



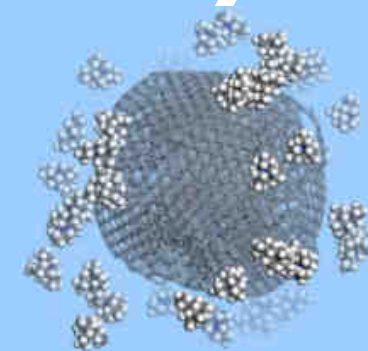
COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

Chaire Développement durable  
Environnement, Énergie et Société

Chaire annuelle – Année académique 2010-2011

# SUPERCONDENSATEURS :

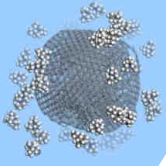
## Principes et Evolutions



Patrice SIMON

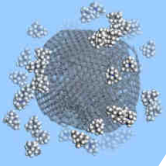


Université Paul Sabatier  
CIRIMAT UMR CNRS 5085  
Toulouse - FRANCE  
[simon@chimie.ups-tlse.fr](mailto:simon@chimie.ups-tlse.fr)



# Plan

- 1. Les supercondensateurs**
  - principes
  - applications
  
- 2. Les matériaux carbonés pour les supercondensateurs**
  - les différents formes de carbones
  - les carbones microporeux (poudres, films)
  
- 3. Les autres types de supercondensateurs**

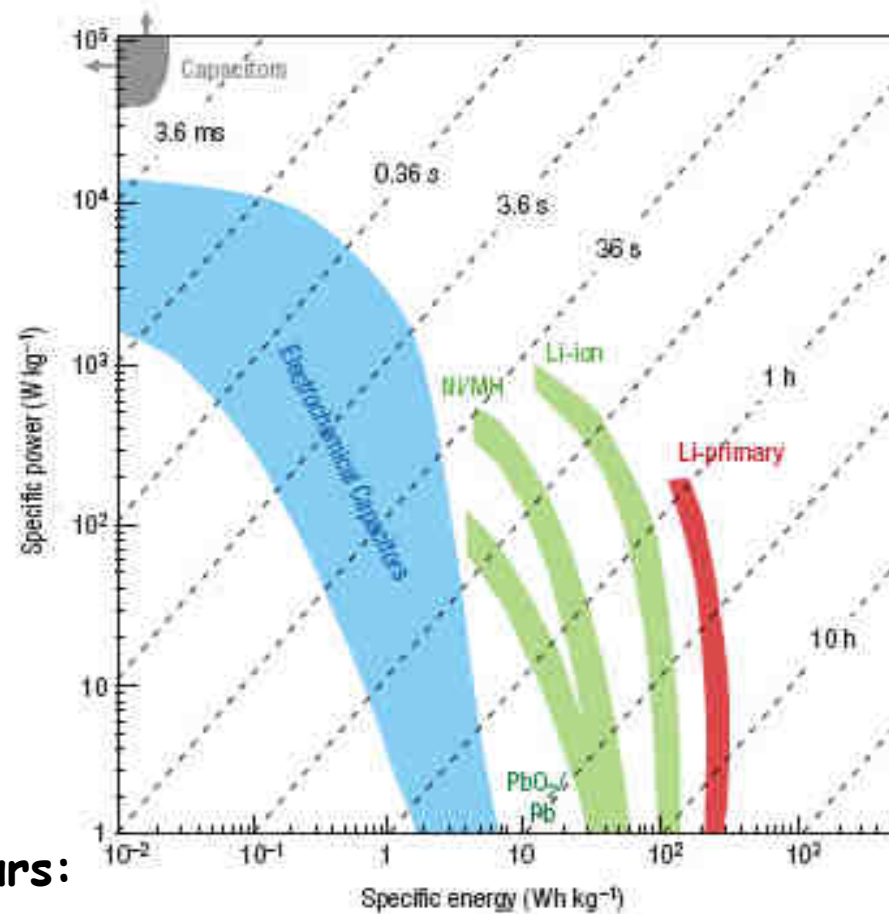


# 1. Pourquoi les supercondensateurs ?

## Supercondensateurs:

- forte puissance (10-20 kW/kg)
- énergie : 5 Wh/kg
- constante de temps : ~ 5 s

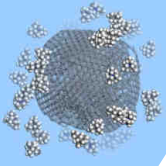
→ performances intermédiaires  
entre les capacités et les batteries



## Différents types de supercondensateurs:

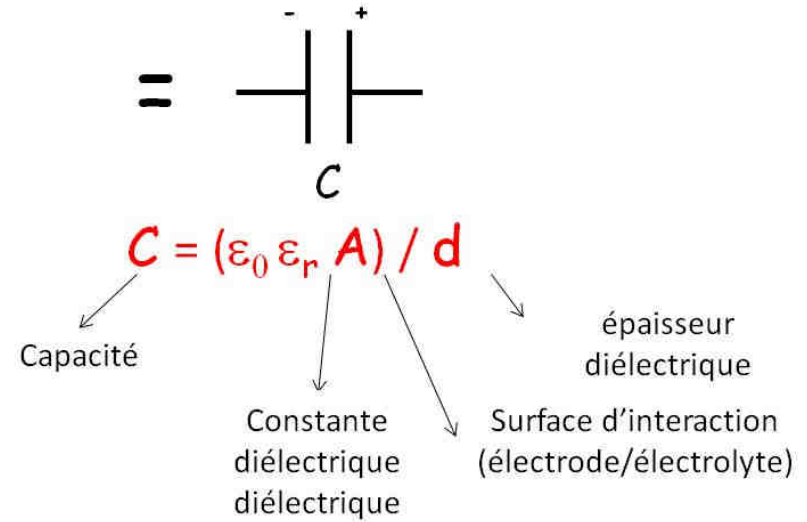
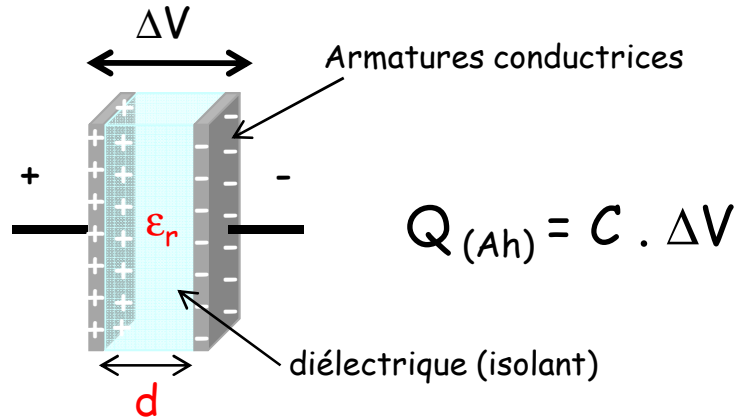
- à base d'oxydes (pseudo-capacités)
- à base de Carbone (> 90% des systèmes commerciaux)

Groupes sur les SCs : F. Béguin (CRMD, Orléans), T. Brousse (IMN Nantes), F. Favier (IGC, Montpellier)

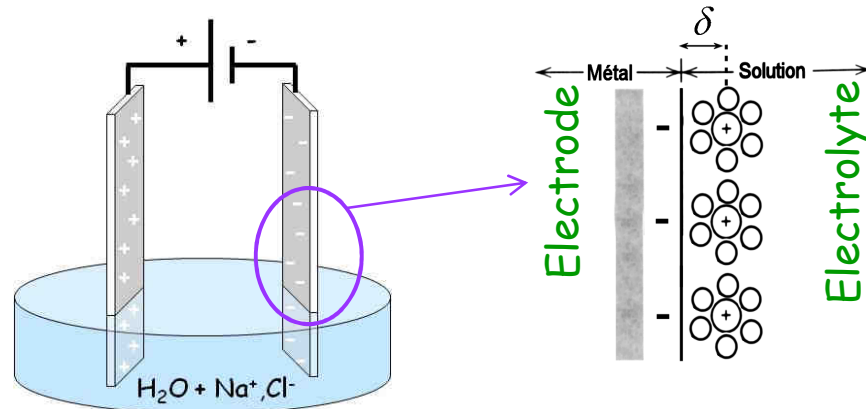


# 1.1 Stockage des charges : électrostatique

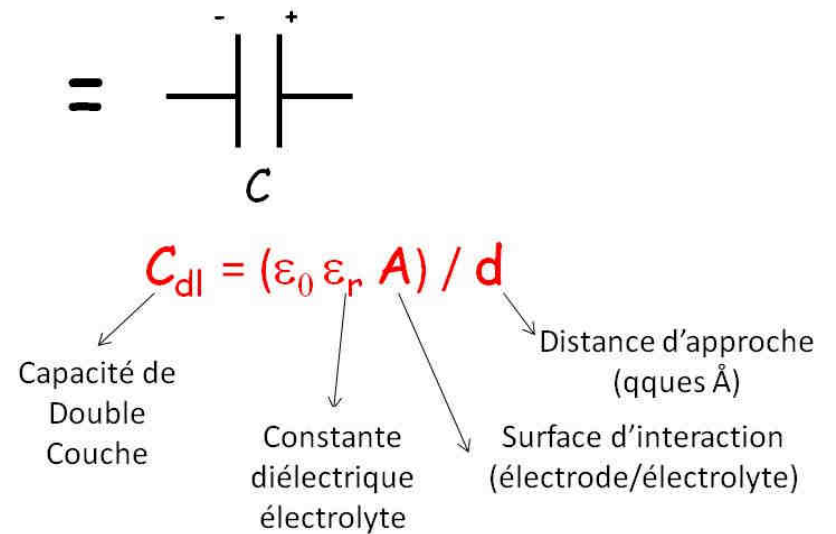
## Condensateur classique

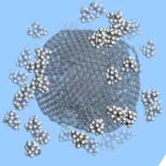


## Supercondensateur : Capacité de double couche électrochimique



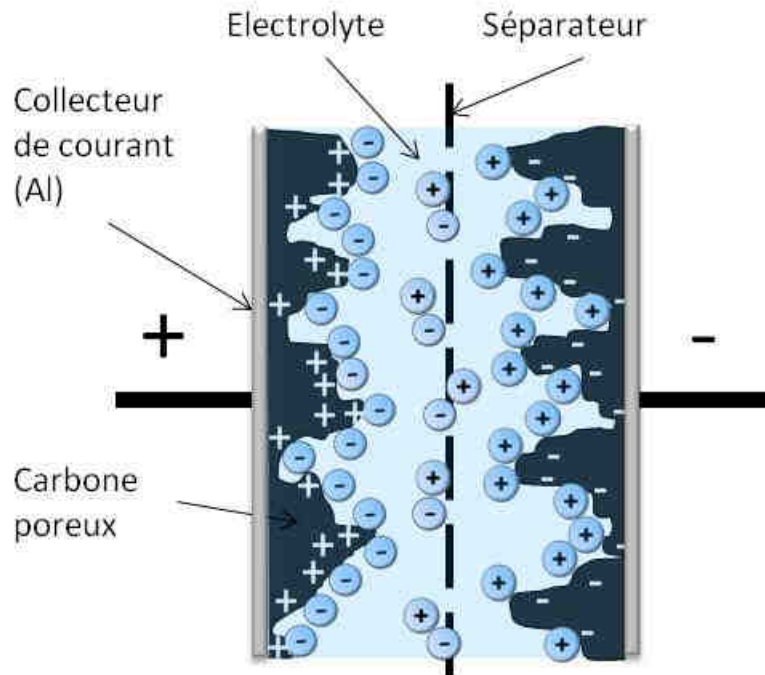
$C_{dl} \approx 10-20 \mu F/cm^2$



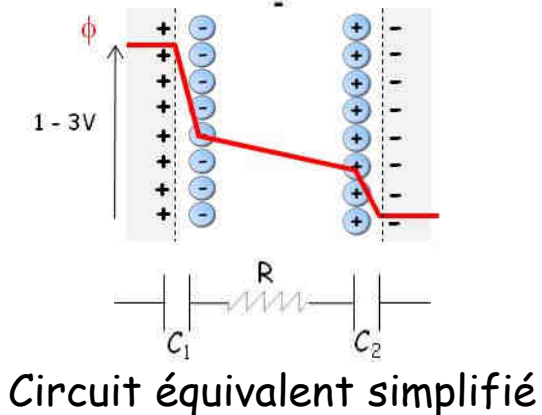


# 1.1 Stockage des charges dans les SCs

## Stockage électrostatique : pas de réaction d'oxydo-réduction

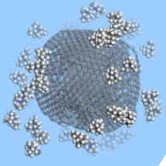


- $\Delta V$  appliqué :
  - adsorption des ions sur C
  - charge de la Double Couche ( $10-20 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ )
- Carbone poreux (grande surface) ( $1000-2000 \text{ m}^2/\text{g}$ )
  - 100 F/g de CA
- Electrolyte aqueux :  $\Delta E_{\text{max}} = 1 \text{ V}$   
Electrolyte organique :  $\Delta E_{\text{max}} = 2,7 \text{ V}$



### Points-clés :

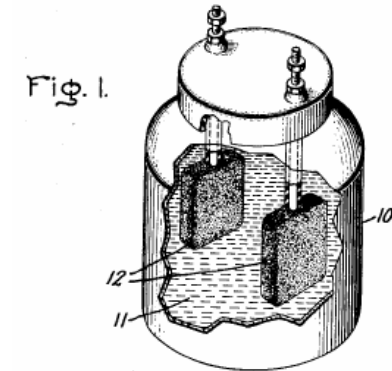
- Pas de Rédox → forte Puissance
- Cyclabilité :  $> 10^6$  cycles
- charge/décharge rapide (qqs)
- basses températures ( $- 40^\circ\text{C}$ )



## 1.1 Un peu d'histoire

**1853** : Concept de la double couche (Helmholtz)

**1957** : Brevet Becker (U.S. Patent 2,800,616) General Electric : deux électrodes en acier inox recouvertes de carbone - électrolyte acide sulfurique)



**1966 - 1970** : Brevets SOHIO Corporation (US patent 3,288,641, US patent 3,536,963) ; électrolyte organique) « Electrokinetic Capacitor »

**1978** : NEC (JP) premiers systèmes « Supercapacitor » (licence SOHIO, aqueux)

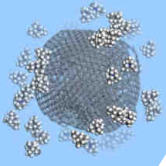
**1991** : Maxwell (USA) ; Boostscap ;  $1F < C < 3000F$ , 2,7V

**1995** : Nippon Chemicon (JP) ; DLCAP ;  $C > 300F$ , 2,7V

**1998** : Nesscap (Cor) ;  $10 < C < 2500 F$  en milieu organique ; Capacité  $> 300F$

**2001** : Bolloré (Fr) ; Batscap, 600 F à 9000F ; 2,7V





# 1.1 Résumé : batteries vs SCs

Caractéristiques	Batteries Li-ion	SuperCondensateurs
Temps de décharge*	3-5 min.	~ 1s
Temps de charge*	> 6 min.	~ 1s
Durée de vie (cycles)	< 5000 (@C)	> 1 000 000 ●
Energie (Wh/kg)	100 - 150 ●	5
Puissance (kW/kg)	< 1**	> 10 ●
Fonctionnement (°C)	-20°C - +70°C	-40°C - +70°C ●
Rendement	70% - 95%	> 95%
Coût (€ par Wh)	0,8 - 1,5 ●	8 - 15
Coût (€ par kW)	60 - 120	20 - 40 ●

\* pour récupérer la totalité de l'énergie stockée ; \*\* temps minimal de décharge avec un rendement de 90%

A. Burke, Electrochimica Acta 53 (2007) 1083-1091, J. Miller ECS Interface (2008)

**SC et batteries sont complémentaires : puissance et énergie**

## Applications

Capacité < 100F :

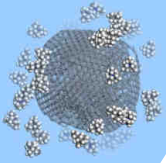
- appels de puissance,
- tampons de puissance

→ Nombreuses applications existantes : outillage, véhicule, électronique de puissance...



Visseuse électrique



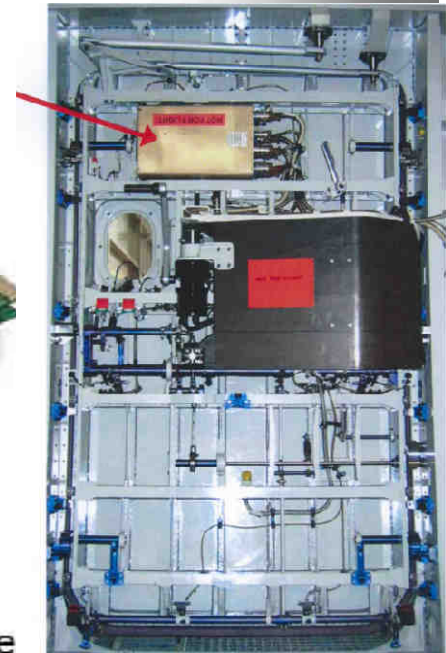


## 1.2 Applications : la puissance

- *Ouverture des portes de l'A380*



- 16 doors per A380, 56 PC100 per door (Maxwell)

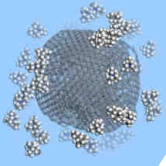


### Advantages by using Ultracaps

- Low weight
- Excellent life time due to high cycle
- High reliability
- No maintenance

16 portes alimentées par des modules 35 V / 28.5 F  
(14 séries de 4 SC 100F en parallèle)





## 1.2 Exemples d'applications : récupération énergie

- **Récupération énergie**  
*Grue portuaire motorisée*

Levage de containers de 12 m, 40 t  
157,000 t de containers par bateau

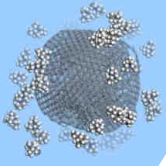


SC récupère l'énergie lors de la descente et la restitue en phase de levage

**-40% consommation carburant**  
**-25% émission de CO<sub>2</sub>**

J.R. Miller and P. Simon, *Science* 321 (2008) 651

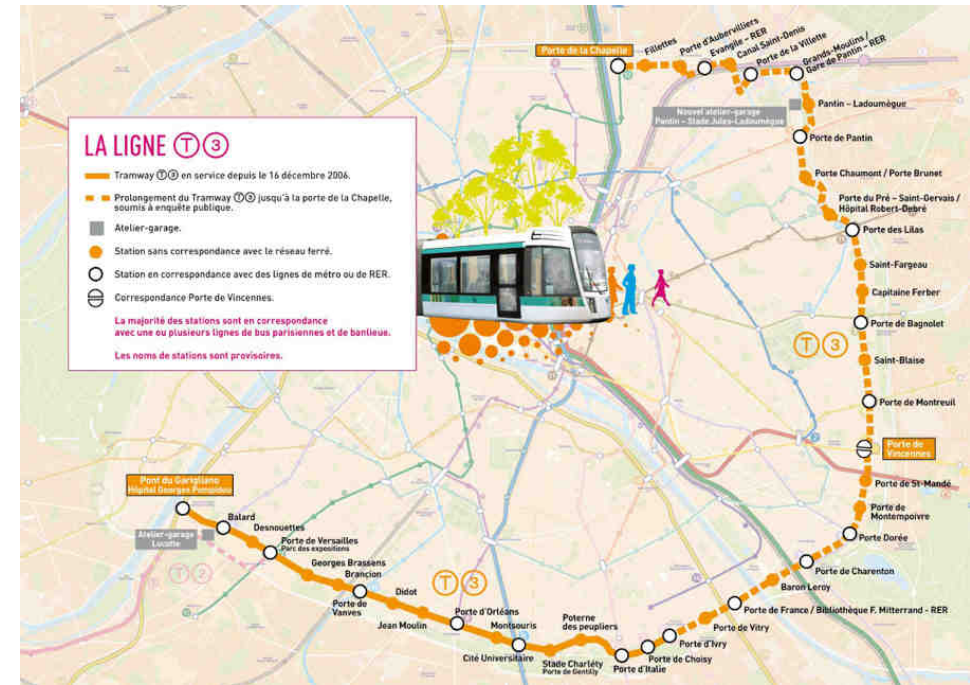




# 1.2 Applications : récupération de l'énergie



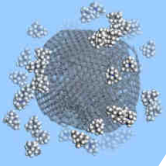
: Alstom



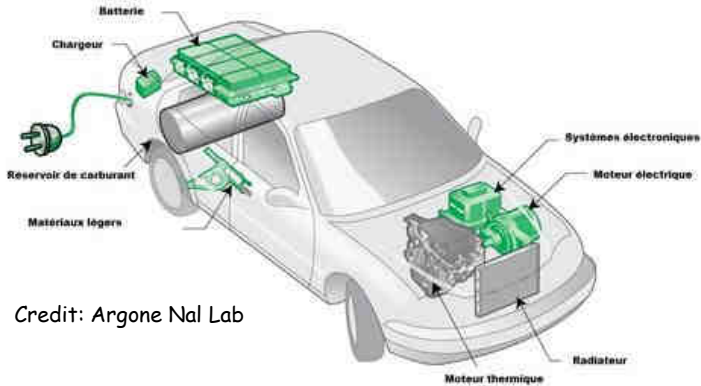
Collaboration Alstom / Batscap

## Module SCs :

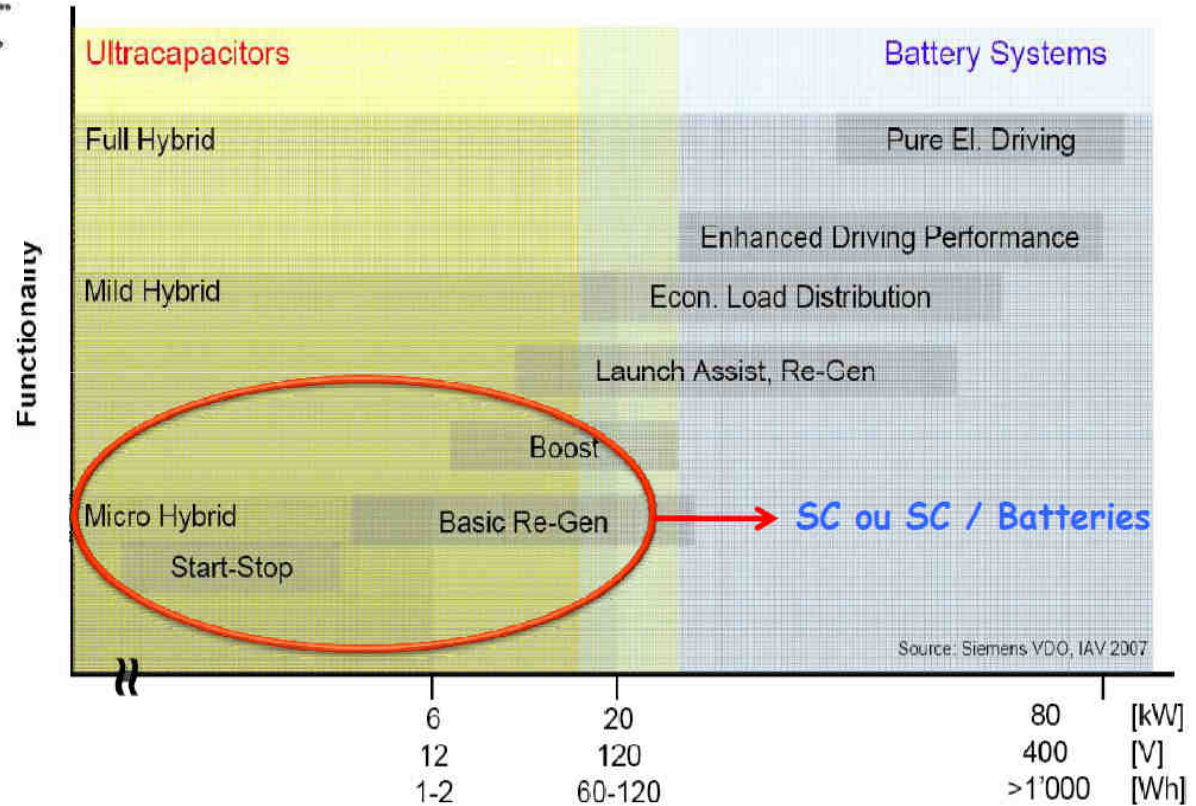
- 1) récupération de l'énergie de freinage
- 2) autonomie de traction sur 100s m



# 1.2 Applications : l'automobile

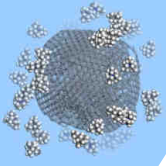


Credit: Argonne Nat Lab



## Alternateur/démarrateur micro-hybride e-Hdi pour Citroen C5 and C4 diesel (2012)

- -15 % gasoil
- CO<sub>2</sub> < 130g par km



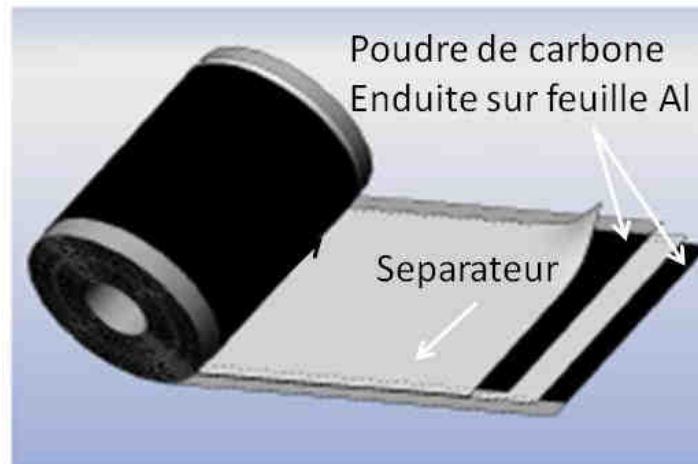
# 1.3 Quelques exemples de EDLCs



NessCap



De la cellule ...  
- de 0,1 F à 9000F  
- de 10 g à 1kg



Maxwell



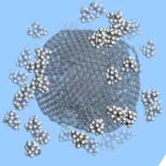
... au module  
- de 5V à 250 V  
- de 50g à 450 kg

Batscap



Nippon  
Chemi-Con





## 1.4 Energie et Puissance des EDLCs

**Energie (max.)**

$$W = 1/2 C V_0^2 \quad (\text{J})$$

**Puissance (max.)**

$$P = V_0^2 / (4R) \quad (\text{W})$$

**$V_0$  :**

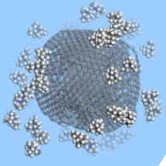
- tension de décomposition de l'électrolyte (red/ox)
- corrosion collecteur de courant ou carbone

**Capacité :**

- Carbone (*Farads par gramme ou par  $\text{cm}^3$  de carbone*)
- interface Carbone / électrolyte

**Résistance :**

- principalement  $R_{\text{électrolyte}}$
- impédance d'interface Film / collecteur



## 1.5 EDLCs : défis technologiques

### Prochains Challenges pour les Supercondensateurs

Densité de puissance ( $P_{max}=V^2/4R$ ) aujourd'hui  $>10$  kW/kg  
→ satisfaisante

**Augmenter la densité d'énergie ( $E=1/2 C.V^2$ )  $> 10$  Wh/kg**  
→  $t_{décharge} > 10s$

#### 1. Augmenter la capacité des carbones

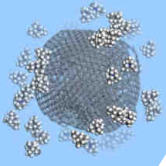
Travailler sur l'interface carbone / électrolyte

→ relation taille des pores / taille des ions ?

#### 2. Augmenter la tension de fonctionnement

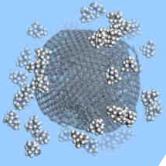
- électrolytes

- systèmes hybrides : association électrode batterie à une électrode SC (carbone)



# Plan

1. Les supercondensateurs
  - principes
  - applications
2. Les supercondensateurs carbone / carbone
  - les différents formes de carbones (carbone activé)
  - les carbones microporeux (poudres, films)
3. Les supercondensateurs à base d'oxydes

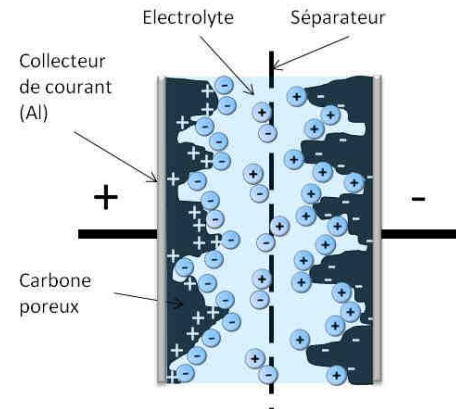
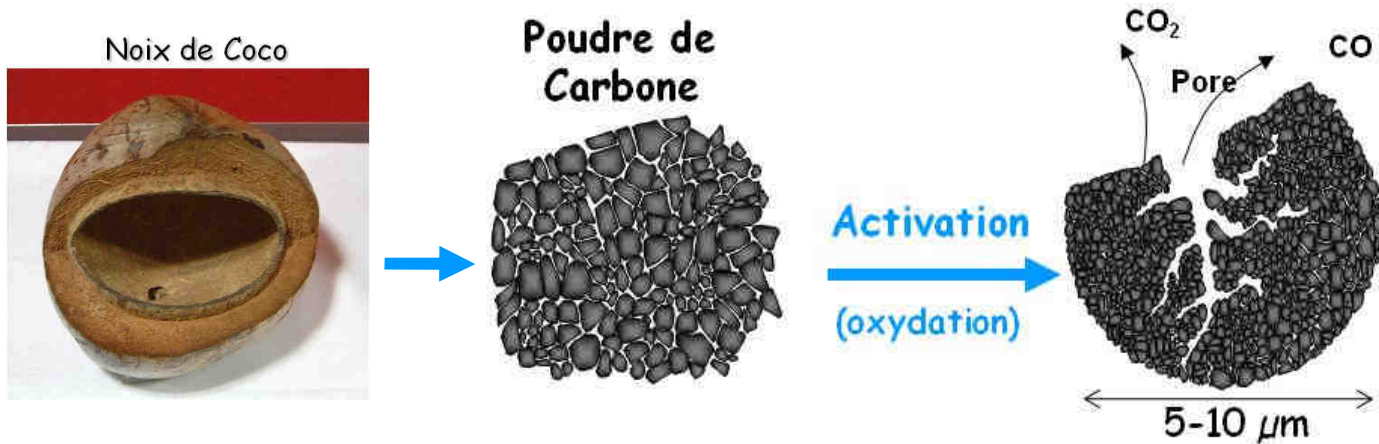


## 2.1 Le matériau actif : le carbone

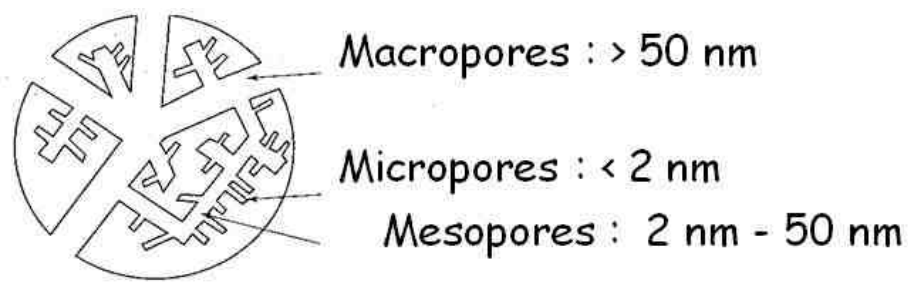
### Matériau actif : pourquoi le carbone ?

- stable électrochimiquement, conducteur électronique
- possibilité de développer de grandes surfaces ( $> 500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )

### 1. Le Carbone activé

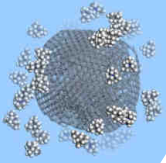


**Carbone activé =  
carbone poreux**



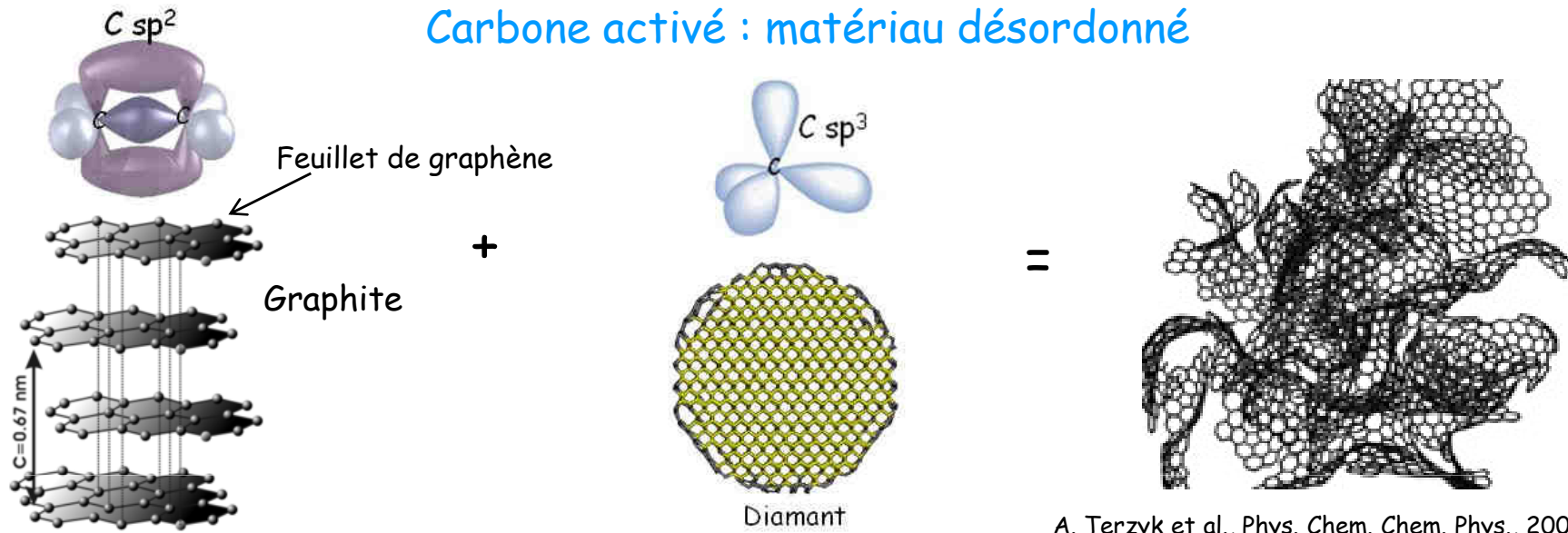
$\rightarrow S \text{ élevée } \sim 1500 \text{ m}^2/\text{g}$



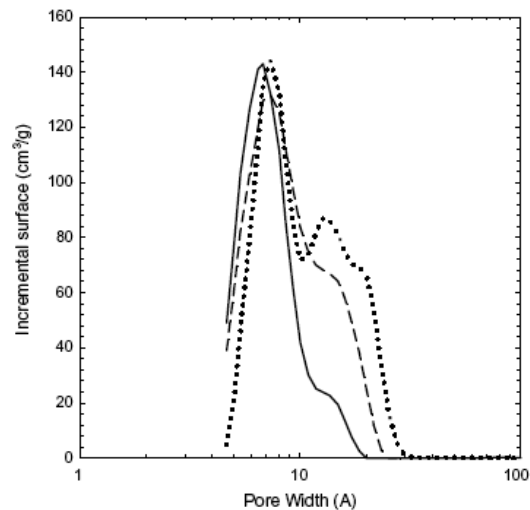


# 2.1 Le matériau actif : le carbone activé

## Carbone activé : matériau désordonné



A. Terzyk et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 2007, 9, 5919



O. Barbieri et al. / Carbon 43 (2005) 1303–1310

Carbone activé  
↓  
Distribution de taille de pore

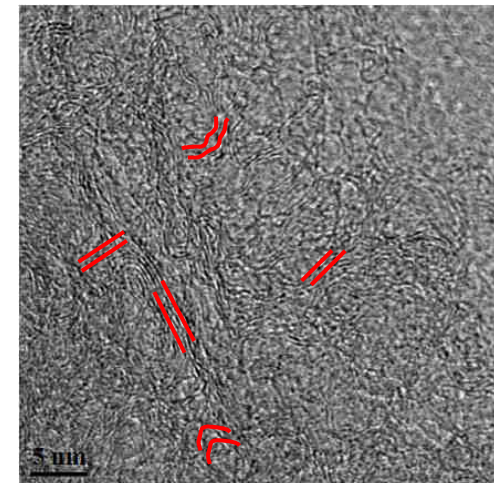
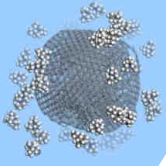


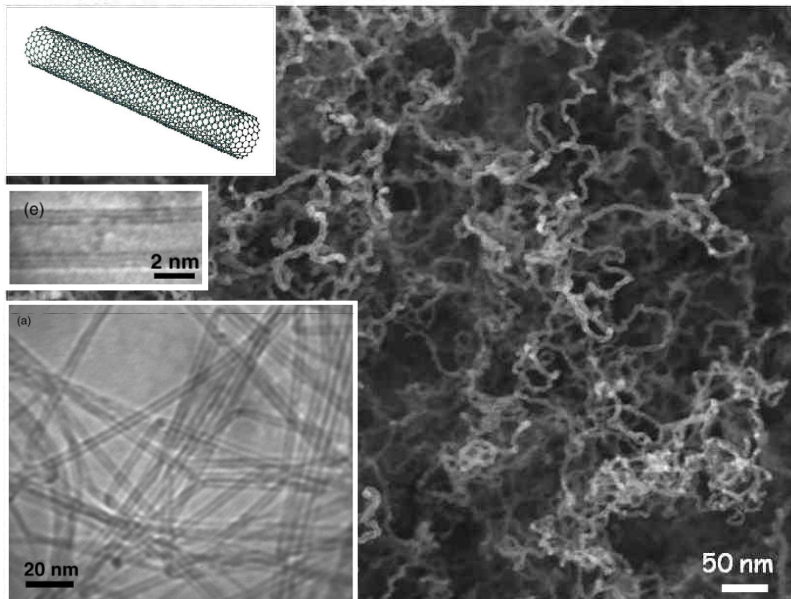
Photo MET d'un CA



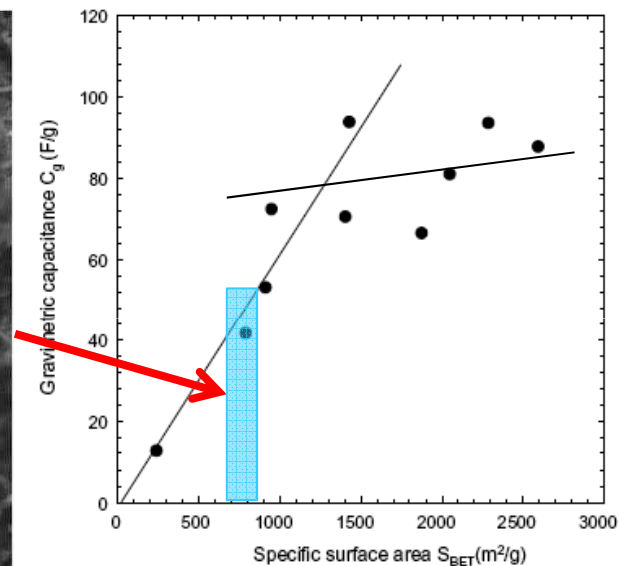
## 2.1 Le matériau actif : le carbone activé

Comment augmenter la capacité (charge stockée) ?

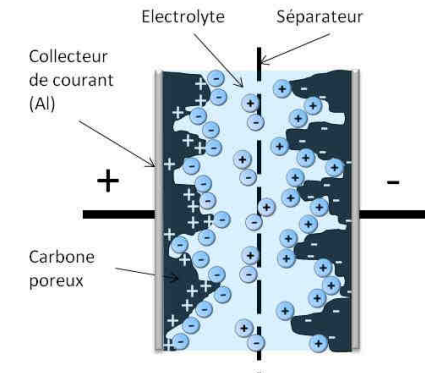
⇒ synthétiser des carbones activés de grande surface



Nanotubes de Carbone



O. Barbieri et al. / Carbon 43 (2005) 1303–1310

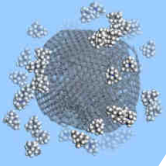


$$C_{dl} = (\epsilon_0 \epsilon S) / \delta$$

Saturation de capacité pour  $S > 1500 \text{ m}^2/\text{g}$  vers  $\sim 100 \text{ F/g}$

~~1. Augmenter la surface spécifique des carbones (m<sup>2</sup>/g)~~

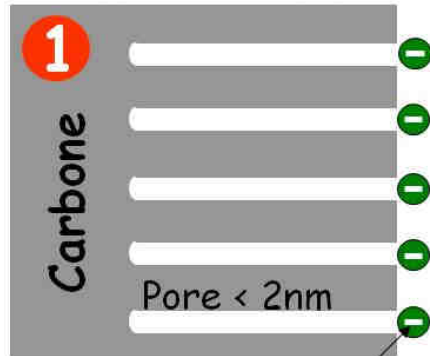
2. Rôle de la taille des pores



## 2.3 Les carbones poreux pour EDLCs

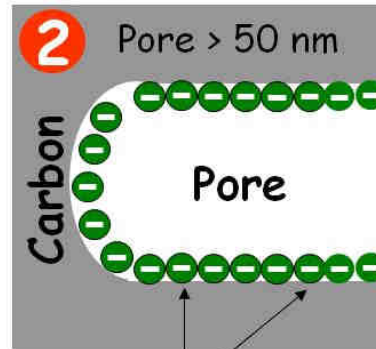
Quelle est la taille de pore optimale pour les Carbones?

Micropores: trop petits



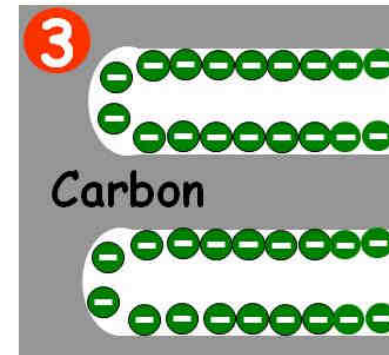
ions solvatés

Macropores: trop larges



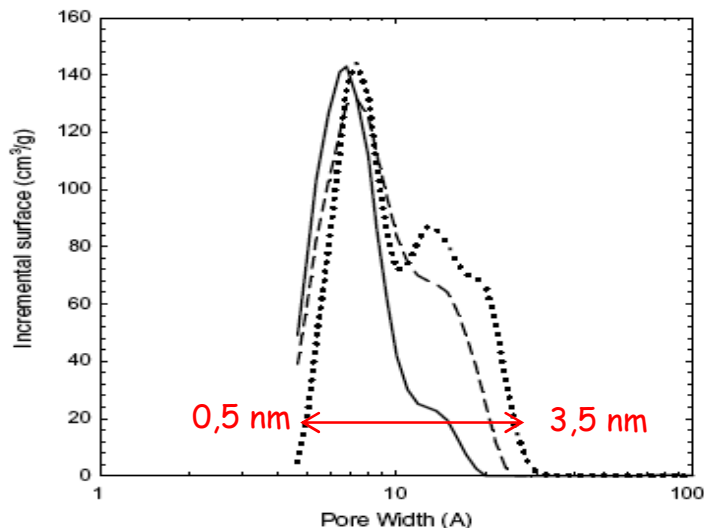
ions solvatés

Mesopores : idéaux



2 < Pore < 5 nm

→ Modèle classique utilisé depuis 20 ans : micropores inactifs

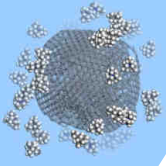


Carbones Activés (CA)

→ distribution de taille de pore (PSD)

⇒ vérification difficile avec CA

→ Besoin de nouveaux carbones



# Plan

## 1. Les supercondensateurs

- principes
- applications

## 2. Les supercondensateurs carbone / carbone

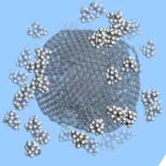
2.1 les différents formes de carbones

2.2 Carbones microporeux : les CDCs

a) électrolyte organique liquide

b) liquide ionique

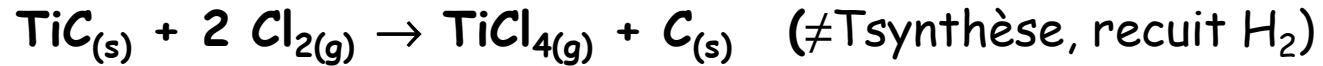
## 3. Les supercondensateurs à base d'oxydes



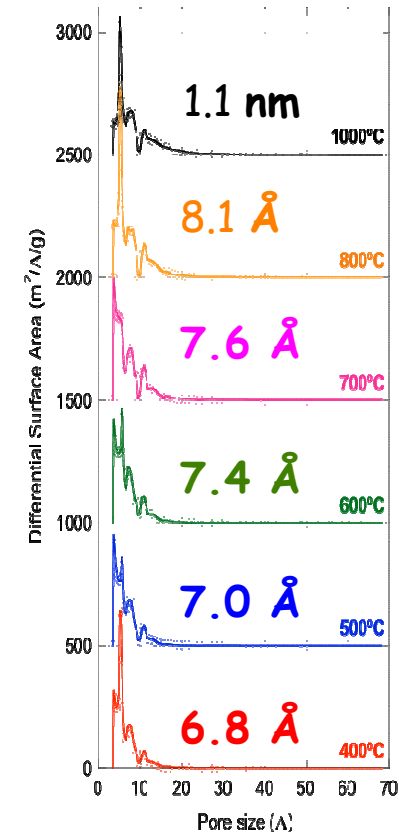
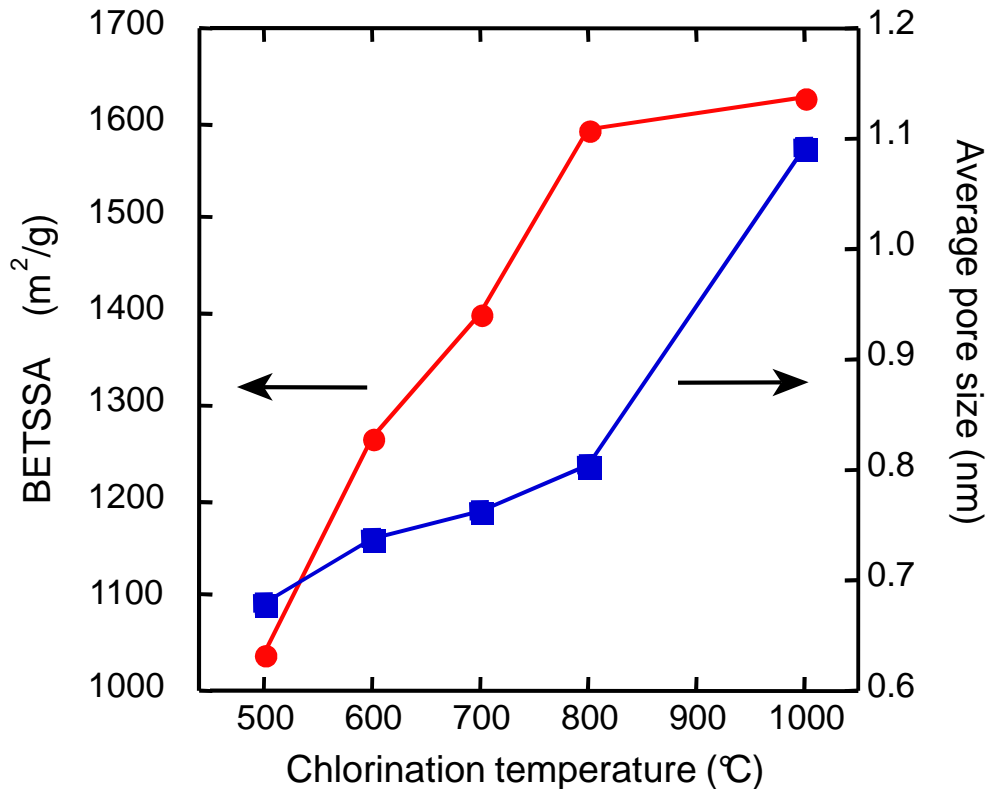
## 2. Les Carbones Dérivés de Carbure (CDCs)

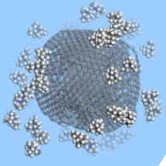
Collaboration : Prof Y. Gogotsi (USA)

Dissolution sélective du métal d'un carbure (TiC, SiC, ZrC...)



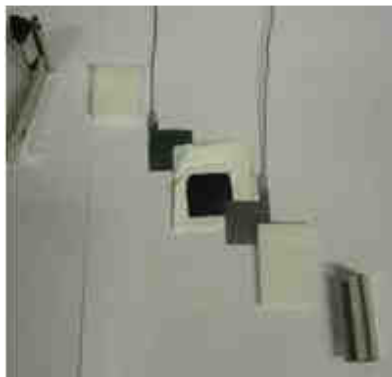
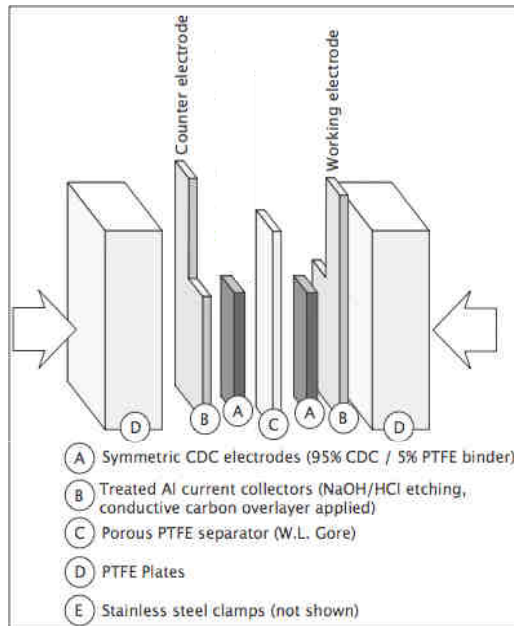
Pourquoi CDCs? → Contrôle précis de la taille de pore + PSD étroite  
Pores de 0,6 à 1 nm (< 2 nm)





## 2.a Les tests

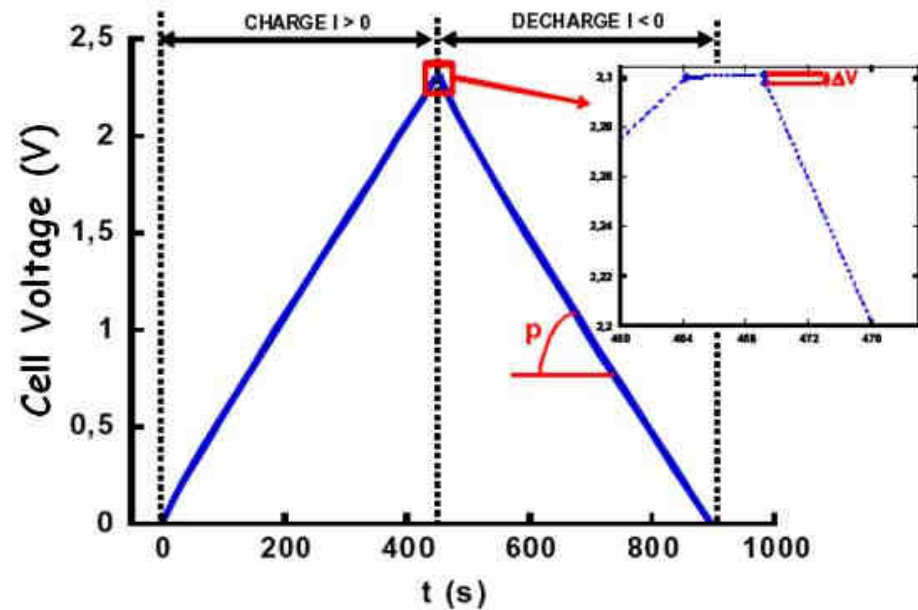
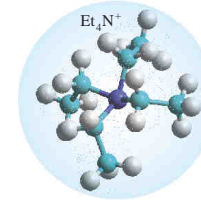
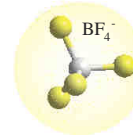
### Cellules Labo

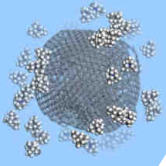


95% CDC, 5% PTFE sur feuille Al  
électrode 4cm<sup>2</sup>, 15 mg/cm<sup>2</sup>

### Electrolyte

(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>N<sup>+</sup>, BF<sub>4</sub><sup>-</sup> 1,5M in ACN

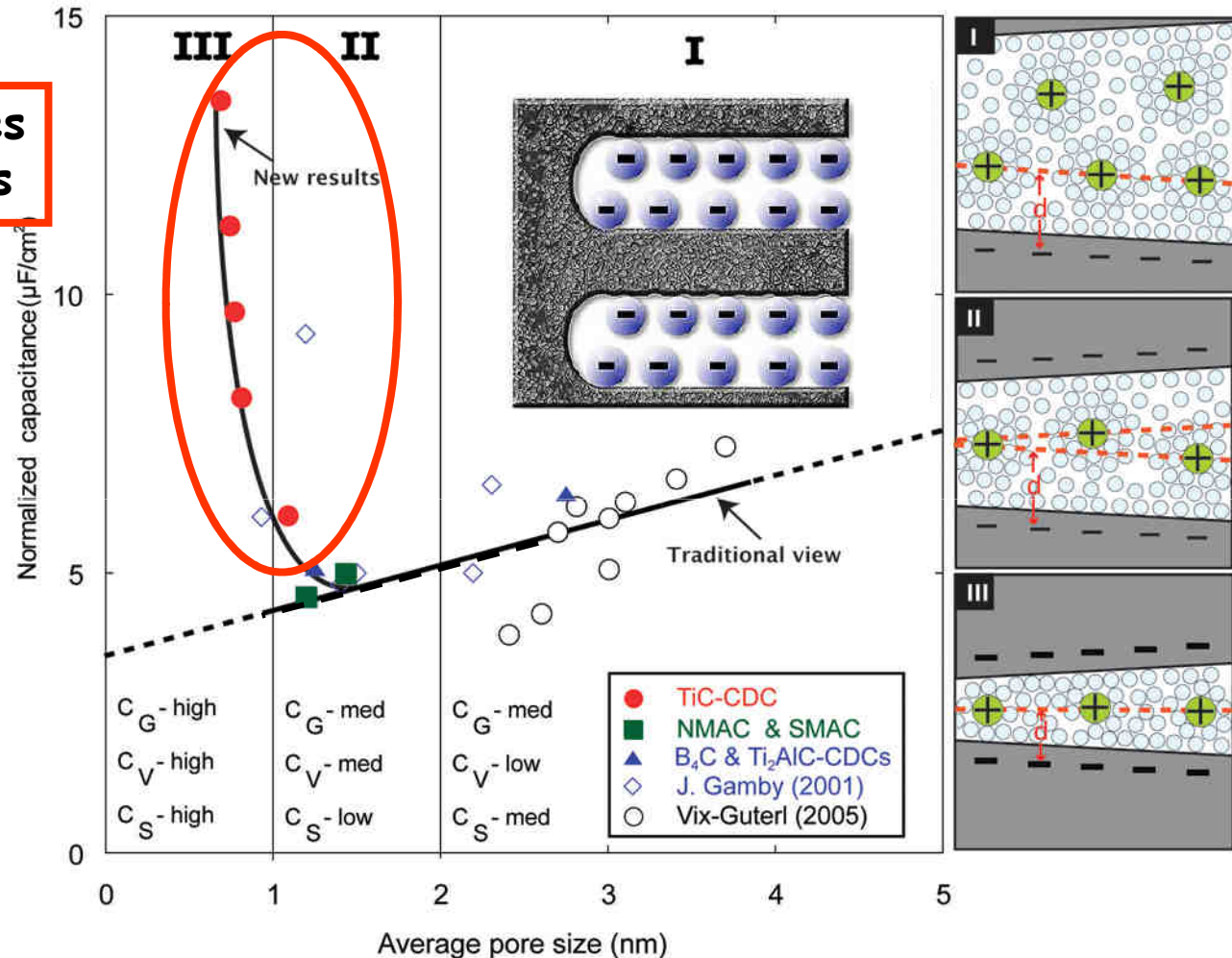




## 2.a CDCs: Augmentation de la capacité dans l'électrolyte AN + 1M $(C_2H_5)_4N^+, BF_4^-$

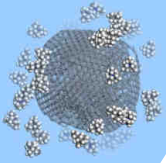
Pores < ions solvatés  
accessible aux ions

Capacité  $\nearrow$  dans  
les micropores  
(+50%)



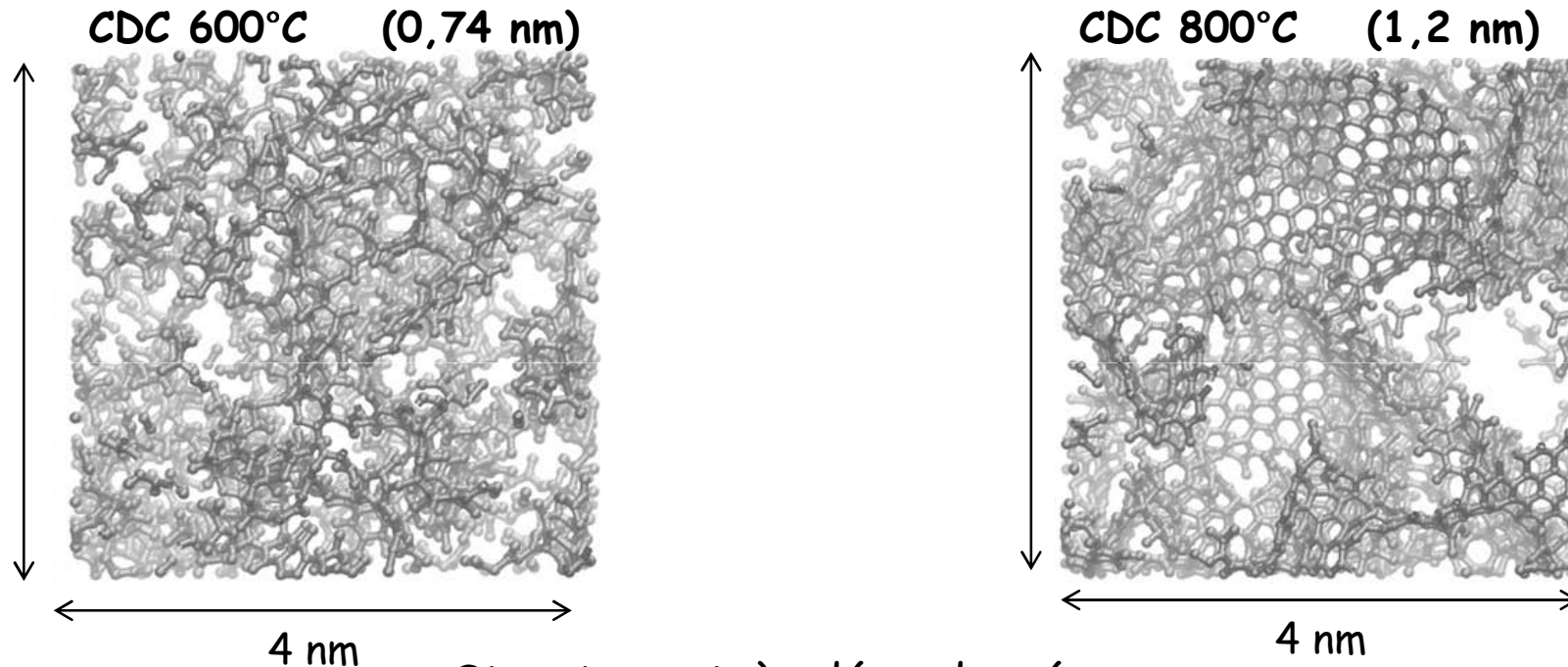
Hypothèse:

→ micropores accessible par déformation de la couche de solvation



## 2.a Structure des CDCs ?

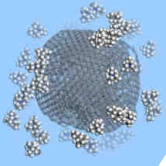
Modélisation par Quenched Molecular Dynamics  
CDCs 600°C (0,74 nm), 800°C (0,8 nm) et 1200°C



Structures très désordonnées...  
(pas de plans graphitiques, pas de pores en fente)

→ structure poreuse interconnectée, ouverte



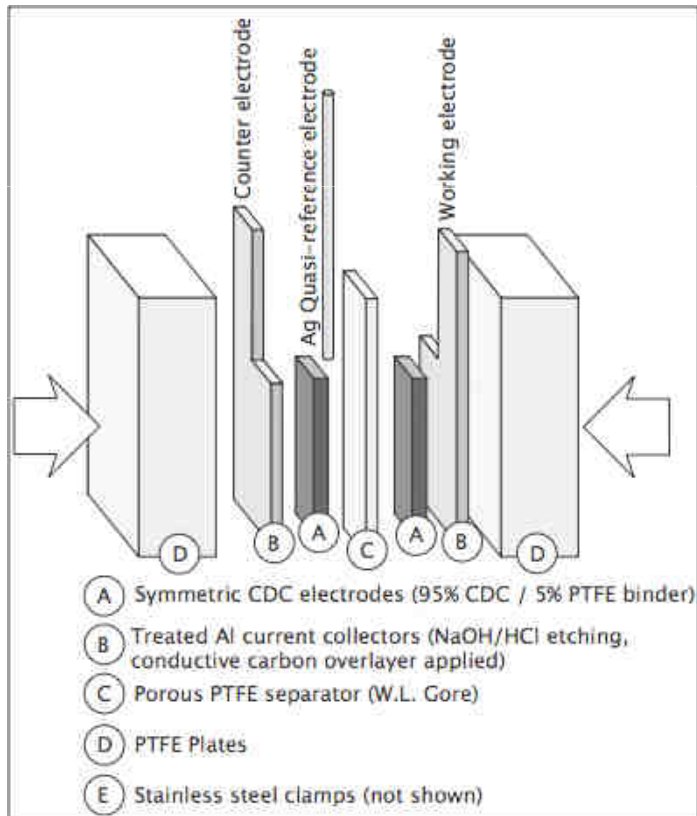


## 2.a Mesures 3-électrodes, électrolyte TEABF<sub>4</sub>

Cellules 2-electrode → mesure de Ccellule

Cellules 3-électrodes → accès à C(+) et C(-)

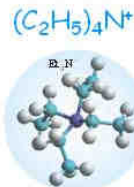
### Cellule



Solvant : AN

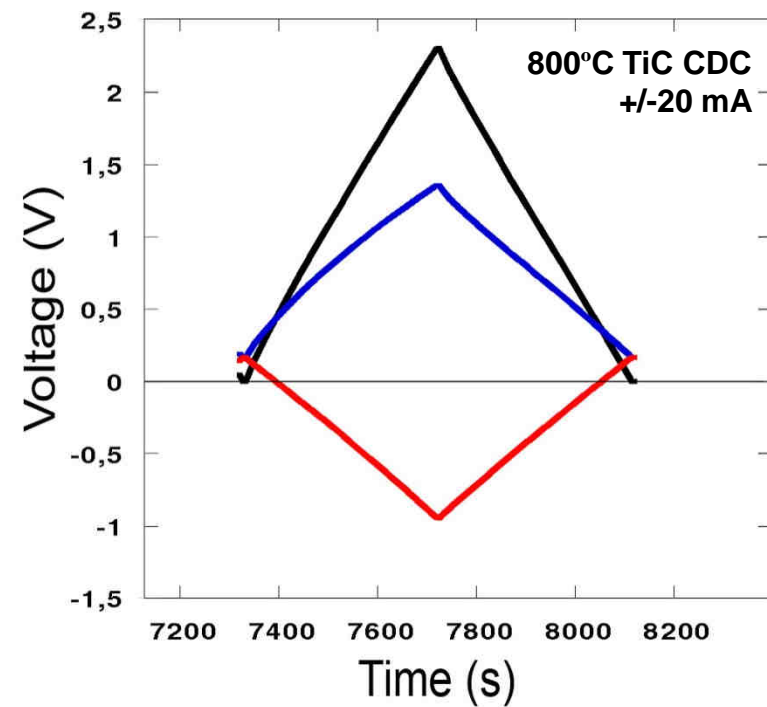


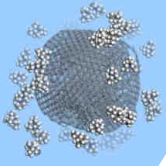
0.478 nm



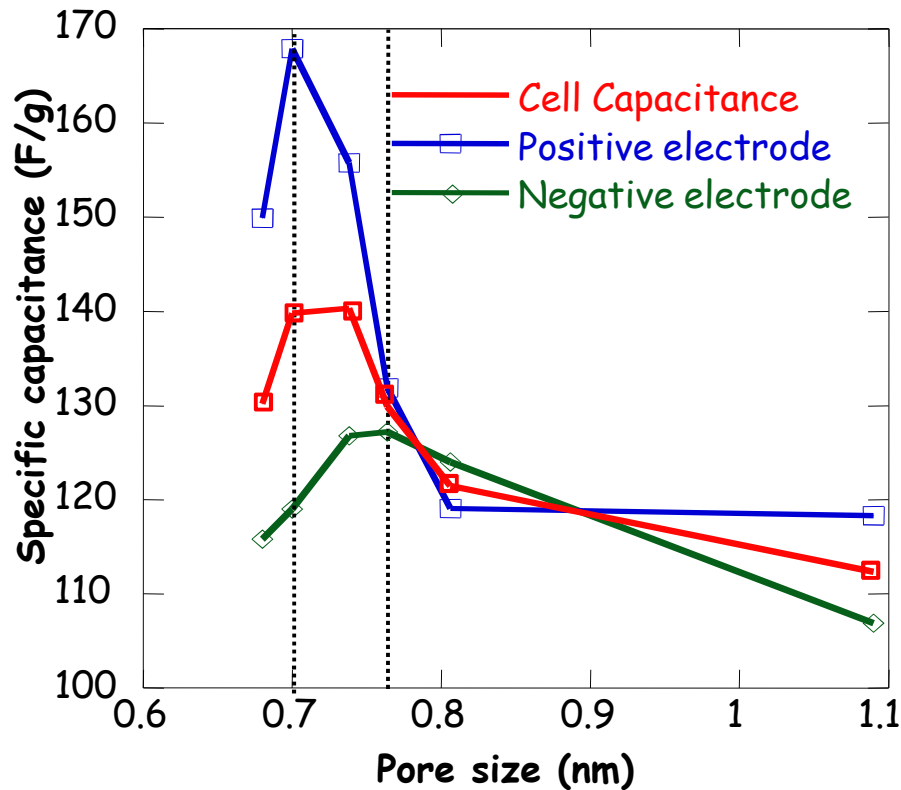
0.674 nm

### Cyclage Galva.

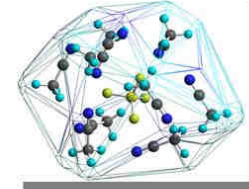
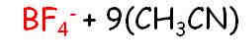




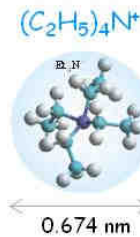
## 2.a Mesures 3 electrodes, AN+1,5M TEABF<sub>4</sub>



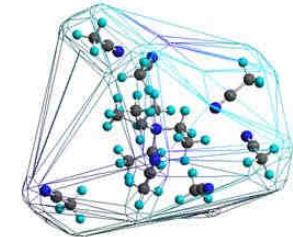
< 0.7 nm <



Diameter: 1.16 nm

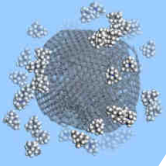


< 0.76 nm <



Diameter: 1.30 nm

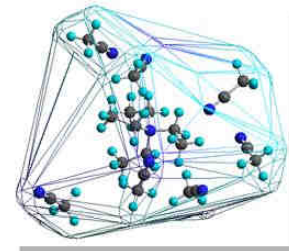
1. Adapter la taille des pores aux ions
2. Ions partiellement désolvatés pour « entrer » dans les pores
3. Cmax pour une taille donnée



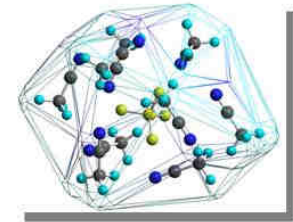
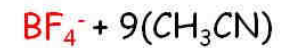
## 2.b Mesures en milieu liquide ionique

Cellules 3-electrodes dans  $(\text{CH}_3)\text{CN} + (\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{N}^+, \text{BF}_4^-$

→ ions solvatés



Diameter: 1.30 nm



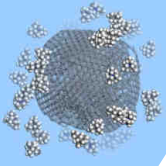
Diameter: 1.16 nm

Liquides Ioniques:

→ Pas de solvant (sels fondus)



Etude du comportement électrochimique des CDCs en ILs

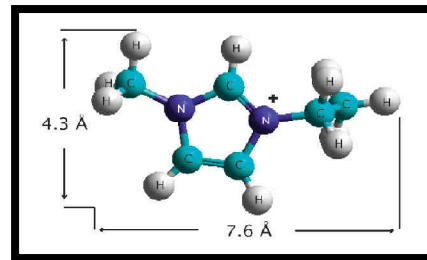
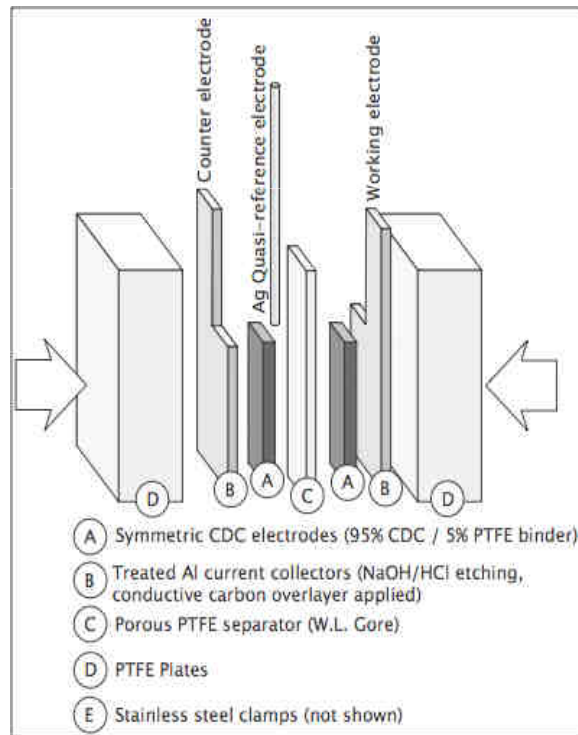


## 2.b Cellules 3-electrode dans EMI-TFSI

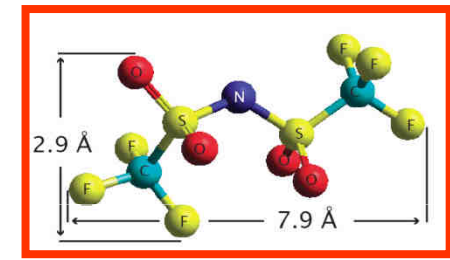
### Electrolyte

Ethyl-MethylImmidazolium-TriFluoro-methane-SulfonylImide (EMI-TFSI)

### Cellules Labo



*EMI<sup>+</sup>*



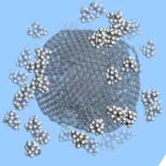
*TFSI<sup>-</sup>*

*EMI<sup>+</sup>* : 0,76 nm (longueur)

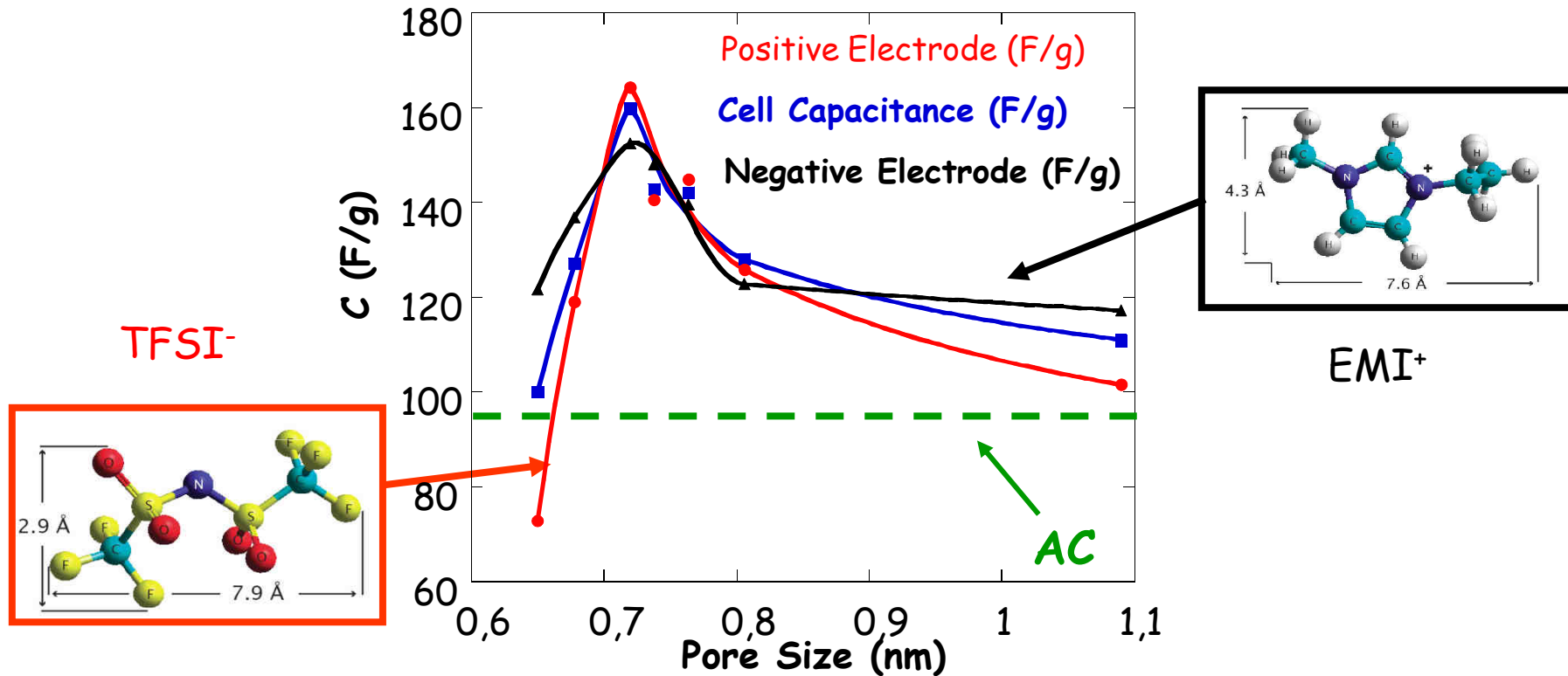
*TFSI<sup>-</sup>* : 0,79 nm (longueur)

→ Tailles très proches

Temp. 60°C; Carbones: CDCs



## 2.b Cellules 3-electrode dans EMI-TFSI

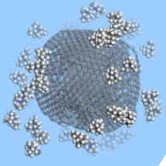


**Augmentation de capacité > 50% vs Carbones Activés (AC)**

**Maximum ~ 0,72 nm → quand taille ion ~ taille pore!!!**

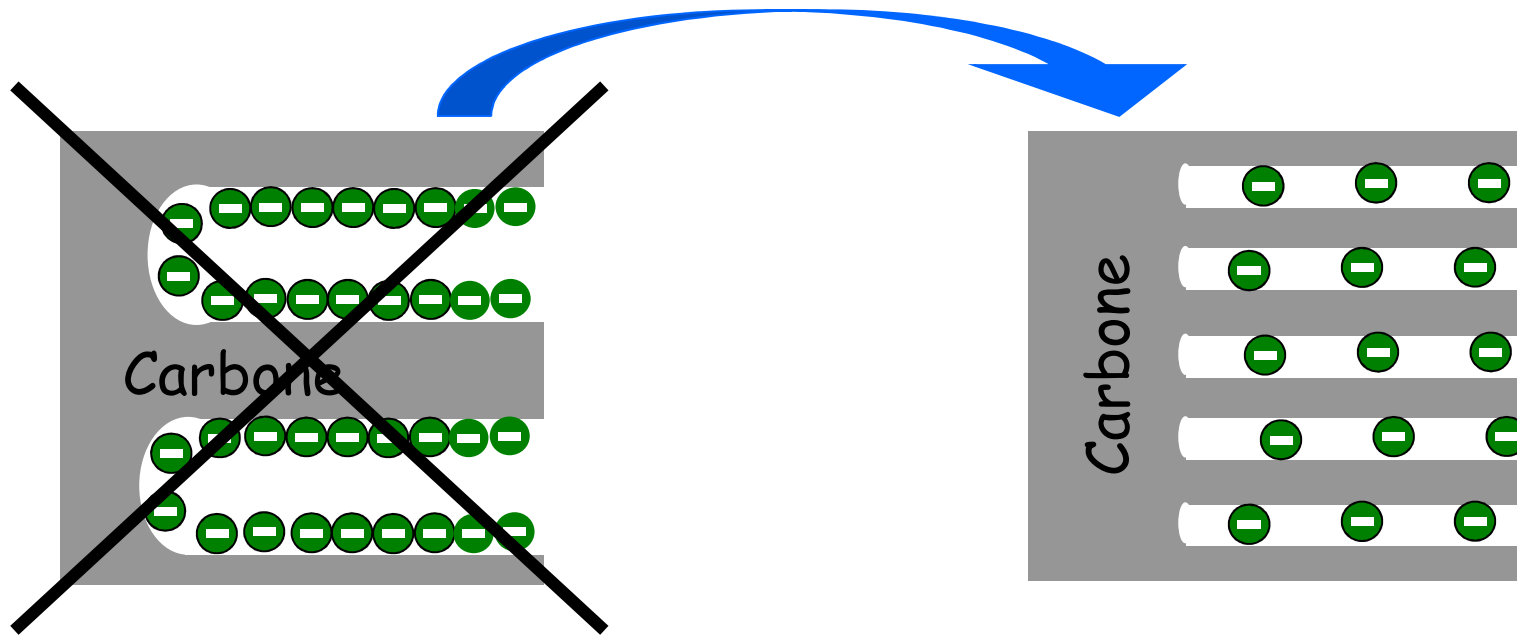
P. Simon, Y. Gogotsi Nature Materials, 7 (2008) 845-854

C. Largeot, C. Portet, J. Chmiola, P.L. Taberna, Y. Gogotsi and P. Simon JACS, 130 (9), 2730 -2731 (2008)



## 2.b Cellules 3-electrode dans EMI-TFSI

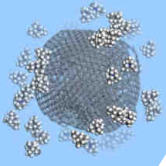
Maximum de Capacité quand taille ion  $\sim$  taille pore :



Ions alignés dans les pores = augmentation de capacité (>50%)  
Double-couche dans les pores sub-nanométriques ?

- puit de potentiel (K. Kaneko, Carbon 2009) ?
- écrantage (Kornyshev et al.?)
- exclusions de contre-ions (Shim et al.)

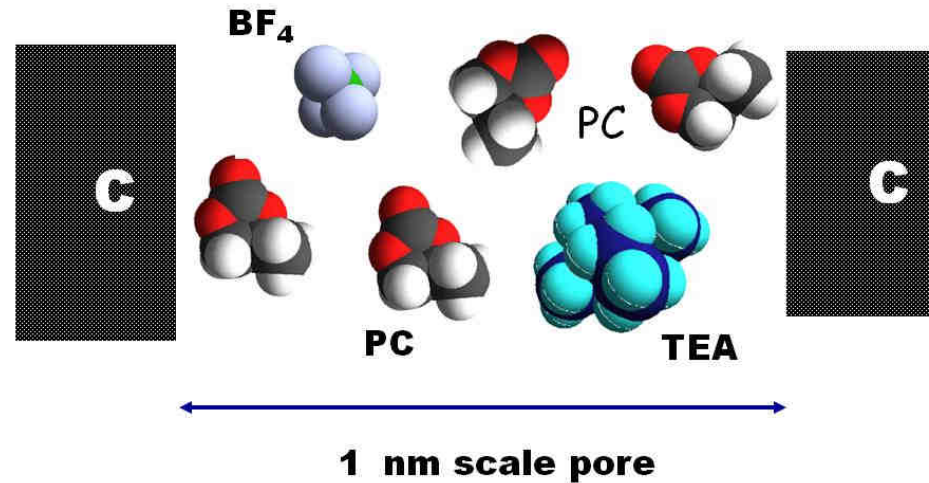
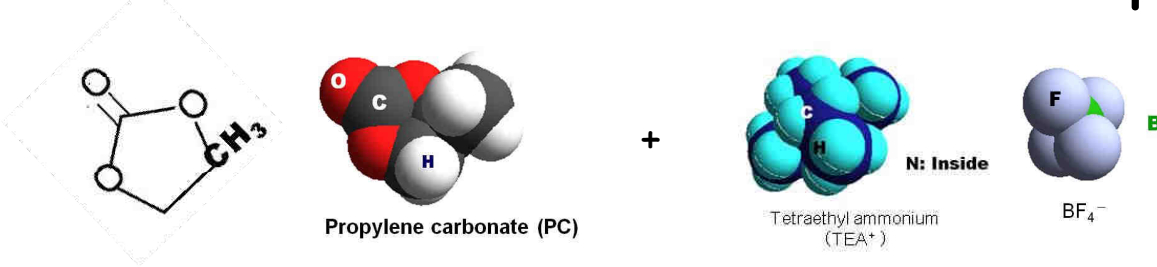
→ **Importance de la modélisation**



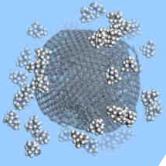
## 2.c Modélisation par Reverse Monte Carlo

Etude de la solvatation dans des fibres de C de 1 nm taille de pore

Electrolyte :



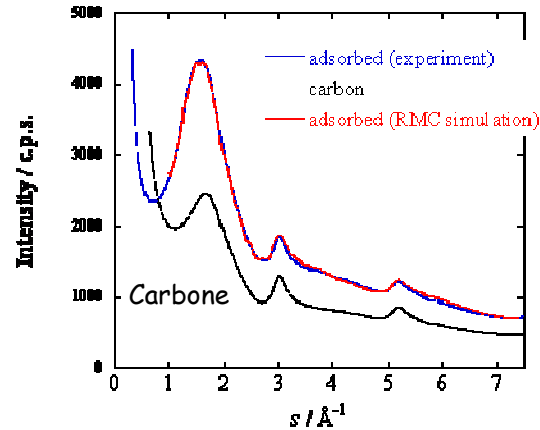
- 1) Immersion des fibres de carbone dans l'électrolyte
- 2) XRD (synchrotron) ; transformée de Fourier
- 3) Reconstruction du diffractogramme par Reverse Monte Carlo



## 2.c Modélisation par Reverse Monte Carlo

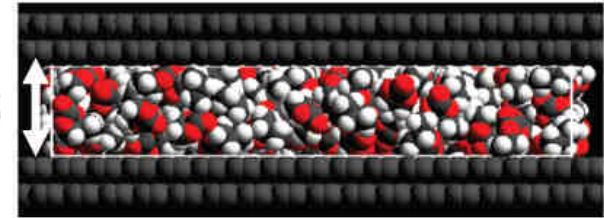
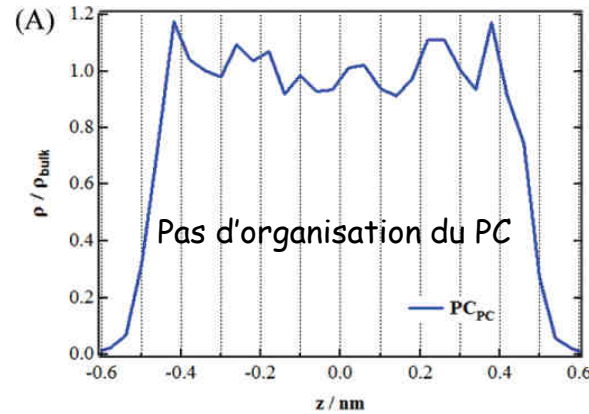
PC seul (sans sel)

XRD

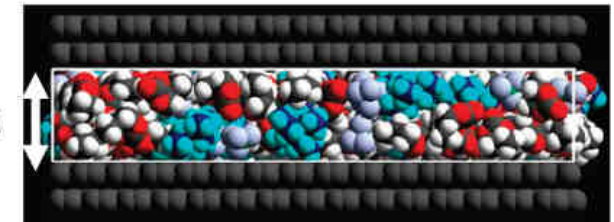
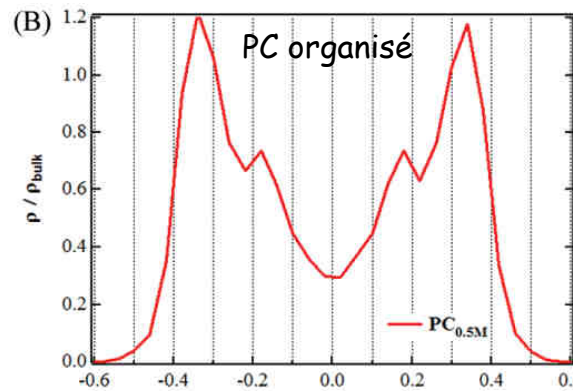
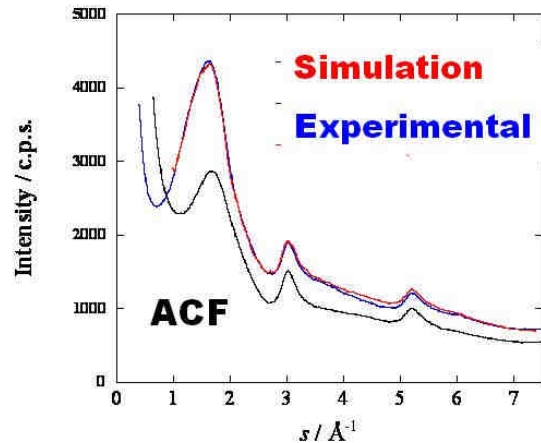


Distribution du PC selon Z

K. Kaneko et al., JACS 132, 2112 (2010)



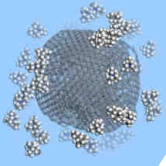
PC+sel



- Molécules de solvant concentrées sur les parois du carbone en présence de sel
- Environnement différent de l'électrolyte libre

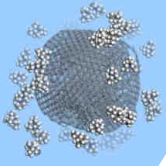
Début d'explication sur la structure des ions dans les nanopores ... en cours...!





# Plan

1. Les supercondensateurs
  - principes et applications
  
2. Adsorption dans les carbones microporeux (CDCs)
  - a) électrolyte organique liquide
  - b) liquide ionique
  - c) modélisation
  - d) films de CDC massifs**
  
3. Les supercondensateurs à base d'oxydes

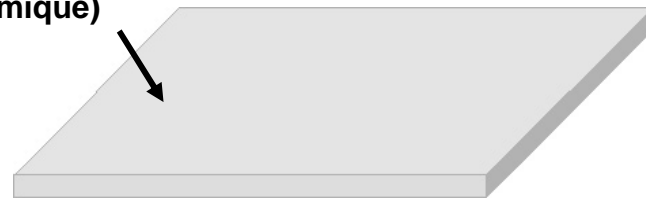


## 2.d Films massifs de CDCs

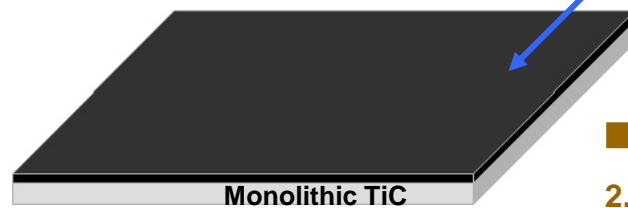
### Micro-systèmes pour:

- alimenter des MEMS (accéléromètres)
- récupérer l'énergie (vibration)

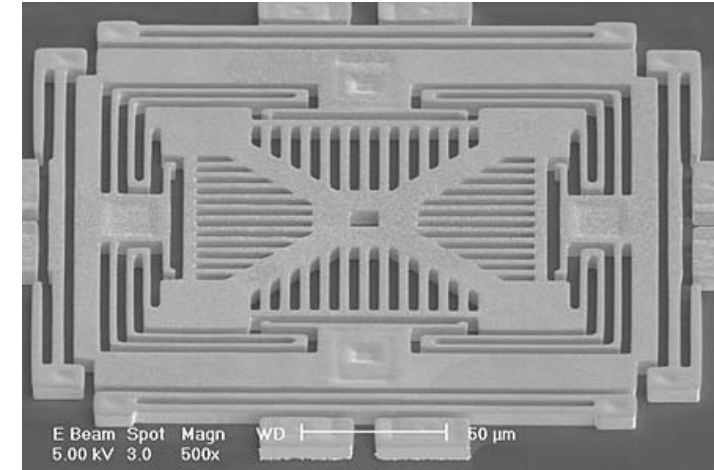
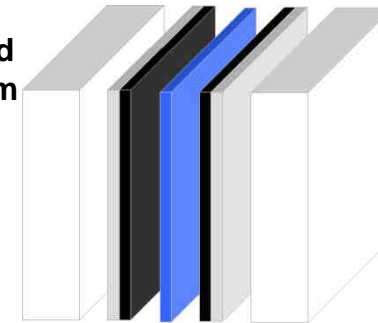
TiC massif (céramique)



1. Chlorination @ 500°C

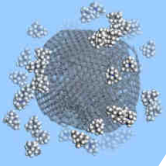


2. Cellule

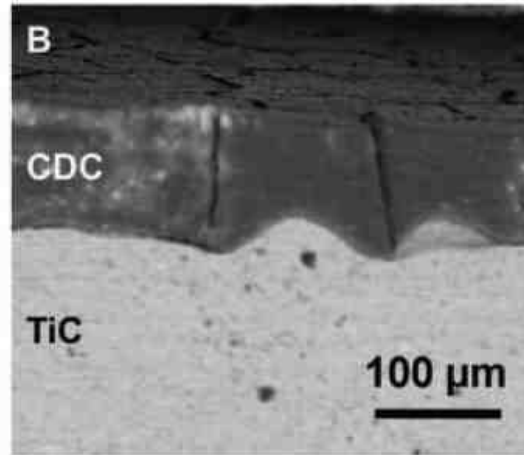
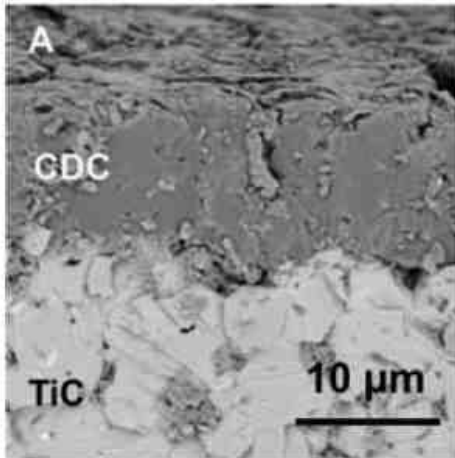


→ Pas de liant, électrode dense

- TiC plate
- CDC film
- Teflon plates
- Electrolyte + separator

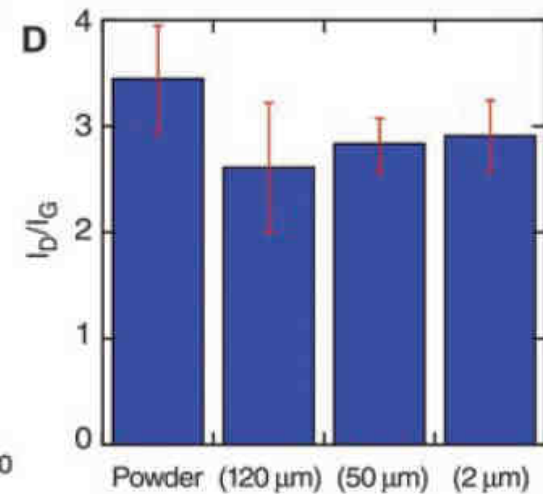
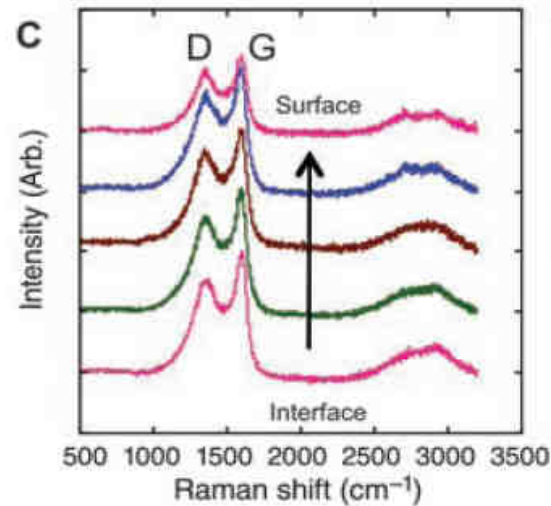


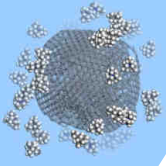
## 2.d SEM et Raman



Films craquelés  
mais adhérents

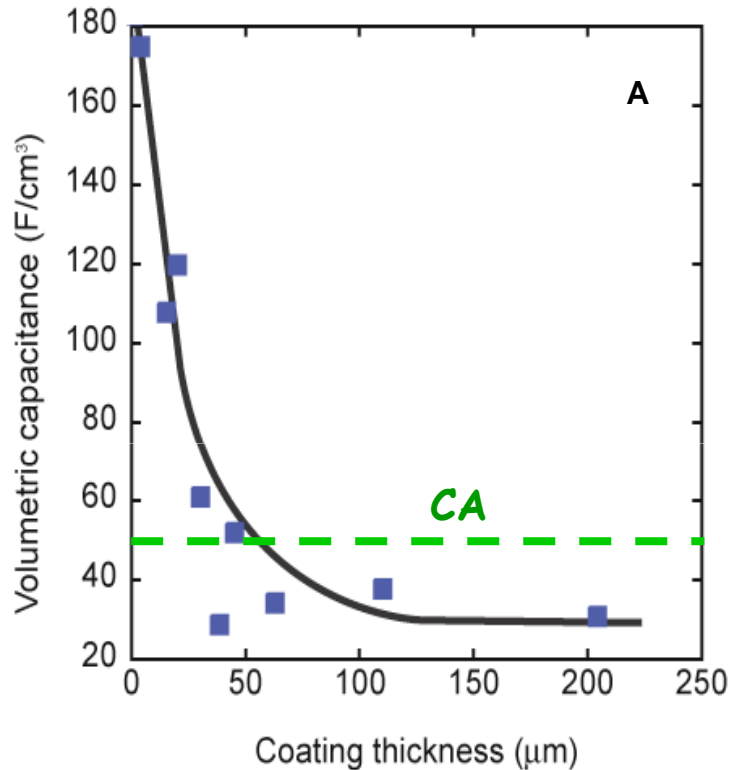
Spectres Raman  
similaires dans  
l'épaisseur du film



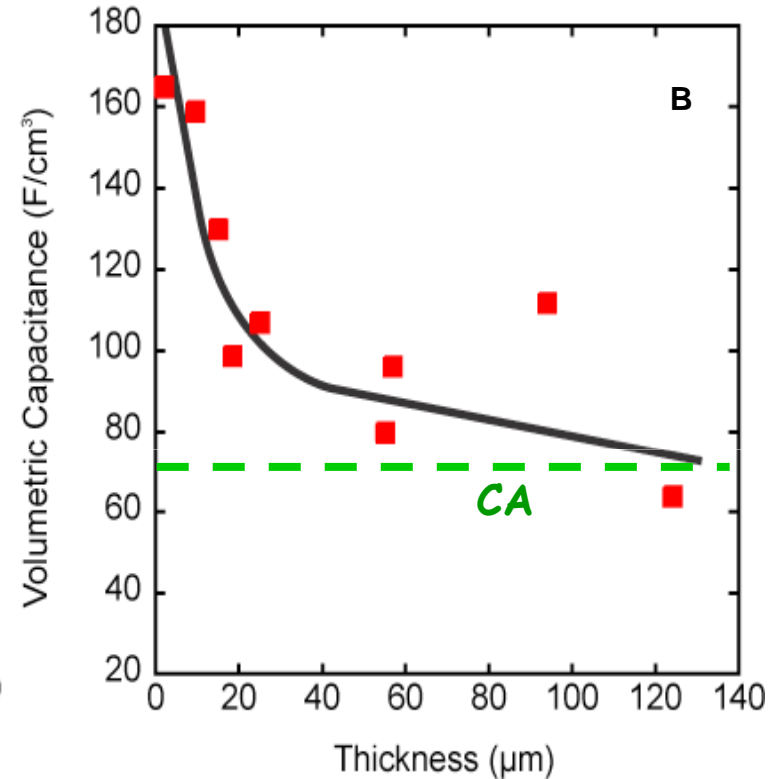


## 2.d CDCs films : Capacités volumiques

ACN + 1M  $\text{NEt}_4\text{BF}_4$

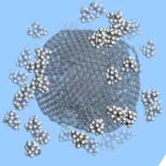


$\text{H}_2\text{SO}_4$  1M

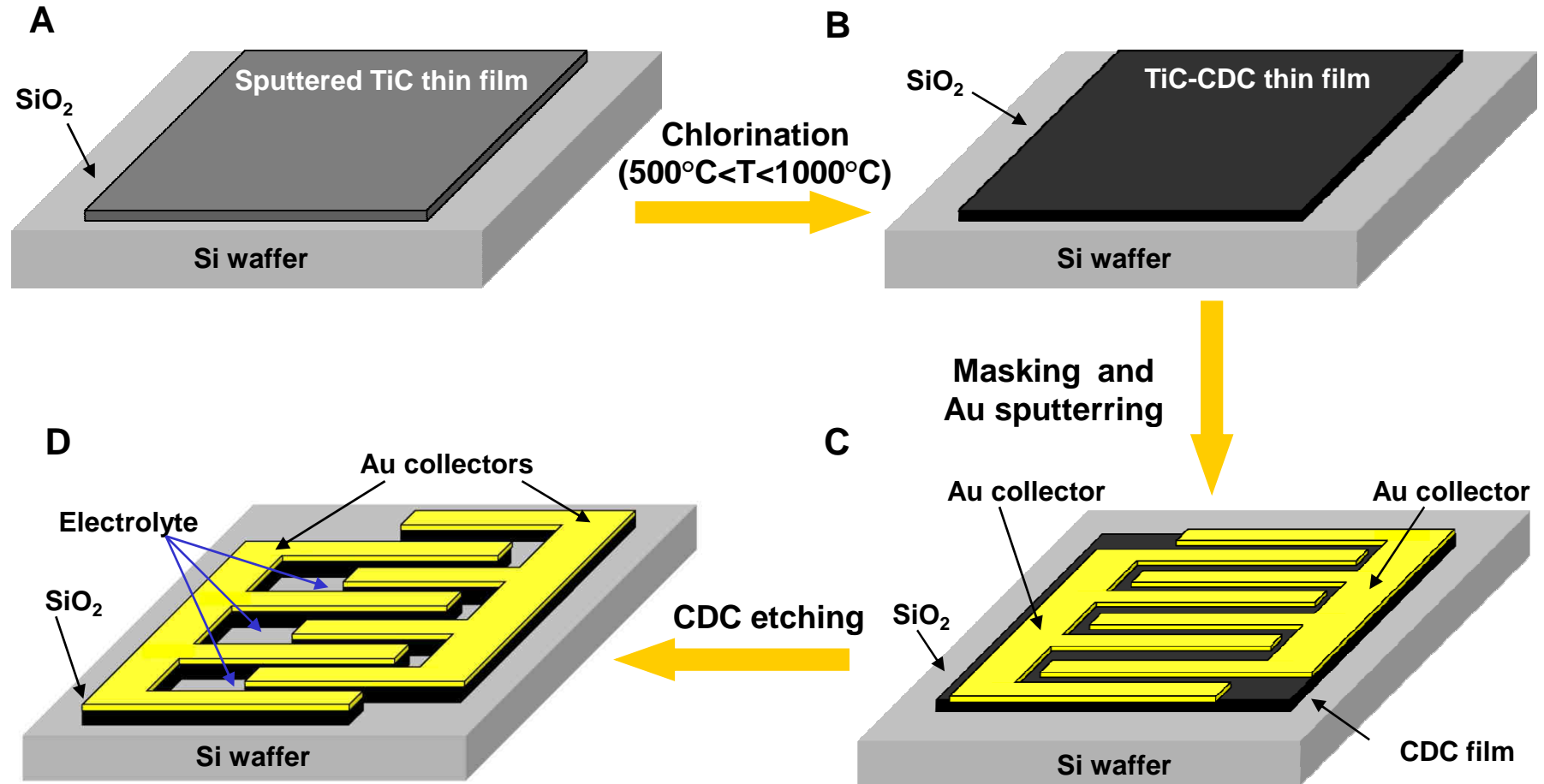


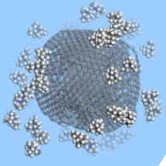
Capacité volumique  $180 \text{ F/cm}^3$  pour  $e = 1 \text{ μm}$  ( $\text{CA} = 50 \text{ F/cm}^3$ )

→ Films minces de haute densité d'énergie (+300% !!!)



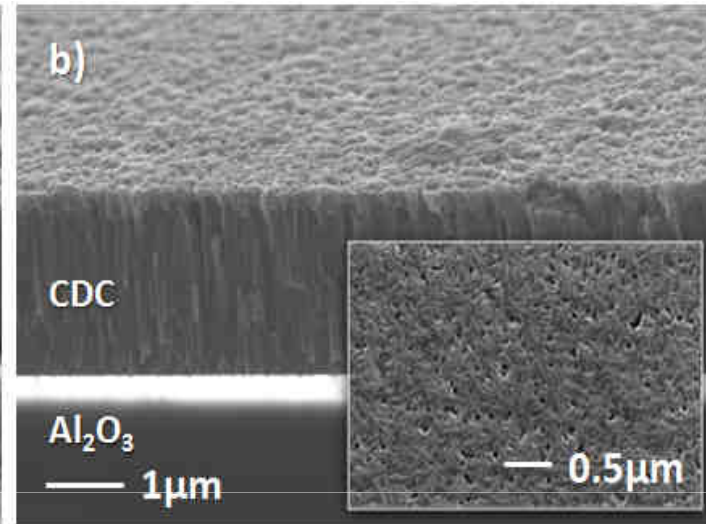
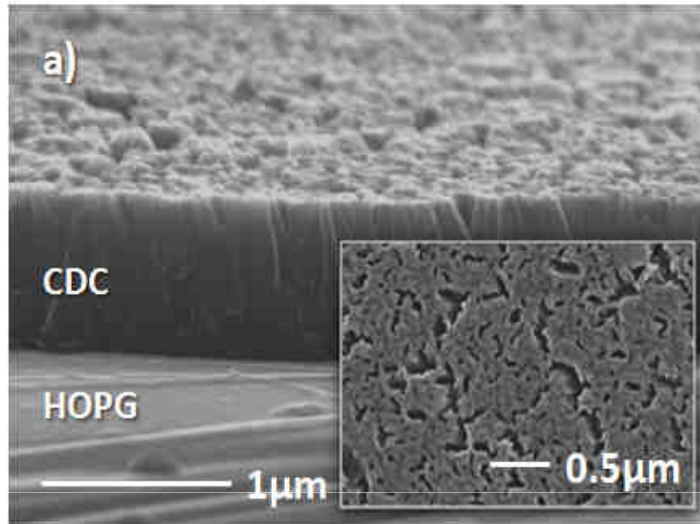
## 2.d CDCs films : vers SC intégrés sur Si ?



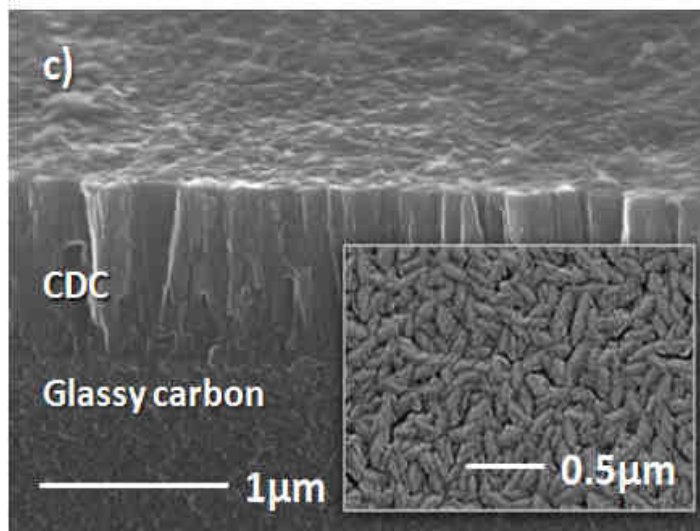


## 2.d Films minces de CDC sur ≠ supports (PVD)

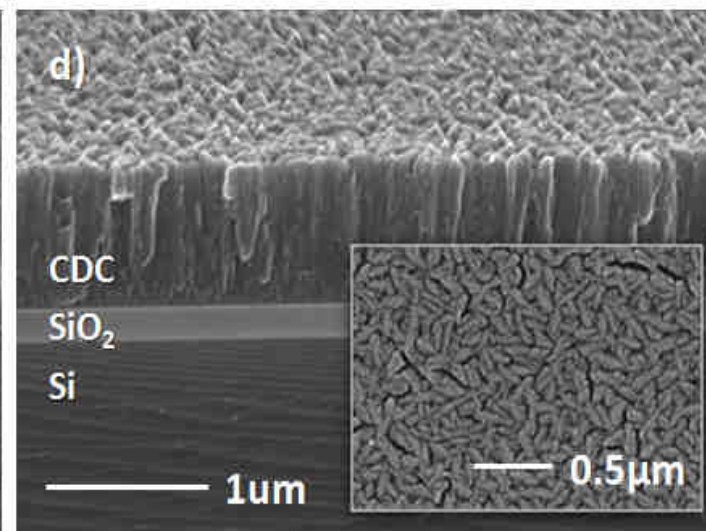
Préparés  
@ 500°C



400°C

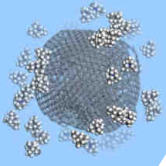


300°C



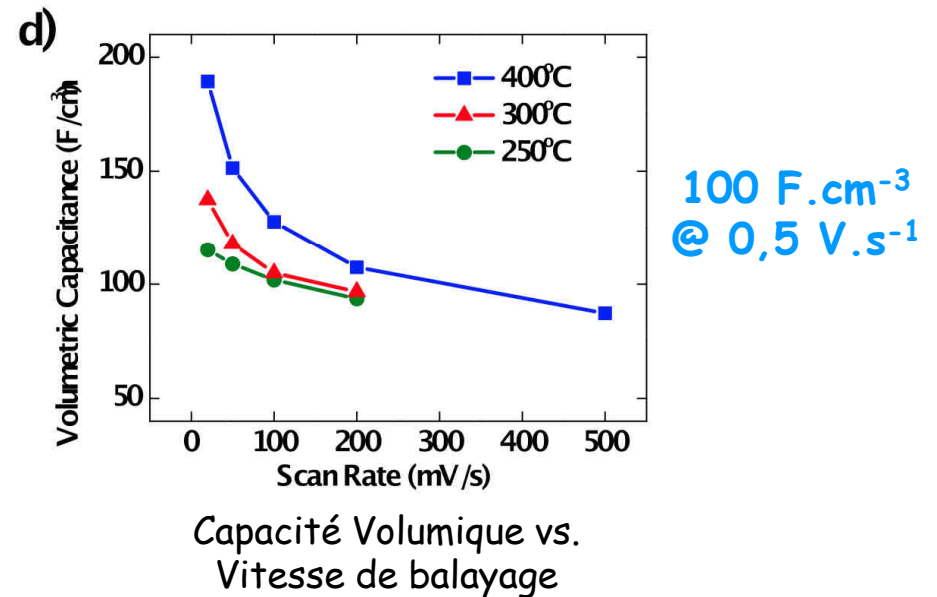
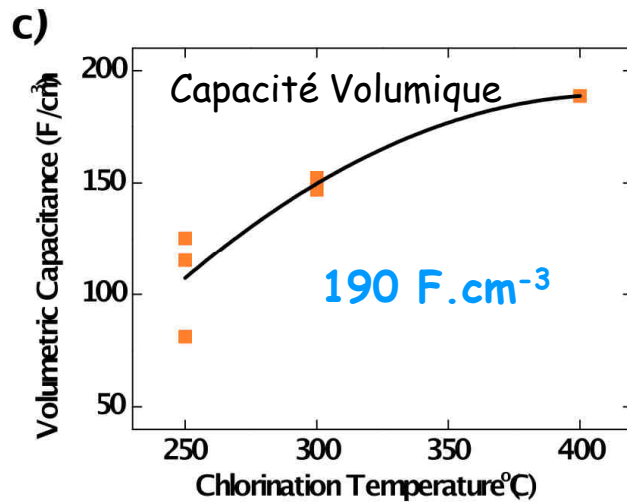
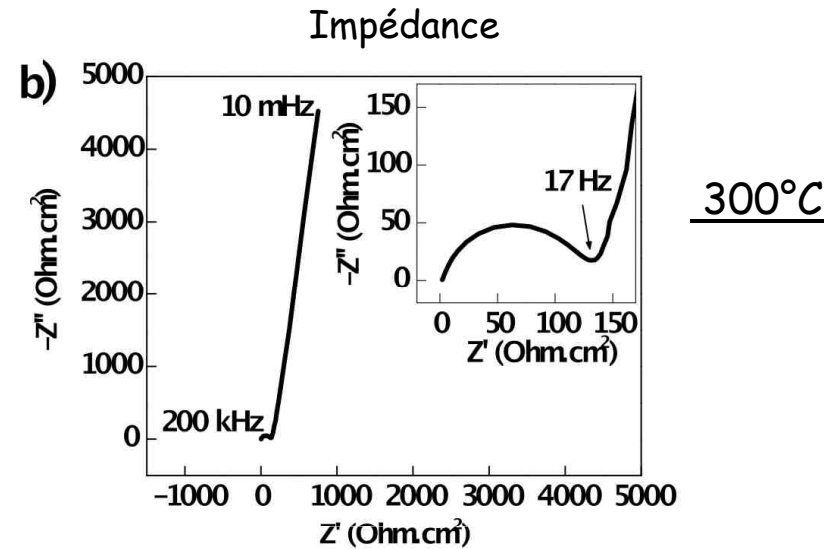
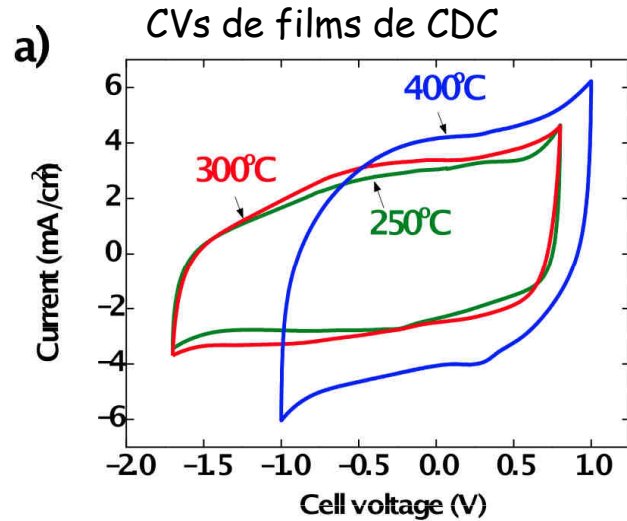
300°C

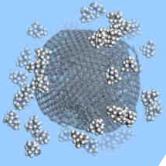
Plusieurs types de substrats peuvent être utilisés...



## 2.d Couches minces CDC: Electrochimie

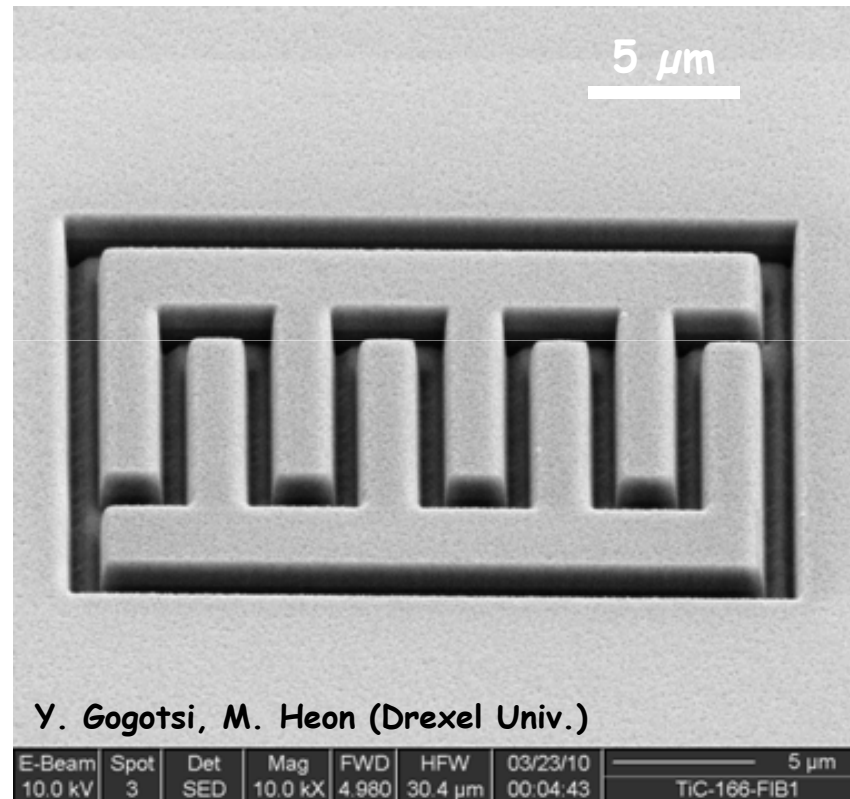
TEA-BF<sub>4</sub>  
dans ACN





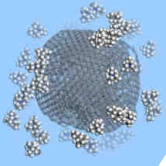
## 2.d Essais de gravure Laser...

**Patterning (FIB) ; 2 électrodes  
inter-digitées.**



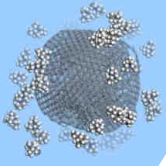
→ Application :  
micro-systèmes intégrés sur Si de haute densité d'énergie





# Plan

1. Les supercondensateurs
  - principes et applications
  
2. Adsorption dans les carbones microporeux (CDCs)
  - a) électrolyte organique liquide
  - b) liquide ionique
  - c) modélisation
  - d) films de CDC massifs
  
3. Les supercondensateurs à base d'oxydes



### 3. Autres types de supercondensateurs

## Prochains Défis pour les Supercondensateurs

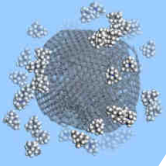
Augmenter la densité d'énergie ( $E = 1/2 C.V^2$ ) > 10 Wh/kg  
→  $t_{\text{décharge}} > 10s$

#### 1. Augmenter la capacité des carbones

Travailler sur l'interface carbone / électrolyte

→ relation taille des pores / taille des ions

#### 2. Augmenter la tension de fonctionnement

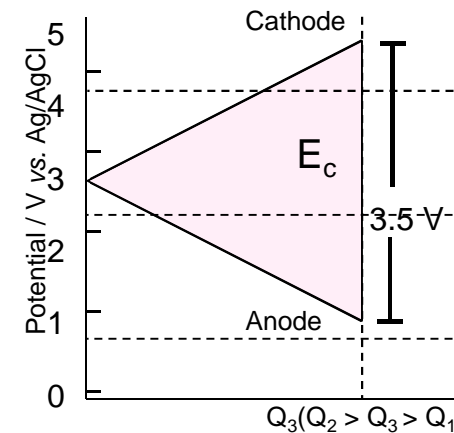
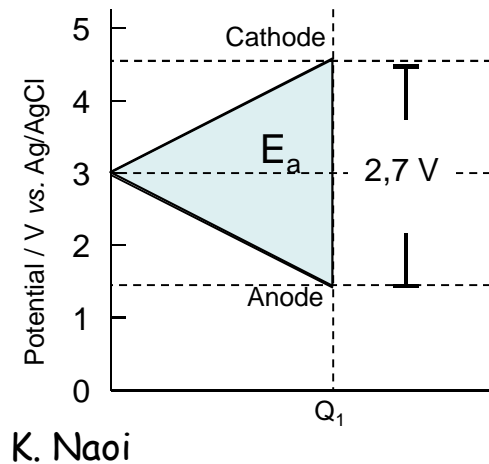


### 3. Autres types de supercondensateurs

#### 2. Augmenter la tension de fonctionnement

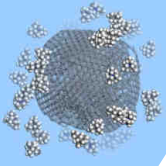
##### a) Nouveaux électrolytes :

→ Mettre au point des électrolytes stables à haut potentiel



**Liquides ioniques** :  $\Delta E$  max = 4 V MAIS peu conducteurs ; OK pour  $T > 30^\circ\text{C}$

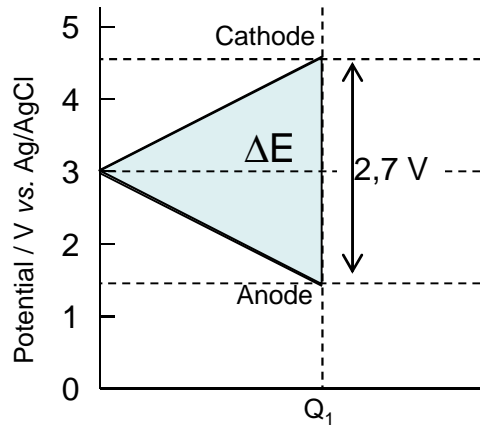
Travaux sur les électrolytes organiques : remplacement AN  
Electrolytes aqueux : C/C avec  $\Delta E$  max = 2V



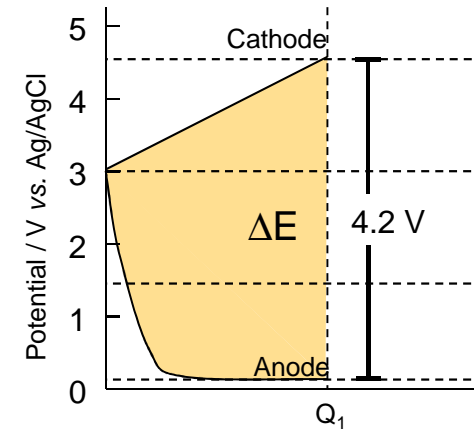
# 3. Les systèmes hybrides (asymétriques)

## b) Systèmes hybrides :

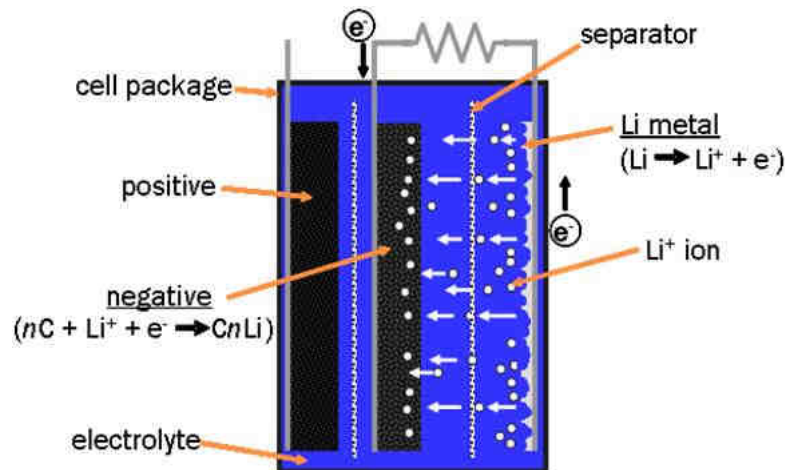
Associer une électrode de carbone à une électrode faradique (type batterie)



Ex. Anode Li-ion



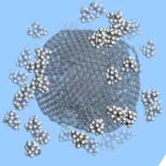
## Le "Li-ion capacitor"



Cell Voltage (V)	C (F) / Ah	Energy (Wh/kg)	$R_1$ kHz ( $m\Omega$ )	$R_{DC}$ ( $m\Omega$ )	Power max. (kW/kg)	W. (g)	Vol. (mL)
3.8 - 2.2	2200 / 1	14	1.4	2.3	10	208	124

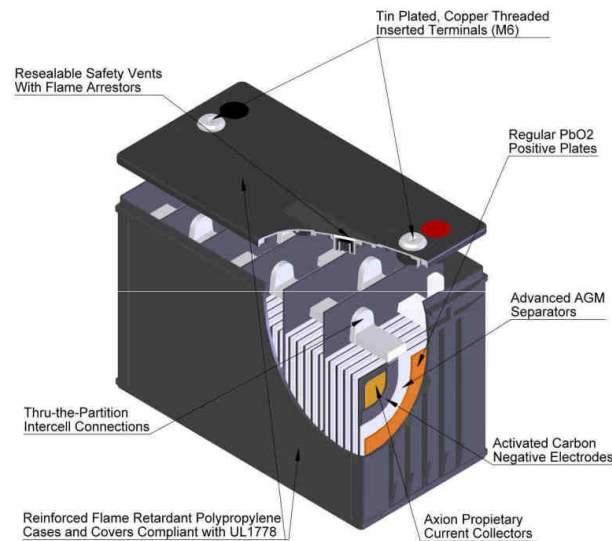
Energie augmentée mais :

- durée de vie limitée
- vitesse de recharge limitée

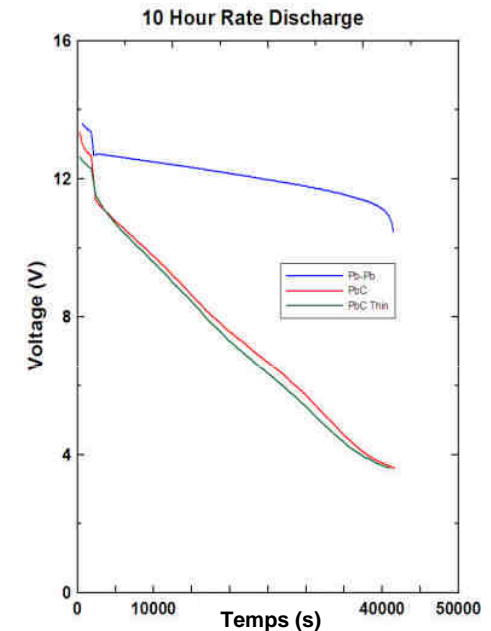
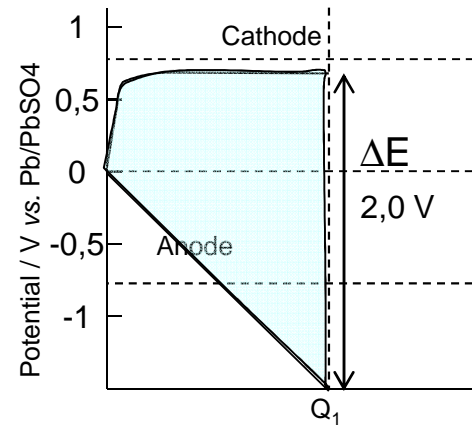


### 3. Les systèmes C / PbO<sub>2</sub> et C / NiOOH

c) **Systèmes hybrides en milieu aqueux :** Le système Carbone / PbO<sub>2</sub>  
Accumulateur au plomb Pb/PbO<sub>2</sub> : peu performant (énergie, puissance) mais bas coût  
→ Remplacement de la négative pour augmenter la puissance



Axion Power PbC® battery ([www.axionpower.com](http://www.axionpower.com))



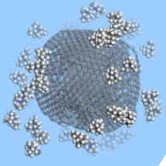
→ Solution pour applications stationnaires

**Le système Carbone / NiOOH :** remplacement de la négative de Cadmium dans Ni/Cd



Fonctionne en milieu alcalin ; application démarrage à froid des moteurs

<http://www.saftbatteries.com>

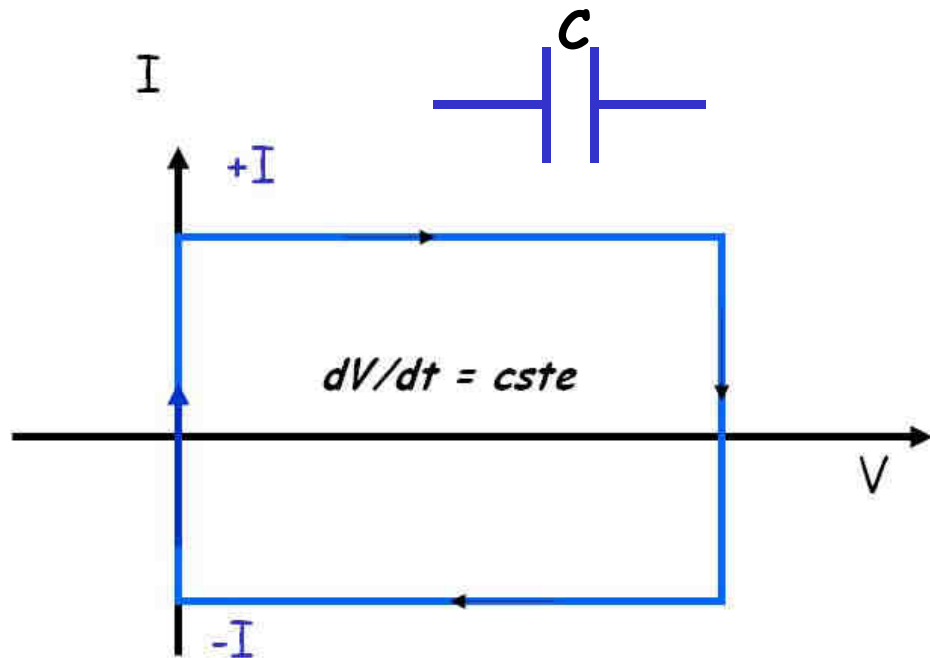


### 3. Le système C / MnO<sub>2</sub>

c) Systèmes hybrides en milieu aqueux :

Les systèmes Carbone / MnO<sub>2</sub>

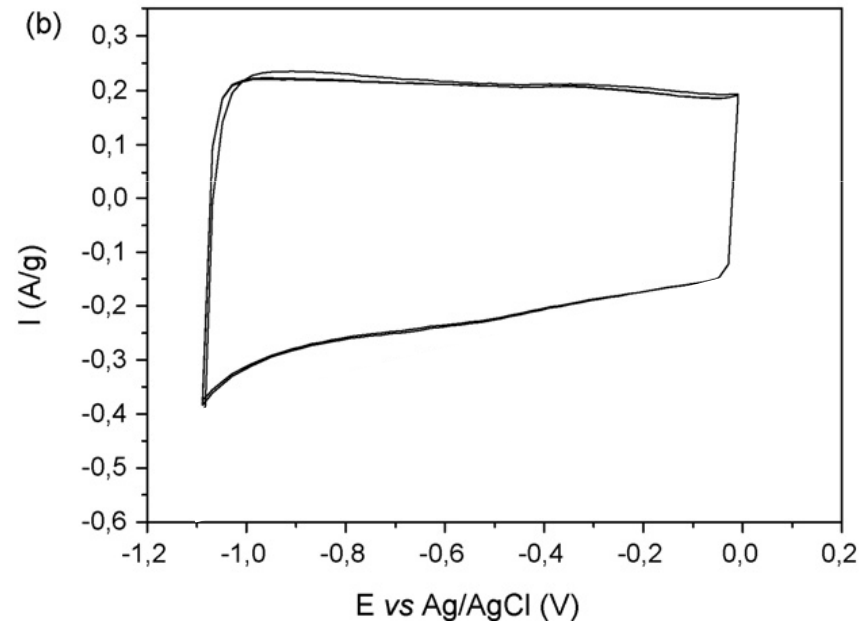
Voltammétrie d'un condensateur parfait

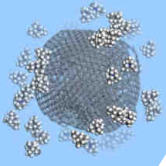


$$I = C \times (dV/dt)$$

Réponse capacitive = CV rectangulaire

Voltammétrie d'une électrode de carbone en milieu aqueux (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5M)



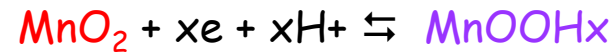


# 3. Le système Carbone / MnO<sub>2</sub>

c) Systèmes hybrides en milieu aqueux :

Les systèmes Carbone / MnO<sub>2</sub>

MnO<sub>2</sub> : stockage électrochimique

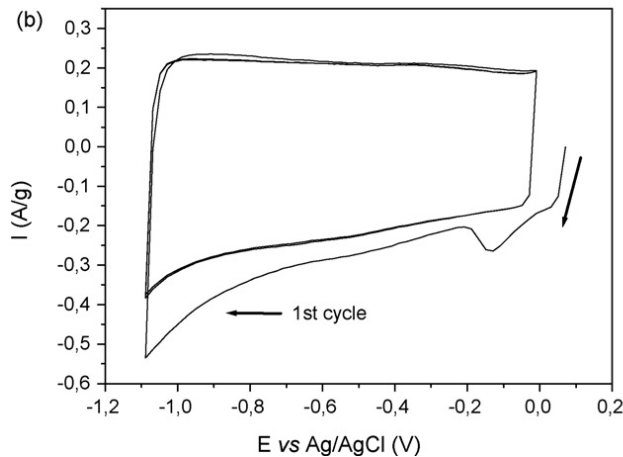
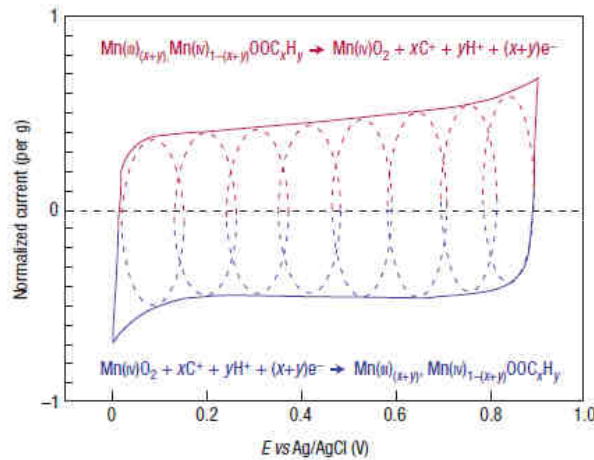


Mais réaction rédox très rapide, de surface



MnOOH<sub>x</sub>

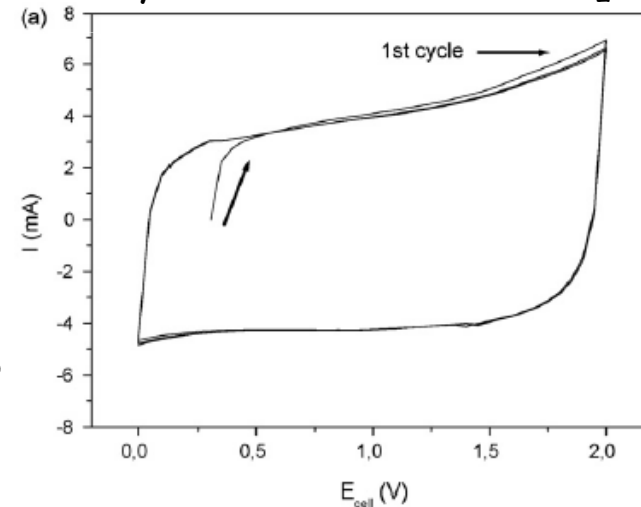
Comportement "Pseudo-capacitif"



MnO<sub>2</sub> (positive)

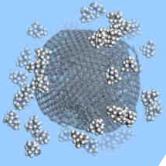
Carbone (negative)

Système Carbone / MnO<sub>2</sub>

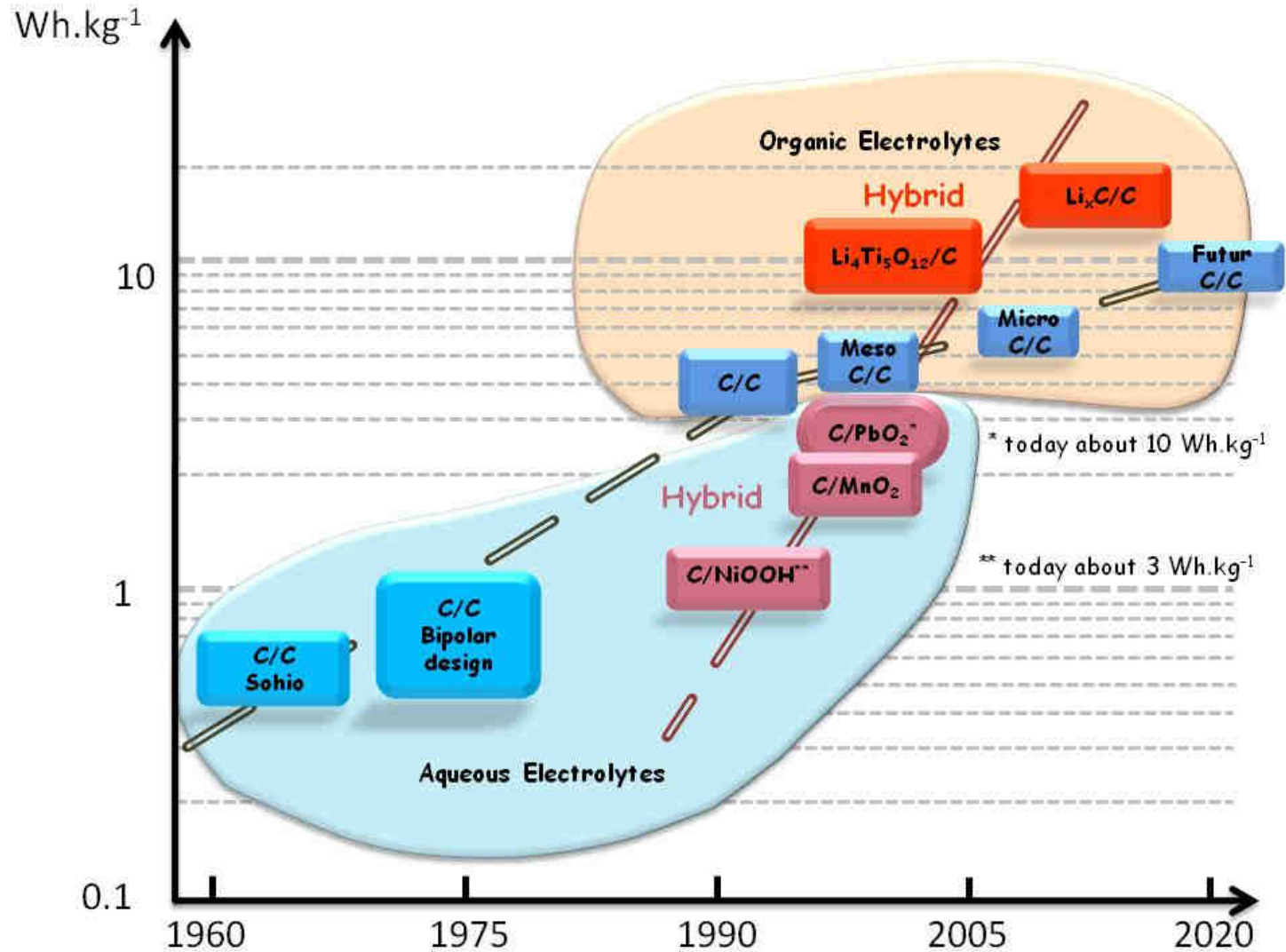


$\Delta V$  max  $\approx$  1,5V (milieu aqueux), mais bas coût  
 → Alternative pour applications spécifiques

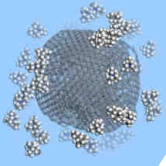
Travaux T. Brousse (IMN), F. Favier (IGC)



# Evolution des performances des systèmes







## 4. Conclusions

### Les supercondensateurs à base de carbone (EDLCs)<sup>20</sup>

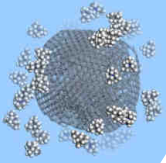
1. Stockage électrostatique en surface ; pas de réaction rédox;
2. Forte P (10 kW/kg) et E = 5Wh/kg ; durée de vie > 10<sup>6</sup> cycles  
→ complémentaire aux batteries (énergie)
3. Récupération énergie (cinétique - freinage -, potentielle ...)

### Carbones Microporeux (CDCs) pour les EDLCs

1. Augmentation de capacité grâce à la désolvatation partielle  
→ double la capacité volumique ; pas de limitation en puissance
2. Capacité exacerbée quand taille pore ≈ taille ion ; mécanisme ?  
→ besoin de modélisations couplées aux expériences (in-situ)
3. Micro-supercondensateurs pour MEMS ou récupération  
→  $\mu$ -Sc de grande densité d'énergie (x3) avec C microporeux

### Systèmes hybrides pour augmenter l'énergie :

1. Carbone / MnO<sub>2</sub>, carbone PbO<sub>2</sub> en milieux aqueux : solution faible coût
2. Couplage avec électrode à intercalation de Li : forte E mais pb cyclabilité



# THANKS

PUF



ATUPS



## **CIRIMAT**

P.L. Taberna, B. Daffos,  
A. Balducci, R. Dugast, P. Huang,  
E. Iwama, C. Largeot, R. Lin  
C. Portet, J. Ségalini

## **Drexel University (Philadelphia)**

Y. Gogotsi,  
J. Chmiola, M. Heon, C. Perez  
V. Pressler, Jake Mc Donough

## **LAAS-CNRS**

M. Brunet, D. Pech

## **Autres...**

P. Mattesco, J. Dalenq (EADS-Astrium)  
J.P. Bellomo (Alstom), J.F. Cazaux (SkyLab)

## **Shinshu Univ. (Nagano)**

K. Kaneko

## **Tokyo Univ.**

K. Naoi