

# Les verres biogéniques

Jacques Livage - Collège de France



Journées plénières USTV – GDR VERRES 3338

8 - 9 Décembre 2011 à Rennes



**Le verre est né du feu**



**HISTOIRE NATURELLE  
DE PLINE**  
TRADUITE EN FRANÇOIS,  
AVEC LE TEXTE LATIN  
rétabli d'après les meilleures leçons manuscrites;



**fusion du sable**



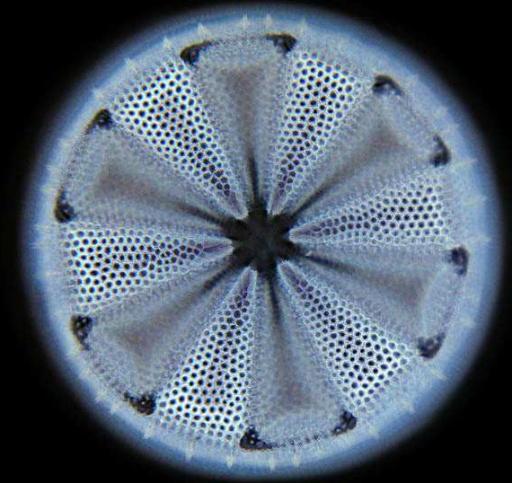
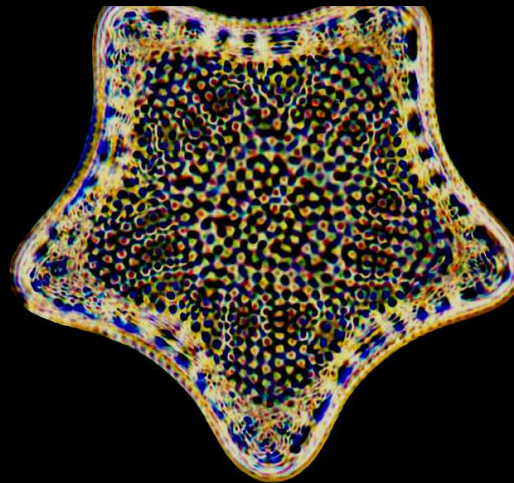
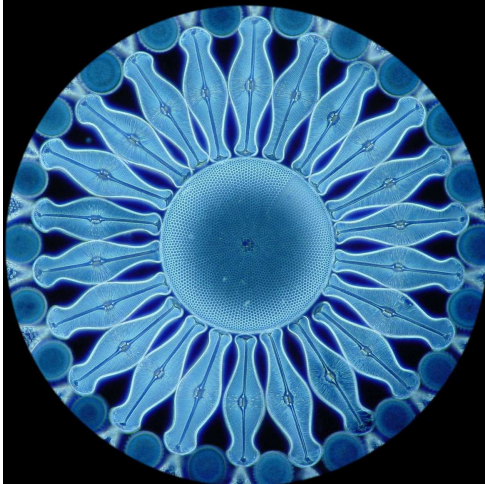
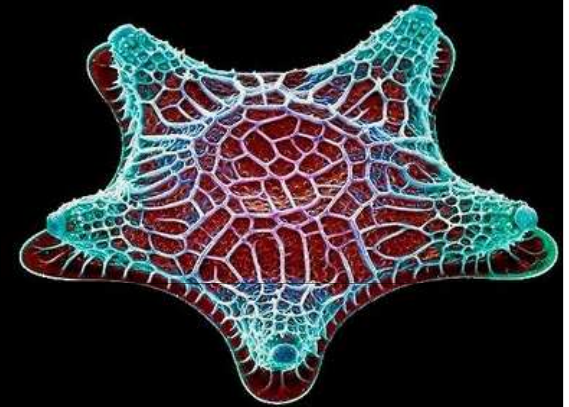
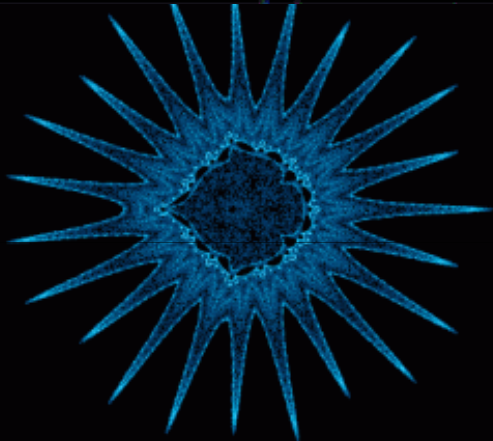
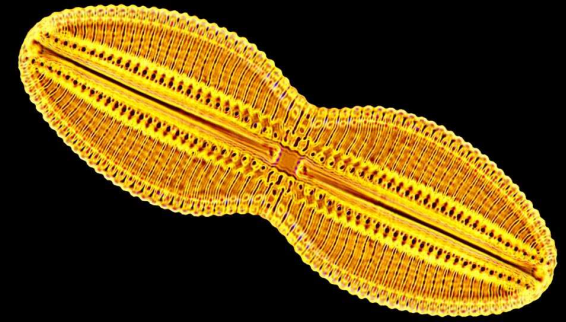


**micro-algues unicellulaires**

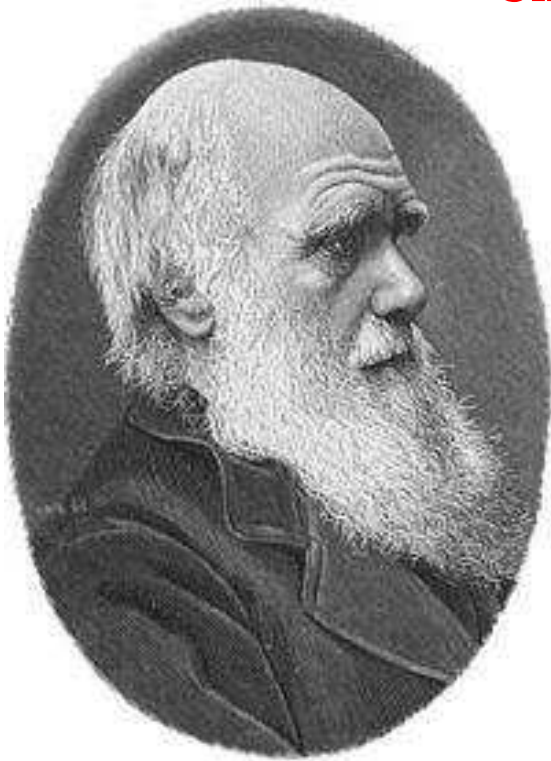
**photosynthétiques  
fixent 20% du CO<sub>2</sub> de  
l'atmosphère**

**entourées d'une carapace de silice  
(frustule)**

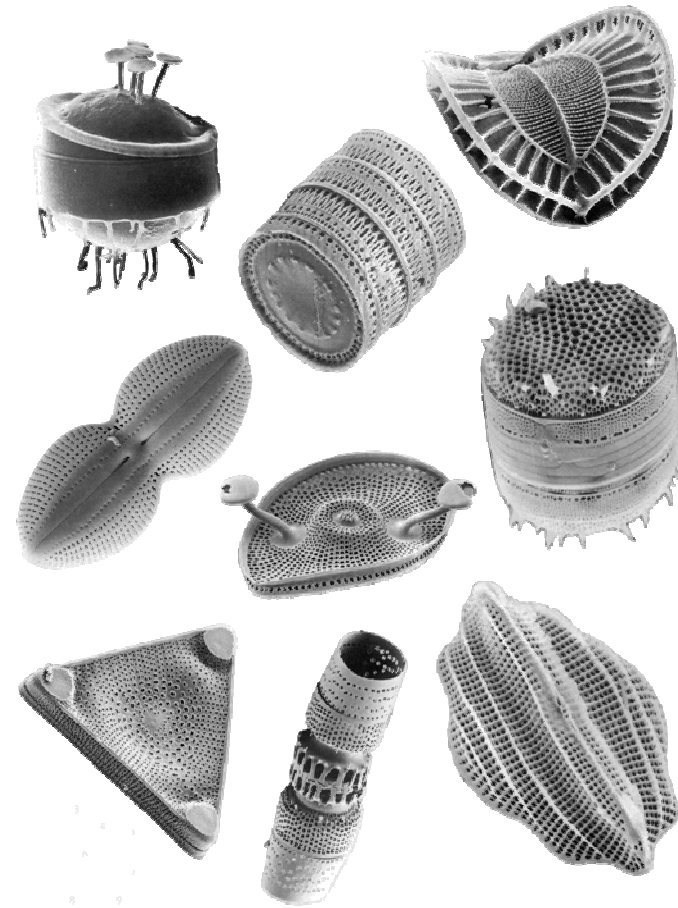
**solide – silice  
transparente – verre  
poreuse**



## Charles Darwin



**l'origine des espèces  
1859**

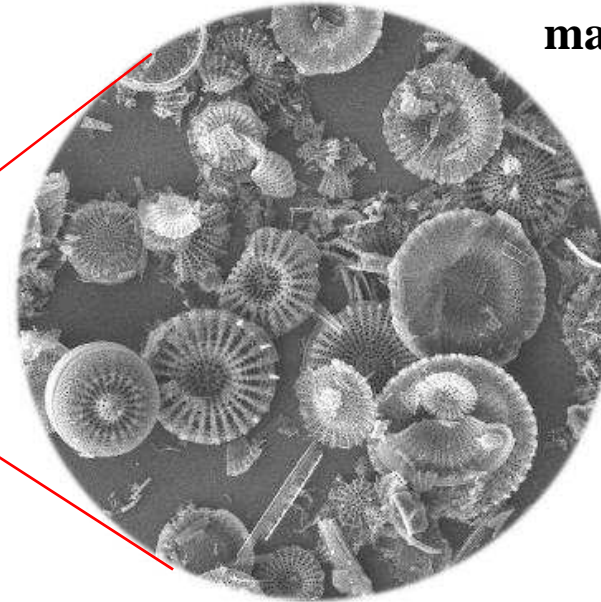


*Il y a peu d'objets plus admirables que les délicates enveloppes siliceuses des diatomées.  
N'ont-elles donc été créées que pour que l'Homme puisse les admirer ?*



## Les diatomées fossiles

*diatomite – terre de diatomées – kieselguhr - célite*



**matériaux poreux**

**filtration : piscines, vin, ...**

**isolant, charge, ...**

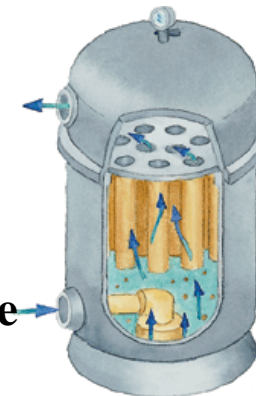
**abrasifs**

**insecticides**

.....

**France  $\approx$  200.000 tonnes/an**

**Filtre de diatomite**



## Alfred Nobel & la dynamite



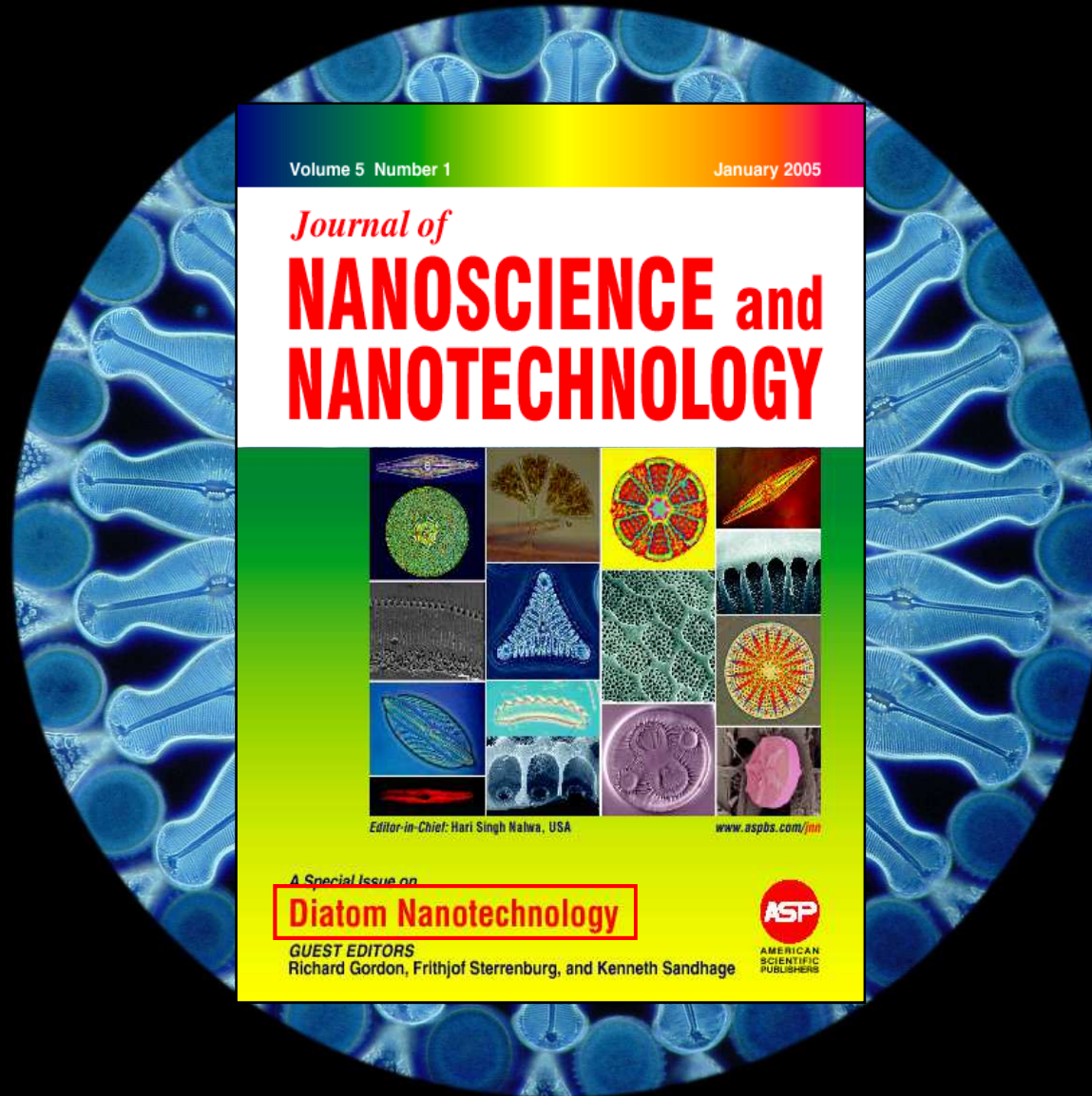
**dynamite**



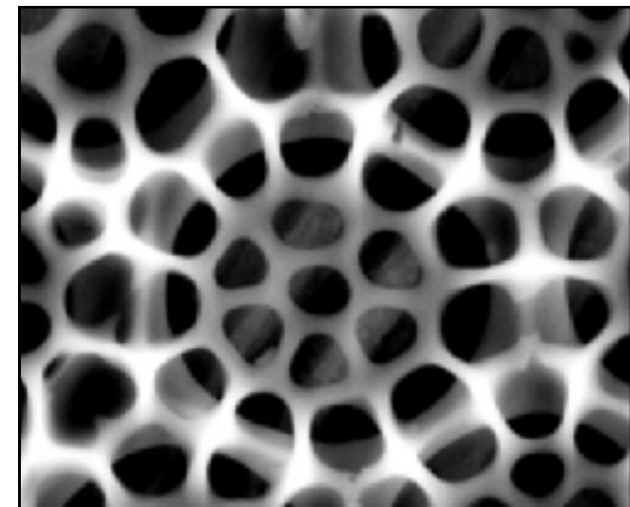
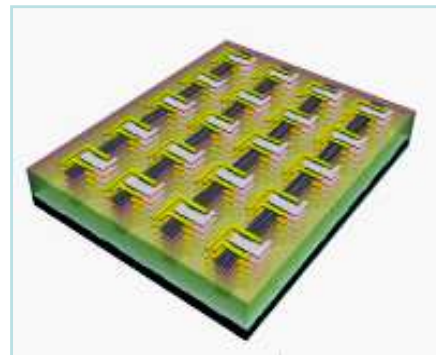
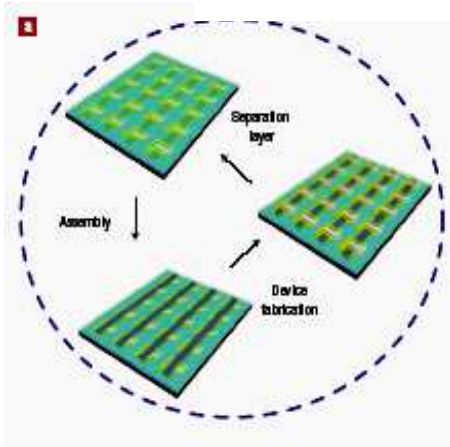
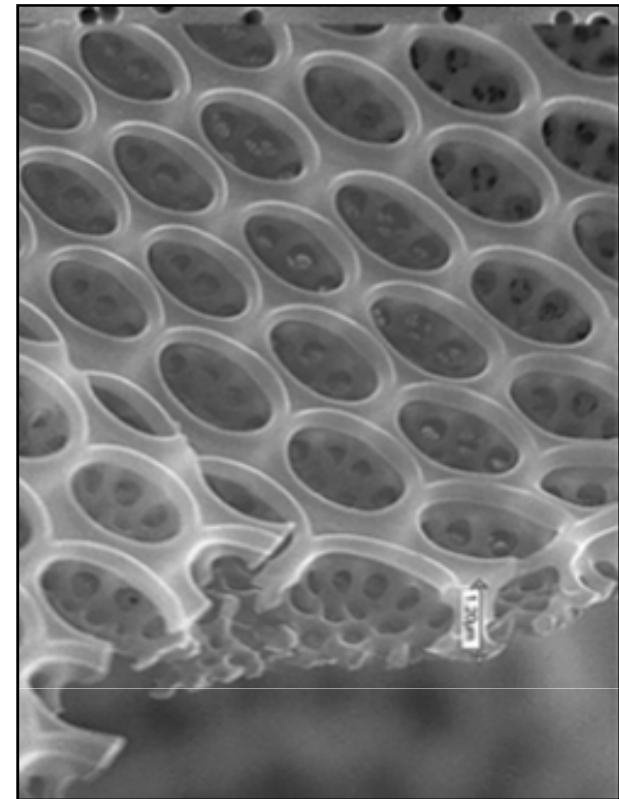
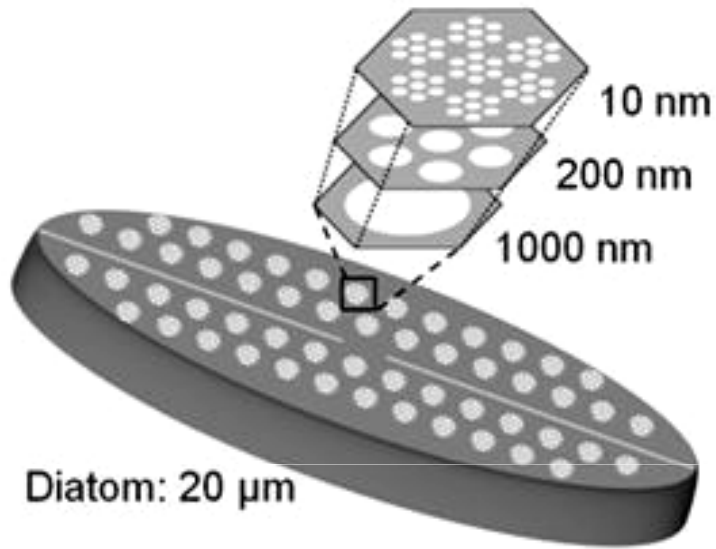
**Terre de diatomées  
imprégnée  
de nitroglycérine**



# I Les diatomées des nano-matériaux vivants !



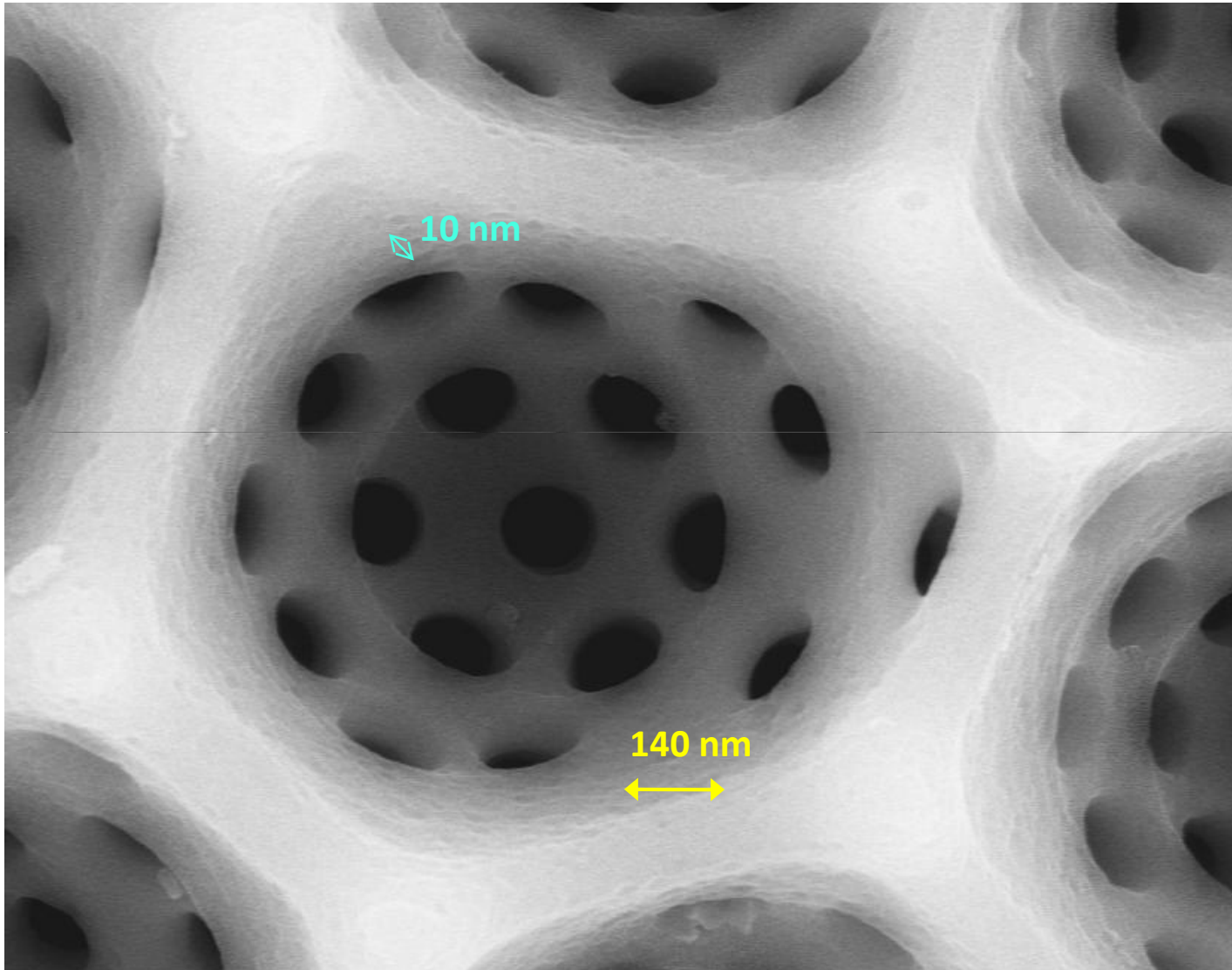
**Les frustules de diatomées présentent  
une porosité hiérarchisée à 3D**



**Les nano-dispositifs 3D sont en général  
élaborés couche par couche**

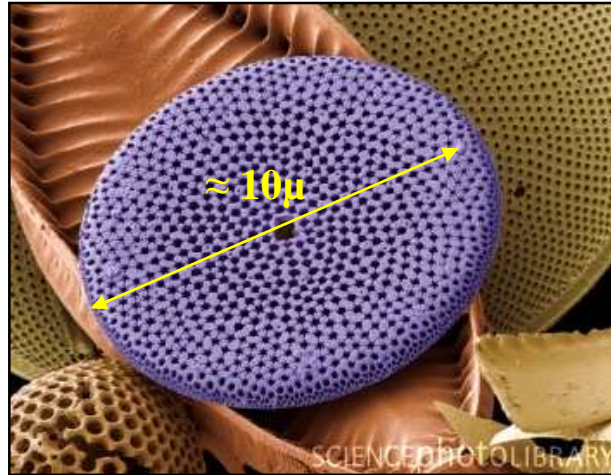


## Porosité à hiérarchisée des frustules des diatomées



# Marine diatoms as optical chemical sensors

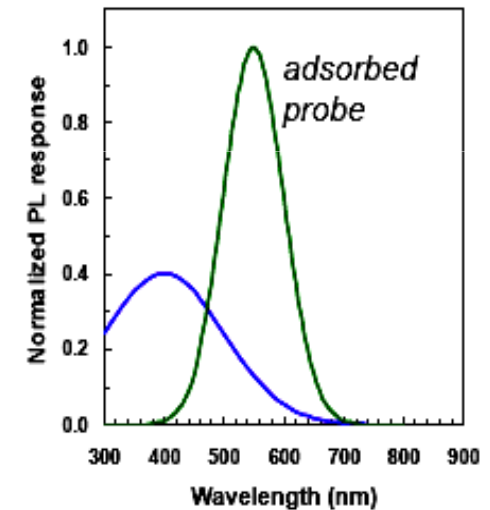
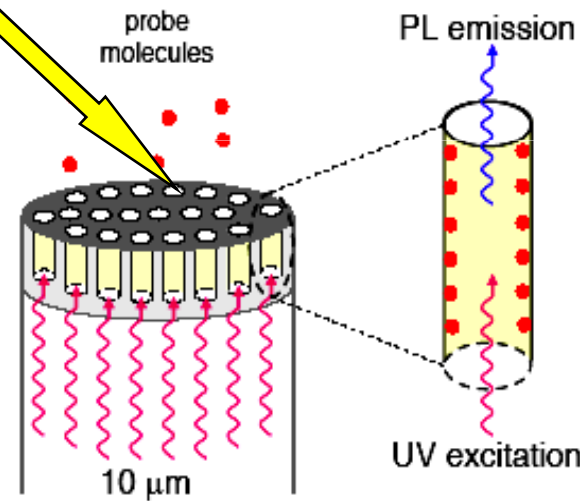
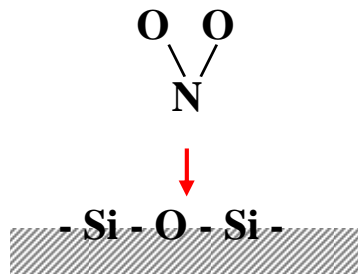
15



La photoluminescence des frustules de silice dépend de l'atmosphère

## Microsensor Device Development

(in cooperation with U.S. Department of Energy  
Pacific Northwest National Laboratory)



*Cyclotella* frustule mounted onto tip of fiber optic cable

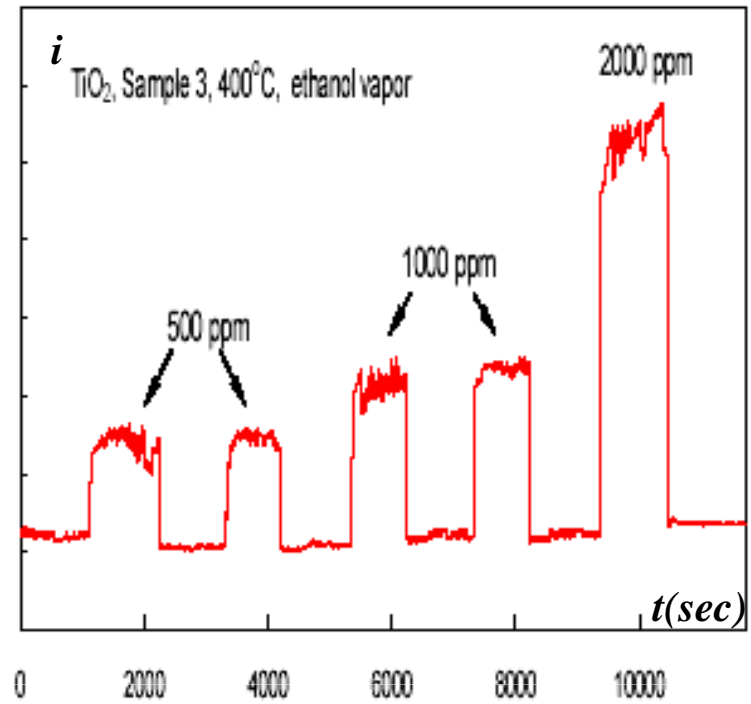
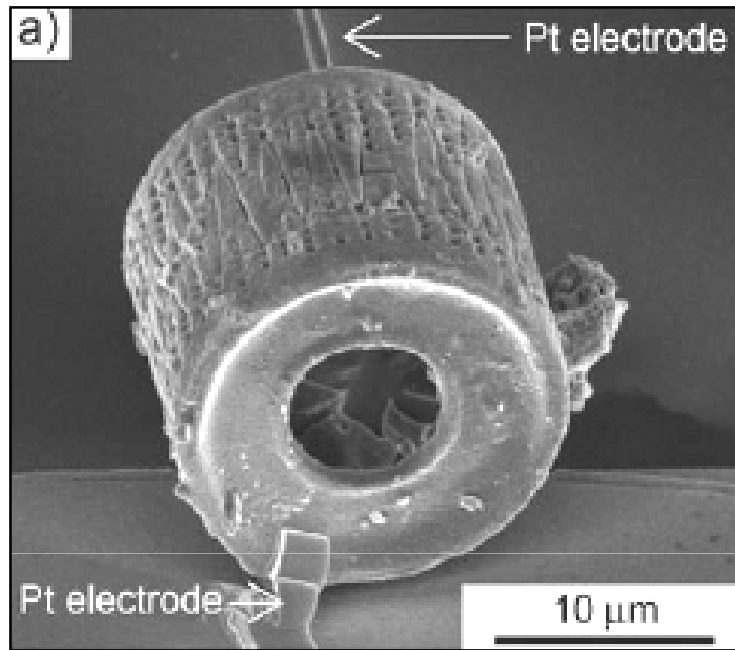
probe molecules adsorbed on surface uniquely change photoluminescent (PL) emission

Limite de détection 0,1 ppm

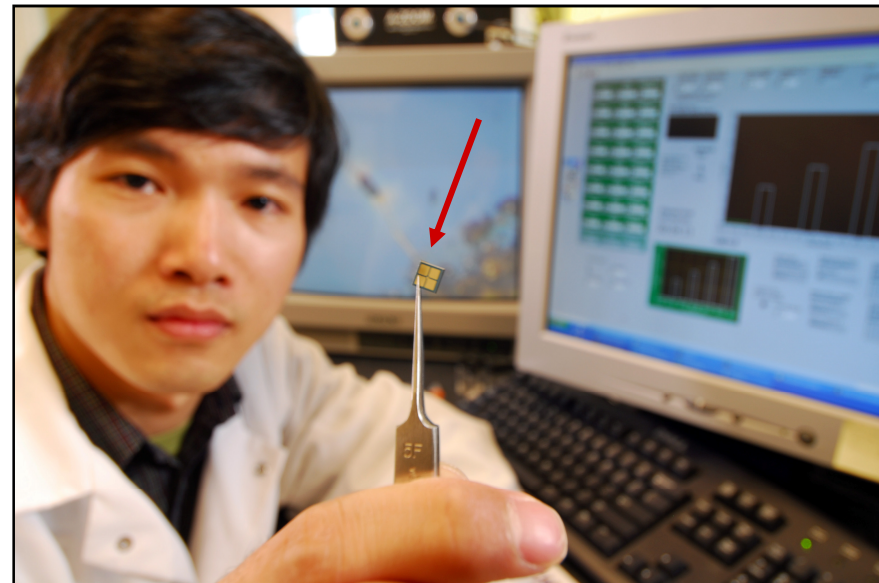
De Stefano et al. *Appl. Phys. Lett.* 87 (2005) 233902



## Capteurs de gaz

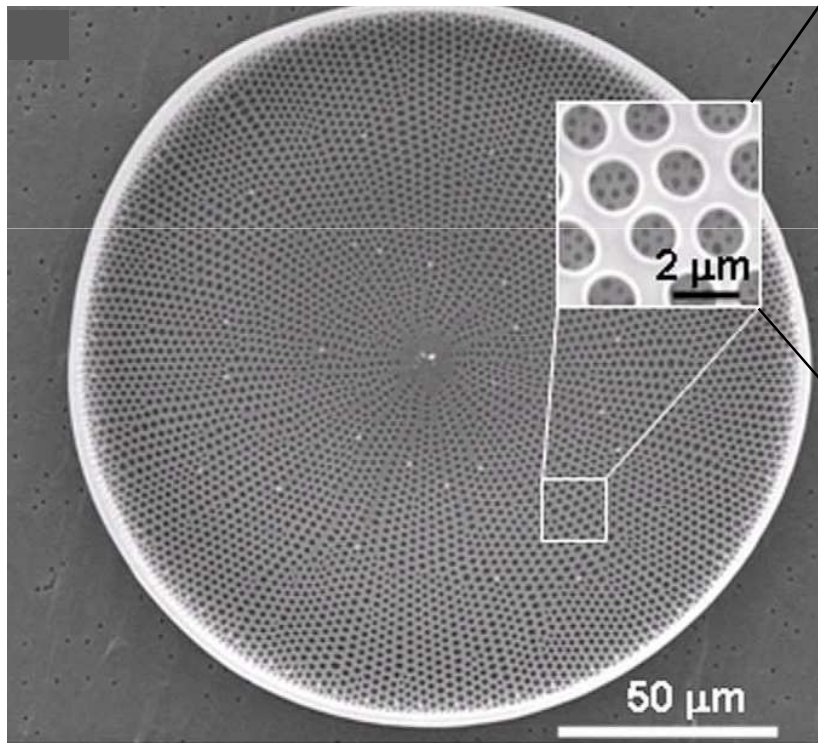


**La conductivité électrique de TiO<sub>2</sub> augmente en présence de vapeurs d'éthanol**

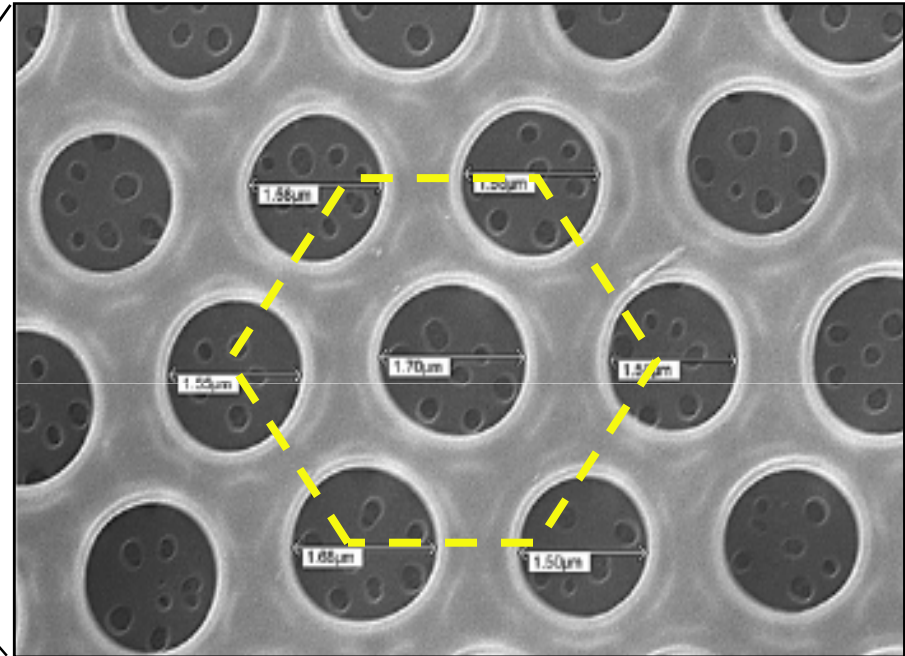


# Les diatomées des cristaux photoniques vivants !

Les pores forment un réseau  
périodique de 'canaux'



réseau hexagonal  $d \approx 0,6 \mu \approx \lambda_{opt}$



Périodicité des indices de réfraction

( $\text{SiO}_2 \approx 1,5$  - air  $\approx 1$ )

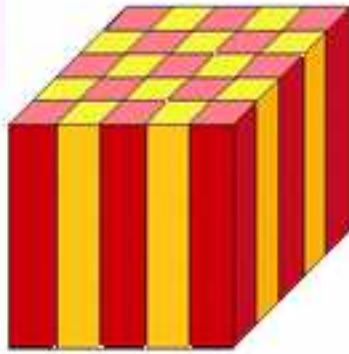


cristal photonique

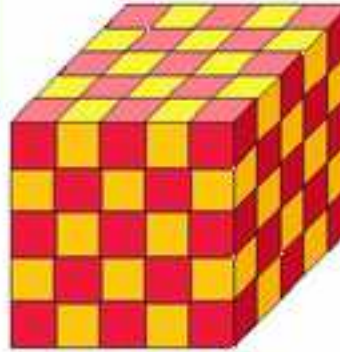
*La photonique, une nouvelle science !*



1D

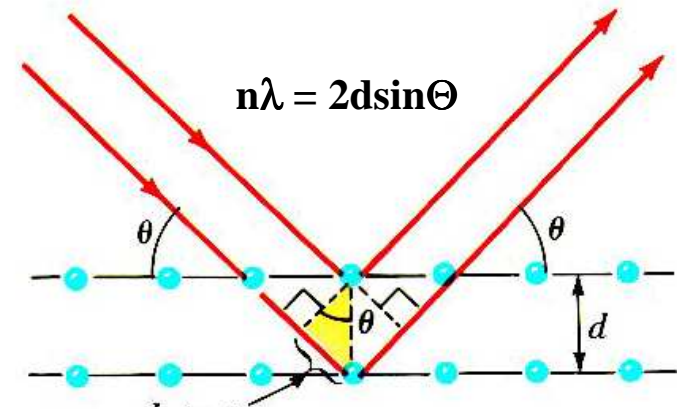


2D



3D

périodicité de l'indice optique

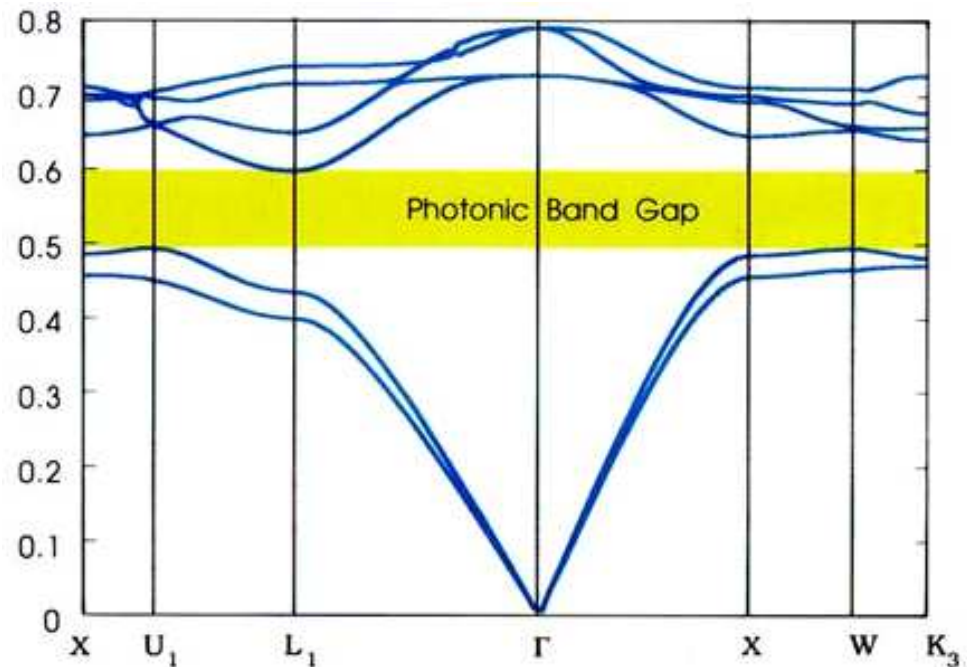


diffraction de la lumière

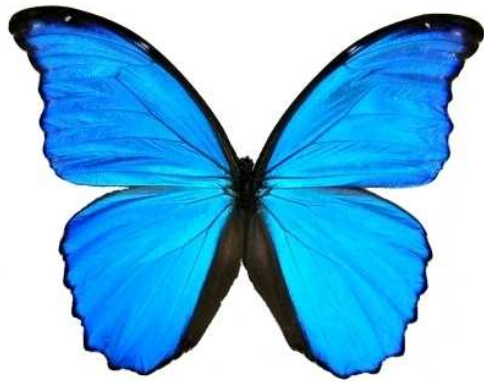
Les photons se propagent  
dans un cristal photonique  
comme les électrons  
dans un cristal semi-conducteur



'gap photonique'







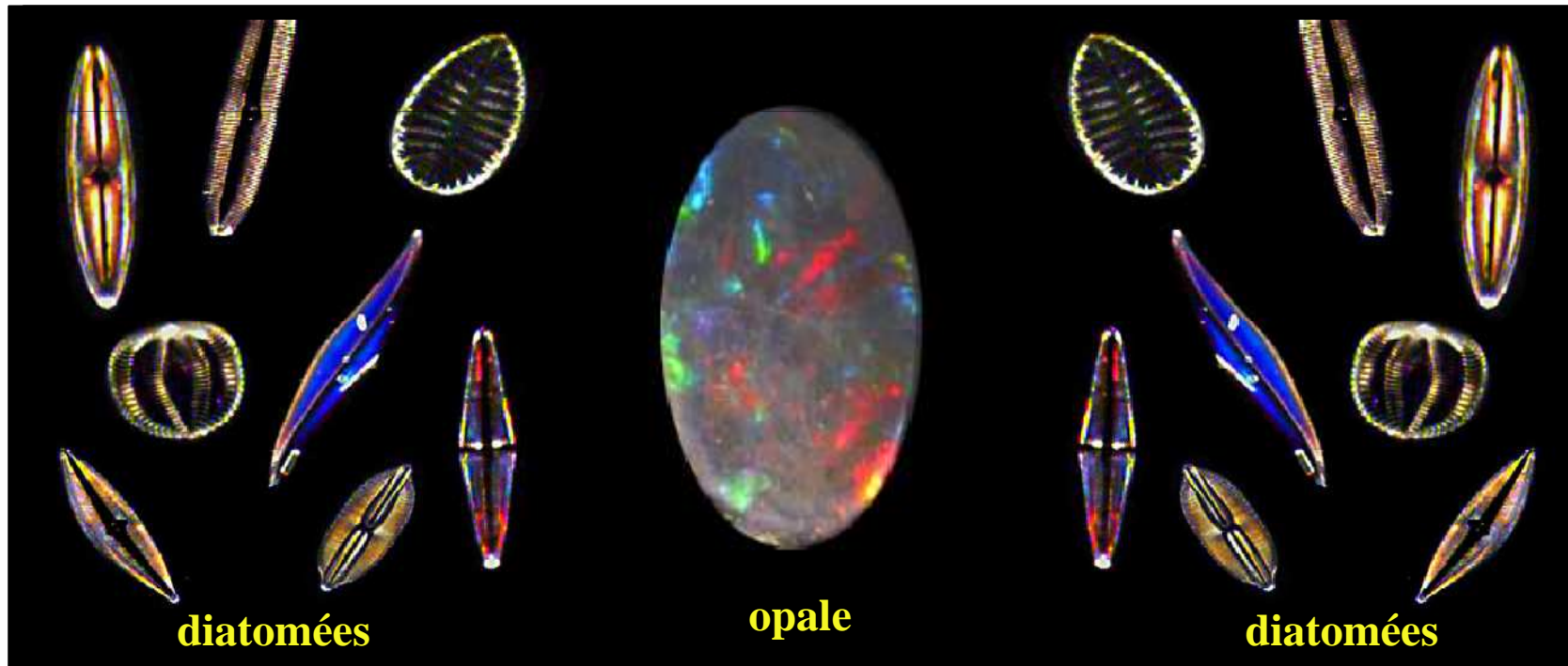
ButterflyUtopia.com

**Diatomées**  
**L'opale des mers**



ButterflyUtopia.com

**diffusion cohérente** → **irridescence**



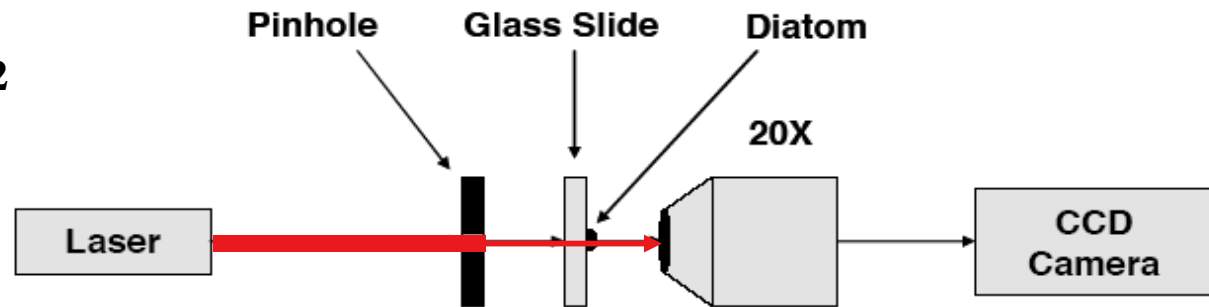
**diatomées**

**opale**

**diatomées**

# Focalisation de la lumière par des frustules de diatomées

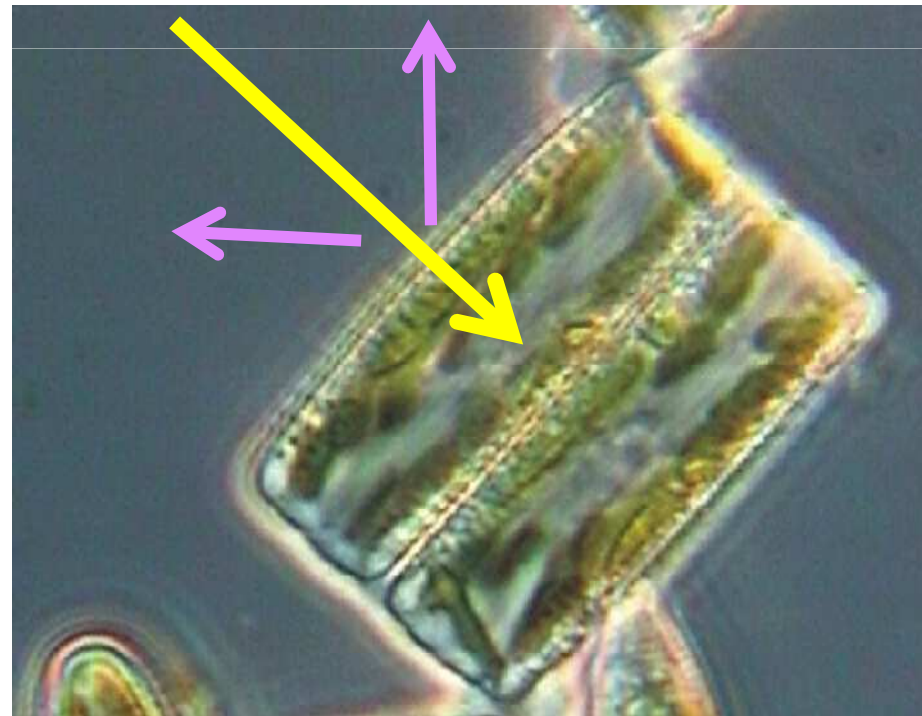
De Stefano *et al.*  
Optics express 15 (2007) 18082



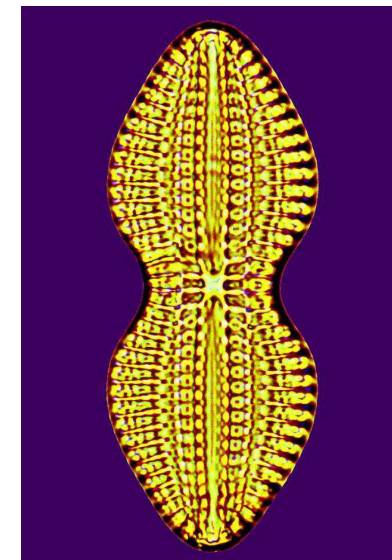
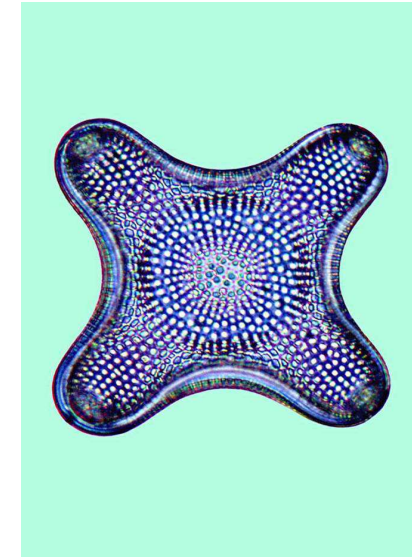
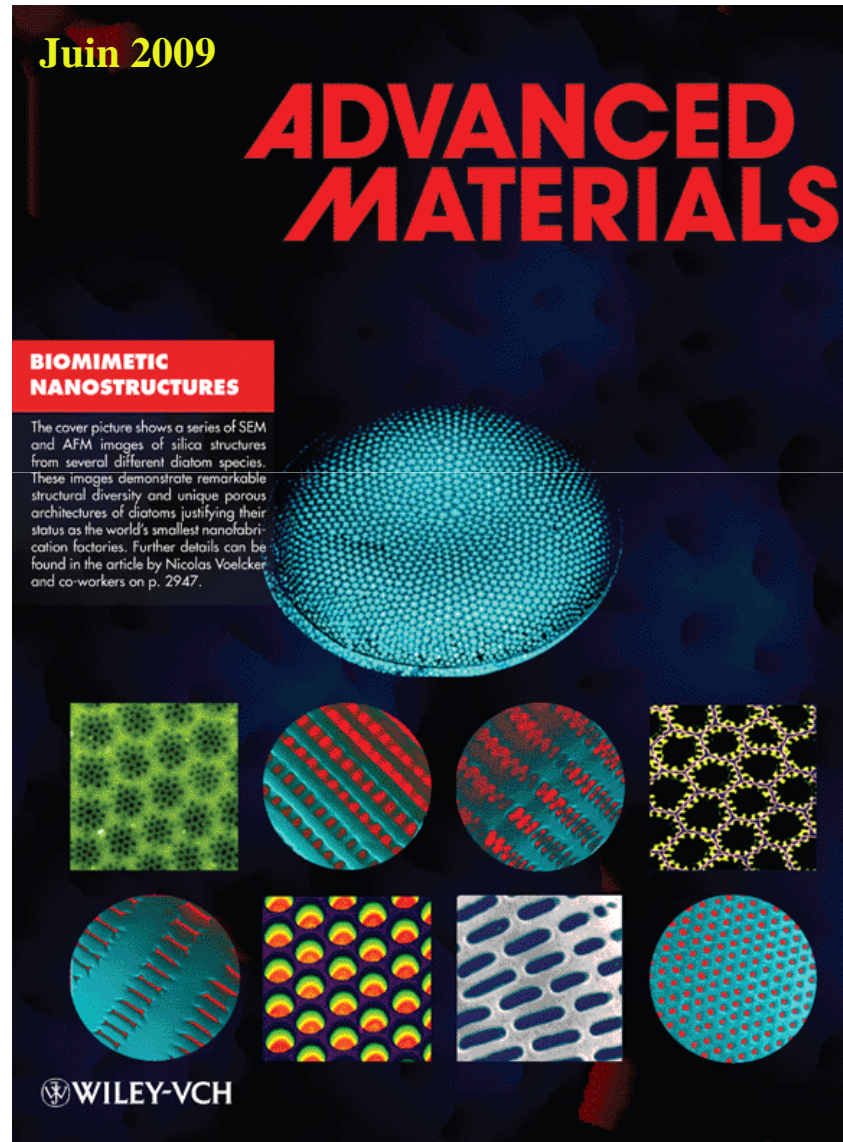
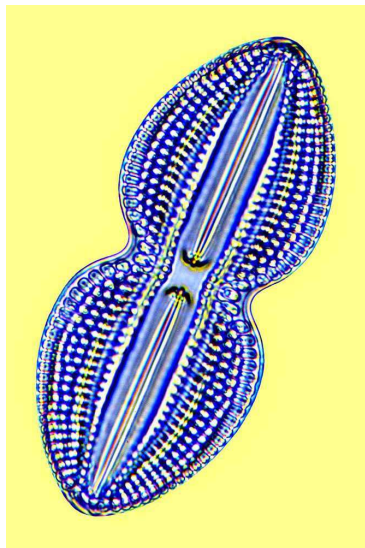
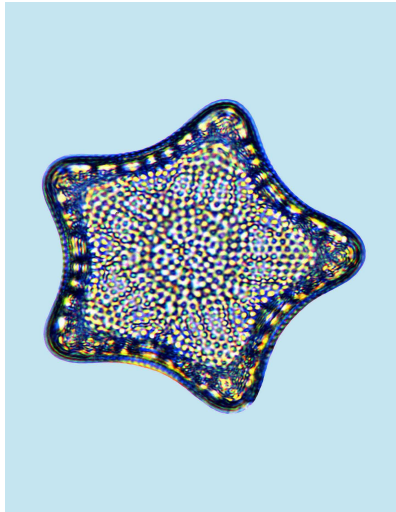
les frustules de diatomée  
jouent avec la lumière  
pour optimiser la photosynthèse

Focalisation du visible sur les  
chloroplastes

les UV sont réfléchis

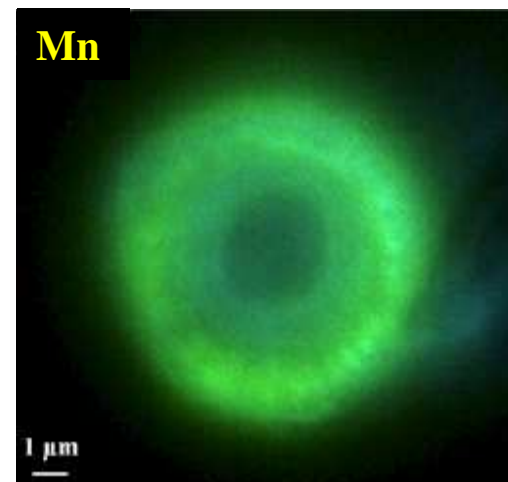
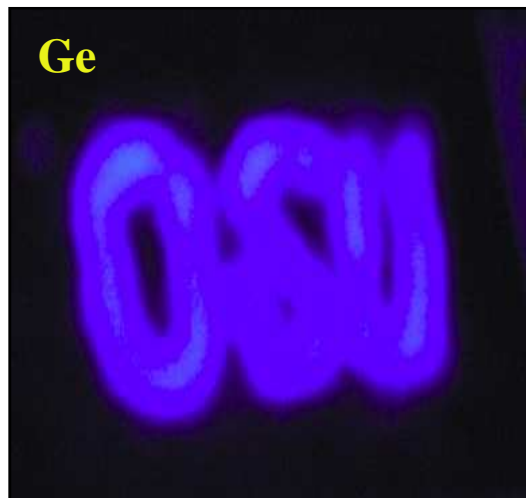
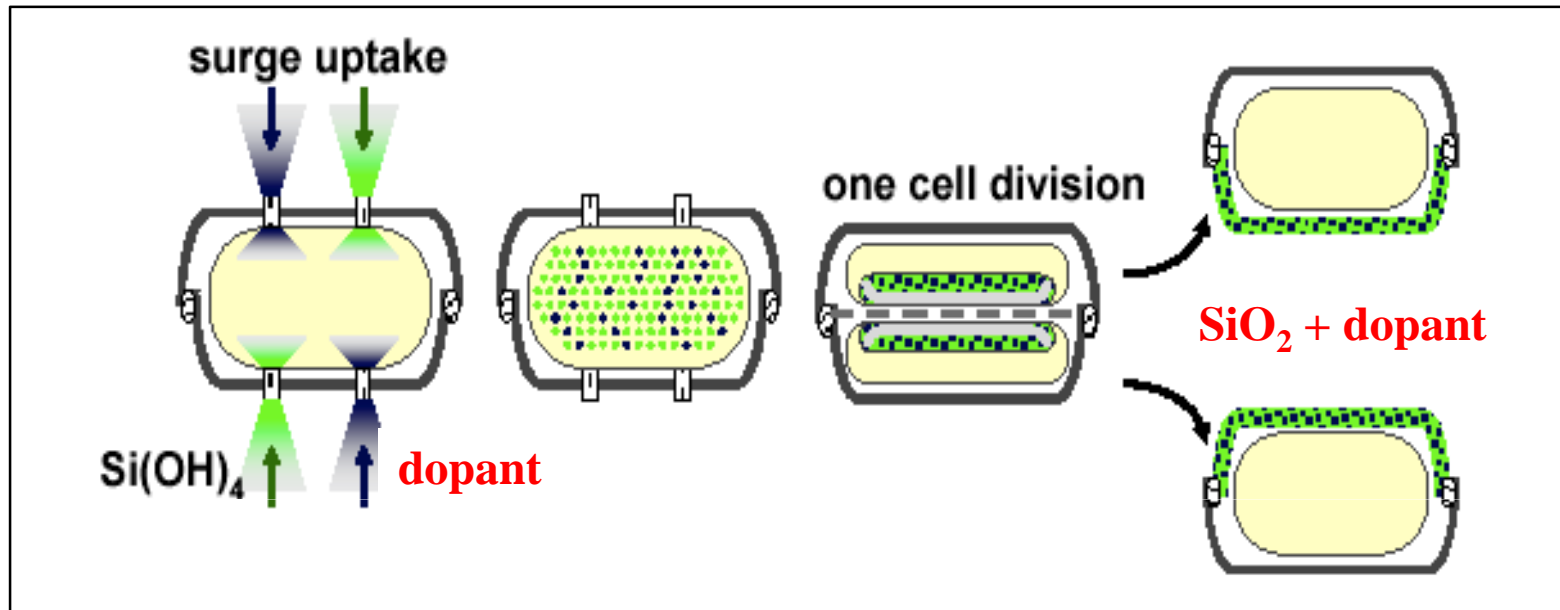


## Les frustules de diatomées peuvent être utilisées pour élaborer de nouveaux nano-matériaux



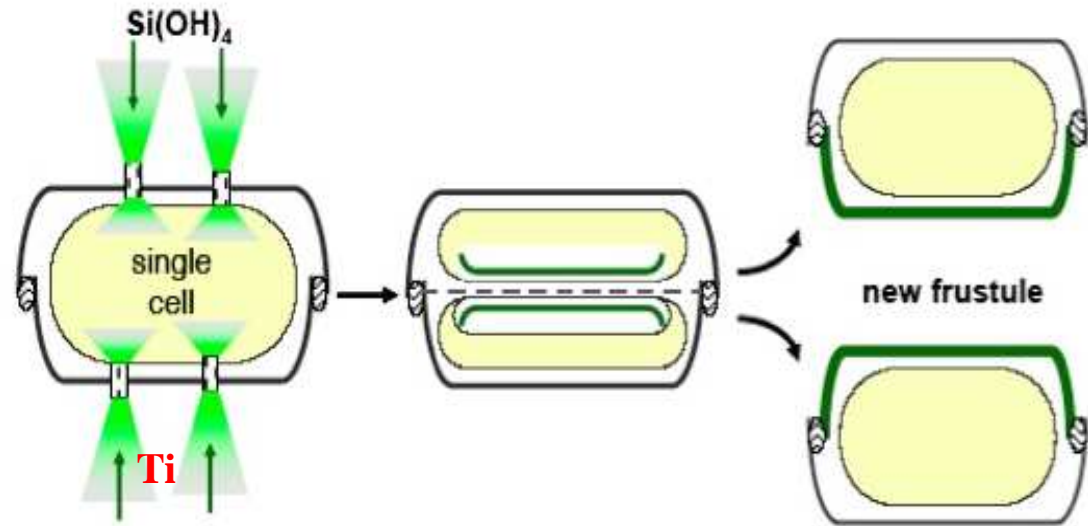


## Modification chimique par dopage introduction d'éléments étrangers pendant la culture

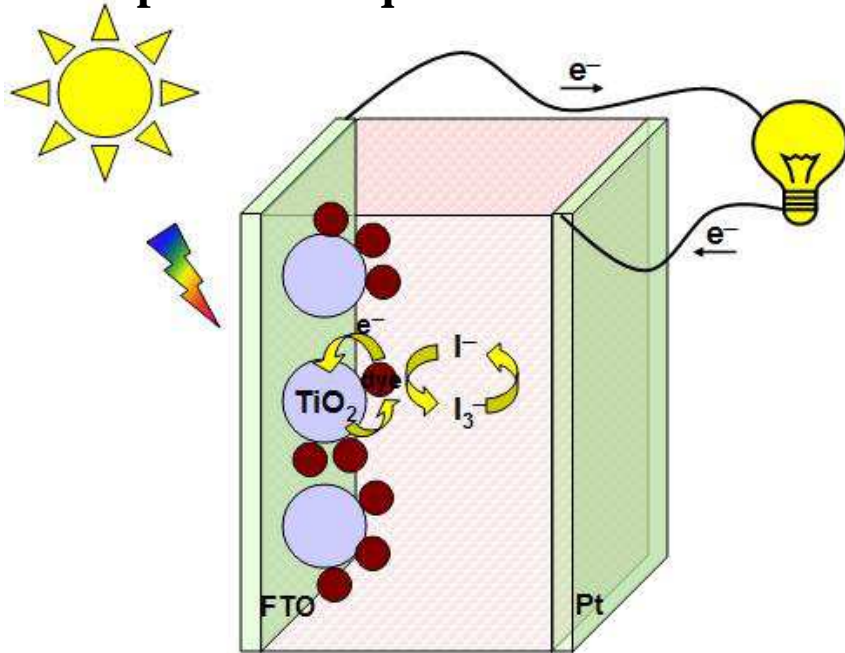


## Utilisation de diatomées vivantes pour déposer $\text{TiO}_2$ sur les frustules

alimentation en Si puis Ti

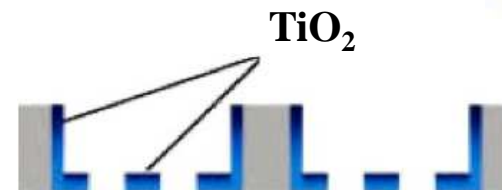
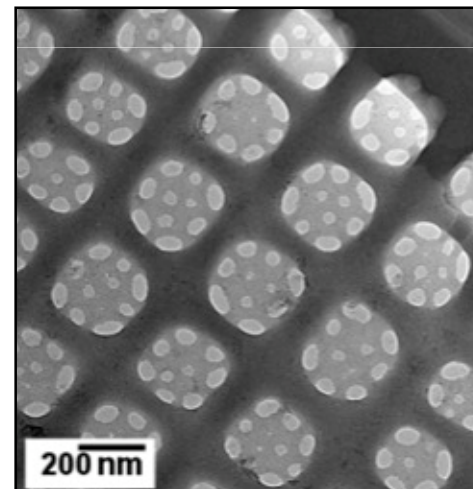


## Cellule photovoltaïque à colorant 'Grätzel'



grande surface de contact  $\text{TiO}_2$ -colorant  
rendement plus élevé

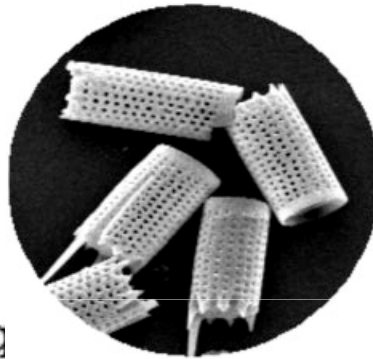
## Pores recouverts d'un film de $\text{TiO}_2$



# Transformation chimique

Modifier la nature chimique des frustules de silice  
sans en changer la morphologie

Diatom Biosilica



## Processes

Hydrothermal growth  
Vapor-phase transport  
Polymer coating/carbonisation  
Coating/pyrolysis  
Gas/solid displacement  
Gas/solid displacement/coating

Magnesioisotermic reduction  
Hydrothermal conversion  
Sol-gel coating  
Polymerisation  
Solution coating/annealing  
Metal/Metal oxide deposition  
Bioprocessing

## New Materials

zeolites/biosilica  
zeolites/biosilica  
C  
Boron Nitride  
MgO, TiO<sub>2</sub>  
MgO/BaTiO<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>  
MgO/BaTiO<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup> doped)  
Si  
BaTiO<sub>3</sub>, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>  
ZrO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, BaTiO<sub>3</sub>  
polyaniline, epoxy  
Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (Mn doped)  
Ag, Au, TiO<sub>2</sub>  
GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>

**BASIC**

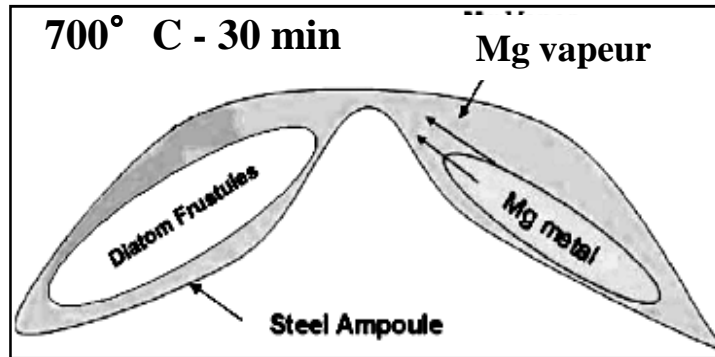
**Bioclastic and Shape-preserving Inorganic Conversion**



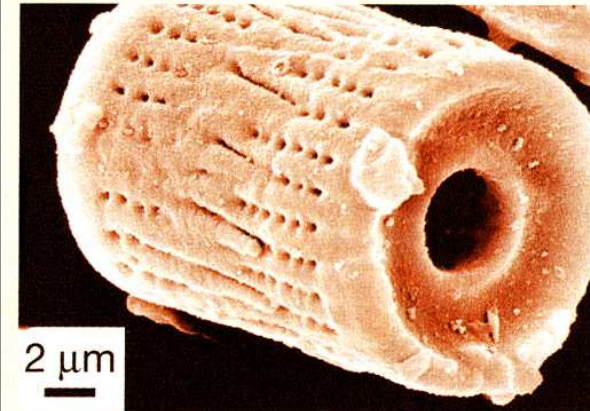
# Silicon life forms

K.H. Sandhage et al. *Nature*, March 2007

Transformation de  $\text{SiO}_2$  en Si



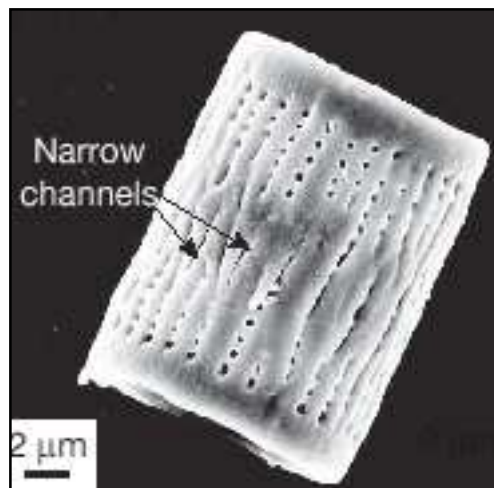
## Diatom skeletons make silicon sensors



This porous semiconductor framework was derived from a diatom

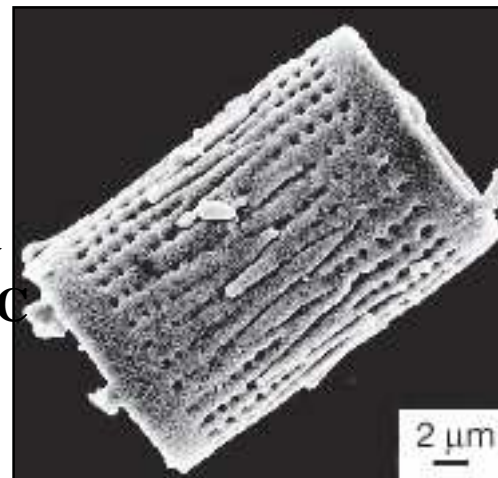
réduction de  $\text{SiO}_2$  par Mg vapeur

dissolution de MgO dans HCl



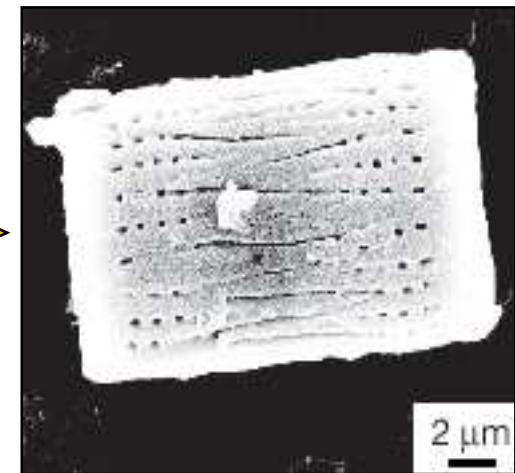
$\text{SiO}_2$

Mg  
650° C



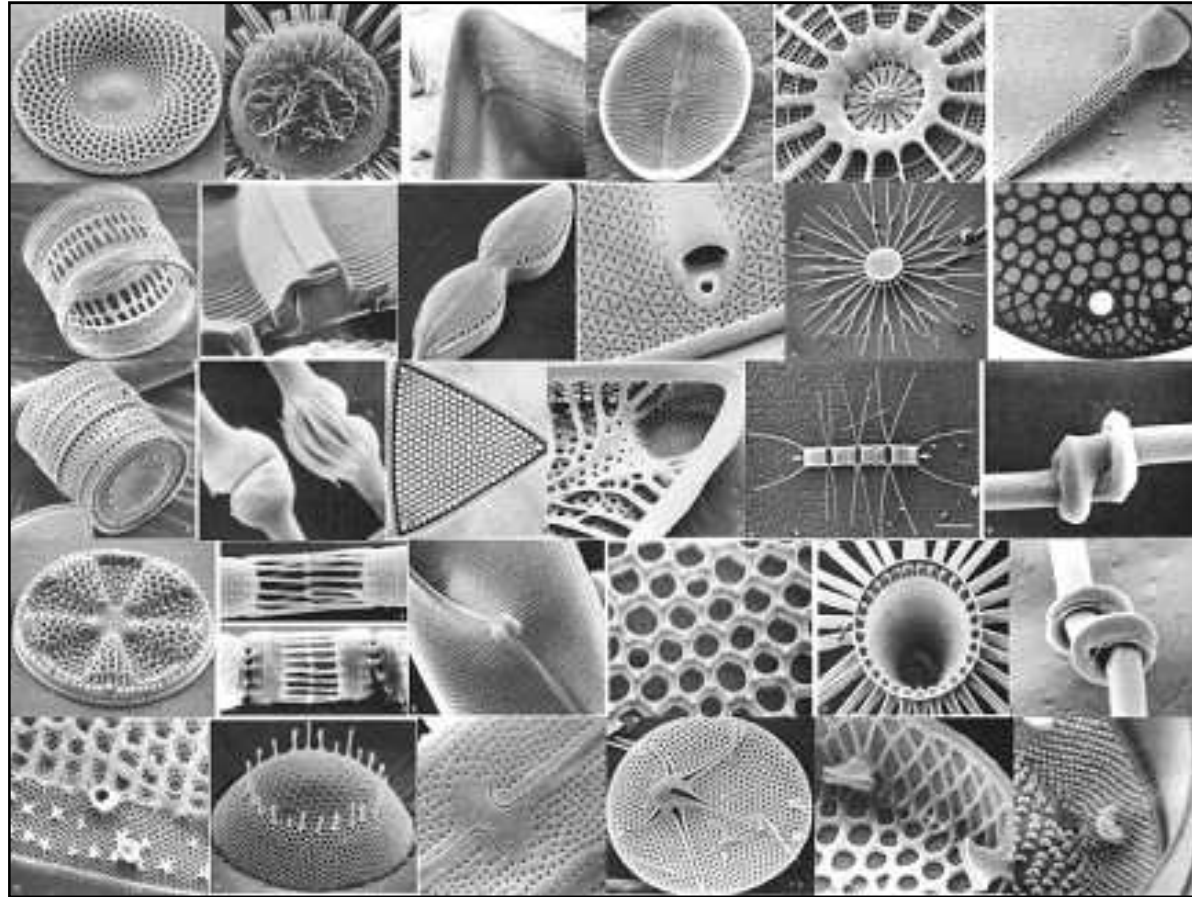
MgO + Si

HCl  
4 h



Si

## Production de grandes quantités de diatomées par culture

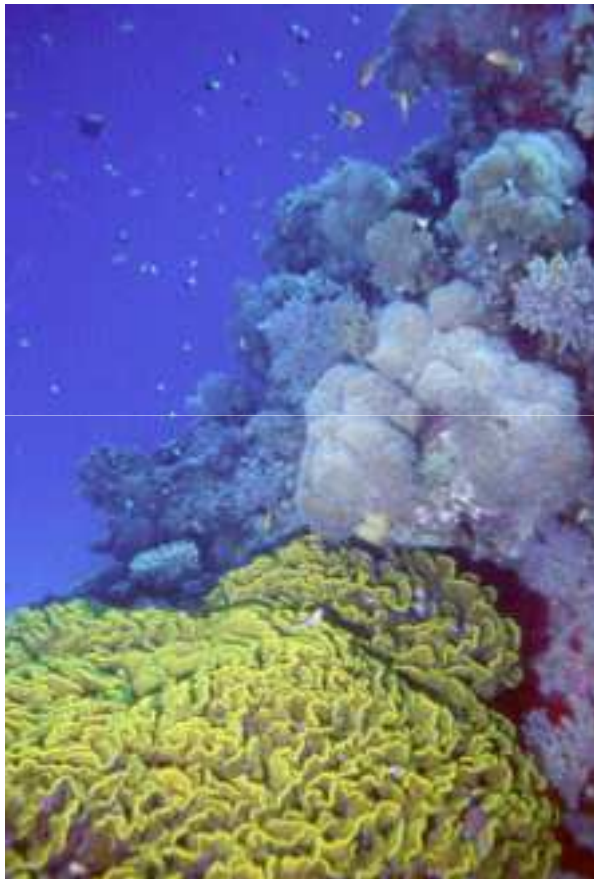


**environ 100.000 espèces différentes  
dont la morphologie est génétiquement contrôlée**



2

à l'école des diatomées  
la chimie douce



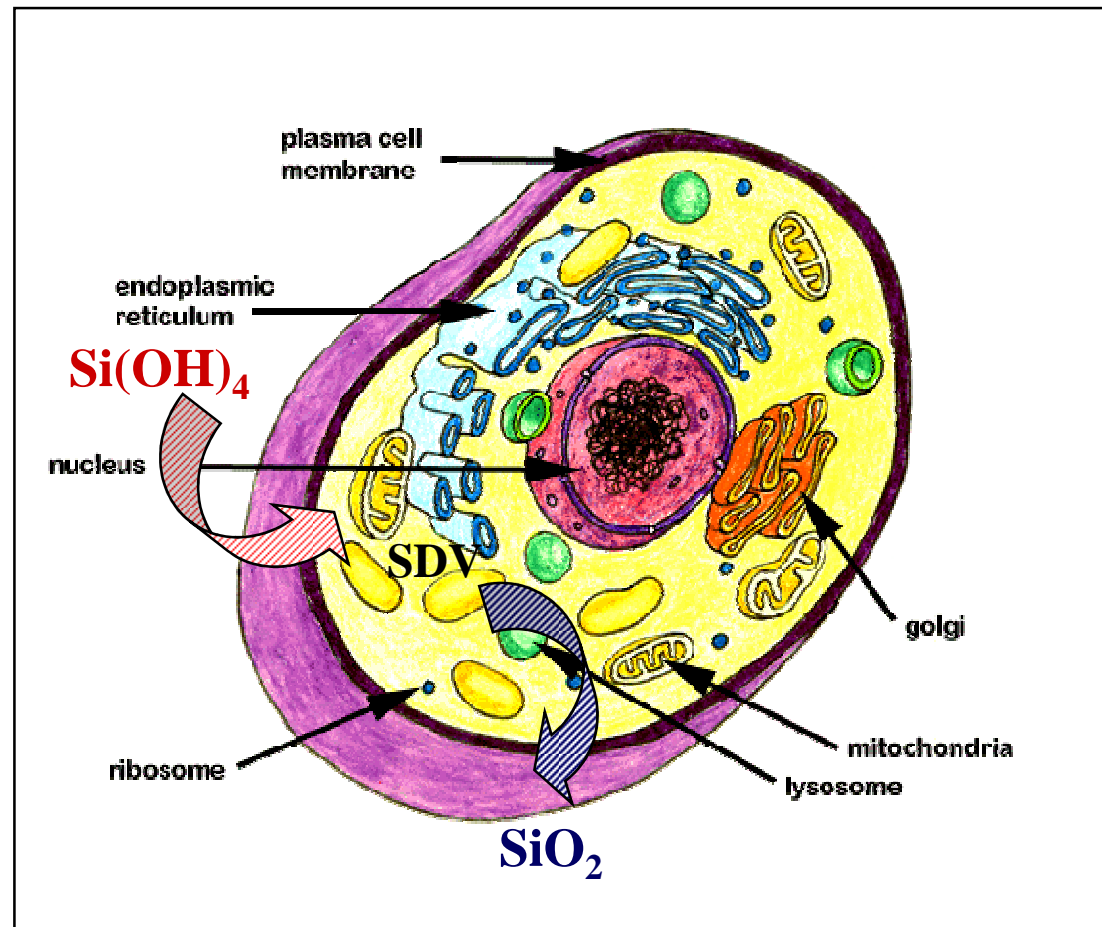
dans l'eau à 20° C

quand l'eau remplace le feu !



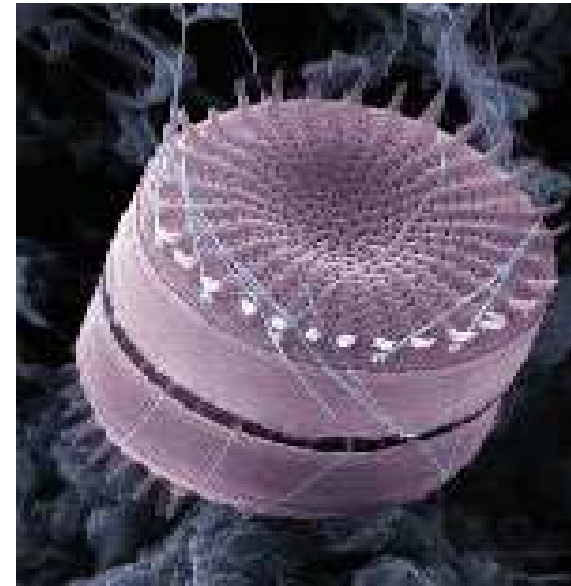
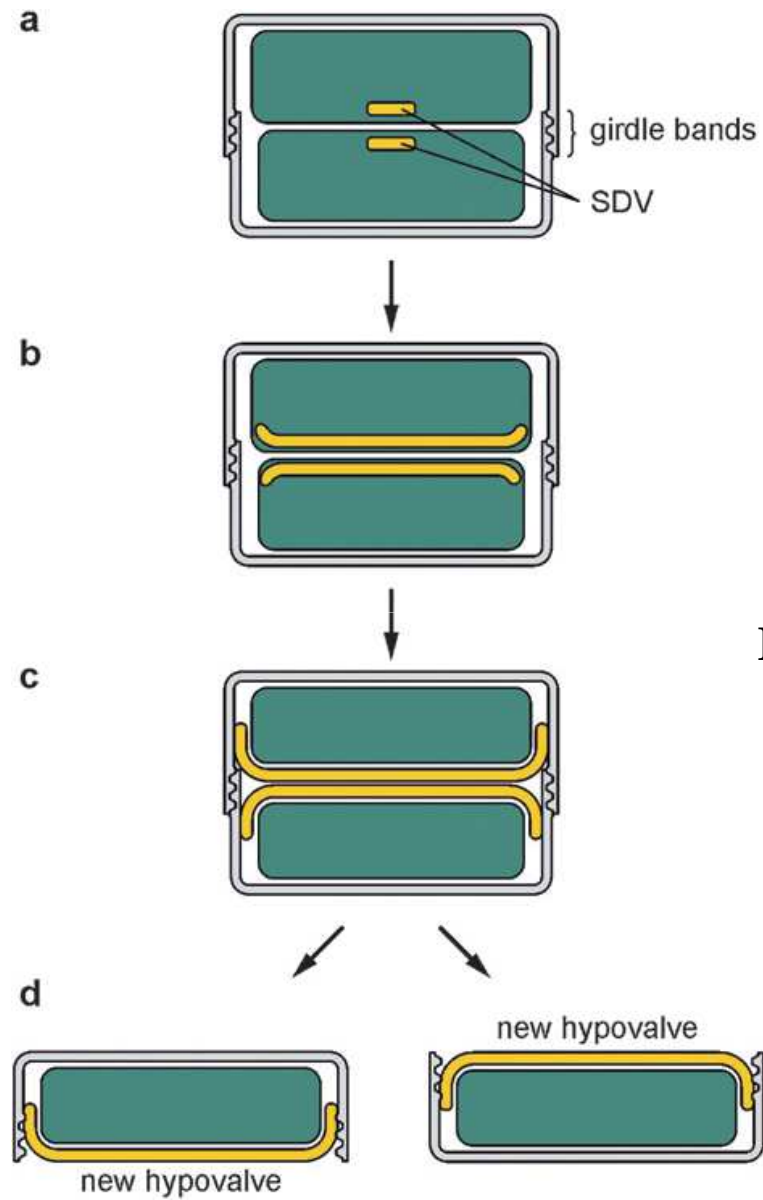


La silice est synthétisée au sein de la cellule dans des vésicules  
“**Silica Deposition Vesicles**”

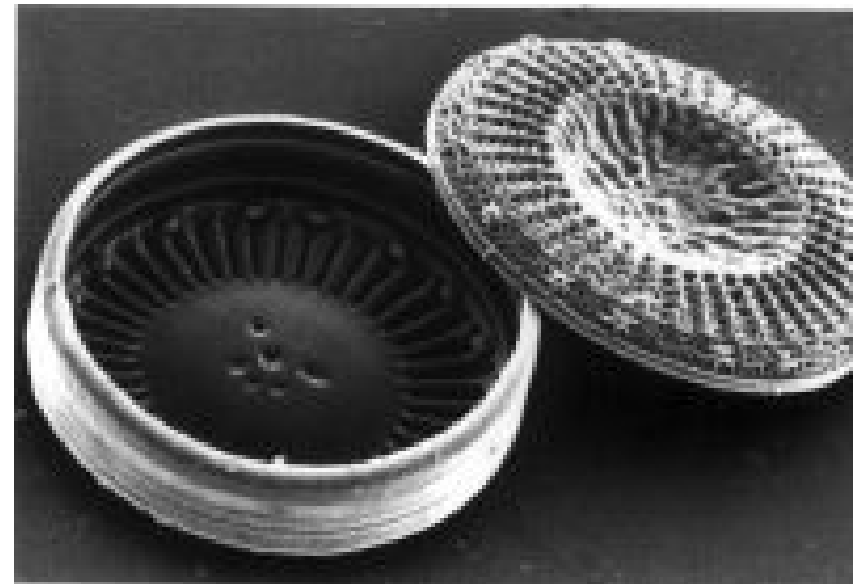


Puis déposée à l'extérieur de la membrane pour former le frutule

## Division des diatomées

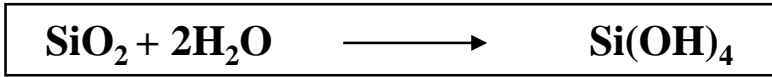


**Formation du nouveau frustule en 1 à 2 heures**

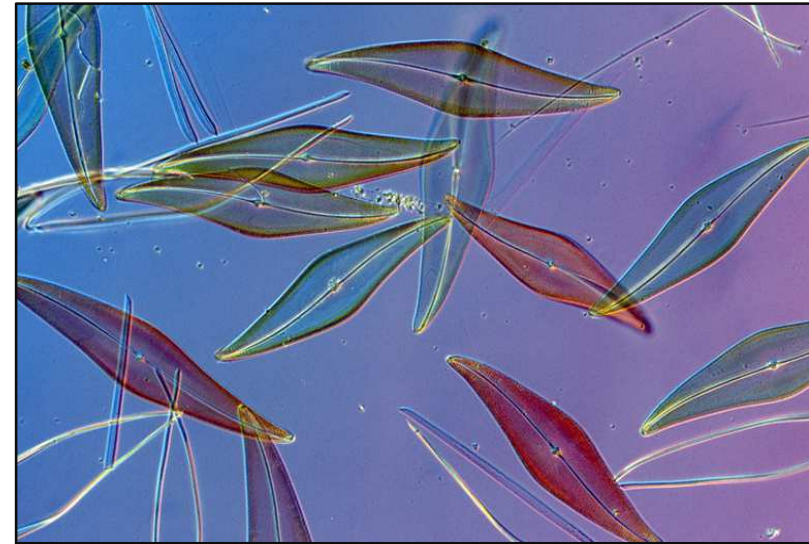
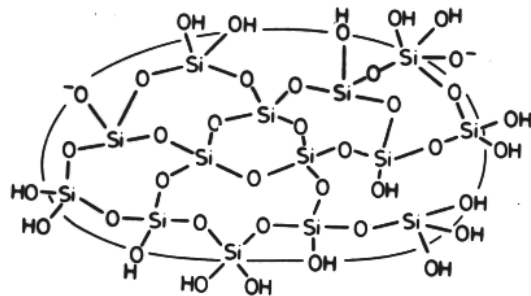
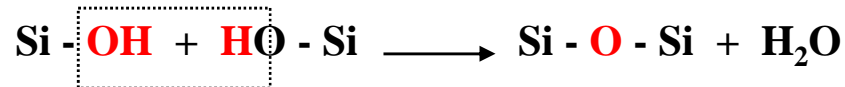


# Synthèse des verres biogéniques

⇒ Dissolution de la silice par érosion des sols

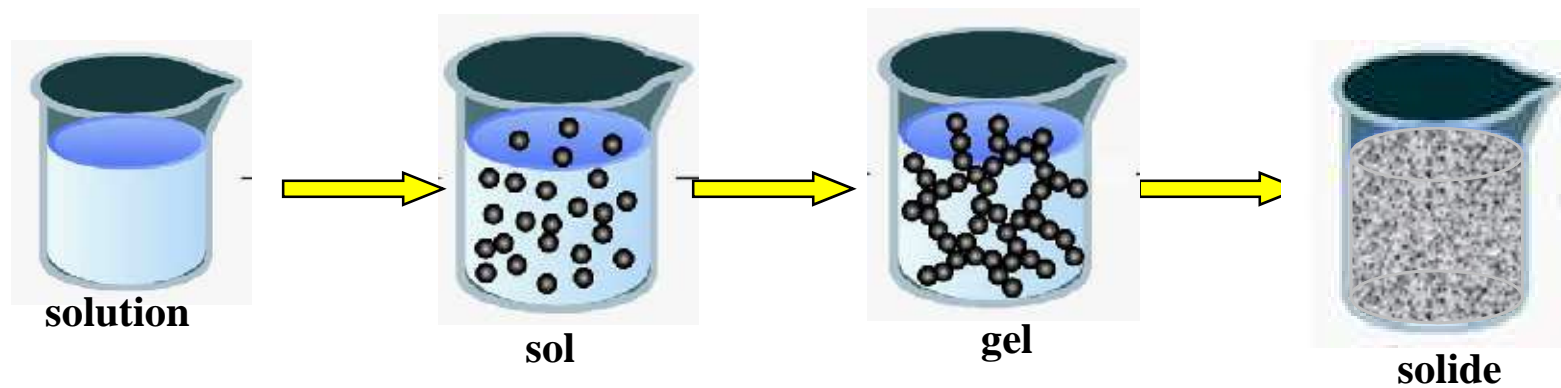
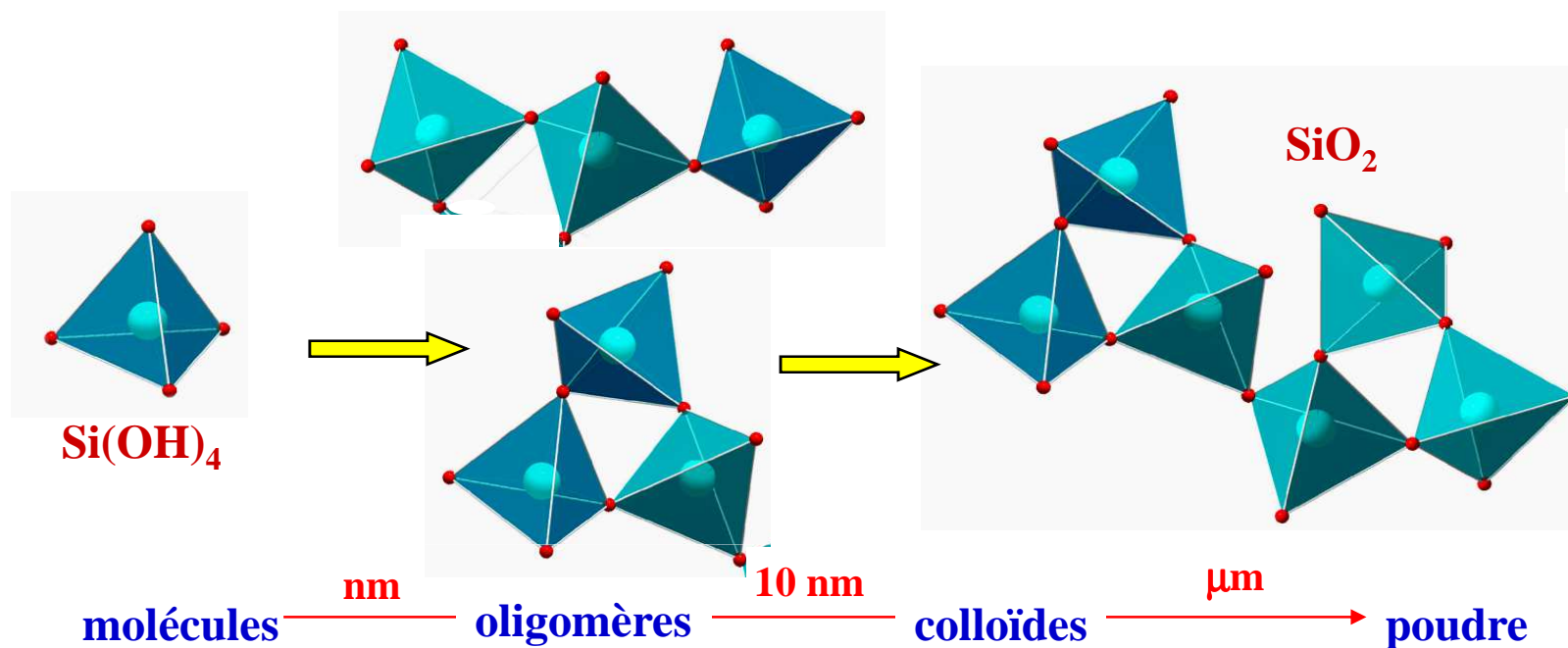


⇒ Formation de silice par condensation





## polymérisation minérale



## Le procédé 'sol-gel'

# Advances in Sol-Gel Technology

**1845** : J.J. Ebelmen, C.R. Académie des Sciences  
' sur une production artificielle de silice diaphane '

**1939** : premier brevet de Schott Glaswerke  
dépôt de films minces sur verre par 'dip-coating'

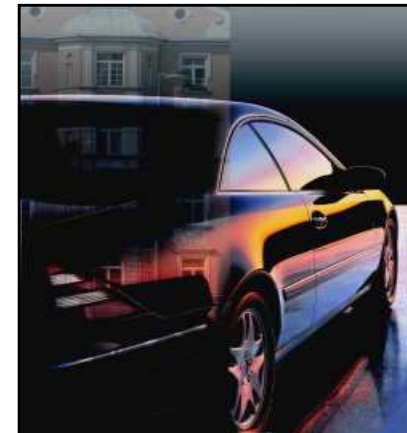
**1959** : commercialisation - revêtement sur vitrages



calorex



pyran

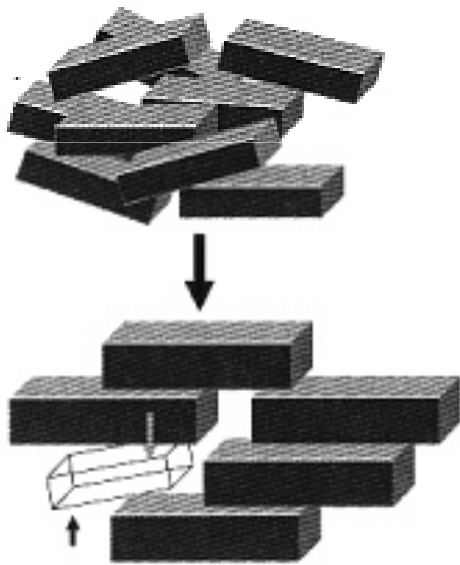


amiran

**1981** : premier congrès scientifique international

# Advances in Sol-Gel Technology

**Contrôle chimique**  
**Élaborer des matériaux sur mesure**



**Possibilité de contrôler chimiquement chaque étape du processus**  
**depuis le choix du précurseur jusqu'au produit final**



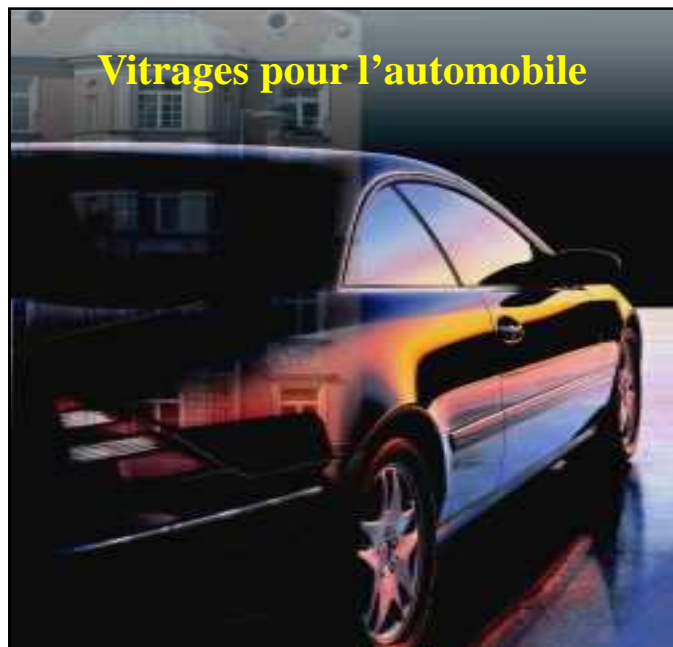
## Revêtements sol-gel sur vitrages

**Premier brevet  
Schott Glasswerke (1939)**

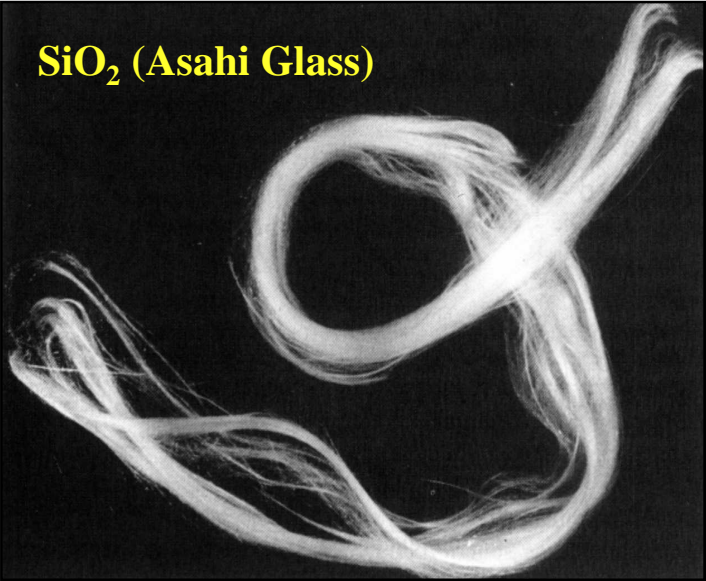
**1959 : rétroviseurs**

**1964 : anti-reflets**

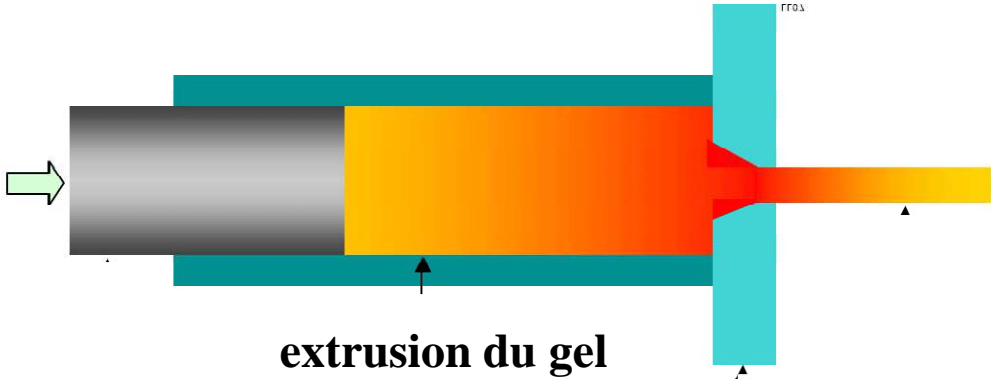
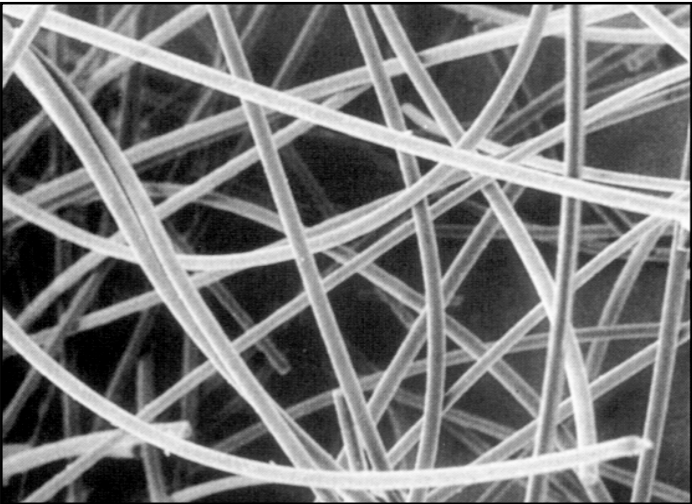
**1969 : anti-caloriques(calorex, Irox)**



# Fibres sol-gel



**Saffil : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (95-5 %)**

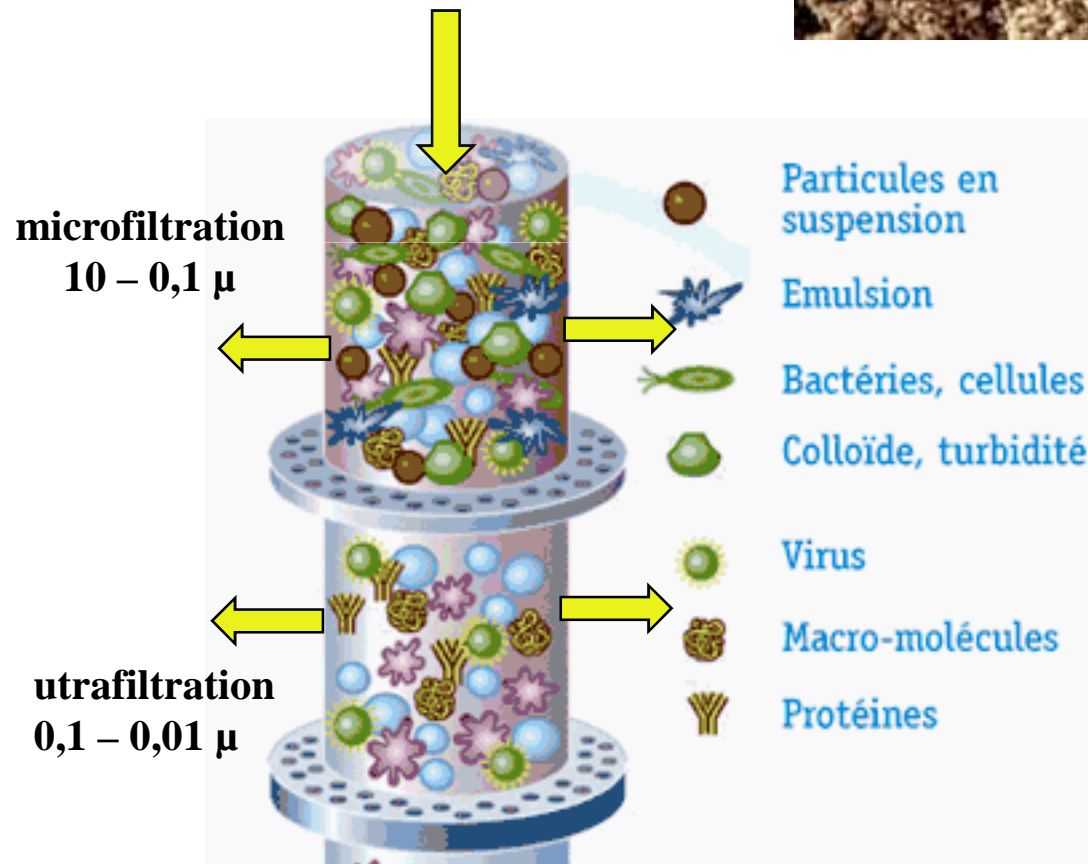
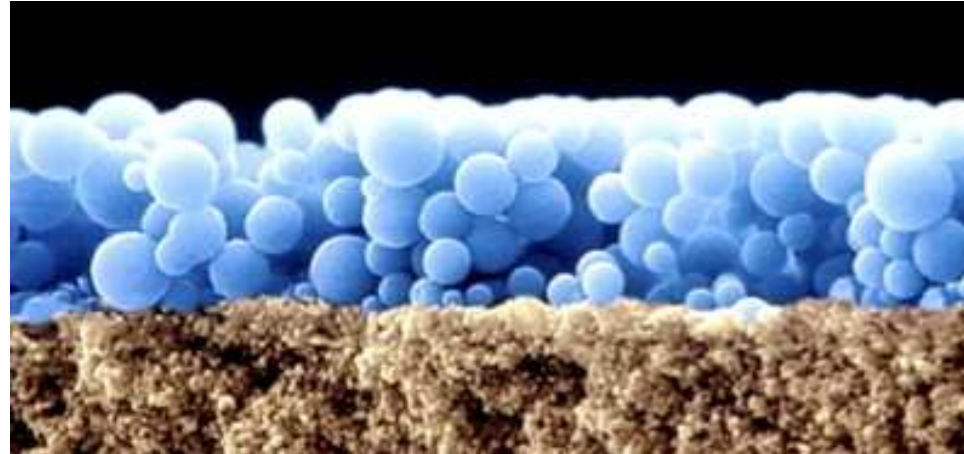


# Nano-particules

Silice 'Stöber'

diamètre < 0,1 $\mu$

membranes d'ultra-filtration





# Nanocomposites hybrides organique-inorganique

**chimie organique = chimie minérale**

**température ambiante**

**précurseurs metallo-organiques dans des solvants organiques**



*Toute une gamme de matériaux nouveaux, du verre cassant au polymère plastique*

**mise en forme par moulage - polissage**



## Optique sol-gel



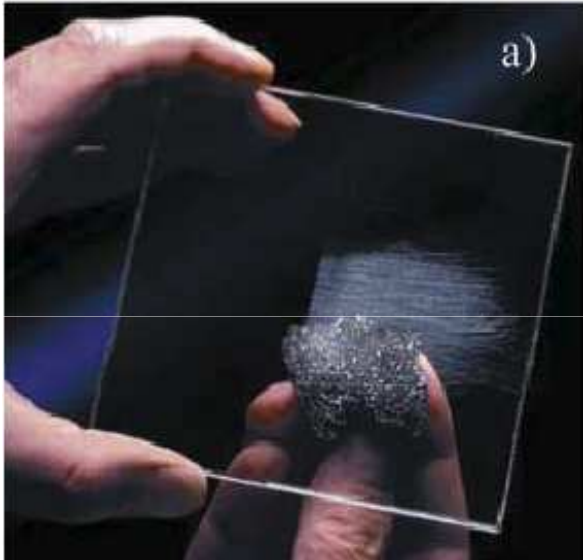
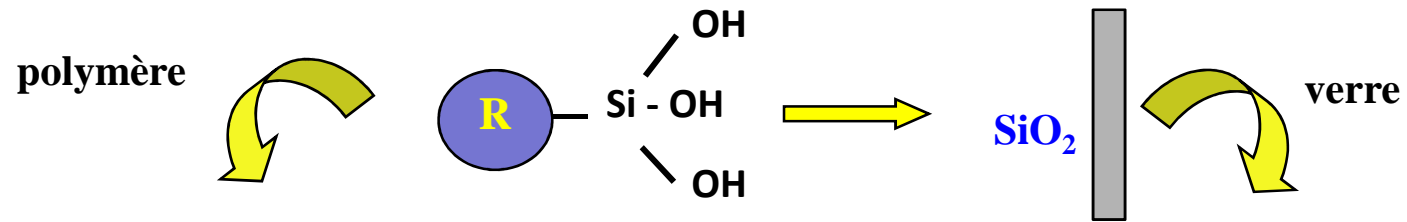
**colorant organique protégé dans une matrice minérale  
nanocomposite à l'échelle moléculaire = transparence**



## Matech

**luminescence - laser - optique non linéaire - photochromisme**

## Revêtements hybrides



anti-abrasion sur polymère



hydrophobe 'anti-pluie' sur verre





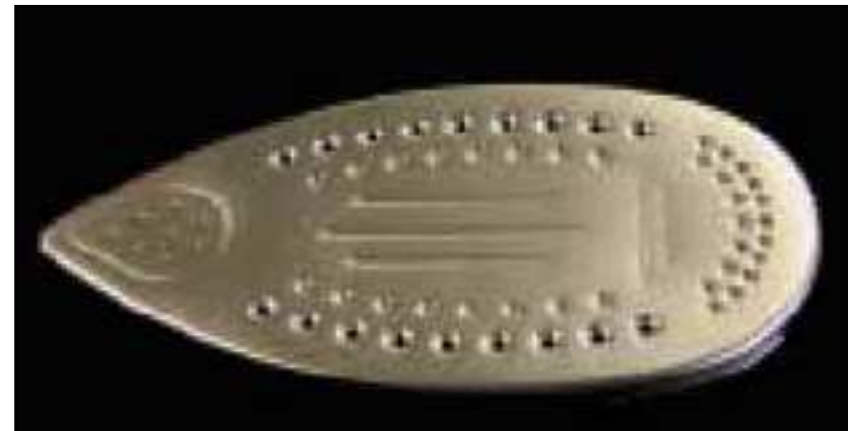
**Hybrides  
'organo-minéraux'**

**Toit du théâtre national de Pekin**

**Beijing Zhang Saina Glass Technology**

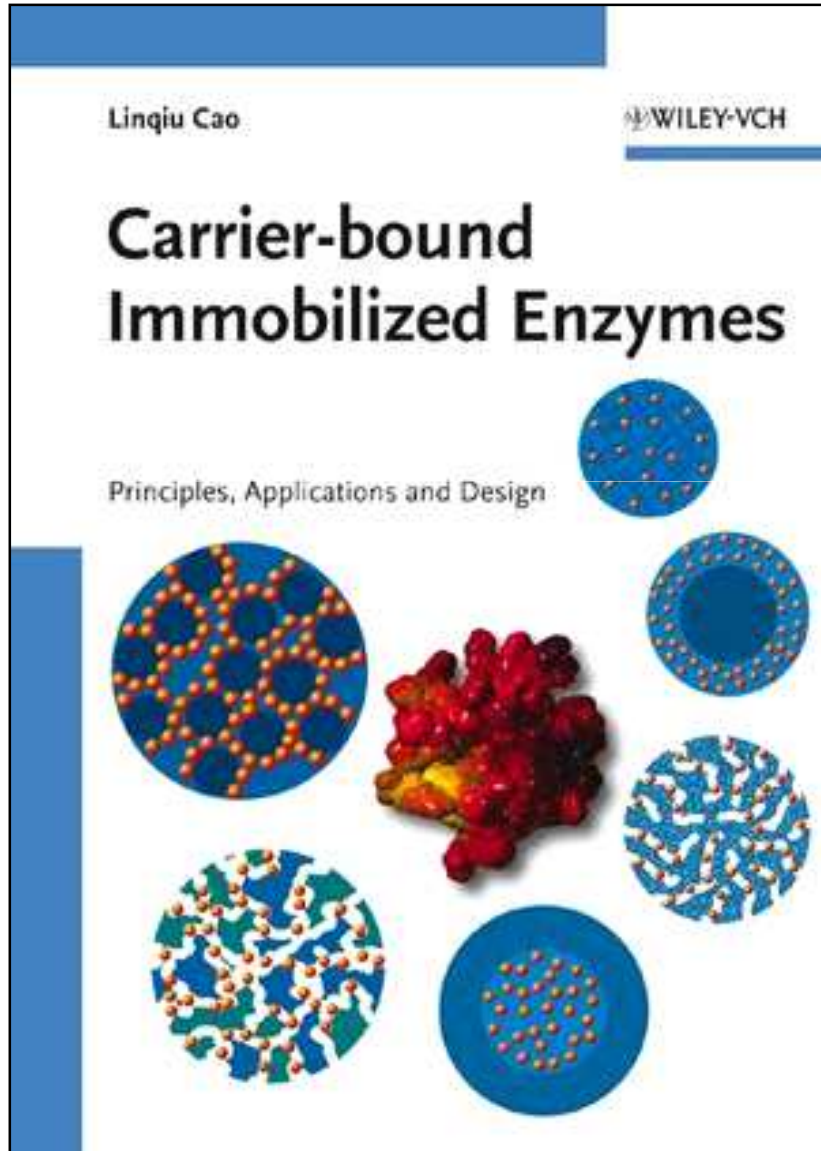


**Semelles  
de fer à repasser**

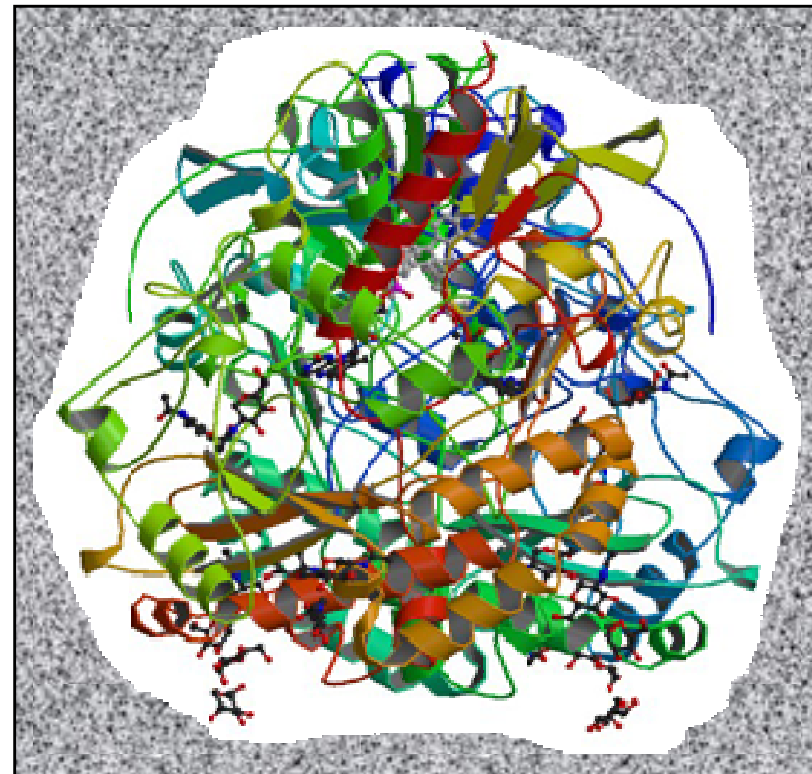


3

## Procédés 'sol-gel' et biologie



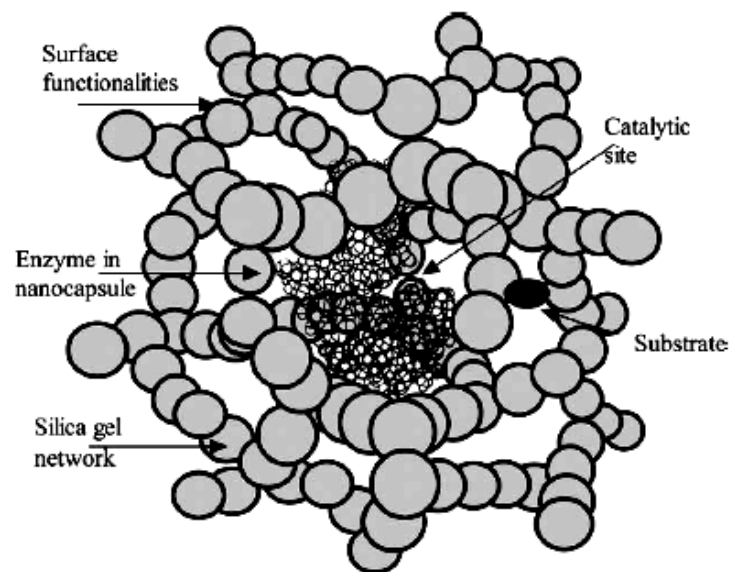
Le développement des biotechnologies  
nécessite de pouvoir immobiliser  
les espèces biologiques actives  
sur des supports solides



## Les enzymes sont protégées par l'enveloppe de silice poreuse

≠ agents extérieurs  
≠ lixiviation  
contrôle de l'environnement

L'activité peut être multipliée par 100



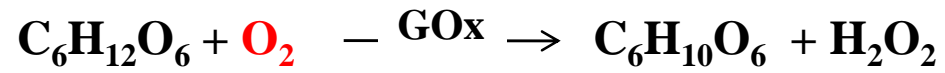
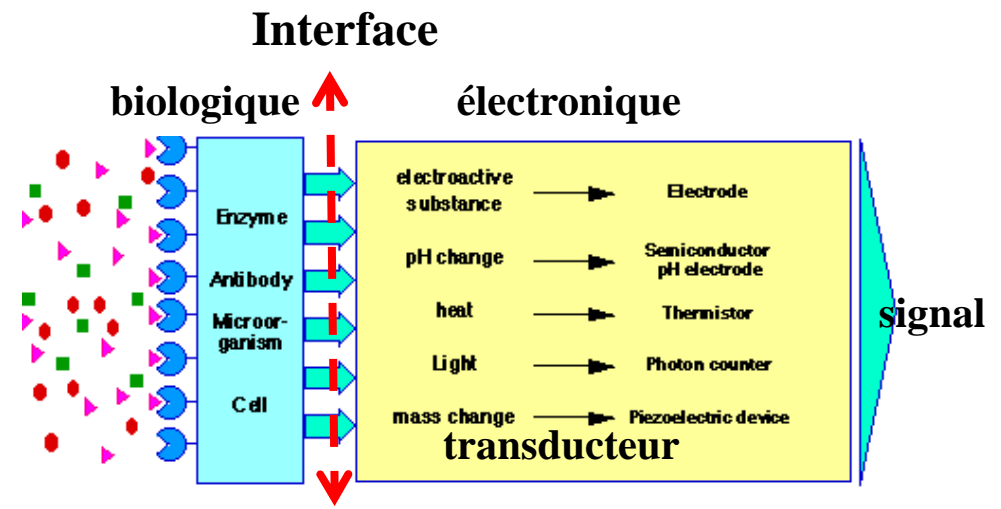
des lipases sol-gel  
sont commercialisées  
par « Fluka »

- 62275 Lipase, imm. In Sol-Gel-AK on sintered glass, Pseud. Fluor
- 62277 Lipase, imm. In Sol-Gel-AK, from candida antarctica
- 62278 Lipase, imm. In Sol-Gel-AK, from Candida cylindracea
- 62279 Lipase, imm. In Sol-Gel-AK, from Pseudo-monas cepacia
- 62281 Lipase, imm. In Sol-Gel-AK, from Asper-gillus niger
- 62282 Lipase, imm. In Sol-Gel-AK, from Mucor miehei
- 62283 Lipase, imm. In Sol-Gel-AK, from Pseudo-monas fluorescens
- 62319 Lipase, imm. On Eupergit C from Pseudo-monas fluorescens



# Biocapteurs Interface biologique – électronique

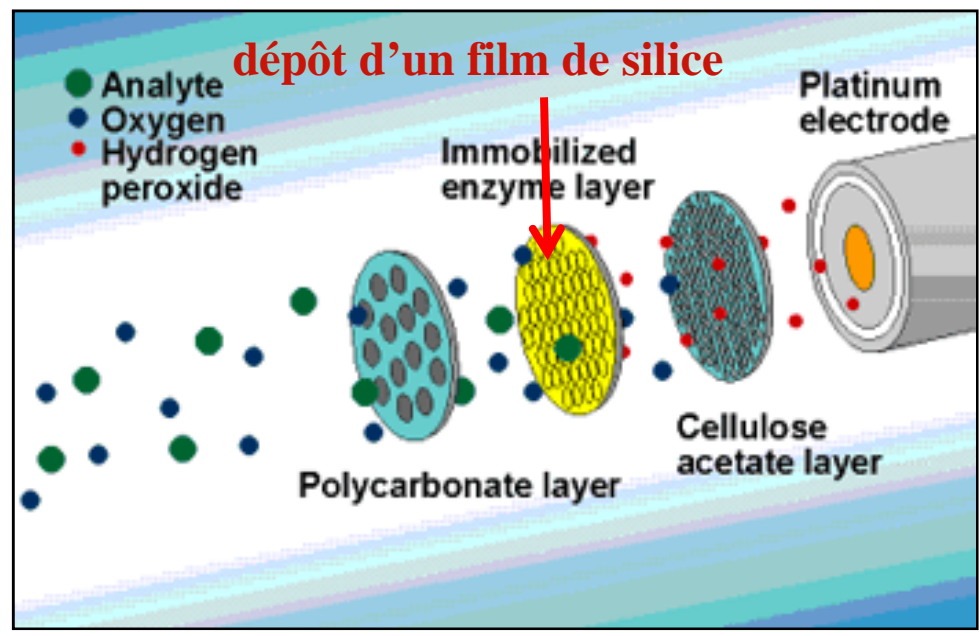
Dosage du glucose



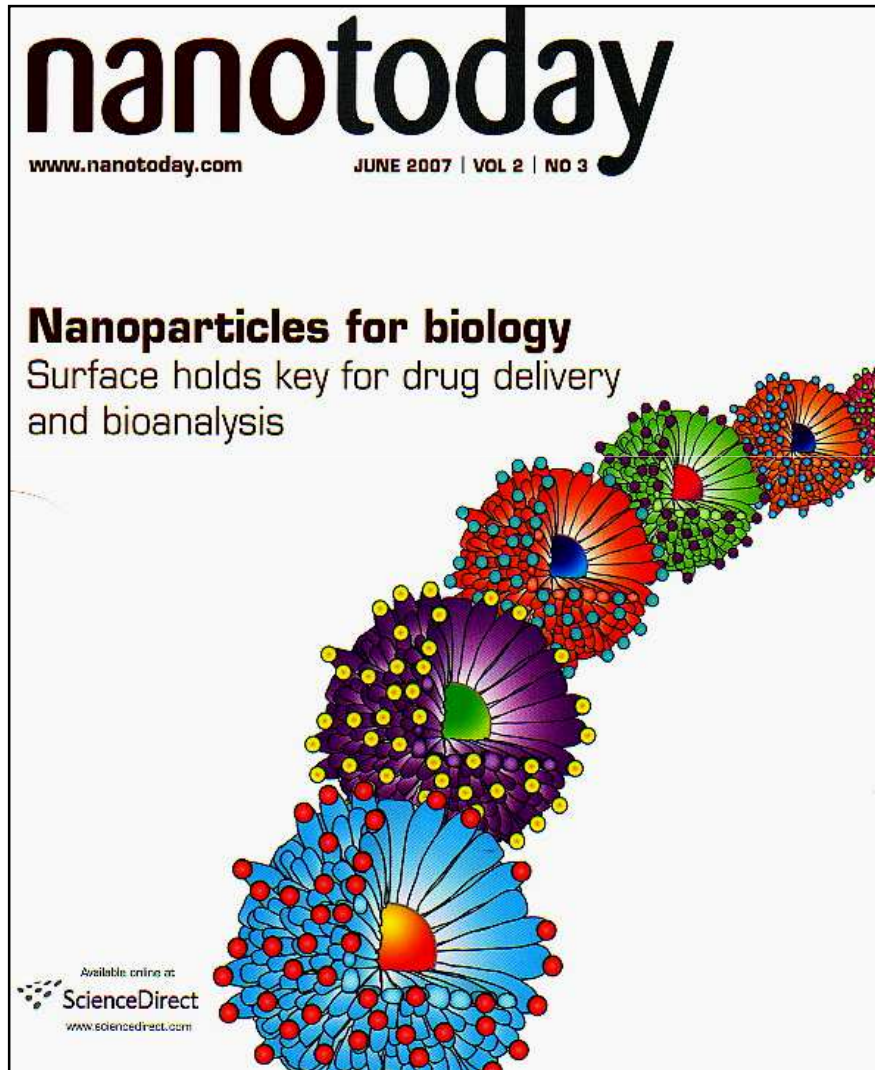
glucose oxydase

Dosage ampérométrique de O<sub>2</sub>

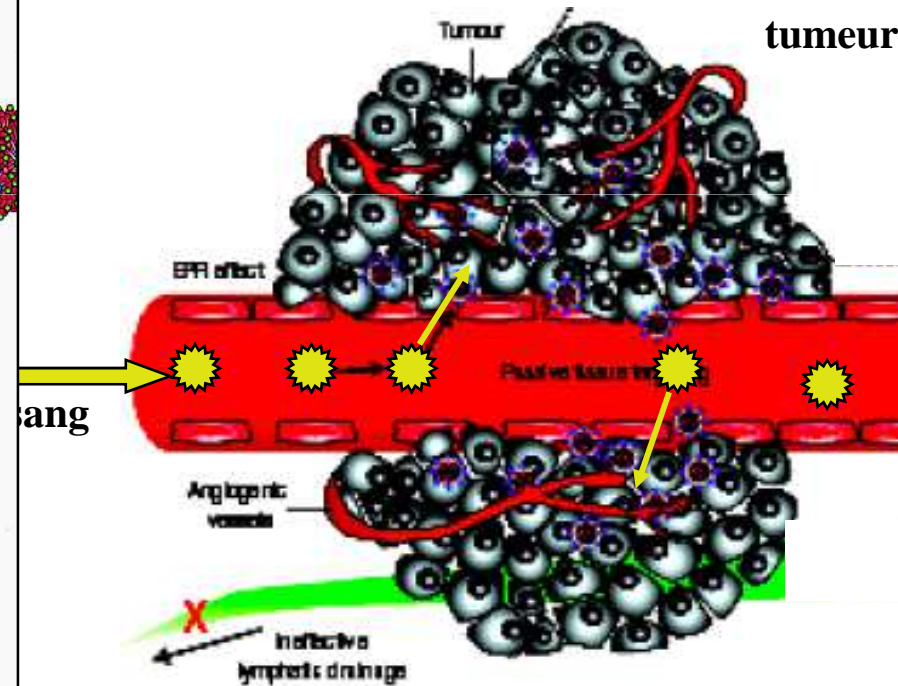
électrode de Clark



# La nano-médecine



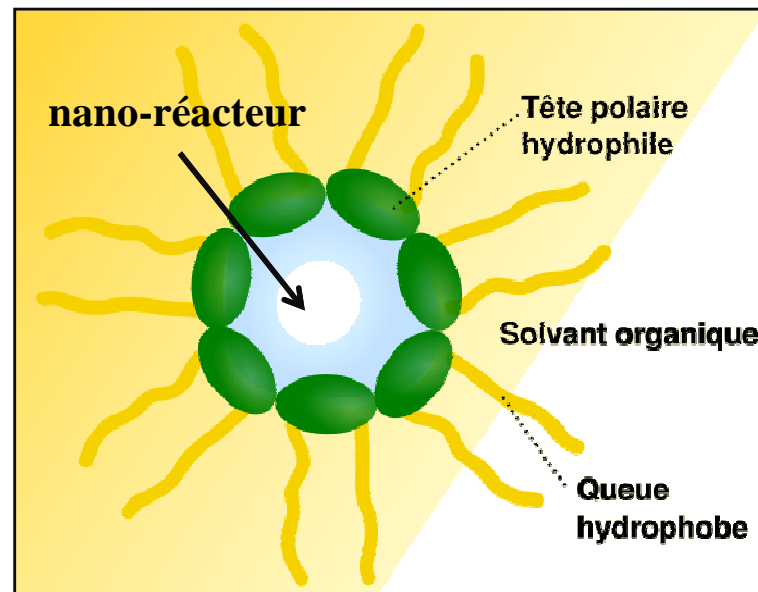
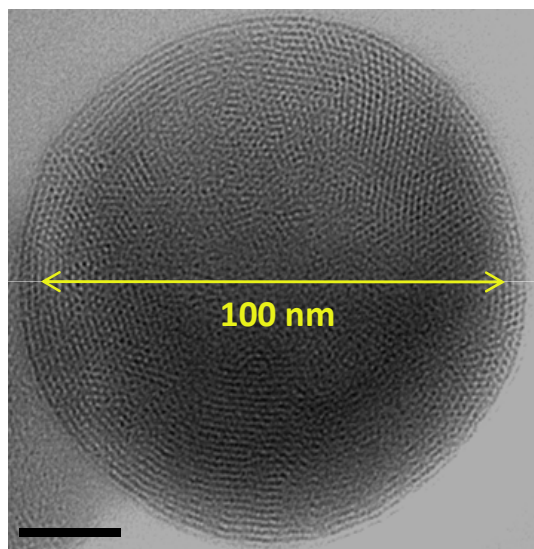
Utilisation de nanoparticules  
comme vecteur pour transporter  
les principes actifs au sein des cellules



les nanoparticules peuvent traverser  
les membranes cellulaires

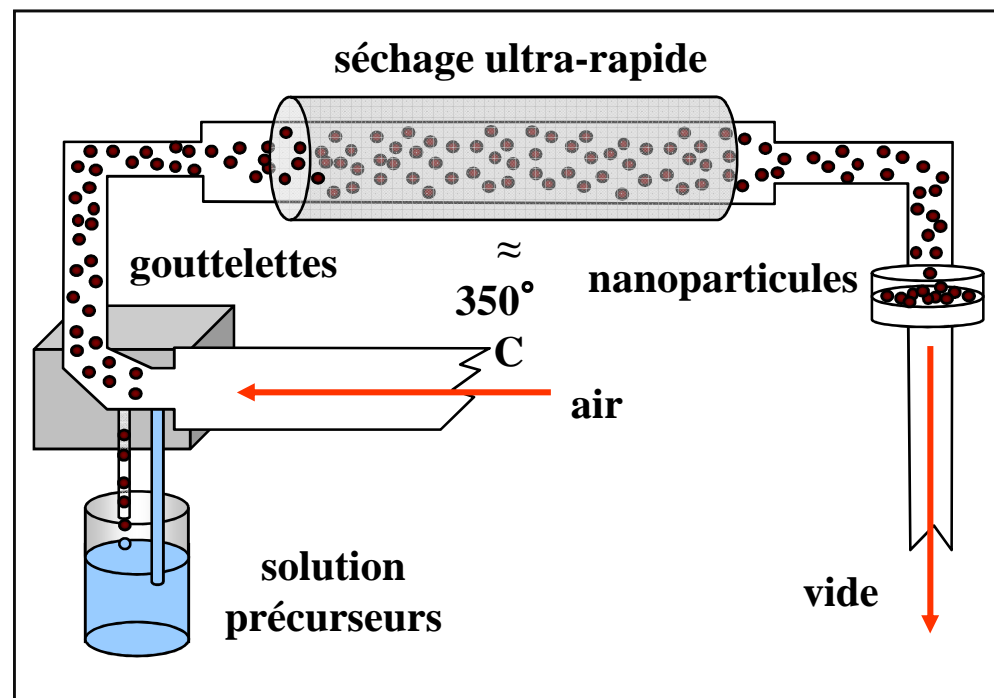
# Elaboration de nano-particules

## Voie 'micro-émulsions'



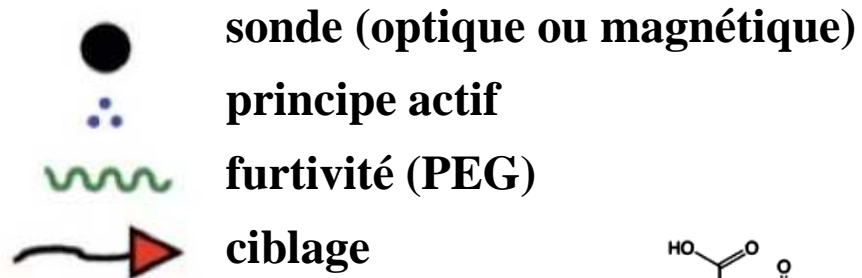
## Voie 'aérosol'

D. Grosso *et al.*  
Adv. Funct. Mater. 2003,  
Chem. Commun. 2003, 22, 2798.

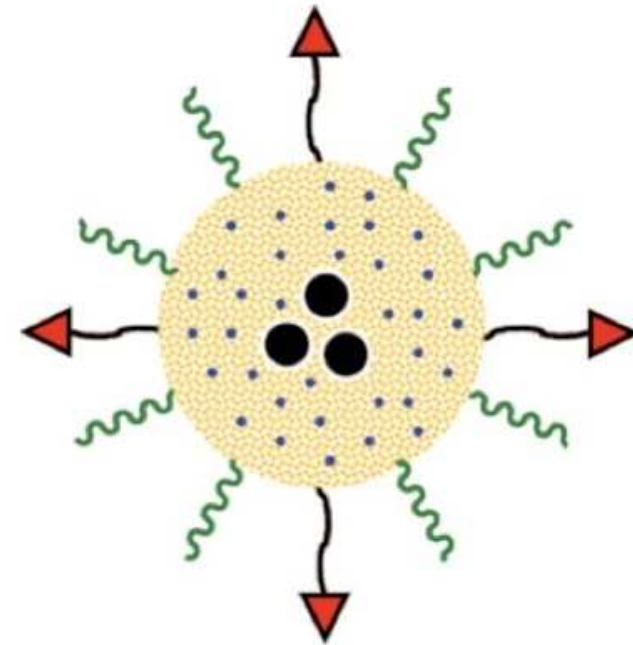
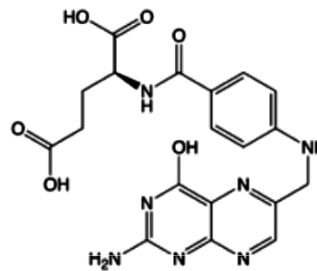




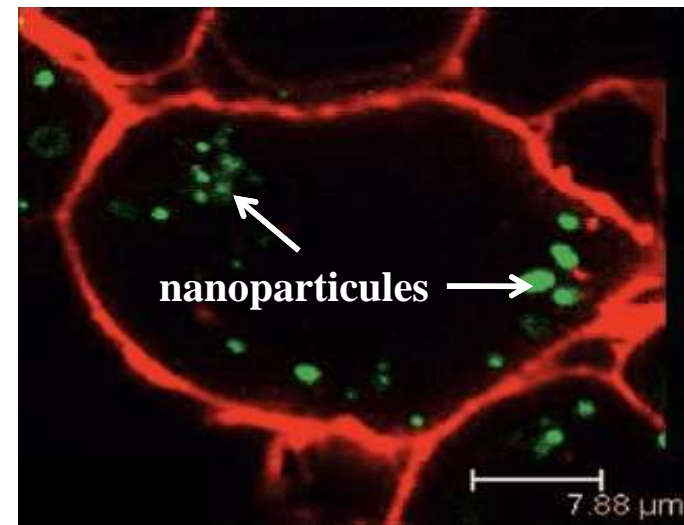
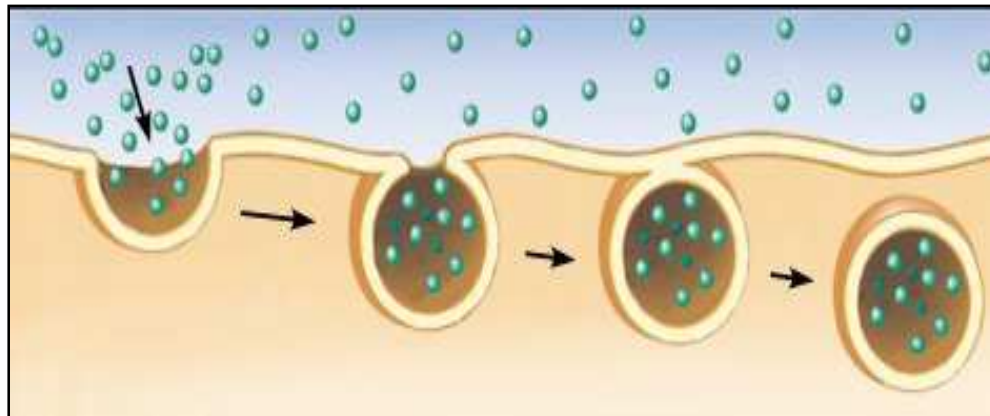
## Vectorisation : nanoparticules



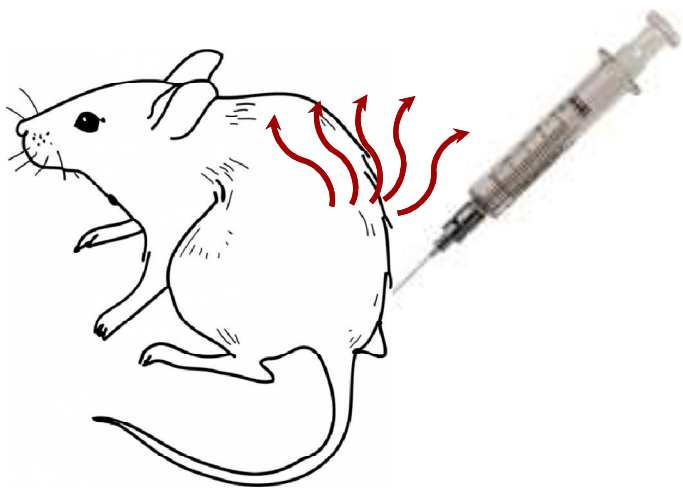
acide folique pour reconnaître  
les tumeurs cancéreuses



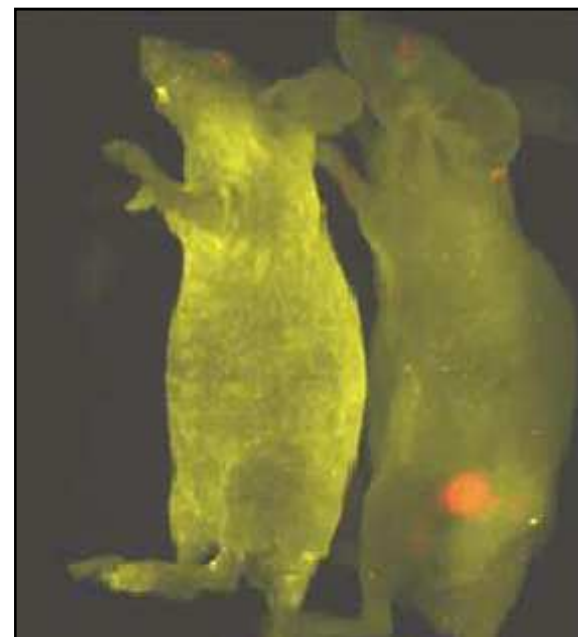
Les nanoparticules traversent les membranes cellulaires par endocytose



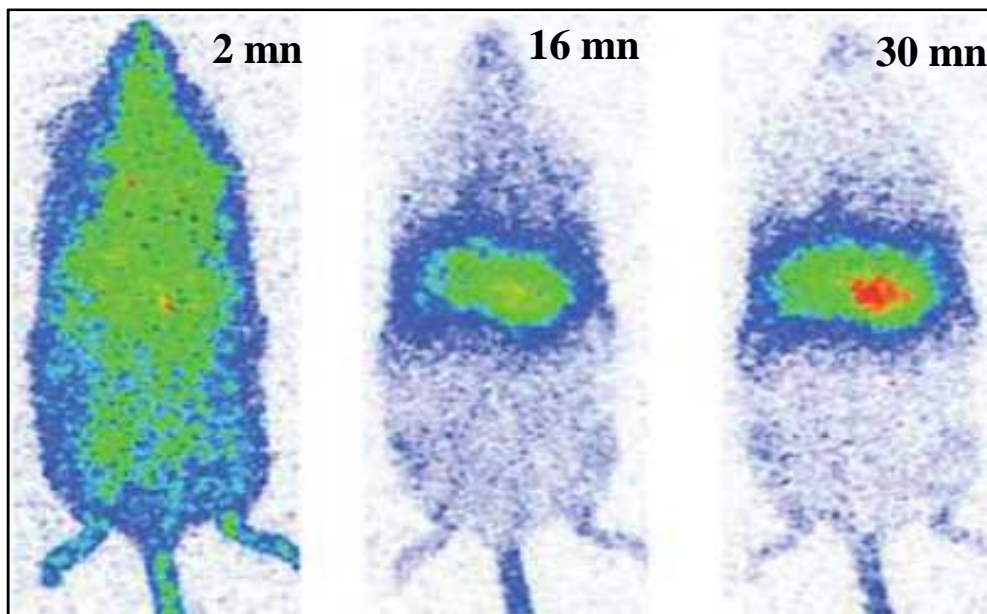
## imagerie médicale



**Injection de nanoparticules luminescentes**



**Visualisation d'une tumeur de la prostate**



**Luminescence persistante**

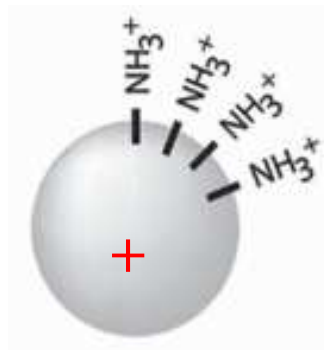
**suivi des nanoparticules  
à travers l'organisme**

**localisation dans les poumons**

*Proc. Natl. Acad. Sci. USA*  
**104 (2007) 9266-9271**

# Ciblage

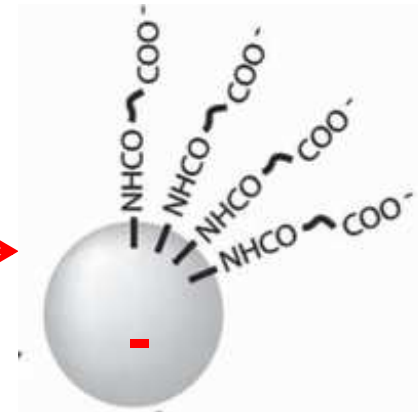
greffage de molécules cibles  
par modification chimique de la surface



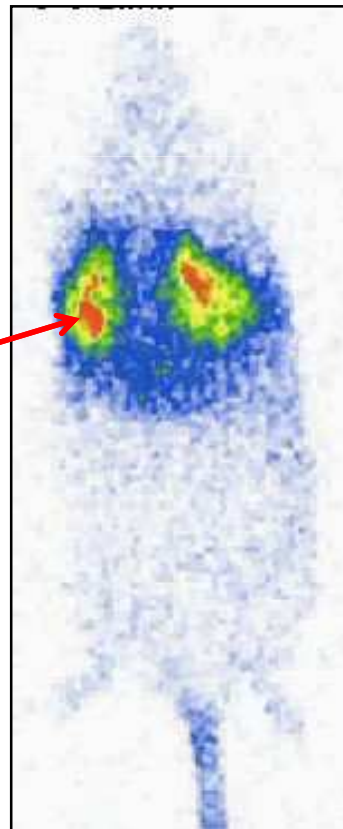
3-aminopropyl  
triethoxysilane



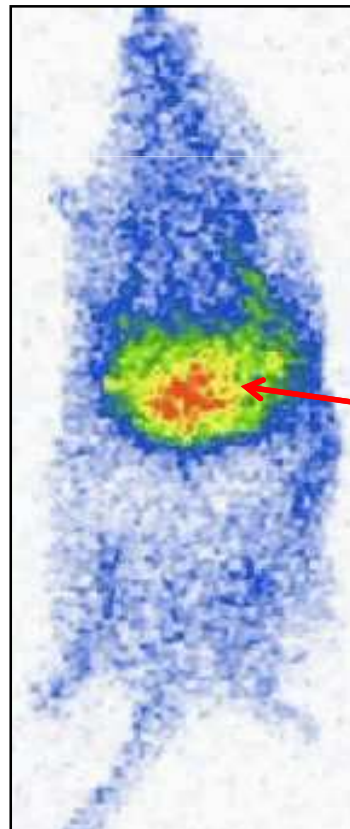
anhydride  
diglycolique



poumons

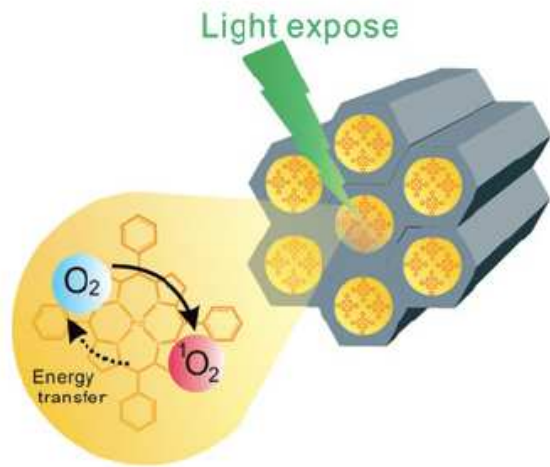


foie





## Photo Thérapie Dynamique



**Injection d'un photo-sensibilisateur  
au sein de tumeurs cancéreuses  
activation par laser  
formation de radicaux libres toxiques ( $^1O_2$ )  
qui détruisent les cellules cancéreuses**

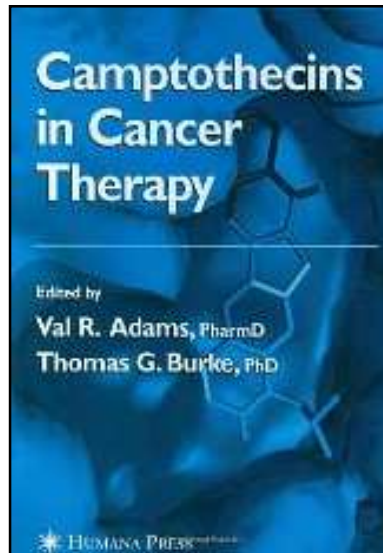


## Hyperthermie

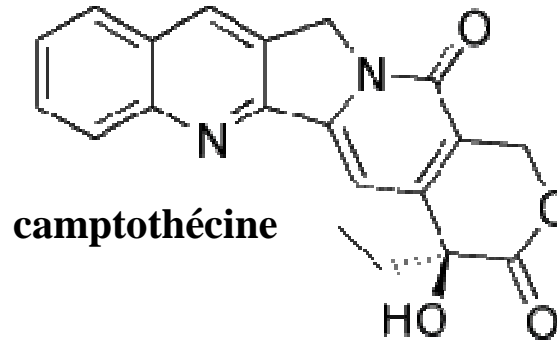
**Nanoparticules magnétiques  
destruction de la tumeur par échauffement local  
sous l'action d'un champ magnétique**

## Libérer un principe actif au sein d'une cellule

45



traitement du cancer

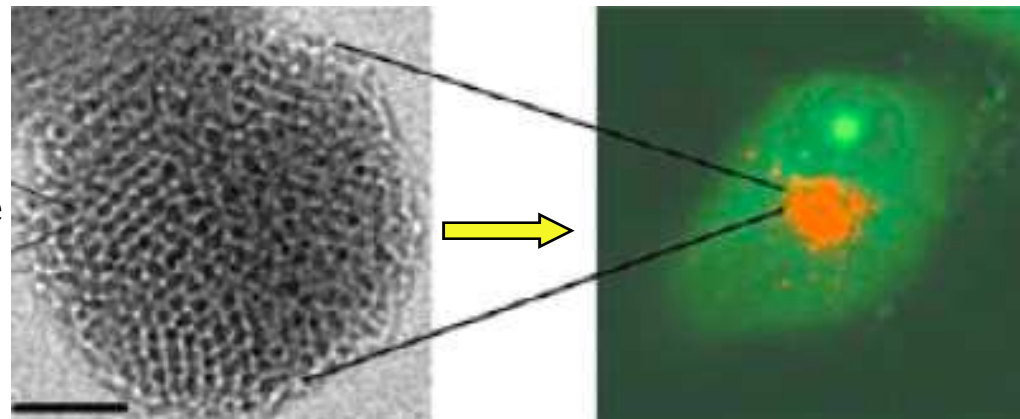


molécule issue d'un arbre chinois



Chimiothérapie par injection veineuse { non soluble dans l'eau (transport)  
molécule très toxique (ciblage)

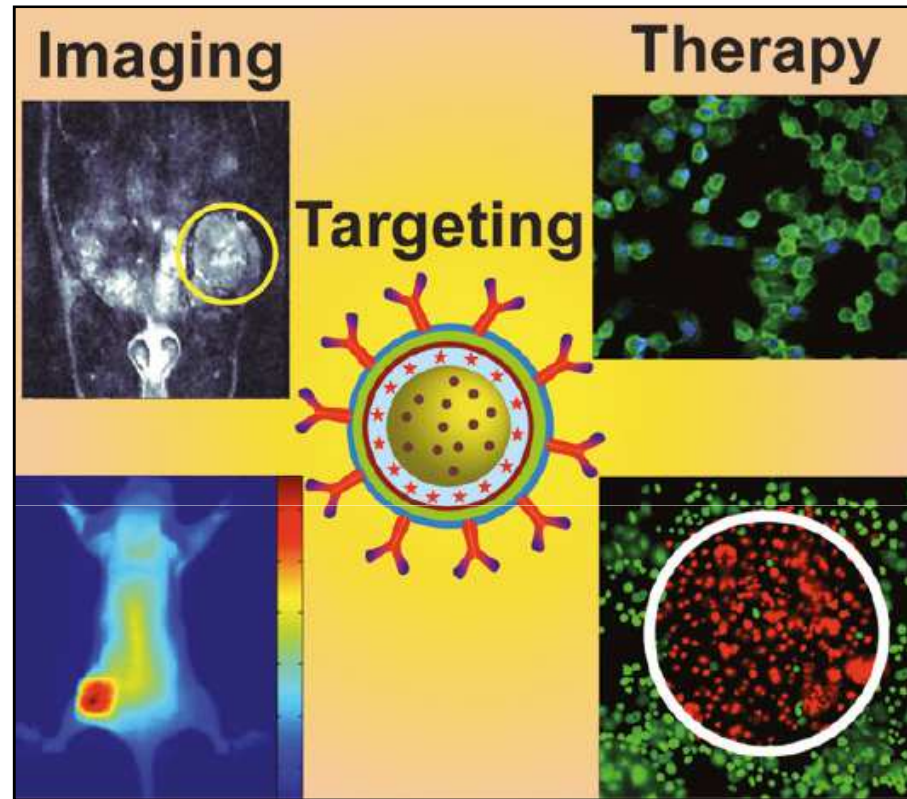
silice mésoporeuse  
+ principe actif



relargage dans la  
cellule cancéreuse

# La théranostique

*alliance du diagnostique et de la thérapeutique*





# UNE MOLÉCULE ANTI-CANCER TÉLÉGUIDÉE

Les Français de Nanobiotix mettent au point un traitement qui cible et détruit sur commande les cellules cancéreuses.

Un médicament anticancéreux, c'est ce que cherche à mettre au point Nanobiotix, une jeune société technologique. La technologie qu'elle développe se situe à la croisée des biotechnologies et des nanotechnologies. Le PDG de la société, Laurent Levy, qui est également l'un des azé fondateurs, lui donne le nom de « nanobiotixique ». Elle repose sur l'utilisation de particules baptisées « nanobiotix », formées par l'association de deux agents : le pre-

mier sert à cibler un récepteur, une cellule cancéreuse par exemple ; le second sert à exercer une action, comme sa destruction.

La première nanobiotix a été élaborée grâce à des recherches menées à l'université de l'Etat de New York, à Buffalo, qui est aussi l'un des actionnaires de la société. Elle est destinée à soigner le cancer du sein. Elle se compose d'un anticorps d'un diamètre dix mille fois plus petit que celui d'un cheveu. A sa surface sont accrochés des molécules de LHRH, une hormone

stimulant l'activité ovarienne, dont les récepteurs sont surexprimés à la surface des tumeurs. Une fois la nanobiotix injectée dans l'organisme, il lui faut de vingt-quatre à quarante-huit heures pour s'accumuler dans les cellules cancéreuses. Sous l'action d'un champ magnétique, appliqué au moyen d'un appareil d'IRM (imagerie par résonance magnétique), les nanobiotix s'orientent et se concentrent, ce qui provoque la destruction des cellules auxquelles ils sont fixés. Au bout de soixante-douze heures, les par-

ticules sont éliminées par les voies naturelles. La méthode est moins destructive que l'injection d'un agent toxique dans le cadre d'une chimiothérapie. Elle présente d'autres avantages : « C'est un médicament sélectif, avec une fonction on/off actionnable à distance, offrant un contrôle thérapeutique complet », explique le patron de 32 ans, physicochimiste de formation, précisant qu'une période d'activation variant de zéro à trois minutes permet de détruire de 0 à 100 % des cellules cibles. L'application de l'IRM permet outre être localisée sur une partie du corps.

Deux autres familles de nanobiotix sont développées par Nanobiotix. Elles sont activées par rayons X ou par rayon laser, et provoquent la destruction de la cellule par la libération de molécules toxiques : ces molécules instables vont se recombiner avec les cellules cibles et provoquer leur destruction. Cette technologie pourrait être efficace pour les cancers des ovaires et de la prostate, voire d'autres pathologies. Nanobiotix compte déjà une quarantaine de produits en préparation et cherche à réaliser une levée de fonds de 7 à 8 millions d'euros pour passer à la phase d'essais cliniques d'ici à 2005.



En gros plan, une tumeur cancéreuse. A proximité, un nanobiotix se fixe à un récepteur et attaque une cellule malade.

## Nano-particules de silice pour le traitement du cancer

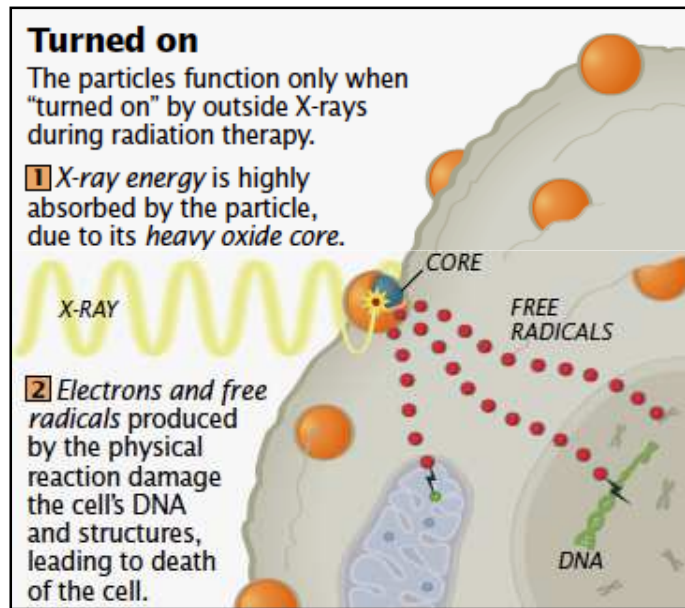


### Turned on

The particles function only when "turned on" by outside X-rays during radiation therapy.

1 X-ray energy is highly absorbed by the particle, due to its heavy oxide core.

2 Electrons and free radicals produced by the physical reaction damage the cell's DNA and structures, leading to death of the cell.

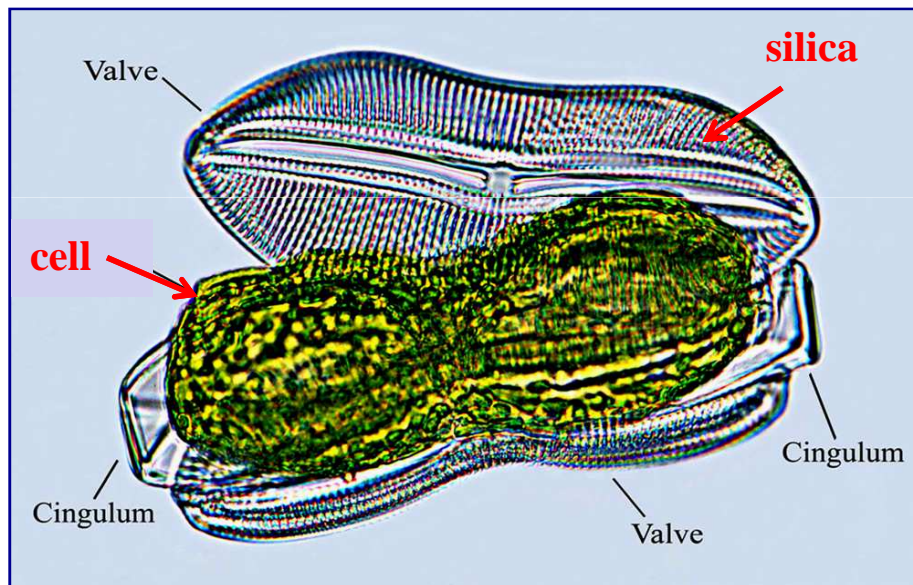


Essais précliniques actuellement en cours à l'hôpital Gustave Roussy

### III

## La vie dans une cage de verre !

Peut on conserver vivants des micro-organismes dans une matrice de silice





## Des matériaux vivants !

première publication en 1989

G. Carturan *et al.*

J. Mol. Catal. 57 (1989) L13

Levures

*Saccharomyces cerevisiae*

viabilité des cellules encapsulées

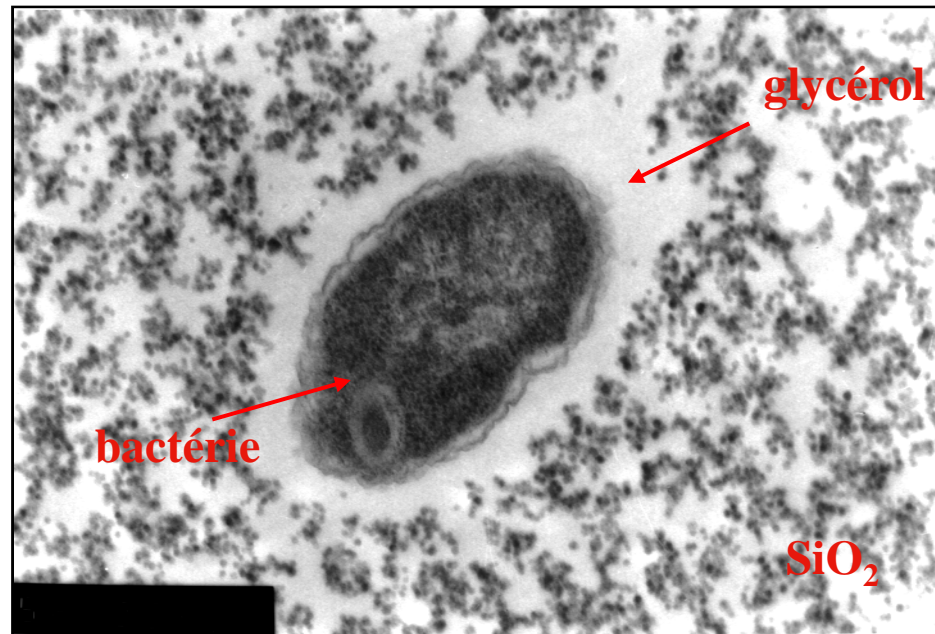
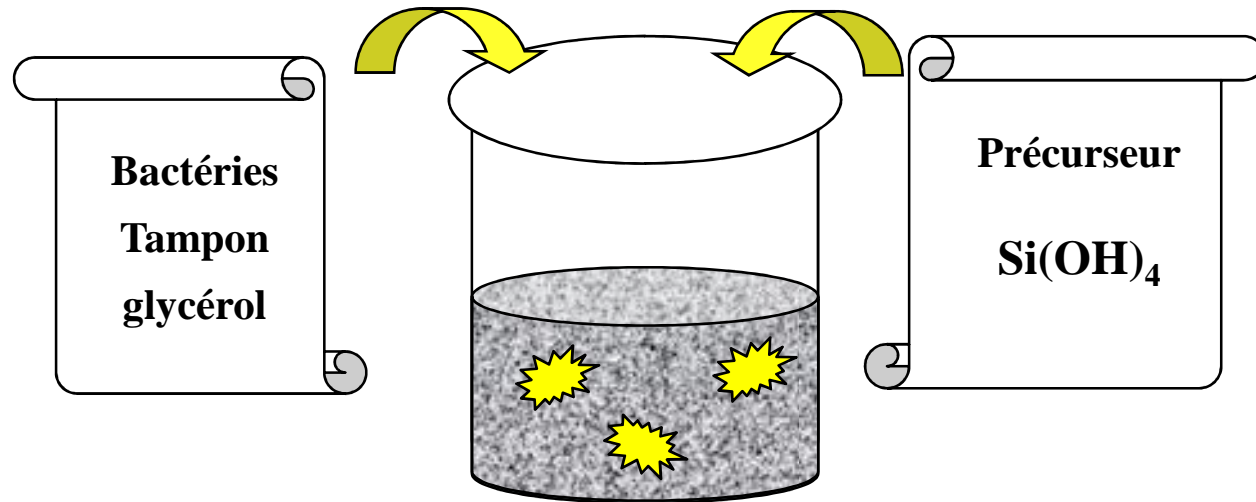
?

CELL	HOST	APPLICATION
<b>Bacteria</b> <i>Bacillus sphaericus</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Methylmonas</i> sp <i>Pseudomonas</i> <i>Rhodococcus rhodochrous</i> <i>Serratia marcescens</i>	<b>Silica</b> gels thin films thick films microcapsules	<b>Bioreactors</b> Alkaloid production Fumaric-malic acid conversion Lactate-acetate conversion Prodigiosin production Propylene epoxidation Protein production Asthaxanthin production
<b>Protists</b> <i>Cylindrotheca fusiformis</i> <i>Haematococcus pluvialis</i> <i>Leishmania donovani infantum</i> <i>Nostoc calcicola</i> <i>Synechococcus</i>	<b>SiO<sub>2</sub>-</b> alginate beads collagen layers glass fibers Alumina powder lipid micelles	<b>Bioremediation</b> Atrazine degradation Phenol degradation Glycols degradation Heavy metal bioaccumulation
<b>Fungi, Yeasts</b> <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<b>Alumina gels</b>	<b>Biosensors</b> Leshmania diagnosis Pesticide detection
<b>Vegetal cells</b> <i>Ajuga reptans</i> <i>Catharantus roseus</i> <i>Coronilla vaginalis</i>		<b>Medical devices</b> Bio-artificial pancreas Bio-artificial liver
<b>Animal cells</b> Fibroblasts Hepatocytes HepG2 Islets of Langerhans Jurkat cells		

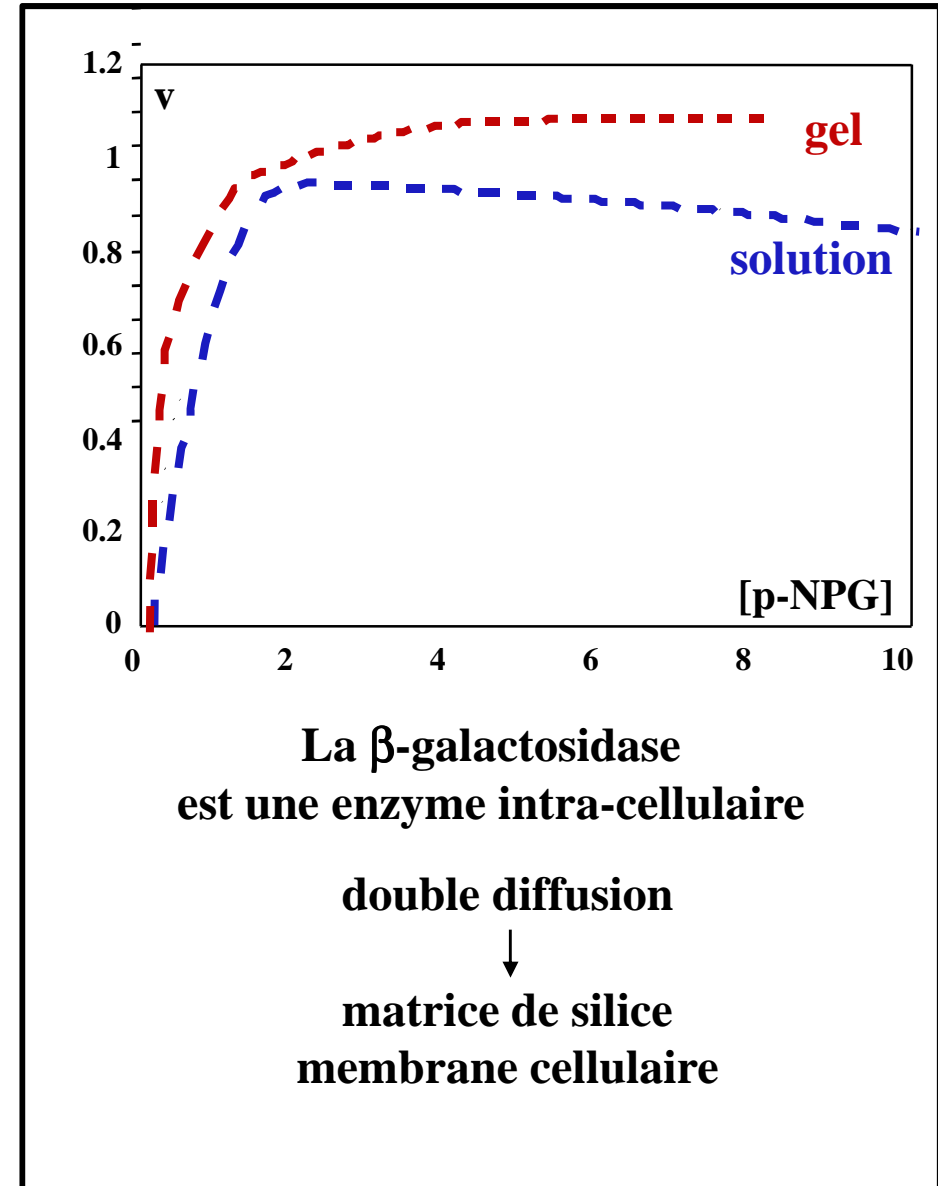
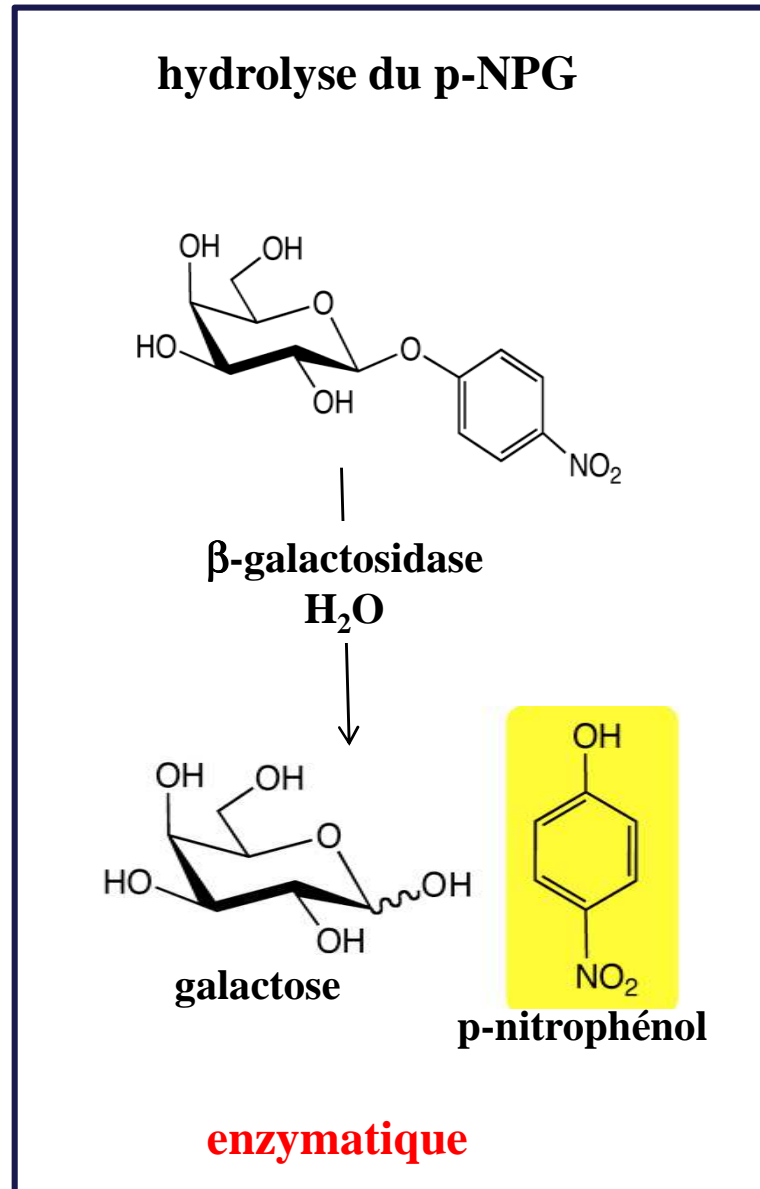


## Encapsulation de bactéries dans un gel de silice

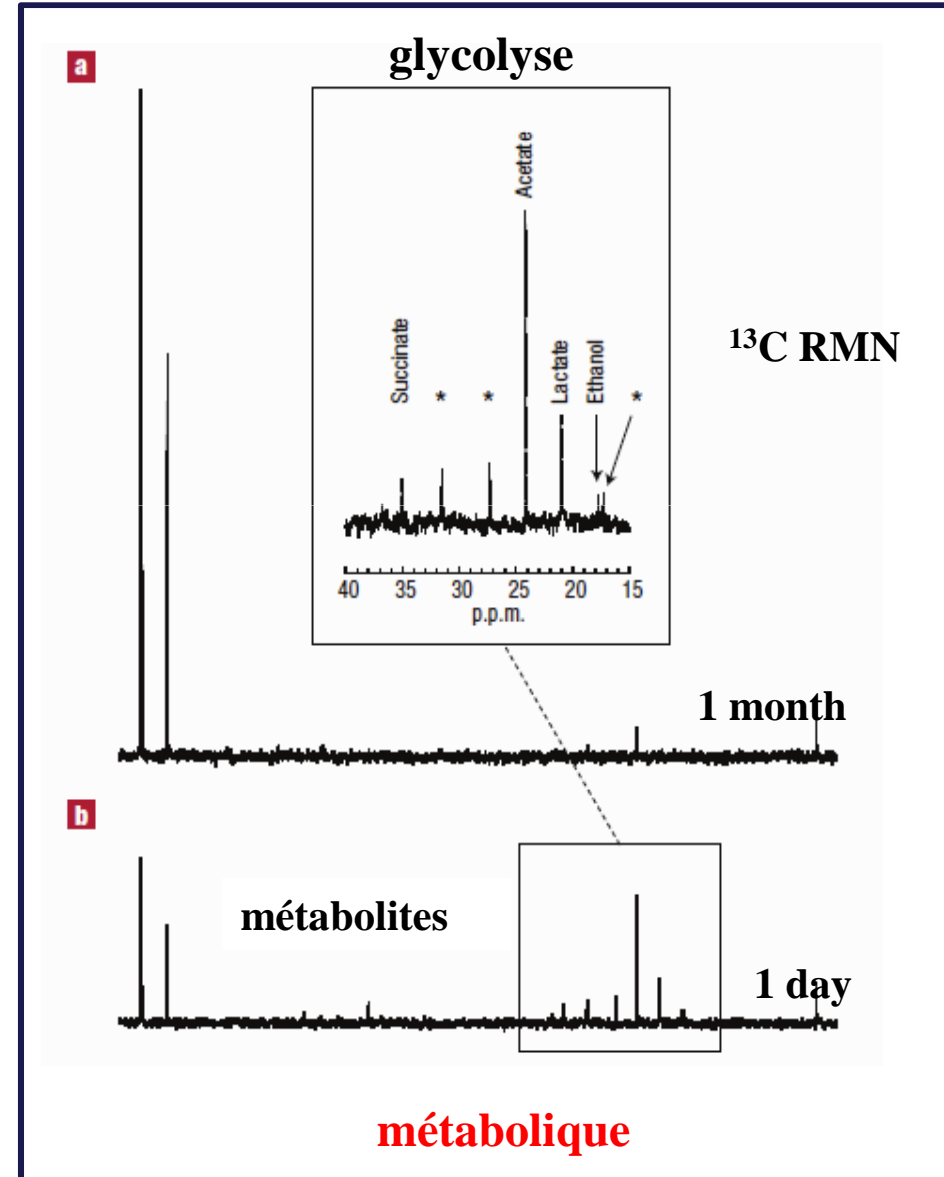
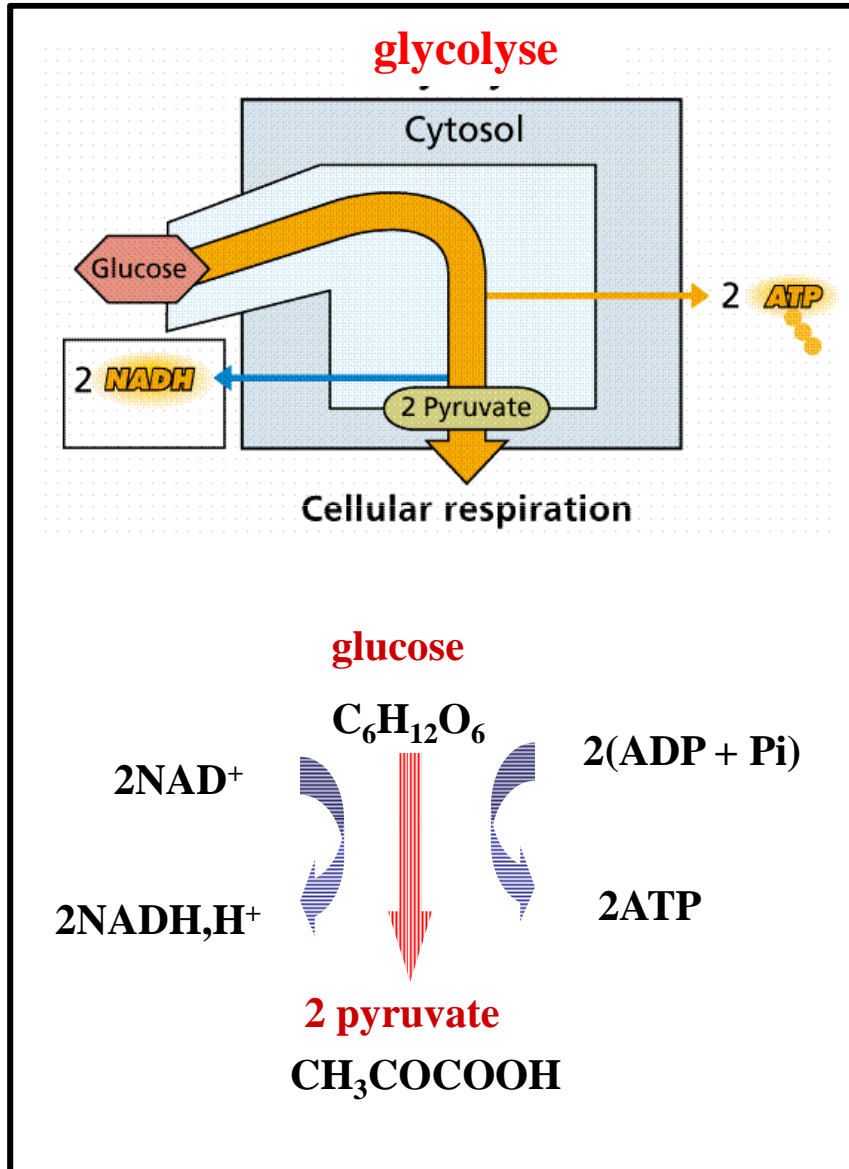
50



## Les bactéries encapsulées conservent leur activité enzymatique

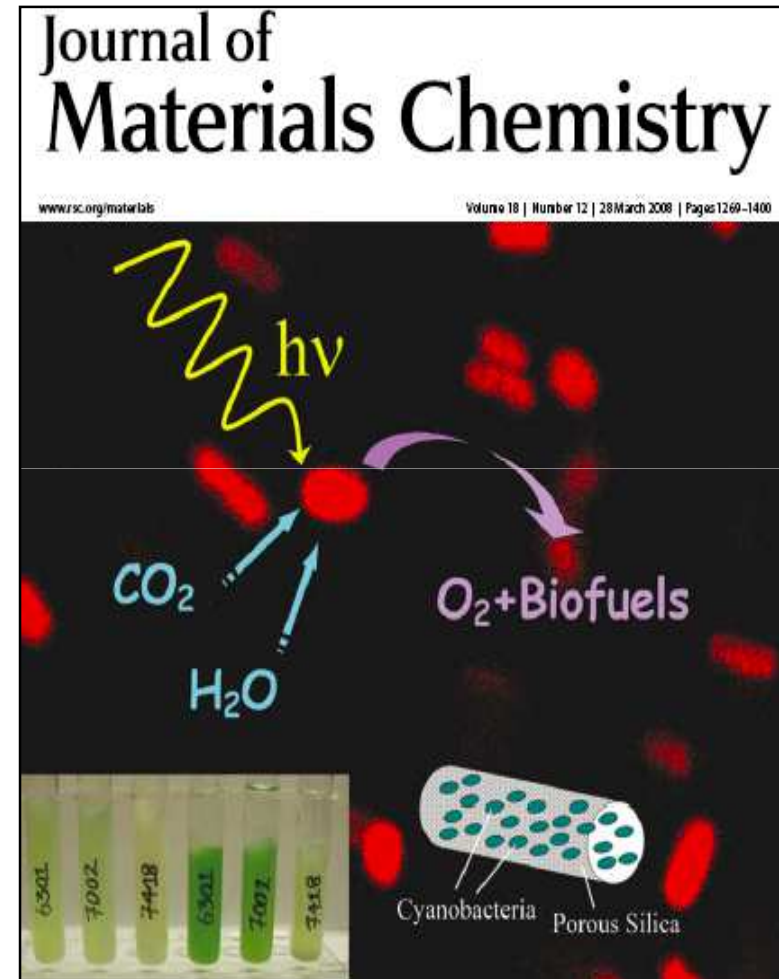
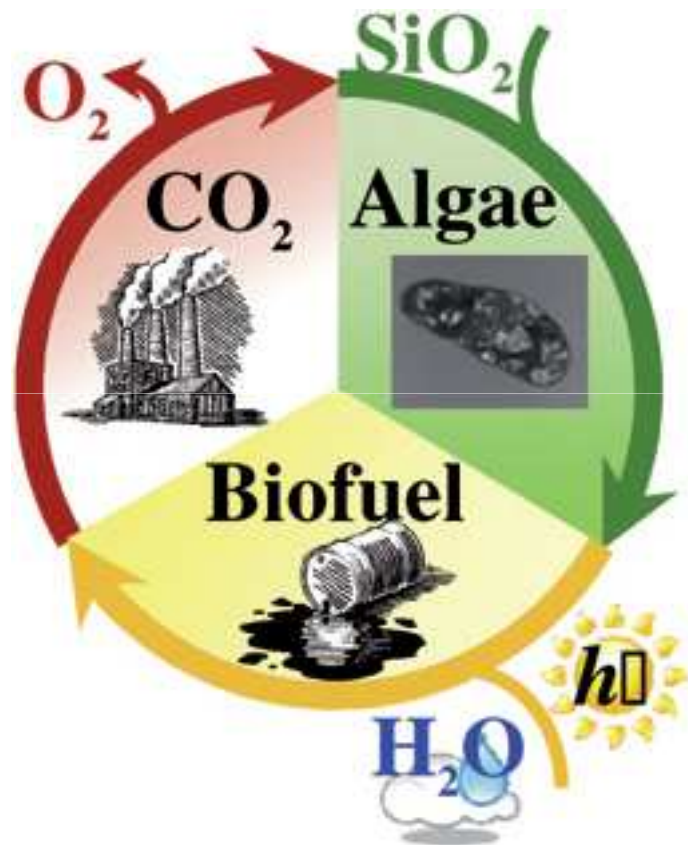


## Les bactéries encapsulées conservent leur activité métabolique

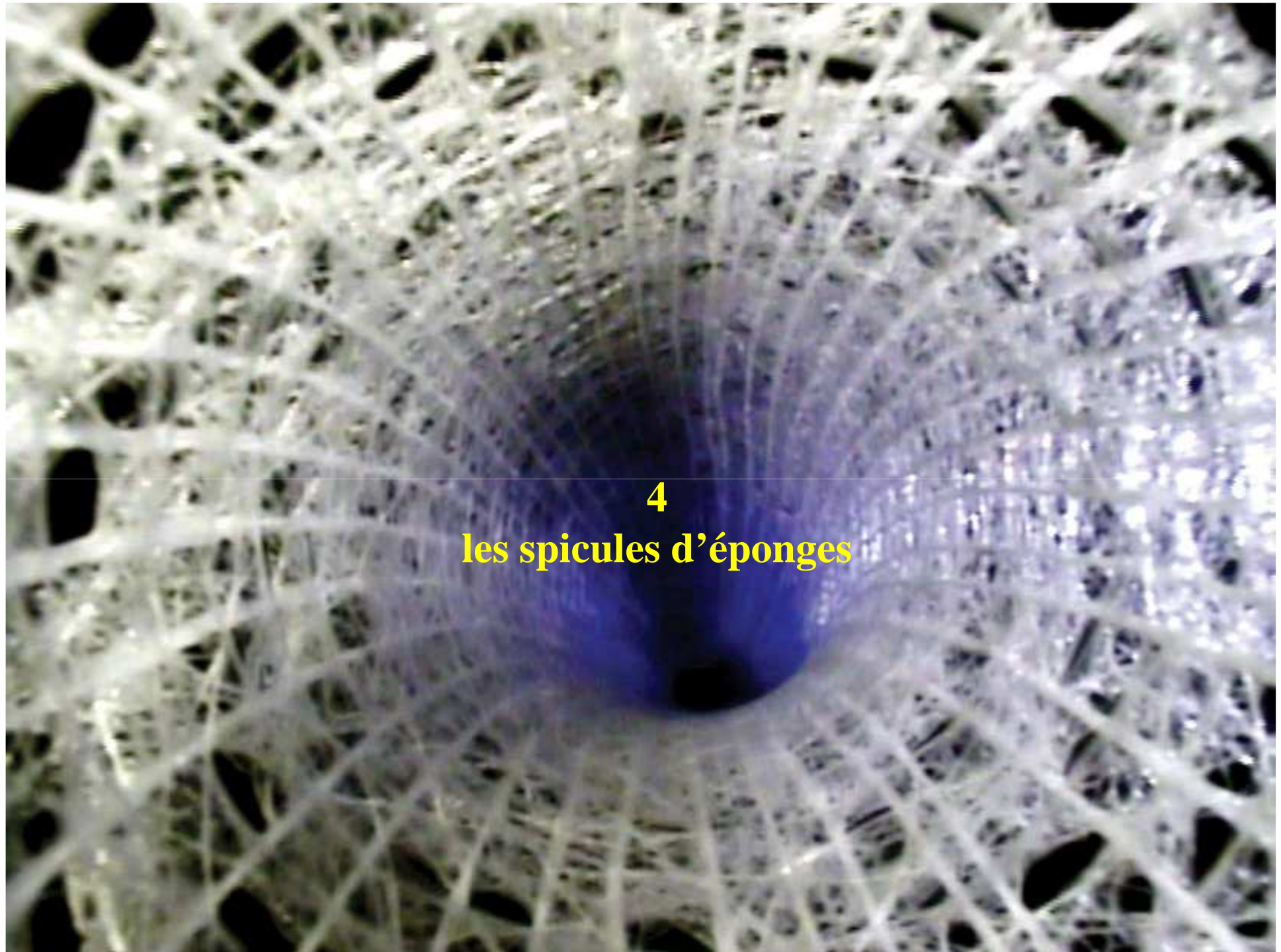




## Utilisation des micro-algues photosynthétiques pour la production de 'biofuels'



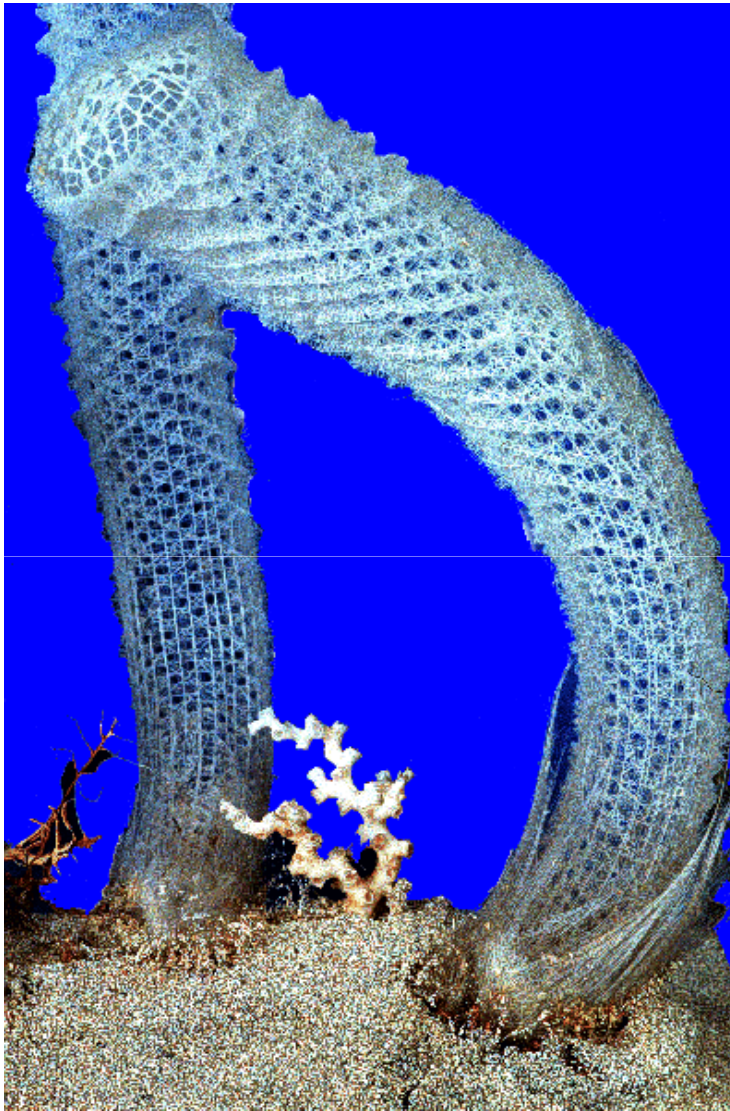
conversion de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  et  $h\nu$  en  $\text{O}_2$  et biomasse



4

les spicules d'éponges



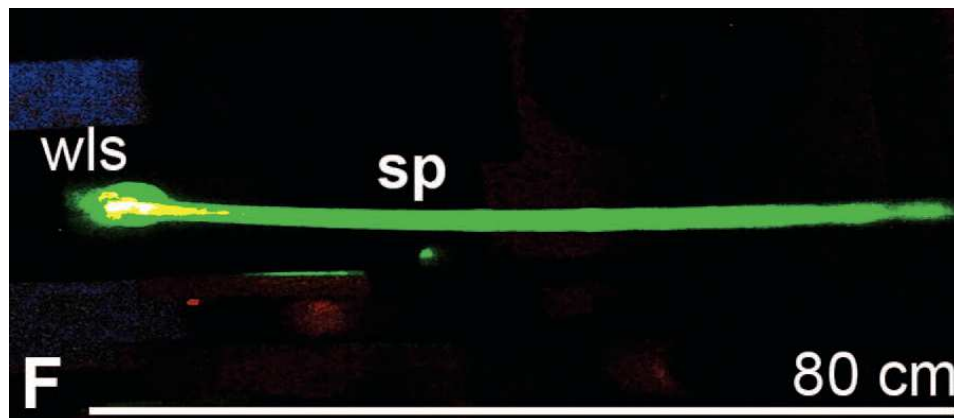
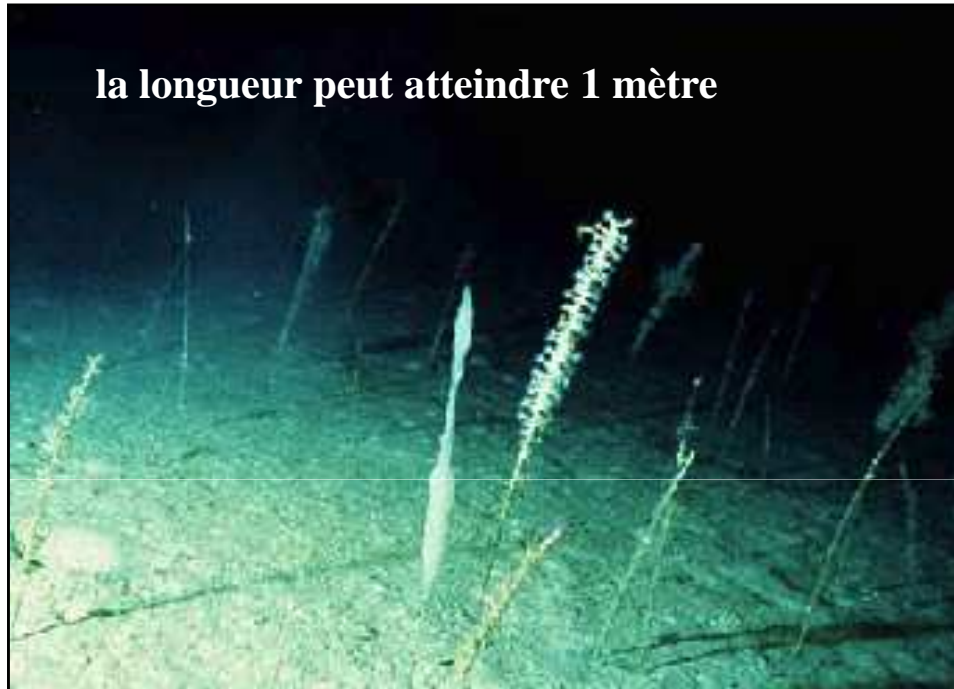


Éponge à crevettes

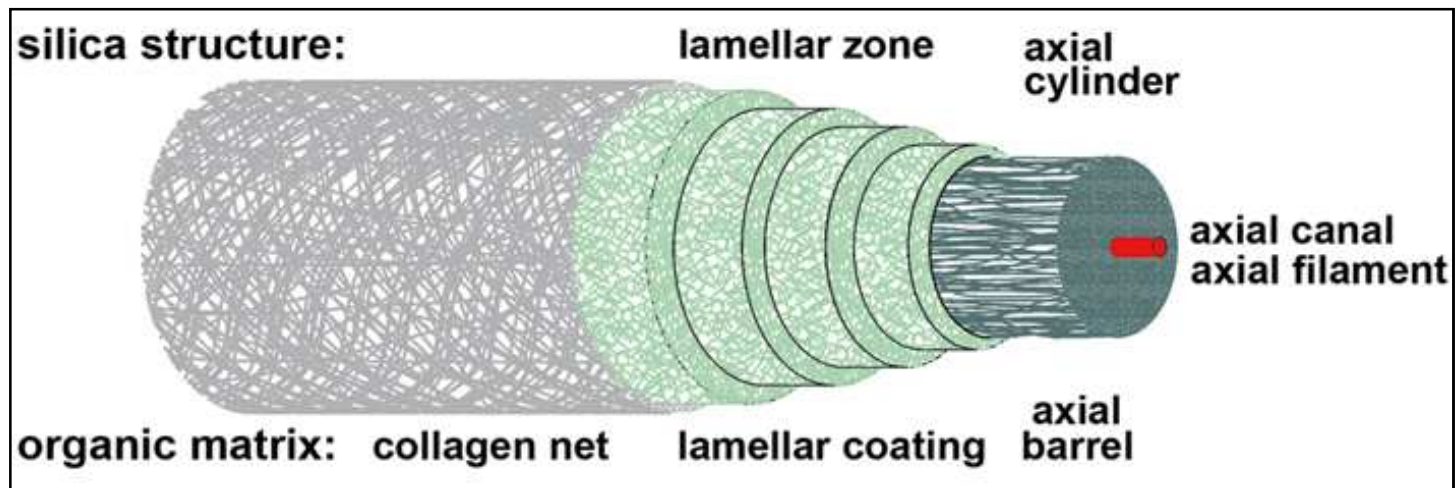
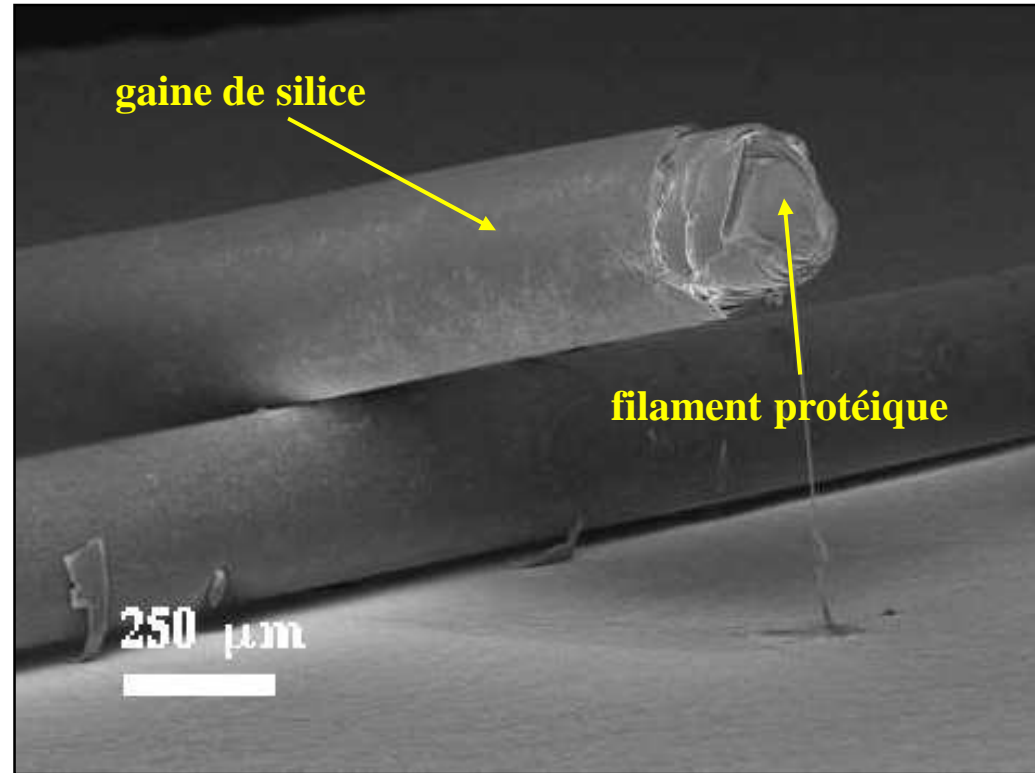
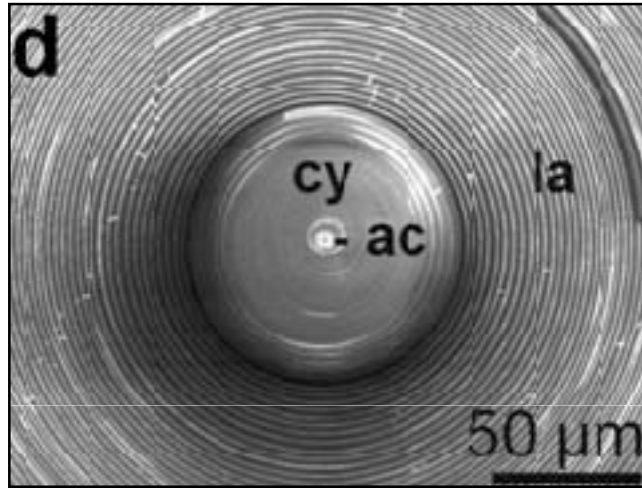


# Spicules d'éponges

Fibres de silice permettant à l'éponge de se fixer au sol



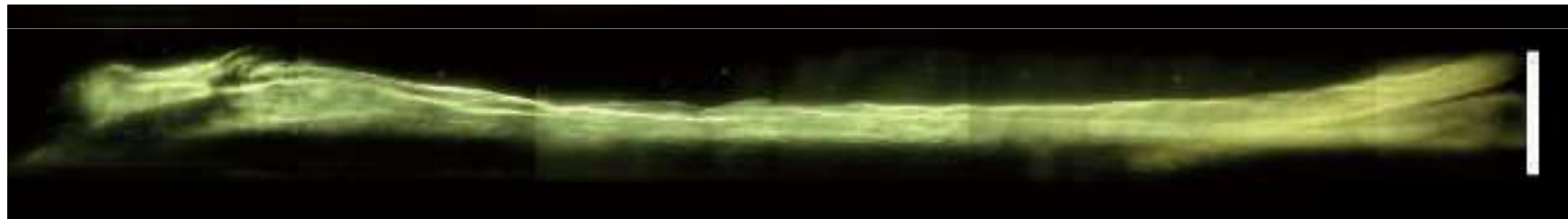
**gaine de silice autour  
d'un filament protéique**



Hierarchical architectures by synergy  
between dynamical template  
self-assembly and biomineralization

EMILIE POUGET<sup>1</sup>, ERIK DUJARDIN<sup>2</sup>, ANNIE CAVALIER<sup>3</sup>, ALAIN MOREAC<sup>1</sup>, CÉLINE VALÉRY<sup>4</sup>,  
VALÉRIE MARCHI-ARTZNER<sup>5</sup>, THOMAS WEISS<sup>6</sup>, ANNE RENAULT<sup>1</sup>, MAITÉ PATERNOSTRE<sup>7</sup>  
AND FRANCK ARTZNER<sup>1\*</sup>

**Nature Materials, juin 2007**



**COMMUNIQUÉ DE PRESSE DU CNRS- RENNES - 30 MAI 2007**

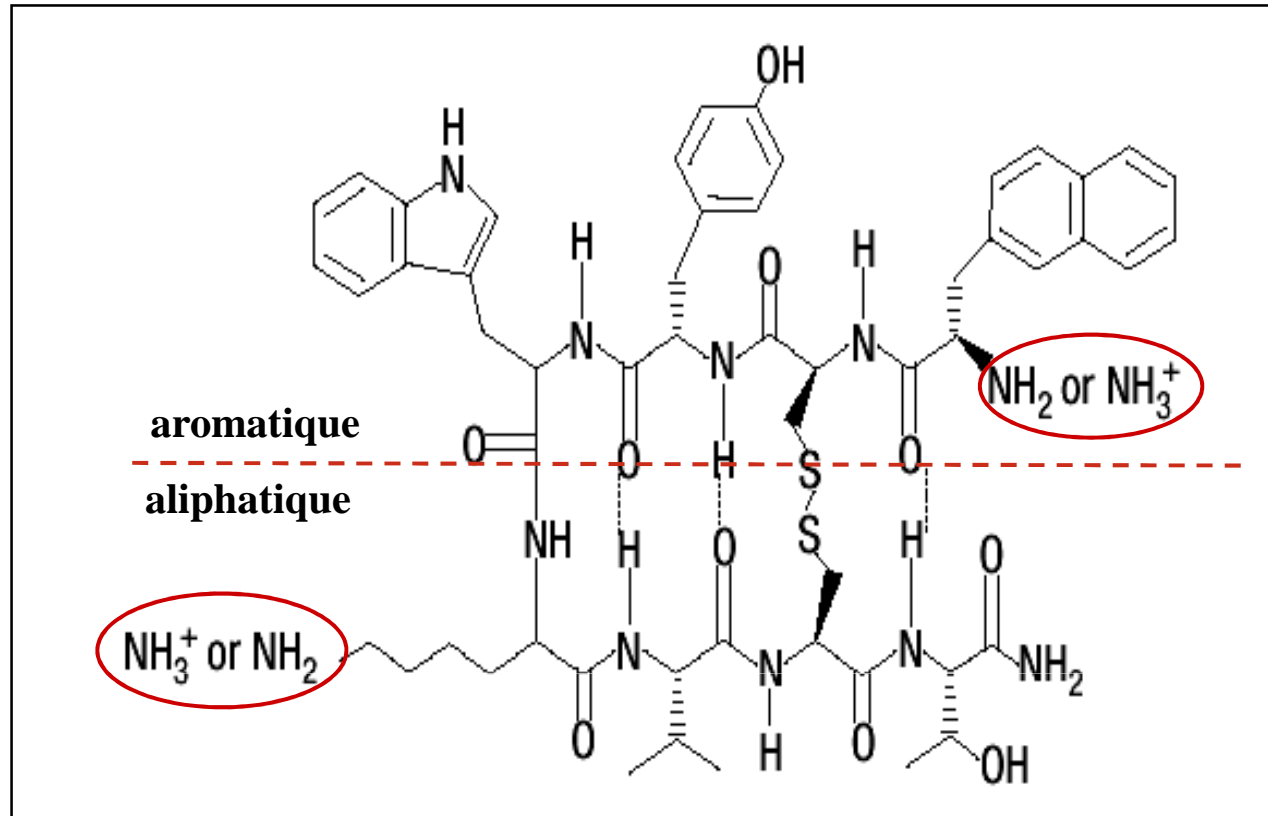
**UN ÉCHAFAUDAGE DE MOLÉCULES BIOLOGIQUES POUR  
FABRIQUER DES NANOTUBES DE VERRE**



## Lanréotide

Octapeptide dicationique

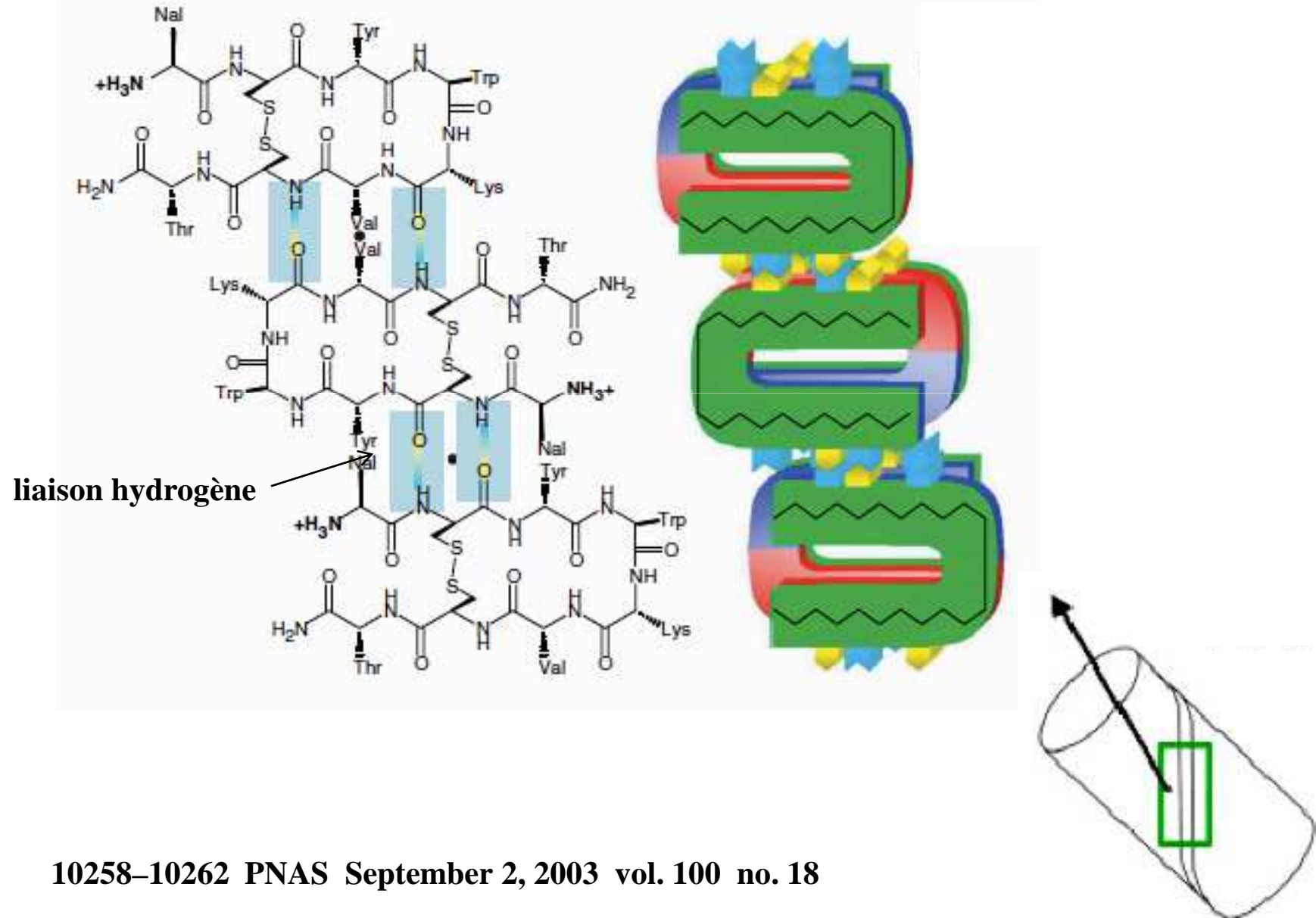
8 amino-acides



acromégalie



# Formation de nanotubes par auto-assemblage en solution aqueuse

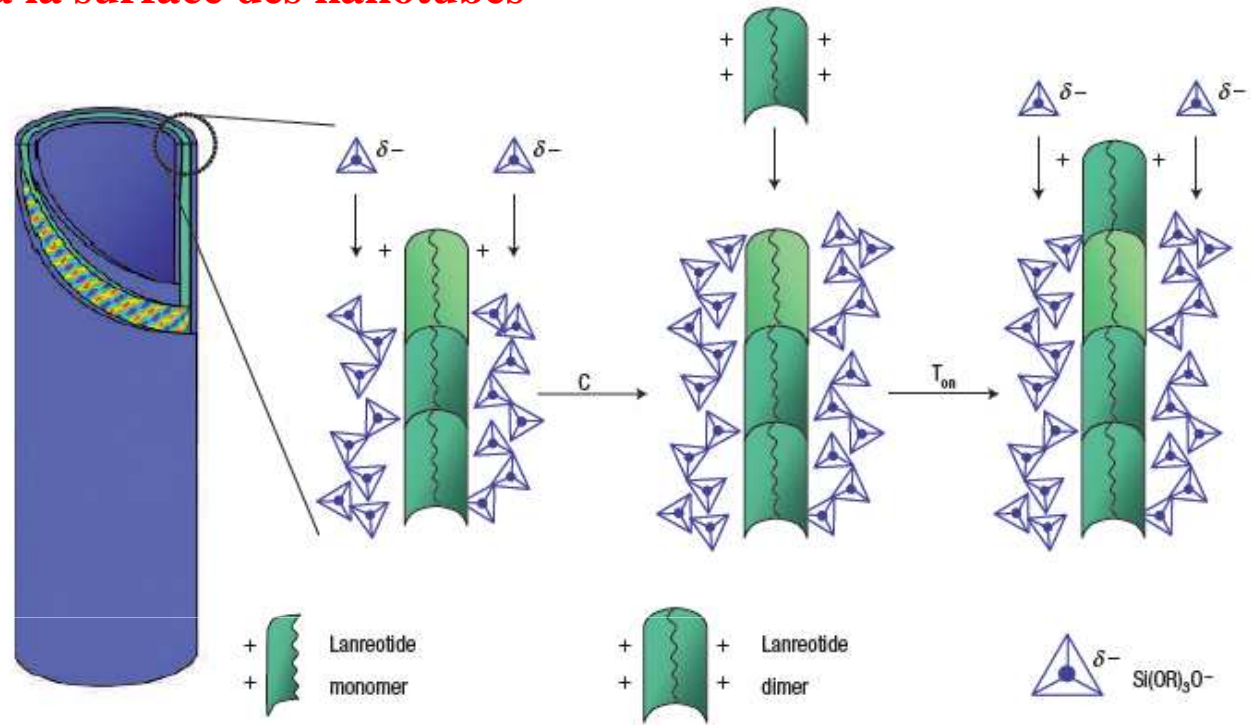


## Condensation de la silice à la surface des nanotubes

attraction électrostatique



Catalyse nucléophile  
par  $\text{NH}_2$

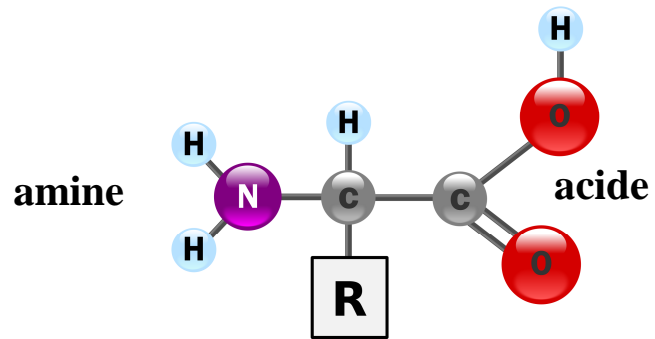
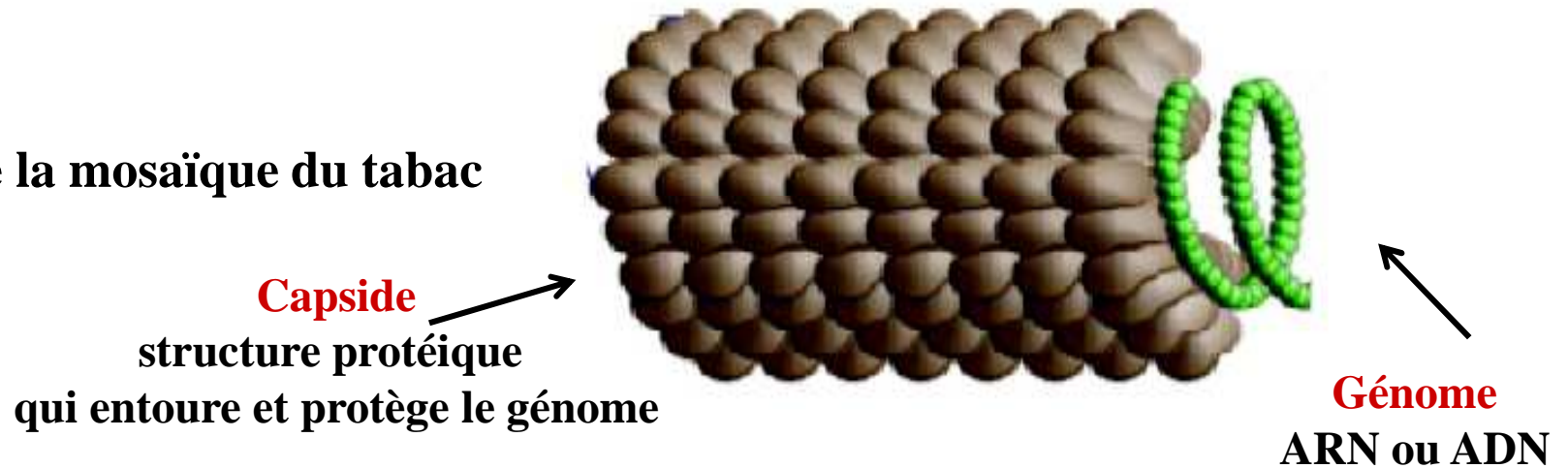


Les nanotubes  
peuvent atteindre  
plusieurs centimètres de long



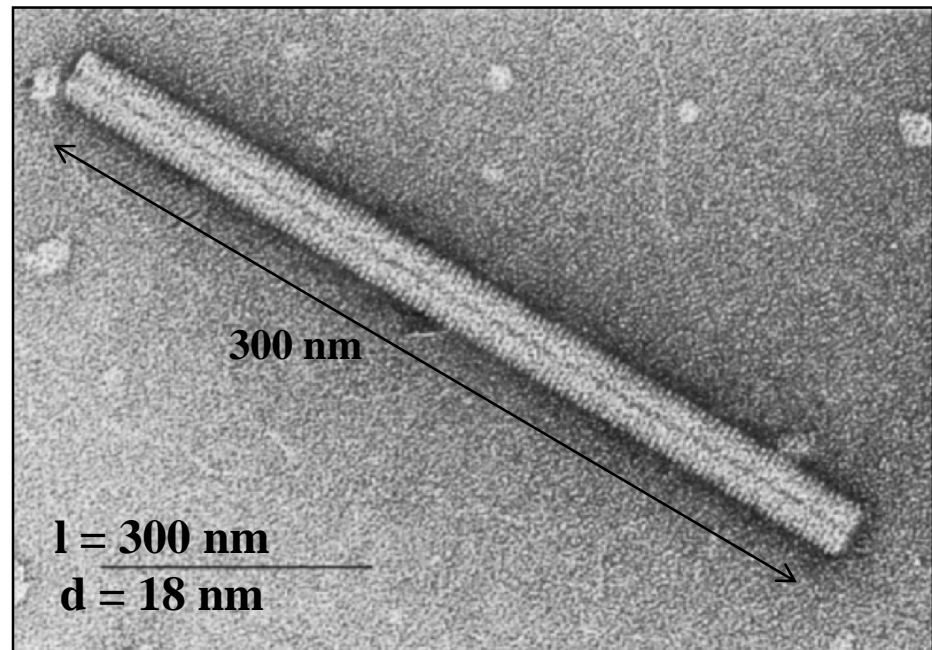
# Fabriquer un tube de verre à l'aide d'un virus !

Virus de la mosaïque du tabac



Forme de bâtonnets

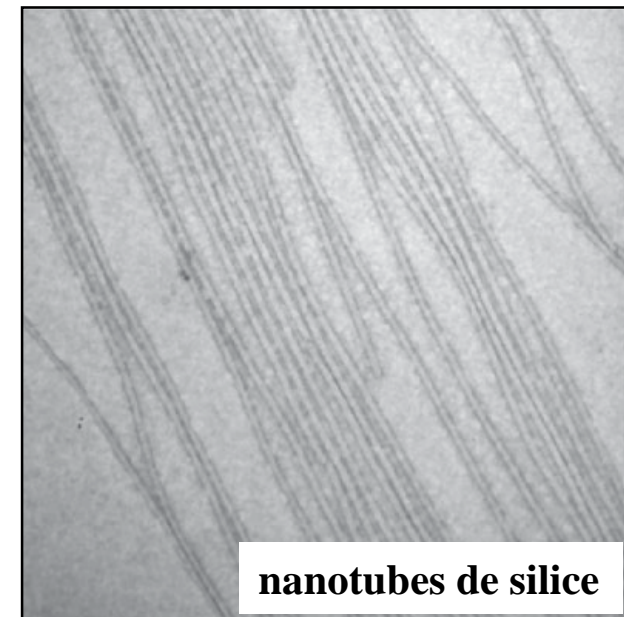
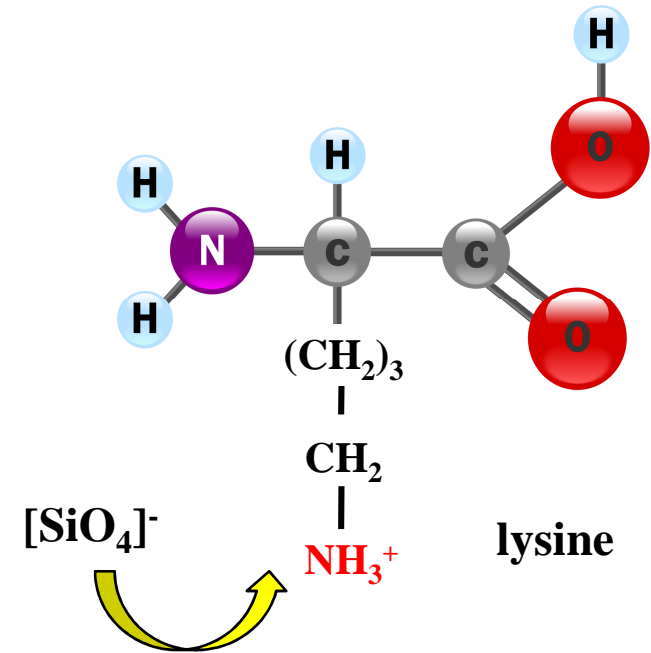
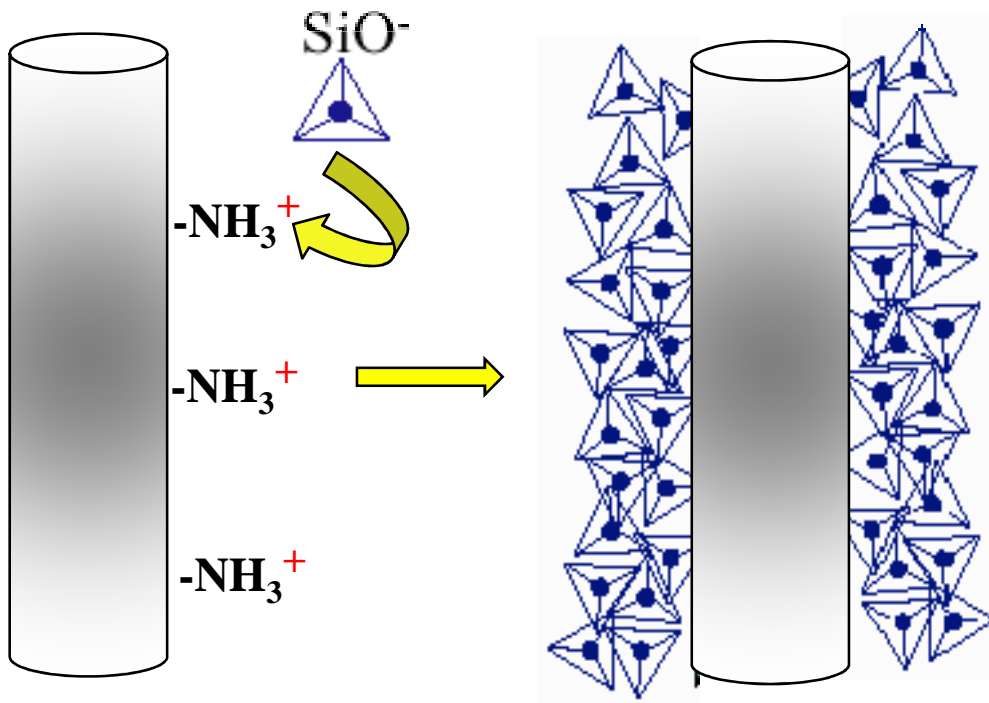
Forme de bâtonnets



# Tobacco Mosaic Virus Materials Templating

S. Mann *et al.* Adv. Mater. 11 (1999) 253

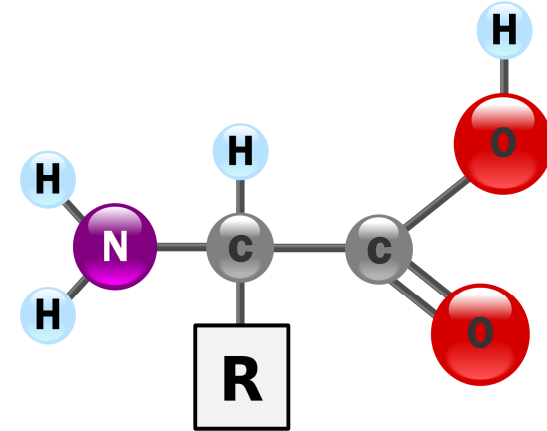
La capside contient des acides aminés tels que la lysine qui servent de sites de nucléation pour la formation de la silice



# Double avantage des virus

## 1. La nature de la capside est génétiquement contrôlée

On peut choisir la nature des groupements 'R'  
qui vont servir de centres de nucléation



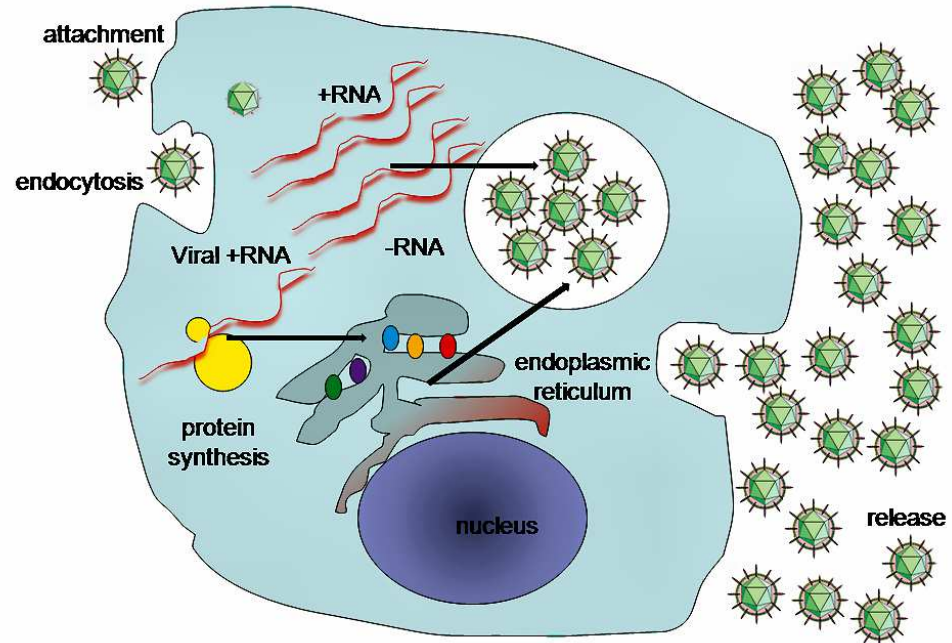
Acide aspartique :  $R = -CH_2-COOH$

Lysine :  $R = -(CH_2)_4-NH_2$

Cystéine :  $R = -CH_2-SH$

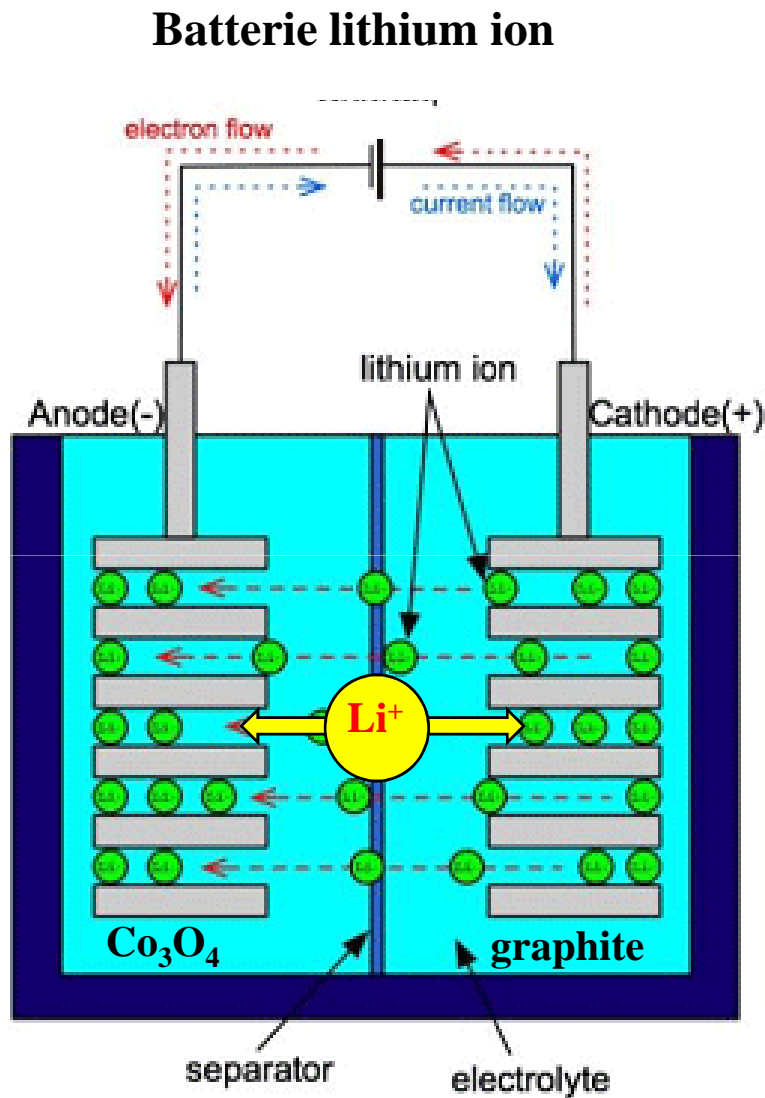
## 2. Culture facile

Les virus se répliquent  
au sein de cellules vivantes





# Des nano-batteries plus puissantes grâce aux virus !

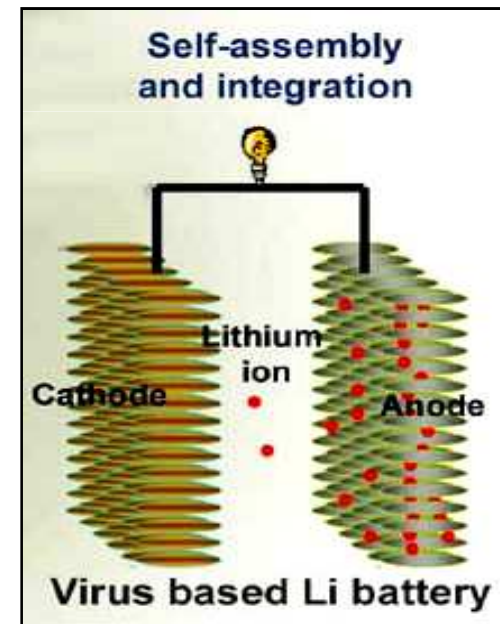


Diffusion des ions  $\text{Li}^+$  entre les 2 électrodes

Problème  
diffusion des ions  $\text{Li}^+$  dans l'oxyde

solide très divisé de façon à limiter le chemin de diffusion

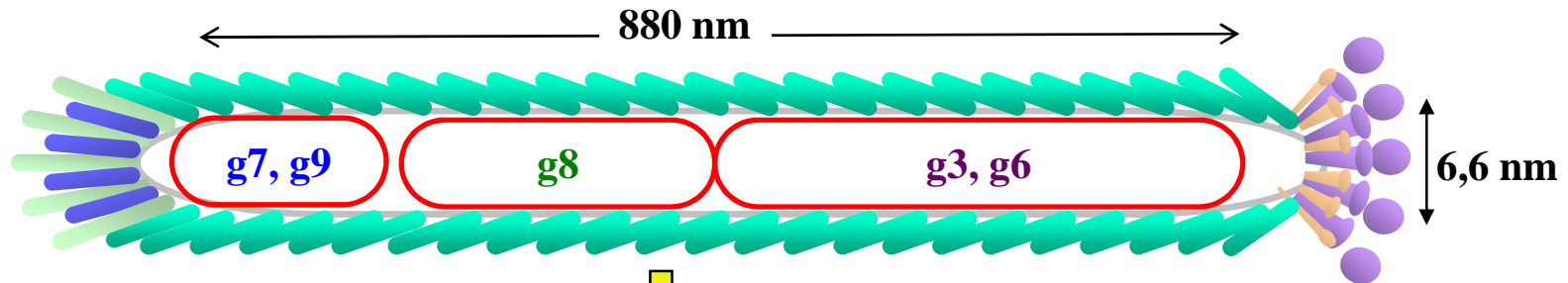
nano-fils de  $\text{Co}_3\text{O}_4$



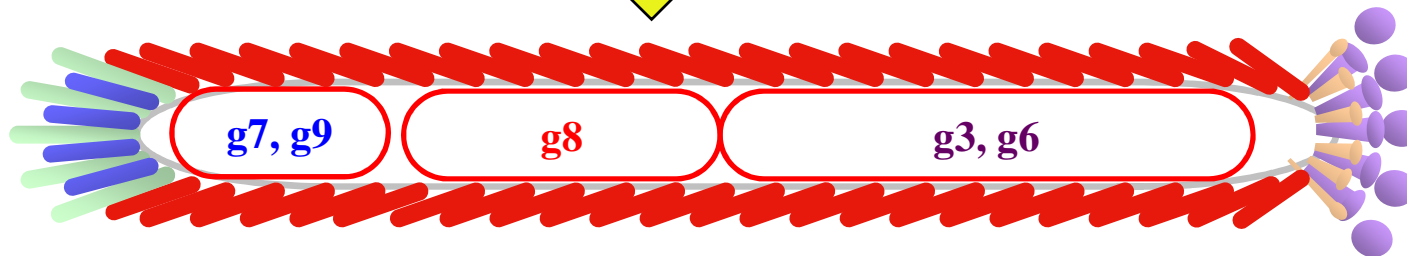
Réaliser une nano-électrode grâce au virus M13

## Bactériophage M13

Virus formé d'un ADN simple brin entouré d'un manteau de peptides dont la nature est génétiquement contrôlée



sélectionner les peptides susceptibles de reconnaître de façon spécifique certains substrats

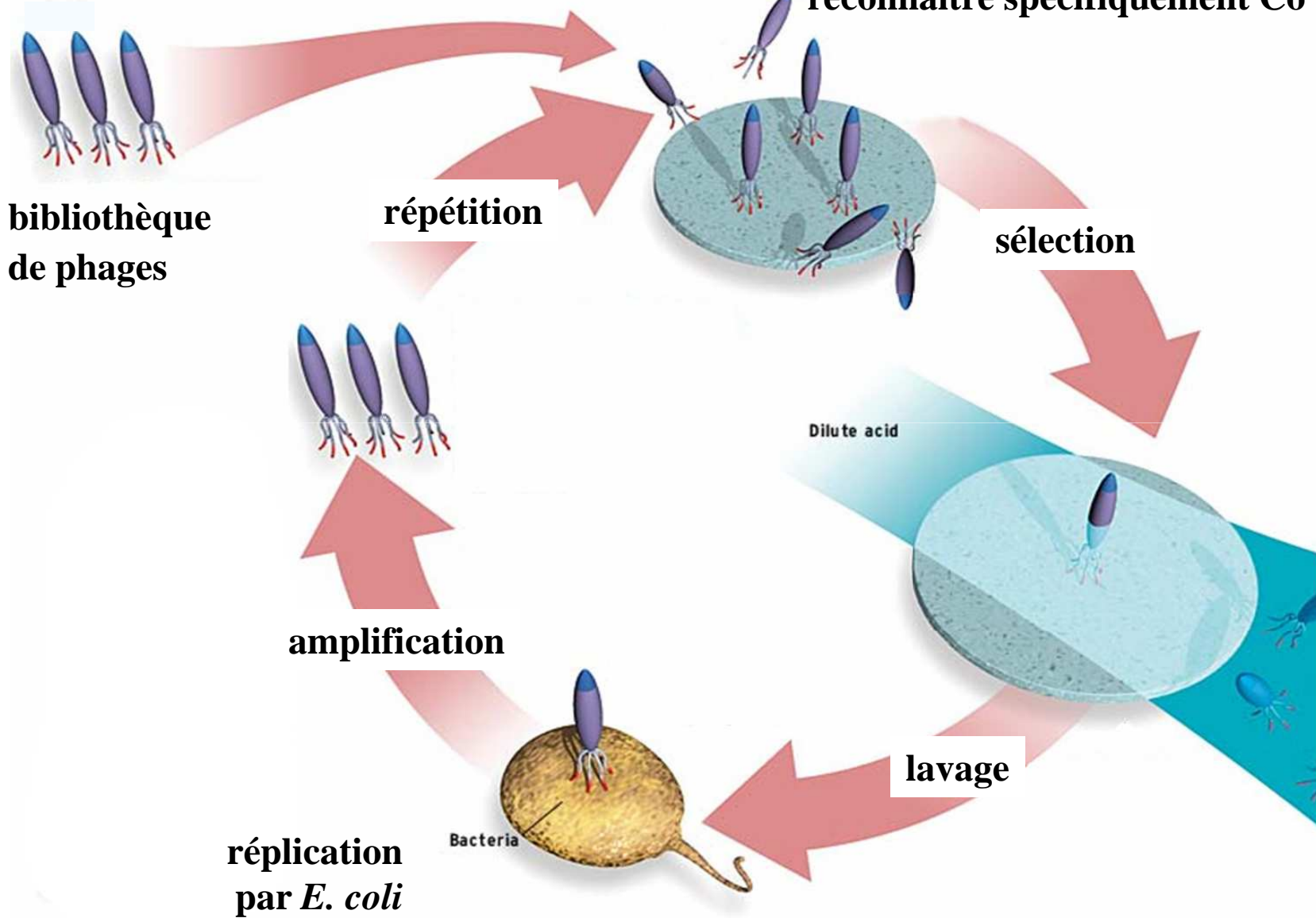


Nano-bâtonnets

Utiliser les protéines de la capside pour cristalliser l'oxyde de cobalt

# Sélection génétique

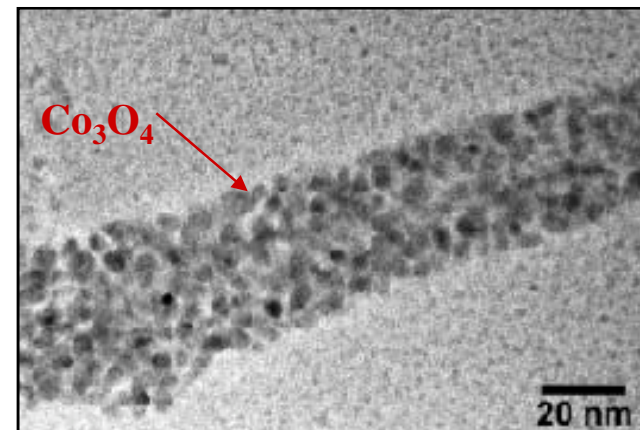
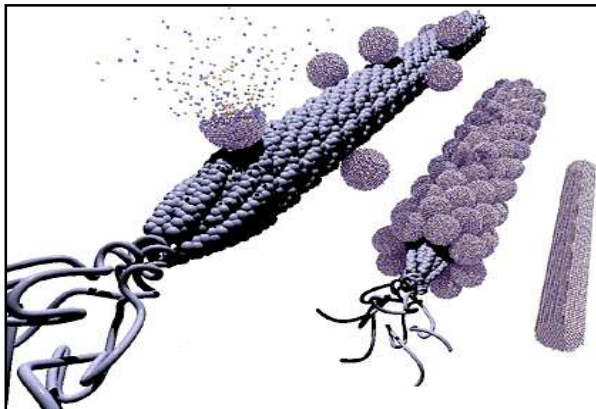
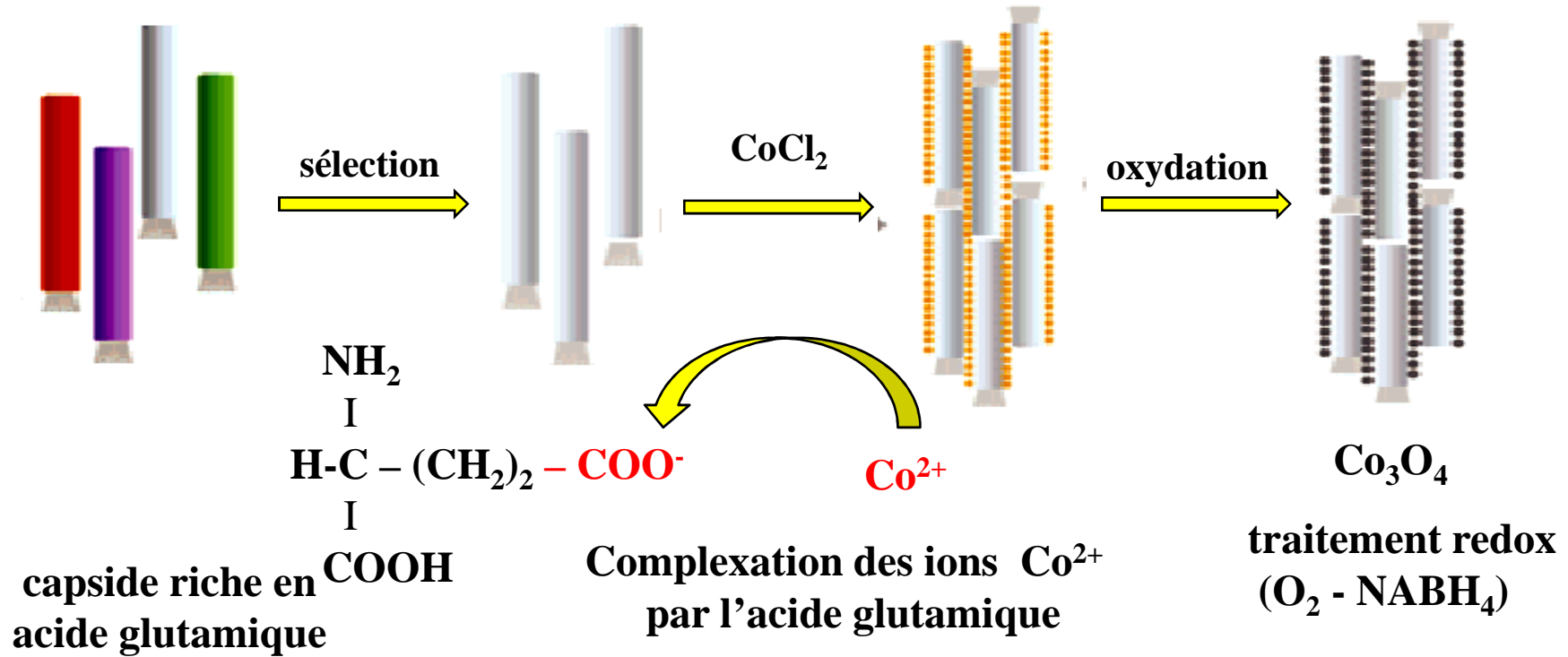
Sélection de virus capables de reconnaître spécifiquement  $\text{Co}^{2+}$



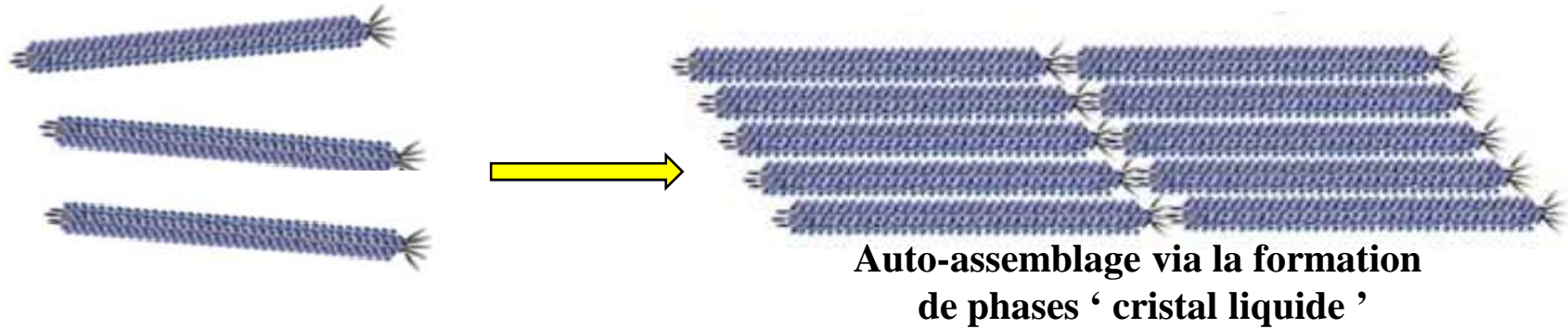


# Elaboration des nanofils d'oxyde de cobalt

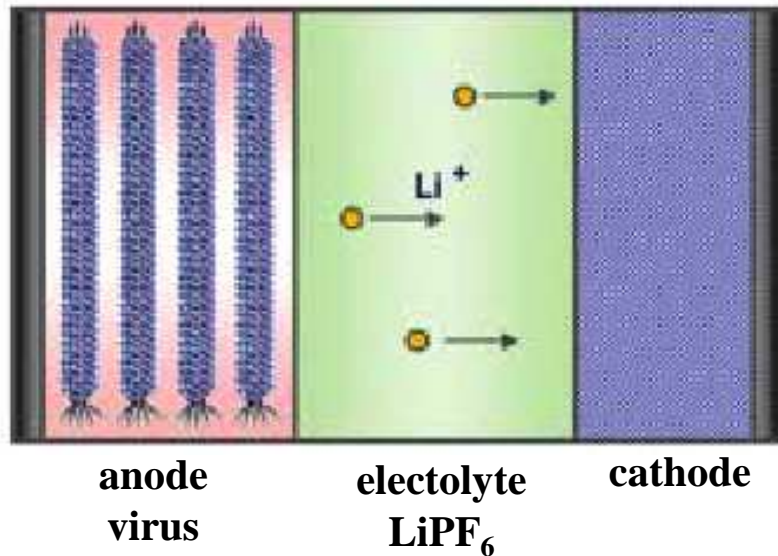
A. Belcher *et al.* Biomacromolecules 7 (2006) 14



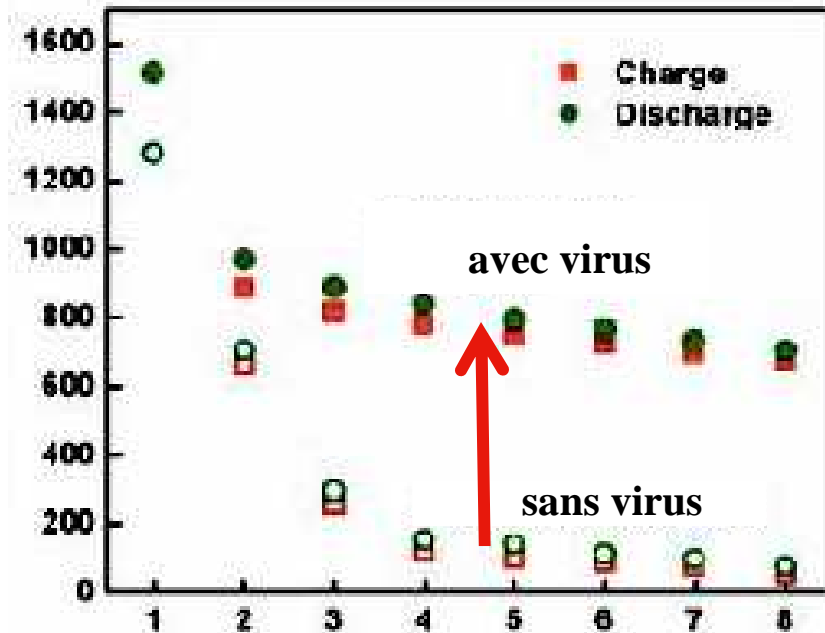
## Dépôt des virus sur une électrode



## Le film (virus+oxyde) sert d'anode pour une batterie au lithium



## capacité doublée $\approx 700\text{mAh/g}$



# Virus Fuels a Battery Breakthrough



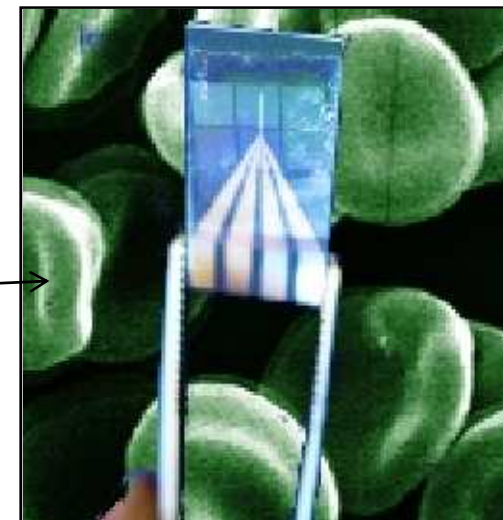
## Nano-batteries



### Virus-Enabled Synthesis and Assembly of Nanowires for Lithium Ion Battery Electrodes

A. M. Belcher *et al.* Science - 12 mai 2006

globule rouge →







*Il y a peu d'objets plus admirables que  
les délicates enveloppes siliceuses des diatomées.  
N'ont-elles donc été créées que pour que l'Homme puisse les admirer ?*

*fin*

**Chimie douce et matériaux bio-inspirés**