



Nucléaire et nanomatériaux : Applications et perspectives



Institut de chimie Séparative de Marcoule

Laboratoire des Nanomatériaux pour L'Énergie et le Recyclage

CEA / Direction de l'Énergie Nucléaire / Marcoule

Xavier.deschanel@cea.fr

Tél : 04 66 79 60 87

Sommaire

- Introduction
 - ✓ Les nanomatériaux – Définitions et généralités
 - ✓ Contraintes d'usage des matériaux dans le nucléaire – Intérêt des nanomatériaux
- Nanomatériaux
 - ✓ Elaboration et mise en forme
 - ✓ Acier de gainage du combustible - ODS
 - ✓ Nanostructuration – Irradiation
 - ✓ Conclusion
- Matériaux mésoporeux
 - ✓ Elaboration et mise en forme
 - ✓ Chimie séparative
 - ✓ Conditionnement des déchets

Nanomatériau : « Définition institutionnelle »

Définition officielle de la Commission européenne (Octobre 2011)

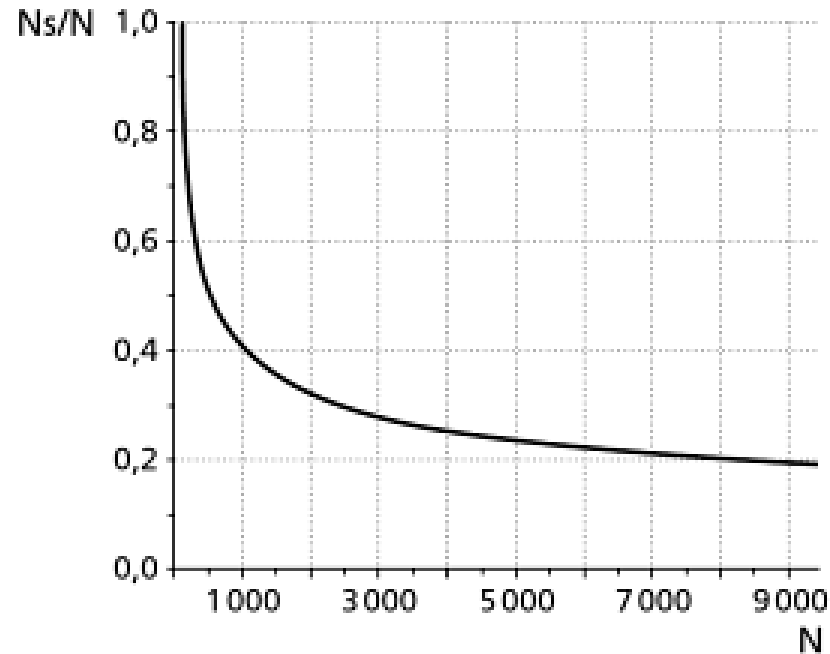
- ✓ Matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé
- ✓ Matériau contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat
- ✓ Matériau contenant au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm

Nanomatériau : « Définition scientifique »

Matériau pour lequel il existe une **limite en dessous de laquelle ses propriétés sont différentes** de celles du matériau massif habituel.

- ✓ Propriétés mécaniques, le seuil apparaît pour une taille de grain peu inférieure au micron
- ✓ Propriétés optiques, des phénomènes particuliers apparaissent à des échelles qui sont supérieures au nanomètre de 1 à 3 ordres de grandeur
- ✓ Un autre seuil apparaît pour tous les matériaux lorsqu'une dimension au moins des particules est suffisamment faible pour induire des effets quantiques

Importance de la surface



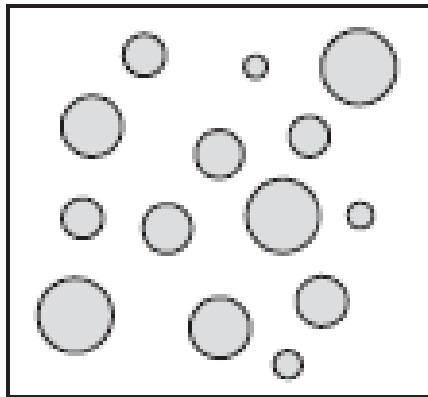
Proportion d'atomes de surface (N_s) pour une particule sphérique en fonction de son nombre N d'atomes, 2nm correspondent à environ 500 atomes et 5nm à 8000 atomes (d'après Henri (2006)).

Approches utilisées pour leur élaboration

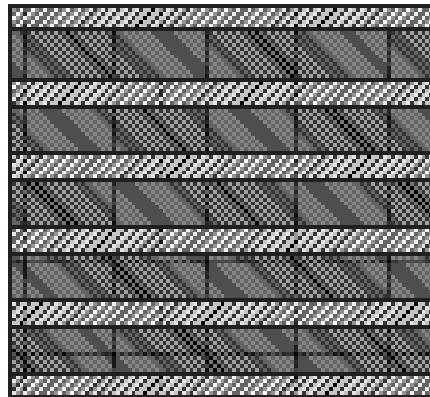
- **Approche Top-down**
 - ✓ Mis en œuvre dans l'électronique pour obtenir des composants ayant des tailles $<0,1 \mu\text{m}$
 - ✓ Méthodes physiques de préparation (dépôt de résine, lithographie, gravure, nanoimpression, technique de dépôt...)
- **Approche Bottom-up**
 - ✓ Voie chimique
 - ✓ Préparation des nano-objet à partir de l'échelon nanométrique (molécules, agrégats, clusters, etc.)
 - ✓ 2 étapes :
 - Synthèse du nano-objet
 - Mise en forme pour obtention d'un nanomatériau

Différentes classifications des nanomatériaux

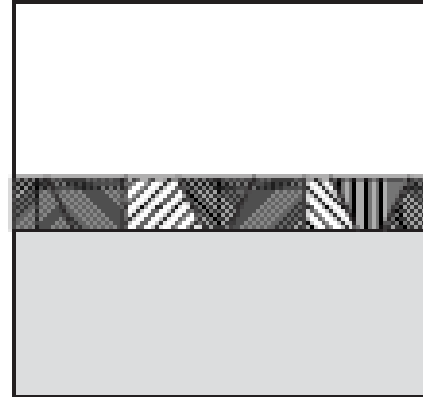
Siegel distingue différents types de nanomatériaux : les multicouches, les monocouches superficielles ou incluses, et les matériaux tridimensionnels



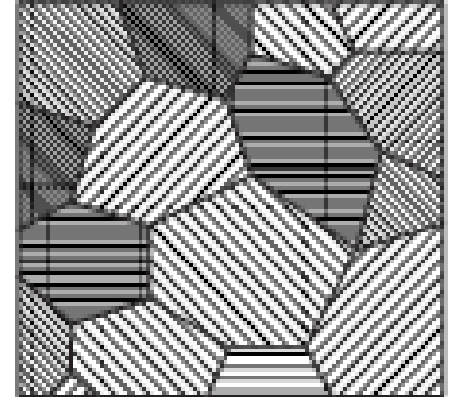
(a) amas (ou agrégats)



(b) multicouche

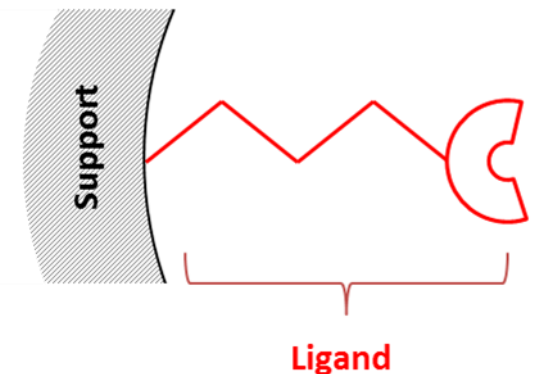


(c) monocouche superficielle ou incluse (ou enterrée)



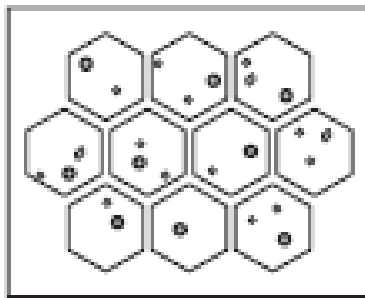
(d) matériaux tridimensionnels monophasés

Greffage d'un nano-objet (nanoparticule, ligand complexant) sur un support

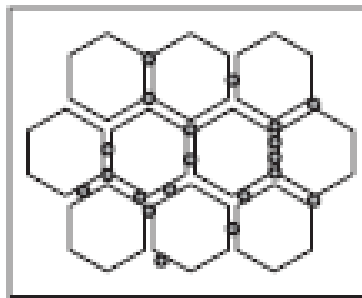


Différentes classifications des nanomatériaux

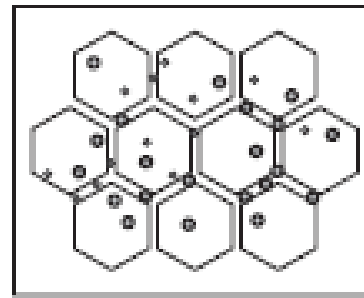
L'organisation même des matériaux tridimensionnels peut revêtir des caractéristiques nanométriques différentes : nanocomposites de type **intragranulaire**, **intergranulaire**, ou **mixte** (distribution d'une phase nanométrique minoritaire vis-à-vis d'une phase majoritaire micrométrique), et en outre les composites entre deux phases d'échelle nanométrique pour lesquelles il peut y avoir ou non percolation



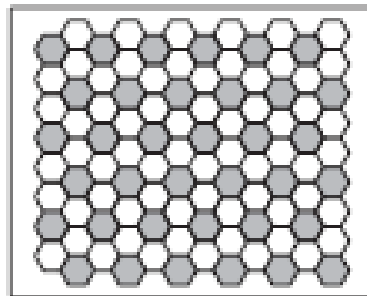
(a) type intragranulaire



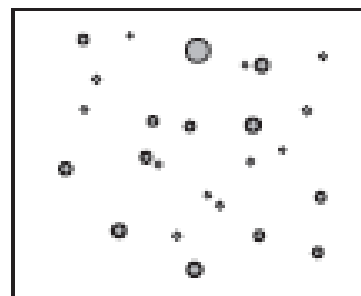
(b) type intergranulaire



(c) type mixte
(inter-intragranulaire)



(d) type "nano-nano"
avec percolation

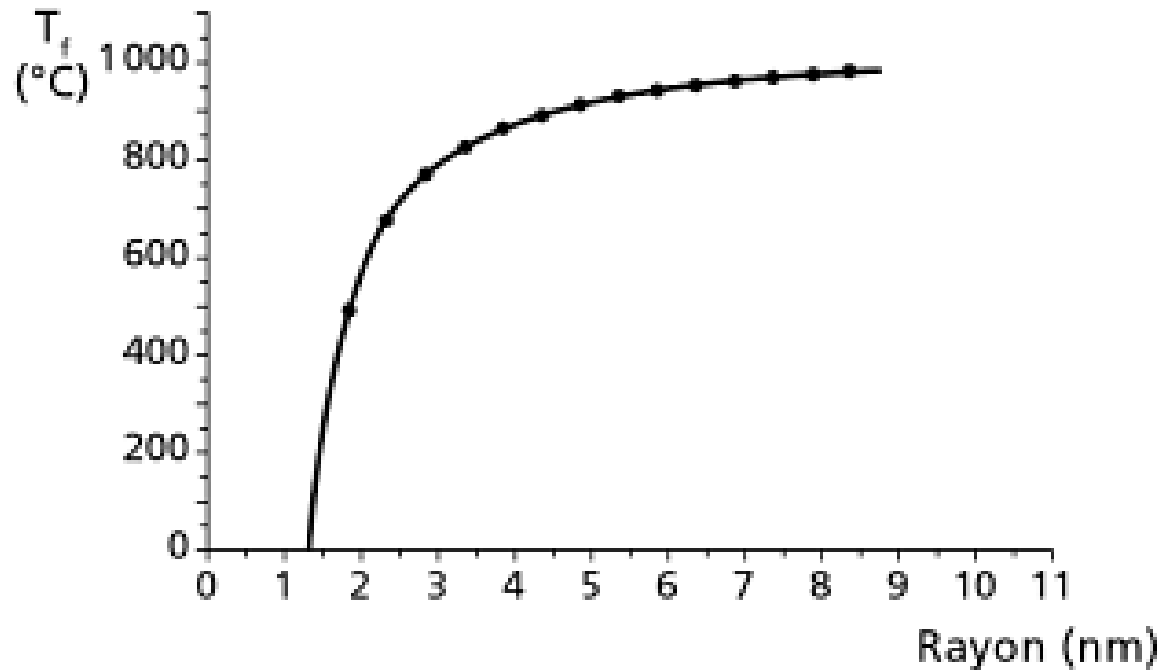


(e) matrice verre
avec précipités nanométriques



Cas particulier
des matériaux
poreux

Propriétés modifiées par le caractère nanométrique



Effet de la taille de la particule sur la température de fusion de l'or (d'après Labastie (2006)).

Propriétés modifiées par le caractère nanométrique

- Propriétés mécaniques

- ✓ Limite élastique (R_e)

- Dépendance en d pour $0.1\mu\text{m} < d < 1\text{mm}$ (**Loi de Hall-Petch**)

$$R_e = R_{e_0} + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

R_{e_0} : Limite élastique du monocristal

k : Coefficient

d : Diamètre du grain

Conséquence de l'interaction des dislocations avec les joints de grains qui constituent un obstacle à leur propagation

Dans le domaine nanométrique cette relation n'est plus vérifiée ($k < 0$)
D'autres phénomènes tels que la diffusion aux joints de grains (fluage Coble) interviennent

Propriétés modifiées par le caractère nanométrique

- Propriétés mécaniques

✓ Ténacité K_{Ic}

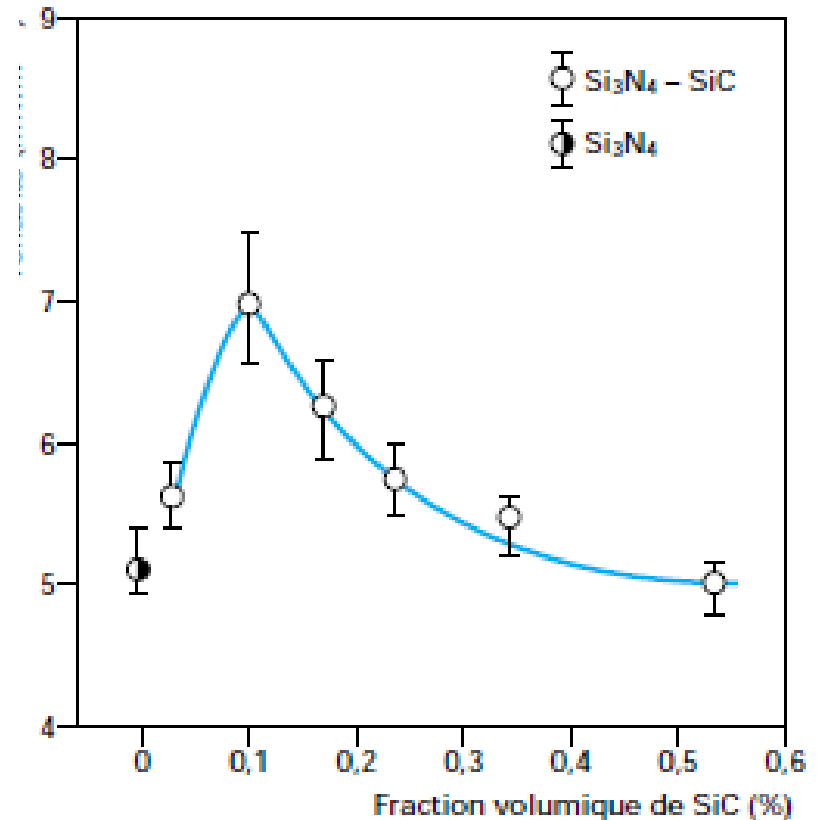
$$\sigma_r = \frac{K_{Ic}}{E \times \sqrt{c}}$$

σ_r : Contrainte à rupture

K_{Ic} : Ténacité

c : Taille du défaut critique

E : Module d'Young



Variation de la ténacité de composites Si_3N_4 -SiC en fonction du taux de SiC nanométrique, d'après Izaki (1990)

Propriétés modifiées par le caractère nanométrique

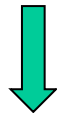
- Réactivité chimique : Catalyse hétérogène

Maximiser la surface active du catalyseur

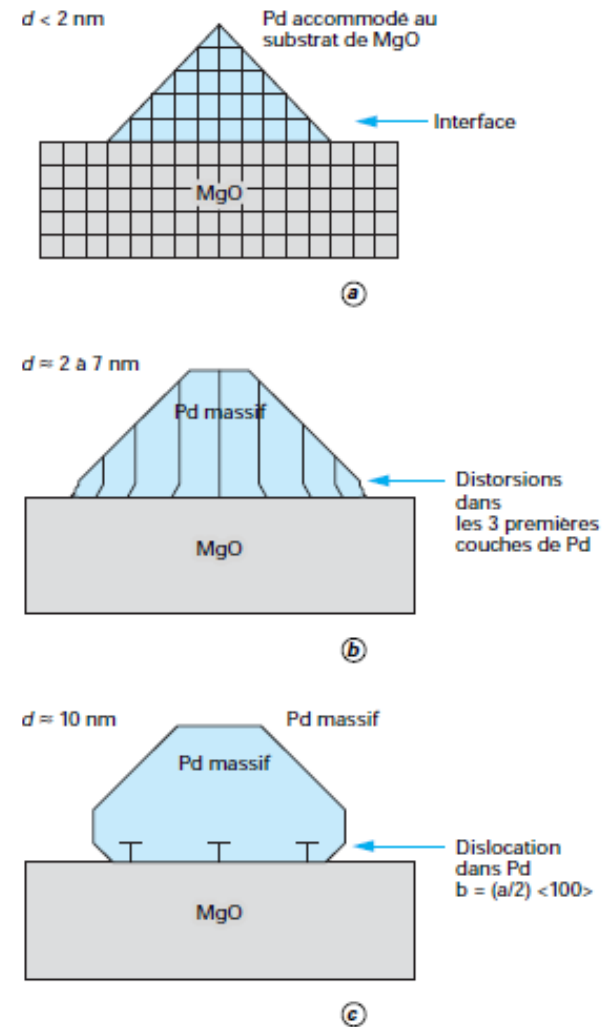


Nanomatériau supporté par un substrat

Épitaxie entre le substrat et le catalyseur pour augmenter la réactivité



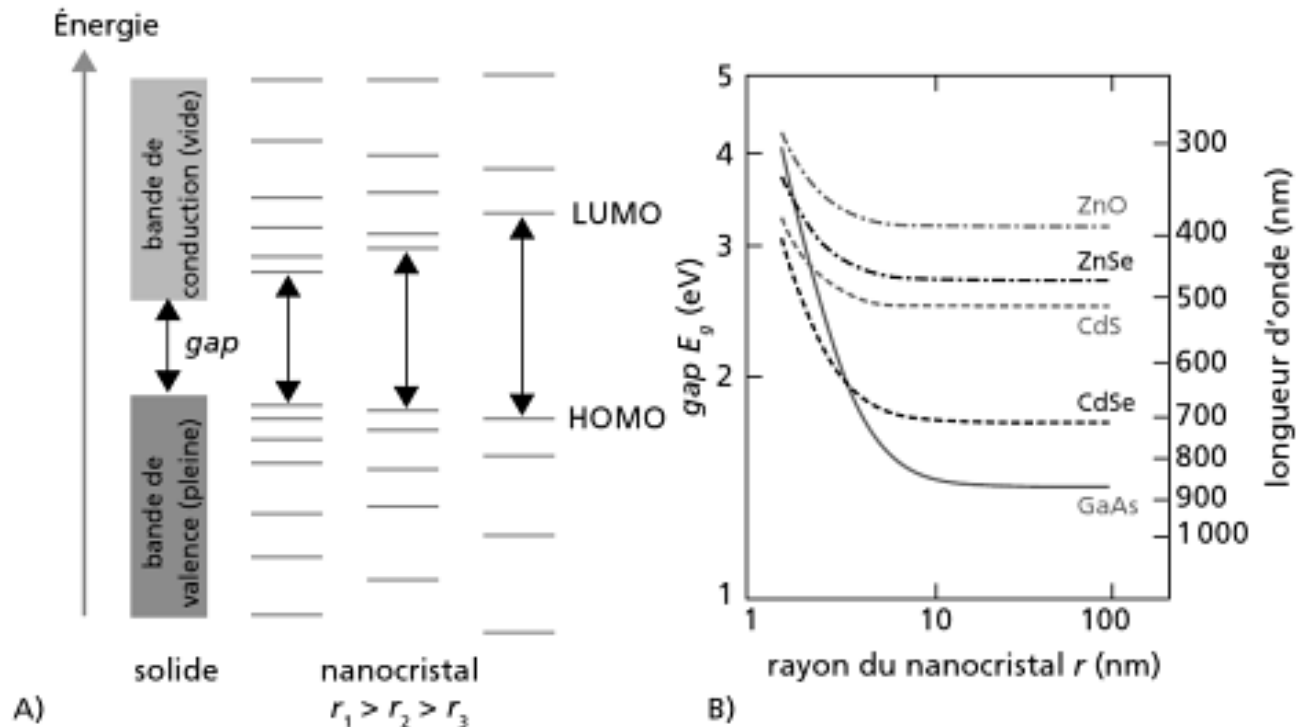
Dépendance en fonction de la taille des amas (Cas MgO/Pd)



Amas de palladium en épitaxie sur MgO; mode d'adaptation à l'interface de l'écart paramétrique selon la taille de l'amas d'après Graoui (2001).

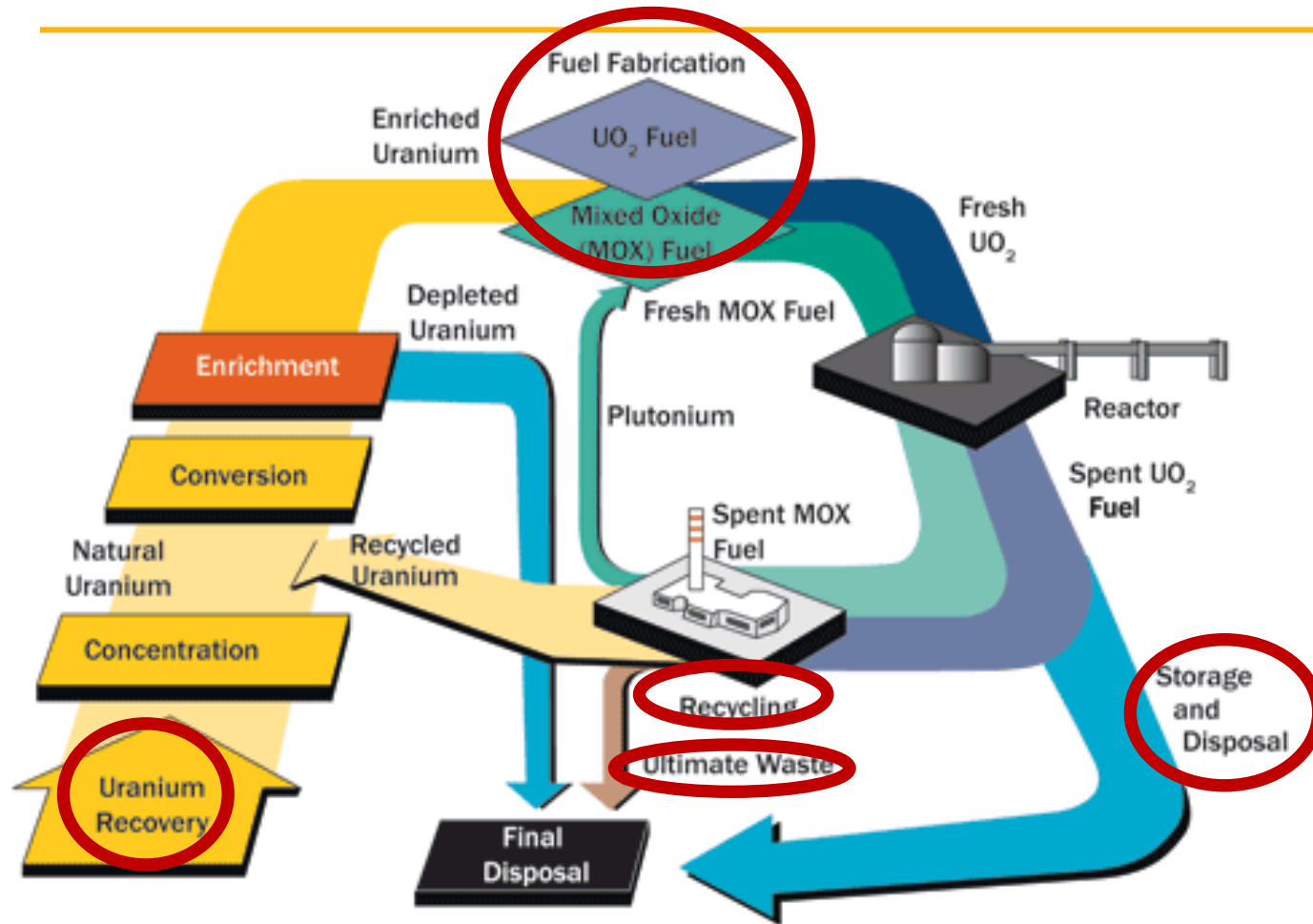
Propriétés modifiées par le caractère nanométrique

Effets quantiques



Effet de la taille sur le comportement électronique de nanocristaux. A) évolution schématique de la structure électronique du solide massif aux nanocristaux, B) variation théorique de la bande interdite en fonction de la taille (d'après Chandezon (2005)).

Cycle du combustible



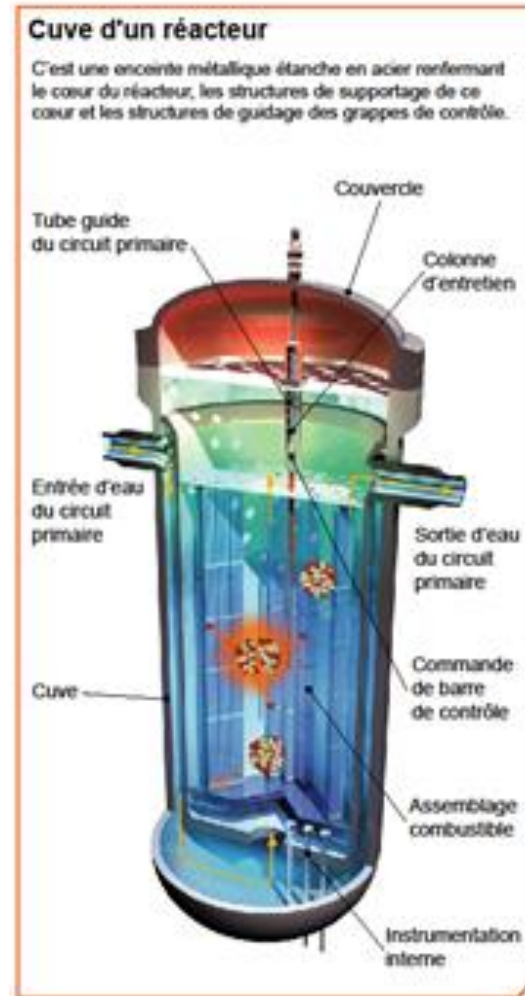
Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission

Différentes étapes du cycle du combustible dans lesquelles les nanomatériaux et matériaux mésoporeux pourraient avoir un intérêt : séparation, fabrication du combustible, matériau de structure du réacteur...

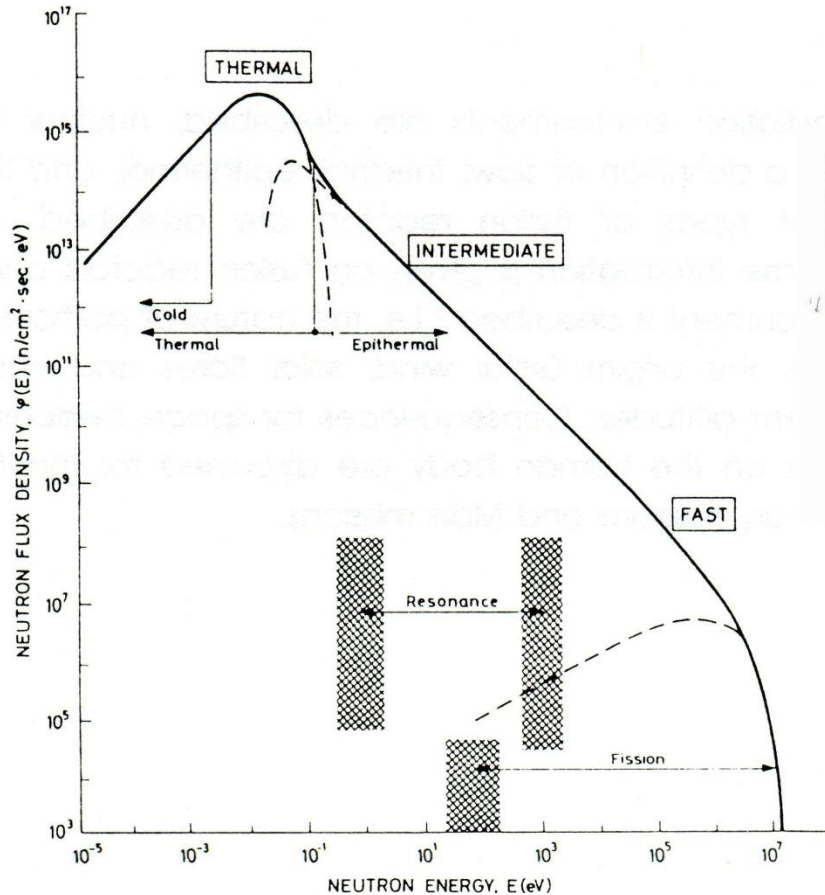
Réacteurs nucléaires et contraintes de fonctionnement

	Réacteurs à eau sous pression	Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium	Réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz
Température de fonctionnement	290 -320 °C	400 -650 °C	500 -850 °C
Pression	155 bars	Quelques bars	70 bars
Flux de neutrons	Mixte (il existe à la fois des neutrons lents et rapides)	Rapide	Rapide
Caloporteur	Eau	Sodium	Hélium
Type de combustible	Oxyde	Oxyde	Carbure

Réacteurs GEN IV



Filières : Spectres neutroniques



Reactor type	Thermal neutron (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fast neutron E > 1 MeV (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
UNGG	3.10 ¹³	3.10 ¹²
PWR	4.10 ¹³	7.10 ¹³
HWR	6.10 ¹³	9.10 ¹³
HTR	8.10 ¹³	8.10 ¹³
FBR (PHENIX)		5.10 ¹⁵
OSIRIS	3.10 ¹⁴	3.10 ¹⁴

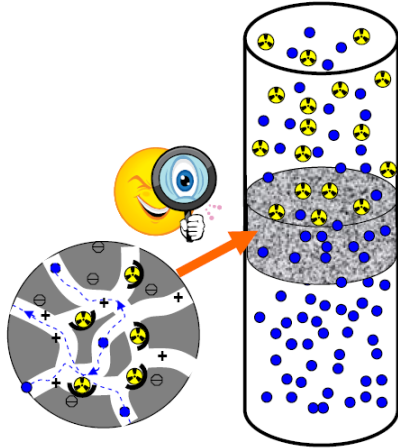
Flux de neutrons dans différents types de réacteurs

Neutrons émis par fission $E_{moy} = 2\text{MeV}$

Neutrons thermiques, $E=0,025\text{eV}$

Spectre neutronique définissant le domaine énergétique des différents types de neutrons.

Matériaux du nucléaire et contrainte de fonctionnement

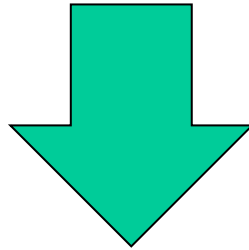


- Séparation sur support solide (décontamination d'effluents)
- Conditionnement des déchets

	Conditions du stockage
Matrice de conditionnement (Hors réacteur)	<ul style="list-style-type: none">- Qqs centaines de degrés $<T <$ ambiante- Durée de stockage : 10^5 à 10^6 ans:- Environnement : eau à long terme + Auto irradiation

Nanostructuration et matériau du nucléaire

Conditions extrêmes d'utilisation des matériaux
(Température, irradiation, corrosion)



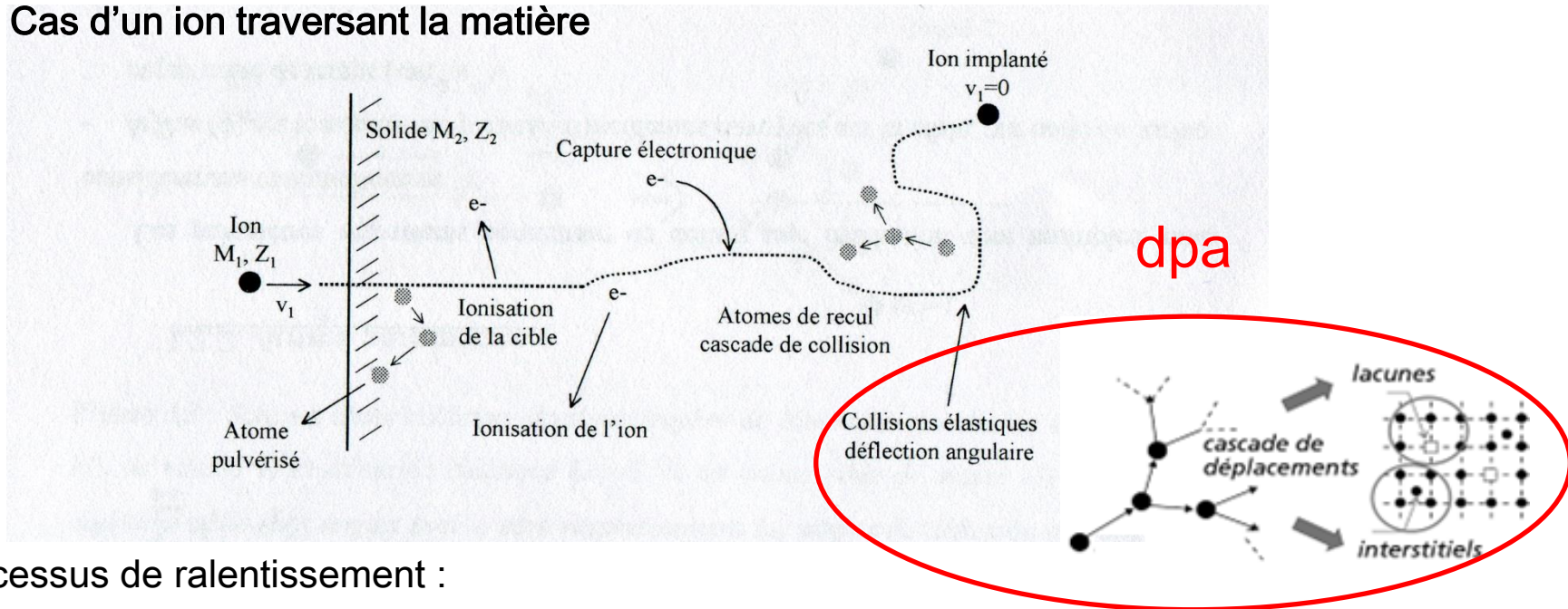
Intérêt d'une nanostructuration des matériaux

- Propriétés mécaniques
- Diffusion (Interaction entre défauts et nanostructure)
- Chimie séparative dans le cycle du combustible

Estimateur de dommage d'irradiation : le DPA

Les particules chargées énergétiques ionisent les atomes ou les molécules sur leur parcours, ce phénomène entraîne une perte de leur énergie initiale. Le pouvoir d'arrêt est la perte moyenne d'énergie par unité de distance parcourue.

Cas d'un ion traversant la matière



2 processus de ralentissement :

- **Collisions élastiques** sur les atomes de la cible, analogues au choc entre 2 boules de billard, il n'y a pas de changement de l'état interne des 2 partenaires de collision. Ces phénomènes engendrent le gonflement, l'amorphisation des matériaux.
- **Collisions inélastiques**, impliquant les électrons de la cible et/ou ceux de l'ion et conduisant à l'ionisation ou l'excitation des partenaires de collision. Ces phénomènes se traduisent principalement par un échauffement des matériaux.

Estimateur de dommage d'irradiation : le DPA

❖ Calcul du nombre de déplacements

- Si l'énergie transmise à l'atome cible **est inférieure** à l'énergie de seuil de déplacement (E_d) → l'atome vibre sur son site et le choc se traduit par un échauffement
- Si l'énergie transmise à l'atome **est supérieure** à l'énergie de seuil de déplacement (E_d) → Création d'une paire Frenkel (lacune+interstitiel)

Calcul du dpa Kinchin, Pease

$$n_p = 0 \quad \bar{E}_T < E_d$$

$$n_p = 1 \quad E_d < \bar{E}_T < 2E_d$$

$$n_p = \frac{\bar{E}_T}{2 \times E_d} \quad 2E_d < \bar{E}_T$$

$$E_{T_{\max}} = 4 \frac{m_p m_c}{(m_p + m_c)^2} E_p \quad ; \quad \bar{E}_T = \frac{E_{T_{\max}}}{2}$$

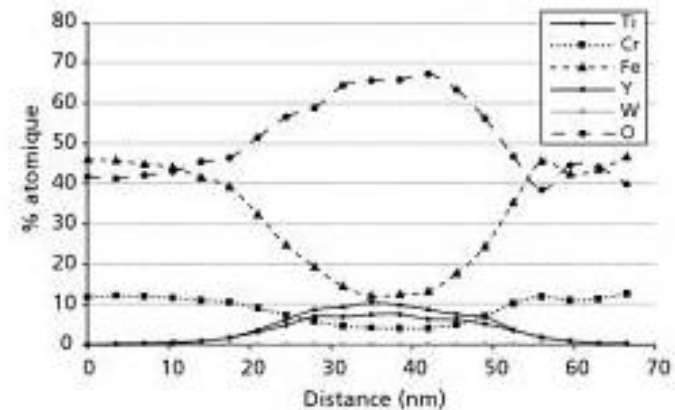
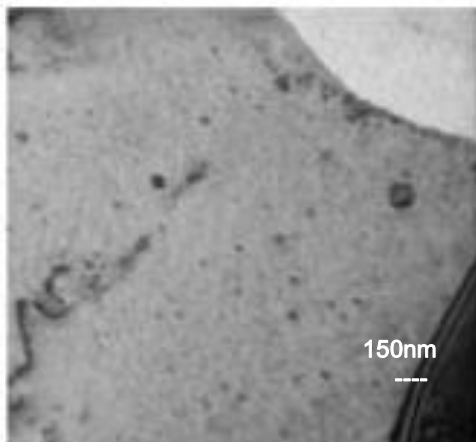
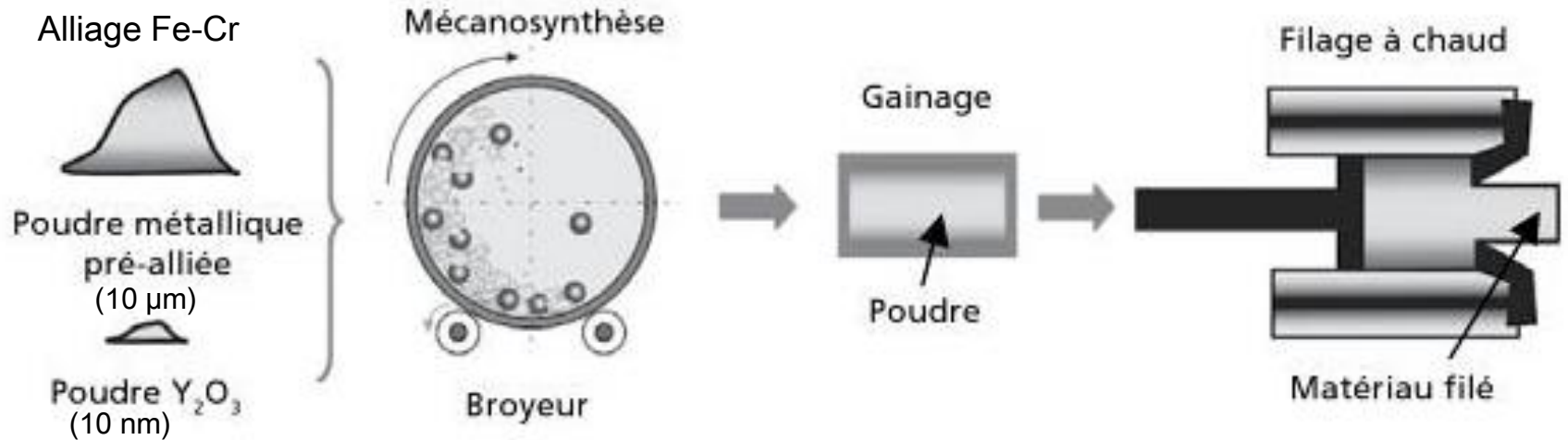
n_p : Nb d'atomes déplacés (dpa)

\bar{E}_T : Energie transmise

E_d : Energie seuil de déplacement

Métallurgie des ODS - Nanostructuration

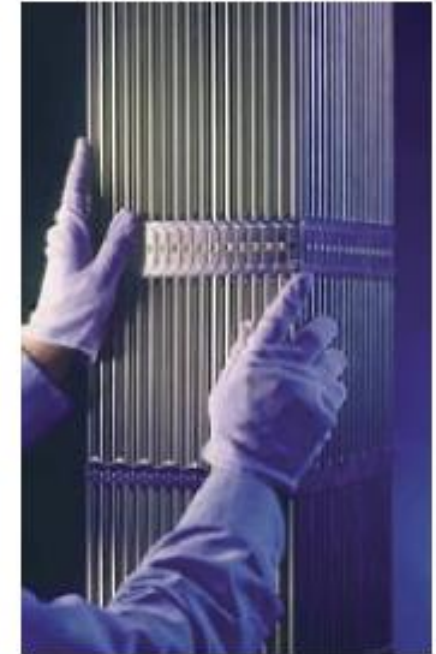
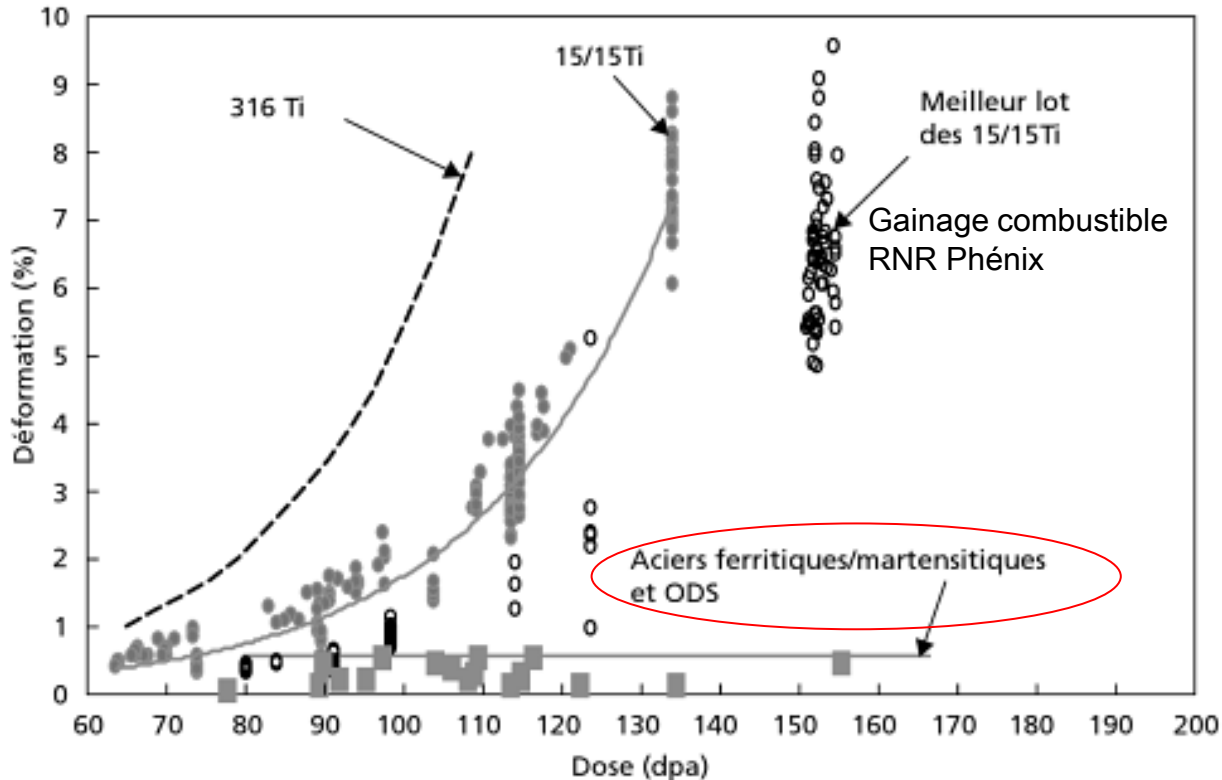
Acier de gainage pour réacteur GEN IV (100 à 150 dpa 10 à 20 dpa dans les gaines des réacteurs actuels)



Précipités nanométriques dans ODS 14%Cr

Gaine du combustible : Acier ODS

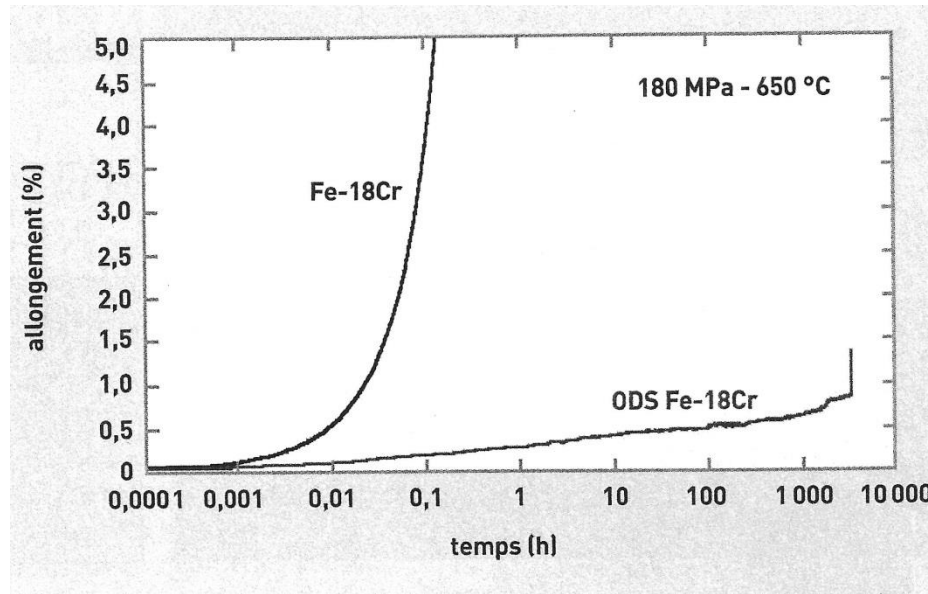
ODS : Oxide Dispersion Strengthened
Acier Fe-13Cr-1.5Mo-2.2Ti+O.5Y₂O₃



Assemblage combustible

Résistance au gonflement des ODS en
comparaison d'autres matériaux de gainage

Gaine du combustible : Acier ODS



Fluage d'un acier ferritique non nanorenforcé comparée à celle d'un matériau ODS Fe-18Cr nanorenforcé

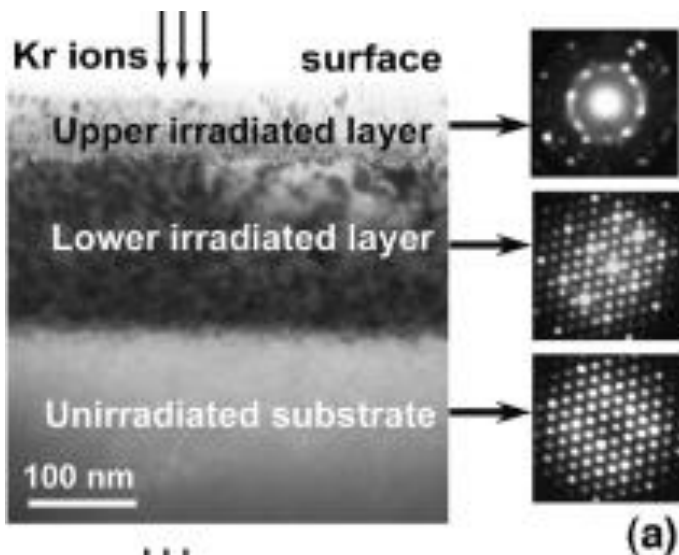
ODS - Conclusion

- Aciers renforcés par des nanoprécipités d'oxydes
 - ✓ Rôle sur le mouvement des dislocations
 - ✓ Sites privilégiés pour la recombinaison des défauts d'irradiation



- Faible déformation en fluage à 650°C
- Faible évolution sous irradiation
- Ductilité résiduelle suffisante pour l'application visée

Nanomatériaux et irradiation

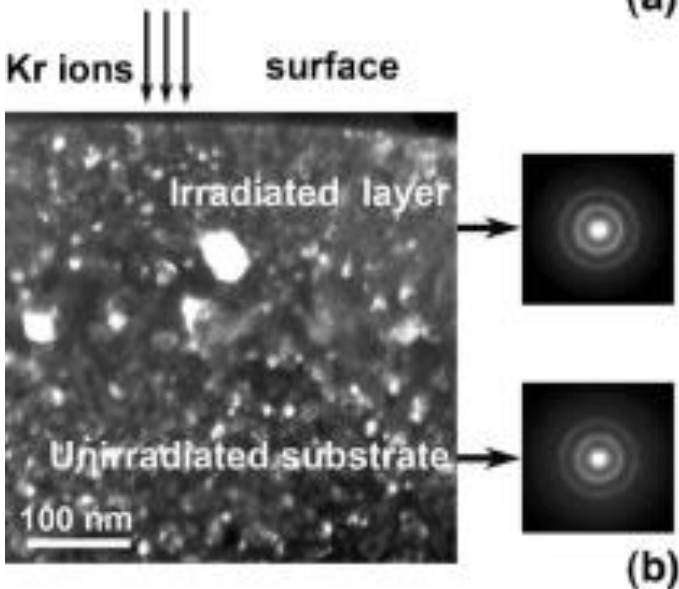


Section transverse observée par MET, d'une spinelle irradiée par des ions Kr de 300 keV.

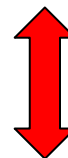
(a) Echantillons présentant des nanograins, irradiés à 96 dpa

(a) (b) Echantillons présentant des grains micrométriques (10 μ m) irradiés à 12 dpa

Les résultats indiquent que l'amorphisation des échantillons présentant des grains micrométriques est obtenues pour une dose beaucoup plus faible.



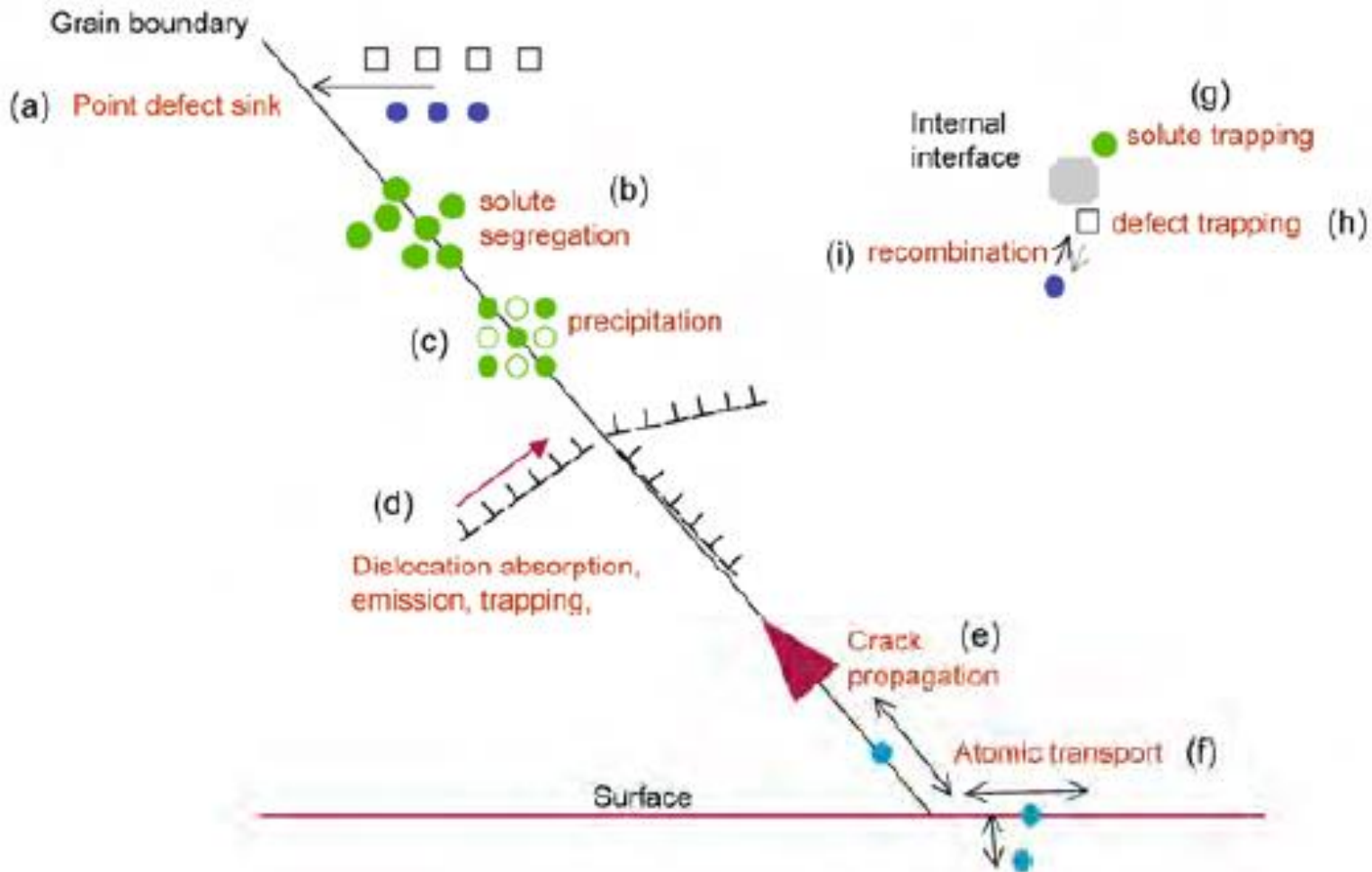
Taille de la cascade de déplacement



Dimension du nanograin

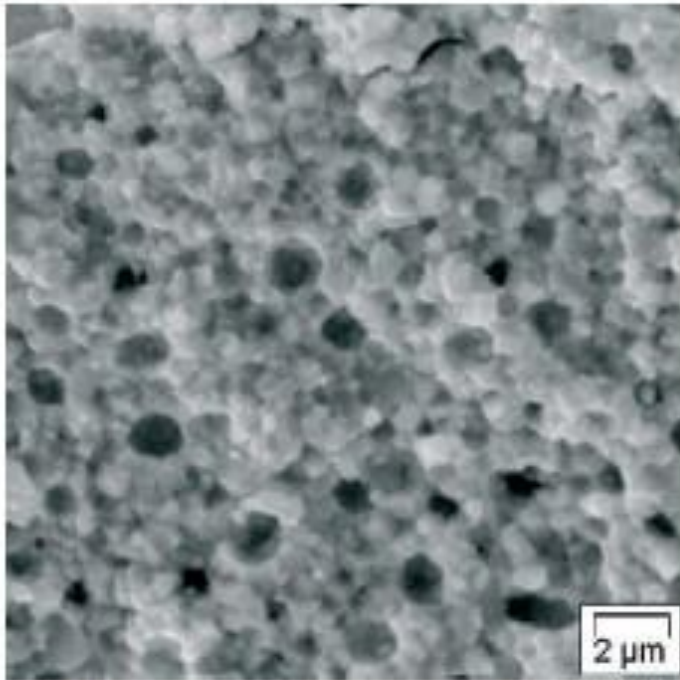
Nanomatériaux et irradiation

Les interfaces offrent des possibilités intéressantes pour la recombinaison des défauts et in fine l'évolution des propriétés du matériau. Sur ce schéma est représenté des interfaces (joints de grains, surface) qui pourraient agir sur l'évolution des défauts



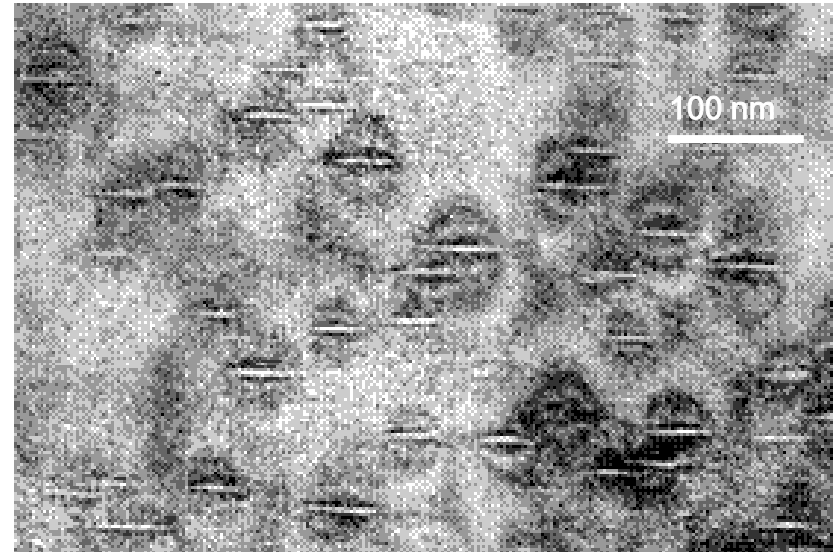
Conclusions - Combustibles et absorbants

Périphérie de pastilles de UO_2
irradiés en REP - Effet RIM



Effet RIM observé en périphérie d'un combustible usé. Les grains initiaux d'une dizaine de micromètres sont remplacés par des grains submicroniques et des bulles de gaz de fission se sont formées

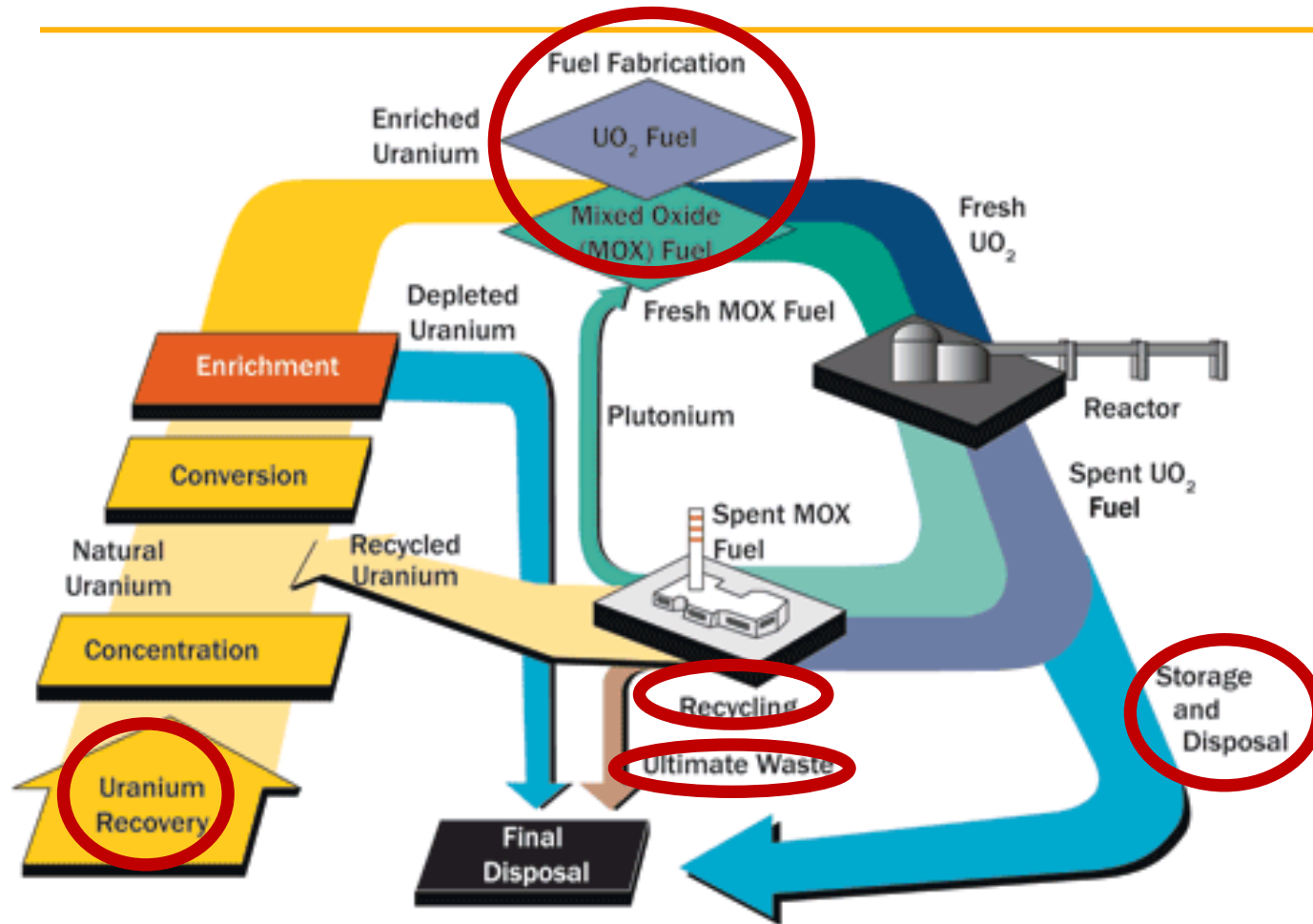
B_4C irradiés en RNR



Bulles d'hélium lenticulaires de qq dizaines de nanomètres provenant de l'agglomération d'atomes d'hélium produit par la réaction $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

Intérêt de la nanostructuration pour ces matériaux?

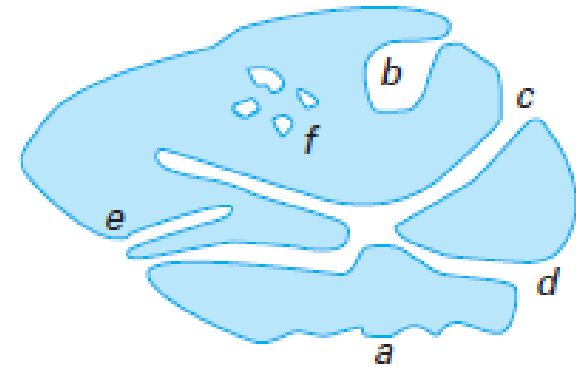
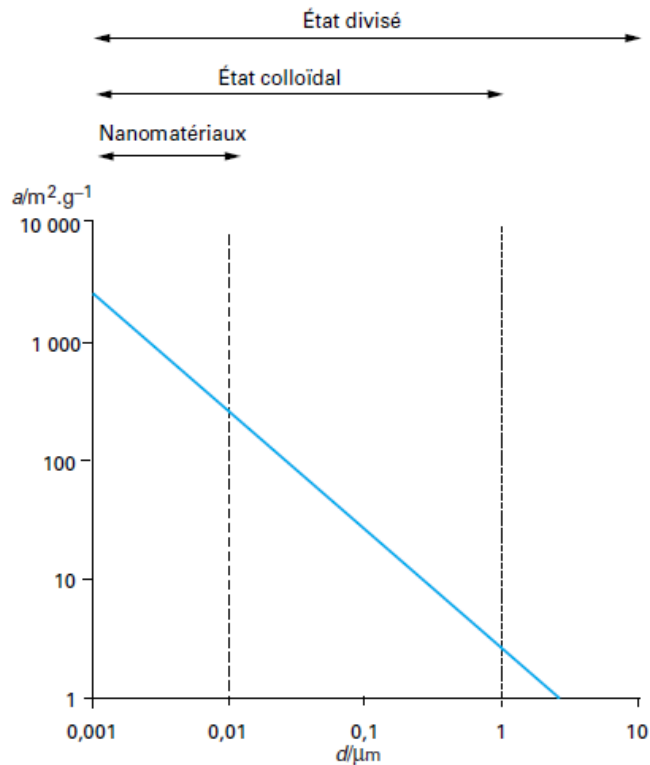
Cycle du combustible



Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission

Différentes étapes du cycle du combustible dans lesquelles les nanomatériaux et matériaux mésoporeux pourraient avoir un intérêt (séparation, fabrication du combustible...)

Matériaux mésoporeux - Nanomatériaux

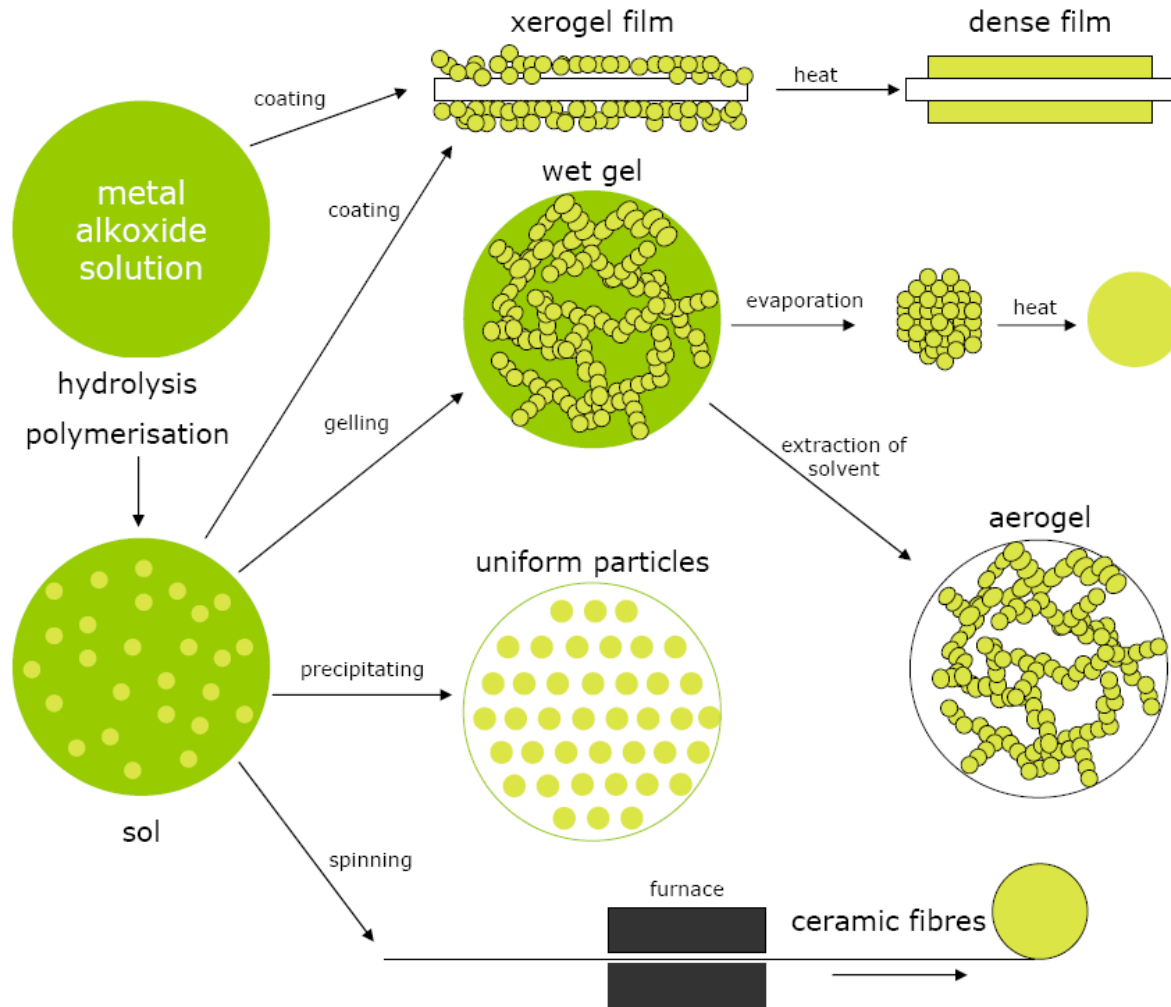


a irrégularité
b, c, d, e pores ouverts
f pore fermé
b, e pores borgnes
c, d pores en intercommunication

- Macroporosité $d > 50$ nm
- Mésoporosité 2 nm $< d < 50$ nm
- Microporosité $d < 2$ nm

Définition IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)

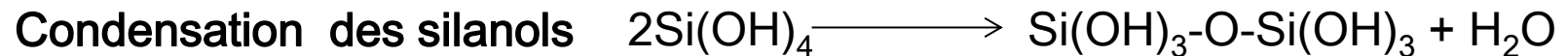
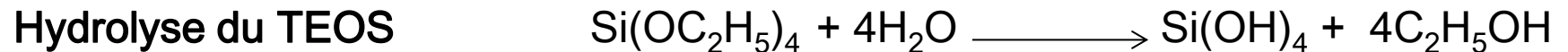
Matériaux mésoporeux : Procédé sol-gel



Silices mésoporeuses

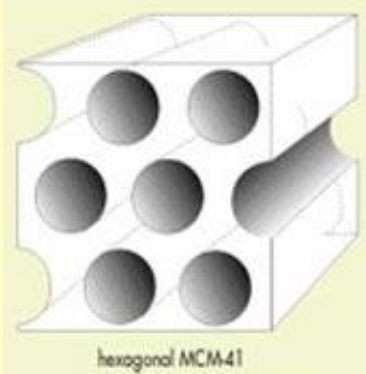
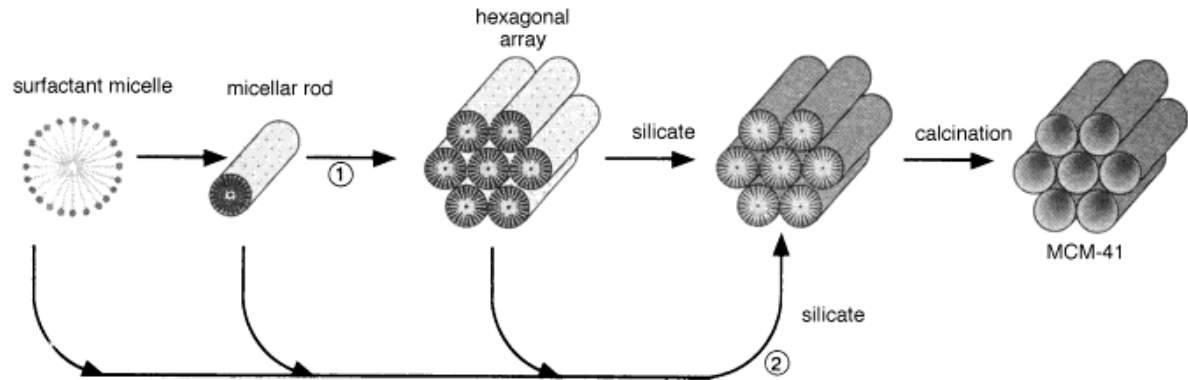
Le procédé sol-gel permet d'obtenir un polymère inorganique à partir de réactions chimiques simples à température ambiante. La synthèse est effectuée à partir d'alcoolates de formule $M(OR)_n$ où M est un métal ou le silicium et R un groupement organique.

Ex dans le cas de la silice:

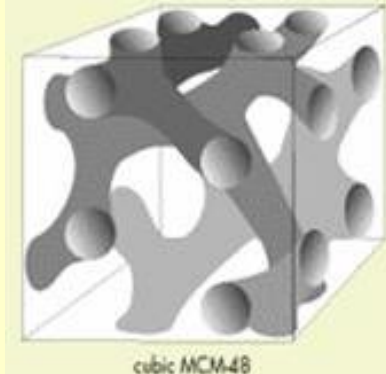


Silices mésoporeuses : « Micelle-Templated Silica » (MTS)

Différentes voies de synthèse à partir de tensioactif

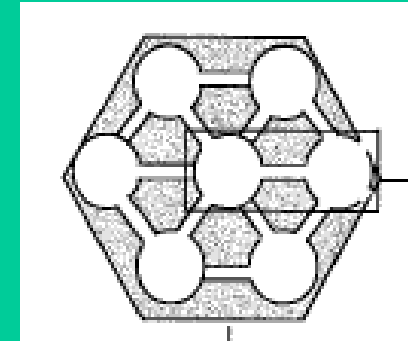


MCM41 (2D-hexagonal)



MCM48 (3D-cubic)

Synthèses en conditions basiques



SBA15 (2D-hexagonal + micropores)

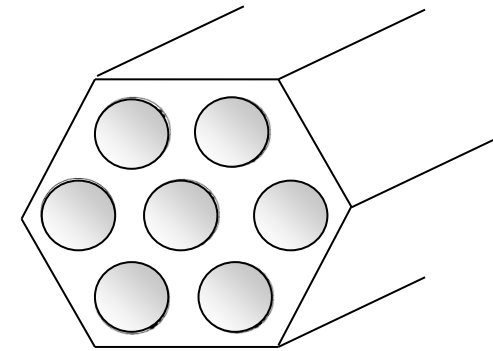
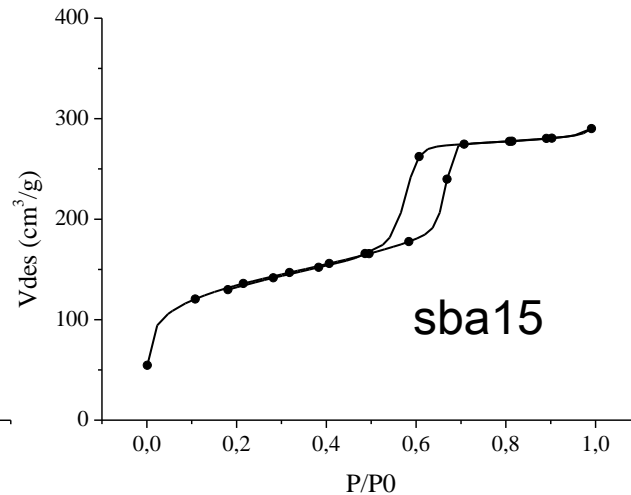
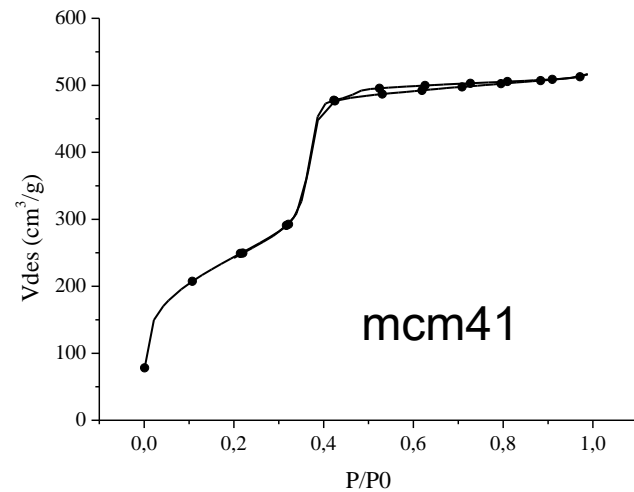
Synthèse en conditions acides

Matériaux mésoporeux - Caractérisation

Analyse porosité

- Adsorption – désorption N₂ : surface spécifique, volume poreux, répartition de taille de pores
- Pycnométrie He (porosité ouverte, fermée)

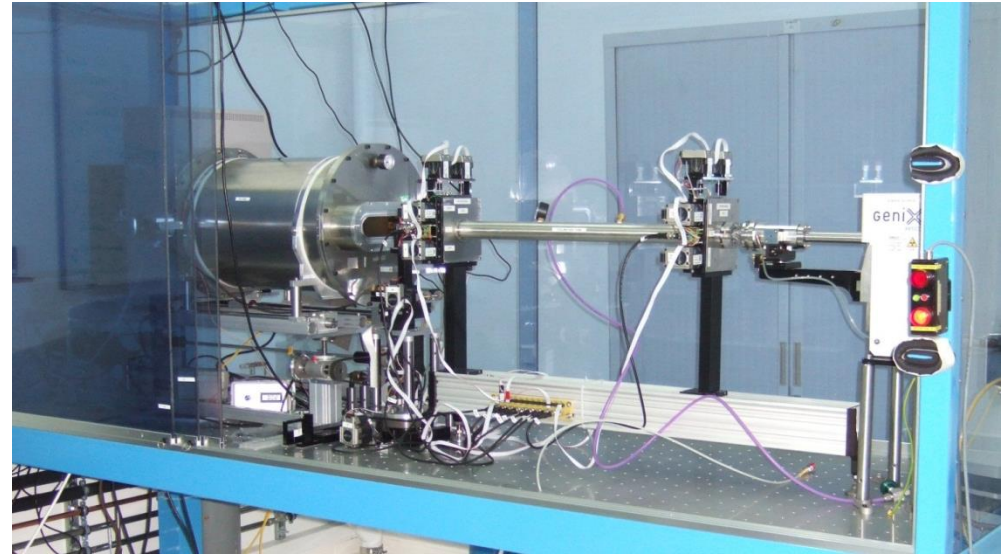
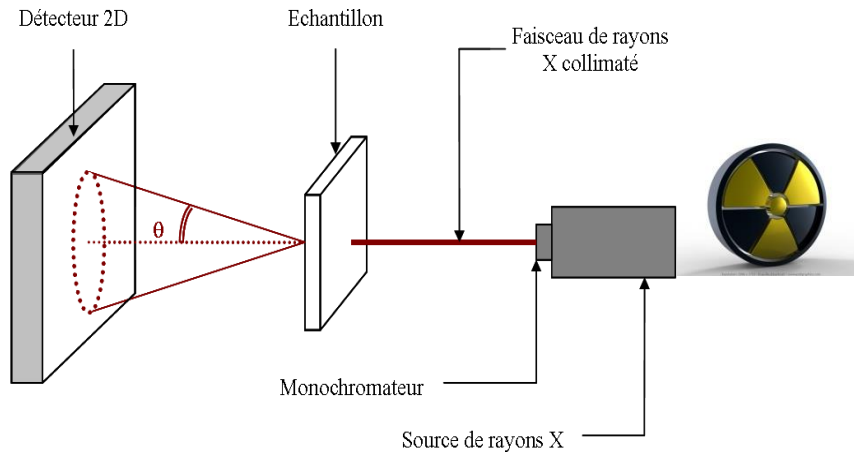
Silice mésoporeuse hexagonal SBA-15



D (nm)	D (nm)	S_{BET} (m ² g ⁻¹)	V_p (cm ³ g ⁻¹)
MCM41	3.0	880	0.76
SBA-15	4.9	465	0.42

Matériaux mésoporeux - Caractérisation

Small Angle X-ray Scattering



Main characteristics:

$$\lambda = 0.71 \text{ \AA} (17 \text{ keV})$$

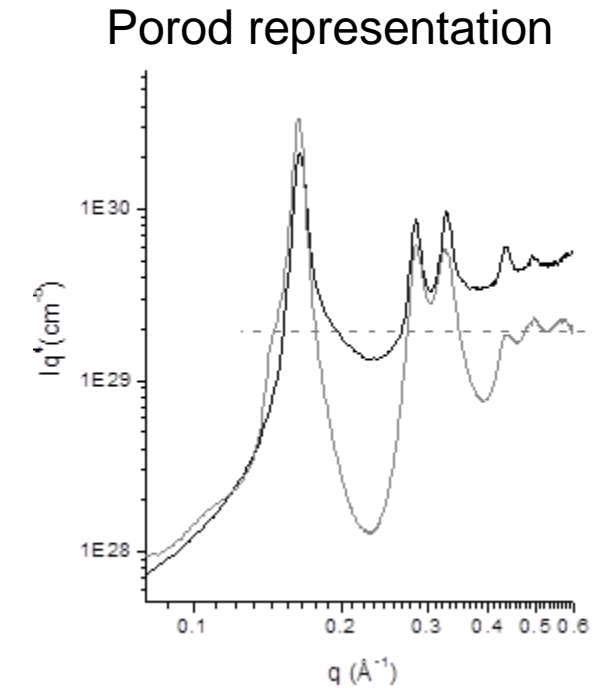
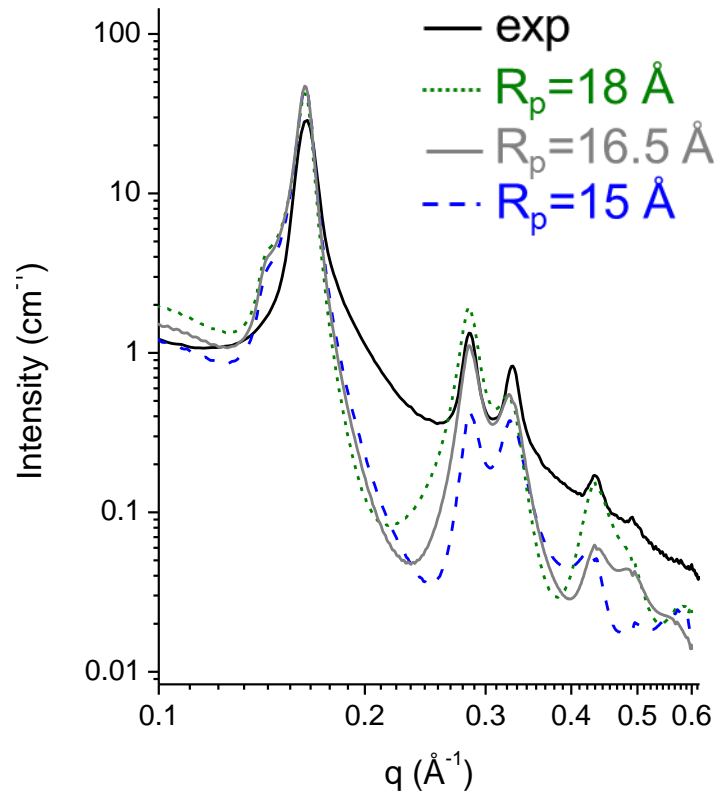
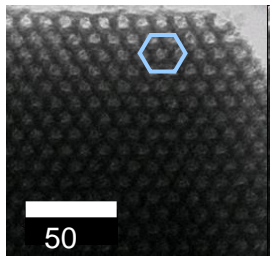
$$\text{Accessible } q = (4 \pi \sin\theta)/\lambda \text{ range} = 0.2 - 30 \text{ nm}^{-1} (2 \text{ \AA} - 30 \text{ nm})$$

Determination of:

- ➔ Mean interaction distances in the sample
- ➔ Shape of isolated objects
- ➔ Estimation of surface roughness
- ➔ Under certain conditions : porosity and specific surface

Matériaux mésoporeux - Caractérisation

Example 1: MCM-41 mesoporous silica



Quantitative calculation of the SAXS pattern

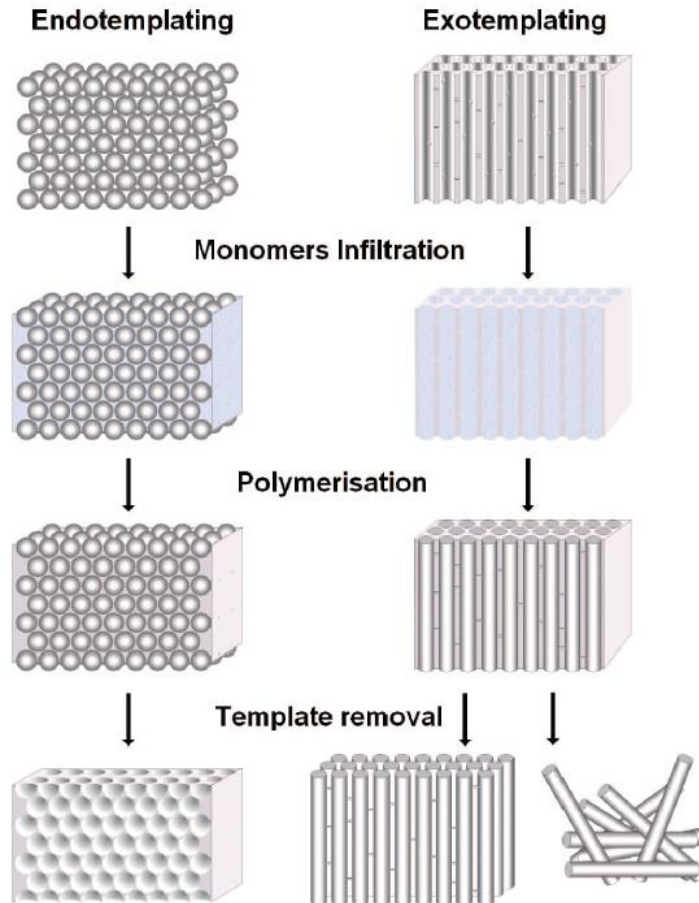
➡ Structural parameters

Theorem of the Porod limit:

➡ Determination of the specific surface

Matériaux mésoporeux obtenus par « Nanocasting »

Endotemplating :
Utilisation d'un moule
constitué de NP



Exotemplating :
Utilisation d'un moule
constitué d'un matériau
mésoporeux

Carbone mésoporeux obtenus par Nanocasting

Nanocasting : Infiltration d'une silice mésoporeuse (SBA15) par un précurseur de carbone (alcool furfurylique ou Mesophase Pitch)

Silica template



Impregnation
Polymerization
Carbonization
of Carbon precursor



Carbon/silica composite



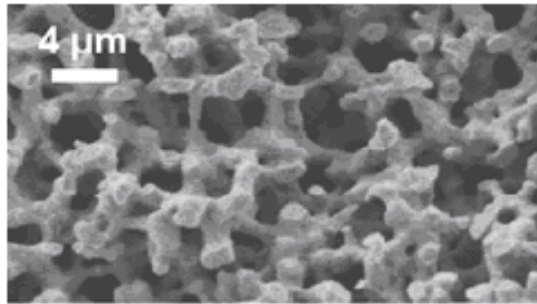
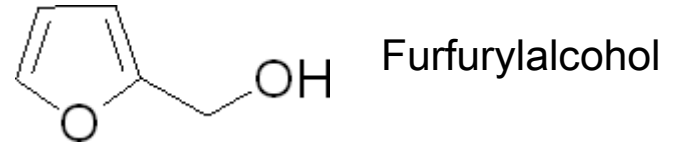
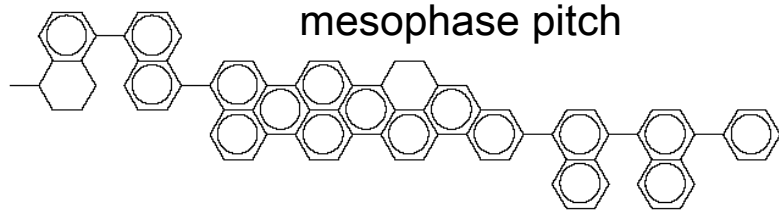
Silica template removal
(NaOH or HF)



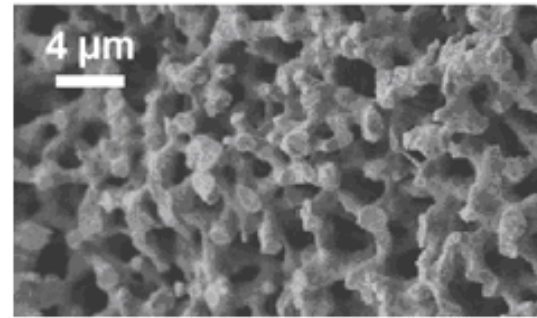
Carbon material



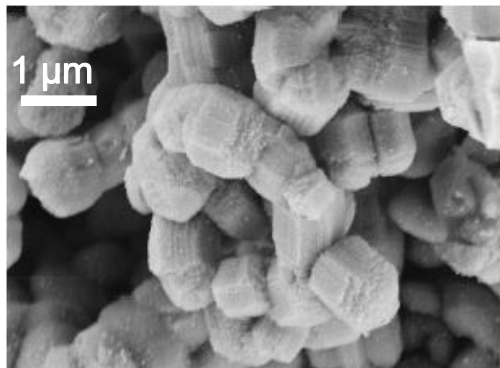
Carbone mésoporeux obtenus par Nanocasting



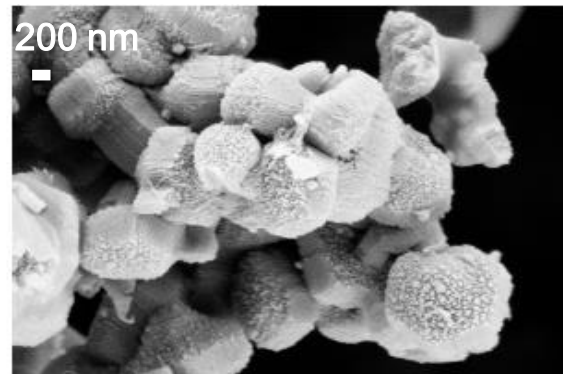
Silica monolith



Carbon replica



SBA-15



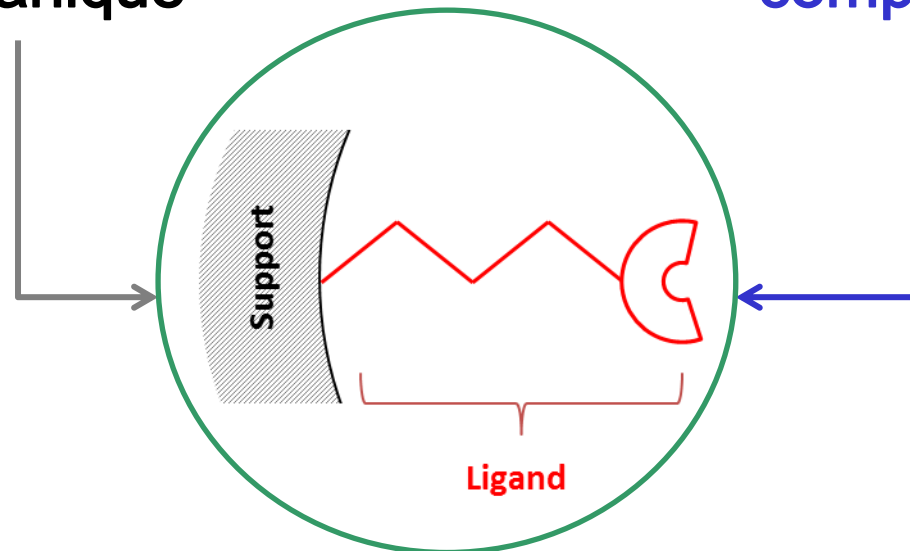
Carbon replica

Matériaux mésoporeux et fonctionnalisation

Mettre au point un matériau hybride inorganique-organique capable d'extraire sélectivement

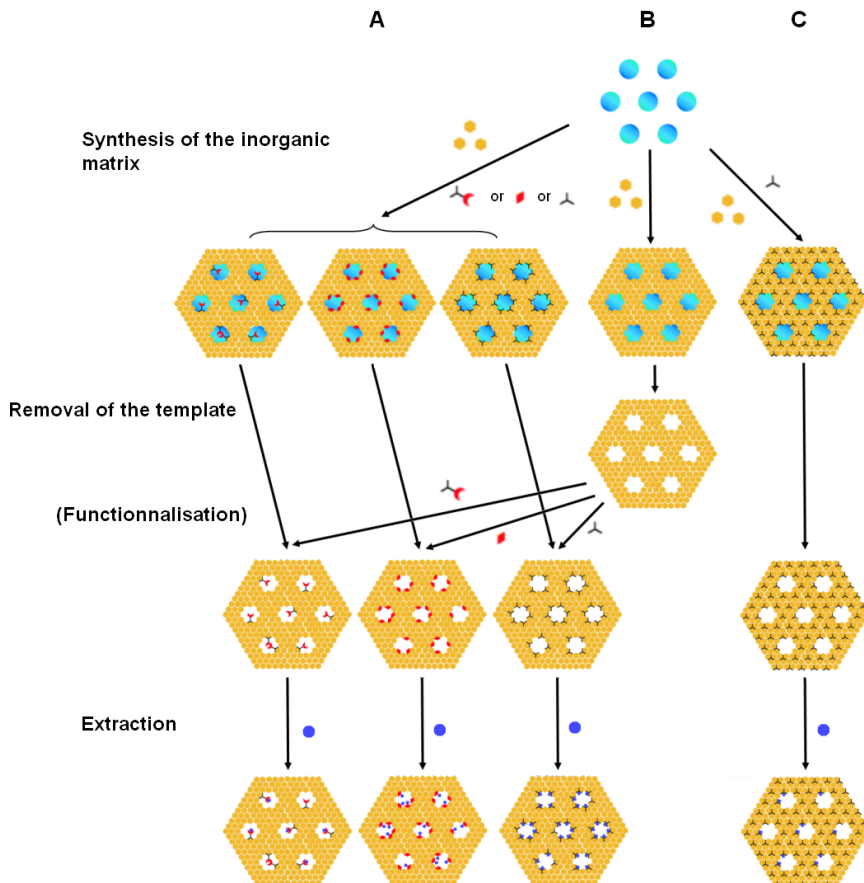
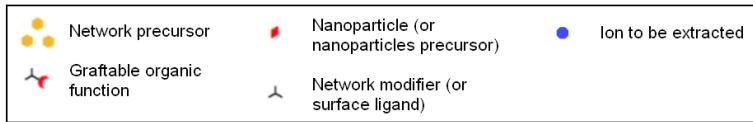
Choix du support
inorganique

Choix du ligand
complexant



Fonctionnalisation du
support

Matériaux mésoporeux et fonctionnalisation

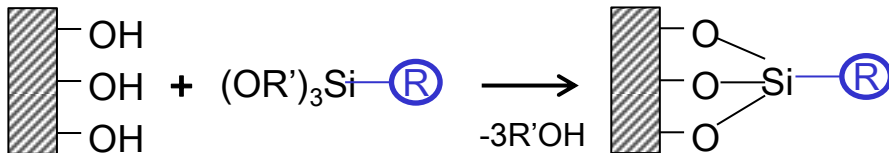


2 voies possibles pour fabriquer un mésoporeux fonctionnel. En A, la voie « one pot » dans laquelle le précurseur de la matrice et les groupements fonctionnels sont mélangés dès le départ. **En B, la voie post-fonctionnalisation** où la matrice poreuse est synthétisée dans un premier temps puis fonctionnalisée.

Matériaux mésoporeux et fonctionnalisation

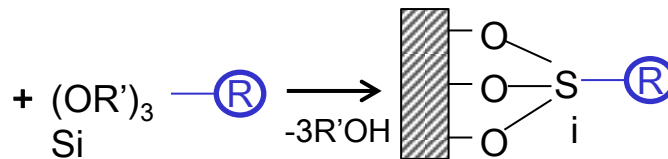
SILICE

Réaction de silanisation



Co-condensation

Précurseur de silice (TEOS)
+
Tensioactif

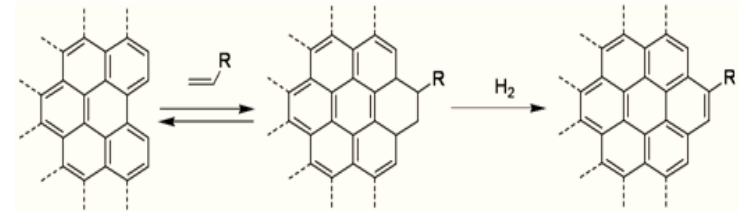


Procédé sol-gel

← Post-fonctionnalisation →

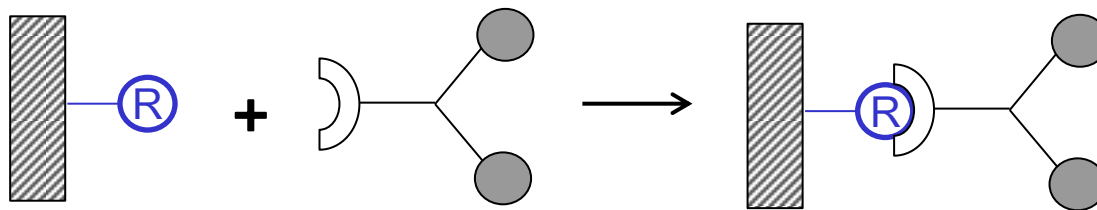
CARBONE

Réaction de Diels-Alder



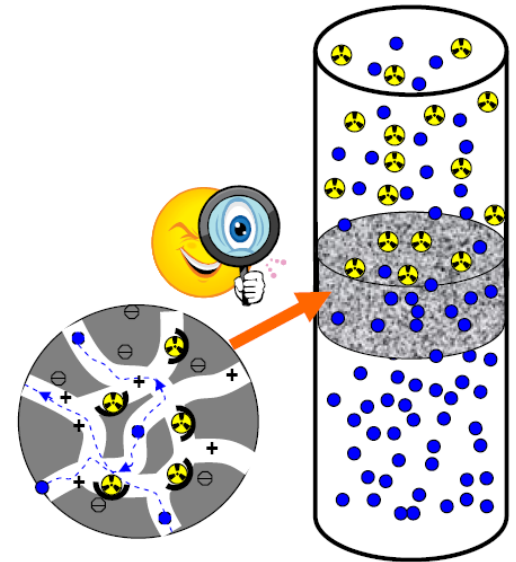
← « One pot »

← « Ship in a bottle » →



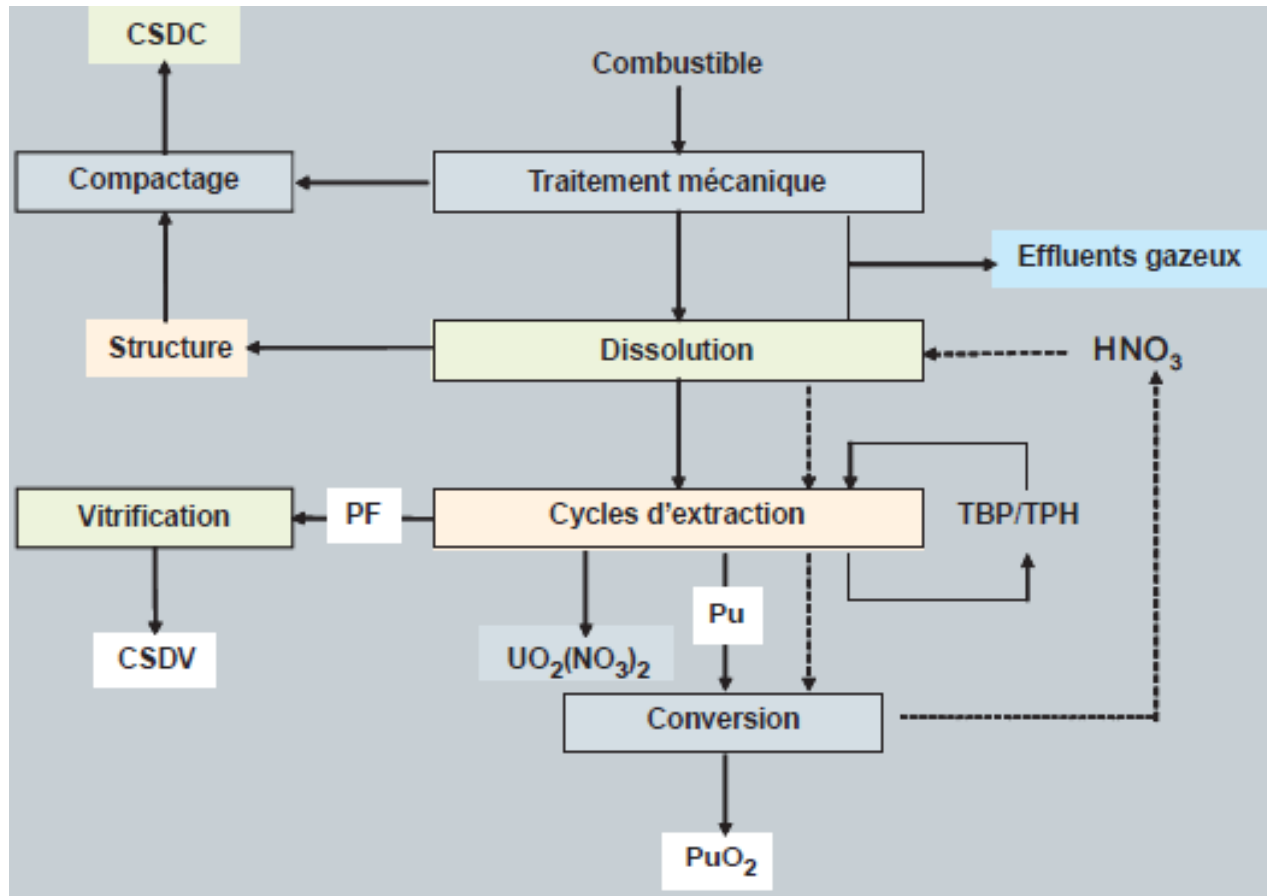
Mésoporosité et matériau nucléaire

- **Chimie séparative**
 - Retraitement du combustible usé
 - Décontamination d'effluent
- **Conditionnement des déchets**
 - Adsorption sélective et encapsulation
 - Getters dans les sites de stockage
- **Combustible nucléaire**
 - UO_2 mésoporeux



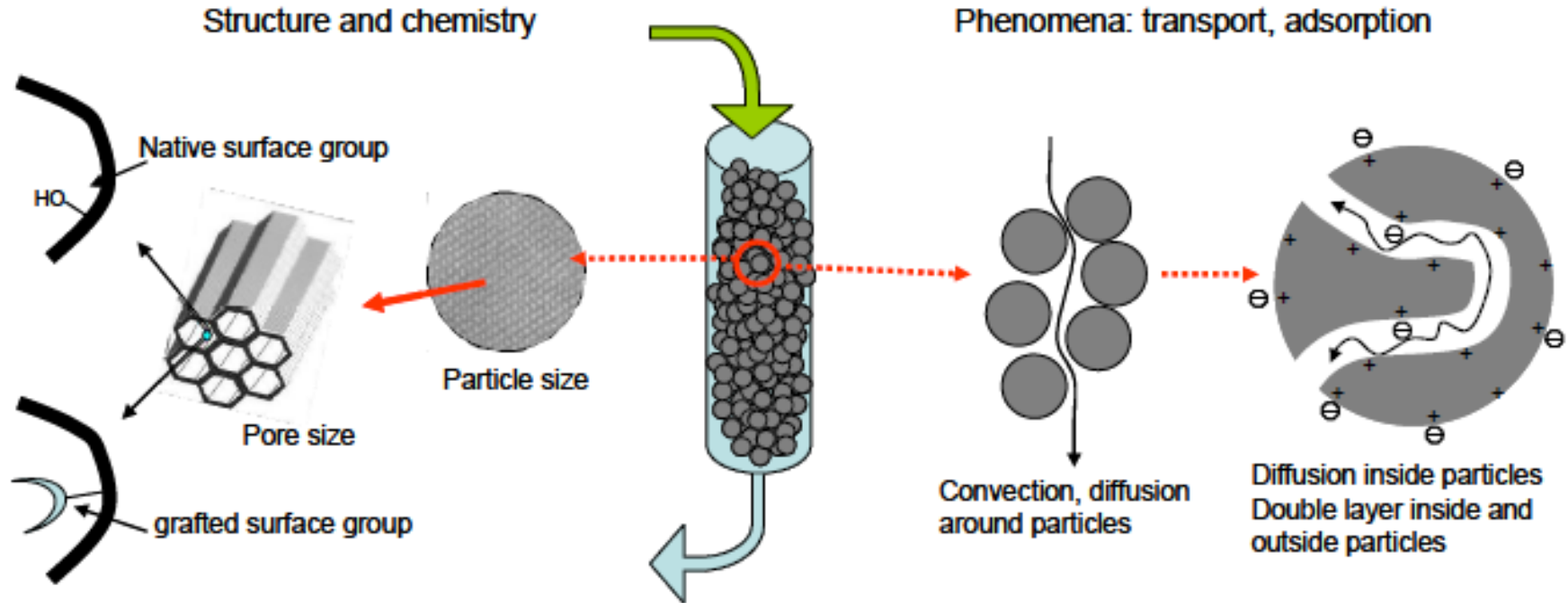
Chimie séparative – Procédé actuel

Principales étapes du procédé Purex



Mésoporosité et chimie séparative

Séparation solide-liquide avec des matériaux mésoporeux fonctionnalisés



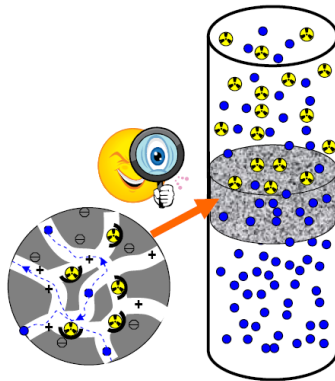
- Support poreux (oxyde, carbone...), forme, dimension
- Type de fonctionnalisation
- Caractéristiques de la porosité

Chimie séparative – Extraction U en milieu acide phosphorique

Extraction liquide-liquide : Utilisation de solvant organique contenant des molécules complexantes spécifiques de l'uranium (procédé réf.)

Extraction solide-liquide :

Utilisation d'un support solide muni de fonctions extractantes spécifiques de l'uranium



⊕ Attrait :

- Economie de solvant
- Procédé colonne continu
- Facilité de transport

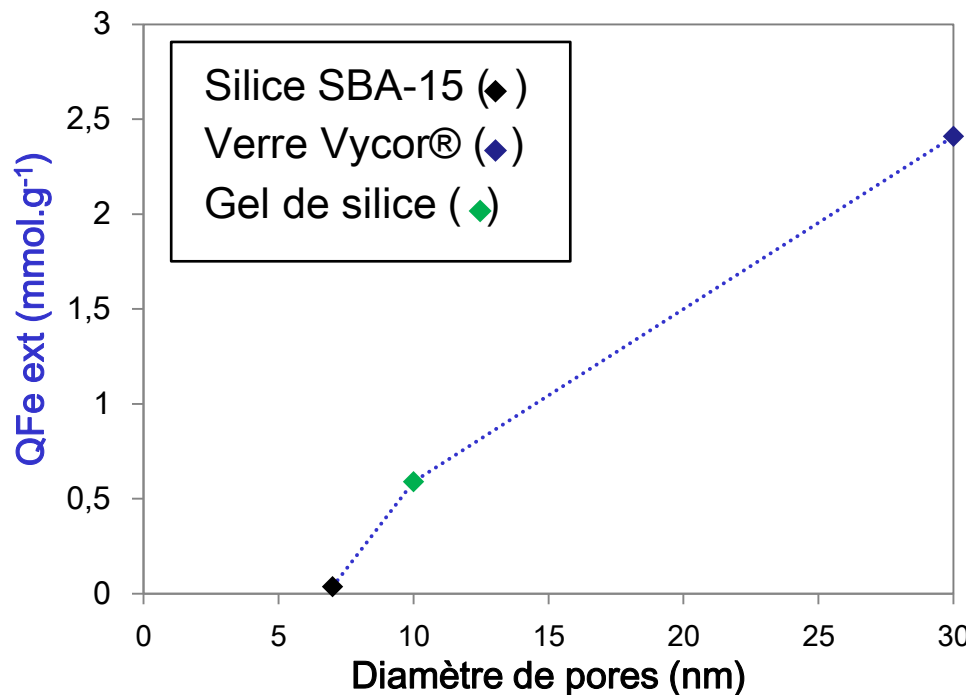
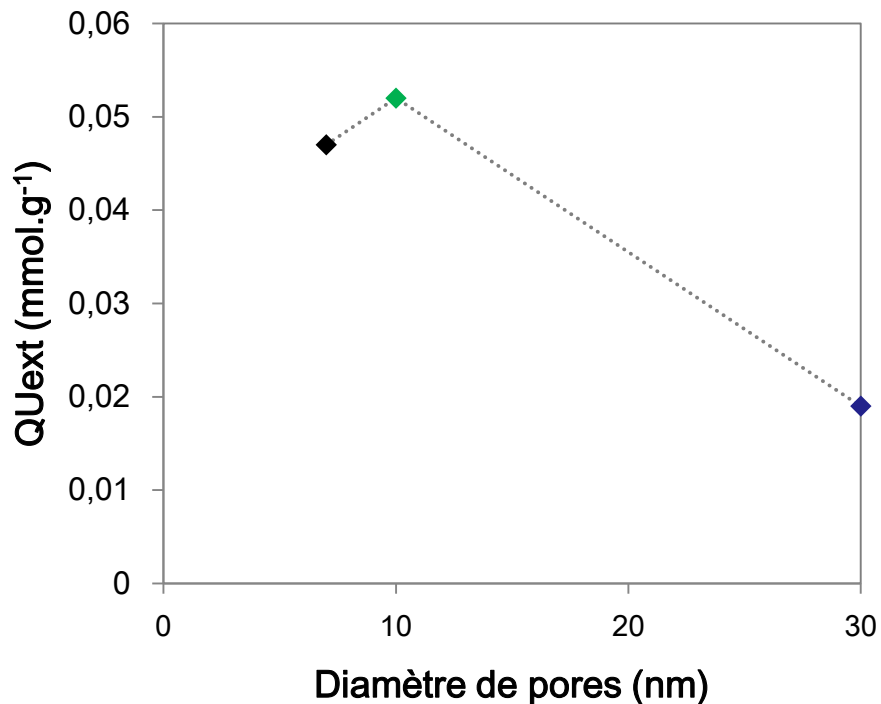
Systeme adapté aux faibles concentrations en uranium

- Remplacer les supports organiques par des supports inorganiques
- Greffage d'un ligand sélectif de l'uranium (VI)

Chimie séparative – Extraction U en milieu acide phosphorique

Sélectivité vis-à-vis du fer U(VI) + Fe(III)

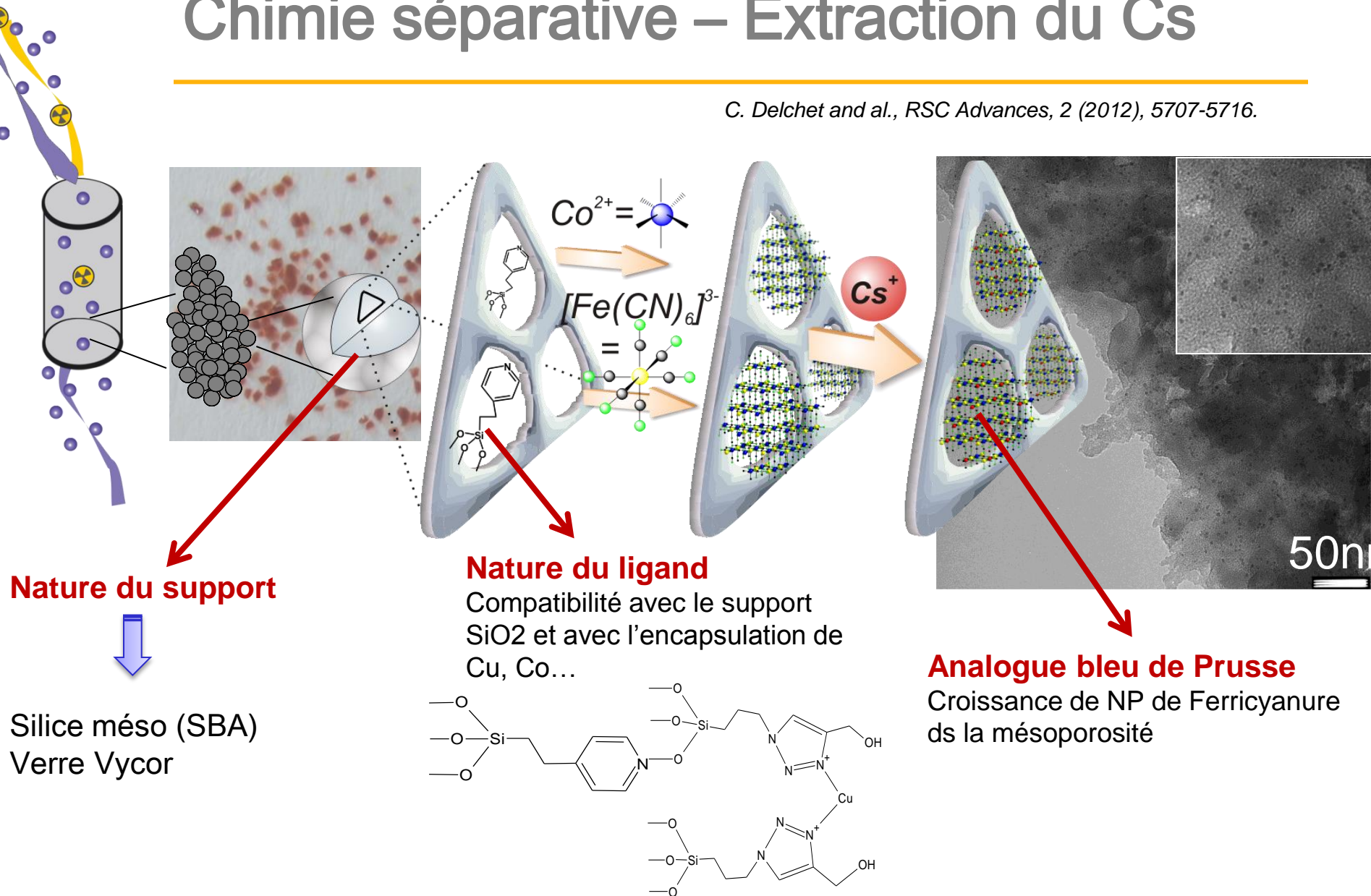
➤ Comparaison de trois supports à base de silice TR@SiO₂)



Diamètre de pores semble influencer la sélectivité du matériau
Phénomène de confinement également observé en catalyse

Chimie séparative – Extraction du Cs

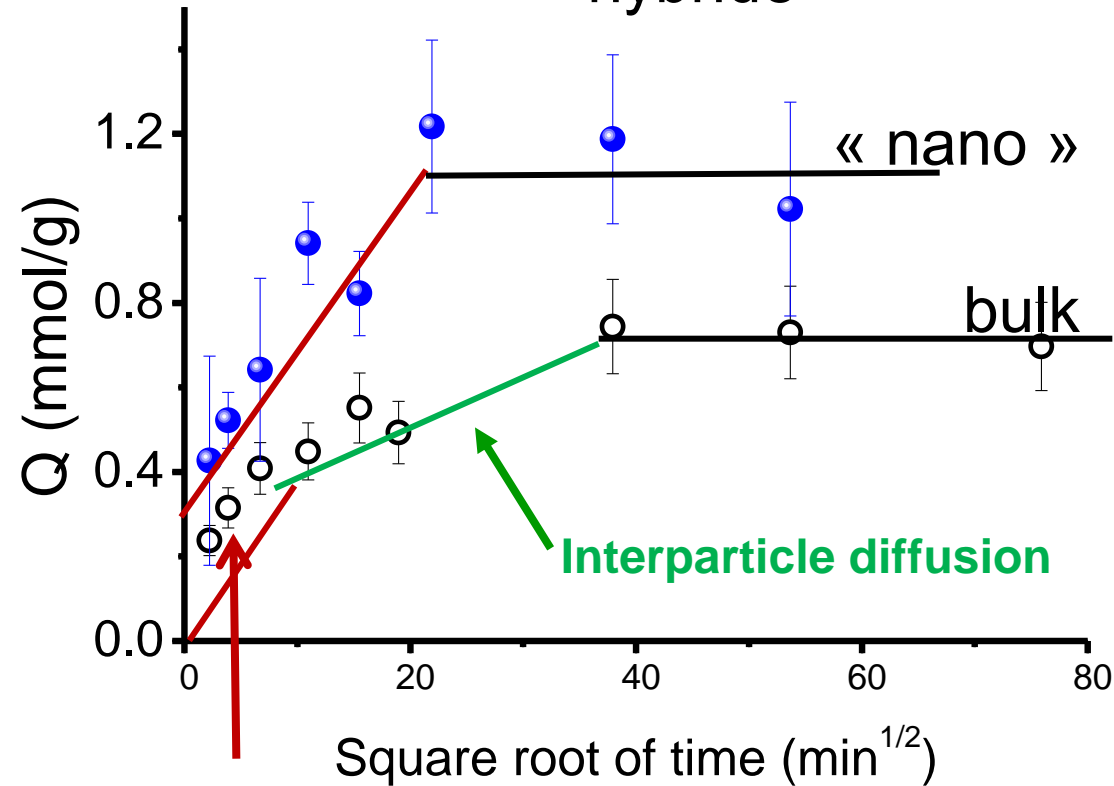
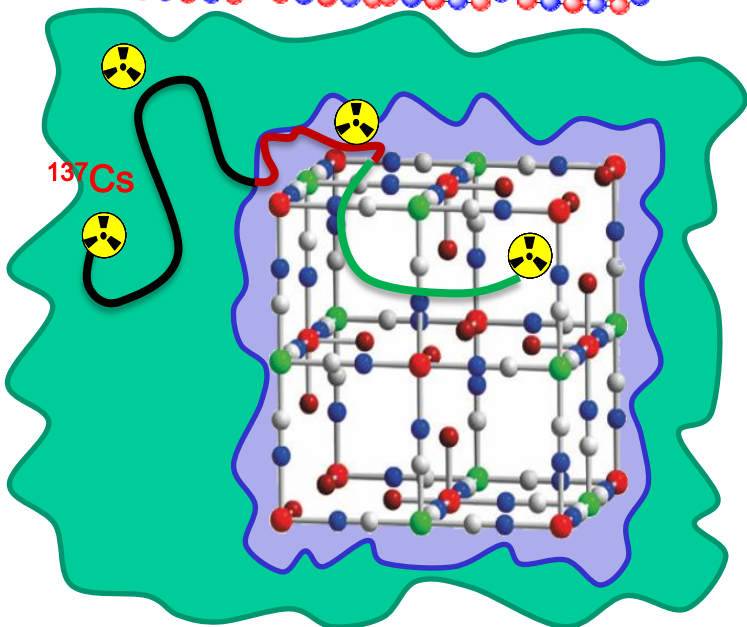
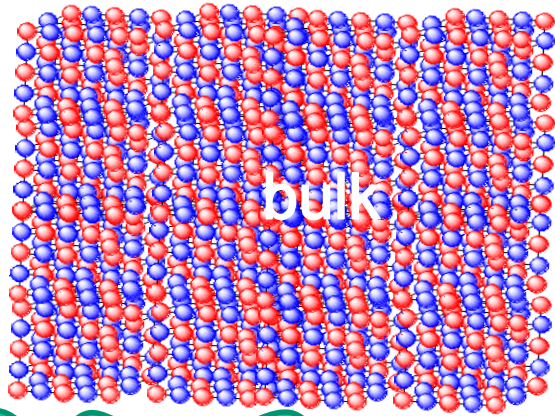
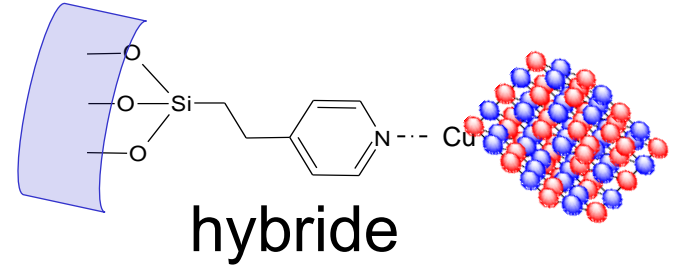
C. Delchet and al., RSC Advances, 2 (2012), 5707-5716.



Chimie séparative – Extraction du Cs

➤ Cinétique de sorption : Effet nano

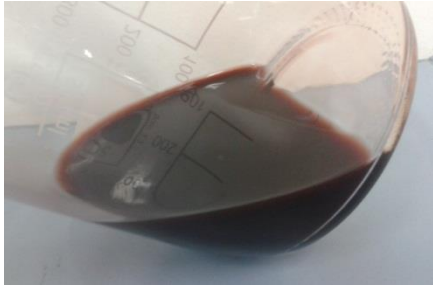
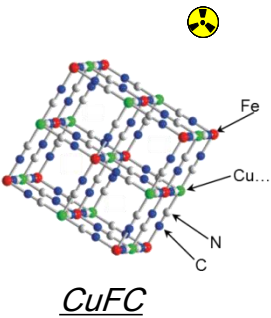
Comparaison : $\text{Co}(\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6)$ « bulk » / nanocomposite



Boundary Layer diffusion

Chimie séparative – Extraction du Cs

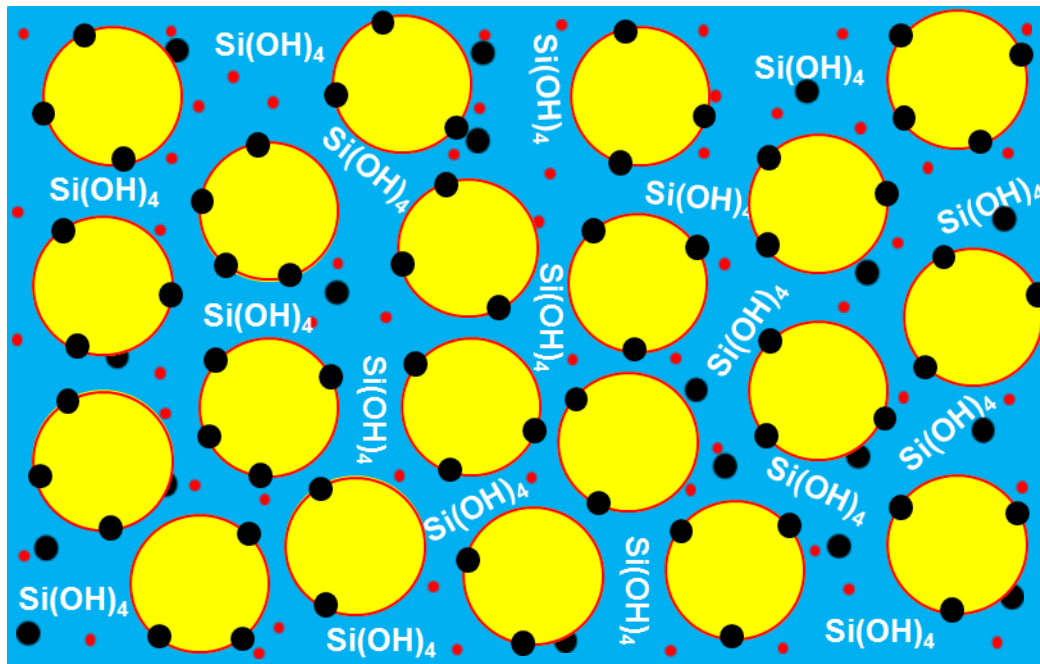
Fonctionnalisation one pot sans calcination



Suspension colloïdale de CuFC

Si(HIPE) fonctionnalisés en une étape:

- Mélange CuFC – tensioactif (P123, CTAB...)
- Ajout de TEOS en phase aqueuse pH=2
- Emulsification d'une phase majoritaire de dodécane (62%vol)



Emulsion à haute teneur en phase interne (HIPE)

Lavage THF (-dodecane; - plupart des TA)

Séchage



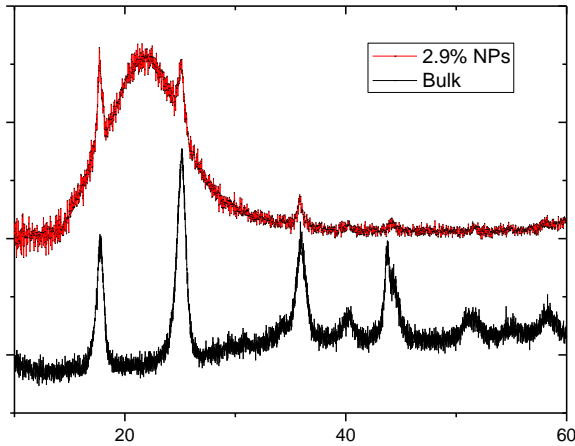
0%NPs 0.8%NPs 1.8%NPs 2.9%NPs 5.1%NPs

Si(HIPE) fonctionnalisé

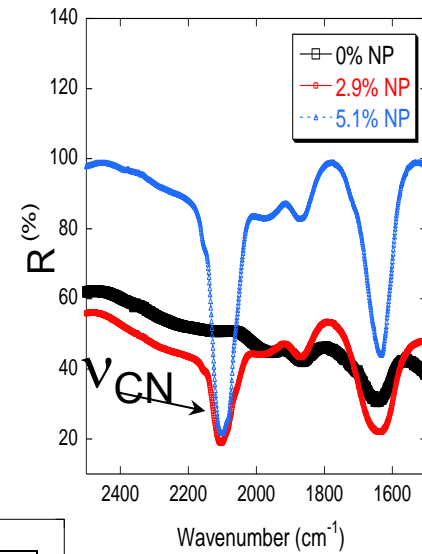
Chimie séparative – Extraction du Cs

Fonctionnalisation one pot sans calcination

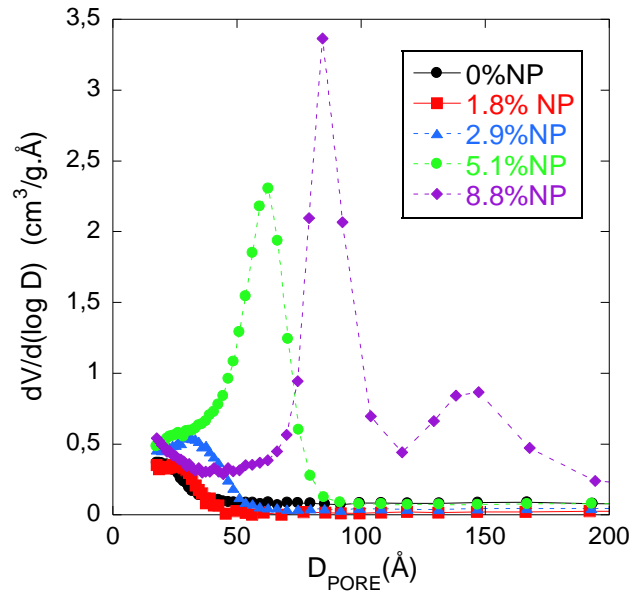
DRX



FT-IR



Microstructure
des monolithes

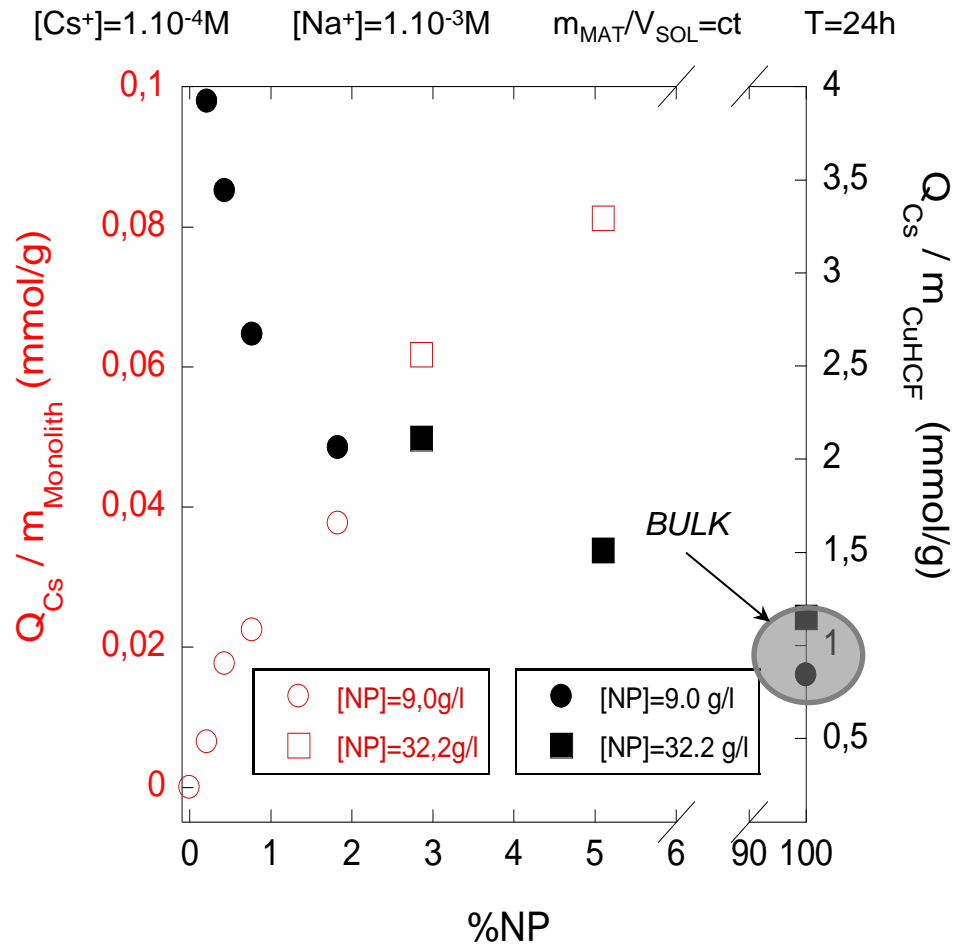


*N_2 ads-dés
Distribution porosité*

Chimie séparative – Extraction du Cs

Fonctionnalisation one pot sans calcination

^{133}Cs uptake: Nanosize effect



Total adsorbed Cs (red data)

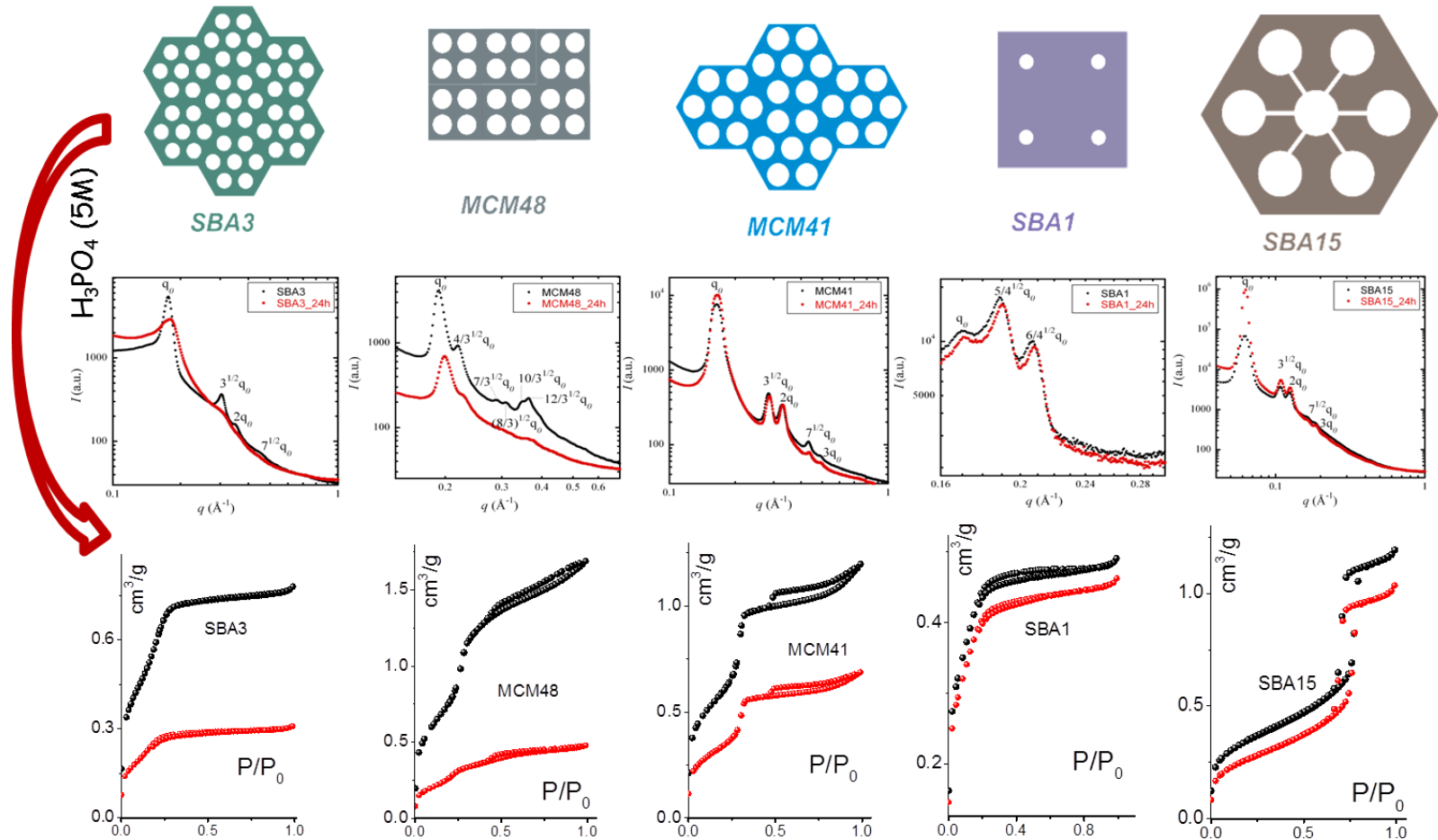
- 0,08 mmol/g of Cs is adsorbed for monoliths with 5.1%wt content of NPs

Adsorbed Cs normalised with NPs mass (black data)

- At 0.2%wt NPs, Cs adsorption is four times more efficient than bulk (3,85 vs 0,85 mmol/g)
- Mechanisms involving surface NPs to the Cs sorption
- Cs adsorption with 5.1%wt NPs is close to the bulk cyanoferrate
- Nanosize effect is lost from 5.1%wt NPs (aggregation of NPs in the monolith)

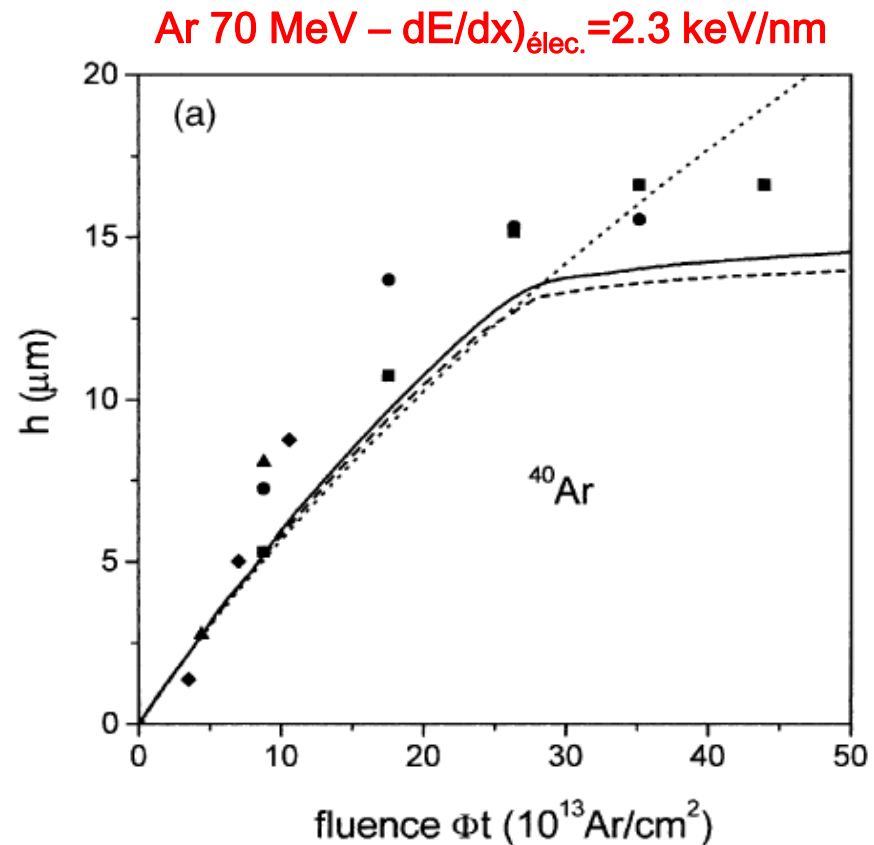
Conditionnement des déchets – Perspectives

Comparaison de la résistance des silices méso à un traitement en milieu acide H_3PO_4 5M



Nanomatériaux et irradiation

Verre Vycor

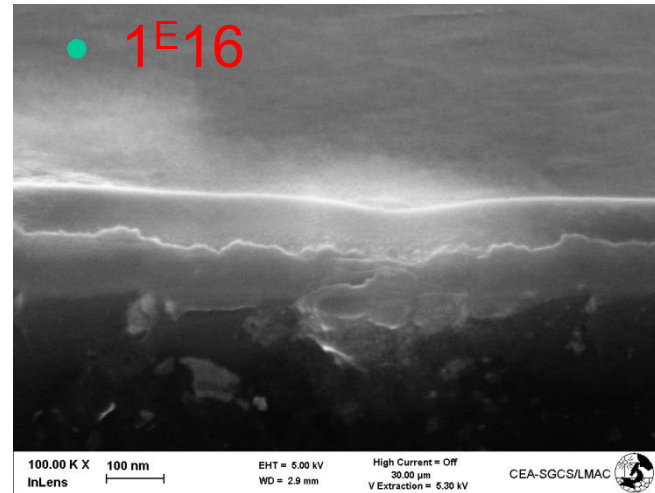
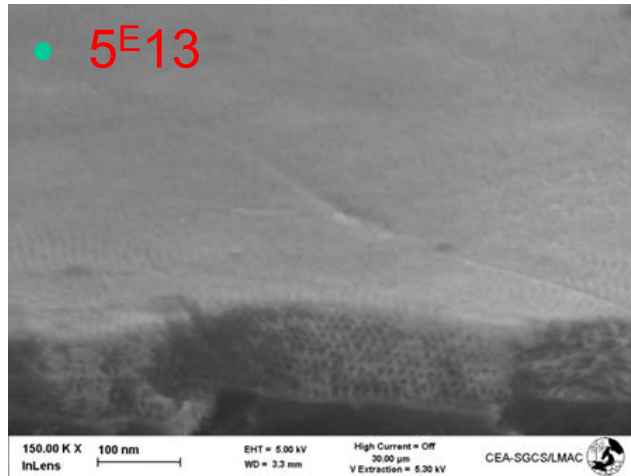


Effondrement de la structure obtenu par irradiation.

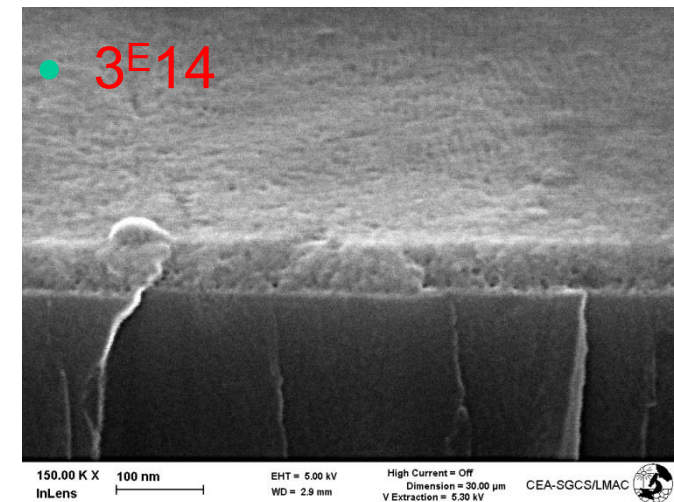
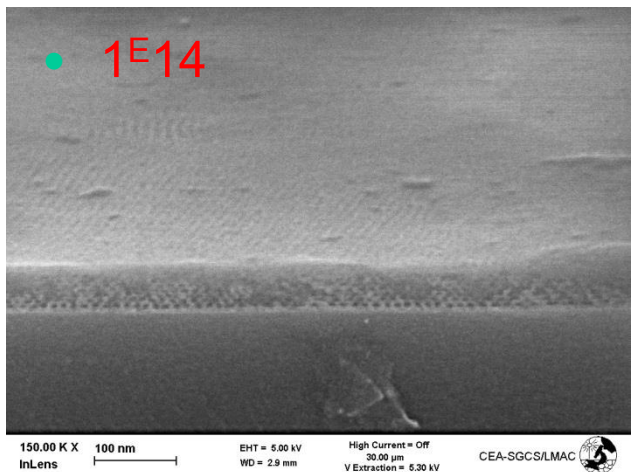
Stratégie séparation – encapsulation?

Nanomatériaux et irradiation

❖ Ar 20MeV $dE/dx=4,4\text{keV/nm}$



• Au 1,5MeV dE/dx Nucl = $1,2\text{keV/nm}$, dE/dx Elec = $4,1\text{keV/nm}$



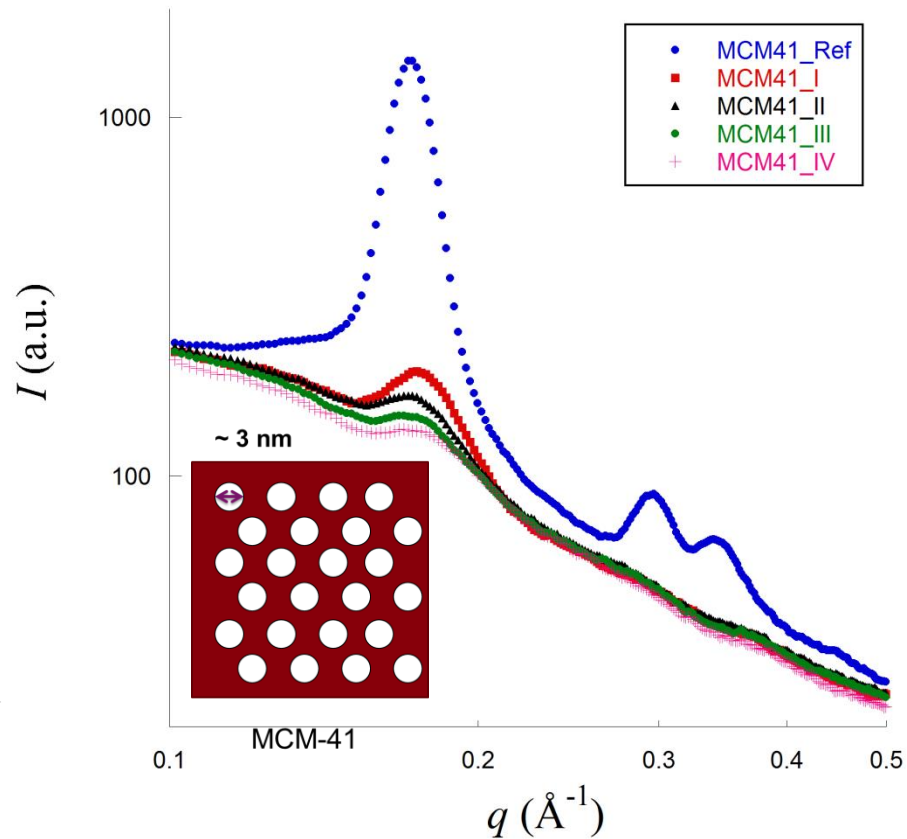
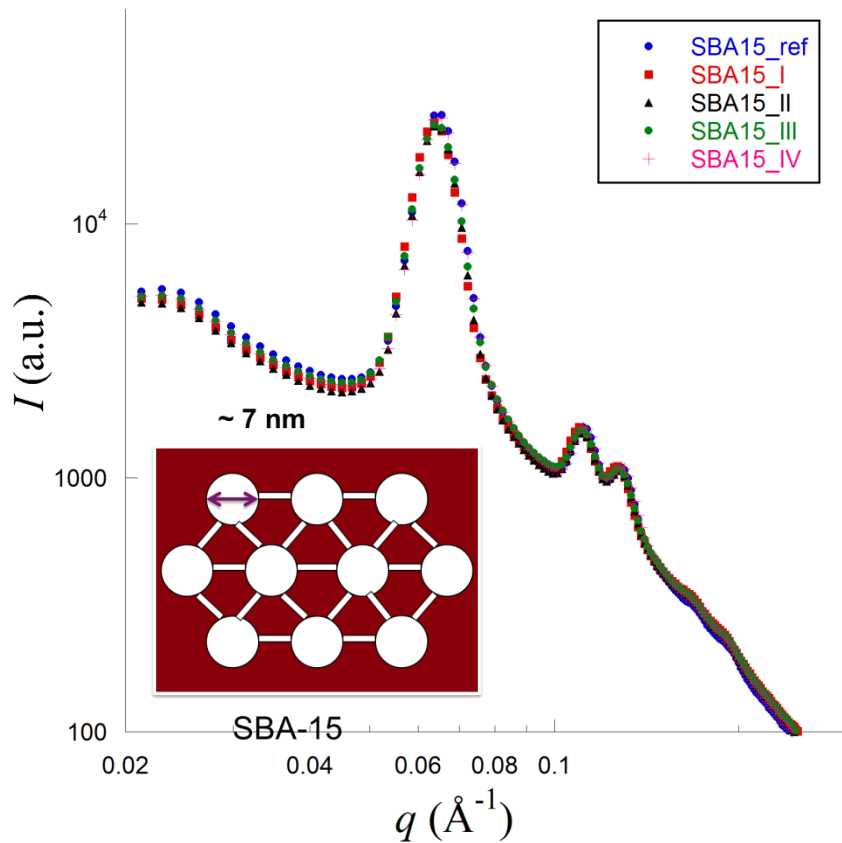
Biblio

- ❖ « Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique » Didier Noël, Lavoisier (2014)
- ❖ Techniques de l'ingénieur NM110, NM3010, NM 3011, P. Costa
- ❖ Techniques de l'ingénieur NM510, R. Corriu
- ❖ Clefs CEA N°59
- ❖ Wikipédia « procédé sol-gel »
- ❖ Materials under irradiation ED A. Dunlop ISBN 0-87849-651-3, solid state phenomena vol. 30-31 (1993)
- ❖ Science des matériaux du nucléaire, C. Lemaignan, ISBN 2-86883-672-0 EDP Sciences (2004)
- ❖ Ecole d'été Lalonde les Maures (24-30mai 2000) « Comprendre et utiliser les irradiations »
- ❖ Monographies DEN
- ❖ Report DOE « Basic research needs for advanced energy systems » July31-August 3, 2006 – http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/ANES_rpt.pdf
- ❖ Thèses
 - A Merceille (2012) « Étude d'échangeurs minéraux pour la décontamination liquide en strontium »
 - C. Delchet (2013) « Matériaux hybrides pour l'extraction sélective du Césium »
 - S. El Mourabit (2013) « Matériaux hybrides inorganiques-organiques pour l'extraction d'uranium en milieu acide phosphorique »



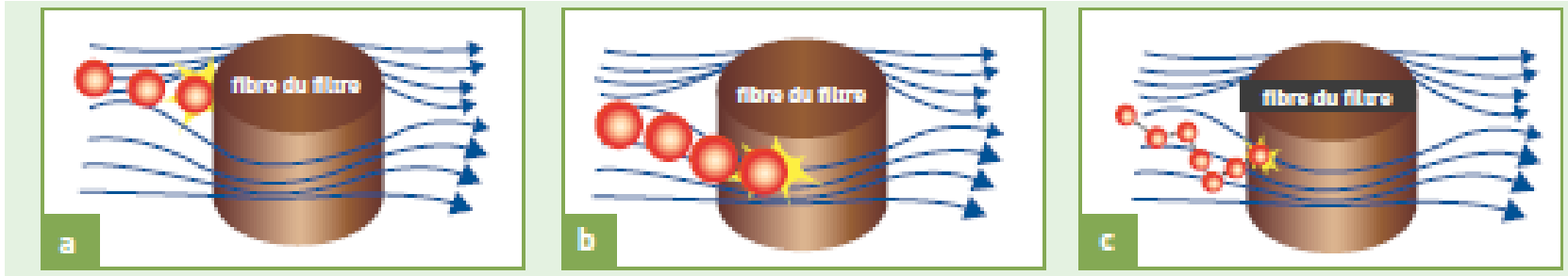
Nanomatériaux et irradiation

- $^{20}_{10}\text{Ne}$ 278MeV-SAXS



Nanomatériaux et risques associés

- Différents mécanismes de capture des particules par les fibres des filtres



- Dépôt par inertie** : Les filets d'air contournent les fibres du filtre alors que les particules, en général plus denses que l'air, n'arrivent pas à suivre la déformation de la veine fluide en raison de leur inertie. Ce mode de dépôt est favorisé par une grande vitesse d'entraînement et par une grande taille de particules
- Dépôt par interception** : Les particules, dont la trajectoire rencontre une fibre, se déposent sur celle-ci. Ce mode de dépôt ne dépend pas de la vitesse du flux gazeux, mais de la grande taille de particules
- Dépôt par diffusion** : En plus du mouvement d'entraînement du gaz, les plus petites particules sont soumises à des déplacements aléatoires découlant du mouvement brownien. Ces déplacements supplémentaires augmentent la probabilité de collision des particules avec les fibres. L'efficacité de capture par diffusion croît avec la petitesse des particules, la température et le ralentissement du flux d'entraînement.