

# Nanotechnologies et Société

---

János B.Nagy et Joseph G. Fripiat, REHNam, Université de Namur

Le Colloque international "Nanotechnologies et Société" s'est tenu à l'Université de Namur le 29 novembre 2018 en présence de quelque septante participants. Ce colloque est organisé par le Réseau des Emérites et Honoraires de l'Université de Namur (REHNam).

Depuis 10 ans, le REHNam organise annuellement un colloque scientifique à destination du grand public en privilégiant l'analyse des impacts sociétaux sur un thème choisi. Citons, à titre d'exemples, les thématiques abordées au cours des dernières années : *La chimie, science carrefour* ; *Les nouvelles technologies et la création artistique* ; *Allemagne-Belgique 1914-2014 - Cent ans d'histoire commune* ; *Regards croisés sur l'art contemporain* ; *La seconde révolution numérique et le vivre ensemble de demain* ; *Les religions : terreau de violence ou source de paix ?*

Ce colloque du REHNam, en collaboration avec la Faculté des sciences de l'Université de Namur, a pour titre *Nanotechnologies et Société*. Rappelons que le préfixe nano - nain en grec - désigne des objets mille millions de fois plus petits qu'un mètre, soit des objets 100.000 fois plus petits que le diamètre d'un cheveu. Les technologies liées à ces objets minuscules connaissent depuis de nombreuses années des financements et des développements intenses et révolutionnent tant le monde industriel que notre façon de vivre.

Ce choix est motivé par le fait que cette discipline fait rarement l'objet de débats publics alors que les enjeux scientifiques, technologiques, industriels, économiques, sociaux, politiques, philosophiques qu'elle soulève sont considérables. Alors que l'on assiste à la multiplication des nanoproduits et de leurs usages (produits de consommation, médicaments, matériaux de construction, matériels électroniques et informatiques), le débat public à leur sujet émerge à peine. L'objectif du colloque est de pallier cette carence par un questionnement critique de cette technologie, de ses applications et de ses impacts y compris les risques pour la santé (nanotoxicité).

Fort de l'expérience pionnière de l'Université de Namur en matière de nanotechnologies, reconnue par la communauté internationale, le colloque a fait appel à des personnalités scientifiques belges et étrangères. Il commence par une introduction au passé, au présent et au futur des nanotechnologies. Il se propose ensuite de traiter les thèmes suivants : les propriétés multiples et riches de conductivité et d'absorption du graphène, la manipulation des atomes et des molécules à l'usage de l'industrie pharmaceutique, les applications industrielles des nanotubes de carbone, les nouvelles limites de la miniaturisation (des supramolécules aux nanomachines), la toxicité des nanomatériaux. Et, finalement, il aborde le sujet de la convergence des nanotechnologies avec la biologie, l'informatique et les sciences cognitives. Ce dernier thème est crucial car il pose la question « d'un phénomène complètement autonome échappant de plus en plus au contrôle de l'homme et faisant peser sur lui un grand nombre de déterminations », telles que le trans et le post humanisme.

Le programme était:

Président de séance : Stéphane Vincent (Directeur du Département de chimie, Université de Namur)

9h30 - 10h00: Ouverture du colloque  
Naji Habra, recteur de l'Université de Namur  
Pierre Devos, Président du REHName  
János B.Nagy, président du colloque: Le passé, le présent et le futur des nanotechnologies

10h00 - 10h55: Anne-Sophie Duwez (Université de Liège) : Jouer avec des molécules individuelles: la chimie revisite ses classiques.

Présidente de séance : Suzanne Thiry (Université de Namur)

10h55 - 11h50: Davide Bonifazi (Université de Cardiff, Grande Bretagne) : De la molécule à la fonction: la chimie supramoléculaire en action.

11h50 - 12h45: Laurent Kosbach (Société Nanocyl, Sambreville) : Les applications industrielles des nanotubes de carbone: un début de maturité

12h45 - 14h30: Buffet

Président de séance : Luc Henrard (Directeur du Département de physique, Université de Namur)

14h30 - 15h25: Philippe Lambin (Université de Namur) : Le carbone dans tous ses états

15h25 - 16h20: Dominique Lison (Université Catholique de Louvain) : Nanotoxicologie: défis et acquis de 20 années de recherche

16h20 - 16h50: Pause-café

Président de séance : Yves Pouillet (Université de Namur)

16h50 - 17h45: Antoinette Rouvroy (Université de Namur): Hyper-pouvoirs et impuissance: la vie au péril du projet immunitaire transhumaniste.

17h45 - 18h00: Clôture du colloque : François Bodart (Université de Namur)

Lors de la séance introductive présidée par le Professeur Stéphane Vincent, Directeur du Département de chimie de l'UNamur, le Professeur Naji Habra, Recteur de l'Université a salué les participants et les conférenciers en soulignant l'importance du réseau REHName pour l'Université.

(<https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c4051a6s2sqfq/>).

Le Professeur Pierre Devos, président du REHName, a remercié l'Université pour son accueil. Il a signalé que ce réseau comprend à ce jour 140 membres retraités de l'Université. Le REHName organise un colloque par an sur un sujet sociétal et 4 à 5 déjeuner-conférences (voir le site web : <https://www.unamur.be/rehnam>).

(<https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c4419a7w4qgme/>)

János B.Nagy, président du colloque a introduit le colloque sur « Le passé, le présent et le futur des nanotechnologies – Enjeu de société ».

(<https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c45d118c32v9k/>).

Il a insisté sur deux aspects importants : 1) La surface des nanoparticules est considérablement augmentée par rapport à celle des objets macroscopiques ; 2)

Les propriétés physico-chimiques des nanoparticules sont très différentes de celles des objets macroscopiques.

Pour le passé, il a rappelé que les nanoparticules étaient déjà employées dans l'antiquité pour obtenir des vitraux de couleurs différentes et il cite les nanomachines comme le futur des nanotechnologies. Il a montré ensuite que les sujets des différents conférenciers représentent le présent de cette technologie.

La Professeure Anne-Sophie Duwez de l'Université de Liège a intitulé sa conférence « Jouer avec des molécules individuelles : la chimie revisite ses classiques » ". (<https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c4607aiwt52ph/>).

Elle a commencé par un historique des nanotechnologies, en expliquant l'origine du mot "Nanotechnology", apparu pour la première fois au début des années 70. Il s'agissait alors de construire des machines et dispositifs atome par atome ou molécule par molécule, et ainsi de développer des approches qui permettraient de préserver les ressources d'énergie et de répondre à des préoccupations de développement durable.

Elle a montré pourquoi l'invention du microscope à effet tunnel il y a presque 40 ans, suivie du microscope à force atomique 5 ans plus tard, ont été des événements cruciaux dans l'histoire des nanosciences et des nanotechnologies. Les inventeurs du microscope à effet tunnel, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, ont reçu le prix Nobel en 1986. Elle a expliqué clairement les principes de ces techniques en montrant la fameuse expérience où le mot "IBM" a été écrite par un "nanocrayon" (Figure 1). Avec l'invention de ces techniques, les scientifiques sont aujourd'hui capables de travailler avec un seul atome ou une seule molécule et d'envisager la construction de "nanomachines". Cette possibilité représente une avancée majeure, à la fois dans la perspective d'applications technologiques, mais aussi au niveau fondamental.

D'un point de vue technologique, elle a montré qu'il est possible de concevoir et fabriquer des dispositifs en atteignant la limite physique ultime de résolution: la molécule unique. Ce type de recherche permet d'envisager le placement et la connexion de milliers d'éléments logiques dans des motifs complexes (pour le domaine de l'électronique par exemple), ou le placement d'éléments senseurs, récepteurs et composants de transduction et de communication pour la fabrication de dispositifs de diagnostic médical ultra-miniaturisés.

Elle a souligné que d'un point de vue fondamental, l'exploration d'entités individuelles en est toujours à ses balbutiements. Les physiciens sont impatients de savoir si les phénomènes observés à cette échelle obéissent aux lois que nous connaissons pour les ensembles d'espèces, ou s'ils vont nous forcer à revoir notre compréhension de certains concepts.

Elle a montré que les chimistes peuvent maintenant jouer avec les liaisons individuelles, orienter les molécules et induire une réaction chimique entre deux entités isolées tandis que les biologistes sont dorénavant capables de sonder les processus moléculaires des organismes vivants, comme le transport cellulaire, les mouvements et les forces générées lors de la transcription de l'ADN.

Elle a montré comment les techniques de manipulation de molécules par microscopie à force atomique contribuent actuellement au domaine des machines moléculaires (domaine récompensé par le prix Nobel de chimie en 2016) en étudiant leur principe de fonctionnement en détail. Ces travaux ont permis de

montrer pour la première fois que les rotaxanes, des machines moléculaires artificielles constituées d'un anneau enfilé autour d'un axe, sont capables de dépasser les performances de protéines naturelles (Figure 2 et 3). Les molécules synthétisées par les groupes des Profs. David Leigh, Fraser Stoddart (prix Nobel 2016) et Ben Feringa (prix Nobel 2016) sont actuellement passés sous la loupe pour en déterminer les performances. Ces études permettent de mettre en lumière l'importance du design moléculaire dans la synthèse de machines efficaces, capable de produire un travail considérable et rivaliser ainsi, ou même surpasser, les machines naturelles.

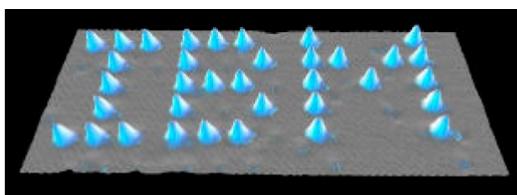


Figure 1: Logo IBM composé de 35 atomes de Xenon déplacés sur une surface de nickel à l'aide d'une pointe STM. Expérience réalisée en 1990 et publiée dans *Nature* **1990**, 344, 524.

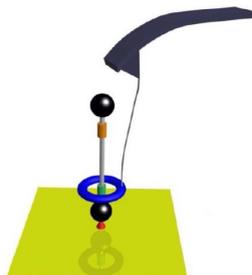


Figure 2: Illustration du principe de mesure du déplacement de l'anneau d'un rotaxane et de la force ainsi générée. Une "laisse" polymère est attachée à l'anneau et permet d'en suivre le mouvement à l'aide d'un bras de levier, composant d'un microscope AFM. Image reproduite de Duwez et al. *Nature Nanotechnology*, **2011**, 6, 553.

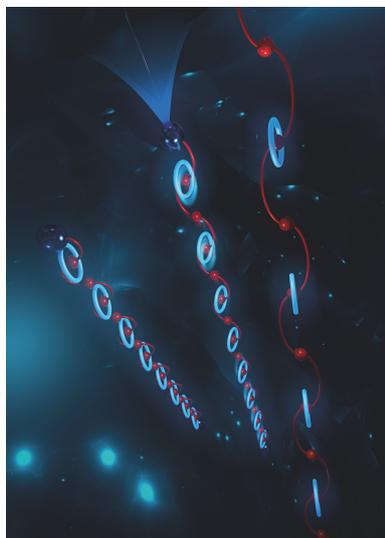


Figure 3: Illustration montrant une expérience de dépliage d'un oligorotaxane (molécule composée de plusieurs anneaux enfilés autour d'un axe et repliée en serpent). La pointe AFM se trouve en haut à gauche et tire sur la molécule qui résiste au dépliage. L'expérience a montré que la molécule est capable d'exercer une force considérable dans le sens opposé de la traction pour se replier instantanément. Image reproduite de la couverture de Duwez et al. *PNAS* **2018**, *115*, 9362.

La deuxième session est présidée par la Professeur Suzanne Thiry, Professeur émérite de l'UNamur. Le premier orateur est le Professeur Davide Bonifazi de l'Université de Cardiff (GB), et sa conférence est intitulée : "De la molécule à la fonction : la chimie supramoléculaire en action".

(<https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c46900kqtl0c8/>)

Au cours de son exposé, Le Professeur Bonifazi a montré en quoi consiste la chimie supramoléculaire et comment obtenir des propriétés spécifiques de ces molécules pour qu'elles puissent être utilisées dans certaines applications. Si la chimie moléculaire classique est la science de la transformation de la matière (Primo Levi, "The periodic table"), la chimie supramoléculaire est l'approche indispensable pour comprendre comment la matière s'auto-organise suivant des processus de reconnaissance moléculaire. Le processus d'auto-organisation implique :

- que les molécules soient "programmées" pour se "rencontrer";
- que ce processus soit réversible;
- qu'il ait un contrôle d'erreur (error checking) pour aboutir à la bonne structure. C'est le cas de l'ADN où si deux bases ne correspondent pas, il n'y a pas de liaison. La double hélice va s'ouvrir pour trouver la bonne paire.
- que le système soit capable de s'adapter aux conditions extérieures (par exemple à la température).
- que la synthèse fournisse un système unique avec 100% de rendement.

Il a insisté sur l'importance de l'auto-organisation qui est basée sur l'interaction favorable entre entités hydrophobes-hydrophobes et hydrophiles-hydrophiles. L'exemple par excellence est la formation de la double hélice de l'ADN. La force hydrophobe a été soulignée par Jean-Marie Lehn, prix Nobel de chimie 1987, pour illustrer l'association des chaînes moléculaires. Le conférencier traite ensuite des machines supramoléculaires (Jean-Pierre Sauvage, prix Nobel de chimie 2016).

Les liaisons covalentes, liaisons fortes, maintiennent ensemble les atomes dans une molécule, tandis que les liaisons non covalentes, interaction faible (système dynamique), sont responsables de l'association des molécules pour former des cristaux moléculaires. Ces interactions peuvent être des ponts d'hydrogène ou de ponts halogènes. En jouant sur les différentes formes d'association moléculaire, les cristaux organiques obtenus peuvent présenter des différences dans leurs propriétés comme par exemple devenir semi-conducteurs.

Les polymères peuvent également former des matériaux supramoléculaires. Dans ceux-ci, les liaisons entre atomes sont généralement de type covalent mais il est possible de créer des systèmes supramoléculaires en incluant des liaisons non covalentes. Si on rompt une liaison de ce type, celle-ci peut se reformer facilement conduisant à un phénomène d'auto-réparation. Dans le futur, on pourrait imaginer des GSM composés de polymères supramoléculaires qui, une fois cassés, opéreraient l'auto-réparation.

L'orateur montre ensuite que, quand on parle de matériaux supramoléculaires, on peut s'inspirer de la nature. Celle-ci est un système supramoléculaire qui s'est auto-sélectionné. Un exemple sont les molécules impliquées dans la photosynthèse où les chromophores sont optimisés pour l'absorption de la lumière et fournir ainsi une énergie utilisable par les plantes.

Un autre exemple très intéressant est le complexe ATP synthase qui intervient dans la transformation de l'adénosine triphosphate (ATP) en adénosine diphosphate (ADP) pour le transport de l'énergie dans le corps humain.

Il existe d'autres systèmes qui sont aussi "dynamiques", les machines moléculaires. Un exemple de machine moléculaire est le rotaxane. Si on absorbe des molécules de rotaxane sur une surface d'or, on a deux positions de "stationnement": une position qui crée une surface "hydrophobe" et une autre qui crée une surface "hydrophile". On observe un mouvement macroscopique lors qu'on ajoute une goutte d'eau sur cette surface.

Un troisième exemple est l'hydrogel: Quand on soumet un hydrogel, qui est une structure nanométrique organisée, à un changement de température, on observe des mouvements au niveau moléculaire dans des directions bien déterminées qui se détectent au niveau macroscopique.

En conclusion, les exemples cités ont montré qu'il peut exister une relation entre les mouvements observés au niveau microscopique avec des propriétés macroscopiques.

Le deuxième orateur de cette session est Mr. Laurent Kosbach de la Société Nanocyl à Sambreville et sa présentation a pour titre "Les applications industrielles des nanotubes de carbone: un début de maturité".

Nanocyl, qui a démarré comme un spin-off de l'Université de Namur, est un des leaders des nanotubes de carbone multi-parois. D'une entreprise de recherche focalisée sur la mise au point des techniques industrielles de production et de contrôle qualité, la société est engagée vers une croissance industrielle sur des

marchés internationaux. Le positionnement unique de Nanocyl en tant que leader de ce domaine est affirmé et Nanocyl voit son avenir avec confiance. Cette conférence est publiée séparément dans cette revue.

La troisième session est présidée par le Professeur Luc Henrard, Directeur du Département de physique. Le premier orateur est le Professeur Philippe Lambin et sa conférence a pour titre "le carbone dans tous ses états". (<https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125cfe9f2c64ks8gw1i/>)

Après les définitions d'usage, cet exposé présente un panorama récent des nanotechnologies plus spécifiquement axé sur les nanostructures de carbone. Ph. Lambin rappelle que le carbone possède plusieurs isotopes ( $C^{12}$ ,  $C^{13}$ , et  $C^{14}$ ). Il compare cet élément avec les autres éléments qui se trouvent dans la même colonne du tableau de Mendeleïev (Si, Ge, Sn), ces éléments possédant également dans la couche électronique externe 2 électrons de type s et 2 électrons de type p. Chaque atome de carbone possède une orbitale atomiques de type s et trois orbitales atomiques de type p. Lors de la formation de liaisons avec d'autres atomes (C, H, N, etc.), ces quatre orbitales peuvent se combiner suivant le cas pour donner

- soit quatre orbitales hybrides de type  $sp^3$  qui pointent vers les quatre sommets d'un tétraèdre comme dans les alcanes (méthane, éthane, ...), formant de simples liaisons.
- soit des orbitales  $sp^2$  pointant vers les sommets d'un triangle équilatéral plus une orbitale atomique p perpendiculaire à ce triangle, formant une double liaison avec les autres atomes (éthylène, propène, etc.),
- soit une orbitale hybride sp plus deux orbitales atomiques 2 p perpendiculaires à celle-ci formant une triple liaisons entre atomes (acétylène, etc.).

Les atomes de carbone peuvent s'associer entre eux ou avec d'autres éléments pour former un nombre considérable de molécules différentes (H, N, O, etc.). Le carbone peut exister sous différentes formes cristallines (diamant, graphite) ou amorphes (Figure 4).

### The natural carbon allotropes

- graphite (density: 2.25 g/cm<sup>3</sup>, C-C distance: 0.142 nm)
  - $\alpha$  variety (hexagonal = Bernal structure)
  - $\beta$  variety (rhombohedral)
- diamond (density: 3.52 g/cm<sup>3</sup>, C-C distance: 0.154 nm)
- amorphous carbons



Natural graphite



Raw diamond (67 ct)

Figure 4: Les variétés allotropiques naturelles du carbone.

Dans le diamant, les liaisons sont de type  $sp^3$  et la structure électronique montre qu'il existe une bande interdite de l'ordre de 5,48 eV, ce qui conduit ce matériau à être un isolant. Ce n'est pas le cas du silicium, du germanium et de l'étain qui présentent une bande interdite de plus en plus faible, l'étain étant à la limite un semi-conducteur.

Ph. Lambin s'intéresse ensuite au graphite qui est un matériau constitué de plans de carbone. Dans ces matériaux, les liaisons entre les carbones sont de type  $sp^2$  auquel, il faut ajouter les liaisons  $\pi$  formées par les orbitales atomiques 2p perpendiculaires au plan des atomes. La structure électronique de ces électrons associées aux orbitales  $sp^2$  présente également une large bande interdite tandis que les électrons associés aux liaisons  $\pi$  montrent une structure de bande où la bande occupée par ces électrons présente un recouvrement avec la bande inoccupée ce qui conduit le graphite à être considéré comme semi-métal, ce recouvrement diminuant lorsqu'on se limite à un seul plan comme dans le graphène conduisant celui-ci à être classé comme semi-conducteur.

A côté de ces deux formes cristallines, une nouvelle forme de carbone a été découverte en étudiant les spectres d'absorption UV de la lumière émise par des étoiles traversant des nuages de poussières interstellaires. Ces spectres présentaient toujours un pic intense à environ 217 nm qui serait dû à la présence d'une variété de carbone, le fullerène  $C_{60}$ , molécule constituée de 12 pentagones et de 48 hexagones formant une cage de symétrie icosaédrique. D'autres variétés ont été également découvertes: le  $C_{70}$ ,  $C_{72}$ ,  $C_{100}$ , etc. (Fig.5).

a supprimé:

### The fullerene gallery

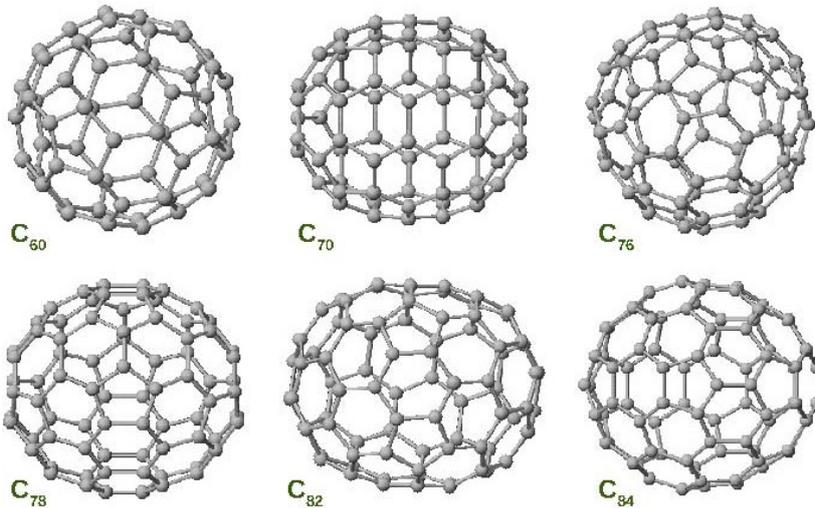


Figure 5: Les différentes formes de fullerènes (C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, C<sub>76</sub>, C<sub>78</sub>, C<sub>82</sub>, C<sub>84</sub>)

a supprimé: 4

Cette découverte a valu à Smalley, Kroto et Curl le prix Nobel en 1987. Ces molécules ont trouvé des applications en pharmacologie (par exemple, le traitement du sida).

Après les fullerènes sont arrivés les oignons de carbone. Ces objets ressemblent à du graphite en boule présentant une structure sphérique et on les considère comme des fullerènes emboîtés les uns dans les autres. Ces molécules peuvent être synthétisées en laboratoire en très petite quantité. Elles existent également dans l'espace sidéral où elles seraient produites à partir de nano-diamants sous l'effet des rayonnements intenses lors de l'explosion d'une supernova. On pense que c'est la variété de carbone la plus stable et serait responsable du pic d'absorption observé à 217 nm.

Une autre variété définie pour la première fois en 1991 est le nanotube de carbone (Figure 6) qui se présente sous forme de cylindres imbriqués l'un dans l'autre.

a supprimé: 5

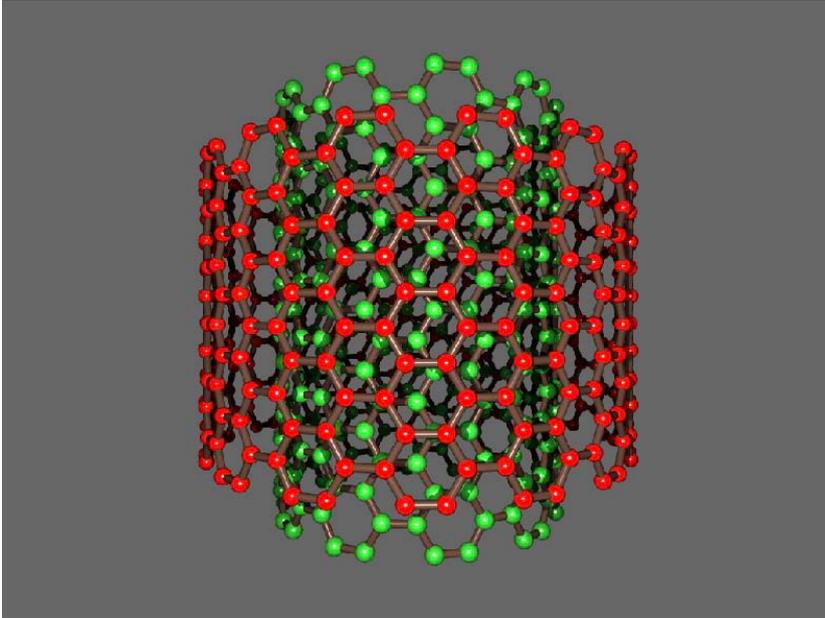


Figure 6: Un nanotube de carbone multiparoï

a supprimé: 5

La synthèse de ces matériaux a été développée par le groupe du Professeur János B.Nagy de l'Université de Namur et sont produits entre-autre par la Société Nanocyl qui fut au départ une startup de cette Université. La synthèse est basée sur une méthode catalytique "chemical vapour deposition". Ces matériaux sont utilisés dans un certain nombre d'applications telle que la "furtivité" des avions militaires. D'autres applications existent dans les matériaux composites. Elles sont basées sur la longueur de ces tubes car lorsqu'ils sont mélangés avec des polymères, ils peuvent rendre ces matériaux composites conducteurs de l'électricité.

La dernière variété du carbone est le graphène (Figure 7).

a supprimé: 6

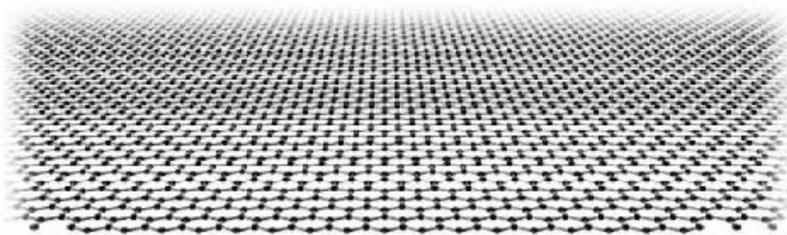


Figure 7: Le graphène

a supprimé: 6

Il est constitué par un réseau hexagonal bidimensionnel de carbones dont l'empilement de ces plans constitue le graphite. Il fut décrit pour la première fois en 2004 par André Geim et Konstantin Novoselov qui reçurent pour cette

découverte le prix Nobel de physique en 2010. Ceux-ci l'ont isolé en utilisant du papier collant sur le graphite. En enlevant ce papier collant, on arrache un ou deux plans à celui-ci.

Le graphène ne laisse rien passer entre ses mailles car elles sont trop petites. Il est très flexible. C'est un semi-conducteur dont la largeur de la bande interdite est nulle. Les électrons et les trous positifs sont très mobiles. Il est transparent à la lumière visible. Une bicouche de graphène peut être supraconductrice, conductrice ou isolante suivant le mode de recouvrement d'une des feuilles par l'autre.

L'obtention du graphène se fait par décomposition catalytique du méthane sur le cuivre: Le graphène forme des îlots sur la plaque de cuivre et puis, au fur à mesure que la réaction se déroule, un film polycristallin se développe. Une autre manière pour obtenir du graphène est la décomposition de l'oxyde de graphène. Le graphène ainsi obtenu forme des labyrinthes qui permettent le passage de l'eau mais pas celui des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , etc.. Ce matériau peut servir pour la désalinisation de l'eau de mer et obtenir ainsi de l'eau potable.

Le graphène peut former des électrodes transparentes (par exemple pour les écrans d'ordinateur) et éviter ainsi la surconsommation de l'Indium. Il peut être utilisé pour former des transistors, des senseurs (sensibles par exemple à la présence de  $\text{NH}_3$ , du CO, du CN, etc...).

Ce composé est utilisé en électronique, dans le stockage et la production de l'énergie (le graphène permettrait la diminution du temps de charge des batteries); il pourrait être utilisé dans les supra condensateurs, dans la fabrication des matériaux composites (pour l'industrie aéronautique), dans les scanners utilisant les ondes de fréquence térahertz.

L'orateur termine son exposé en citant le graphyne qui est un composé du carbone dont la structure est similaire à celle du graphène. Ce composé (Figure 8) peut être vu comme un réseau de cycles benzéniques connectés entre-eux par des ponts acétylène.

a supprimé: 7

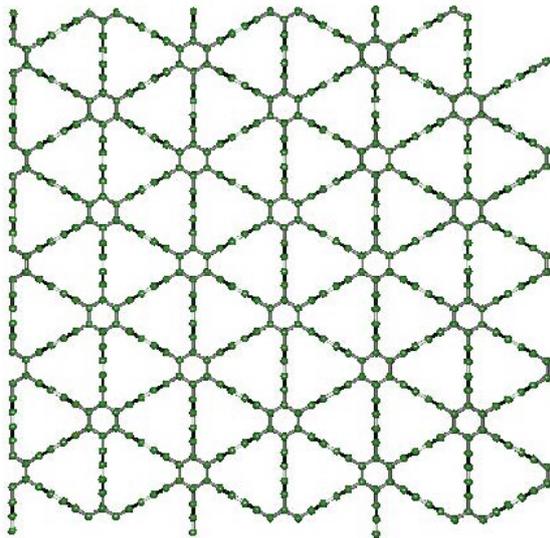


Figure 8: Le graphdiyne

C'est un vrai semi-conducteur et il est uniquement perméable à l'hydrogène. On peut inventer d'autres matériaux tels que les dichalcogénures de molybdène ( $\text{MoS}_2$ , Figure 9) qui présentent également une structure plane.

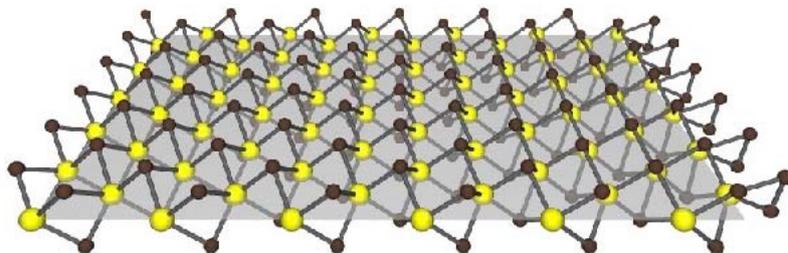


Figure 9: Un dichalcogénure d'un métal de transition de composition  $\text{MX}_2$  où M est un métal de transition (Mo, W, ..., représenté par une sphère noire) et X = S ou Se (en jaune).

Ce dernier matériau est un vrai semi-conducteur dont la bande interdite se trouve dans le domaine du visible ou de l'I.R.

Le deuxième orateur de la troisième session est le Professeur Dominique Lison de l'Université catholique de Louvain et sa conférence a pour titre "Nanotoxicologie: défis et acquis de 20 années de recherche".

["https://melies.srv.fundp.ac.be/ti/v125ce5c43e9ermm7lh5/"](https://melies.srv.fundp.ac.be/ti/v125ce5c43e9ermm7lh5/)

Les nanomatériaux possèdent des propriétés physico-chimiques exceptionnelles offrant de très nombreuses applications technologiques.

Suivant une proposition de l'Union européenne, les matériaux sont qualifiés comme nanomatériaux s'ils sont soit isolés soit se présentant sous forme d'agrégats ou agglomérats dont au moins 50% de ces particules ont des tailles de l'ordre de 1nm-100nm. On définit un agglomérat si les particules sont faiblement liées entre-elles. Dans le cas contraire, on parle d'agrégats. Les nanomatériaux peuvent être à une dimension (le graphène), à deux dimensions (les fibres) ou à 3 dimensions (les nanoparticules).

À l'état naturel, on retrouve les nanomatériaux dans par exemple les émissions de volcan, dans les feux de forêt, les virus. On les retrouve également dans les produits de combustion provoqués par l'activité humaine, participant ainsi à la pollution de l'air. On sait que ces particules ultra-fines ont un impact sur la santé des gens, plus particulièrement au niveau respiratoire et ont une incidence dans l'apparition de certains cancers. On retrouve, en effet, dans l'air des grandes villes des nanoparticules qui peuvent se fixer dans les poumons.

On connaît aussi des nanomatériaux manufacturés composés essentiellement de métaux, de carbone, ou des polymères. On les retrouve, par exemple, sous forme d'oxyde de silicium dans le ketchup, sous forme d'oxyde de titane dans le dentifrice et les produits cosmétiques. L'oxyde de titane nanométrique est transparent et est utilisé sur le verre pour rendre le verre autonettoyant. Les nanotubes de carbone, quant à eux, sont utilisés pour renforcer les polymères. Le nanoargent est utilisé dans la fabrication des chaussettes pour combattre l'odeur des pieds! Il existe un site web qui répertorie les produits qui contiennent ces nanomatériaux ; plus de 1600 produits y sont répertoriés à ce jour.

Comme pour toute innovation technologique, se pose donc la nécessité d'étudier non seulement les applications envisagées (nanotechnologies), mais également les implications possibles (nano toxicologie). C'est en 2004 qu'un premier article attirait l'attention sur la possible dangerosité de ces composés.

Depuis cette date, d'intenses efforts de recherche ont été réalisés pour tenter de préciser les éventuelles propriétés toxiques des nanomatériaux.

Cette toxicité reposerait sur l'interaction de certaines propriétés physico-chimiques avec le milieu vivant. Une des propriétés que présentent ces matériaux nanométriques tels que le  $TiO_2$  est leur très grande surface spécifique. Une autre propriété est la grande capacité que possèdent ces matériaux à se distribuer dans l'organisme. Par exemple les particules nanométriques peuvent se distribuer dans le cerveau après une inhalation. Normalement les particules devraient rester au niveau des voies respiratoires mais elles diffusent par la voie des nerfs olfactifs jusqu'au cerveau en franchissant ainsi la barrière hémato-encéphalique. Cela n'a pas nécessairement un effet délétère car cette voie pourrait être utilisée pour délivrer des médicaments au cerveau. Une autre difficulté pour caractériser la toxicité est l'énorme diversité que peut présenter un même composé tel que, par exemple, l'oxyde de zinc.

Quels sont les défis que les chercheurs rencontrent lorsqu'il s'agit d'analyser la toxicité de ces matériaux:

- Le premier est que ces matériaux se présentent sous forme solide et ne sont pas solubles dans le milieu. Les propriétés des nanoparticules sont différentes de celles de la matière macroscopique.
- Elles ont différents modes d'action.

- On connaît une diversité de nanoparticules
- Des artefacts peuvent tromper l'expérimentateur.

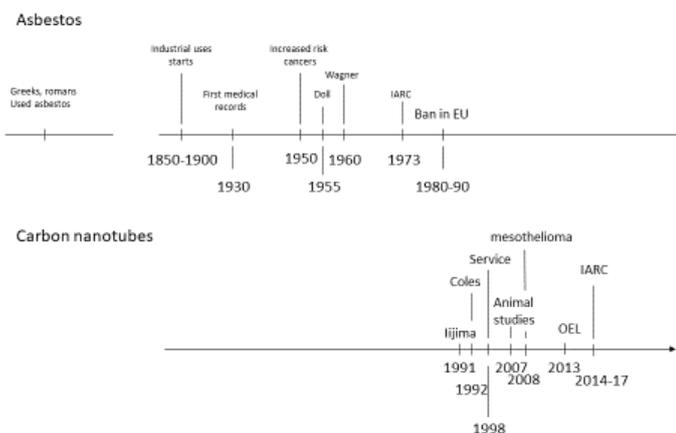
On peut se demander si, en entrant dans ce "nano monde", on n'entrerait pas également dans une "nouvelle toxicologie". La réponse est probablement négative car, jusqu'à présent, on n'a pas découvert une nano-toxicité totalement nouvelle.

Le nombre de publications a augmenté considérablement ces dernières années : on a connu une croissance exponentielle entre 2004 et 2015 mais depuis 2016, le nombre de publications par an semble s'être stabilisé. Cela peut s'expliquer par l'action de l'Union européenne qui a financé un certain nombre de projets dans le cadre des 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> "programmes cadre" (100 millions d'euro). Malheureusement beaucoup d'études financées par ces programmes n'ont conduit à rien ou très peu, principalement car les expériences étaient effectuées in vitro conduisant à des conclusions discutables.

Le défi auquel les chercheurs dans ce domaine sont confrontés est de bien définir les nanomatériaux dans leur environnement, parvenir à bien les caractériser. Le problème est de relier ces propriétés physico-chimiques avec les faits observés dans les études.

L'orateur cite deux expériences qui ont conduit à des informations utiles car elles ont été menées in vivo:

- L'une concerne les nanotubes de carbone. On a comparé ces nanotubes à l'amiante. L'asbeste a été utilisé intensivement depuis de nombreuses années et les premiers rapports sur les effets cancérigènes de l'amiante sont apparus au début du 20<sup>ème</sup> siècle et il a fallu attendre 60 ans avant d'interdire leur utilisation (Fig. 10).



a supprimé: 9

Figure 10: Il s'est écoulé près d'un siècle entre la découverte des effets cancérigènes des fibres d'asbeste. Serons-nous plus prompts à gérer le risque sanitaire posés par les nanotubes de carbone ?

a supprimé: 9

Les images de microscopie montrent que les fibres d'amiante et les

nanotubes de carbone sont similaires mais ces deux matériaux présentent, malgré tout, des différences: l'un est hydrophile et l'autre hydrophobe, l'un produit des radicaux libres et pas l'autre. Il est difficile de se débarrasser de l'amiante, par contre "il suffit de brûler" les nanotubes de carbone. On sait aussi que toutes les fibres d'amiante provoquent des cancers chez l'homme tandis que ce n'est le cas que pour quelques nanotubes. Ce sont les nanotubes longs (>15nm), rigides, épais, multi-parois et sous forme d'aiguille qui sont les plus dangereux.

- On a surtout étudié l'effet des nanomatériaux sur les voies respiratoires mais ceux-ci peuvent se montrer néfastes chez l'homme par la voie digestive. Il y a trois nanomatériaux (la silice, le dioxyde de titane TiO<sub>2</sub>, des nanoparticules d'argent métallique) qui apparaissent dans l'alimentation. On estime que l'exposition de l'homme est à 1 mg par kg et par jour pour le TiO<sub>2</sub>, 2 mg pour la silice et 1 µg pour l'argent métallique. Les études menées par différentes équipes pour explorer l'impact digestif de ces nanoparticules conduisent à des résultats contradictoires. Toutes ces études ont été menées pour mesurer les effets systémiques c.à.d. des effets sur l'ensemble de l'organisme (foie, rein, ...)
- On a découvert ces dernières années un nouvel organe qui est constitué des bactéries, des microbes, etc. qui colonisent notre intestin (le microbiote intestinal). Ils sont présents en quantité plus importante que le nombre total de cellules qui constituent le corps humain. Ils sont présents depuis la naissance et sont transmis par la mère. Ils sont modulés par des facteurs environnementaux et ils ont un impact très important sur le fonctionnement de l'organisme au point qu'ils sont considérés comme étant un organe à part entière. Quand l'équilibre de ce microbiote est perturbé, on arrive à un système qui est appelé la dysbiose, responsable de pathologies comme l'obésité, le diabète, le syndrome métabolique, les maladies cardiovasculaires, ....
- Le nano-argent présentant des propriétés bactéricides, on s'est posé la question de savoir si ces nanoparticules présentes dans la nourriture ne pourraient pas perturber ce microbiote et être responsable de certaines pathologies. La réponse est positive d'après les dernières études menées chez des souris nourries pendant 4 semaines avec de la nourriture contaminée par le nano-argent (Fig. 11).

a supprimé: 0

## Modifications at phyla level

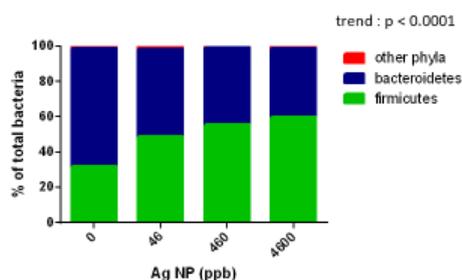


Figure 11: Illustration de l'effet de doses croissantes de nano-argent alimentaire sur la composition du microbiote intestinal chez la souris. van den Brule et al., Part Fibre Toxicol 13 :38 (2016).

a supprimé: 0

En conclusion, l'orateur insiste sur le point que tous les nanotubes ne sont pas semblables. Il y en a seulement certains qui sont dangereux et qui provoquent des pathologies (cancer, ...). D'autres nanotubes tels que ceux produits par Nanocyl sont probablement moins dangereux. Il estime aussi que, dans les études toxicologiques, l'impact de l'ingestion a été souvent négligé par rapport à celui de l'inhalation.

On peut se poser la question de savoir si on a appris des erreurs qui ont été réalisées au début. La réponse est plutôt négative. On a été complice dans nos réponses à ce que le pouvoir politique souhaitait entendre et on n'est pas resté suffisamment sur nos fondamentaux.

Les projets de recherche ne sont généralement financés que pour 4 ans. C'est souvent trop court. Il faudrait des financements de plus longue durée.

L'orateur suggère aussi que lors du dépôt d'un brevet, on ne se contente pas uniquement d'indiquer les applications éventuelles du produit industriel mais aussi les implications sur la santé et l'environnement.

La dernière session est présidée par le Professeur Yves Poulet (Recteur honoraire de l'Université de Namur) et la dernière oratrice est la Professeur Antoinette Rouvroy (Université de Namur) dont la conférence a pour titre "Hyper-pouvoirs et impuissance: la vie au péril du projet immunitaire transhumaniste"  
["https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c410bcm2w8vlq/"](https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c410bcm2w8vlq/)

La vie – Processus du vivant – Processus d'altération. Nous existons en sortant de nous-mêmes. L'Humanité – c'est un projet. Lieu public – lieu d'ouverture – espace d'hospitalité, de vulnérabilité. Possibilité de devenir humain.

#####Texte à recevoir#####

Le Professeur François Bodart (Université de Namur) clôture le colloque.

["https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c4088diae5k2r/"](https://melies.srv.fundp.ac.be/lti/v125ce5c4088diae5k2r/)

Pour lui, après avoir écouté les différents orateurs, il y a deux approches bien présentes : l'une consiste à assimiler la nanotechnologie à des matériaux de dimension nanométrique, l'autre consiste à la manipulation des unités fondamentales de la matière, les atomes et les molécules. Grâce au développement de deux types de microscopes comme l'a montré A.S. Duwez, on est parvenu à repousser ce qui pour quelqu'un qui n'est pas physicien ou chimiste est extraordinaire car cela semble être du domaine de l'invisible, alors que pour les scientifiques, cela devient de plus en plus visible jusqu'au niveau des atomes et molécules.

Ce qui est intéressant pour l'orateur, c'est qu'il y a deux approches dans le développement des nanotechnologies avec leur impact politique: la première consiste à considérer les nanotechnologies comme étant le développement des matériaux de l'échelle nanométrique et par conséquent avec toutes les implications que cela peut avoir dans les financements. C'est la définition dans laquelle on va s'intéresser aux biotechnologies, aux nanomatériaux, etc... Cette première approche a été soutenue par des lobbys financiers aux Etats-Unis et a englouti des sommes colossales, au détriment d'une deuxième approche qui consiste de partir des atomes et molécules pour construire des éléments du vivant ou du matériel avec une perspective radicalement différente. Nous sommes tous conscients que notre société va buter contre le mur de la rareté de certaines ressources naturelles. Il n'y a pas de possibilité de réduction à l'infini des circuits électroniques. Il n'y a pas de capacité d'augmentation sans limite dans le cadre de la technologie actuelle des mémoires de stockage. Par conséquent, c'est plutôt une autre approche qui consiste à dire qu'au lieu d'éliminer des quantités colossales de la matière pour arriver à des systèmes de plus en plus petits, partons des éléments de base pour construire des systèmes appartenant au monde vivant ou au monde des matériaux.

Actuellement, c'est l'approche réductionniste qui l'a emporté financièrement sur l'autre. Par conséquent, cela rejette dans un avenir lointain les perspectives de développement économique dans toute une série de domaines qui pourraient être développés par l'autre approche.

Il est apparu en filigrane dans les différents exposés le problème des applications. Un article paru, il a quelques temps, s'intitulait "Les nanotechnologies du point de vue du marché : vrais espoirs et/ou fausse promesse". En 2005 la National Science Foundation aux Etats-Unis prévoyait un marché de 1000 milliards de dollars à l'horizon de 2015-2020. On en est loin. Les conférences de ce jour ont montré qu'il y a encore très peu de produits sur le marché. Il y a un écart entre les perspectives qui sont fondés et le passage à des processus industriels.

Le financement européen reste très important. Dans le programme cadre européen pour la recherche et le développement 2014-2020, il y a 13 milliards cinq cent millions euros consacrés aux développements des technologies où les nanotechnologies occupent une place centrale.

L'orateur aurait souhaité que les applications des nanotechnologies dans le domaine de la santé soient plus développées au cours des exposés. En effet si on

regarde les programmes de recherche en Europe, ceux ci consacrent des sommes considérables dans le domaine des technologies appliquées à la santé.

Pour l'orateur, un autre point pour la compréhension de ces matériaux est l'enchaînement entre l'exposé de Laurent Kosbach et celui de Philippe Lambin: Laurent Kosbach a parlé de nanotubes dont les notions pour un non chimiste ne sont pas toujours compréhensibles tandis que Philippe Lambin a replacé ces nanoparticules dans un contexte plus général du monde du carbone et de ses différentes structures (diamant, graphite, graphène, nanotubes, etc.).

De l'exposé de Dominique Lizon, il retiendra en filigrane qu'il y a des risques qui existent et que l'on ne demande pas lors d'un dépôt de brevet à côté des applications possibles quelles sont les implications induites par ces applications.

A ce stade, suite à une question d'un participant, l'orateur rappelle la définition des NBIC, l'interaction entre nanotechnologie, biologie, informatique et les sciences cognitives. Par exemple, nous savons qu'en informatique, nous avons besoin de capacités de calcul et de stockage de plus en plus grandes alors qu'on arrive à la limite de la miniaturisation des circuits électroniques. Il faut donc trouver d'autres solutions. Cela pourrait être des nano-machines et pour le stockage des supramolécules.

On aura besoin dans le futur de l'accès à des ordinateurs de plus en plus puissants. Par exemple, en intelligence artificielle, les algorithmes sont connus depuis plus de vingt ans. Le seul problème est qu'il faut des machines disposant d'une puissance colossale pour pouvoir utiliser l'intelligence artificielle dans la vie quotidienne. Un autre type d'interaction qui existe est entre la biologie et l'informatique pour donner la bio-informatique. Les nanosciences ont également besoin d'une puissance de calcul phénoménale pour se développer. Les sciences cognitives qui concernent l'étude du cerveau, la possibilité d'agir sur les comportements neuronaux, ont également besoin de l'outil informatique. On constate de plus en plus que la frontière entre ces différentes disciplines devient de plus en plus floue.

De l'exposé d'Antoinette Rouvri, il ressort que le post-humanisme et le trans-humanisme ne peuvent pas être sans convergence entre les différentes disciplines citées plus haut.

Enfin, rappelant le mythe faustien de Goethe, l'orateur se demande si on n'est pas dans une forme plus grave de ce mythe car c'est un "mythe faustien algorithmique".