



Nanomatériaux et nanotechnologies : au-delà de la science fiction

Mostapha M. BOUSMINA (*)

Il m'est fort agréable de m'adresser aujourd'hui aux élèves et aux étudiants ainsi qu'aux collègues sur le thème des nanotechnologies. Mais avant de vous amener avec moi dans l'extraordinaire voyage vers l'infiniment petit, laissez-moi d'abord vous entretenir sur la démarche et la méthode scientifiques.

La science a son mode de fonctionnement basé sur l'approche rationnelle dénuée d'émotions et de superstitions. Elle n'est, en aucun cas, assujettie aux traditions et mœurs et aux pressions sociales ou politiques. Ses principes n'obéissent à aucun dogme ou certitude non-prouvée. Elle requiert un esprit libre dans le vrai sens du mot où aucune question n'est taboue. Elle aboutit, dans un intervalle de conditions, à des lois universelles. La même expérience conduite au Maroc, en Chine, en France, au États-Unis ou en Australie doit reproduire le même résultat indépendamment de l'origine, de la couleur, de l'âge, du sexe ou de la religion de l'expérimentateur. Un objet tombe de haut en bas, peu importe l'endroit où l'expérience est menée et peu importe la personne qui réalise cette expérience. Son langage et ses méthodes sont, de ce fait, universels.

La méthode scientifique est basée sur des étapes rationnelles: i) la curiosité, ii) l'observation aiguë par l'intuition, iii) l'interrogation, iv) le raisonnement critique, v) l'hypothèse, vi) la conceptualisation et vi) la confrontation "impitoyable" avec l'expérience.

Ces étapes doivent être basées uniquement sur le raisonnement qui ne fait intervenir aucun facteur extérieur (mystérieux), ni force supposée à qui on fait attribuer une partie ou la totalité des événements. Tout doit être déduit du compréhensible et du tangible. Le tangible ne veut pas nécessairement dire "matériel", mais plutôt un concept concret ou abstrait, mais qui est assujetti à la vérification. Il peut s'agir d'un ressort qu'on voit s'allonger et revenir à sa forme initiale ou d'une force gravitationnelle ou magnétique qu'on ne voit pas, mais dont les effets sont mesurables.

(*) Chaire de Recherche du Canada sur la Physique des Polymères et les Nanomatériaux, Département de génie chimique (CREPEC), Université Laval, Ste-Foy, Québec G1K 7P4, CANADA. Membre résident de l'Académie Hassan II des Sciences et Technique, Rabat, Maroc
Email: Bousmina@gch.ulaval.ca

La curiosité est cette attitude “intérêt” de vouloir apprendre et surtout comprendre et démystifier les phénomènes auxquels on est confronté. Ceci émane du désir de découvrir et requiert une attitude active basée sur l’observation. Il ne s’agit pas de subir simplement les événements, mais d’être attentif et proactif en utilisant le sens de l’interrogation qui dépasse le stade, nécessaire mais non suffisant, de l’émerveillement. L’émerveillement contemplatif seul n’est pas productif. Il le devient quand il est accompagné du questionnement: pourquoi, comment, quand et où? Pour avoir réponse à ces questions, il faut avoir une attitude critique basée uniquement sur le rationnel et l’objectivité. C’est la, sans doute, l’étape la plus importante de la démarche scientifique. Bien des esprits et des peuples se sont égarés (et certains continuent malheureusement à l’être), car ils n’osaient pas remettre en cause le dogme établi. Cette attitude est stérile et bloque l’avancée de la science et fige nos connaissances du monde et de nous même. Aux yeux de la science, rien, mais absolument rien, n’est acquis de façon absolue. Tout est critiquable et tout est sujet à l’amélioration. Les principes et les résultats de la science sont eux-mêmes critiquables et donc évolutifs. Les lois de la physique restent valables dans un intervalle de conditions. Poussées à leur limite, les lois de la physique deviennent, dans bien des cas, invalides, et il faut les modifier ou encore les remplacer par d’autres lois. On a cru pendant longtemps que l’hérédité était due aux protéines et que celles-ci étaient contenues dans les chromosomes. On sait maintenant que le code génétique est transcrit dans l’ADN qui est présent dans les chromosomes. Les protéines ne forment que l’enveloppe.

La température et la chaleur ont été fort longtemps confondues; ces notions sont pourtant bien distinctes. On a cru suite aux affirmations de Kepler (1571-1630) et surtout de Descartes (1596-1650) que la vitesse de la lumière était infinie. Par la suite des mesures ont montré qu’elle était finie et qu’elle avait une valeur dans le vide avoisinant 300,000 km/s. La théorie de la relativité générale d’Einstein a placé cette vitesse comme la vitesse plafond infranchissable. Des expériences récentes basées sur des pulses électromagnétiques mettent maintenant en doute cette limite. On a cru fort longtemps à la théorie géo-centriste plaçant la terre au centre de l’univers. On a découvert par la suite qu’il existe d’autres galaxies et pas uniquement la notre et que la terre tourne autour du soleil et non l’inverse et par le même phénomène la lune tourne autour de la terre. On a pendant longtemps affirmé que notre système solaire contient sept planètes. Ce nombre a maintenant presque doublé. On ne croyait jamais pouvoir aller sur d’autres planètes et pourtant l’homme est allé sur la lune et d’autres voyages plus lointains sont maintenant programmés. On croyait que l’intérieur du corps humain était inaccessible, alors que maintenant des techniques simples comme les scanners, les rayons X, la résonance magnétique permettent d’explorer l’intérieur du corps humain avec une incroyable clarté.

Ce ne sont là que quelques exemples qui illustrent l’évolution des concepts et des résultats de la science. Cette évolution est obtenue grâce aux travaux de scientifiques chevronnés qui osent mettre en doute les lois et les concepts établis et qui proposent de leur propre chef une idée nouvelle qui va à l’encontre des idées reçues et de l’établi rassurant!

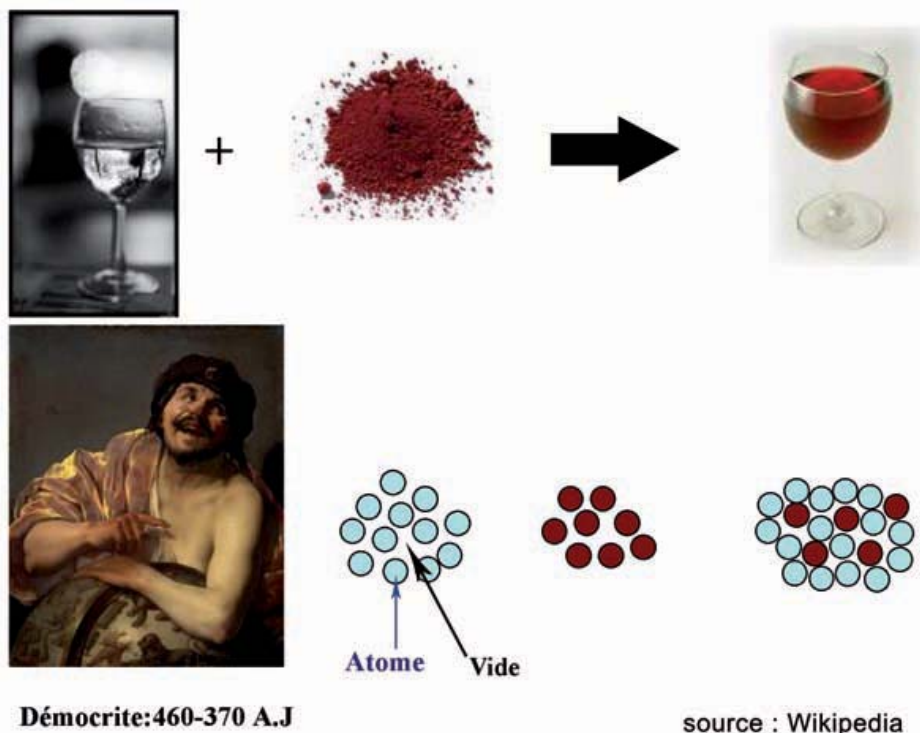
Une fois que l’idée a germé, il faut la faire mûrir en envisageant les différentes possibilités de ses conséquences. Ceci permet de transformer l’idée initiale en un concept et par la suite à des hypothèses et théories qui doivent être validées ou rejetées par l’expérience. L’étape de la preuve est cruciale et elle est impitoyablement non complaisante!

Les progrès de la science dont nous profitons tous aujourd'hui et nos connaissances du monde sont le résultat de cet exercice fécond et évolutif. Les nanotechnologies s'inscrivent dans cette épopée de quête du savoir qui a nécessité de multiples remises en cause d'idées préconçues et de concepts préétablis.

Les nanotechnologies concernent la manipulation et la structuration de la matière à l'échelle du milliardième de mètre (nanomètre = 10^{-9} m). Bien que le nanomètre soit imperceptible à l'œil nu, on arrive à structurer la matière à cette échelle de façon parfaitement organisée pour la doter de tout un spectre de propriétés différentes de celles observées à l'état massique. Cette extraordinaire avancée dans la nanomanipulation de la matière a nécessité des efforts considérables d'hommes et de femmes de sciences qui ont contribué, chacun à sa manière, à l'essor de ce fascinant voyage vers l'infiniment petit.

L'origine de ces efforts remonte à l'époque des grecs par les travaux de Démocrite (460-370 avant J.-C.) qui adorait boire du vin. Pour obtenir le vin à cette époque, on mélangeait une pâte rougeâtre de raisin fermenté, séché et broyé avec l'eau. Le mélange ainsi obtenu est un liquide de couleur rouge-pâle. Démocrite se posa alors la question suivante : où est passé la pâte solide? Pour répondre à cette question, il imagina que la matière est formée du vide et d'entités élémentaires indivisibles qu'il appela "Atomes". Mise dans l'eau, la pâte se subdivise en ses atomes qui infiltrent l'espace interstitiel "le vide" entre les atomes de l'eau. Démocrite stipula qu'en changeant la quantité "la concentration" de la pâte dans l'eau, on change le nombre d'atomes et par conséquent on change la couleur et la saveur du vin ainsi obtenu.

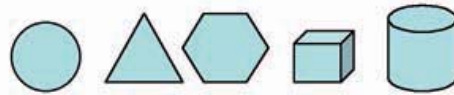
Cette idée fût rejetée par Aristote (384-322 avant J.-C.) qui décrivit la matière plutôt par quatre éléments : eau, air, terre et feu. Vus la notoriété et le charisme du personnage (la grande autorité de l'époque, maître d'Alexandre le Grand et inventeur du syllogisme), les idées d'Aristote ont prévalu pendant presque deux mille ans sans que personne n'osât les mettre en doute.





Platon: (427-348 av.JC)

Différentes formes:



Aristote: (384-322 av.JC)

Terre, eau, air et feu

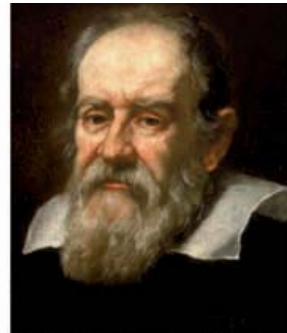
source : Wikipedia

Cette croyance aveugle dans la théorie d'Aristote a bloqué l'évolution de la science jusqu'à l'arrivée de Giordano Bruno (1548-1600) et Galilée (1564-1642) qui contestèrent le postulat et qui clamèrent haut et fort l'existence des atomes. Les deux payèrent leur opposition à la théorie d'Aristote de leur vie : le premier a été brûlé vif et le deuxième a été condamné à vie.

L'idée d'atomes fût définitivement imposée suite à beaucoup d'efforts de plusieurs scientifiques et penseurs et notamment John Locke (1632-1704), John Dalton (1766-1844), Michael Faraday (1791-1867) et James Clerk Maxwell (1831-1879). Par la suite



Giordano Bruno (1548-1600)



Galilée (1564-1642)

source : Wikipedia

Dimitri Mendeleïev (1834-1907) effectua un travail colossal "de moine" en classant les atomes dans un tableau périodique selon leur masse (la vraie classification est selon la charge qui diffère peu de celle basée sur la masse). Cette classification a permis de comprendre que certains atomes ont un excès de charge et d'autres ont un défaut de charge.

Il était alors clair que si on combinait les uns avec les autres on obtiendrait des associations entre atomes (molécules). Les molécules ont été connues avant Mendeleïev, mais l'idée des combinaisons possibles était obscure. On peut combiner non

**Mendeleïev (1834-1907).**source :
Wikipedia

CLASSIFICATION DES ELEMENTS CHIMIQUES

Chaque case de tableau correspond à un élément, dont on trouve le nom, le symbole, le numéro atomique (nombre d'électrons de l'atome) au haut à gauche, la masse atomique au haut à droite.

Les éléments du tableau sont disposés en colonnes (groupes). Les éléments qui figurent sur une même ligne ou période, respectent la même configuration de valence, une seule pour l'hydrogène et l'hélium, 2 pour la période suivante, 8 ou 18 de l'hélium au xénon, et ainsi de suite.

Les éléments placés dans une même colonne partagent également le même nombre d'électrons pour la couche externe. Après 8 pour la colonne de l'hydrogène jusqu'à 8 pour celle de l'hélium, la grandeur de la période augmente.

Une seule case a été réservée aux éléments des terres rares (lanthanides), placés sous le tableau pour ne pas encombrer le tableau principal.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| H | He | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | Be | B | C | N | O | F | Ne | | | | | | | | | | |
| Na | Mg | Al | Si | P | S | Cl | Ar | | | | | | | | | | |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LANTHANIDES | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ACTINIDES | | | | | | | | | | | | | | | | | |

seulement des atomes pour obtenir des molécules, mais les molécules elles-mêmes peuvent également se combiner par réaction chimique pour donner d'autres molécules ayant des propriétés différentes des molécules de base. Il fallait alors un critère permettant de savoir si une réaction chimique était possible ou non. Le critère en question fut donné par Willard Gibbs (1839-1903, énergie libre) et par Ludwig Boltzmann (1844-1906, entropie).

Nos idées sur les atomes et les molécules commencèrent à se préciser. Cependant, il fallait déterminer leur taille. La taille des atomes fut calculée par Niels Bohr (1885-1923) qui trouva une valeur de l'ordre de l'angström Å (10^{-10} m = 10 nm).

Les Lois Thermodynamiques

source : Wikipedia

**Ludwig Boltzmann 1844-1906****Hermann von Helmholtz 1821-1894****Willard Gibbs 1839-1903**

Nous connaissons alors la charge et la taille des atomes. Il faut maintenant savoir comment ces atomes se lient entre eux pour former des molécules.

Les atomes se lient entre eux par des liaisons fortes et faibles: liaison covalentes simples, doubles et triples, liaisons métalliques, liaisons d'hydrogène. Ces liaisons peuvent faire impliquer des liaisons carbone-carbone, carbone-hydrogène, carbone-oxygène, carbone-azote et autres, mais aussi des liaisons carbone-métal.

Ces liaisons permettent d'assembler un grand nombre d'atomes et de molécules. Pour avoir une idée sur ce nombre, revenons un peu en arrière et examinons une expérience simple mais magistrale. Celle de Benjamin Franklin (1706-1790), répétée plus tard par Lord Rayleigh (1842-1919). En versant une cuillère d'huile (environ 1 cm^3) sur la surface d'eau d'un lac peu agité, l'huile forma un disque mince et lisse. Il fallait déterminer l'épaisseur de ce film. Ceci est obtenu par la mesure du diamètre du disque et donc de sa surface S . L'épaisseur (e) du film est alors obtenue en égalant le volume du cylindre ($e \cdot S$) au volume initial $V=1\text{cm}^3$. L'estimation aboutit à environ 5-10 nanomètres! Telle est environ l'épaisseur de film mince impliquant une disposition particulière des atomes et molécules.

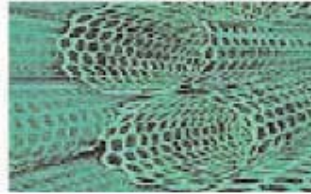
Combien d'atomes (ou molécules) sont présents dans ce films? Ce nombre peut être estimé à partir du volume initial et du volume des atomes supposés sphériques. En effet, dans 1cm^3 , il y a N atomes, chacun ayant une dimension de l'ordre de \AA (10^{-10} m). On a donc $1\text{cm}^3 = N \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$. Ceci permet d'estimer le nombre N . La valeur trouvée est le nombre magique 10^{23} , connu sous le nom d'Avogadro (Avogadro, 1776 -1850, n'a pas calculé ce nombre). Quand nous manipulons la matière (mélange de réactifs pour faire une réaction chimique), nous manipulons, en fait, un multiple de 10^{23} atomes ou molécules.

Est-il possible de manipuler un seul atome ou une molécule à la fois? Tel est le défi des nanotechnologies. La possibilité de manipuler des atomes un par un est rendu possible grâce à la découverte des nouveaux microscopes comme le microscope à effet tunnel et le microscope à force atomique dotés d'une tête conique extrêmement pointue. Grâce à cette pointe, les chercheurs d'IBM ont pu déplacer des atomes de xénon un à un sur une surface de nickel pour dessiner à l'échelle atomique le sigle d'IBM. Ceci a ouvert la voie à des manipulations de la matière jusqu'à la impossibles. Cette démarche de bas en haut (bottom-up) permet de fabriquer et d'organiser la matière de manière extrêmement précise. L'autre approche utilise une démarche inverse allant du macro vers le nano (de haut en bas: top-down).

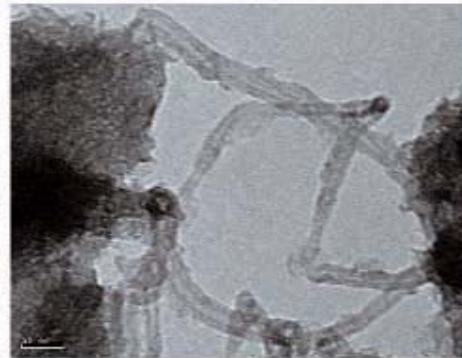
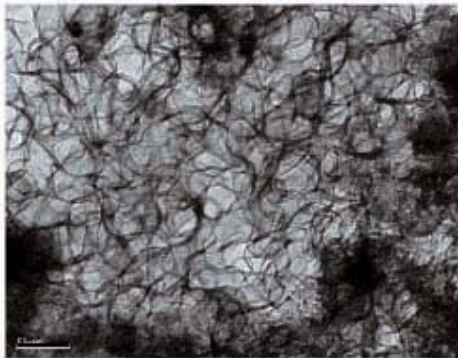
Ces approches basées sur la manipulation des atomes en utilisant des microscopes ou encore des réactions chimiques de molécules fonctionnalisées qui s'auto assemblent pour former une structure prévue à l'avance, permet de structurer la matière sous des formes variées: sphériques, lamellaires, tubulaires, hélicoïdales, bâtonnets, tores, hémisphères etc. Bref, les physiciens et les chimistes structurent la matière et la sculptent pour lui donner des formes et des fonctions (donc des propriétés) nouvelles. Ainsi, on arrive à structurer les atomes de carbone sous formes de cages et de tubes ayant une résistance mécanique dépassant celle de tous les matériaux connus jusqu'à date. Ces nanotubes ont en plus des propriétés thermiques et électriques forts intéressantes pour des applications en électronique, photonique, magnétique etc. Des particules sphériques d'oxydes métalliques ayant une dimension nanométrique sont fabriquées pour diverses applications en électronique, en cosmétique, dans le domaine des peintures, dans le domaine magnétique etc. Des assemblages d'atomes connus sous le nom de quantum dots (boîtes quantiques) changent de couleur avec la taille et donc ils sont potentiellement adaptés pour la fabrication des capteurs, des cellules photovoltaïques etc. Les molécules peuvent aussi être mises sous forme de films minces et même sous forme de couches mono-moléculaires pour des applications en optique photonique, en électronique, en médecine etc.

L'organisation de la matière est rendue possible non seulement à l'état inerte, mais aussi à l'état vivant (nano-biotechnologies). Les chimistes, les physiciens et les biologistes travaillent désormais de concert et utilisent souvent les mêmes techniques d'investigation.

Les applications des nanotechnologies sont énormes et variées et nous ne sommes qu'au début d'une nouvelle révolution technologique. Elles sont impliquées dans des domaines



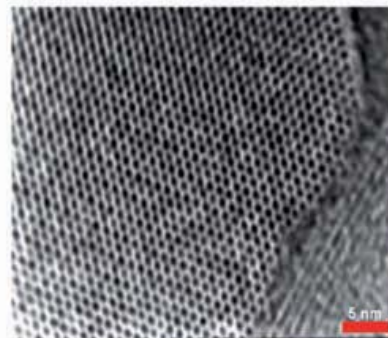
Nanotubes de carbone
source : Wikipedia



Journal of Nanoscience and Nanotechnology
6, 2191-2195 (2006)



Particules d'oxydes métalliques



Matériaux structurés avec
des pores de 5 Å de diamètre

comme l'électronique, les semi-conducteurs, la catalyse, l'automobile, l'aérospatiale, la génétique, les télécommunications, les NEMS (Nanoelectromechanical systems), les BioNEMS, les MMS (man-machine systems), l'optique et photonique, la santé, l'agriculture, l'énergie, l'environnement, la sécurité, la robotique et dans des domaines non encore anticipés.

Dans le futur on prévoit stocker toutes les bibliothèques d'un pays comme le notre sur une puce d'environ 1 cm², on prévoit fabriquer des médicaments qui vont directement réparer ou détruire les cellules infectées dans le corps humain sans l'intervention du chirurgien; on prévoit éliminer les radicaux libres dans le corps humain et de lutter contre leur effet vieillissant, on prévoit de fabriquer des fours et des réfrigérateurs fonctionnant à des températures impressionnantes, on prévoit fabriquer des ordinateurs

sans clavier ni écran, n'importe quelle surface peut être utilisée pour servir de clavier et d'écran, on envisage de rendre la matière invisible et de voir à travers des surfaces solides, on entrevoit la manipulation des molécules pour les doter d'une structure similaire à celle de l'ADN, on entrevoit d'utiliser ces structures pour fabriquer des ordinateurs biologiques et quantiques, on envisage d'utiliser les bactéries par millions pour exécuter des tâches prédéfinies etc.

Malgré tous ces développements, la théorie reste encore défailante. Rigoureusement parlant, il n'existe pas encore de "Nanosciences". Toutes les nouvelles propriétés mesurées sont pour le moment expliquées soit par la physique classique soit par la physique quantique ou sont encore inexpliquées. Paradoxalement, une physique à une échelle encore plus petite existe déjà (physique quantique), mais à l'échelle du nanomètre (le chaînon manquant) la théorie n'est pas encore complète. C'est peut être là que réside la solution de l'unification des quatre forces et la conciliation entre la relativité générale et la mécanique quantique!