Sakamoto Y., Ohsunu T., Terasaki O., Structural study of mesoporous MCM-48 and carbon networks synthesized in the spaces of MCM-48 by electron crystallography, *J. Phys. Chem. B*, **2002**, *106*, p. 1256.
- [9] Kruk M., Jaroniec, M., Kim T.W., Ryoo R., Synthesis and characterization of hexagonally ordered carbon nanopipes, *Chem. Mater.*, **2003**, *15*, p. 2815.

- [10] Darmstadt H., Roy C., Kaliaguine S., Kim T.W., Ryoo R., Surface and pore structures of CMK-5 ordered mesoporous carbons by adsorption and surface spectroscopy, *Chem. Mater.*, **2003**, *15*, p. 3300.
- [11] Ehrburger-Dolle F., Morfin I., Geissler E., Bley F., Livet F., Vix-Guterl C., Saadallah S., Parmentier J., Reda M., Patarin J., Small-angle X-Ray scattering and electron microscopy investigation of silica and replicas with ordered porosity, *Langmuir*, **2003**, *19*, p. 4303.
- [12] Gadiou R., Vix-Guterl C., Properties of carbon materials synthesized inside a confined space, *Annales de Chimie-Physique Science des Matériaux*, **2005**, *30*, p. 4.
- [13] Vix-Guterl C., Saadallah S., Vidal L., Reda M., Parmentier J., Patarin J., Template synthesis of a new type of ordered carbon structure from pitch, *J. Mat. Chem.*, **2003**, *13*, p. 2535.
- [14] Vix-Guterl C., Couzi M., Trinquecoste M., Dentzer J., Delhaes P., Surface characterization of carbon multiwall nanotubes: comparison between surface active sites and Raman spectroscopy, *J. Phys. Chem. B*, **2004**, *108*, p. 19361.
- [15] Vix-Guterl C., Didion A., Saadallah S., Couzi M., Rouzaud J.-N., Gadiou R., Delhaes P., Graphitization of porous carbon synthesized in a confined medium, *Carbon*, **2006**, à paraître.
- [16] Parmentier J., Vix-Guterl C., Saadallah S., Reda M., Illescu M., Werckmann J., Patarin J., Organised mesoporous silica synthesised by a nanoscale duplication of an ordered mesoporous carbon material using a one-step gas phase process, *Chem. Lett.*, **2003**, *32*(3), p. 262.
- [17] Parmentier J., Dentzer J., Vix-Guterl C., Patarin J., Formation of SiC via carbothermal reduction of mesoporous MCM-48 silica phase: a new route to produce SiC with high surface area SiC, *Ceramics International*, **2002**, *28*, p. 1.
- [18] Jurewicz K., Vix-Guterl C., Frackowiak E., Saadallah S., Reda M., Parmentier J., Patarin J., Béguin F., Capacitance properties of ordered porous carbon materials prepared by a templating procedure, *J. Phys. Chem. Solids*, **2004**, *65*, p. 287.
- [19] Vix-Guterl C., Frackowiak E., Jurewicz K., Friebe M., Parmentier J., Béguin F., Electrochemical energy storage in ordered porous carbon materials, *Carbon*, **2005**, *43*(12), p. 2160.
- [20] Gadiou R., Saadallah S., Piquero T., David P., Parmentier J., Vix-Guterl C., The influence of textural properties on the adsorption of hydrogen on ordered nanostructured carbons, *Micro. Meso. Mat.*, **2005**, *79*, p. 121.



C. Vix-Guterl

Cathie Vix-Guterl

est chercheur CNRS à l'Institut de Chimie des Surfaces et Interfaces (ICSI) de Mulhouse¹ ; elle y est responsable de l'équipe « Carbones et Céramiques ».



J. Parmentier

Julien Parmentier

est maître de conférences à l'Université de Haute Alsace et mène ses recherches au Laboratoire de matériaux à porosité contrôlée (LMPC)².



P. Delhaes

Pierre Delhaes

est directeur de recherche émérite du CNRS au Centre de Recherches Paul Pascal de Bordeaux³.

- 1 ICSI, UPR CNRS 9069, 15 rue Jean Starcky, BP 2488, 68057 Mulhouse Cedex.
Tél. : 03 89 60 87 45. Fax : 03 89 60 87 99.
Courriel : Cathie.Vix@uha.fr
- 2 LMPC, UMR CNRS 7016, 3 rue Alfred Werner, 68093 Mulhouse.
Tél. : 03.89.33.68.87. Courriel : J.Parmentier@uha.fr
- 3 Centre de Recherche Paul Pascal, UPR CNRS 8641, Avenue Albert Schweitzer, 33600 Pessac.
Tél. : 05 56 84 56 94. Courriel : delhaes@crpp-bordeaux.cnrs.fr

COLLECTION SCIENCES DES MATÉRIAUX

**LES ZÉOLITHES**

Un nanomonde au service de la catalyse

M. Guisnet et F. R. Ribeiro

Ce livre présente les aspects fondamentaux et appliqués des matériaux zéolithes et des réactions qu'ils catalysent. Le lecteur pourra consulter en annexe des documents rappelant de façon succincte les notions de base sur la catalyse hétérogène, les réacteurs utilisés industriellement et au laboratoire, etc. L'ouvrage est destiné aux élèves des Écoles d'Ingénieurs, aux étudiants de Master et de Doctorat. Il servira également aux industriels et chercheurs.

• Mars 2006 • 2-86883-826-X • 276 pages • 32 €

NOUVEAUTÉ

**LE VERRE**

Science et technologie

J. Barton et C. Guillemet

Ce livre, unique ouvrage français scientifique et technologique verrier de référence paru depuis trente ans, aborde à la fois les aspects théoriques ainsi que les applications industrielles. Il arrive à point pour transmettre et initier au verre un plus large public ; s'adressant aux chercheurs, enseignants et professionnels du verre, il permettra également à toute autre personne d'acquérir des connaissances de base sur ce matériau.

• 2005 • 2-86883-789-1 • 442 pages • 49 €

**LES MATÉRIAUX MICRO ET MÉSOPOREUX**
Caractérisation

Groupe Français des Zéolithes - F. Thibault-Starzyk, coord.

Cet ouvrage complet est consacré aux méthodes de caractérisation des matériaux microporeux : il permet une mise à niveau des connaissances sur la base des développements récents de ce secteur et propose également de découvrir la richesse de ce nouvel univers, de plus en plus présent dans l'industrie et la vie quotidienne.

• 2004 • 2-86883-713-1 • 304 pages • 42 €

**ENDOMMAGEMENTS ET RUPTURE DES MATÉRIAUX**

D. François

Cet ouvrage traite de l'endommagement des matériaux sous de nouveaux angles comme l'ordre et le désordre, la demande industrielle ou l'incidence des connaissances concernant les endommagements sur la maintenance. Un nouveau traitement de cette problématique hautement stratégique au plan industriel, économique et scientifique...

• 2004 • 2-86883-714-X • 250 pages • 39 €



Disponibles chez votre libraire habituel
ou sur www.edpsciences.org

