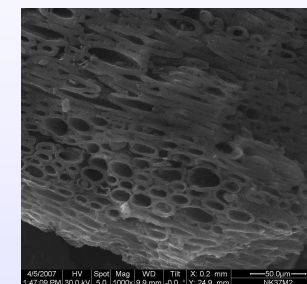
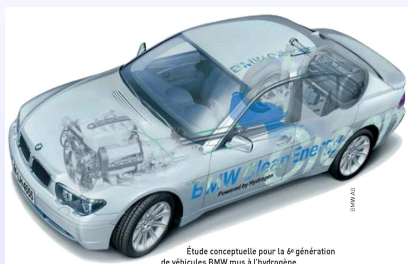


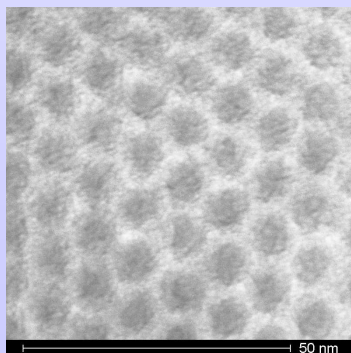
'Carbon and Ceramic' Group



Nouveaux matériaux carbonés
Application au stockage d'énergie

Cathie VIX-GUTERL

cathie.vix@uha.fr





Institut de Chimie des Surfaces et Interfaces (ICSI)

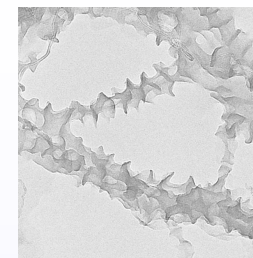
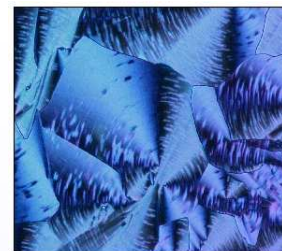
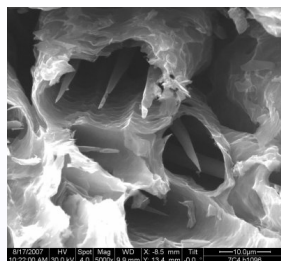
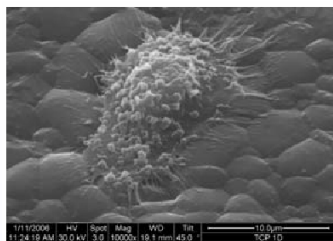
www.icsi.uha.fr

UPR CNRS 9069 – Département Chimie

80-100 personnes (50 permanents)

Directeur: Dimitri IVANOV – Directeur-Adjoint: Cathie VIX

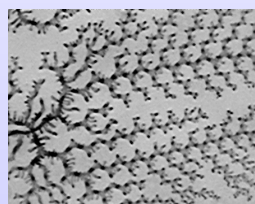




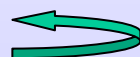
Axe principal

Étude de la Chimie et de la Physique des Surfaces et Interfaces des Matériaux et Multi-Matériaux

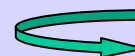
Recherche multi- et trans-disciplinaire de l'échelle atomique ou
nanoscopique à l'échelle macroscopique



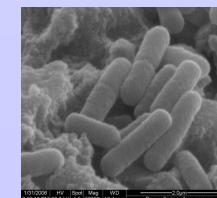
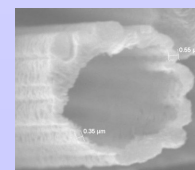
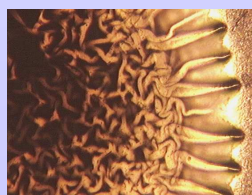
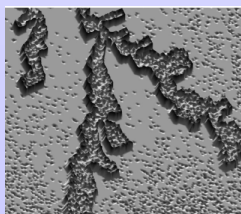
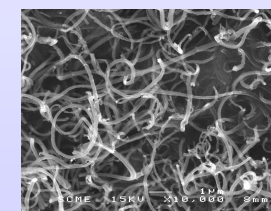
POLYMERES



MATERIAUX



CARBONES, CERAMIQUES



*Synthèse contrôlée
de surface, interface, interphase
Architecture originale*

*Etude du mécanisme de synthèse
Influence du milieu de confinement*

Caractérisation multi-échelle

*Structure, texture, chimie de surface
morphologie*

Développement de techniques

SAXS/WAXS

XPS (surface –objet biologiques)

➤ *Adhesion and bioadhesion*

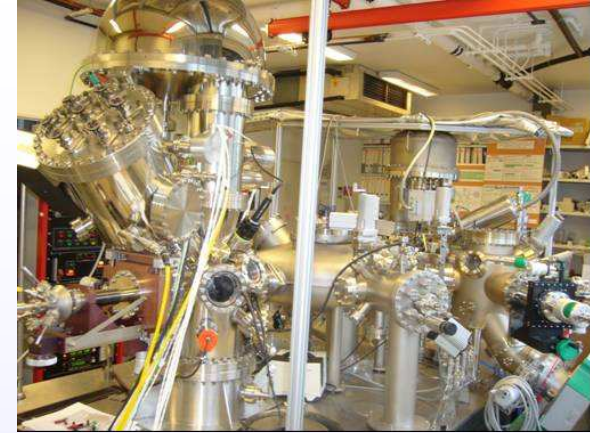
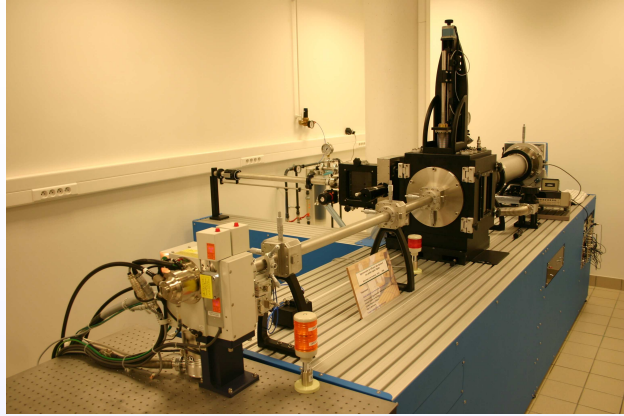
➤ *Physics at the interface*

➤ *Carbon and hybride materials*

Propriétés spécifiques - Performance - Applications

*Adhésion, usure, réactivité solide-gaz ou solide-liquide,
renforcement, mouillabilité, adsorption sélective, propriétés
mécaniques,,bio-adhésion, stockage d'énergie, interaction surface-
objets biologiques,...*

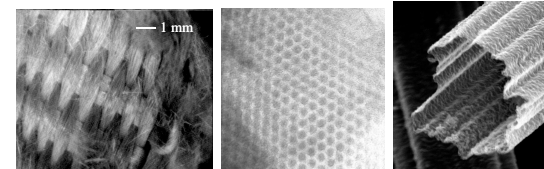
*Corrélation performance/caractéristiques, Compréhension mécanismes
interfaciaux, maîtrise et amélioration des performances*



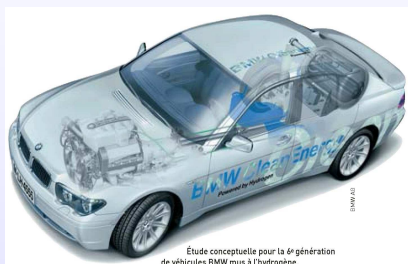
Surfaces – Matériaux

**Synthèse → Caractérisation → Performance → Applications
multi-échelle**

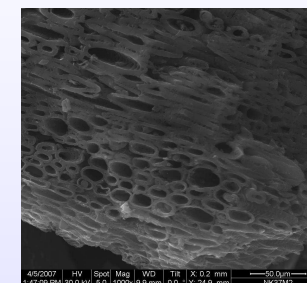




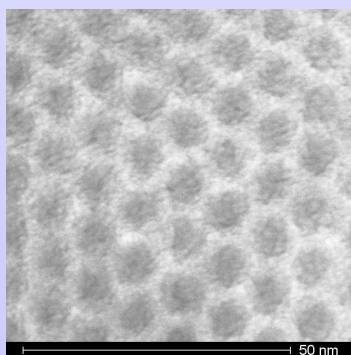
'Carbon and Ceramic' Group



Étude conceptuelle pour la 6^e génération de véhicules BMW musés à l'hydrogène.



Nouveaux matériaux carbonés *Application au stockage d'énergie*



CONTEXTE SCIENTIFIQUE et INDUSTRIEL

Matériaux carbonés et céramiques: applications dans des secteurs d'activités stratégiques

- **Stockage d'énergie**
(batterie lithium-ions, supercondensateurs, stockage d'hydrogène)
- **Environnement (adsorption de polluants)**
- **Aéronautique, aérospatial (matériaux composites C/C, C/SiC)**
- **Biomatériaux**

**Différents types de matériaux carbonés
(graphite, carbones activés, (nano) fibres de carbones,
nanotubes de carbone, carbone pyrolytique....)**

- ☞ **Matériau léger, solide à température ambiante**
- ☞ **Surface spécifique élevée, volume poreux total élevé**
- ☞ **Bonne conductivité électrique, bonnes propriétés mécaniques**
- ☞ **Inerte en milieu non oxydant**
- ☞ **Possibilité de préparer une large palette de matériaux carbonés**
 - ✓ *morphologie (poudre, fibres, nanotubes, monolithe)*
 - ✓ *texture (surface spécifique, distribution poreuse, porosité hiérarchisée - micro (< 2nm), méso (2-50 nm) et macro (> 50 nm))*
 - ✓ *degré de graphitisation*
 - ✓ *chimie de surface*

Moduler la structure, texture, la morphologie et la chimie de surface

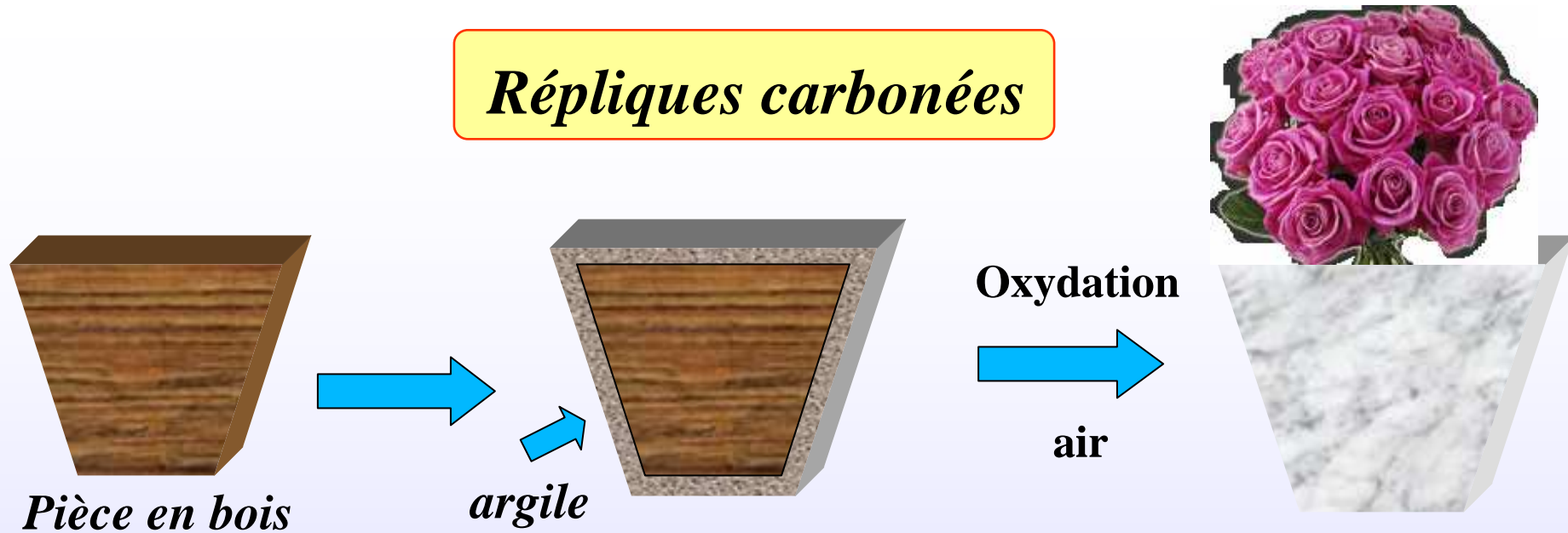
Performance \longleftrightarrow **structure, texture et chimie de surface**

Corrélations ? \Rightarrow 'Matériaux Modèles'

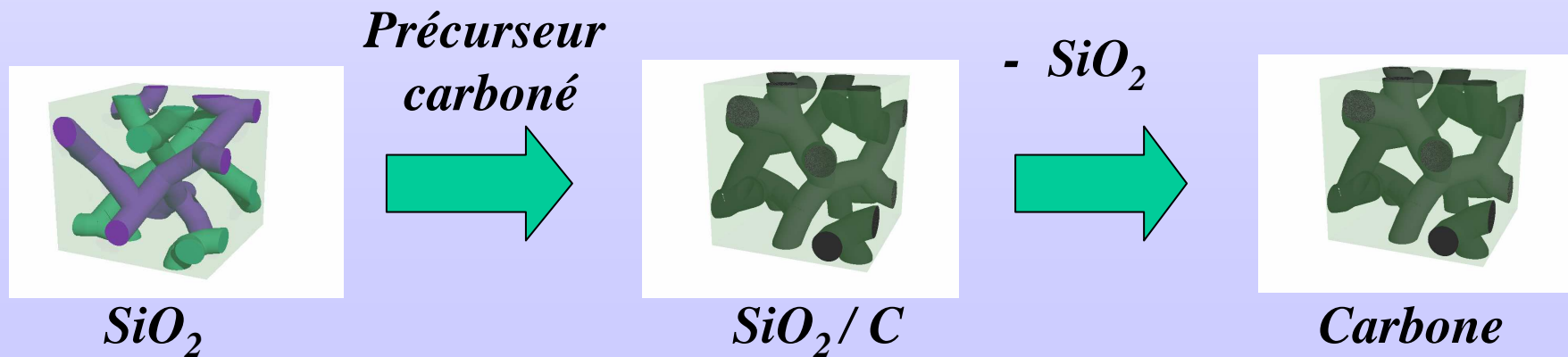
**Matériaux carbonés nanostructurés
obtenus par une technique de réplique**

Templated carbon materials

Répliques carbonées

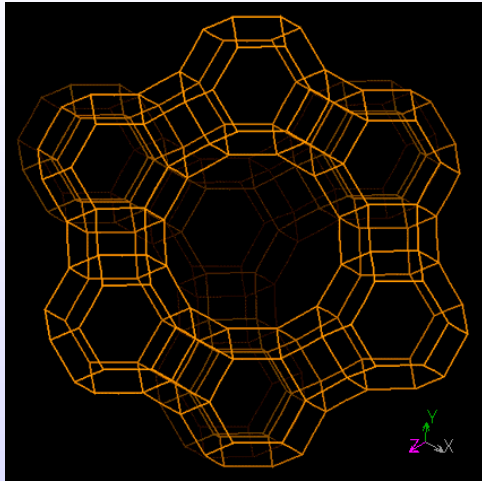


Procédé transféré à l'échelle nanométrique → procédé de réplique



Choix de la matrice

zéolithe

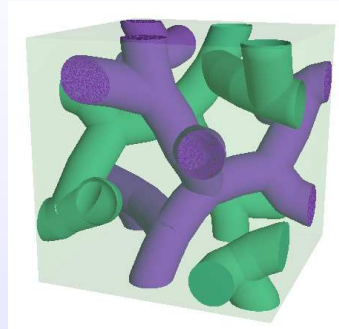


Faujasite NaY

Cellule : 2,4 nm.

Pore : 0,8-1 nm.

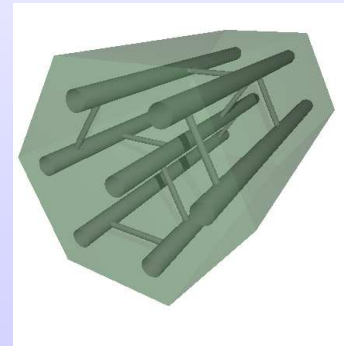
Silices mésoporeuses



MCM-48

Cellule : 8 nm.

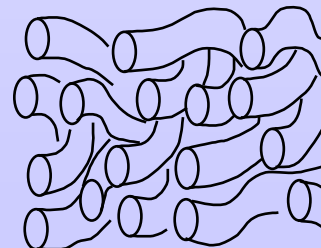
Pore : 3-4 nm.



SBA-15

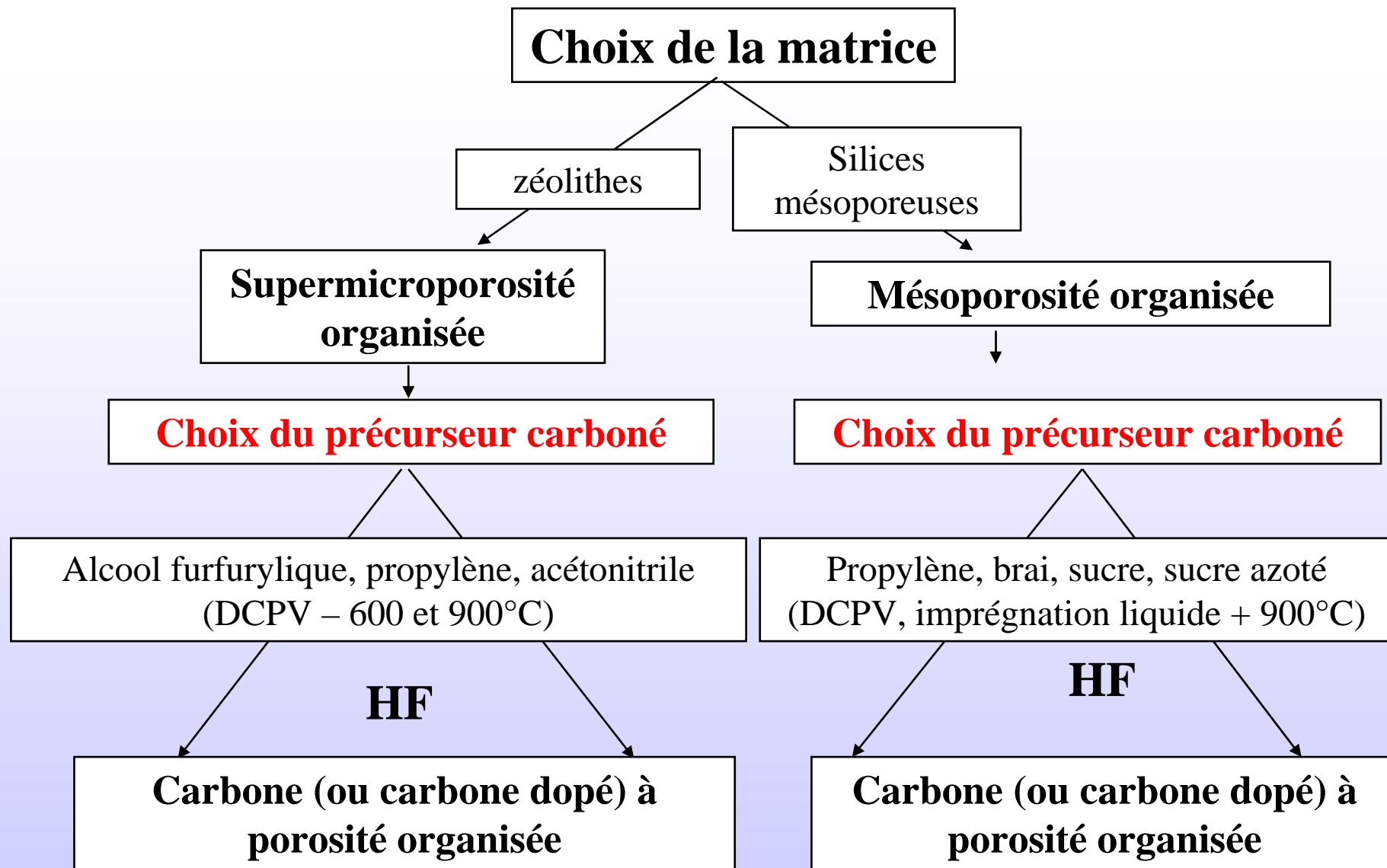
Cellule : 10-11 nm.

Pore : 7 nm.



MSU: 3D

Pore : 2 nm.

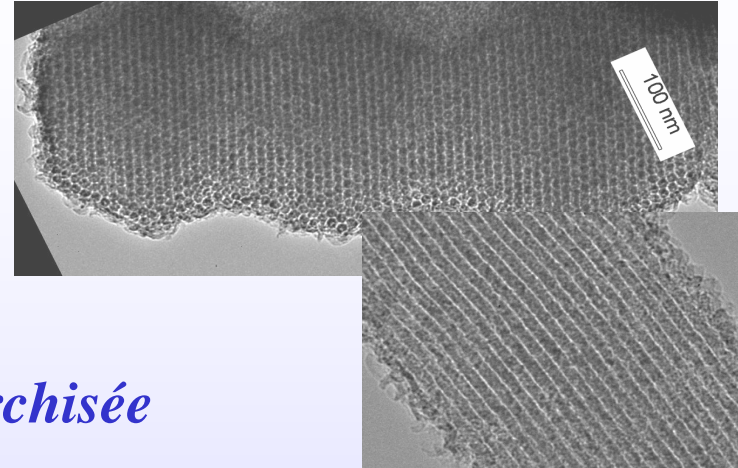


Ryoo et al. J. Phys. Chem. B 1999, C. Vix-Guterl et al. J. Mat. Chem. 2003, R. Gadiou et C. Vix-Guterl, J. Phys. Chem. Solids (2008), R. Campesi, M. Latroche, C. Vix-Guterl et al., Carbon 2008

*Caractérisations en termes de structure, texture et chimie de surface
XRD, Raman, adsorption de gaz (N_2 and CO_2), SEM, TEM, XPS, TPD*

☞ *Matériaux carbonés micro/mésoporeux*

- ↳ *microporosité étroite ($D < 0.7 \text{ nm}$)*
- ↳ *microporosité secondaire ($0.7 < D < 2 \text{ nm}$)*
- ↳ *mésopores ($2 < D < 10 \text{ nm}$)*



☞ *Porosité interconnectée organisée – hiérarchisée*

☞ *Surface spécifique et V_p total élevés ($> 2000 \text{ m}^2/\text{g}$, $V_p > 1 \text{ cm}^3/\text{g}$)*

☞ *Morphologie diverse (poudre, monolithe...)*

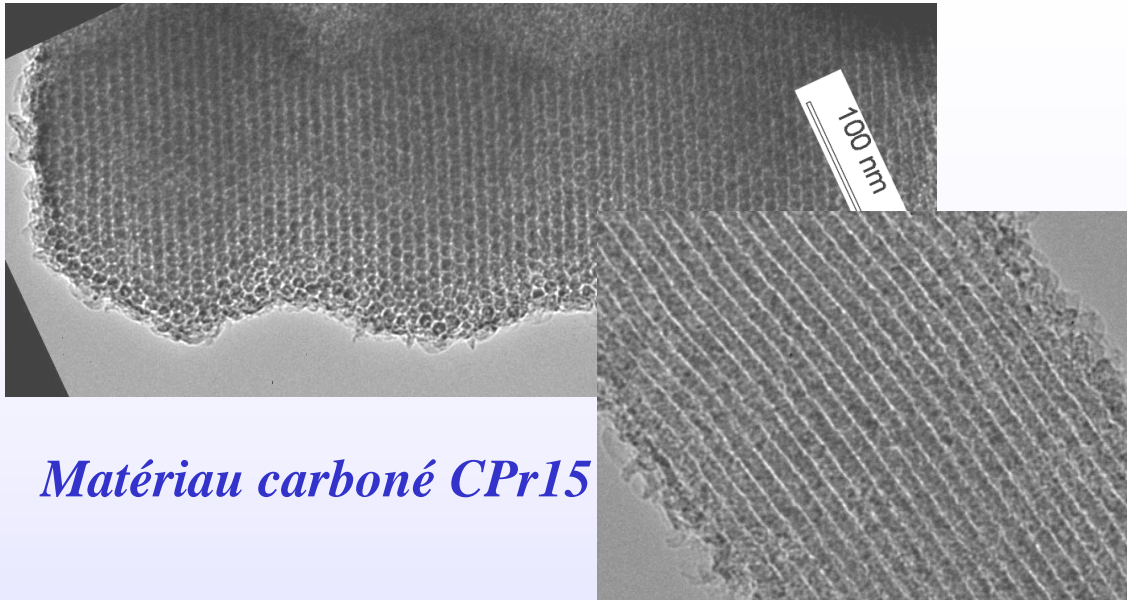
☞ *Introduction d'hétéroéléments → azote*

Synthèse du carbone en milieu confiné → confère des propriétés spécifiques

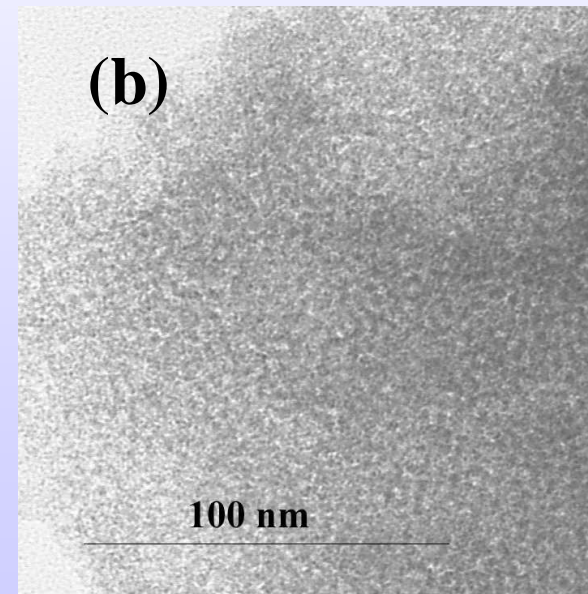
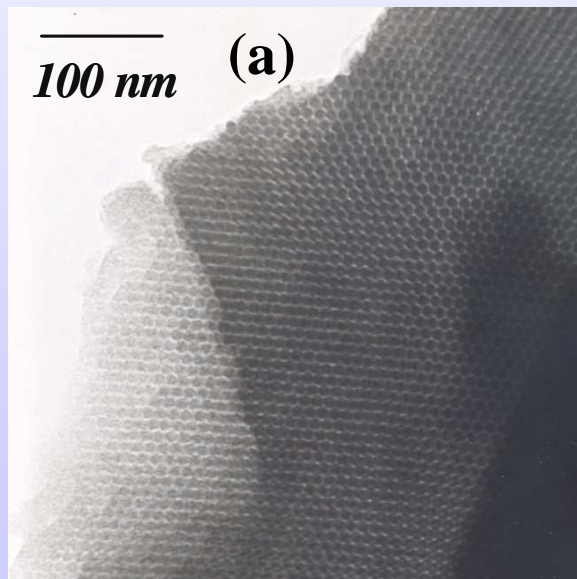
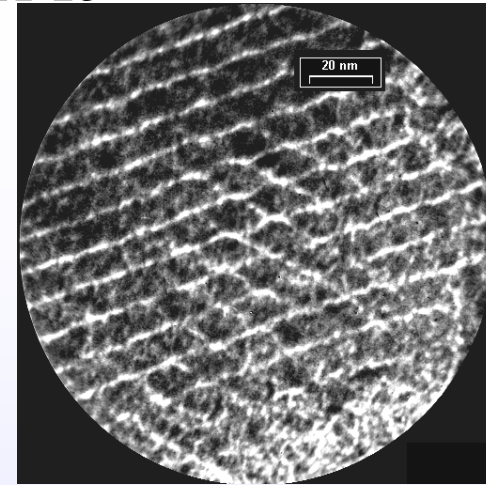
Annales de Chimie-Physique -Sciences des Matériaux, 30, 4 (2005)

Carbon, 44, 15, 3348-3352 (2006)

Précurseur carboné: propylène - Template: SBA-15

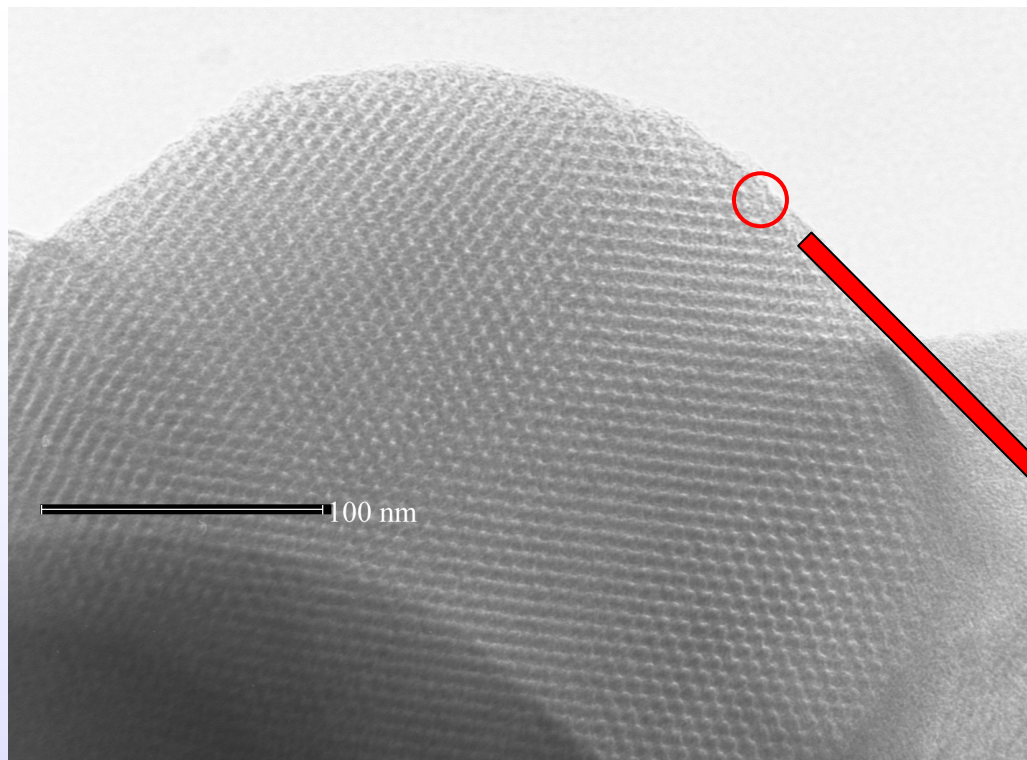


Matériau carboné CPr15



Précurseur carboné: brai - Template: SBA-15

*Précurseur carboné: sucrose
Template: MSU-X*

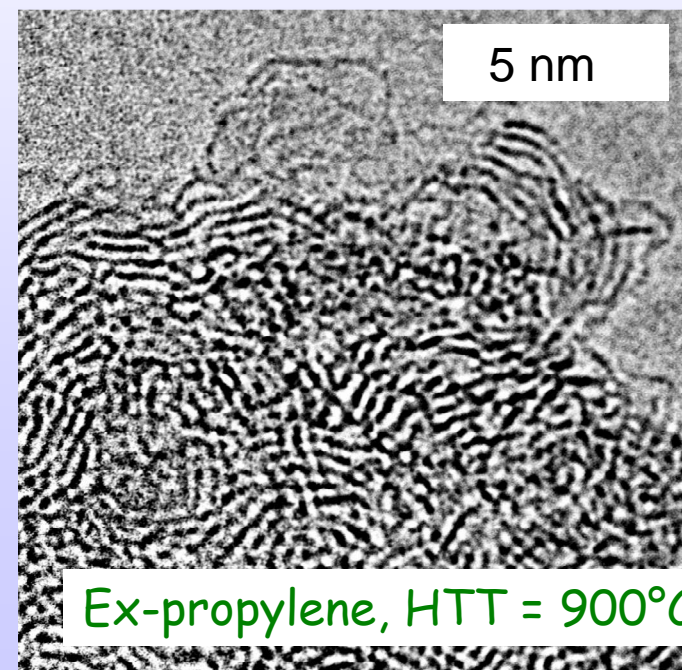


Traitement à 900°C

CPr48

**Murs mésoporeux sont constitués
de plans graphitiques
de tailles nanométriques
plus ou moins désorientés**

**Caractère microporeux
∇ Précurseur carboné**



Stabilité thermique des répliques carbonées

➤ $HTT < 1500^{\circ}\text{C}$

- ↳ *Préserve l'ordre à longue distance*
- ↳ *disparition de la microporosité*

➤ $HTT > 1500^{\circ}\text{C}$

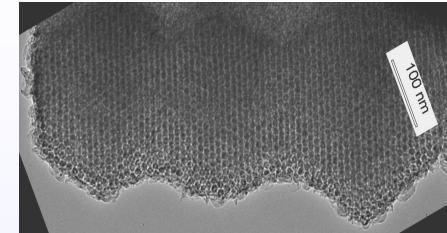
- ↳ *perte graduelle de l'ordre à longue distance*
- ↳ *évolution de la structure graphitique*

➤ $HTT: 2500^{\circ}\text{C}$

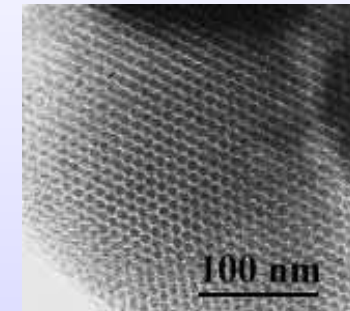
- ↳ *Carbons mésoporeux ($30 < TSA < 300 \text{ m}^2/\text{g}$)*
($30 \text{ m}^2/\text{g}$ (MCM-48) et $200 \text{ m}^2/\text{g}$ (SBA-15))

- ↳ $d \approx 1.4 \rightarrow$ **carbone vitreux**
fermeture de la microporosité pendant le traitement

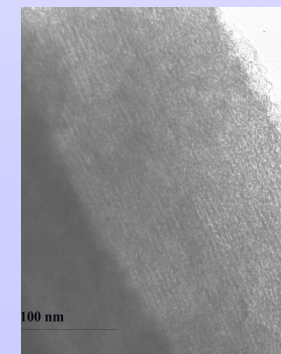
- ↳ *Réplique d'une organisation locale*



HTT: 1400°C



HTT: 2500°C



Influence du précurseur carboné?

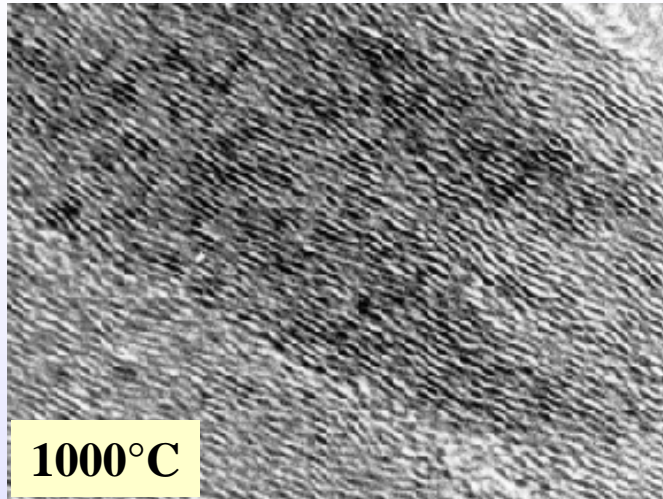
Influence du milieu confiné ?

*En collaboration avec
Dr. J.N. Rouzaud (HRTEM)
Ecole Nationale Supérieure de Paris*

Sélection de deux types de précurseurs

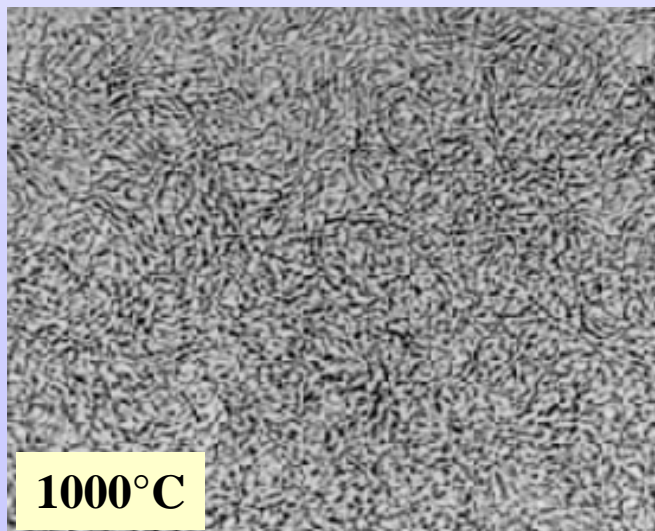
1. Graphitisable (brai, propylène)

=> Microtexture lamellaire



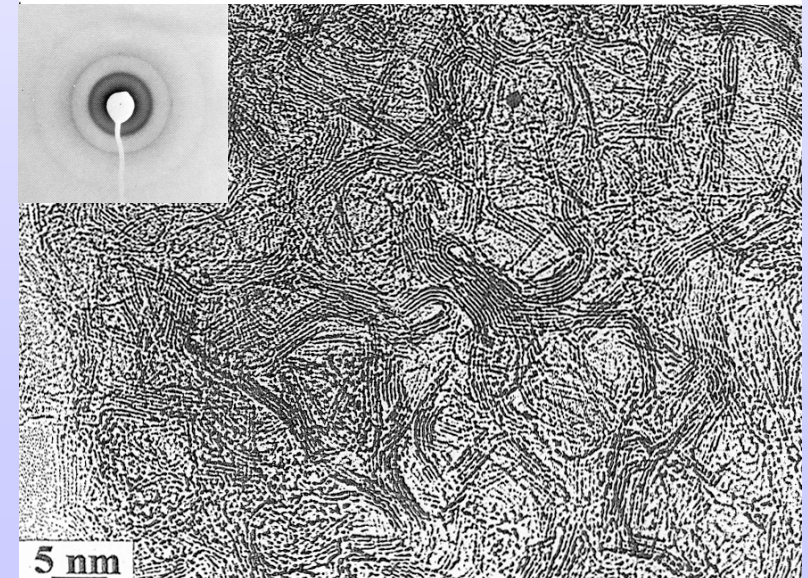
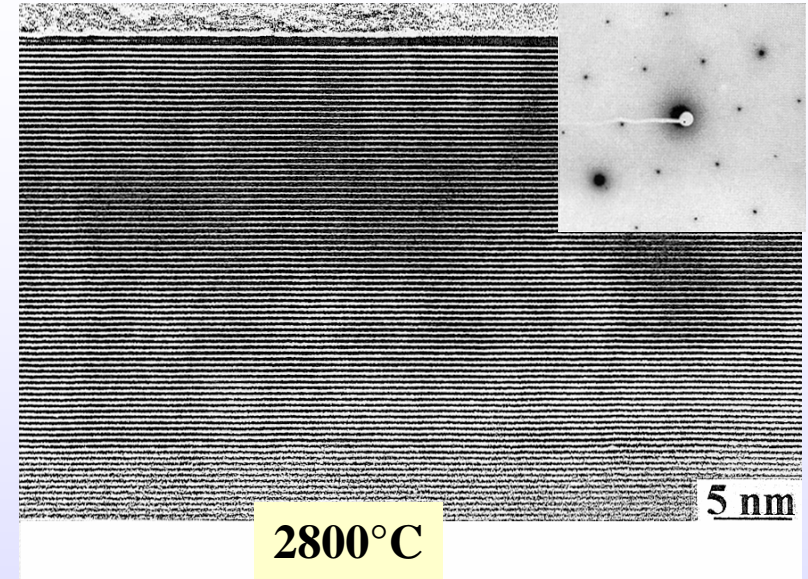
2. Non-graphitisable (sucrose)

=> Microtexture microporeuse



HTT
→

Graphite

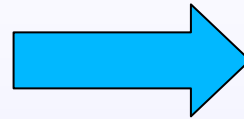
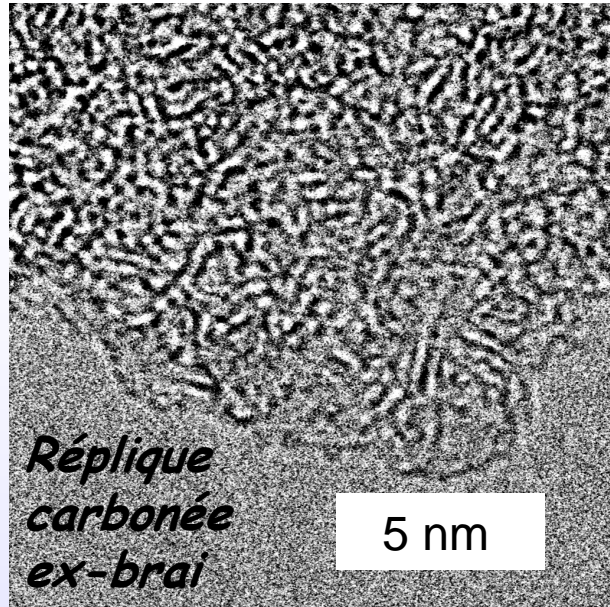


La microtexture
du coke
gouverne sa
graphitabilité

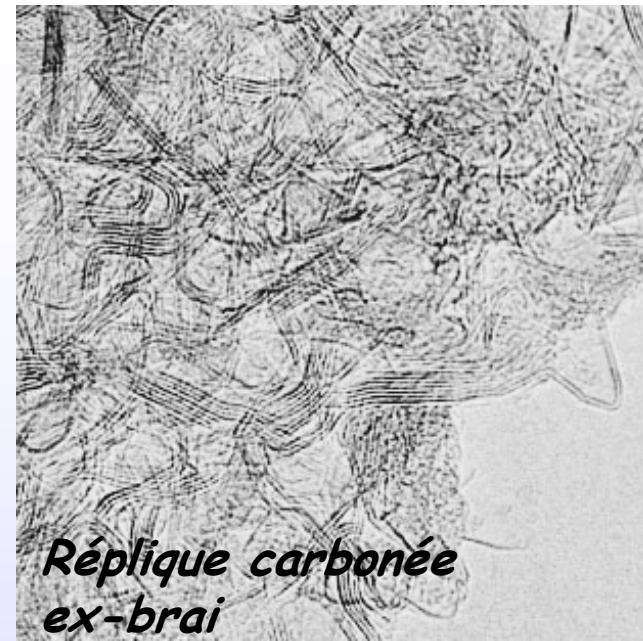
A. Oberlin
Carbon 1984

Carbon poreux turbostratique

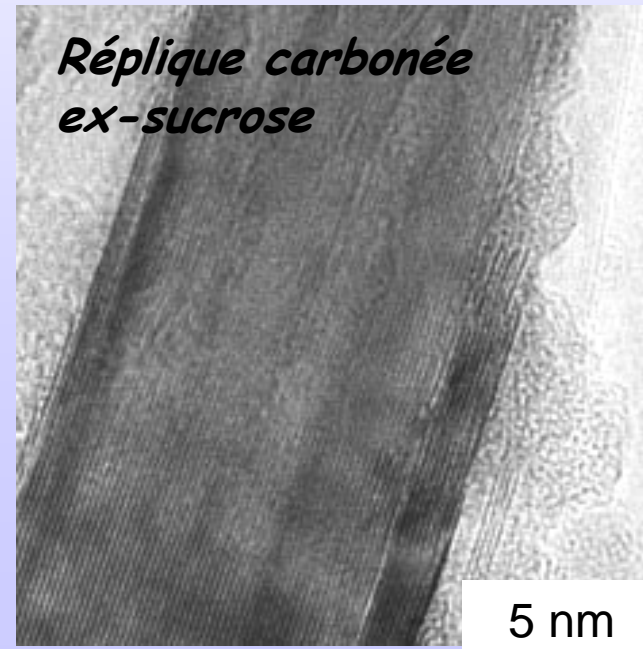
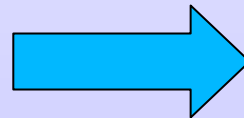
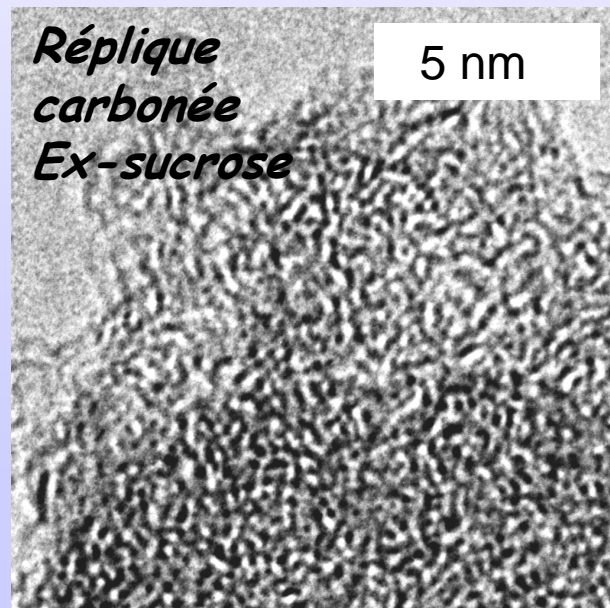
HTT:900°C



HTT:2500°C



Effet du confinement

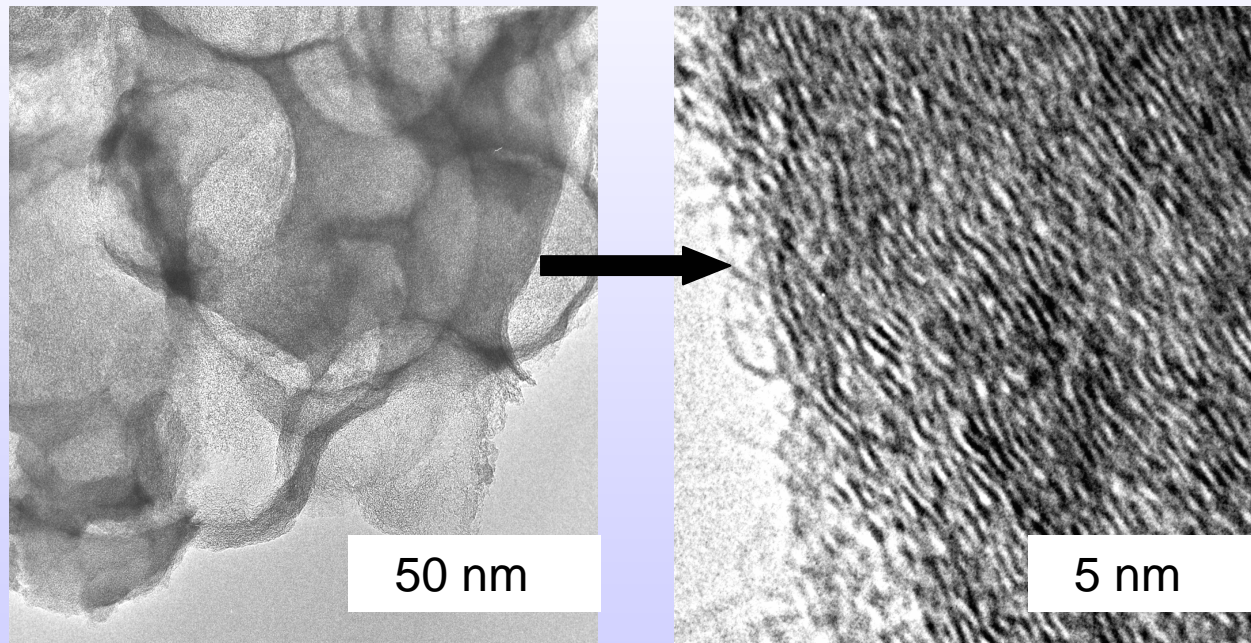


Contraction du paramètre de maille (9%)

⇒ Contraintes mécaniques résiduelles anisotropiques

HTT > 1400°C : relaxation de cette contrainte + élimination O₂

⇒ Orientation préférentielle des plans de graphènes



⇒ Microtexture lamellaire

graphite peut être formé à 2500°C

Influence du milieu confiné

Propylène (DCPV)

Matrice hôte (silice) impose une limitation géométrique

Pyrocarbone non-lamellaire

Brai

Matrice hôte (silice) impose une limitation géométrique

*Les sphérules de mésophases ne peuvent être formées :
Brai carbonisé à l'intérieur des pores de tailles nanométriques
ce qui empêche la formation de mésophase de taille micrométrique*

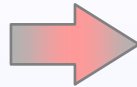
Sucrose

Pré-orientation à longue distance

Carbon, 44, 15, 3348-3352 (2006)

Répliques carbonées

☞ Matériau hôte



SiO₂ et ZrO₂ à porosité organisée

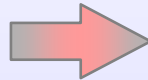
Chem. Lett., 32, (3), 262 (2003)

SiC avec une surface spécifique élevée (100 m²/g)

J. Parmentier, C. Vix-Guterl

Micro. and Meso. Mat. 62, 87 (2003)

☞ Biomaterial

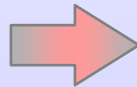


Hydroxyapatite nanoporeuse

Adsorption sélective de protéines

R. Gadiou, C. Vix-Guterl, soumis (2008)

☞ Energy storage medium



Eletrodes pour supercondensateurs

Jurewicz, K. et al. J. Phys. Chem. Solids. 2004, 65, 287

C.Vix-Guterl, Carbon, 43,6,1293 (2005)

Milieu de stockage d'hydrogène

R. Gadiou, C. Vix-Guterl,

Micro. and Meso. Mat.,79, 1-3,121,2005

Adsorption, 11, 823-827 (2005)

C.Vix-Guterl, Carbon, 43,6,1293 (2005)

R. Pellenq, R.Gadiou; C. Vix et al.

Langmuir (2006), J. Phys. Chem C (2007)

Sources d'énergie



Supercondensateurs

Critères pour électrodes

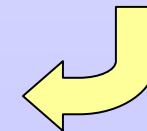
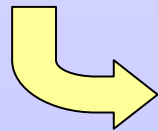
- ↳ *conductivité électrique importante*
- ↳ *Surface spécifique élevée (accumulation de charge)*
- ↳ *bonne connectivité entre les pores, mouillabilité*

Piles à combustible

Stockage d'hydrogène dans un matériaux poreux par voie gazeuse ou électrochimique

Critères

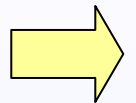
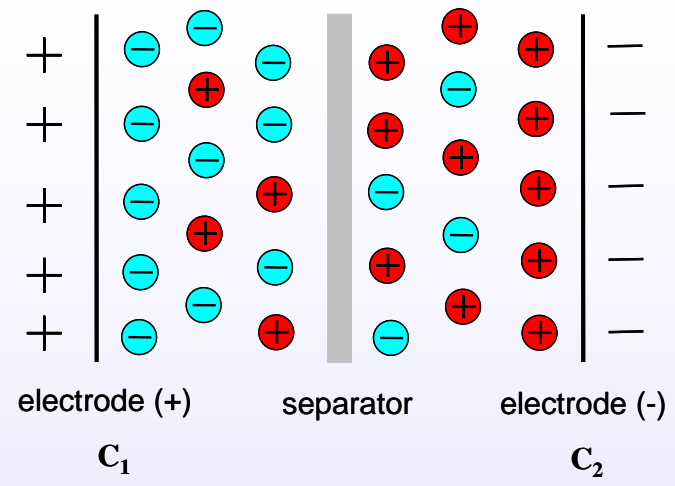
- ↳ *Capacité de stockage ≥ 6.0 wt%*
- ↳ *Réversibilité des cycles adsorption/desorption*
- ↳ *Faible coût, faible toxicité, faible risque d'explosion*



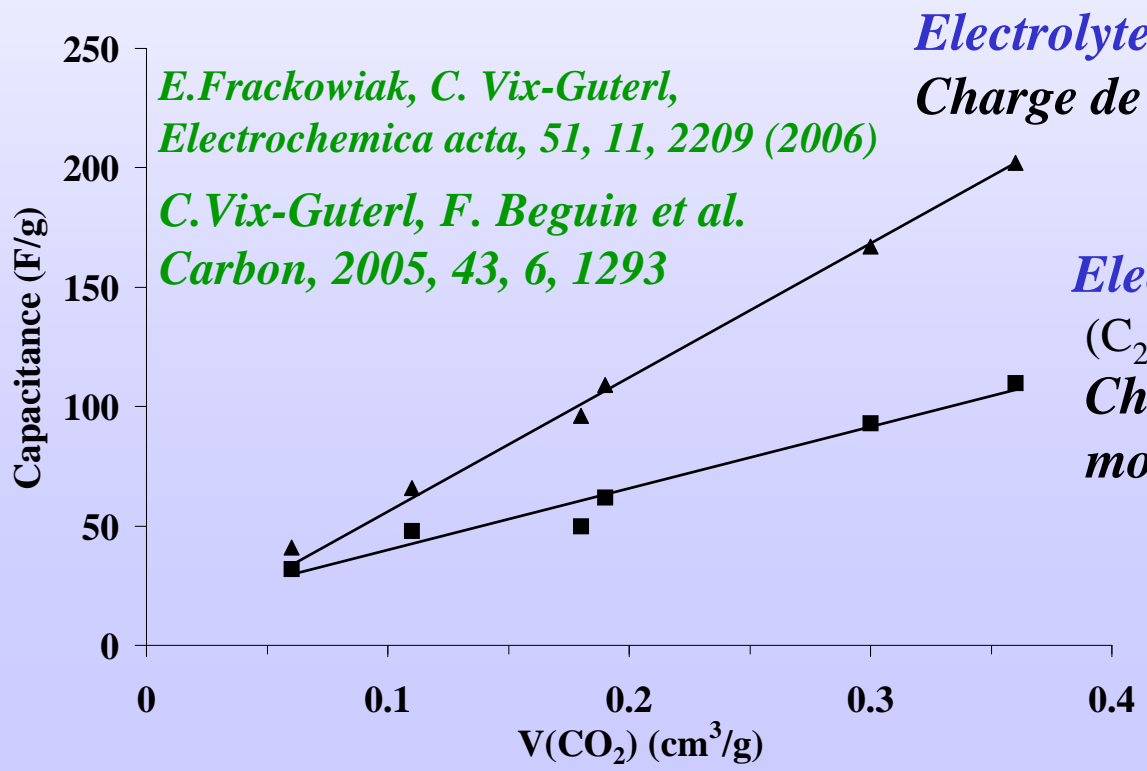
Carbones nanostructurés

**Répliques carbonées
comme électrodes pour supercondensateurs**

Supercondensateurs



$$C = A S \text{ (surface spécifique)}$$



*E. Frackowiak, C. Vix-Guterl,
Electrochimica acta, 51, 11, 2209 (2006)*
*C. Vix-Guterl, F. Beguin et al.
Carbon, 2005, 43, 6, 1293*

Electrolyte aqueux
Charge de la DCE → micropores

Electrolyte organique
(C₂H₅)₄N⁺ (0.74 nm), BF₄⁻ (0.49 nm)
Charge de la DCE → moins efficace dans les micropores

☞ Performance des électrodes carbonées pour supercondensateurs

- *Importance de l'ultramicroporosité ($D < 0.7$ nm) pour la charge de la DCE*
- *porosité du carbone : microporosité, distribution poreuse rapport micro/mésoporosité*
- *Organisation de la porosité a peu d'influence*
- *Importance de l'interconnectivité*
- *Electrolyte (organique < aqueux)*

Présence d'azote ?

Carbone activés → augmentation de la capacité

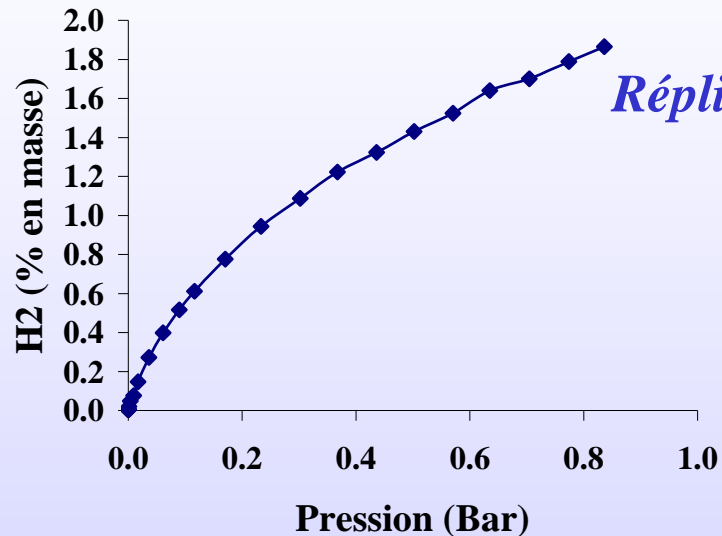
*E.Frackowiak *Electrochimica acta*, 51, 11, 2209 (2006)*

**Répliques carbonées
comme milieu de stockage de l'hydrogène**

Adsorption d'hydrogène

Plusieurs méthodes: volumétrie, manométrie, gravimétrie, TDP

ICSI: montage manométrique - $P = 1E^{-4}$ to 7 MPa – (77K – 273K)

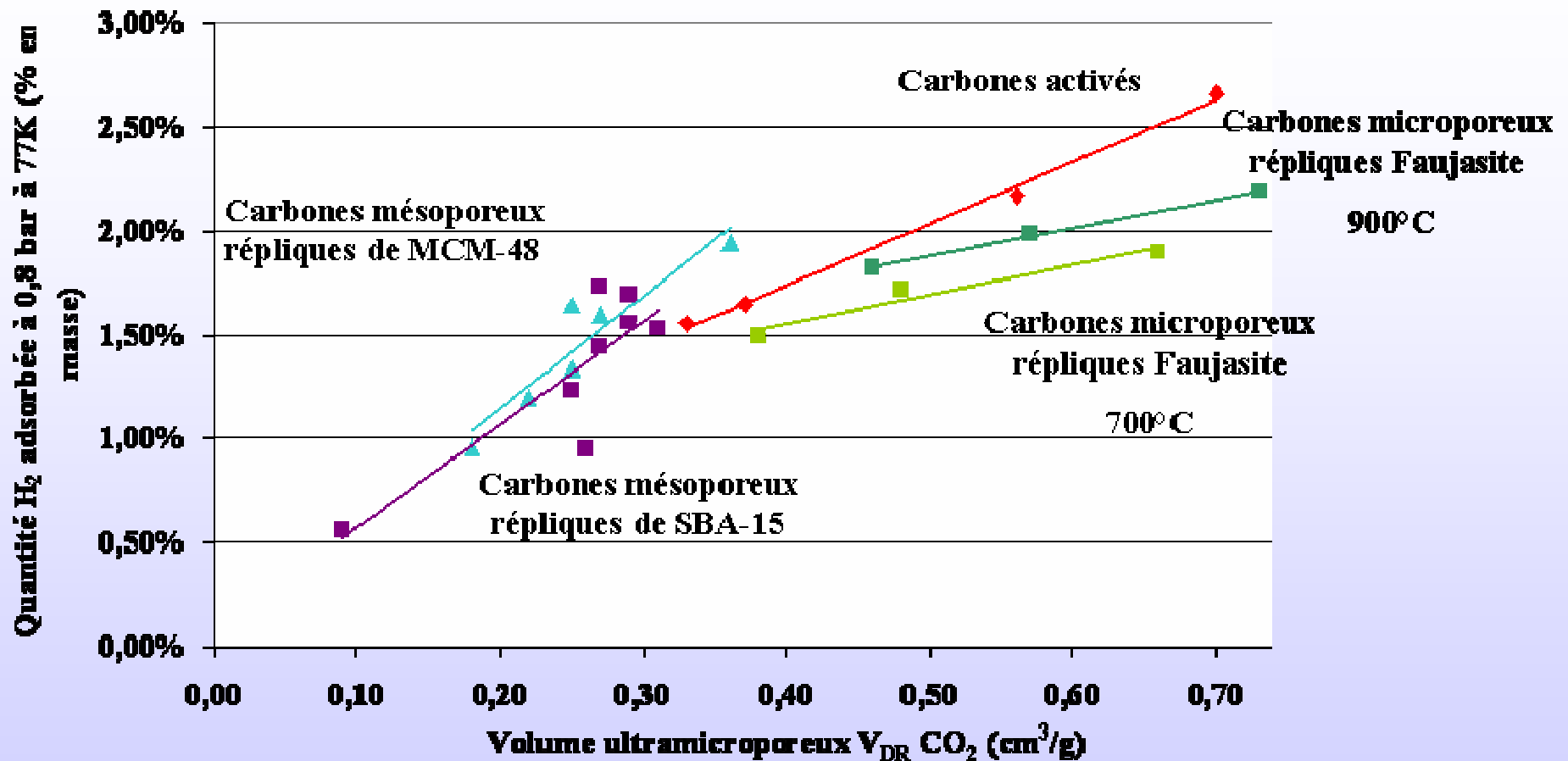


Répliques carbonées \approx 2.5 wt. % at 0.1MPa (77K)
4.5 wt. % at 1 MPa (77K)

R. Gadiou, C. Vix-Guterl
Micro. and Meso. Mat., 79, 1-3, 121 (2005),
Adsorption 11, 823 (2005)

- ↳ Quantité d' H_2 adsorbé augmente avec la pression
- ↳ Résultats homogènes, peu dispersés
- ↳ Pas de corrélation avec la surface spécifique des nanostructures carbonées
- ↳ Correlation entre la capacité de stockage et le volume microporeux $V(CO_2)$
Importance de la microporosité étroite $D < 0.7$ nm
Même tendance pour stockage électrochimique

Comparaison H₂ adsorbé à 77K - Efficacité des ultramicropores (D<0.8nm)



Pas de relation universelle.

Influence de l'ultramicroporosité, mais pas unique paramètre :

⇒ influence de la structure du matériau.

Influence de la synthèse en milieu confiné

<i>Matériaux carbonés</i>	TSA (m ² /g)	V(CO ₂) (cm ³ /g)	Qté d'hydrogène stocké [mAh/g]
<i>Réplique carbonée (sucrose)</i>	1740	0.34	388 (1.4 wt%)
<i>Sucrose carbonisé</i>	372	0.19	37 (0.1 wt.%)

Influence de la préparation du carbone en milieu confiné sur la capacité de stockage d'hydrogène

Conclusion

- ☞ Formation de nanostructures carbonées à porosité organisée par un procédé de réplique à partir de zéolithes ou silices mésoporeuses

Caractéristiques du matériau carboné

texture et structure de la silice hôte

(MCM-48, SBA-15, MSU-X...,)

Du procédé utilisé pour infiltrer le carbone

Phase gazeuse ≠ imprégnation liquide

Matériaux à structure et texture contrôlées

- *Stabilité thermique - → 1500°C*
- *Influence du milieu confiné → degré de graphitisation*

Répliques carbonées → Matériaux modèles



***Caractéristiques optimales pour être utilisés
dans les systèmes de stockage d'énergie
(supercondensateurs, milieu de stockage d'énergie)***

- **Importance de la microporosité**
- **Rapport micro/mésoporosité approprié**
- **Corrélation entre capacité (supercondensateur) et stockage d'H₂ et le volume microporeux**

Le mécanisme de formation des nanostructures carbonées et les performances du matériau sont influencés par le milieu nanométrique confiné dans lequel est formé le carbone.

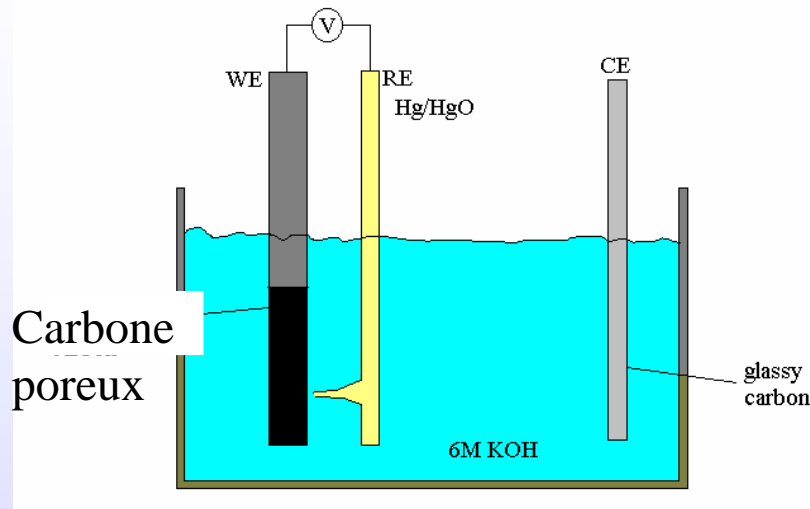
Remerciements

- **Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)**
- **Programme Matériaux du CNRS**
- **Agence National de la Recherche (ANR)**
- **Ministère français de la Recherche**
(ACI Energie, ACI Nanostructures)
- **Egide (PAI Polonium)**
- **Région Alsace**

Merci

Stockage électrochimique de l'hydrogène

Principe



Loi de Faraday law,

270 mAh/g = 1wt % d'hydrogène

*K. Jurewicz E. Frackowiak, F. Beguin
Appl. Phys. A 78, 981 (2004)*

Eq= -0.908V vs Hg/HgO

Avantages

- ↪ *Une étape :
production + stockage H₂*
- ↪ *Tamb. et Patm.*
- ↪ *Processus réversible*

Mécanisme ?

→ *Chimisorption d'hydrogène*

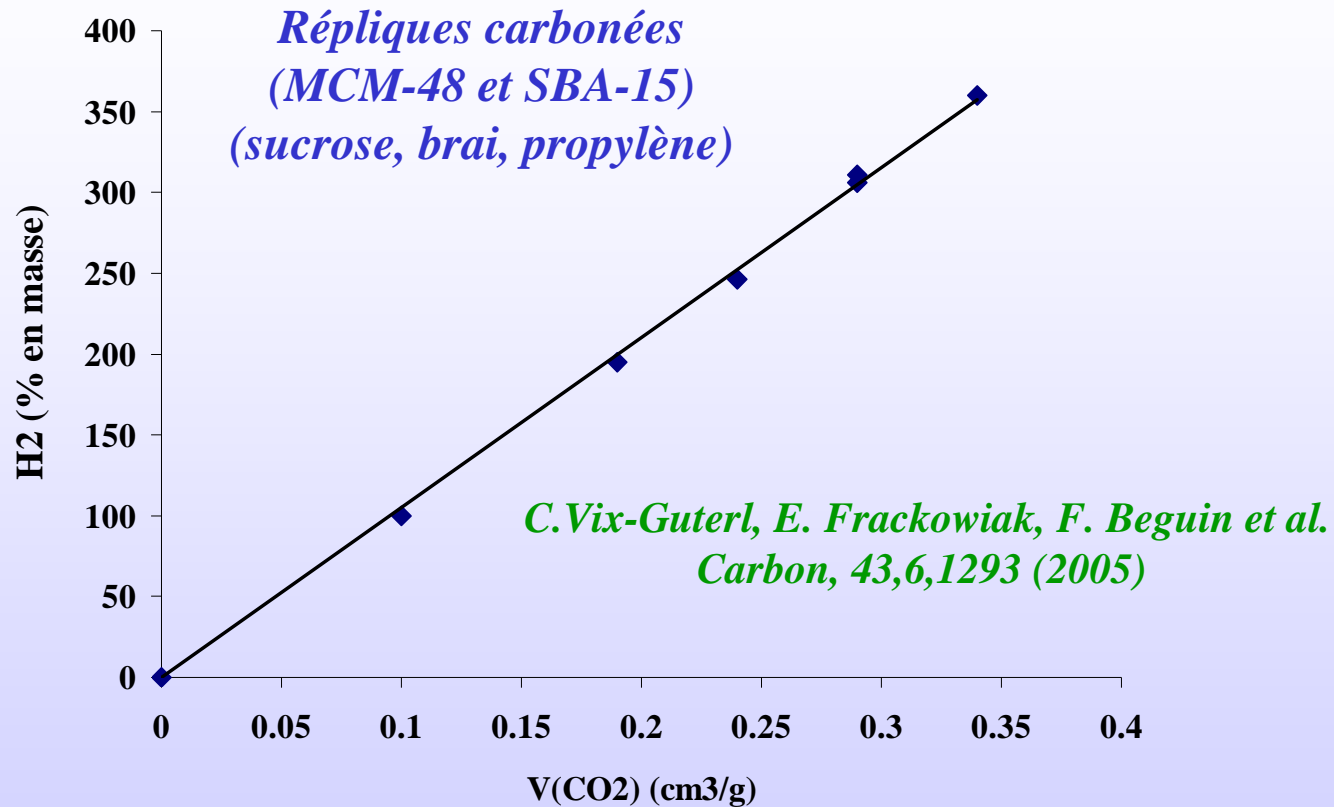
*F. Beguin, C. Vix-Guterl et al.
Carbon, 44, 2392 (2006)*

Stockage électrochimique de l'hydrogène

Tamb. – Patm. -

<i>Matériaux</i>	TSA (m²/g)	V(CO₂) (cm³/g)	H₂ stocké [% en masse]
<i>Réplique carbonée (sucrose)</i> <i>C.Vix-Guterl, F. Béguin et al.</i> <i>Carbon, 43,6,1293 (2005)</i>	2000	0.36	1.4
<i>Réplique carbonée (sucrose)</i> <i>Fang. Et al. J. Phys.Chem.B</i> <i>110 4875 (2006)</i>	1883	0.51	1.9
<i>Carbones activés</i> <i>Tissu activé</i> <i>K. Jurewicz</i> <i>Appl. Phys. A 78, 981 (2004)</i>	1390	0.30	1.85
<i>Carbone activé KOH</i> <i>F. Béguin – Electro.Acta 51</i> <i>2161 (2006)</i>	1310	0.34	1.1

Importance de la microporosité étroite (ultramicroporosité)
 $D < 0.7$ nm



- *Rôle de la chimie de surface (groupes oxygénés de surface)*
- *Présence d'azote - → peu d'influence*

On board hydrogen Storage Challenge (economical and environmental benefits)

Targets of the Departement of Energy of the United States (DOE)

- ☞ minimum 'gravimetric' and 'volumetric' capacity
2010 → 2 kWh/kg (6wt%)
1.5 kWh/L (0.045 kg H₂/l) } *whole system*
- ☞ reversibility of the charge/discharging processes

Storing enough hydrogen on vehicles to achieve a distance greater than 400 kms driving range is difficult !!

What are the options?

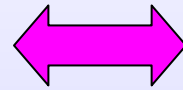
☞ Different techniques

- ↳ **Cyclic voltammetry**
(2 and 10mV/s)
- ↳ **Galvanostatic charge/discharge**
(0.2 A/g; 0.5 A/g)
- ↳ **Impedance spectroscopy**
(100 kHz to 1mHz)

CONCLUSION

Applications stockage de l'énergie

*Carbones activés
'Commercial'*



*Répliques carbonées
'Modèle'*

*Texture – Microporosité ($D < 0.7$ nm)
Chimie de surface - Groupes oxygénés de surface
Présence d'hétéroatome*

Carbones activés

Activation physique ou chimique de précurseurs carbonés synthétiques ou naturels

Nouveautés

- ☛ *Précurseurs biopolymères: alginate de sodium, bois*
E. Raymundo-Pinera, F. Leroux et F. Beguin, Adv. Mater. 18, 1877 (2006)
FC. Wu et al. J. Power Source 138, 321 (2004)
- ☛ *Introduction d'hétéroélément (azote)*
E. Frackowiak et al. Electrochimica acta 51 (11): 2209-2214 (2006)
- ☛ *Modifications des procédés d'activation chimiques (KOH)*
R.Gadiou – Adsorption 11 823 (2005)
D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano, Carbon (site WEB) (2006)
E. Raymundo-Pinero, F. Beguin et al. Carbon 44 (12) 2498 (2006)

Carbones poreux préparés par réplique

⇒ *Carbone microporeux*

↳ *zeolithe (3D) (NaY) - imprégnation en phase gazeuse (CVD)*

*Kyotani et al. - Carbon 40, 2367 (2002), Carbon, 43, 876 (2005),
Bull. Chem. Soc. Jpn, 79, 9, 1322 (2006)*

⇒ *Carbone mésoporeux (présence d'une microporosité)*

↳ *solides mésoporeux à porosité organisée ou vermiculaire
(MCM-48, SBA-15, MSU-X.....)*

↳ *deux voies d'imprégnation (liquide (+ carbonisation) ou gaz (CVD))*

↳ *précurseurs carbonés variés (sucrose, glucose, propylène,
alcool furfurylique, acétonitrile....)*

R. Ryoo, S.H. Joo, M. Kruk, M. Jaroniec, Adv. Mater. 13, 3184 (2001)

J. Lee, S. Han, T. Hyeon – J. Mater. Chem. 14, 478 (2004)

A.H. Lui, F. Schüth - Advanced Materials 18, 1793 (2006)

C. Vix-Guterl. J. Mat. Chem. 13, 2535-2539 (2003)

Chimie et Physique des Surfaces et Interfaces

Élaboration des surfaces, interfaces ou interphases

polymères, films minces de polymères, monocouches auto-assemblées (SAM's), mésophases colonnaires, carbones, céramiques, matériaux hybrides, polyaniline, nanoparticules...

polymérisation plasma, cristallisation, cristallogenèse, auto-assemblage (co-adsorption, greffage séquentiel, méthode d'impression, dépôt chimique en phase vapeur, fonctionnalisation)

Synthèse contrôlée

Compréhension des mécanismes (en milieu confiné)

Caractérisation multi-échelle

structure, texture, chimie de surface, morphologie, biologique

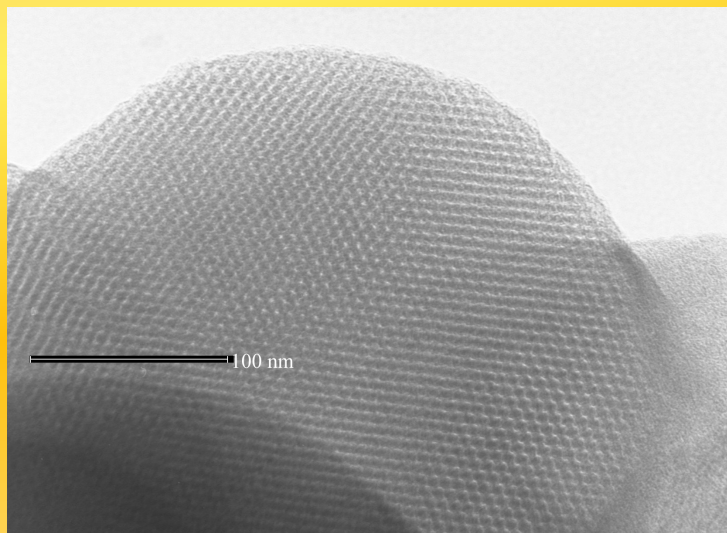
Diffusion de rayons-X, microscopies MET/MEB, AFM/STM, adsorption de gaz, calorimétrie, XPS, IR, Raman, ellipsométrie

De l'étude à l'élaboration des propriétés spécifiques

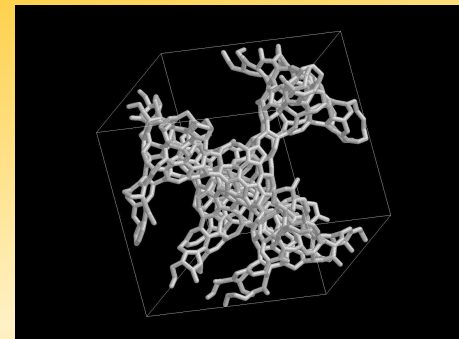
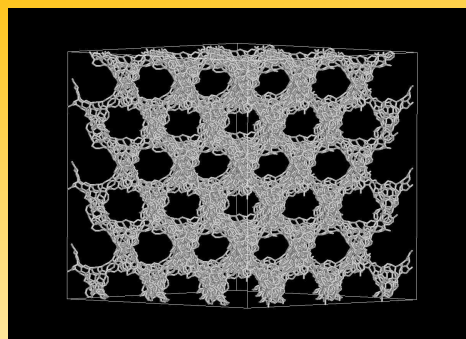
Adhésion, usure, réactivité solide-gaz ou solide-liquide, renforcement, mouillabilité, adsorption sélective, propriétés mécaniques, bio-adhésion, stockage d'énergie, bio-fonctionnalité, interaction surface-objets biologiques,...

Corrélation performance/caractéristiques – Compréhension mécanismes interfaciaux, maîtrise et amélioration des performances

Meso-microporous carbon templates (C.Vix *et al*, ICSI, Mulhouse)



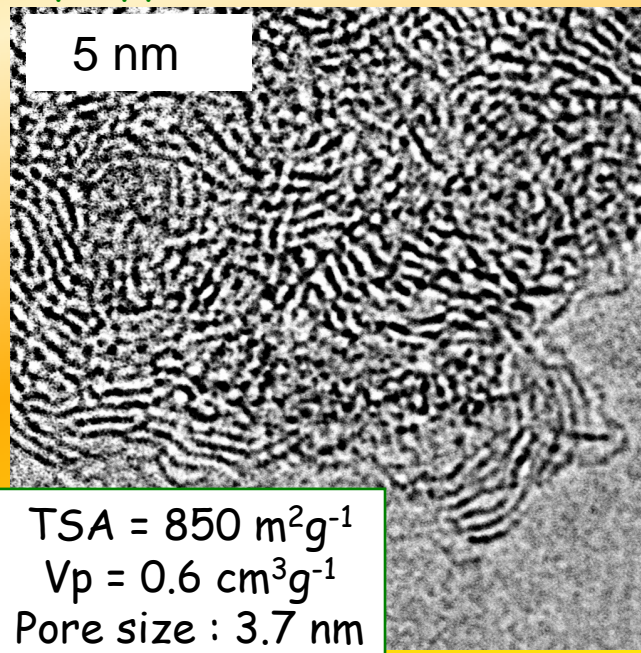
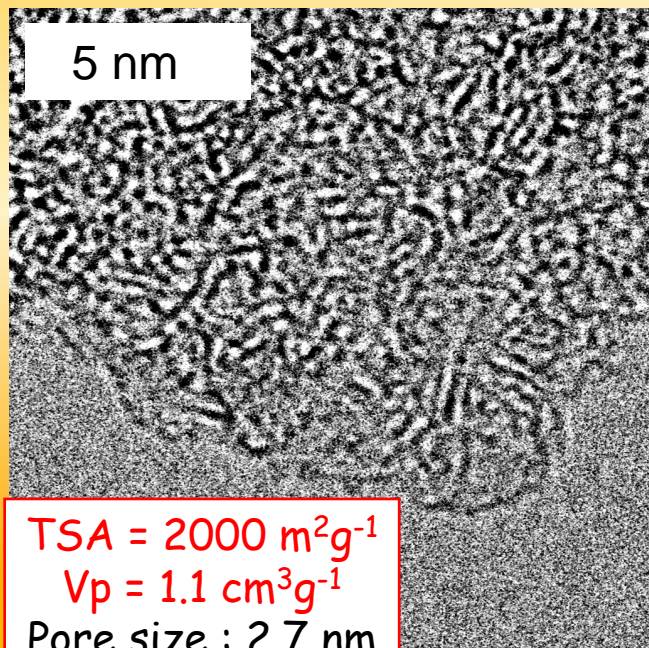
Mesopores walls are made of disordered carbon
⇒ Microporous character
depending on carbon precursor and HTT



Numerical simulations, R. Pellenq *et al*, 2005

Ex-sucrose carbon, HTT = 900°C

Ex-propylene carbon, HTT = 900°C



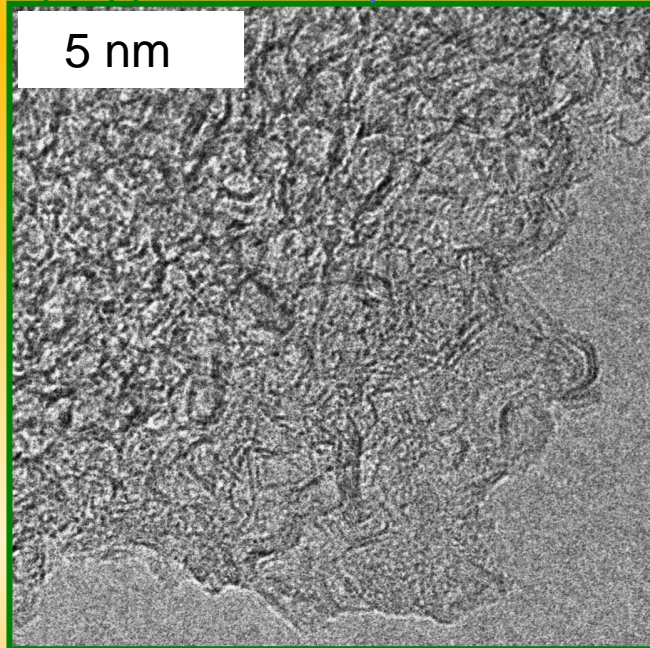
Poor agreement
between TEM images
and pore sizes
from adsorption data !

Micropores images
are superimposed
to the 2-4 nm
mesopores ?

MCM48-based Mesoporous Ordered Carbons) HTT = 2500°C Effect of the carbon precursor

The pyrolysed carbons are always more or less heterogeneous (graphite + mesoporous turbostratic carbon): the main phase is imaged below

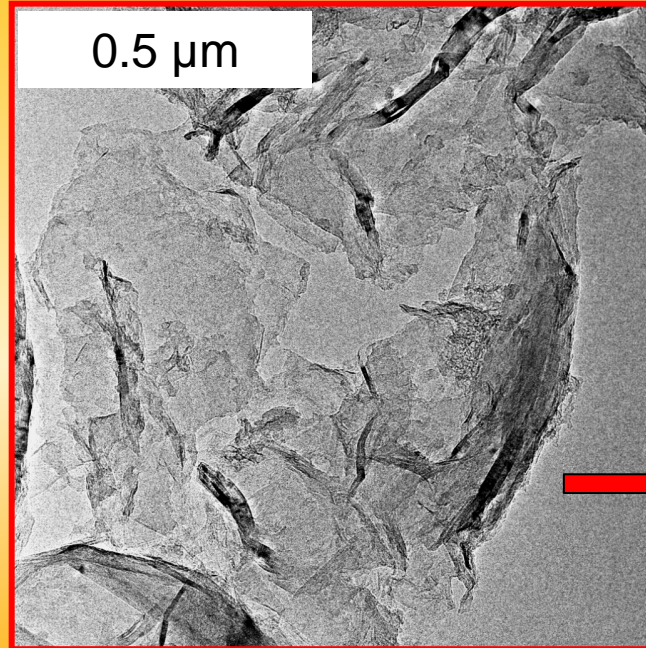
Ex-propylene (& ex-pitch) carbons



mesoporous turbostratic carbon

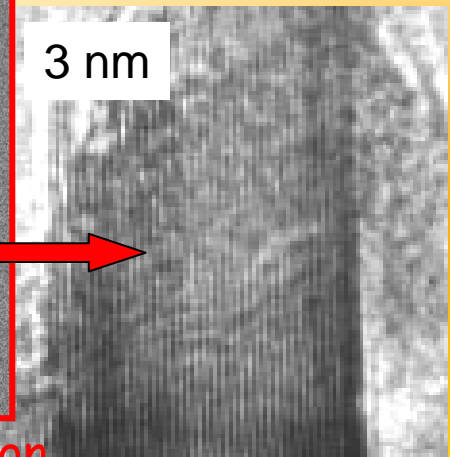
TSA = 35 m²g⁻¹
Vp = 0.05 cm³g⁻¹

Ex-sucrose carbon



Lamellar graphitized carbon

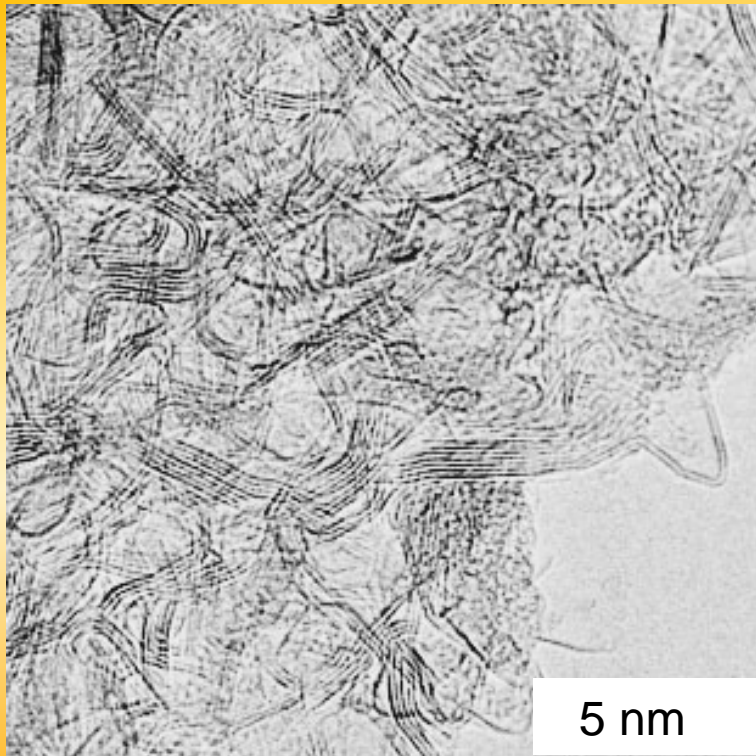
TSA = 38 m²g⁻¹
Vp = 0.04 cm³g⁻¹



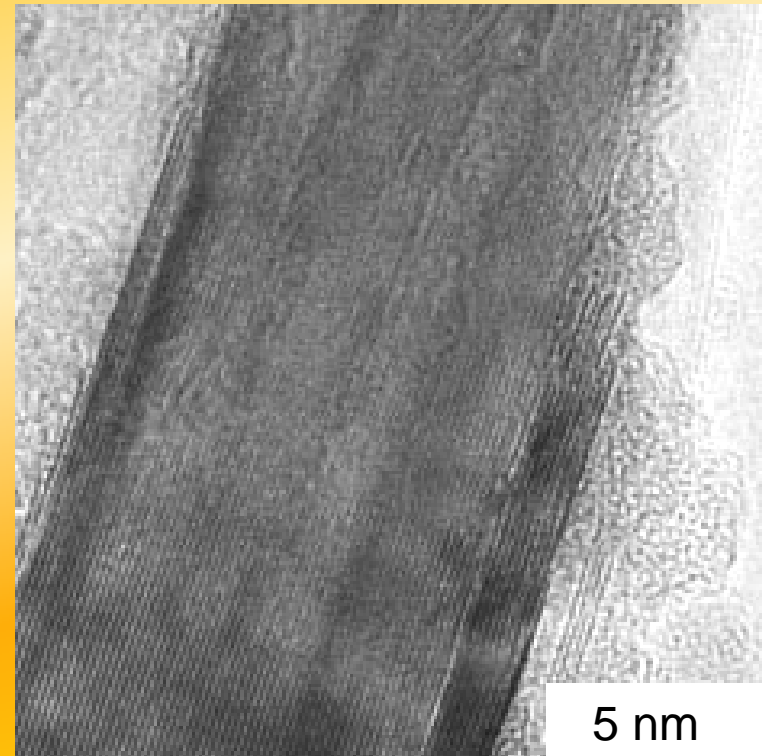
Structural improvement : larger and better stacked graphene layers
=> TSA and porous volumes strongly decrease

Why the graphitizable precursors give glassy carbons whereas non-graphitizable carbons leads to graphite when the carbonization occurs inside the template ?

Ex-pitch templated carbon
HTT = 2500°C



Ex-sucrose templated carbon
HTT = 2500°C



Effect of a geometrically limited carbonization medium ?

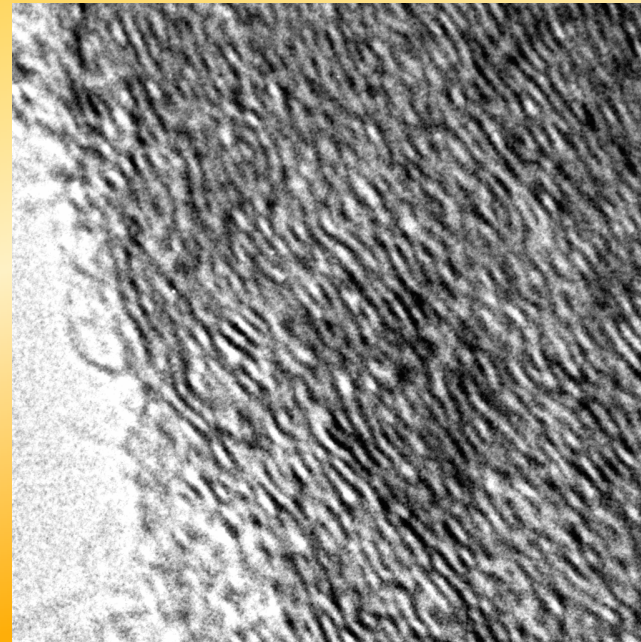
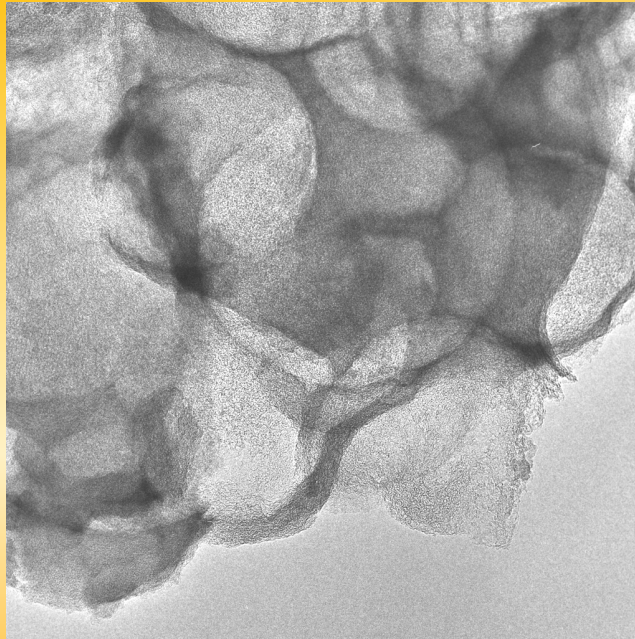
Case of the sucrose precursor

Shrinkage of the template lattice (9%)

=> anisotropic mechanical constraints

HTT > 1400°C : constraint relaxations

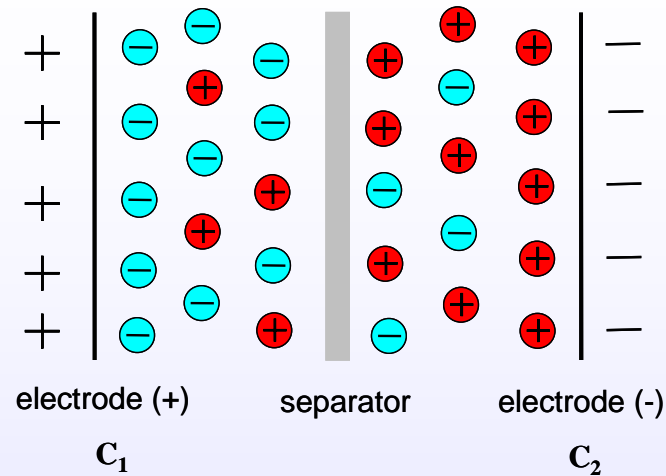
=> preferential planar orientation of graphene layers



=> Lamellar microtexture => graphite can be formed at 2500°C

Similar mechanisms were involved to explain graphite formation in 2500°C heat-treated stretched polyimide films (Oberlin, Inagaki), anthracites (Blanche, 1995 *et al*), carbon-silicates nanocomposites (Béguin *et al*, 1996)

Supercondensateurs



$$C = A S \text{ (surface spécifique)}$$

Supercondensateurs (deux électrodes)

☞ **Electrodes** : Carbon (85 wt%) + liant

☞ **Electrolyte**

- ↳ *milieu acide (1M H₂SO₄)*
- ↳ *milieu basique (6 M KOH)*
- ↳ *solution organique*
(1.0 M TEABF₄ in CH₃CN)
- ↳ **liquide ionique**
A. Ania, F. Beguin et al.
Carbon 44 3126 (2005)
E. Frackowiak et al.
App. Phys. Lett. 86 (16) 2005

Supercondensateurs

<i>Matériaux</i>	Acide (F/g)	Organique (F/g)	TSA (m²/g)
<i>Réplique (sucrose)*</i>	200	115	2000
<i>Carbones activés**</i>	286-130	50-100	2740-800

* *Jurewicz, K., C. Vix-Guterl J. Phys. Chem. Solids. 2004, 65, 287*
C.Vix-Guterl et al. Mat. Scien. Eng.108, 148 (2004)
C.Vix-Guterl, Carbon, 2005, 43, 6, 1293

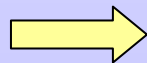
** *E. Raymundo-Pinero, F. Beguin et al. Carbon 44 , 2498 (2006)*
D.Cazorla-Amoros, Carbon 44 2642 (2006)

Capacité ↔ texture du carbone ?

1) *Surface spécifique*

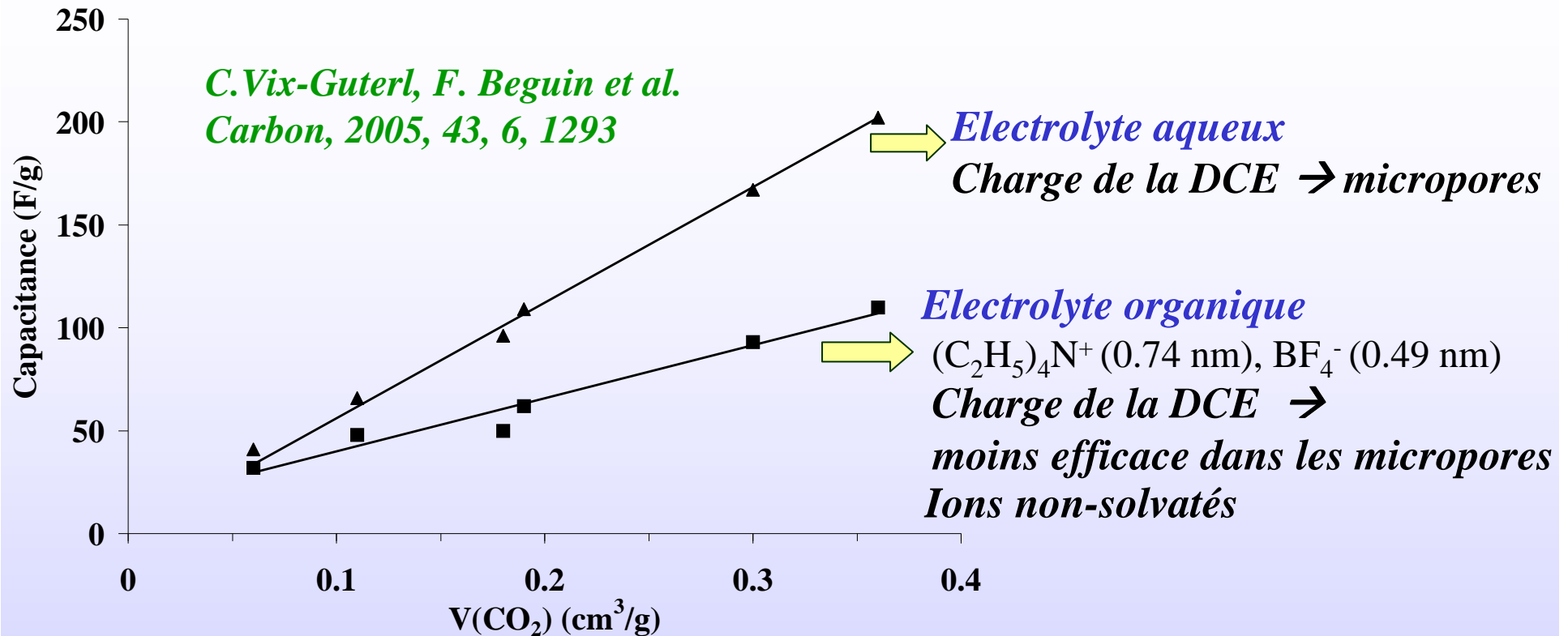
2) *Volume micro*

3) *Volume mésoporeux*



V(N₂) + V(CO₂)

Répliques carbonées – Importance de la microporosité



Carbones activés *E. Raymundo-Pinera, F. Beguin et al. Carbon 44, 2498 (2006)*

- ☞ Formation DCE optimale pour $D \approx 0.7$ nm (aqueux) et $D \approx 0.8$ nm (organique)
- ☞ Importance de la chimie de surface (groupements oxygénés de surface)
pseudocapacitance