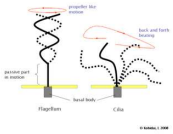
Impact des nanotechnologies sur l'agriculture et l'alimentation

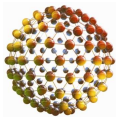
Michel Monsigny

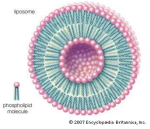
CBM-CNRS et Université d'Orléans

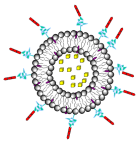
Membre titulaire de l'Académie d'Orléans

Jeudi 6 décembre 2012









Richard Feynman

(1918 -1988) CalTech Pasadena 29-12-1959

There's plenty of room at the bottom

Il y a une place énorme à la base, c'est-à-dire dans le domaine de l'infiniment petit, … celui des **nanotechnologies**.

****

Alan Kay

informaticien américain, (1940 - …)

The best way to predict the future is to invent it

la meilleure façon de prévoir l'avenir est de l'inventer

Impact des nanotechnologies sur l'agriculture et l'alimentation

1 Données fondamentales

Taille nano

Nano objets

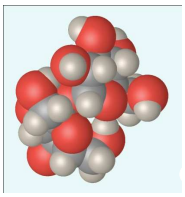
Conséquences

2 Impacts sur

*** Agriculture**

*** Alimentaire**

3 Aspects environnementaux, éthiques et règlementaires



1 nm

Molécule de saccharose

10^{-9} m

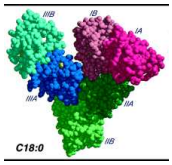
Notions de taille **facteur 100 millions**

Cendré d'Olivet

~ **10^{-1} m** = **0,1 m**

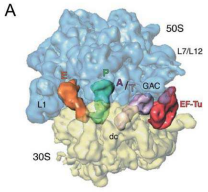
Terre

~ **10^{7} m** ~12 750 000 m



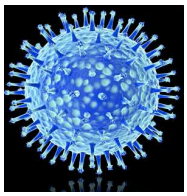
Protéine

~ 10 nm



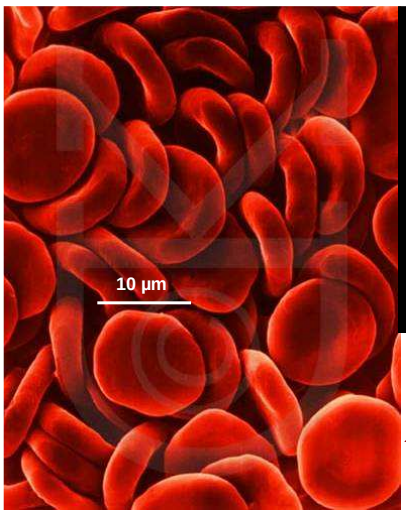
Ribosome

~ 20 nm

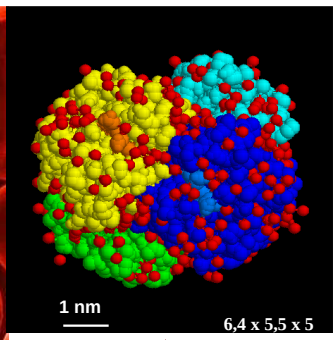


Virus de la grippe

~ 100 nm



http://www.odec.ca/projects/2007/nand7t2/images/rbc.jpg

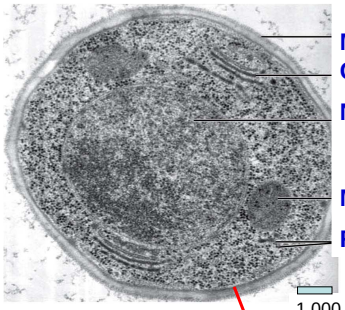


Hémoglobine

Globules rouges

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d2/Hemoglobin.gif

Figure 9-45 *Molecular Biology of the Cell* (© Garland Science 2008)



Membrane

Golgi

Noyau

Mitochondrie

Ribosomes

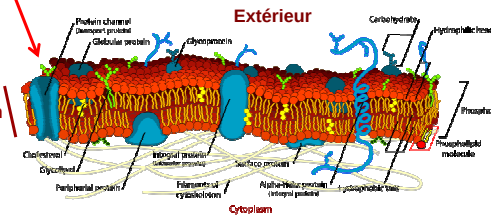
Vue au microscope électronique d'une cellule animale

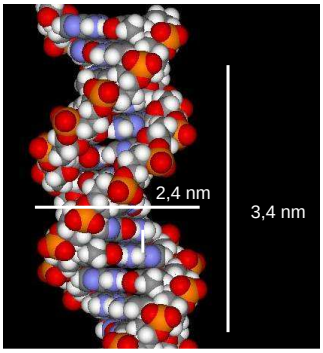
1 000 nm

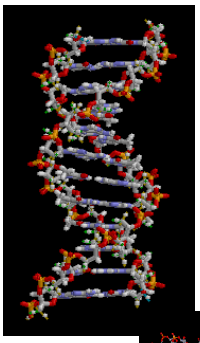
http://cellbiology.med.unsw.edu.au/units/images/Cell_membrane.png

Structure de la membrane périphérique d'une cellule

6 nm



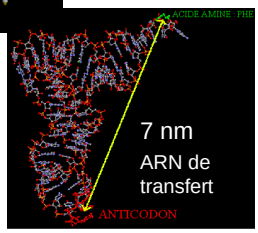




Liaisons fortes
→ Intégrité moléculaire

Liaisons faibles
→ interactions
A=T
G=C

Double hélice d'ADN
→ Nanoparticules
Code-bar moléculaire

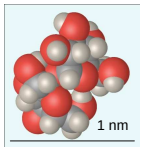


Nanoparticules

Nanoparticules de 1 à 100 nm

Sucre

Molécule



NB : 1 nanoparticule de sucre de 100 nm de côté
=> 10^6 molécules de sucre
1 kg contient 1,75 10^{24} (Yatto)

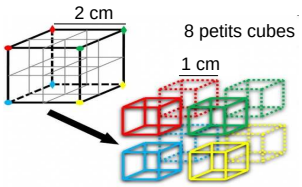
Préparations
****

Approche descendante
Matériau massif
↓
Poudre
↓
Nanoparticules
↑
Aggrégats / cristaux
↑
Atomes /molécules

Approche ascendante

Nanoparticules : conséquences

accroissement considérable de la **surface accessible**



	côté	Surface
Surface totale (2 cm) →		**24 cm²**
Surface totale (1 cm) →		**48 cm²**

1 m³ en cube de 1 m de côté ou en cubes de 1 nm de côté

Cubes	Côté	Nombre	Volume unitaire	Surface des parois
Unités	m	N	m^3	m^2
A (m)	1	1	1	6
B (nm)	10^{-9}	10^{27}	10^{-27}	$6\ 10^9$

Le monde nanométrique

corollaire

le très petit
et
le très grand
vont de pair

Applications :

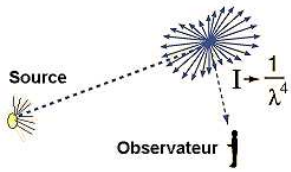
***catalyse chimique** (fer, or, argent …)
***vectorisation** (pharmacologie)
***nutrition** (dissolution, biodisponibilité …)

Nanoparticules : conséquences

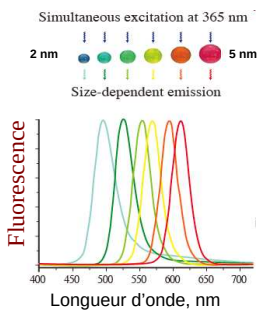
Diffusion de la lumière

Diffusion de Rayleigh : diamètre << 50 nm soit << 1/10 λ

le bleu diffuse ~10 fois plus que le rouge



Poussières quantiques
Quantum dots

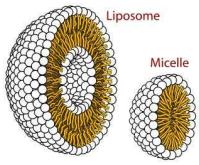


Nanoparticules : conséquences

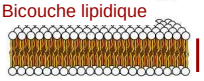
Au-delà de la nature chimique
Diverses influences

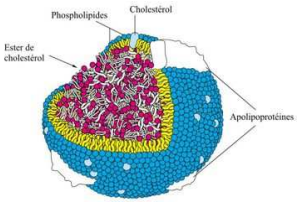
- **Texture**
- **Durée de vie**
- **Suspension**
- **Solubilisation rapide**
- **Couleur :** sels de fer
- **Goût :** cacao
- **Protection :**
  vitamines, antioxydants, arômes …
- **Délivrance localisée :**
  salive , estomac, intestin grêle

Nanoparticules lipidiques

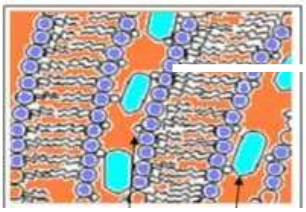


Bicouche lipidique

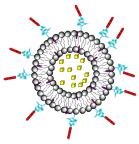




Lipoprotéine

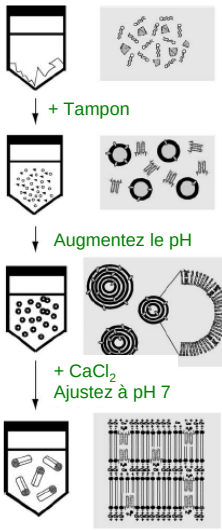


Nanocochléates

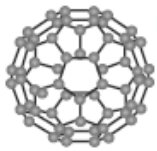


Liposomes vectorisés

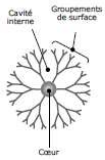
- **Signal de reconnaissance**
  Peptides, sucres, oligonucléotides, etc.



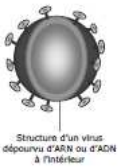
Cochléates
2005 Met Enzymol
391, 314 ssq



Fullérènes

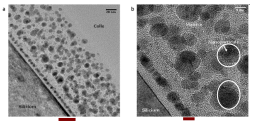


Dendrimères

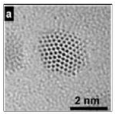


Pseudovirus

Gateau roulé



20 nm 5 nm
Nanoparticules d'argent



Nanoparticules d'or

Nano-objets :Caractérisation

ZétaSizer
Taille et charges superficielles

Résonance plasmonique de surface

Microscopie électronique

Microscope à force atomique

2e colloque Nanosciences et Mesures
Paris 28 novembre 2012

Impact des nanotechnologies sur l'agriculture et l'alimentation

1 - Données fondamentales
Taille nano
Nano objets
Conséquences

2 - Impacts sur
*** Agriculture**
*** Alimentaire**

3 - Aspects environnementaux, éthiques et règlementaires

Agriculture

Au niveau mondial : questions importantes au 21e siècle :

* augmentation de la **population humaine**
1960 3 milliards
2000 6,1 milliards
2012 7 milliards
2050 9 milliards
(+ en pays en voie de développement)

* déclin de la disponibilité / personne
- terres cultivables
- ressources renouvelables en eau fraiche

Agriculture

Efficacité relative des produits utilisés

Entrants	Efficacité relative
N azote	20-50 %
P Phosphore	10-25 % < 1% (sols calcaires)
K Potassium	~ 40 %
Pesticide	< 1 %
Eau	< 30 %
Eau (terre aride / semi-aride)	5-10 %

Agriculture : Impacts

Améliorations

** Rationalisation de la gestion des ressources agricoles
Fertilité des sols → Rendements

** Techniques de reproduction végétale
Régulateur de croissance végétale
Protection antistress
chaleur, sécheresse, maladie

**Techniques d'élevage
Santé du bétail

Agriculture : Impacts

Diminutions

**** Coûts de production**
**** Utilisation de pesticides**
**** Utilisation d'engrais**
**** Déchets**
**** Coûts de la main d'œuvre**

Agriculture : Applications

Nanoparticules

** engrais et des pesticides : épandage facilité
efficacité accrue, dissolution plus efficace
** réduction des quantités de produits dans l'environnement.
** administration d'ADN pour les plantes (génie génétique)

Nanocapsules

** libération contrôlée : pesticides, herbicides, engrais, etc.

Exemple : pyréthrines naturelles
contre insectes ravageurs : coton, riz, arachides, soja.
* se brisent au contact des feuilles
* libèrent agent actif dans tractus digestif alcalin de certains insectes.

** livraison d' hormones de croissance
de *manière contrôlée*
** administration de vaccins

Agriculture : Applications

Produits	Nano-objets	Applications	Développeur
Nanocides	Pesticides nanocapsules	Libération controllée	BASF
	Pesticides nanoemulsions	Plus grande efficcacité	Syngenta
Engrais enveloppés	Ammoniac nanocapsules	Libération controllée	Kyoto Univ.
Antibactériens	nanoparticles et molécules d'adhésion spécifiques	Élimination *Campylobacter jejuni* / volailles	Clemson Univ.

Agriculture : Applications

Nanoparticules de fer

dégradation (oxydation) de contaminants organiques
trichloroéthène, tétrachlorure de carbone, dioxines, PCB
→ composés carbonés simples beaucoup moins toxiques
Nettoyage sols contaminés et eaux souterraines

Nanoparticules de lanthane

absorption de phosphates dans étangs et piscines : =/= algues

Filtres à nanofibres d'oxyde d'aluminium : 2 nm diamètre

Purification de l'eau
Nettoyage des eaux souterraines

Agriculture : Applications

- **Nanopuces** - préservation de l'identité et suivi
- **Nanodétecteurs à puce** : dispositifs intelligents
  GPS → Culture de précision : prévention et alerte précoce
  → produits chimiques: apport contrôlé et de manière ciblée
- **Biocapteurs**
  - surveillance des sols
  - croissance des cultures
  - détection de pathogènes animaux ou végétaux
- **Nanocapteurs**
  * contrôles : cultures, sols (éléments nutritifs…),
  santé des végétaux (viroses végétales), santé du bétail

Agriculture
Domaines d'application

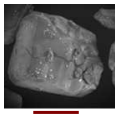
Domaines	Nano-objets	Applications	Développeur
Nano-détection	Nanodétecteurs	Aliments contaminés Pathogènes	Nestlé, Kraft Cornell Univ
Agriculture de précision	Nanodétecteurs reliés au GPS	Contrôles temps réel États du sol Croissance des récoltes	USDA
Élevage et pêche	Nanoparticles, fullérènes, dendrimères Nanocapsules Nanovaccins Nanopartic. de fer	Nutrition Médecine vétérinaire médicaments Surveillance des troupeaux Nettoyage des bassins d'élevage	Cornell Univ, Nanovic, Australie

Alimentation
Généralités

Plus de **300 nanoproduits alimentaires**

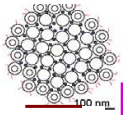
Marché mondial	
	milliards $
2005 2010 **2015**	5 20 **40**

Alimentation

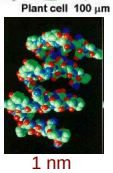


200 µm
Sucre

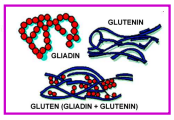
1 à 2 nm
Fibre musculaire

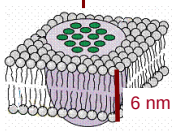


100 nm
Micelles
de caséine

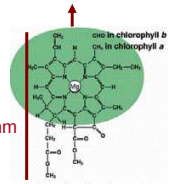


1 nm
Gluténine

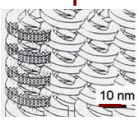




Agrégats



5-50 µm
granules d'amidon



Réseau
d'amylopectine

Alimentation

Chaine alimentaire ← **Consommateur**

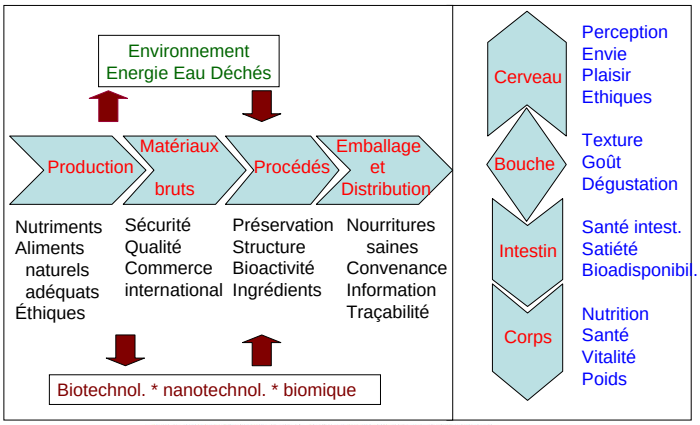


FIGURE 2-1 The two dimensions, or axes, of the food industry of the future:

Alimentation
Préparation des aliments

Nanoparticules et poudres nanométriques,
Nanoémulsions, micelles, nanogouttelettes
- → **meilleure disponibilité et**
- → **meilleure dispersion des éléments nutritifs**
- → **augmentation de l'absorption des nutriments**

Nanocapsules
- → **amélioration biodisponibilité des nutraceutiques**

Nanocochléates (nanoparticules enroulées)
- → **livraison plus efficace de nutriments aux cellules**
- → **préservation de la couleur ou du goût des aliments**
  - **ions ferriques sur le riz**

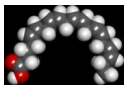
Aliments
Exemples

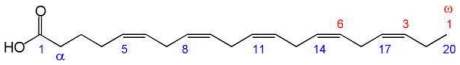
Nanocapsules

Libération conditionnelle de *nutriments*.

Exhausteurs de goût
Stéroïdes végétaux (phytostérols =/= cholestérol)
Huile de thon … : acides gras ω-3 et ω-6

DHA : acide docosahéxaénoïque oméga-3 : 22:6, Δ4,7,10,13,16,19





EPA : acide eicosapentaénoïque oméga-3 : 20:5, Δ5,8,11,14,17

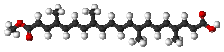
Aliments
Exemples

Micelles 30 nm / Nanocochléates 50 nm

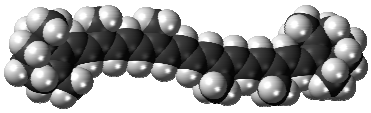
Libération conditionnelle des *nutriments*
Allongement durée de vie des aliments
Accroissement de la biodisponbilité

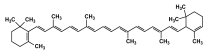
Nutraceutiques

Vitamines liposolubles **CoQ10.**
Lycopène (tomate) **Lutéine**
Phytostérols
Acides gras ω-3, ω-6 polyinsaturés DHA/EPA

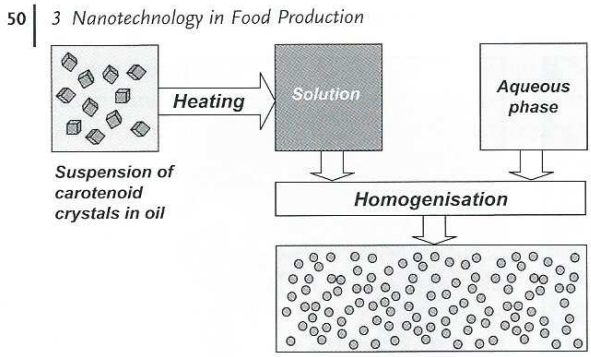


β-carotène





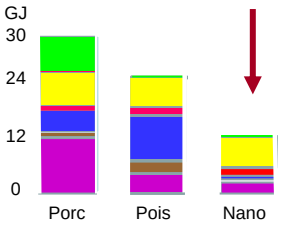
Nanogouttelettes de caroténoïdes



Alimentation

Coût énergétique de la préparation d'un kg de protéines	
Origine	Gigajoules
Porc	30
Pois	24
Pois nano	12

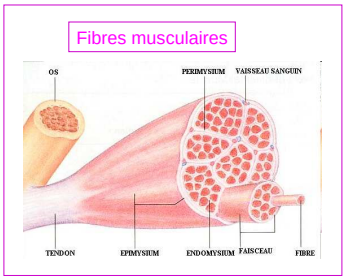
Aliments du futur

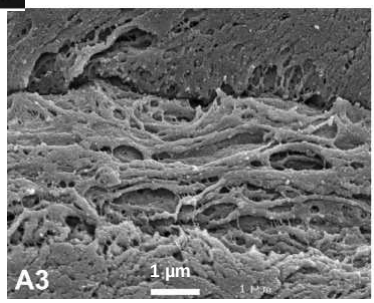


Transformation
Utilisateur process
Distribution
Élaboration
Ingrédients (préparations)
Production

Caséinate de Ca solidifé
en présence de transglutaminase

Microscopie électronique
Après 35 min à 50℃ sous cisaillement





Alimentation
Emballage

Barrières *** mécaniques** + ***autoréparation***
*** Thermiques**
*** Chimiques**
*** Microbiologiques**
Bactéries, levures, champignons,

Détection
*** pathogènes**
*** durée de conservation**
*** variations de température**

Alimentation
Emballage

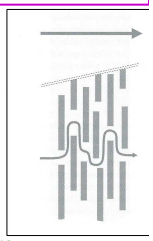
Films protecteurs
antimicrobiens et antifongiques

**** Nanoparticules d'argent :**
antiseptiques : **antimicrobiens** : **cher**

**** Nanoparticules de MgO et ZnO :** U. Leeds
oxyde de magnésium et d'oxyde de zinc
destruction efficace de micro-organismes :
bon marché

Alimentation
Emballage

Films protecteurs
antimicrobiens et antifongiques



** **Nanoparticules d'argile** barrière contre la détérioration et l'absorption d'oxygène
- **perte de dioxyde de carbone de la bière**
- **pénétration d'oxygène dans la bouteille**
- → **6 mois sur l'étagère fraîcheur de la bière**

** **Nanoparticules de silicate :** **Bayer**

Anti-desséchement
Anti- humidité et oxygène
économiques, légers, plus forts et plus résistants à la chaleur

Alimentation
Emballages intelligents

Films détecteurs

Nanoparticules fluorescentes (+ anticorps)
- → **détection de produits chimiques**
- → **détection de pathogènes d'origine alimentaire**

Nanocapteurs électrochimiques
- → **détection de l'éthylène**

Nanocapteurs biodégradables
- → **surveillance température, humidité, vieillissement**

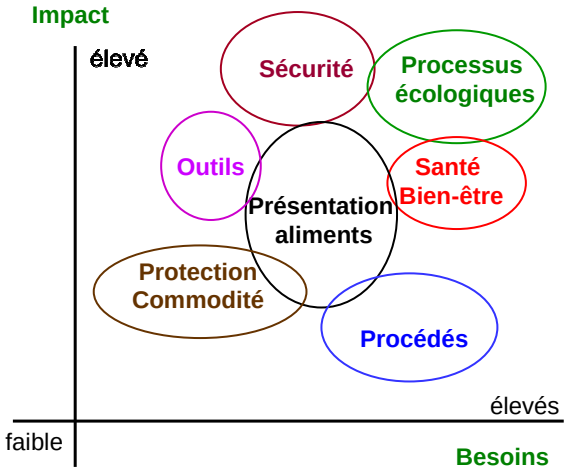
Alimentation
Puces détectrices

Biopuces à ADN

Détection de * pathogènes
*** bactéries nocives**
Viande. Poisson. Champignons. Fruits. …

Puces jetables enduite de **produits chimiques**
→ **détecte la surface des bactéries**

Nanobioluminescence **(pulvérisateur)**
protéine luminescente se lie à la surface des microbes
Salmonella, E. coli. …
émet une lumière visible
→ **Boissons ou aliments contaminés**



Statut des nanotechnologies

Impact des nanotechnologies sur l'agriculture et l'alimentation

1 - Données fondamentales

2 - Applications avérées et potentielles

3 - Aspects environnementaux, réglementaires et éthiques
Risques
Éthique
Débats publics
Grenelle 1 et 2

« Toute substance est un poison :
il n'y en a aucune qui n'en soit pas un.
La dose appropriée différentie
le poison du médicament. »

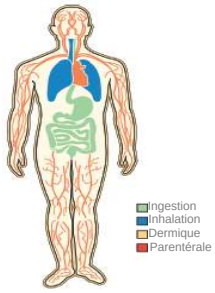
Paracelse
1493-1541

Risques liés aux nanoparticules

Cytotoxicité
Génotoxicité

Nature chimique
Agrégation / dissociation
Dispersibilité
Solubilité dans l'eau
Biodégradabilité

Fort développement de l'utilisation conduisant
→ augmentation de l'exposition et
→ questionnement sur les risques pour la santé



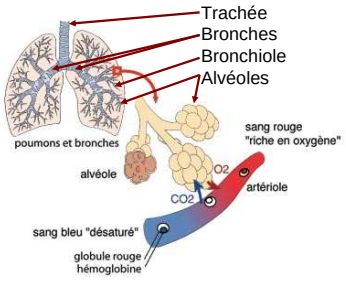
INERIS

Inhalation : voie d'entrée privilégiée

Voie orale : via l'alimentation (10^{12} NP/j), l'ingestion de particules inhalées...

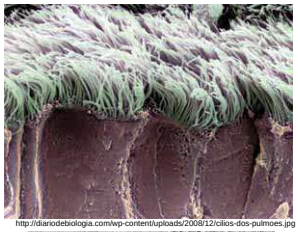
Voie cutanée : via les produits cosmétiques...

Voie parentérale : Applications médicales

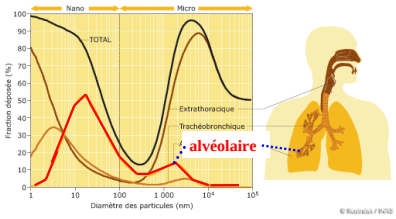


http://www.alessandroconti.ch/coursbio/Biologiehumaine/fr/Image/poumon_detail.jpg

Nanoparticules inhalées
Entrée dans les poumons



http://diariodebiologia.com/wp-content/uploads/2008/12/cilios-dos-pulmoes.jpg



Nanoparticles dans une cellule épithéliale

http://www.iom-world.org/research/nanoparticle

Éthique

CCNE*

Avis n°96 : **Questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé**

Unesco / Comest**
Éthique et politique des nanotechnologies
2007, 30 pages
Éthique de la Nanotechnologie
2009, 6 pages

*Comité consultatif National d'Éthique
**Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies

Grenelle 1

Loi du 3 août 2009

→ Débat public
utilisation des substances nanoparticulaires
débat : fin 2009

→ Information
du public et des consommateurs

→ Déclaration obligatoire :
quantités et usages de nano-objets

CNDP 1
Débat public : Nanotechnologies
2009

Qu'attend-on de positif des nanotechnologies ?

Que craint-on de leur développement ?

Que leur reproche-t-on ?

Que propose-t-on ?

Grenelle 2

Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 - art. 188

Santé et environnement
**** Prévention des risques***
**** Exposition aux substances nanoparticulaires.***
en l'état, en mélanges ou rejetées

Traçabilité et information du public
fabricants, importateurs et distributeurs

Déclaration périodique à l'autorité administrative
identité, quantités et usages des substances

Grenelle 2 suite

Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 - art. 188

****

Décret n°2012-232 du 17 février 2012

déclaration annuelle des substances à l'état nanoparticulaire

en vigueur au 1er janvier 2013

******

Décret n°2012-233 du 17 février 2012

désignation des organismes destinataires des informations obtenues

par l' Anses : Afssaps ; INVS ; Inrs ; Inéris …

Impact des nanotechnologies sur l'agriculture et l'alimentation

1 Données fondamentales

2 Applications avérées et potentielles

3 Aspects environnementaux, éthiques et réglementaires

Conclusions 1

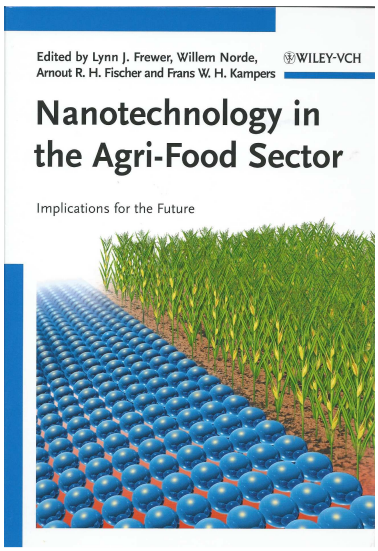
Le vivant est constitué de nanoconstituants

****

Avancées

*** Acquis scientifiques très importants**
*** Mise en évidence de propriétés spécifiques**
*** Potentiel considérable :**
Agriculture, Alimentation,
Médecine, Industries informatiques, électroniques,
NBIC Nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives

Conclusions 2

Nécessité de développer

*** la traçabilité,**
*** les recherches toxicologiques, épidémiologiques …**
*** la protection des travailleurs, de l'environnement …**
*** des informations accessibles à tous**