

Éléments d'introduction : les enjeux des nanosciences et des nanotechnologies

Table des matières

Objectifs	2
Introduction	3
I - Que sont les nanosciences et nanotechnologies ?	3
A. Définition par la taille	4
B. Définition par les propriétés physiques	7
C. Définition par les instruments et les technologies	10
1. Les instruments	10
2. Les technologies	17
3. Nouveaux domaines technoscientifiques	23
D. Définition par les politiques de recherche	24
E. Définition par les productions	26
1. Déjà 1317 produits sur le marché en mars 2011	26
2. Dans le domaine médical	38
3. Dans le domaine militaire	39
F. Définition par les controverses	41
1. Des enjeux sociétaux	43
2. Dans les médias ?	43
3. Espoirs et promesses ?	44
4. Des risques ?	44
5. Des contestations ?	45
En guise de conclusion	

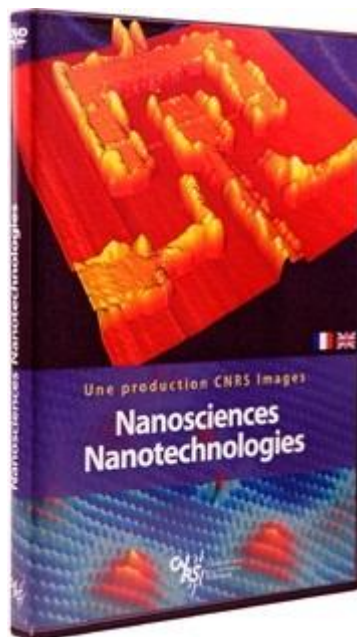
Objectifs

- Comprendre les différentes définitions des nanosciences et nanotechnologies
- Cerner les enjeux scientifiques, technologiques, industriels, sociaux, éthiques et politiques des nanosciences et nanotechnologies

Introduction

Le module aborde l'émergence et le développement de la notion de **nanosciences** et **nanotechnologies** et présente plusieurs façons de les définir selon différents enjeux, intérêts et acteurs concernés. Le module aborde également les controverses soulevées par les nanosciences et nanotechnologies.

Que sont les nanosciences et nanotechnologies ?



Pour le CNRS, « un nouveau monde est en formation. Peuplé d'objets aux comportements étranges, son univers est celui des nanomètres, la taille des atomes et des molécules. »
(<http://www.cnrs.fr/cnrs-images/nano/index.html>)

Définition par les propriétés physiques	14
Définition par les instruments et les technologies	17
Définition par les politiques de recherche	34
Définition par les productions	36
Définition par les controverses	52

Le terme de **nanotechnologie(s)** a été employé pour la première fois en 1974 par le physicien japonais, professeur à l'université des sciences de Tokyo, **Norio Taniguchi** pour désigner les procédés de conception, de fabrication et d'utilisation des structures à l'échelle du **nanomètre**.

C'est à la fois :

- Un champ défini par son **échelle** (un ordre de grandeur allant approximativement de 1 à 100 nanomètres).
- Un champ multidisciplinaire de recherches orientées vers une **finalité technologique**.
- Un nouvel horizon des **politiques de recherche** : label et convergence NBIC.
- Une technologie devenue précocement **enjeu de société**.

Mais il est important de bien comprendre que :

"« *La définition, le sens et la portée du terme "nanotechnologie(s)" sont toujours l'objet de débats. Des définitions en concurrence dans l'espace public.* »" (Fourniau, 2011)

A. Définition par la taille

- Cette définition est la plus simple et aussi la plus largement répandue. Elle permet d'englober une large gamme d'activités ou de produits sous le label "nano". On peut présenter les nanotechnologies comme l'ensemble des recherches menées à l'échelle nanométrique (10^{-9} m, soit un milliardième de mètre).
- Autrement dit, il s'agit de l'ensemble des connaissances et des techniques grâce auxquelles on crée, manipule, visualise et utilise des objets (matériaux ou machines) qui sont de l'ordre du nanomètre.

Fondamental : Définition de l'Union Européenne

Il convient de rappeler que la définition du terme «nanomatériau» dans la législation de l'Union Européenne **se fonde uniquement sur la taille des particules constitutives du matériau**, à l'**exclusion** de toute **considération relative aux risques ou aux dangers qu'il peut présenter**. Cette définition, fondée exclusivement sur la taille du matériau, couvrirait les

matériaux naturels, formés accidentellement ou manufacturés.

(Recommandation n° 2011/696/UE du 18/10/11 relative à la définition des nanomatériaux, **JOUE n° L 275 du 20 octobre 2011**

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF>)

Complément

Le rapport de référence du centre commun de recherche de la Commission Européenne, établi en juin 2010 et intitulé «**Considerations on a Definition of Nanomaterials for Regulatory purposes**» [EUR 24403 EN], suggère que la définition des nanomatériaux doit couvrir les nanomatériaux particuliers, être globalement applicable dans le cadre de la législation de l'Union et s'inscrire dans la ligne des autres approches en la matière adoptées dans le monde. **La taille doit être l'unique caractéristique constitutive de la définition qui nécessite d'établir clairement les limites de l'échelle nanoscopique.**

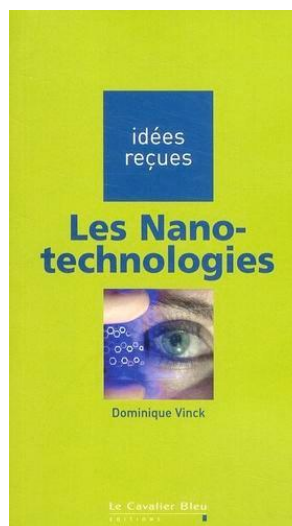
http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_reference_report_201007_nanomaterials.pdf

Définition de la NNI

En se référant aux documents officiels de la **National Nanotechnology Initiative** États-unienne (NNI), l'objectif du champ des nanosciences et nanotechnologies serait de travailler à la mise au point de **technologies à l'échelle atomique, moléculaire et macromoléculaire, dans une fourchette comprise entre 1 et 100 nm environ.**

(NSF, 2000 et 21st Century Nanotechnology R&D Act <http://www.nano.gov>)

Mais si les nanosciences et nanotechnologies concernent la conception, la caractérisation, la production et les applications de matériaux et de systèmes à l'échelle nano (Vinck, 2009), se pose la question de délimiter les frontières du domaine, les limites de taille, les objets (Corriu, Nozières & Weisbuch, 2004; Vinck, 2009)



Idées reçues - Les nanotechnologies

Par exemple en effet, alors que les définitions posent une taille comprise entre 1 et 100 nm, peut-on considérer qu'un objet peut être qualifié de "nano" si :

- **Au moins une de ses dimensions est de l'ordre du nanomètre ?**

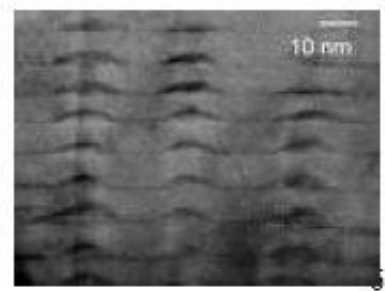
Les "nanos" concernent alors tout objet qui peut mesurer plusieurs microns, millimètres, centimètres ou mètres :

- **de long** : nanotubes ou nanofils ;



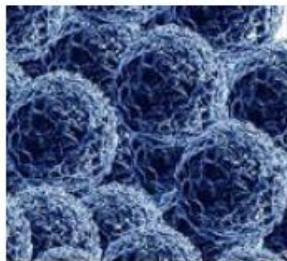
© CNRS/sagascience. Illustration Eric Vanneste

- **de large** : couches nanométriques.



Source : inac.cea.fr

A l'inverse, doit-on considérer qu'un objet ne peut être qualifié de nano que si ...



Source: NanoPrism Technologies, Inc.

• **Toutes les dimensions de l'objet sont de l'ordre du nanomètre ?**

Les nanotechnologies se limitent alors aux nano-objets, nanorobots, nanoparticules dont aucune dimension ne dépasse 100 nm ;

Autres questions soulevées :

• Plus généralement, est-ce que peuvent être qualifiés de "nanos" :

- **toutes les surfaces "nano-structurées" ?**

C'est-à-dire ordonnées de manière contrôlée.

- **des objets dont un élément est de taille nano ?**

Par exemple dans le cas des microsystèmes composés de plusieurs pièces.

- **des objets de taille supérieure au nanomètre mais « nano-fabriqués » ?**

Si la précision est de ce type elle concerne, en particulier, la miniaturisation de l'électronique mais certains considèrent que cela n'a rien à voir avec les nanotechnologies.

Ainsi l'appellation serait réservée au cas où la fonction assumée par l'objet tient sur quelques nanomètres, avec une précision de fabrication d'environ 0,05 nanomètre.

- des matériaux nanostructurés ou nanomatériaux ?

Par exemple, un objet avec une inclusion de nano-objets ou de nanofils pour le renforcer comme dans les raquettes de tennis ou les pneus ? [...]

Cette définition est d'ailleurs également ambiguë car quasiment tous les matériaux (ciment, métaux, bois) sont naturellement nanostructurés. **Aussi, certains restreignent l'appellation de nanomatériaux à ce qui a été sciemment nanostructuré par l'être humain.**

Complément

En 2004, la **Royal Society** et la **Royal Academy of Engineering** britanniques énonçaient la définition suivante du champ de recherche des nanosciences : « **La nanoscience est l'étude des phénomènes et la manipulation de matériaux aux échelles atomiques, moléculaires et macromoléculaires, où les propriétés diffèrent significativement de celles observées à plus grande échelle** » ; et une autre définition du champ de recherche des nanotechnologies : « **Les nanotechnologies recouvrent la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, de dispositifs et de systèmes par un contrôle de la forme et de la taille exercée à l'échelle nanométrique**».

Commentaire

On voit bien une distinction faite entre les nanosciences et les nanotechnologies, le premier terme comprenant l'« **étude des phénomènes et la manipulation** » des particules à l'échelle nanométrique et le deuxième recouvrant « **la conception, la caractérisation et la production** » de structures, dispositifs et systèmes à l'échelle nanométrique.

Mais ces distinctions entre **étudier** et **fabriquer** sont aussi questionnées pour les "nanos" (voir module 2)

B. Définition par les propriétés physiques

Attention

La définition par la taille est manifestement très discutée et remise en cause, puisque travailler sur des éléments à l'échelle nanométrique n'est pas nouveau surtout pour les chimistes, les biologistes et aussi les physiciens.

Pour l'Union Européenne

La mesure des tailles et de la répartition des tailles dans le cas des nanomatériaux pose fréquemment des difficultés et il n'est pas garanti que des mesures effectuées selon différentes méthodes produisent des résultats comparables. Il est nécessaire d'élaborer des méthodes de mesure harmonisées afin de faire en sorte que l'application de la définition produise des résultats cohérents à tout moment et pour tous les matériaux. En attendant de pouvoir disposer de méthodes de mesure harmonisées, il convient d'utiliser à défaut les meilleures méthodes disponibles. (Recommandation n° 2011/696/UE du 18/10/11 relative à la définition des nanomatériaux.

JOUE n° L 275 du 20 octobre 2011

[http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF))

Attention

Par contre, l'essentiel de ce que nous savons du comportement des atomes, des molécules et du monde physique repose sur des recherches effectuées à plus grande échelle.

Et à l'échelle nanométrique, les propriétés observées peuvent être bien différentes de celles aux échelles supérieures.

Ainsi l'idée de propriétés inédites des objets à l'échelle nanométrique est mentionnée dans plusieurs définitions des "nanos".

- Pour la **National Nanotechnology Initiative (NNI)**, le champ des nanosciences et nanotechnologies serait de travailler à la mise au point de technologies à l'échelle atomique, moléculaire et macromoléculaire, dans une fourchette comprise entre 1 et 100 nm environ, **pour obtenir une connaissance fondamentale des phénomènes et des matériaux à l'échelle nanométrique**

(NSF, 2000 et 21st Century Nanotechnology R&D Act, <http://www.nano.gov/>)

- Pour la Royal Society & Royal Academy of Engineering britanniques,, il s'agit de "« *the study of phenomena and manipulation of materials at atomic and macromolecular scales, where properties differ significantly from those at the larger scale* »" (**Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2004**)

Les "nanos" représentent alors un type de connaissances consistant non pas en des lois, mais en des comportements inconnus ou surprenants :

- Par exemple les phénomènes d'adhésion

A l'échelle "nano" ces phénomènes sont différents de ceux aux échelles macros. C'est ce qu'illustrent les photos emblématiques ci-dessous où des insectes et d'autres animaux tels que le gecko pourvu de poils à nanostructures se déplacent à la surface de liquides, de murs et de plafonds.



Meniscus-climbing insects
David L. Hu & John W. M. Bush
Department of Mathematics, MIT

Des poils microscopiques, tapissés de milliers de spatules d'environ 200nm de largeur, tapissent le dessous des pattes des geckos (image suivante). Ces spatules peuvent s'approcher d'une surface à des distances nanométriques. A ces distances, il existe des forces et des liens entre les molécules très faibles mais très nombreux. Ils s'additionnent et permettent au gecko d'évoluer sur des surfaces lisses verticales et même au plafond.

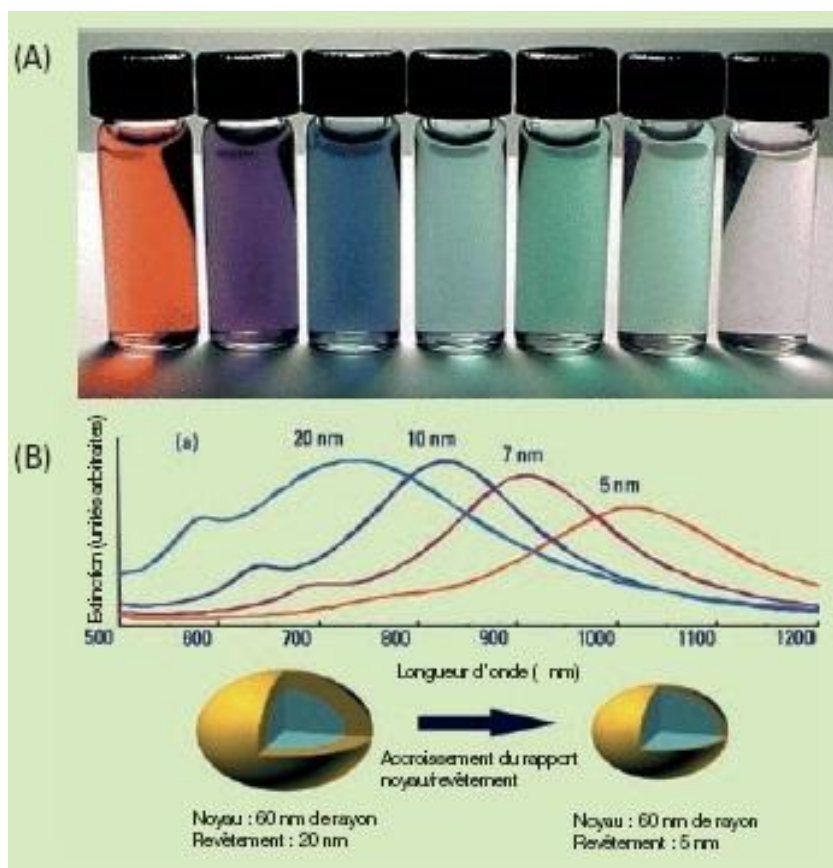


- Autre exemple : l'absorption de la lumière

Les « nanobilles d'or » sont des nanoparticules diélectriques composées d'un noyau entouré d'un fin revêtement métallique. En faisant varier les dimensions relatives du noyau et du revêtement, on peut concevoir des particules qui soit absorbent, soit dispersent la lumière dans le visible et une large part de la partie infrarouge du spectre électromagnétique.

(A) Les flacons de l'image ci-dessous contiennent soit une suspension colloïdale d'or (de couleur rouge caractéristique à l'extrême gauche) soit une suspension de nanoparticules recouvertes d'or dont les dimensions relatives du noyau et du revêtement varient. Ainsi la couleur de la solution varie.

(B) Les propriétés optiques des nanobilles sont prédites par la théorie de diffraction de la lumière de Mie. Pour un noyau de dimension donnée, plus fine est l'épaisseur du revêtement, plus grande est la longueur d'onde à laquelle se produit la résonance optique.



West, J. L. et Halas, N. J. 2003. Engineered nanomaterials for biophotonics applications: Improving sensing, imaging, and therapeutics. Annual Review of Biomedical Engineering, vol. 5, p. 285-292.

C. Définition par les instruments et les technologies

Les recherches en micro et nano technologies se pratiquent à des échelles que seuls les instruments récents peuvent explorer. Et dans ce domaine, ce sont les différentes propriétés physiques des matériaux qui déterminent les applications. Or, pour les microscopes, l'équation est similaire : les différentes propriétés physiques font des images différentes ! D'où la nécessité de recourir à une grande variété d'instruments pour étudier toutes les caractéristiques des différents nano-objets .

(http://www.cea.fr/technologies/les_microscopes/les_microscopes_explorateurs_de_l_infime)

1. Les instruments

Pour Alain Costes, chargé de mission du projet "Nano Innov" : "« les nanotechnologies ne sont pas une invention de l'Homme, la grande innovation réside dans notre capacité à regarder au niveau de l'atome et de la molécule grâce au perfectionnement de l'appareillage, notamment des microscopes »"

(<http://www.objectifnews.com/node/872>)

Observer et comprendre les nouvelles propriétés des objets nanométriques n'est utile (du point de vue de l'ingénierie) que si ces éléments peuvent être manipulés et mis à profit pour créer de nouvelles combinaisons de molécules, de nouveaux appareils et dispositifs.

Il est important de noter ici une spécificité des nanosciences et nanotechnologies:

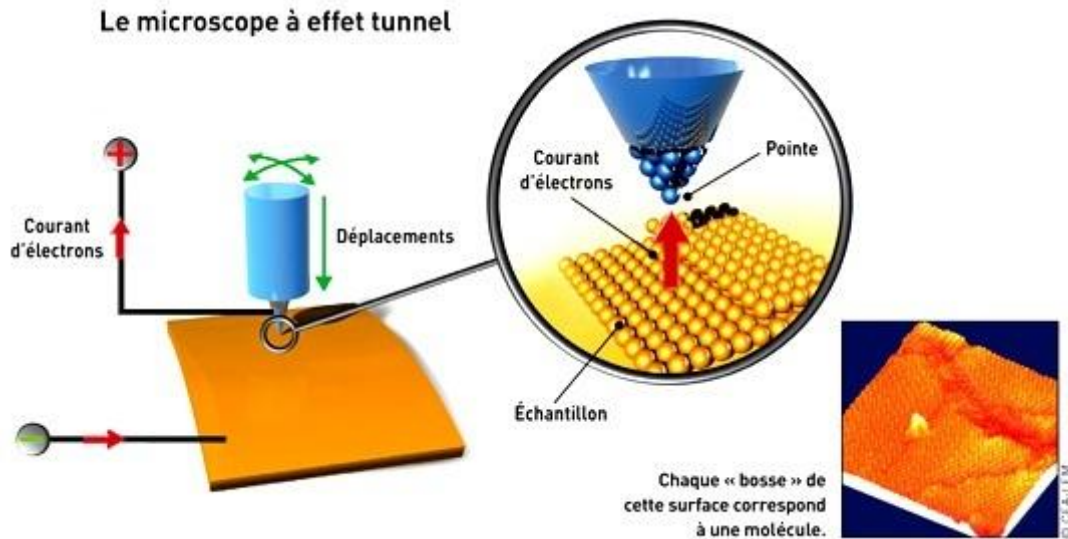
Le rôle de l'instrumentation qui permet à la fois l'observation et l'ingénierie directe des molécules ou des atomes.

On peut parler alors de manipulation moléculaires ou atomique.

Ainsi, en "nano", le chercheur est aussi un ingénieur, il s'agit de connaître et de fabriquer des "nanos" dans la même dynamique.

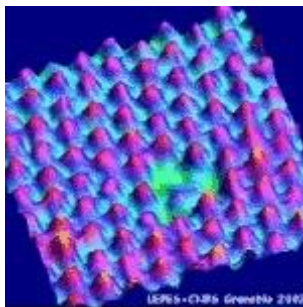
Le microscope à effet tunnel (STM pour Scanning Tunneling Microscope)

Au début des années 80, deux physiciens **Gerd Binnig** et **Heinrich Rohrer** (du laboratoire de recherche d'IBM de San José, Californie), ont réalisé des expériences qui conduiront à la fabrication du **microscope à effet tunnel** ce qui leur a permis d'obtenir le prix Nobel de Physique en 1986. Cette réalisation permet **d'observer** les atomes et de les **déplacer** un par un.

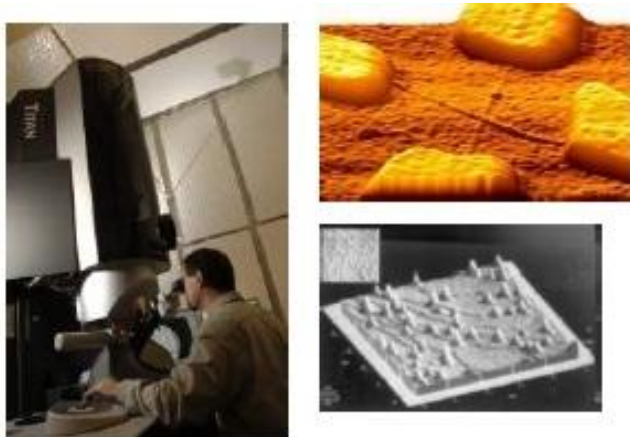


La microscopie à effet tunnel est une technique qui permet d'atteindre la résolution du millièème de millimètre (ou nanomètre) et de distinguer ainsi les atomes à la surface d'un objet

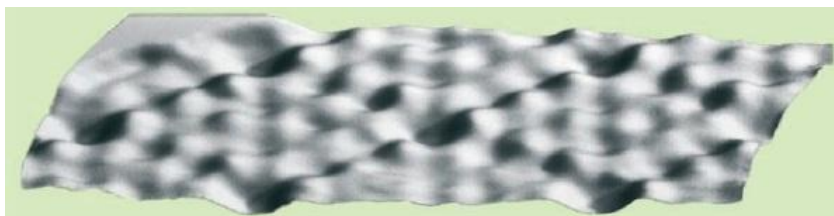
Contrairement aux microscopes classiques qui fonctionnent avec de la lumière, un STM (Scanning Tunneling Microscope) utilise une pointe mobile très pointue qui se termine par un unique atome qui va servir à scanner la surface à observer. Lors du balayage, le dernier atome de la pointe suit le relief de la surface. En pratique, on balaie ligne par ligne une zone carrée pour reconstituer une image. On obtient la topographie du corps «observé» avec des cartes en reliefs.



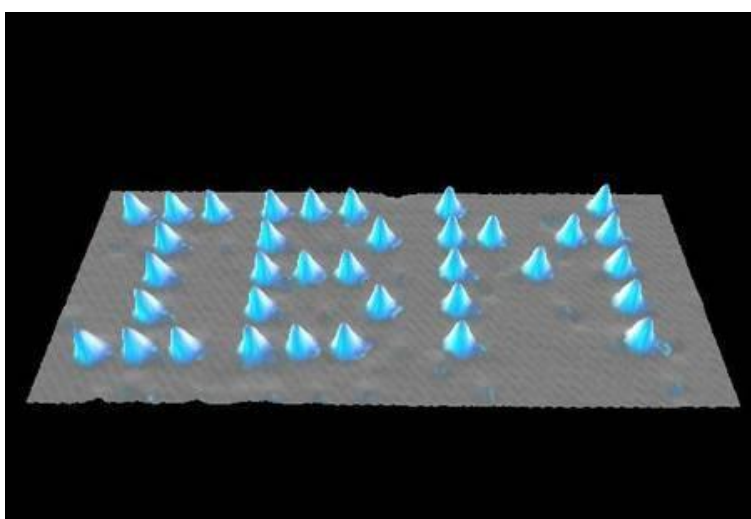
Atomes de Nickel observés grâce au microscope à effet tunnel. Taille de l'image : 2,3 nm x 2,3 nm



Visualisation de l'atome à l'aide du microscope à effet tunnel. Binnig, G. et Rohrer, H. 1987. Scanning tunneling microscopy: From birth to adolescence. Review of Modern Physics, Vol. 59, no 3, p. 622. Copyright 1987: American Physical Society.



- En 1989, Donald Eigler, chercheur chez IBM, parvient, à l'aide d'un STM, à déplacer un à un, comme des cubes de Lego, 35 atomes de xénon et à dessiner les initiales d'IBM en utilisant la pointe ultrafine du microscope à effet tunnel à la façon d'une pince.



Cette photo est très célèbre et largement utilisée dans les documents de vulgarisation des "nanos".

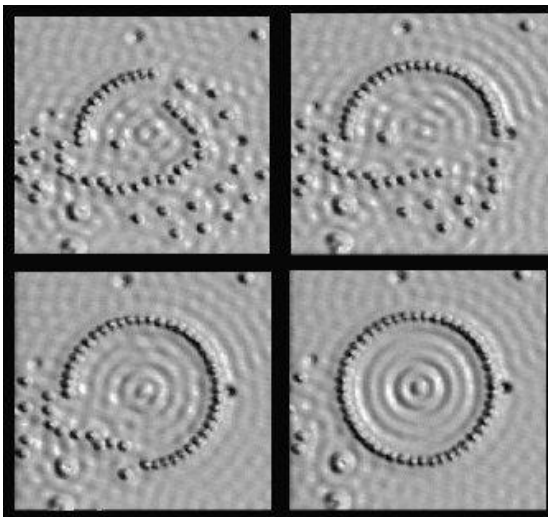
En 1993, Donald Eigler réalise la première "nanoexpérience" et qui consistait en l'assemblage de 48 atomes de fer en un tambour électronique.

Corral quantique

- Le premier "corral quantique" constitué d'atomes de fer sur une surface de cuivre, a été obtenu en 1993 par Christopher Lutz, Donald Eigler et Michael Crommie (IBM). Le corral quantique est une enceinte formée d'atomes mis en place sur un substrat par un microscope à effet tunnel. Cette enceinte permet de créer une onde stationnaire dans la mer d'électrons de la surface. Cette onde peut être visualisée par un microscope à effet tunnel.

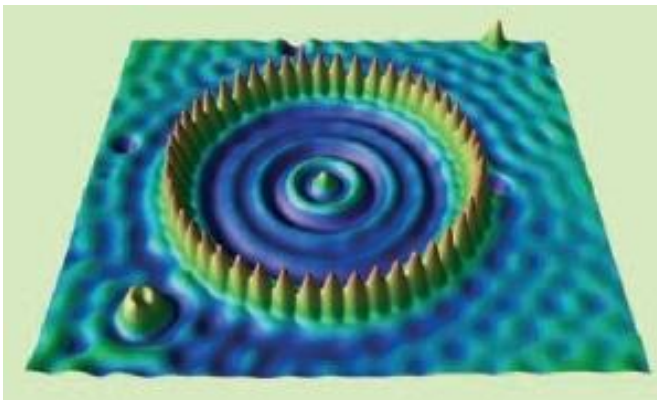
La figure suivante montre les différentes étapes de la construction du « Corral Quantique » assemblé avec 48 atomes de Fe sur Cu (111). Les ondes électroniques de surface sont confinées à l'intérieur du corral et forment « des vagues quantiques » dont l'amplitude augmente au fur et à mesure de l'assemblage de ce « nano-résonateur » d'ondes électroniques.

(Extrait du rapport "Nanosciences - Nanotechnologies" de l'Académie des Sciences et de l'Académie des Technologies - rst n° 18 - avril 2004)



(d'après les travaux de D. EIGLER et al., IBM Research Division, Almaden Research Center, California, USA)

Voici une image en couleurs qui montre sa forme définitive :

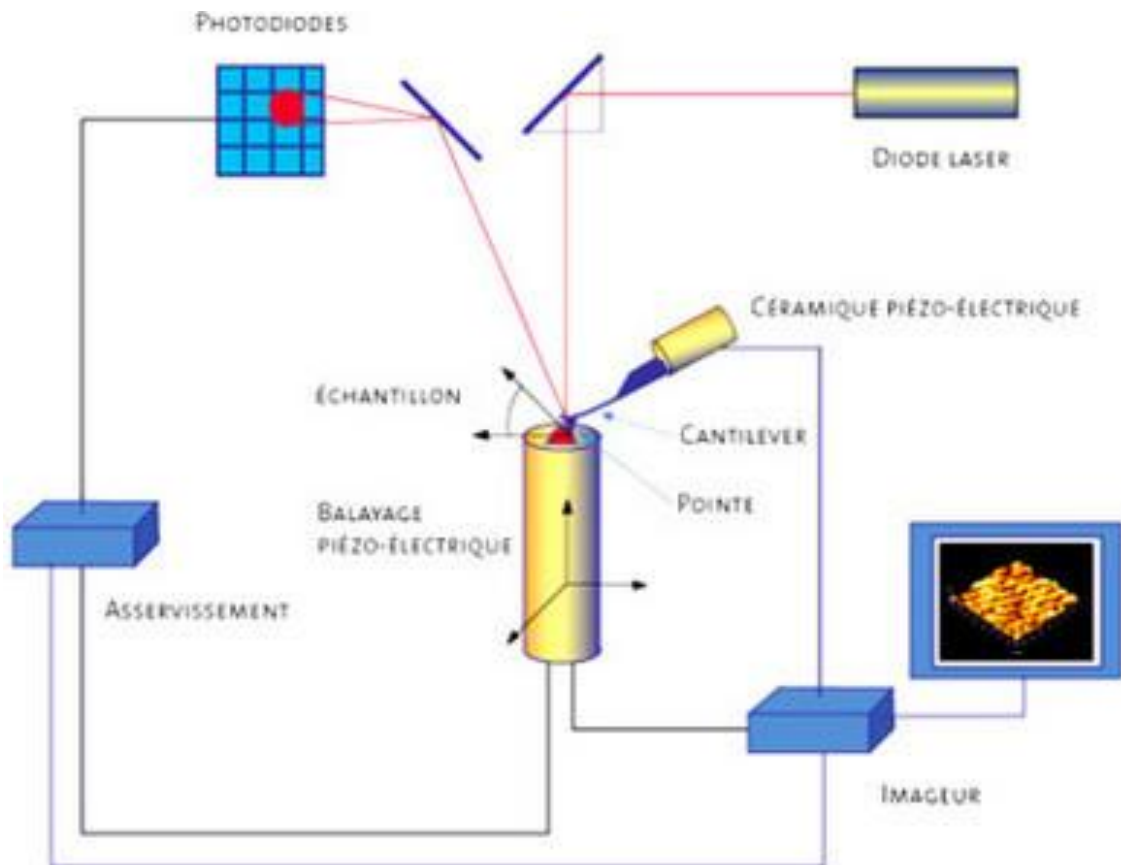


Corral quantique (Eigler, D. M et Schweizer, E. K. 1990. Positioning single atoms with a scanning tunneling)

Microscope à force atomique (AFM)

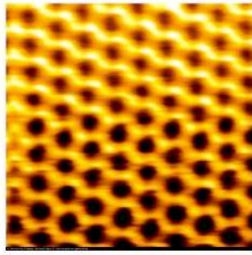
Mis au point en 1986, par G. Binnig (du laboratoire de recherche d'IBM de San José, Californie et de celui de Zurich), F. Quate (du centre de recherche de XEROX de Palo Alto, Californie) et C. Gerber (du laboratoire de recherche d'IBM de Zurich), le microscope à effet atomique (Atomic Force Microscope AFM) permet l'étude de surfaces de matériaux isolants à l'échelle atomique. Ce type de microscopie est essentiellement basé sur l'analyse d'un objet point par point au moyen d'un balayage via une sonde locale, assimilable à une pointe effilée. Le microscope à force atomique est un dérivé du microscope à effet tunnel, qui peut servir à visualiser la topologie de la surface d'un échantillon ne conduisant pas l'électricité. Le principe se base sur les interactions entre l'échantillon et une pointe montée sur un microlevier. La pointe balaie (ou scanne) la surface à représenter, et l'on agit sur sa hauteur selon un paramètre de rétroaction. Un ordinateur enregistre cette hauteur et peut ainsi reconstituer une image de la surface.

La différence entre l'AFM et le STM réside dans la mesure prise en compte pour la rétroaction utilisée : le STM utilise le courant tunnel, l'AFM utilise la déviation du levier, c'est-à-dire indirectement les forces d'interactions entre la pointe et la surface.

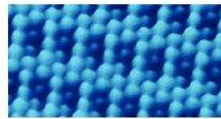


Principe du microscope à force atomique (AFM) © C. Reyraud

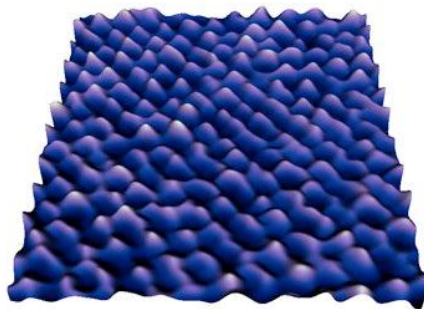
(http://www.cea.fr/technologies/les_microscopes/le_microscope_a_force_atomique_afm_simple_et)



Graphite

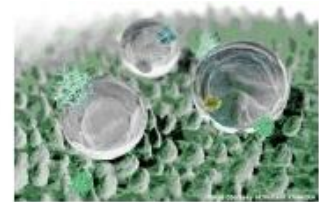
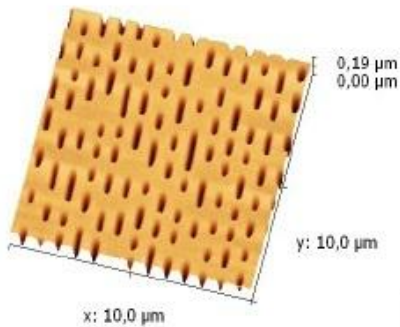


Silicium



Mica

Images prises par un microscope à force atomique

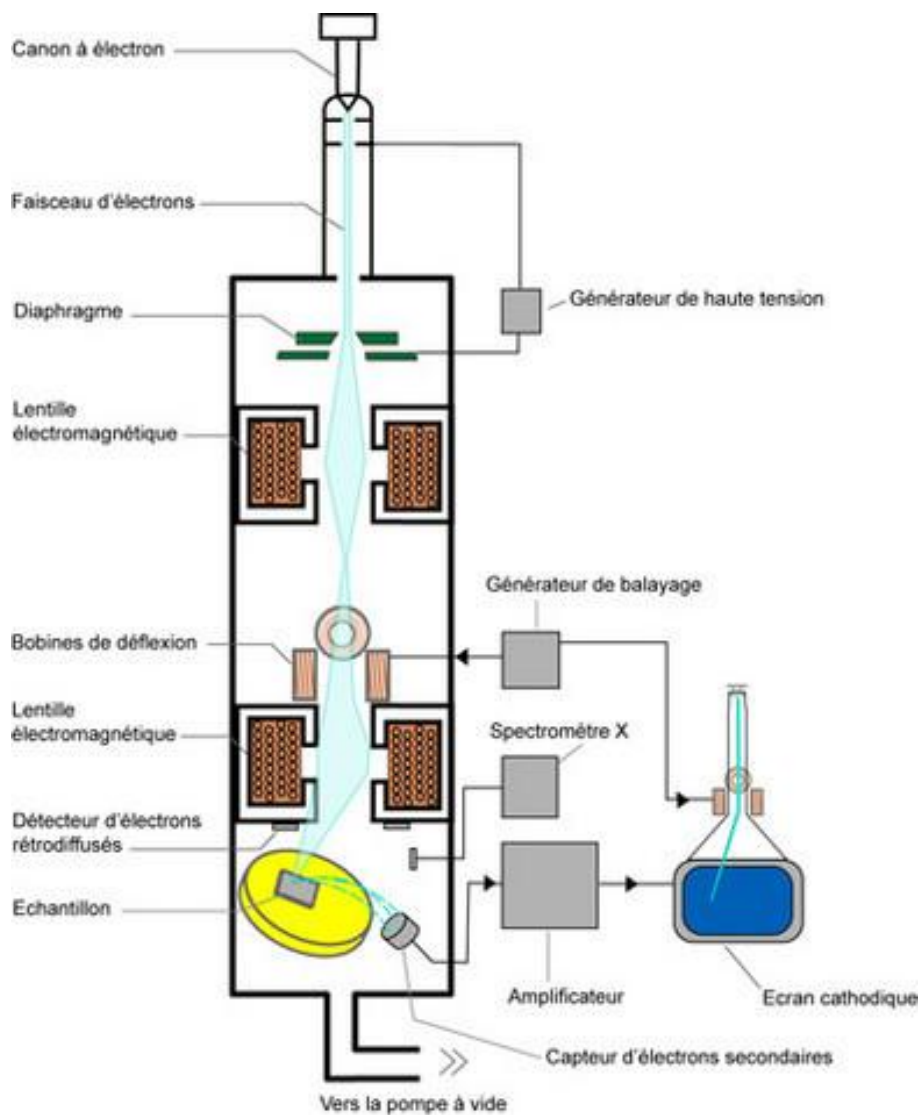


Topographie d'un disque DVD optique par microscopie AFM (image du CIME-Nanotech)

Le microscope électronique à balayage

Les microscopes électroniques remplacent le faisceau de lumière des microscopes optiques par un faisceau d'électrons. Il existe deux types de microscopes électroniques. Le microscope à balayage explore la surface de l'échantillon avec un faisceau très fin d'électrons et on détecte les électrons réémis par l'échantillon. La résolution est d'environ 1 nm.

Dans un microscope à transmission, le faisceau d'électrons traverse l'échantillon qui doit être relativement mince (de 20 à 200 nm). Cette technique permet de visualiser en volume. Les microscopes à transmission ont une résolution supérieure aux microscopes à balayage (0,17 nm).



Le microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage © C. Reyraud

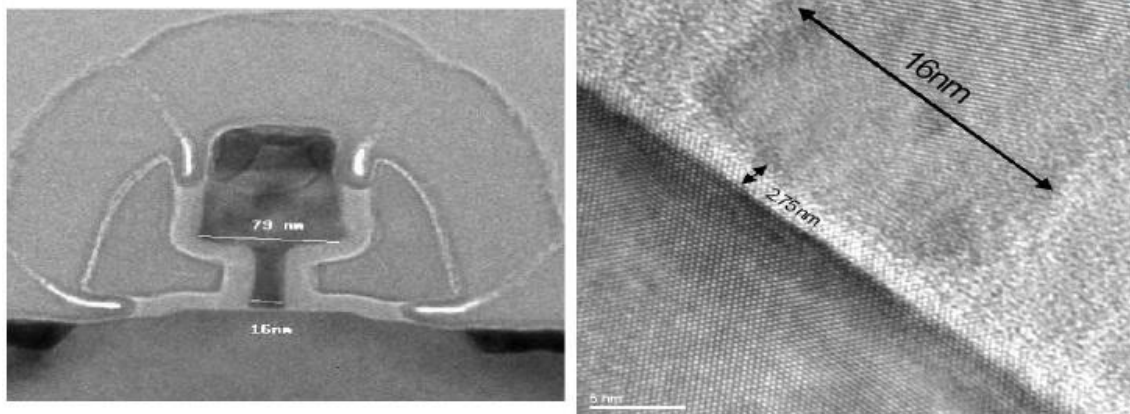
(http://www.cea.fr/technologies/les_microscopes/le_microscope_electronique_a_balayage_meb)

La photo ci-dessous est une image de nanofils d'oxyde de zinc sur saphir obtenue par le microscope électronique à balayage.



http://www.maxisciences.com/microscope/le-fonctionnement-du-microscope-electronique-a-balayage-meb-explique-en-video_art546.html

Les photos suivantes ont été prises à l'aide du microscope électronique à balayage : il s'agit d'un transistor de recherche de 16 nm de largeur de grille (noter la très faible épaisseur de l'isolant de grille, 2,75 nm, soit environ 9 atomes) (document ST Microelectronics).



Document extrait du rapport Nanosciences - Nanotechnologies de l'Académie des Sciences et de l'Académie des Technologies - rst n° 18 - avril 2004

2. Les technologies

Approche «top down»

- Certains microcomposants et microsystèmes voient progressivement leurs dimensions diminuer et se rapprocher de l'échelle du nanomètre suivant **la voie descendante "top-down"**, devenant ainsi des nanocomposants et des nanosystèmes.
- Depuis 30 ans, la fabrication des composants micro-électroniques est de plus en plus miniaturisée. Ainsi, tous les 18 mois le nombre des transistors sur la surface des puces électroniques double et la taille de leur grille diminue par un facteur 1,3. Cette tendance est connue sous le nom de la loi de Moore, du nom de son auteur, Gordon Moore, ingénieur chez Fairchild puis co-fondateur de la

société Intel (voir module 3). La surface moyenne d'un transistor, élément de base dans la fabrication de processeurs de plus en plus rapide, est de 1 micromètre carré et les motifs réalisés par lithographie atteignent 100 nm. Mais il semblerait que les problèmes techniques de la miniaturisation deviennent de plus en plus difficiles à résoudre.

Complément : Rapports de sénateurs sur la micro/nanoélectronique

D'après le rapport des sénateurs Jean-Louis Lorrain et Daniel Raoul établi le 6 mai 2004 et intitulé "**nanosciences et progrès médical**", la miniaturisation des composants semi-conducteurs arrive à une limite insurmontable : " « *Les extrapolations montrent qu'en 2010 ces dimensions seront de l'ordre de la dizaine de nanomètre. On pense alors que l'on aura atteint la limite ultime de cette approche. On devrait alors lui substituer une approche bottom-up en concevant des dispositifs où le transistor serait constitué d'un ensemble organisé d'un très petit nombre de molécules (voire une molécule unique). Le but ultime de cette électronique moléculaire serait de réaliser des circuits électroniques utilisant des molécules fonctionnalisées comme composants.* » "

(<http://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-off/i1588.asp>)

De même, le rapport du sénateur Claude Saunier établi le 25 juin 2008 sur "l'évolution du secteur de la micro/nanoélectronique", évoque les problèmes liés à la miniaturisation toujours accrue des composants électroniques, ainsi il apparaît que depuis 2003 « *la microélectronique est passée à l'échelle nanométrique en descendant sous la barre des 100 nm de la largeur de grille du transistor (noeud de 90 nm)* » " et que depuis septembre 2006 " « *la résolution des circuits intégrés est de 65 nm et au début de l'année 2008, elle est passée à 45 nm pour des microprocesseurs très rapides. Parallèlement, les résolutions à 32 nm et 22 nm sont déjà en préparation, tandis qu'en laboratoire, des largeurs aussi faibles que 6 nm ont été obtenues.* » "

(<http://www.senat.fr/rap/r07-417/r07-4178.html#toc73>)

Complément : Le transistor, composant de base des circuits intégrés

En décembre 1947, John Bardeen, Walter Houser Brattain et William Bradford Shockley (physiciens et ingénieurs des laboratoires Bell Téléphonie, co-lauréats du prix Nobel de physique en 1956) réalisaient le premier transistor en germanium. Ils développaient l'année suivante le transistor à jonction et la théorie associée. Au milieu des années 1950, les transistors sont réalisés en silicium (Si), qui reste aujourd'hui le semiconducteur généralement utilisé, vu la qualité inégalée de l'interface créée par le silicium et l'oxyde de silicium (SiO₂), qui sert d'isolant.

En 1958, Jack Kilby (physicien et ingénieur en électronique chez Texas Instruments, co-lauréat du prix Nobel de physique en 2000), invente le circuit intégré en fabriquant cinq composants sur le même substrat. Les années 1970 verront le premier microprocesseur d'Intel (2.250 transistors) et les premières mémoires. La complexité des circuits intégrés ne cessera de croître exponentiellement depuis (doublement tous les deux-trois ans, selon la « loi de Moore ») grâce à la miniaturisation des transistors.

Le transistor (de l'anglais transfer resistor, résistance de transfert), composant de base des circuits intégrés micro-électroniques, le restera mutatis mutandis à l'échelle de la nanoélectronique : adapté également à l'amplification, entre autres fonctions, il assume en effet une fonction basique essentielle : laisser passer un courant ou l'interrompre à la demande, à la manière d'un commutateur. Son principe de base s'applique donc directement au traitement du langage binaire (0, le courant ne passe pas ; 1, il passe) dans des circuits logiques (inverseurs, portes, additionneurs, cellules mémoire).

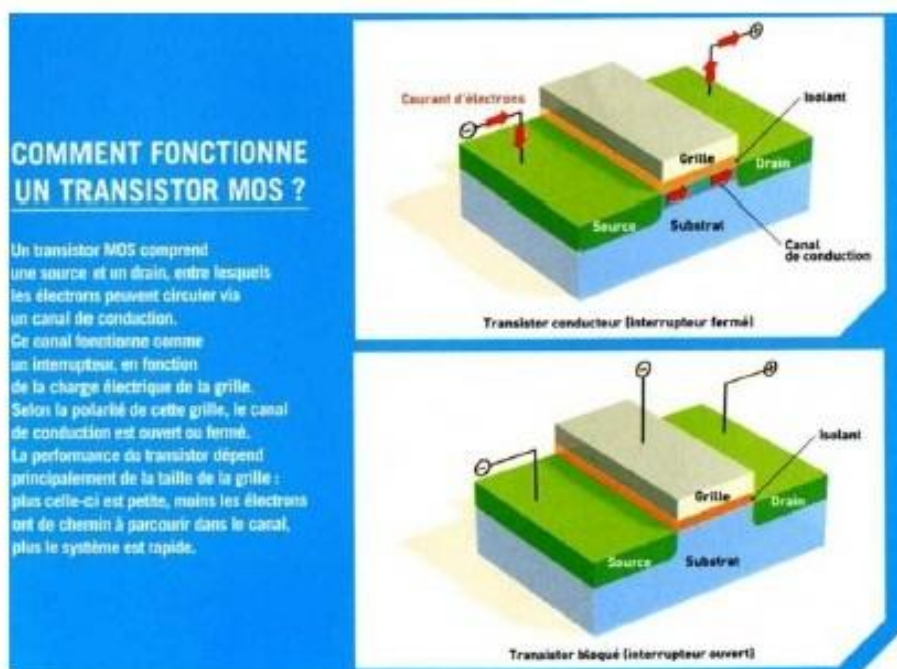
Le transistor, fondé sur le transport des électrons dans un solide et non plus dans le vide comme dans les tubes électroniques des anciennes triodes, est composé de trois

électrodes (anode, cathode et grille) dont deux servent de réservoirs à électrons : la source, équivalent du filament émetteur du tube électronique, le drain, équivalent de la plaque collectrice, et la grille, le « contrôleur ». Ces éléments ne fonctionnent pas de la même manière dans les deux principaux types de transistors utilisés aujourd'hui, les transistors bipolaires à jonction, qui ont été les premiers à être utilisés, et les transistors à effet de champ (en anglais FET, Field Effect Transistor). Les transistors bipolaires mettent en oeuvre les deux types de porteurs de charge, les électrons (charges négatives) et les trous (charges positives), et se composent de deux parties de substrat semiconducteur identiquement dopées (p ou n), séparées par une mince couche de semiconducteur inversement dopée.

L'assemblage de deux semiconducteurs de types opposés (jonction p-n) permet de ne faire passer le courant que dans un sens. Qu'ils soient de type n-p-n ou p-n-p, les transistors bipolaires sont fondamentalement des amplificateurs de courant, commandés par un courant de grille : ainsi dans un transistor n-p-n, la tension appliquée à la partie p contrôle le passage du courant entre les deux régions n. Les circuits logiques utilisant des transistors bipolaires, appelés TTL (Transistor Transistor Logic), sont plus consommateurs de courant que les transistors à effet de champ, qui présentent un courant de grille nul en régime statique et sont commandés par l'application d'une tension.

Ce sont ces derniers, sous la forme MOS (Métal oxyde semiconducteur), qui composent aujourd'hui la plupart des circuits logiques du type CMOS (C pour complémentaire). On parle alors de transistor MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Sur un cristal de silicium de type p, deux régions de type n sont créées par dopage de la surface. Appelées là aussi source et drain, ces deux régions ne sont donc séparées que par un petit espace de type p, le canal. Sous l'effet d'une tension positive sur une électrode de commande placée au dessus du semiconducteur et qui porte tout naturellement le nom de grille, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semiconducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain. Lorsqu'une tension négative est appliquée sur la grille, isolée électriquement par une couche d'oxyde, les électrons sont repoussés hors du canal. Plus la tension positive est élevée, plus la résistance du canal diminue et plus ce dernier laisse passer de courant.



Dans un circuit intégré, les transistors et les autres composants (diodes, condensateurs, résistances) sont d'origine incorporés au sein d'une « puce » aux fonctions plus ou moins complexes. Le circuit est constitué d'un empilement de couches de matériaux conducteurs ou isolants délimitées par lithographie. L'exemple le plus emblématique est le microprocesseur placé au coeur des ordinateurs et qui regroupe plusieurs centaines de millions de transistors (dont la taille a été réduite par 10.000 depuis les années 1960) et bientôt un milliard, ce qui amène les industriels à fractionner le coeur des processeurs en plusieurs sous-unités travaillant en parallèle !

Approche «bottom up»

- L'approche dite «**ascendante**» ou «**bottom up**» consiste à construire des nano-objets atome par atome ou à construire des molécules que l'on peut ensuite ajouter dans un système plus grand. L'assemblage fait de manière précise permet de maîtriser la structure. Pour cela des instruments spécifiques sont nécessaires comme le microscope à effet tunnel qui est capable non seulement de distinguer les atomes d'une surface, mais aussi de les déplacer un à un.
- Il s'agit pour les ingénieurs et scientifiques d'imaginer des façons de créer toutes sortes de produits ou de matériaux «**en partant de la base**», c'est-à-dire atome par atome à l'aide d'**usines nanométriques**. Cette approche présenterait l'avantage d'une flexibilité quasi infinie, permettant de mettre au point toutes sortes de substances, d'objets, de dispositifs, d'appareils ou de matériaux en procédant atome par atome.

Les techniques de lithographie

On peut également fabriquer des "nanos" en utilisant de nouvelles variantes des techniques de lithographie (lithographie extrême ultraviolet, lithographie électronique, nano-impression). Ces nouvelles techniques repoussent sans cesse la précision de fabrication des nanostructures. Ceci est réalisé dans des conditions particulières de pression relative, de température, d'humidité et de poussière dans ce qu'on appelle des salles blanches pour signifier l'absence d'impuretés venant de l'extérieur.



Salle blanche de l'institut FEMTO-ST (<http://www.femto-st.fr/fr/Agenda/agenda-2009/Inauguration-de-la-salle-blanche-2-octobre-2009/>)

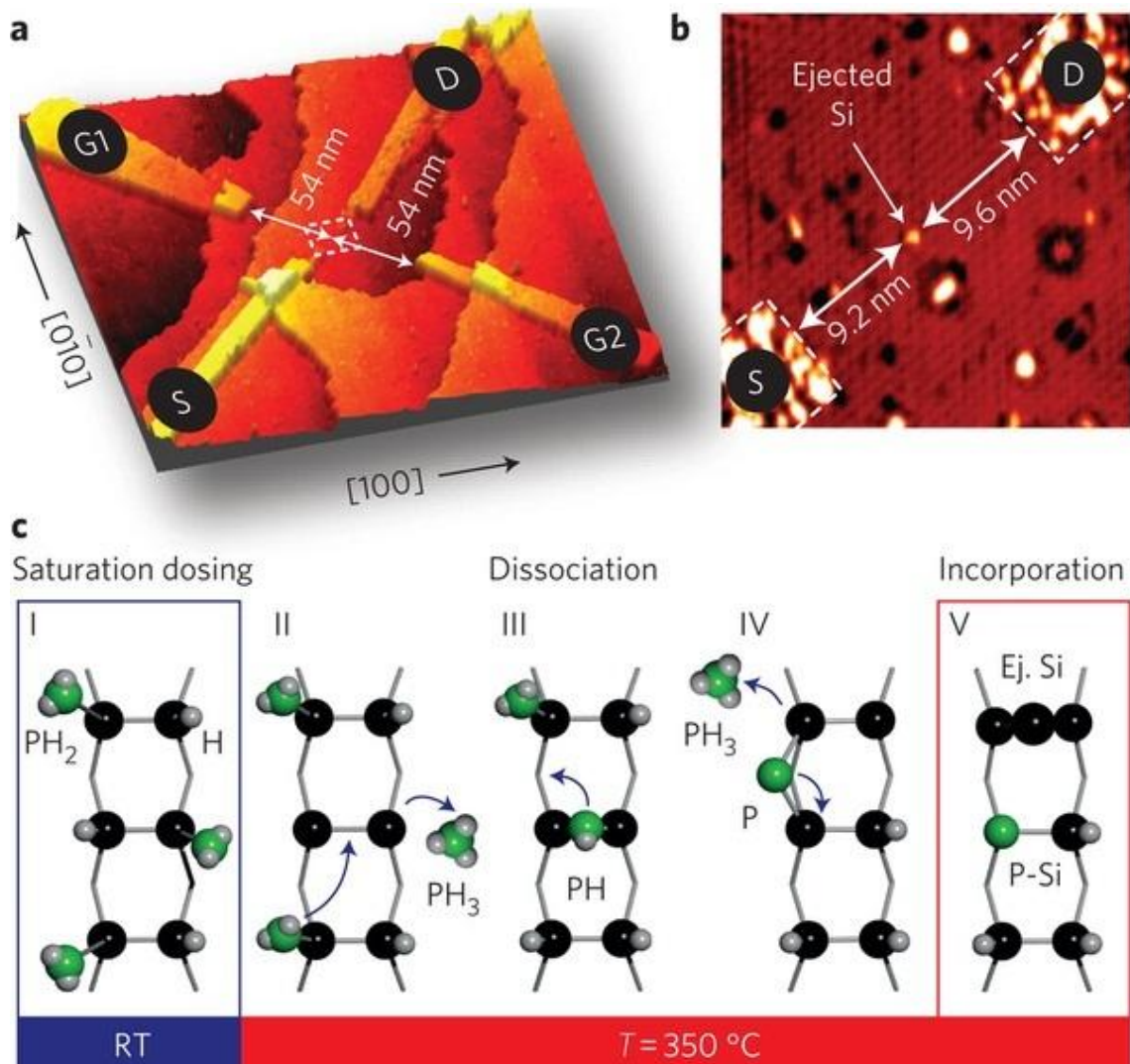


Salle Blanche TEMIS, Zone Lithographie (<http://www.femto-st.fr/fr/Centrale-de-technologie-MIMENTO/Ressources-disponibles/Nanotechnologies/Lithographie-electronique>)

Dernière nouveauté : Transistor à un seul atome (fin 2011)

Fin 2011, des physiciens australiens, coréen et américains, des universités de Purdue et de New South Wales, ont construit un transistor à partir d'un seul atome de phosphore incorporé dans un cristal de silicium.

<http://www.nature.com/nnano/journal/v7/n4/full/nnano.2012.21.html>



Single-atom transistor based on deterministic positioning of a phosphorus atom in epitaxial silicon (Revue "Nature nanotechnology", <http://www.nature.com/nnano/journal/v7/n4/full/nnano.2012.21.html>)

a, Perspective STM image of the device, in which the hydrogen-desorbed regions defining source (S) and drain (D) leads and two gates (G1, G2) appear raised due to the increased tunnelling current through the silicon dangling bond states that were created. Upon subsequent dosing with phosphine, these regions form highly phosphorus-doped co-planar transport electrodes of monatomic height, which are registered to a single phosphorus atom in the centre of the device. Several atomic steps running across the Si(100) surface are also visible.

b, Close-up of the inner device area (dashed box in a), where the central bright protrusion is the silicon atom, which is ejected when a single phosphorus atom incorporates into the surface.

c, Schematic of the chemical reaction to deterministically incorporate a single phosphorus atom into the surface. Saturation dosing of a three-dimer patch (I) at room temperature (RT) followed by annealing to 350 °C allows successive dissociation of PH₃ (II–IV) and subsequent incorporation of a single phosphorus atom in the surface layer, ejecting a silicon adatom in the process (V).

(Extrait de la revue "Nature nanotechnology" <http://www.nature.com/nnano/journal/v7/n4/full/nnano.2012.21.html>)

3. Nouveaux domaines technoscientifiques

La Spintronique

Albert Fert (directeur scientifique à l'unité mixte de physique CNRS/Thales associée à l'Université Paris-Sud et colauréat du Prix Nobel de physique 2007) a ouvert la voie à une nouvelle électronique, la spintronique, qui n'utilise plus la charge des électrons pour véhiculer l'information mais leur spin.

"Le spin, moment magnétique de l'électron, peut prendre deux valeurs seulement. Il peut donc être utilisé pour stocker une information binaire. Le principe de la spintronique est simple : des couches minces de matériaux magnétiques, placées sur le trajet des électrons laissent passer une certaine orientation de spin et pas l'autre."*(<http://www.cnrs.fr/>)*

Thales est un groupe spécialisé sur les marchés de la défense, de la sécurité, de l'aérospatial, des technologies de l'information et du transport terrestre (*[http://www.thalesgroup.com/Group/A_propos_de_Thales\(2\)/](http://www.thalesgroup.com/Group/A_propos_de_Thales(2)/)*).

A l'origine de Thales, le développement du groupe "Thomson-CSF" (CSF pour "Compagnie générale de la télégraphie sans fil"), par croissance interne et par acquisitions, notamment le rachat en juin 2000 de la société britannique "Racal Electronics" qui modifie en profondeur le domaine d'activités de ce groupe, notamment les marchés civils des technologies de l'information, et des télécommunications mobiles. En juillet 2000, une nouvelle organisation en trois pôles est mise en place, autour de la défense, l'aéronautique, et des technologies de l'information et des services. En décembre 2000, Thomson-CSF devient Thales. (*<http://fr.wikipedia.org/wiki/Thales>*)

Magnetic Random Access Memory MRAM

Une des premières applications importantes de la spintronique est la conception de mémoires MRAM (Magnetic Random Access Memory) qui vont exploiter l'effet tunnel dans les jonctions magnétiques. Ces MRAM sont aussi rapides que les RAM classiques avec un énorme avantage : l'information est permanente car elle est due au magnétisme. (*<http://www.cnrs.fr>*)



La photonique

La photonique utilise différents semi-conducteurs pour fabriquer des dispositifs qui émettent, détectent ou manipulent la lumière. Son objectif est d'obtenir des circuits comparables aux circuits électroniques mais dans lesquels les photons auraient le rôle des électrons, les calculs s'effectuant alors à la vitesse de la lumière.

Les MEMS

Les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems ou Systèmes micro-électro-mécaniques) sont des dispositifs de taille comprise entre 1 et 300 microns capables de détecter ou de générer des forces mécaniques, électromécaniques, thermiques ou acoustiques. Apparus dans les années 1980, ils sont à l'origine d'importants succès industriels et commerciaux comme, par exemple, les capteurs de choc des airbags ou les têtes d'injection des imprimantes à jet d'encre.

Les MEMS sont donc des microsystèmes qui transposent à la mécanique les technologies de miniaturisation performantes de l'électronique.

Le Quantronium

Le quantronium est un composant électronique quantique, c'est-à-dire un composant qui va utiliser des effets quantiques pour réaliser des circuits électroniques plus performants.

D. Définition par les politiques de recherche

« D'autres définitions des nanosciences et nanotechnologies mettent l'accent sur les questions :

- **d'allocation de ressources (subventions pour la recherche ou pour le développement industriel),**
- d'adhésion du public et d'acceptation sociale des produits,
- et de contraintes (standardisation des produits, législation, organisation des programmes de recherche et développement).

La définition est donc stratégique pour les acteurs » (Vinck, 2009)

En France

- En 1999, lancement du "**Réseau de Recherche en Micro et Nanotechnologies**" (RMNT) piloté par le Ministère de la recherche pour favoriser la coopération entre industrie et laboratoires publics dans le domaine des nanotechnologies.

Aux Etats-Unis

- A l'automne 2000, lancement du programme "**National Nanotechnology Initiative**" (NNI) avec un budget de 450 millions de dollars pour l'année 2001.

C'est un programme interministériel mis en place pour coordonner la recherche dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies entre les divers organismes publics de financement de la recherche & développement.

- Depuis la création de la NNI en 2001, l'investissement total du gouvernement américain s'élève à 12 milliards de dollars (en dix ans, 2001-2010).
- Le budget de la NNI pour l'année 2012 s'élève à 1,64 milliards de dollars, ce qui représente le 1/3 du budget de la Défense.
- En mars 2002, l'US Army et le Massachusetts Institute of Technology (MIT) fondent l'**Institute for Soldiers Nanotechnologies** (ISN).
- La **National Science Foundation** américaine a joué un rôle important dans le financement des recherches en nanotechnologies, en particulier en créant des centres régionaux axés sur des aspects spécifiques de cette discipline.
- Pour 2012, le site de la NSF fait état d'une demande de budget de plus de 2,1 milliards de dollars.

En Europe

- L'Union Européenne consacre 0,5% de son budget total aux "nanos". Ainsi, dans le cadre des recherches financées par l'UE, le 6ème programme-cadre pour la recherche et le développement PCRD (qui a constitué le cadre général des activités de l'UE dans le domaine de la science, de la recherche et de

l'innovation de 2002 à 2006) comprenait un budget de 1,3 milliards d'euros aux nanos.

(http://europa.eu/legislation_summaries/research_innovation/general_framework/i23012_fr.htm)

- Prévision pour le 7ème PCRD (de 2007 au 2013) : 3,5 milliards d'euros seront consacrés aux "nanos".
- Officiellement inauguré le 2 juin 2006 à Grenoble, le complexe scientifique européen **MIcro NAno TEChnologies "MINATEC"** est consacré aux nanotechnologies. Il réunit au total 4 200 personnes (2400 chercheurs, 1200 étudiants et 600 industriels). Il est actuellement le premier centre européen consacré aux nanotechnologies, et le troisième au niveau mondial.
- Minatec représente un investissement de 150 millions d'euros entre 2002 et 2005.

Exemple : CIME Nanotech

Par exemple, le budget annuel de la plate-forme CIME Nanotech (Centre Interuniversitaire de Microélectronique et Nanotechnologies), sur le site de "MINATEC", s'élève à 3 millions d'euros par an (hors salaires), dont près de 0,6 million d'euros en investissement. <http://www.minatec.org/recherche/plate-forme-technologique-formation-recherche-en-nanotechnologies>

Au Japon

- Le Ministère japonais de l'éducation, de la culture, des sports, de la science et de la technologie a affecté quelque 250 millions de dollars à la recherche dans diverses branches des nanotechnologies.

Au Royaume-Uni

- La Royal Society britannique signale que, au niveau de l'Union européenne, le montant total du financement est de l'ordre d'un milliard d'euros, le Royaume-Uni y consacrant pour sa part actuellement quelque 45 millions de livres chaque année.

Dans d'autres pays

- La Chine, l'Iran, le Brésil et Israël ont tous bien fait savoir que les nanotechnologies figuraient parmi les priorités de la recherche nationale en sciences et technologies.

Remarque

Au regard des investissements colossaux et des sommes déjà consacrées dans les recherches sur les "nanos" dans la dernière décennie et dans différents pays, on peut en comprendre que les politiques de recherche dans ces pays se sont orientées dans une même dynamique de développement des "nanos".

C'est une preuve de l'intérêt majeur que suscitent les "nanos" pour différents acteurs (UE, NSF, Militaires, industriels, ...) et dans des domaines industriels multiples.

De nombreux produits utilisant des "nanos" sont déjà sur le marché.

Exemples de différents secteurs impliqués par les recherches

1. **Réalisation de capteurs pour l'imagerie** : « *Nanodiamant : applications en bio-imagerie et nanosciences - François Treussart (ENS Cachan), du Laboratoire de photonique quantique et moléculaire (ENS Cachan/CNRS)* ».

2. **Réalisation des "nanoelectromechanical systems" pour système nanoélectromécanique tels que les airbags de voiture, certains vidéo-projecteurs et la manette de la wii** : « Comment on mesure la masse d'un atome avec un NEMS (nano-electro mechanical system) et à quoi cela sert - Anthony Ayari (CNRS), du laboratoire de physique de la matière condensée (CNRS/ Université Claude Bernard). »
3. **Réalisation d'accumulateurs pour le stockage de l'énergie** : « L'intérêt des matériaux nanostructurés pour les accumulateurs lithium - Frédéric Le Cras (CEA-Liten, Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) ».

E. Définition par les productions

Pour la **National Nanotechnology Initiative** (NNI), l'objectif du champ des nanosciences et nanotechnologies serait de travailler à la mise au point de technologies à l'échelle atomique, moléculaire et macromoléculaire, dans une fourchette comprise entre 1 et 100 nm environ, pour obtenir une connaissance fondamentale des phénomènes et des matériaux à l'échelle nanométrique ainsi que **pour concevoir et mettre à profit des structures, des dispositifs et des systèmes ayant des propriétés et des fonctions nouvelles en raison de leur petite taille ou de leur taille moyenne.** (NSF, 2000 et 21st Century Nanotechnology R&D Act)

Attention

De nouvelles propriétés sont susceptibles d'être employées pour de nouvelles applications. D'où l'intérêt des nanotechnologies dans le domaine industriel et manufacturier pour la fabrication d'**objets**, la mise en œuvre d'**applications** dans plusieurs **secteurs** industriels.

1. Déjà 1317 produits sur le marché en mars 2011

Raquettes de tennis, tests de grossesse, mémoires flash des lecteurs mp3 ou crèmes solaires, la plupart des produits de consommation "nano" sont basés essentiellement sur des effets de surface, sur la modification de la résistance des matériaux ou sur l'accroissement de la capacité de pénétration des principes actifs.

<http://www.nanoceo.net/nanoproducts>



La recherche sur les effets de surface a par exemple conduit à la fabrication d'objets à texture rugueuse, imperméable, "easy to clean", "Lotus-effect", anti-trace de doigt, autonettoyante, anti-graffiti, anti-microbien, anti-brouillard, etc.

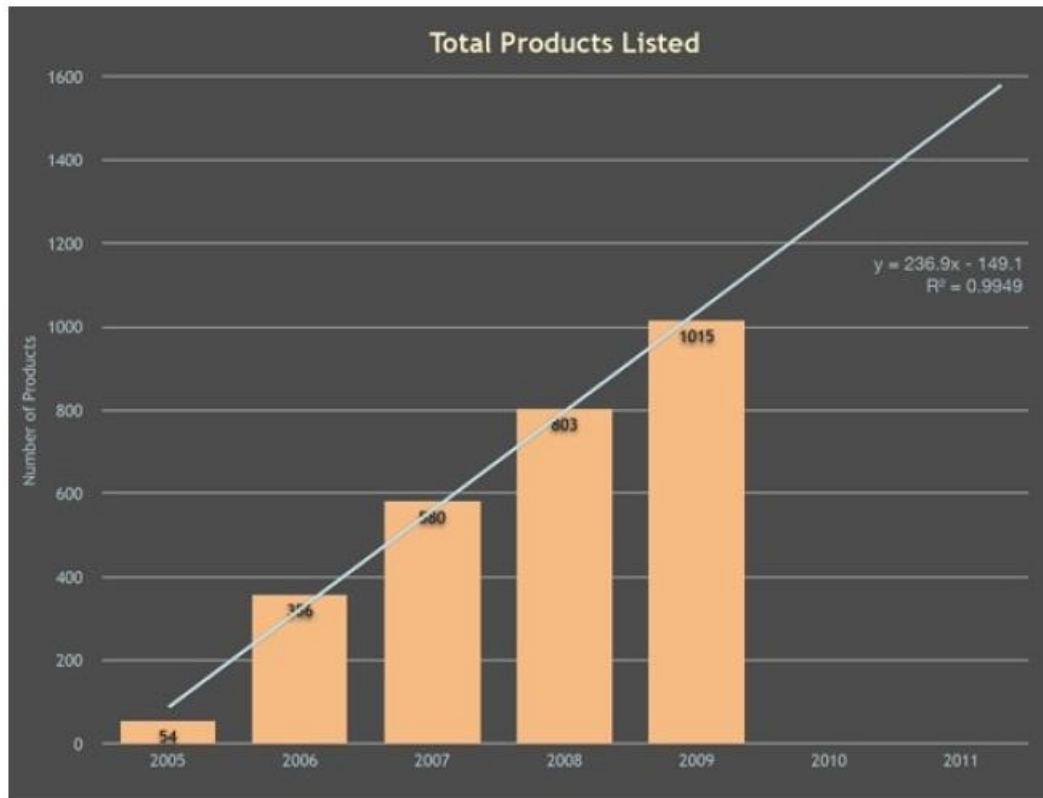
Exemple

En ce qui concerne les surfaces easy to clean, par exemple, l'objectif est de parvenir à modifier les propriétés du verre, du textile ou du ciment, de telle sorte que ceux-ci absorbent moins facilement les autres matières, tout en conservant leur propriété de transparence, de douceur ou de résistance.

a) L'inventaire du Project on Emerging Nanotechnologies

Il semblerait que c'est l'inventaire le plus connu et le plus fourni : l'inventaire "**Consumer Products**" du think tank américain Project on Emerging Nanotechnologies (PEN) du Woodrow Wilson Institute. Dans sa dernière mise à jour de **mars 2011**, l'inventaire recensait **1317 produits** sur le marché mondial, dont **367 au niveau européen** : une nette majorité concernait les domaines des produits de beauté / parapharmacie, de l'habillement et des cosmétiques.

Nombres de produits manufacturés par années



<http://www.nanoceo.net>

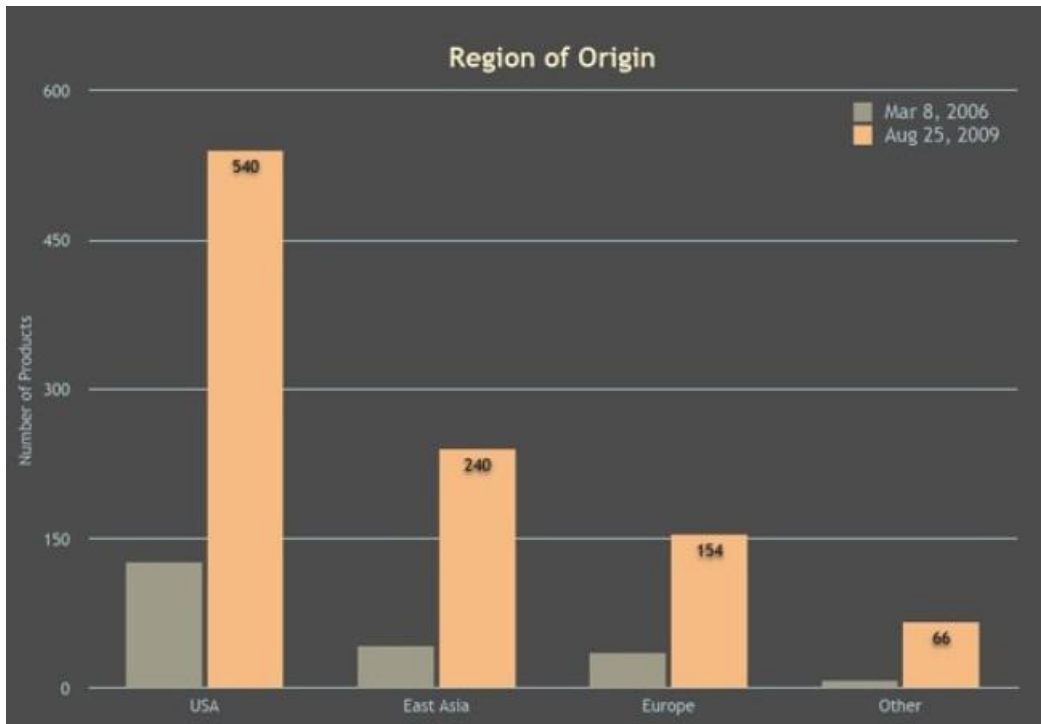
En 2012, le marché des produits finis fabriqué avec des nanotechnologies représente un marché de 1000 milliards de dollars.

Exemple de produits nanotechnologiques commercialisés

- Fart à skis Nanowax Cerax
- Veste de ski imperméable Franz Ziener (traitement Nano-Tex)
- Vêtements infroissables et intachables par traitement Nano-Care
- Crème de soin pour la peau à taux de pénétration élevé L'Oréal
- Appareil photographique Kodak OLED (à diodes organiques luminescentes)
- Revêtement antiréfl échissant Nanofi Im pour lunettes de soleil de haute protection
- Écran solaire Z-COTE
- Raquette de tennis à nanotubes Babolat
- Balles de tennis nanotech de InMat
- Semelles de production thermique Aerogel Shockjock
- Matelas lavable Simmons (traitement Nano-Tex)
- Clubs de golf Maruman & Co. utilisant des « fullerènes de titane »
- Balles de golf Nanodynamics
- « Soins de la peau personnalisés » Bionova
- Pansements Nucryst contre les brûlures, recouverts d'une couche de « nanoargent »
- Désinfectant (nanoémulsion) de qualité militaire EcoTrue de chez Envirosystems

- Aérosol superhydrophobique Mincor de chez BASF destiné à rendre imperméables les matériaux de construction
- Aérosol pour fenêtres ClarityDefender de chez Nanofilm
- Crème contre les douleurs articulaires et musculaires Flex Power (utilisant des « liposomes de 90 nm »)
- Adhésif dentaire (nanohydroxyapatite) de 3M

Produits par régions d'origine

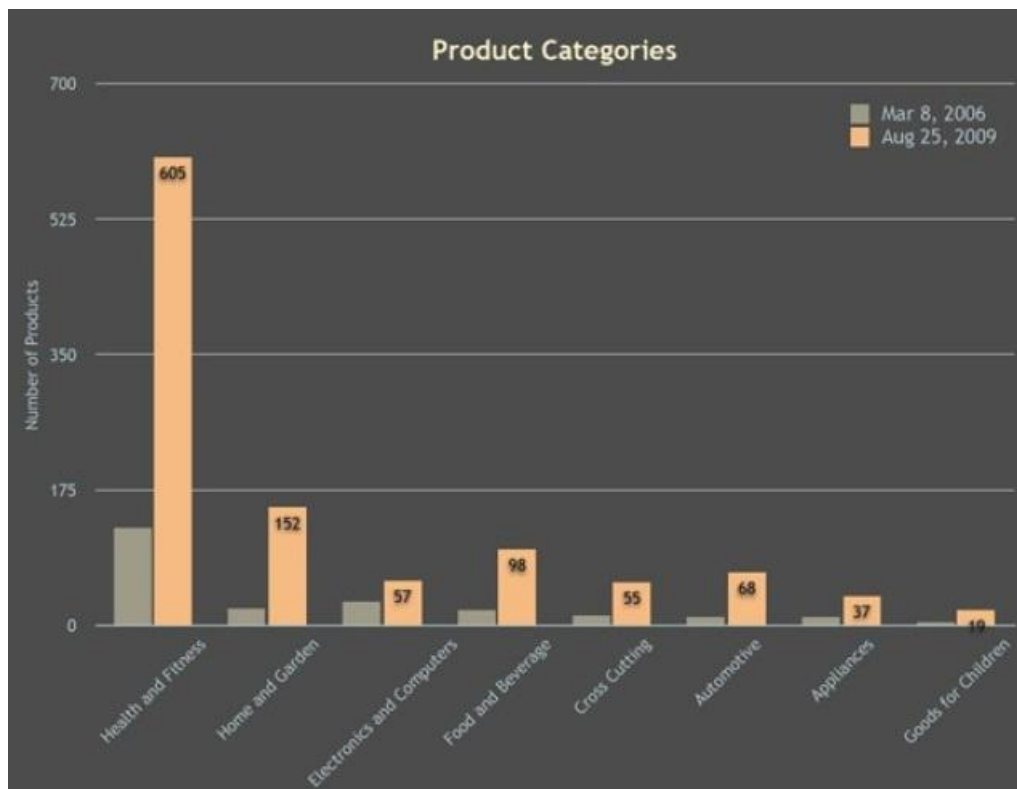


Catégories de produits commercialisés

Après plus de vingt années de recherche fondamentale et appliquée, les nanotechnologies sont de plus en plus utilisées dans le domaine commercial. Actuellement on trouve les nanomatériaux dans l'électronique, dans les cosmétiques, dans les produits de l'automobile et dans le domaine médical. Il est difficile de savoir combien de produits «nano» sont disponibles auprès des consommateurs et sur le marché des marchandises ce qui pourrait être appelé "nano". Bien que n'étant pas exhaustif, l'inventaire proposé donne la liste de plus de 1000 produits fabriqués et disponibles identifiés comme produits de consommation à base de nanotechnologies actuellement sur le marché.

(<http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>)

Plusieurs catégories de produits nanotechnologiques : transports, électronique, textile, alimentation, cosmétiques ...



Catégories et sous-catégories des produits "nanos" de consommation :

- Appliances

Batteries

Heating, Cooling and Air

Large Kitchen Appliances

Laundry & Clothing Care

Automotive

Exterior

Maintenance & Accessories

Watercraft

- Cross Cutting

Coatings

- Electronics and Computers

Audio

Cameras and Film

Computer Hardware

Display

Mobile Devices and Communications

Television

Video

- Food and Beverage

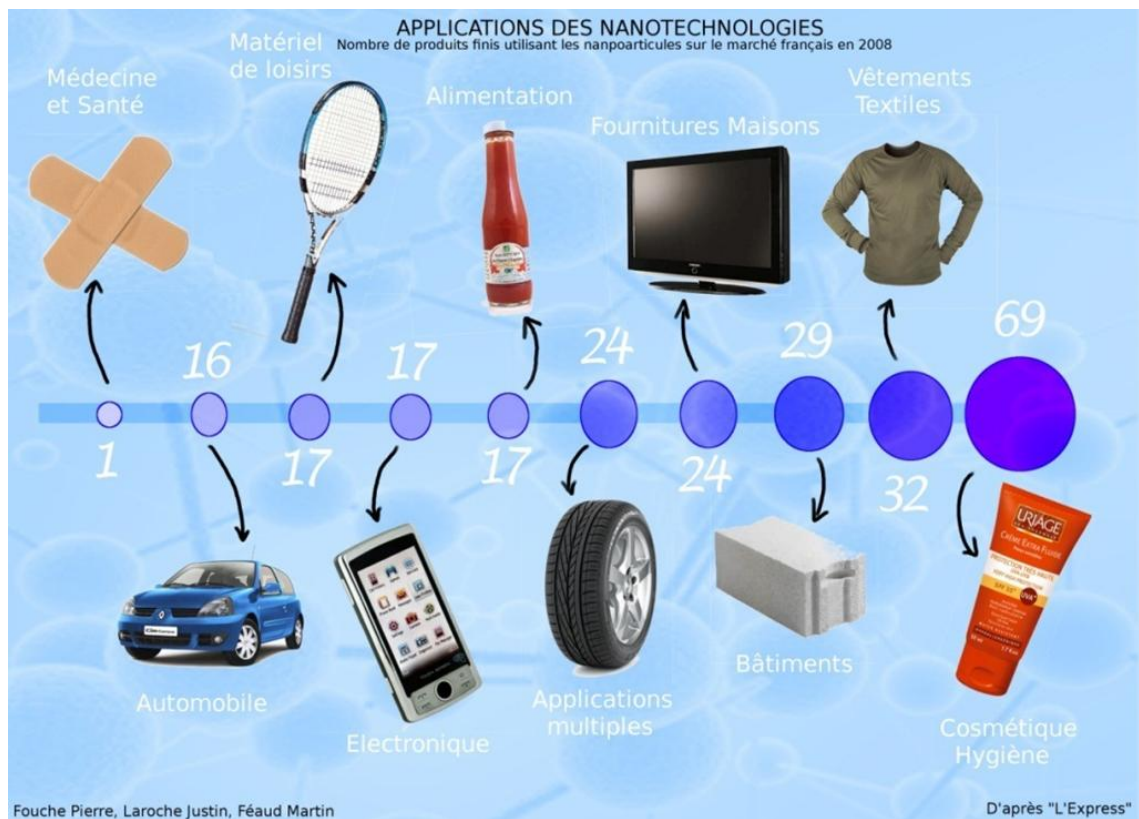
Cooking

Food

Storage
 Supplements
 • Goods for Children
 Basics
 Toys and Games
 • Health and Fitness
 Clothing
 Cosmetics
 Filtration
 Personal Care
 Sporting Goods
 Sunscreen
 • Home and Garden
 Cleaning
 Construction Materials
 Home Furnishings
 Luggage
 Luxury
 Paint
 Pets

b) Secteurs industriels

Nombreux sont les secteurs qui s'intéressent aux nanotechnologies allant du domaine industriel au domaine médical.



Quelques secteurs des nanotechnologies

Exemple : Dans le domaine du textile

- On retrouve de nombreuses applications dans le domaine du textile avec la création de vêtements anti-bactériens composés de nanoparticules d'argent.
- En 2008, l'institut français de l'habillement a recensé plus de 1950 références de nanoparticules et près de 140 fabricants.

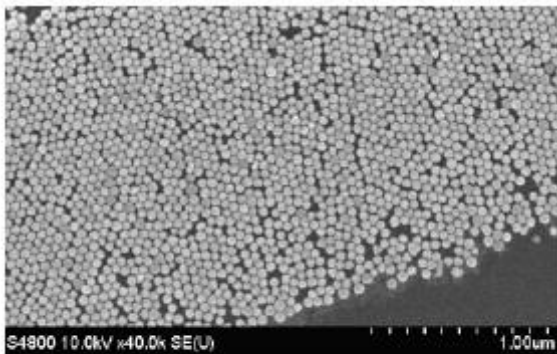
Exemple : Dans le domaine automobile

- Le domaine des automobiles semble aussi très impliqué dans la mise en œuvre, la fabrication et l'utilisation des nanotechnologies.
- Depuis 2003, la Mercedes est par exemple recouverte d'une peinture anti-éraflure constituée de nanoparticules de titane, d'oxyde de silicium ou de céramique.

Complément

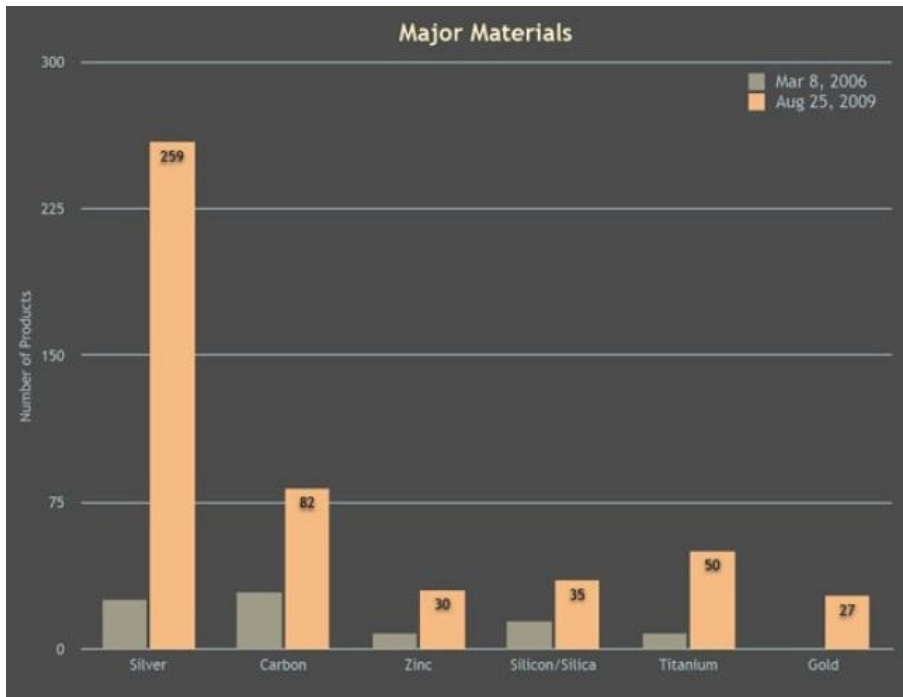
La société "Nanomade Concept" propose des plateformes technologiques de diagnostics à base de composants nanos s'adressant aux professionnels de la santé, de l'agro-alimentaire, de la défense et de la communication.

(http://www.cnrs.fr/dire/creation-entreprises/docs/2009A_NANOMADE.pdf)



© Assemblée de Nanoparticules d'or pour réalisation de Nano-jauges de contraintes ou capteurs innovants (collaboration Nanomade-LPCNO)

Principaux matériaux utilisés



Dans les produits cosmétiques

Pour la crème solaire "translucide", on utilise l'oxyde de zinc ou l'oxyde de titane, qui sont des absorbeurs d'ultra-violet connus depuis longtemps, mais qui ont pour fâcheuse tendance de laisser des traces blanches sur la peau après application. Leur "avantage" à l'échelle nano est qu'ils n'absorbent plus la lumière visible, mais seulement les UV. Certaines marques de cosmétique proposent également des crèmes à base de nanoparticules, ou dont les principes sont nano-encapsulés, en mettant en avant le fait que cela améliore leur pouvoir couvrant ou pénétrant (les particules nano-encapsulées dans des liposomes pénètrent plus facilement la barrière cutanée).

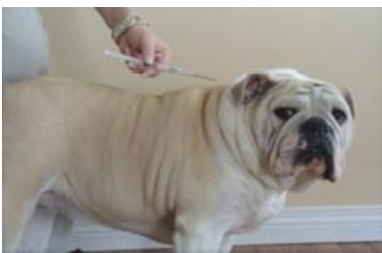


Nano-dispositifs électroniques

La réduction de taille des dispositifs électroniques à l'échelle des "nanos", permet de nombreuses applications dans divers domaines.

Exemple : Traçabilité vétérinaire

Implantation sous-cutanée de puces pour la géolocalisation des animaux.



Exemple : Suivi des déplacements

Puces RFID dans les cartes de transport et les passeports pour l'enregistrement personnalisé des déplacements des individus.



Passeport avec puce RFID



Carte de transport avec puce

Exemple : Gestion des stocks

Puces RFID dans les produits commercialisés pour la gestion des stocks, des prix, des paiements et la sécurité des produits.





Exemple : Imagerie médicale

Les implants



Recherche d'identité



Exemples dans le domaine alimentaire

- Plastiques et emballages alimentaires

Additifs alimentaires :

- Le dioxyde de silice (SiO_2) est autorisé comme additif alimentaire (E 551).
- Des silices de taille nanométrique sont utilisées depuis longtemps dans l'alimentation pour leurs propriétés rhéologiques sous le même numéro d'additif (silices précipitée et silices pyrogénées par exemple).
- Le dioxyde de titane (TiO_2) est autorisé comme additif alimentaire (E171).

Alimentation :

- Hydrosol d'argent
- Lycopène nanoparticulaire
- Nitrite de titane (TiN) nanoparticulaire

Sources :

« Nanotechnology consumer products Inventory » <http://www.nanotechproject.org/>

« Project on emerging nanotechnologies de Woodrow Wilson International Center for Scholars » <http://www.nanotechproject.org>

« Nanotechnologies for Food and Beverages (2007) »
<http://www.researchandmarkets.com/reports/357299>

Exemple : Le lycopène

Dès 2005, le lycopène nanoparticulaire issu de la synthèse chimique par BASF a fait l'objet d'une notification comme ingrédients de diverses denrées alimentaires commercialisées aux USA.

(<http://www.corporate.basf.com/en/innovationen/felder/nanotechnologie>)

Il est difficile d'obtenir des informations sur l'usage des "nanos" dans l'industrie alimentaire que ce soit au niveau des produits ou des procédés de fabrication.

D'après l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), seules certitudes, est qu'aucun procédé de traitement des eaux utilisant des nanoparticules n'a été mis sur le marché français et aucun

médicament vétérinaire ou produit phytosanitaire relevant des nanotechnologies n'a été soumis à autorisation en Europe.

(<http://www.anses.fr/index.htm>)

En résumé ?

Le domaine des "nanos" touche plusieurs secteurs industriels qui se trouvent donc tous en compétition dans le même marché au lieu d'être organisés en branches d'activités indépendantes (cosmétique, automobile, électronique, mécanique, alimentation, ...)

2. Dans le domaine médical

Les trois principales applications des nanotechnologies dans le domaine médical sont la vectorisation des médicaments, les puces ADN et l'utilisation des quantum dots en bio-imagerie.

Définition

La vectorisation des médicaments, vise l'administration spécifique de la dose nécessaire de substance active au niveau de l'organe, du tissu ou de la cellule malade.



Vecteurs de médicaments (<http://www.cnrs.fr/>)

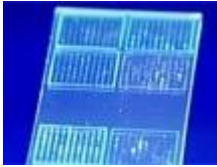
La vectorisation des médicaments se base sur le principe d'adressage, qui consiste à encapsuler le médicament dans un nanovecteur (le plus souvent un liposome), de telle sorte que celui-ci ne délivrerait son principe actif qu'après avoir pénétré la cellule malade, et non pas durant son "cheminement" via la circulation sanguine. L'objectif de l'adressage est donc une plus grande maîtrise de l'index thérapeutique, de manière à réduire la toxicité des médicaments, ainsi que les effets secondaires ou simplement à améliorer leur efficacité.

Les puces à ADN sont utilisées pour diagnostiquer des cancers. Les quantum dots servent de marqueurs en bio-imagerie.

Les Biopuces

A l'interface entre électronique et biologie, une des applications importantes des nanotechnologies à la biologie et à la médecine est la mise au point de biopuces. Les premières biopuces furent les puces à ADN, mais aujourd'hui elles se sont diversifiées : puces à protéines, puces à cellules, véritables laboratoires sur puce....

Ces biopuces visent à permettre de détecter des molécules ou de réaliser des analyses sur de très petites quantités de produits.



Biopuces (<http://www.cnrs.fr/>)

Complément : Ingénierie tissulaire

L'ingénierie tissulaire est la science qui vise à reconstruire les tissus biologiques : peau, cornée, cartilage... Les nanotechnologies sont destinées à permettre une nanostructuration des matériaux utilisés à l'échelle du vivant. Le principe est de construire des échafaudages pour guider la croissance des cellules afin de mimer les tissus. Ces échafaudages biocompatibles sont ensuite destinés à s'autodétruire quand le tissu serait régénéré.



Ingénierie tissulaire (<http://www.cnrs.fr/>)

C'est sans doute dans le domaine médical que les espoirs et utopies sont les plus prolifiques, cependant on est encore loin, même très loin des tissus autorégénérants ouvrant les voies de l'immortalité, ou des nanorobots qu'il suffirait d'ingérer pour une aventure intérieure thérapeutique.

3. Dans le domaine militaire

On sait que les nanotechnologies intéressent l'Armée (un quart du budget colossal consacré à la recherche dans les nanotechnologies aux Etats-Unis est consacré à la défense).

Textiles camouflants, uniformes communicants ou exosquelettes pourraient servir à "améliorer" conséquemment l'équipement de fantassins déjà suréquipés. Sans parler de l'avantage stratégique que représenterait la possession de nanodrones de la taille d'une libellule, indécélables, ou de nanocapsules de produit toxique qu'aucune barrière, qu'aucun masque à gaz ne pourrait arrêter...

Complément

En 2002, l'armée américaine, le MIT (Massachusetts Institute of Technology) et un groupe d'industriels se sont associés pour mettre en place : "The Institute for Soldier Nanotechnology (ISN) afin de mettre en place des applications militaires basées sur les nanotechnologies.

Le physicien allemand à l'université de Dortmund **Jürgen Altmann** classe les projets militaires des nanotechnologies selon trois catégories :

- Miniaturisation, allégement, accroissement de la résistance des équipements.
- Utilisation de nouveaux matériaux nanostructurés.
- amélioration des fonctions de certains systèmes de l'organisme, déterminants pour les performances, par hybridation, implants, puces et prothèses.

(Jürgen Altmann (2006), Military technology: potential applications and preventive

arms control, Editions Routledge, Londres and New York, 2006)

Concrètement, le passage à l'échelle nano devrait permettre de stocker et analyser toujours plus d'informations, d'équiper les missiles de nano-ordinateurs incorporés, de déclencher des alertes en cas d'agression ou de mort, d'implanter des capteurs sur les soldats pour suivre leur état de santé ou des contre-mesures à visée curative (injection automatique d'antalgique, d'anti-inflammatoire, etc.), ou encore de renforcer les blindages par adjonction de nanotubes de carbones.

Si certains de ces projets relèvent encore aujourd'hui de (mauvais) rêves, d'autres tel que le nanodrone "Libellule" ou l'exosquelette "Hercule" financés par la DGA (Direction Générale de l'Armement) sont bien réels...

Exemple : Comme son nom l'indique, le nanodrone "Libellule" est un projet biomimétique imitant la forme et le vol de cet insecte. Il est muni de quatre ailes de 3 cm actionnés par 180 000 muscles artificiels et pèse 120 milligrammes.

(http://www.lemonde.fr/cgi-bin/ACHATS/acheter.cgi?offre=ARCHIVES&type_item=ART_ARCH_30J&objet_id=948358&xtmc=libellule_le_futur_ange_gardien_du_fantassin&xtcr=1)



[http://www.defense.gouv.fr/dga/industrie2/espace-pme/soutenir-et-developper-l-innovation/\(language\)/fre-FR#SearchText=libellule#xtcr=1](http://www.defense.gouv.fr/dga/industrie2/espace-pme/soutenir-et-developper-l-innovation/(language)/fre-FR#SearchText=libellule#xtcr=1)

Exemple : L'exosquelette "Hercule", fabriqué par la DGA, est destiné à porter de lourdes charges sans le moindre mal de dos. Ce modèle d'exosquelette permet actuellement de porter 40 kilos pendant une autonomie de quatre heures. D'ici 2015, il est prévu qu'il puisse porter une centaine de kilos.



*L'exosquelette Hercule à l'Eurosaty 2012 —Jonathan Duron / 20 Minutes
(<http://www.20minutes.fr/high-tech/952859-video-exosquelette-hercule-brouette-futur>)*

F. Définition par les controverses

Nanotechnologie ... pourquoi s'interroger ? (Lacour, 2010)

Les interrogations sont cruciales pour plusieurs acteurs peut être parce que les nanotechnologies sont déjà en train de modifier nos vies, engendrant des usages qui peuvent modifier :

- **nos relations :**

- exemple du réseau Internet partout et pour tous grâce à des processeurs puissants et peu coûteux ;



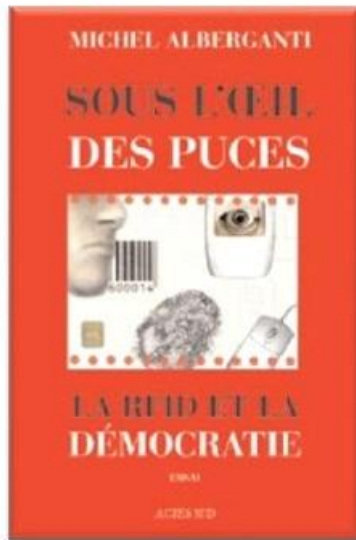
Ubiquitous computing will enable diverse wireless applications, including monitoring of pets and houseplants, operation of appliances, keeping track of books and bicycles, and much more.

- **nos libertés :**

- exemples : surveillance 24h/24 ; savoir ce que l'on mange, ce que contiennent nos cosmétiques, nos vêtements...



- **les risques que nous prenons, pour nous et notre environnement ?**



- exemple de la chasse aux bactéries par le nanoparticules d'argent ;



1. Des enjeux sociaux

Nous avons vu dans les parties précédentes que les "nanos" se déploient en société et sont déjà sur le marché dans de nombreux domaines et de nombreux pays.

Les "nanos" soulèvent également des critiques et des oppositions de groupes sociaux divers (associations de consommateurs, environnementalistes, syndicats, citoyens ...). Elles font l'objet en société de débats dans un contexte de relations technosciences-société en mutation depuis les années 1970 et notamment marqués par des crises sanitaires et environnementales nombreuses (Tchernobyl, vache folle, amiante, sang contaminé, OGM, mediator, Fukushima, ...).

2. Dans les médias ?

Les "nanos" font l'objet d'investissements colossaux et suscitent des espoirs de gains économiques considérables que les médias relaient (photo ci-dessous).



3. Espoirs et promesses ?

La même idée d'espoirs et de promesses se trouve et s'amplifie dans la démarche démiurgique qui s'incarne dans les objets de conception et de fabrication de nanorobots, d'hybrides homme-machine (cyborgs), des dispositifs visant à pallier des déficiences motrices visuelles, auditives ou la diminution des capacités dues à la vieillesse en vue d'un rêve de vie parfaite et d'immortalité.



4. Des risques ?

Comme toute nouvelle technoscience se pose par ailleurs la question des risques pour la santé et l'environnement.



5. Des contestations ?

Les débats soulevés en société à propos des "nanos" ne se réduisent toutefois pas à la question des risques.

Des citoyens s'organisent et se mobilisent pour questionner l'intérêt des "nanos", les modifications sociales et politiques qu'elles génèrent, la façon dont est organisée et financée l'innovation et dont sont prises les décisions en matière de politique de recherche et d'innovation.

C'est ce qu'illustre la photo suivante d'une manifestation à Grenoble d'opposants au projet Minatec.



En guise de conclusion

Les nanos concernent plusieurs secteurs industriels et comportent de nombreux enjeux scientifiques, technologiques, sanitaires, réglementaires... Nous avons vu que les définitions des nanos sont stratégiques pour les acteurs concernés, et soulèvent également des débats en société.