

# CHIMIE NOUVELLE

LA REVUE DE CONTACT DE LA SOCIÉTÉ ROYALE DE CHIMIE

37<sup>ème</sup> année - décembre 2019



CN 132

## Chimie et Nanotechnologie

<b>Nanotechnologies et Société</b>	1
J. B. NAGY et J. G. FRIPIAT	
<b>Les Applications Industrielles des Nanotubes de Carbone : Un Début de Maturité ?</b>	22
L. KOSBACH	

## Directeurs de rédaction

Bernard Mahieu  
UCL, Ecole de Chimie  
Place Pasteur, 1  
Boite L4.01.07  
1348 Louvain-la-Neuve  
bernard.mahieu@uclouvain.be

Benoît Champagne  
UNamur,  
Département de Chimie  
Rue de Bruxelles, 61  
5000 Namur  
benoit.champagne@unamur.be

## Infographisme

emmanuel@norproduction.eu

## Comité de rédaction

Kristin Bartik, ULB  
Nicolas Blanchard, Université de Haute-Alsace-Université de Strasbourg  
Sophie Carencu, Sorbonne Université, Paris  
Frédéric Castet, Université de Bordeaux  
André Colas, Dow Corning  
Damien Debecker, UCL  
Philippe Dubois, UMONS  
Gwilherm Evano, ULB  
Danielle Fauque, Université de Paris Sud  
Stéphane Gérard, Faculté de Pharmacie, Reims  
Bernard Joris, ULg  
Sophie Laurent, UMONS  
Raphaël Robiette, UCL  
Cédric Samuel, École des Mines de Douai  
Armand Soldera, Université de Sherbrooke  
Johan Wouters, UNamur

## Secrétariat

Violaine SIZAIRE  
ULB  
avenue Franklin Roosevelt 50, CP 160/07 1050 Bruxelles  
Tel : +32 2 650 52 08 Fax : +32 2 650 51 84 - email : src@ulb.ac.be  
Fortis : BE60 2100 4208 0470

## Comité directeur

## Conseil de gestion

Président	B. Champagne, UNamur	benoit.champagne@unamur.be
Vice-président	L. Provins, UCB	laurent.provins@ucb.com
Président sortant	T. Randoux, Certech	Thierry.Randoux@certech.be
Secrétaire générale	C. Buess-Herman, ULB	cbuess@ulb.ac.be
Trésorier	P. Laurent, ULB	plaurant@ulb.ac.be
Délégué relations extérieures	P. Baekelmans, Solvay	paul.baekelmans@solvay.com
Délégué communication	A. Colas, Dow Corning	colas.andre@outlook.com

## Divisions

Chimie Médicinale	L. Provins, UCB	laurent.provins@ucb.com
Jeunes Chimistes	S. van den Wildenberg, ULg	svdwildenberg@ulg.ac.be
Histoire et Enseignement de la Chimie	B. Van Tiggelen	vantiggelen@memosciences.be
Délégué Essenscia Wallonie	C. Moucheron, ULB	cmouche@ulb.ac.be
	T. Randoux, Certech	Thierry.Randoux@certech.be

## Sections locales

Bruxelles	A. De Wit, ULB	adewit@ulb.ac.be
Louvain-la-Neuve	R. Robiette, UCL	raphael.robiette@uclouvain.be
Mons	P. Gerbaux, UMONS	Pascal.GERBAUX@umons.ac.be
Liège	A. S. Duwez, ULg	asduwez@ulg.ac.be
Namur	B. Champagne, UNamur	benoit.champagne@unamur.be

## Membres protecteurs de la SRC

ALLNEX  
CERTECH  
DOW CORNING  
EXXONMOBIL CHEMICAL  
ESSENSCIA  
LHOIST  
SOLVAY  
TOTAL PETROCHEMICALS RESEARCH FELUY  
UCB

## Parution : trimestrielle

Avec le soutien du Fonds National de la Recherche Scientifique.  
Les articles paraissant dans Chimie nouvelle sont repris dans CHEMICAL ABSTRACTS

Editeur responsable : Claudine Buess-Herman,  
ULB, CP 160/07,  
avenue Roosevelt 50, 1050 Bruxelles

Les articles sont soumis à un processus de reviewing.  
Les annonces publicitaires sont établies sous la responsabilité des firmes.

« CHIMIE NOUVELLE » est un titre déposé

ISBN 0771-730X

János B.NAGY et Joseph G. FRIPIAT  
REHNam, Université de Namur, Rue de Bruxelles, 61  
B-5000 Namur

# Nanotechnologies et Société

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 nanoproducts 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'adsorption 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 REHNam

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 Poullet, 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 REHNam pour l'Université.

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

Le Professeur Pierre Devos, président du REHNam, a remercié l'Université pour son accueil. Il a signalé que ce réseau comprend à ce jour 140 membres retraités de l'Université. Le REHNam 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.

### 1. Jouer avec des molécules individuelles : la chimie revisite ses classiques

La Professeuse 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 quarante ans, suivie du microscope à force atomique cinq 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 écrit 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.

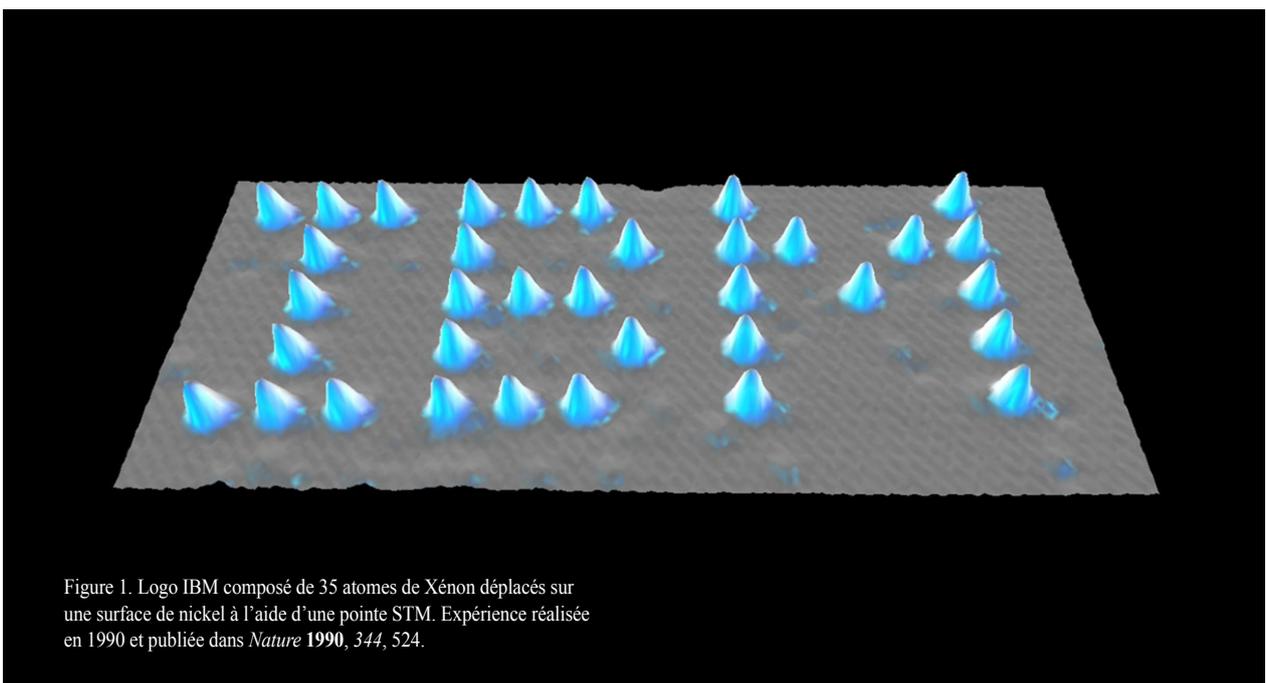


Figure 1. Logo IBM composé de 35 atomes de Xénon déplacés sur une surface de nickel à l'aide d'une pointe STM. Expérience réalisée en 1990 et publiée dans *Nature* 1990, 344, 524.

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 (Figures 2 et 3).

Les molécules synthétisées par les groupes des Professeurs David Leigh, Fraser Stoddart (prix Nobel 2016) et Ben Feringa (prix Nobel 2016) sont actuellement passées 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.

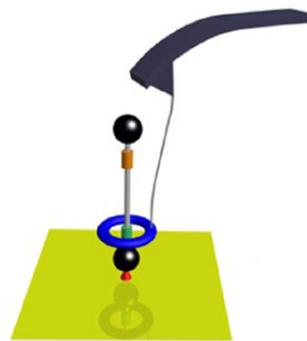


Figure 2. Illustration du principe de mesure du déplacement de l'anneau d'un rotaxane et de la force ainsi générée. Une «laisse» polymère est attachée à l'anneau et permet d'en suivre le mouvement à l'aide d'un bras de levier, composant d'un microscope AFM. Image reproduite de Duwez et al. *Nanotechnology*,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

## 2. De la molécule à la fonction : la chimie supramoléculaire en action

La deuxième session est présidée par la Professeure Suzanne Thiry, Professeure 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 [1], 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.

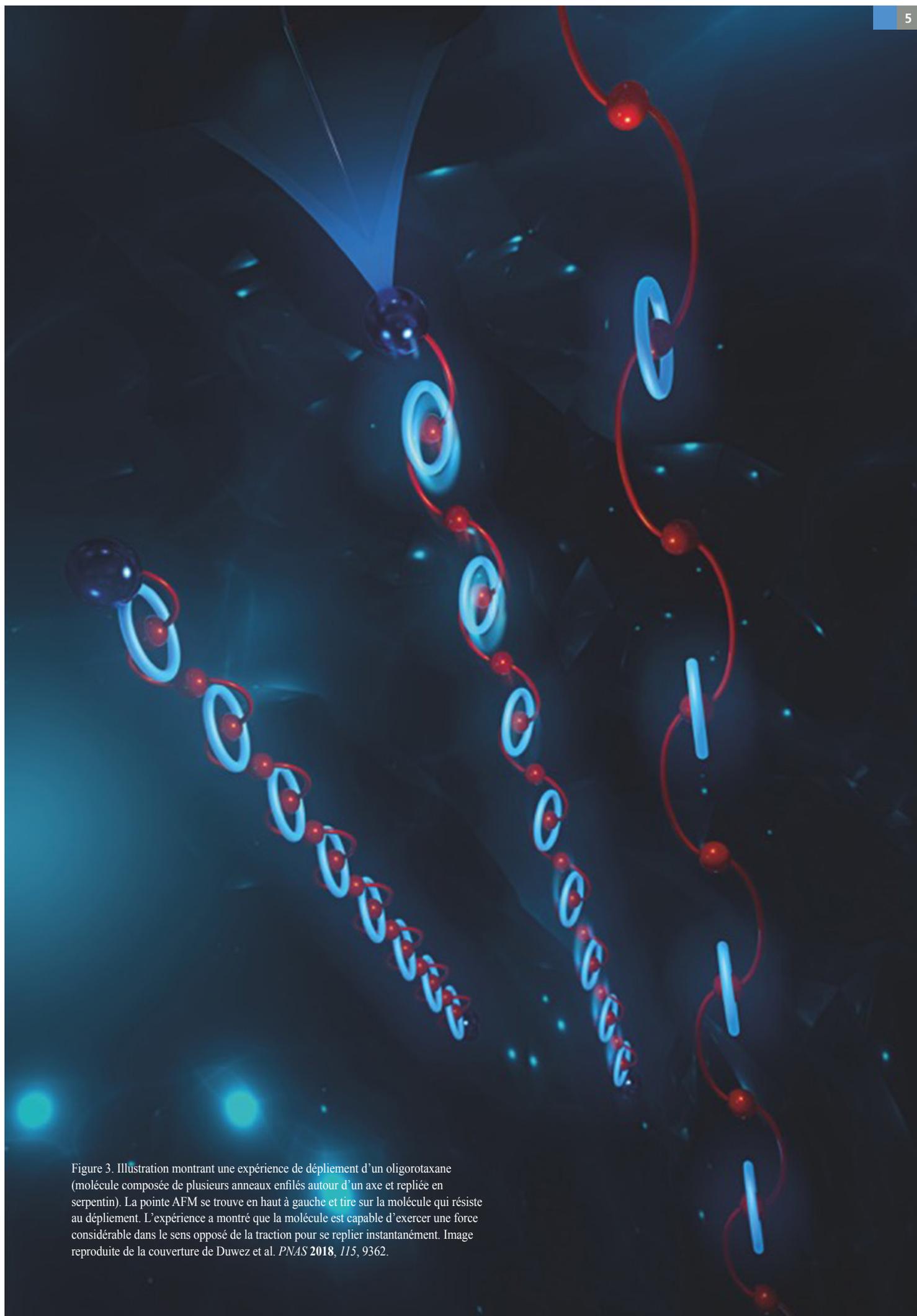


Figure 3. Illustration montrant une expérience de dépliement d'un oligorotaxane (molécule composée de plusieurs anneaux enfilés autour d'un axe et repliée en serpent). La pointe AFM se trouve en haut à gauche et tire sur la molécule qui résiste au dépliement. L'expérience a montré que la molécule est 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.

- 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 hydrogène ou des 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'autoréparation. Dans le futur, on pourrait imaginer des GSM composés de polymères supramoléculaires qui, une fois cassés, opéreraient l'autoréparation.

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'ab-

sorption 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 adsorbe 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.

### 3. Les applications industrielles des nanotubes de carbone : un début de maturité

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 ce numéro de la revue « Chimie Nouvelle ».

#### 4. Le carbone dans tous ses états

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 ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ , et  $^{14}\text{C}$ ). Il compare cet élément aux autres éléments qui se trouvent dans la même colonne du tableau périodique (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 dans sa couche de valence une orbitale atomique 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 liaison 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).

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.

### 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.

## The fullerene gallery

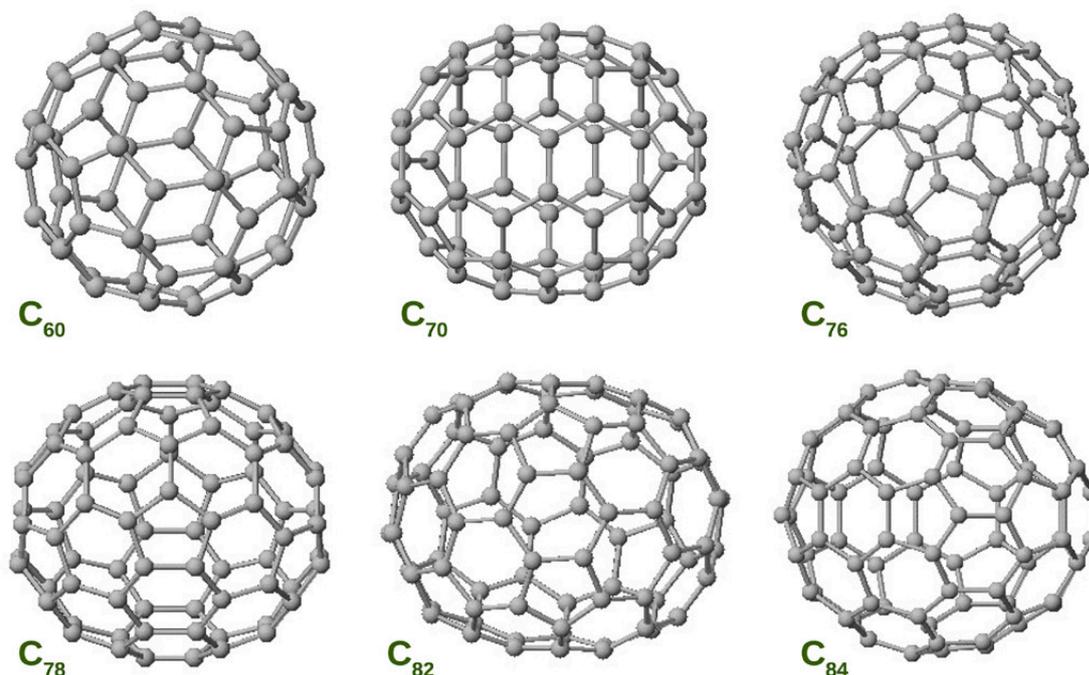


Figure 5. Les différentes formes de fullerènes ( $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{76}$ ,  $C_{78}$ ,  $C_{82}$ ,  $C_{84}$ )

Dans ces matériaux, les liaisons entre les carbones sont de type  $sp^2$  auxquelles il faut ajouter les liaisons  $\pi$  formées par les orbitales atomiques 2p perpendiculaires au plan des atomes. La structure électronique associée 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).

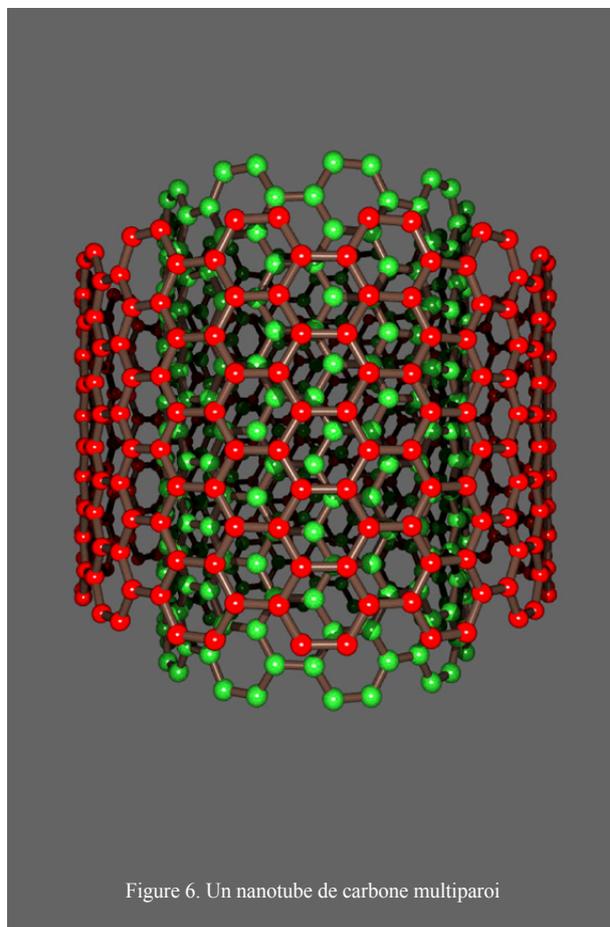


Figure 6. Un nanotube de carbone multiparoï

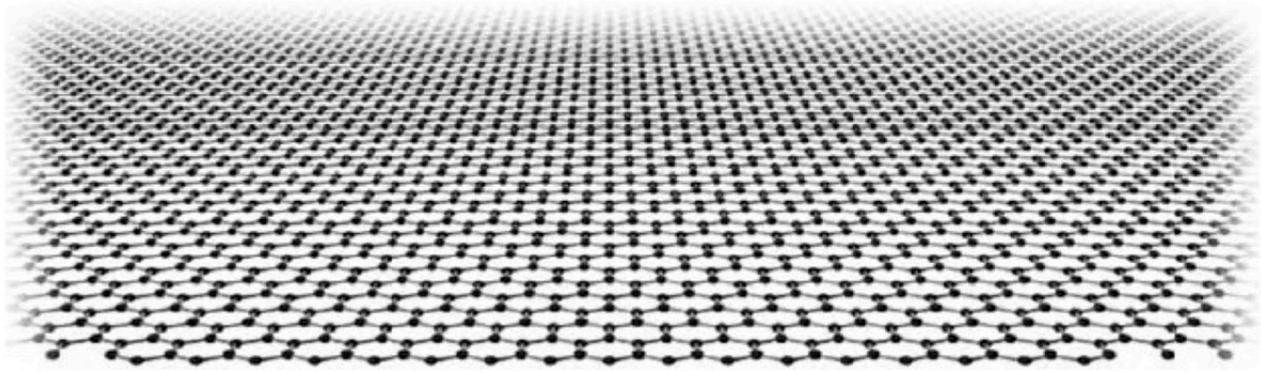


Figure 7. Le graphène

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 intersidéral 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 qu'elle 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 les uns dans les autres.

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 autres par la Société Nanocyl qui fut au départ un 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).

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 la 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  $\text{CO}$ , du  $\text{CN}$ , etc...).

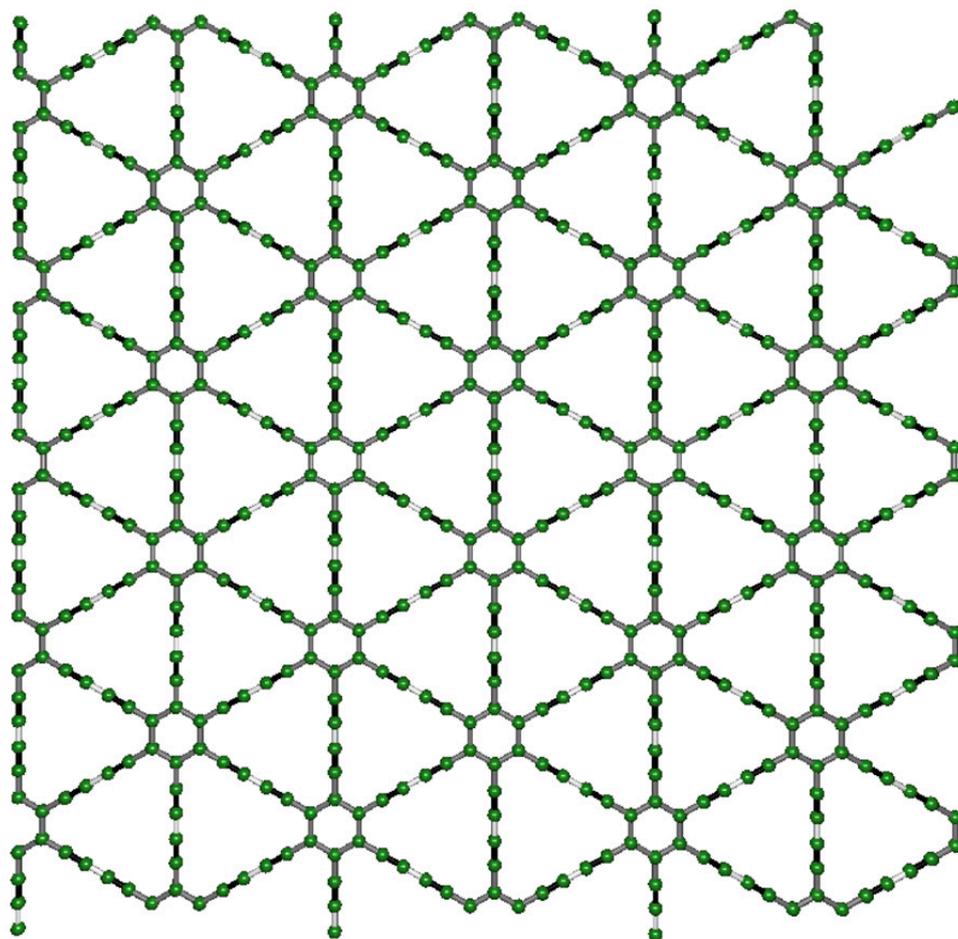


Figure 8. Le Graphyne-2 (graphdiyne) avec des ponts constitués de deux triples liaisons carbone-carbone entre les cycles benzéniques.

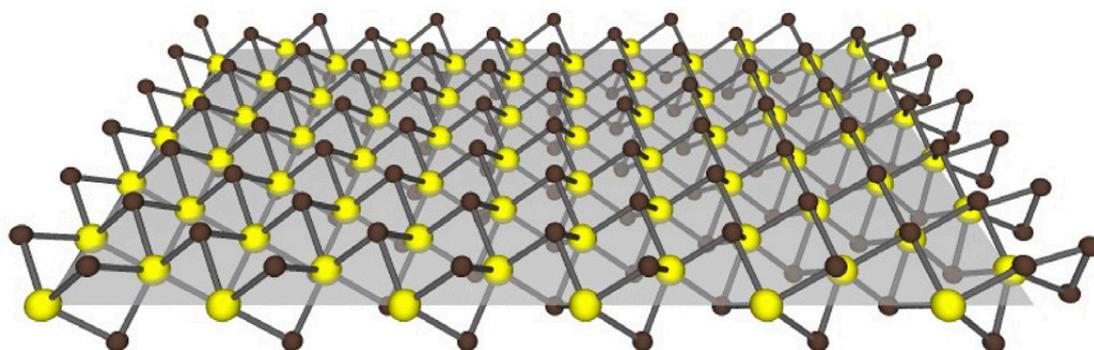


Figure 9. Un dichalcogénure d'un métal de transition de composition  $MX_2$  où M est un métal de transition (Mo, W, ..., représenté par une sphère noire) et X = S ou Se (en jaune).

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 supercondensateurs, 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 constitués par une ou plusieurs triples liaisons carbone-carbone.

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.

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

### 5. Nanotoxicologie : défis et acquis de 20 années de recherche

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/lti/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 de nanomatériaux s'ils sont soit isolés, soit s'ils se présentent sous forme d'agrégats ou agglomérats dont au moins 50% de ces particules ont des tailles de l'ordre de 1 nm-100 nm. On définit un agglomérat si les particules sont faiblement liées entre-elles. Dans le cas contraire, on parle d'agrégats. Les nanomaté-

riaux peuvent être à une dimension (les fibres), à deux dimensions (le graphène) ou à 3 dimensions (les nanoparticules).

A 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 ultrafines 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  $\text{TiO}_2$  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>ième</sup> et 7<sup>ième</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.

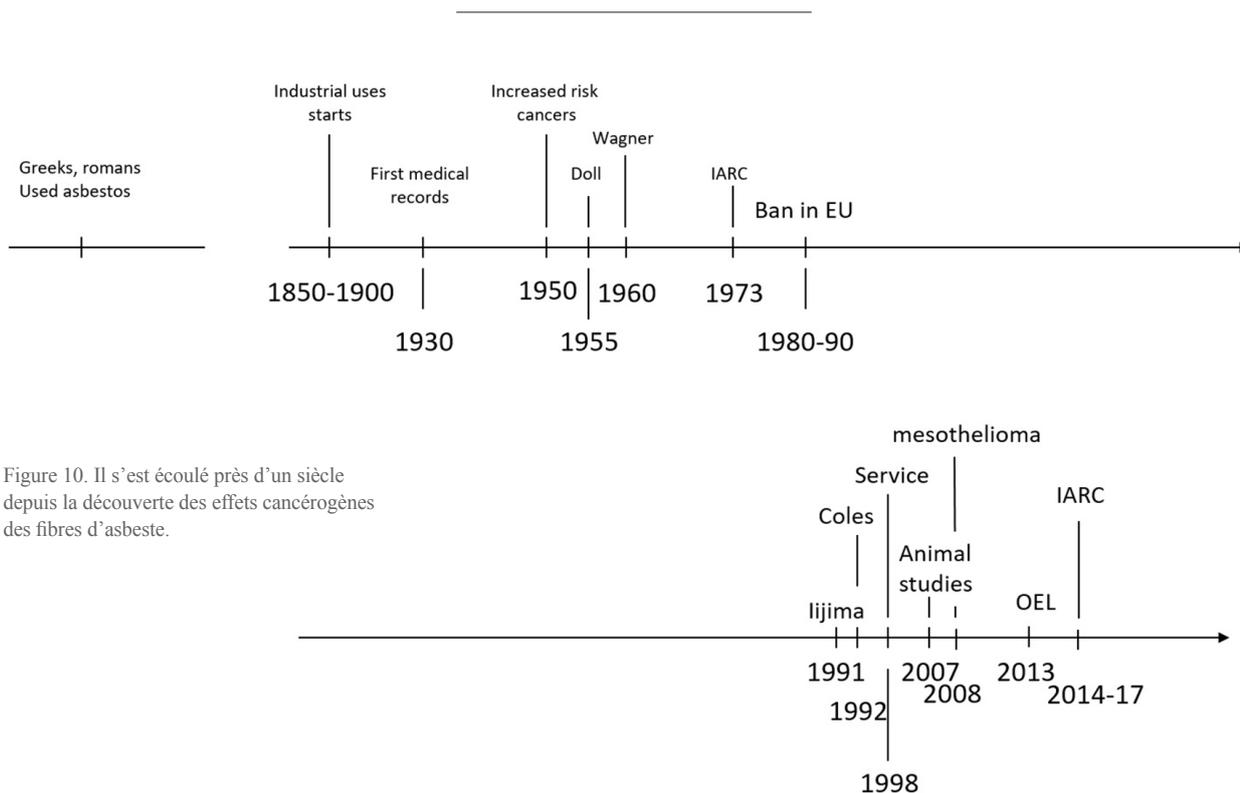


Figure 10. Il s'est écoulé près d'un siècle depuis la découverte des effets cancérogènes des fibres d'asbeste.

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 cancérogènes 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 (Figure 10). Serons-nous plus prompts à gérer le risque sanitaire posés par les nanotubes de carbone ?
- 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 aussi se montrer néfastes chez l'homme par la voie digestive. Il y a trois nanomatériaux (la silice, le dioxyde de titane  $TiO_2$ , 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  $TiO_2$ , 2 mg pour la silice et 1 mg 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). Ces microorganismes sont présents en quantité plus importante que le nombre total de cellules qui constituent le corps humain. Ils sont pré-

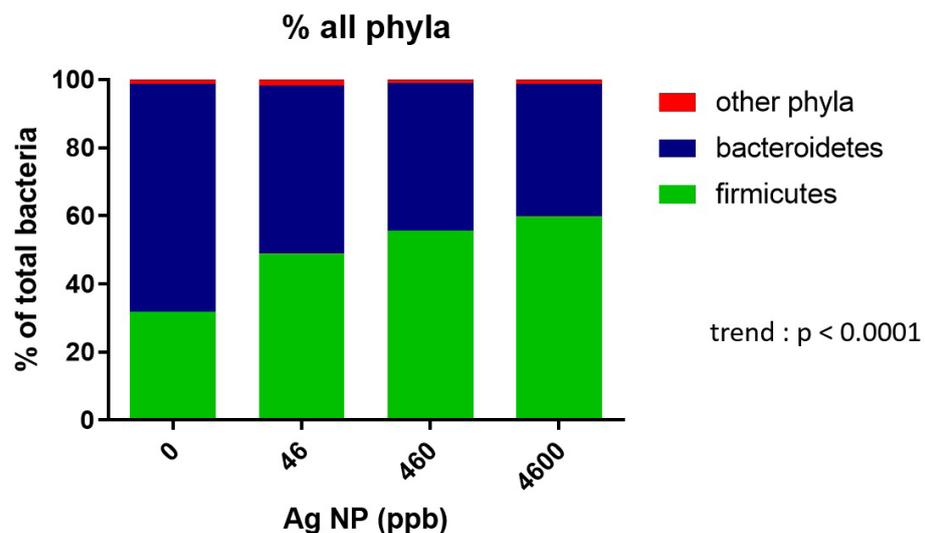


Figure 11. Illustration de l'effet de doses croissantes de nano-argent alimentaire sur la composition du microbiote intestinal chez la souris [2].

sents 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 responsables 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. En effet, si on regarde quelles sont les populations microbiennes qui changent dans les selles de ces animaux lorsqu'on augmente la quantité de particules de nano-argent, on constate une diminution du nombre de bactéroïdées et une augmentation des firmicutes (Figure 11). Ce phénomène est également observé chez les personnes obèses.

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.

## 6. Hyper-pouvoirs et impuissance : la vie au péril du projet immunitaire transhumaniste

La dernière session est présidée par le Professeur Yves Pouillet (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/>

Dans cet exposé, l'oratrice soulève la question de l'imprévisibilité de la vie, la vie à l'épreuve des tentations immunitaires du transhumanisme auxquelles contribue fortement la convergence entre les nanotechnologies, la biotechnologie, l'informatique, et les sciences cognitives (NBIC) [3]. Pour l'oratrice, ce qui est en jeu n'est pas uniquement l'humain mais la vie.

On parle beaucoup de transhumanisme, de ces possibilités de nous «augmenter», d'améliorer nos performances (psychique, mentale, cognitive) mais aussi notre productivité, nos jouissances et nos consommations. On est dans une idée d'augmentation très quantitative de notre bien être alors que les conditions matérielles, organiques, biologiques de la survie sur terre sont menacées.

Le contexte est donné par un philosophe, Frédéric Neyrat [4], qui explique que les deux maux dont meurent aujourd'hui les sociétés sont d'une part la croyance en l'indemne qui nous permet de tout détruire et la programmation des conduites qui nous empêche d'exister. L'hypothèse que l'oratrice émet à ce stade, c'est précisément que ce projet transhumaniste correspond à ces deux

maux, que ce projet est l'accélération de l'agonie pour atteindre finalement l'immobilisme de la mort. Il est vrai qu'aujourd'hui ce qui caractérise notre époque, c'est l'existence de désastres environnementaux, de changement climatique, des inégalités dans la distribution des richesses sur notre planète, les problèmes liés aux migrations de population que nous ne savons pas gérer. Tous ces faits génèrent en nous un sentiment d'impuissance. Il est tentant d'adhérer à des projets transhumanistes qui nous donneraient un sentiment de toute puissance en permettant de nous désintéresser radicalement de tout ce qui nous condamne à l'impuissance. Ils présupposent en premier lieu une sorte de réduction du vivant à une forme purement algorithmique ou une production de la vie sous forme de données. Il est vrai qu'en biologie, cette idée s'est répandue parce qu'il n'existe pas vraiment de théorie d'ontogénèse bien établie. Comment, par exemple, le développement de l'embryon conduit à une tête d'un côté et à des jambes de l'autre. C'est un mystère. C'est pourquoi cette idée de réduction à l'algorithme plaît assez bien. Monod et Jacob, pionniers de la génétique, écrivaient en 1976 qu'on n'interroge que la vie dans les laboratoires et c'est aux algorithmes du monde vivant que l'on s'adresse. Ils ne croyaient pas que la vie est réductible à des algorithmes, la vie étant bien plus que des algorithmes. Mais c'est une réduction méthodologique qui leur permettait de travailler.

Les algorithmes du monde vivant marquent déjà un premier passage de ce réductionnisme méthodologique vers une forme de réductionnisme idéologique qui induit progressivement une représentation de la vie qui aurait en son principe l'information et en particulier le code génétique. C'est ce code, qui survit à l'organisme et assure la reproduction de l'espèce. Cela marche de la même manière pour l'ensemble du monde vivant (bactéries, monde végétal, monde animal, l'être humain). L'information génétique est donc de ce point de vue absolument statique et immobile. Elle n'a rien à dire de la vie comme biographie chaotique de l'être humain. C'est en contraste avec ce que Hannah Arendt a écrit dans « *la*

*condition de l'homme moderne* » [5] que le propre de l'être humain est de se déplacer suivant une trajectoire rectiligne entre un début et une fin dans un univers biologique circulaire. Ce cercle biologique dans lequel les membres d'une espèce animale n'ont pas conscience de leur mortalité, d'un début et d'une fin. C'est pourquoi Arendt disait que l'homme est le seul être mortel. La mortalité est précisément ce dont les transhumanistes nous proposent de nous dispenser. Le transhumanisme nous propose aussi de nous dispenser de notre animalité, l'animalité étant l'organisme vivant. A partir du moment où la vie peut être reproduite sous forme d'informations, à partir du moment où la vie peut être désorganisée, fragmentée sous forme de microparticules « ré-agençables » à plaisir. On a plus affaire à de l'animal, il n'y a plus de distinction qu'on puisse faire à une certaine échelle. Tout est inanimé. La vie sous l'angle génomique du programme fait en sorte que le corps ne soit plus rien d'autre qu'un moment incident dans la transmission du code de l'information. C'est la raison pour laquelle l'organisme, le corps, la vie autobiographique, devient éminemment dispensable, devient éminemment aussi commercialisable, devient en quelque sorte un capital, peut-être un des objets de la domination capitaliste la plus importante à l'ère de l'anthropocène.

Le transhumanisme consiste donc à recueillir toute l'information qu'il y a dans le cerveau et à la reproduire sur un disque dur à l'abri de la corruption, de la dégradation, de la mort. C'est un projet qui est voué à l'échec parce que la vie est récalcitrante à ce genre de chose car tout simplement le cerveau ne fonctionne pas comme un ordinateur malgré toutes les métaphores qu'on peut utiliser aujourd'hui qui vont dans ce sens. Le cerveau ne fonctionne pas comme un ordinateur dans la mesure où il est impossible de séparer le hardware du cerveau du software du cerveau. On ne peut pas modifier l'un sans modifier l'autre.

C'est Miguel Benasayag [6] qui explique que, malgré que nos cellules soient remplacées continuellement, et donc physiquement notre organisme change, chaque fois qu'on se regarde dans un

miroir, on se reconnaît. C'est grâce à la mémoire. Aujourd'hui, il y a des propositions très concrètes d'utiliser notamment les nanotechnologies et les neurosciences pour corriger la mémoire. Par exemple, retravailler la mémoire des combattants armés qui ont subi des événements très traumatisants pour effacer certains souvenirs. Mais cela risque de produire des psychotiques parfaits.

C'est pour cela qu'il est absolument impossible de charger la vie et plus particulièrement la vie humaine à un moment donné sur un disque dur externe et pouvoir dire que c'est moi dans le « cloud » ; de la même façon qu'il était tout à fait impossible de dire, quand on a décrypté le génome humain et que l'on a mis sur une disquette, mon génome, c'est moi.

Cette sorte de révisionnisme a encore cours aujourd'hui, que ce soit dans le domaine de la génétique, que ce soit dans le domaine de l'intelligence artificielle, que ce soit dans le domaine des NBIC.

Nous ne sommes pas du code. Nous avons une dimension biologique et organique qui est niée par le transhumanisme. Nous avons une dimension symbolique. C'est d'ailleurs pour cela que Alain Supiot [7] assigne une fonction anthropologique qui consiste précisément à lier entre-elles les dimensions biologiques et symboliques de l'être humain. Dans la métaphysique du pur présent, la temporalité n'est plus qu'une juxtaposition de moments successifs. Ce qui disparaît précisément, c'est la durée et c'est aussi la rythmicité. Un très beau livre de Jonathan Crary, « *Capitalisme à l'assaut du sommeil* » [8] exprime justement qu'en fait, cette rythmicité aujourd'hui fait l'objet d'attentat continu. L'objectif est nous rendre productif ou consommateur puisque les deux se confondent dans une sorte de hyper-capitalisme. Cette maximisation de la production performante et de la consommation jouissante devient absolument indistinguable. Il n'y a plus de distinction temporelle entre les moments où je suis dans mon espace privé avec ma famille et les moments où je suis au travail puisque je suis toujours joignable, par exemple, grâce à mon smartphone.

On est dans une sorte de « sur-présence » sans existence. Nous n'existons pas dans des données. Nous n'existons qu'en sortant de nous-même. Nous sommes des processus en constant dépassement de nous-même.

Ce que propose le transhumanisme, c'est de faire ce déplacement à notre place, de nous optimiser. Plutôt que ce déplacement soit l'objet d'un projet, de fantasme, de fabulation, de rêves, de regrets, le transhumanisme nous propose plutôt de nous optimiser en fonction d'impératifs qui sont ceux du « pure-présence ». Le problème est que l'adaptation parfaite de l'espèce à un moment présent est la mort de l'espèce parce que de petits changements dans l'environnement feront que les super-adaptés vont devenir des hyper-mal-adaptés. Cela pour dire que cette volonté de cloner le cerveau ou les fonctions du cerveau (même sur des disques durs) c'est un peu du rêve. Ce qui apparaît dans les discours transhumanistes, c'est l'idée d'une forme d'accès à une rationalité absolue d'autant plus absolue qu'elle est désincarnée. On y retrouve certains thèmes théologiques, religieux, platoniciens, c.à.d. comme toutes les utopies, c'est la haine du corps. C'est l'idée que si on n'a plus de corps, on serait devenu plus rationnel, qu'on deviendrait tout à fait objectif, exhaustif, etc... Toutefois, sur le plan de l'évolution, il est quand même curieux que nous soyons restés en gros les mêmes depuis le début de l'homo sapiens. Est-ce que ce n'est pas un avantage évolutionniste de justement ne pas avoir une rationalité absolue ? Nietzsche dit aussi que si on était incapable d'oublier tout ce qu'on fait, on deviendrait fou. On a besoin de pouvoir faire le tri, d'oublier certaines choses. Il y a des manières de voir la vie ou le vivant autrement que comme simplement un ensemble de processus physico-chimiques modélisable, reproductible, augmentable, améliorable.

Il y a beaucoup d'ambiguïté dans le transhumanisme. Il y a des ambiguïtés entre réparer ou augmenter. Est-ce qu'on doit réparer simplement, par exemple, un corps ou une tête qui fonctionne mal ? Qu'est ce qui est normal ? On pourrait trouver qu'un handicap ou un fonction-

nement singulier n'est pas compatible avec un fonctionnement normal de « l'homo economicus ». Le choix de réparer ou de ne pas réparer certaines choses est évidemment conditionné par des variables socio-économiques qui n'ont rien de scientifique mais qui sont de nature politique. Avec ces nouveaux pouvoirs, c'est aussi se dire que l'environnement socio-économique dans lequel nous vivons, avec ces critères, ces seuils de compétitivité, cette course à la productivité, etc... seraient devenus le nouvel état de la nature et que nous devrions adapter l'espèce humaine à ces impératifs du marché. Dans ce cas, l'espèce humaine deviendrait éminemment plastique c.à.d. quelque chose que l'on peut transformer alors que les conditions socio-économiques acquièrent une rigidité qu'elles n'ont jamais eue jusqu'à présent. Il y a une complexité très grande sur le plan politique entre les discours pro-humanistes et cette sorte de fatalisme à vivre dans un système politique et économique qui nous envoie dans le mur.

Cette idée d'augmenter les performances intellectuelles, cognitives, émotionnelles, physiques, etc..., au-delà de l'idée de réparation, est complice d'une idée sur l'intouchabilité du capitalisme. Dans un manifeste publié en 2007 sur le transhumanisme, W.S. Bainbridge expliquait que « *Capitalisme is very good at producing the wealth, but not at distributing it to needy babies. NBIC is the chief means by which any economic system of the future can produce maximum wealth at minimum disruption to the environment and to people's lives* » [9]. La vie est éminemment divisible, elle est éminemment changeable mais on va corriger les dysfonctionnements, les coûts ou les externalités négatifs du capitalisme en utilisant les NBIC. En gros, on va améliorer les bêtes de manière à ce qu'ils puissent entrer idéalement en compétition, de manière à ne pas changer les règles de la compétition.

Tout cela est présenté comme étant émancipateur. On serait enfin émancipé des contraintes que nous impose la nature. On serait émancipé de notre corps mais en même temps on est totalement asservi à des systèmes de contrôle et de programmation de plus en plus sophistiqués.

Quand vous allez sur les réseaux sociaux, qu'allez-vous chercher : des likes. Ce sont des choses qui rendent la vie supportable ; ce ne sont rien que des signaux ; c'est insignifiant mais finalement on rentre dans une sorte de société où les individus rentrent dans des logiques d'optimisation mais d'optimisation non pas en fonction d'un projet qu'ils auraient décidé seul ou collectivement, non pas en fonction de normes qui auraient été délibérées mais en fonction simplement de métrique hyper-mobile qui dépend du comportement de tous les autres. Cela transforme de façon fondamentale la normativité et cela nous enjoint à adopter spontanément des logiques d'optimisation. Ces rapports avec l'environnement numérique nous transforment et transforment même nos structures neuronales. Comme déjà indiqué, cela entraîne d'énormes enjeux qui ne sont pas des enjeux techniques mais des enjeux politiques.

Le posthumanisme, comme on l'a appelé, est quelque chose de légèrement différent du transhumanisme et a été avancé notamment par des auteures matérialistes féministes comme Donna Haraway et Rosi Braidotti qui se sont fortement intéressées à cette problématique. Elles se sont saisies de tout cela comme une stratégie de dépassement de deux choses qui selon elles sont oppressives :

- D'une part le dépassement de l'humanisme, qui est critiqué par ce qu'il a comme modèle, selon elles, le modèle de l'homme blanc. Elles disent qu'il n'y a pas de raison de s'opposer au posthumanisme alors qu'on n'a pas considéré dès le départ tous les humains de la même façon. S'accrocher à l'humanisme, c'est aussi s'accrocher à des vieux modèles alors que le posthumanisme pourrait être l'occasion de critiquer ces vieux modèles.
- D'autre part ce dépassement de l'humanisme est une occasion de nous défaire, de nous écarter de l'anthropocentrisme. A partir du moment où effectivement vous avez une sorte de description du monde comme étant un continuum animé ou inanimé, il n'y a plus de raison de faire des

distinctions entre les animaux et les êtres humains. Bien entendu, il faudrait que cette dématérialisation, cette déterritorialisation ne soit pas faite au détriment de la vie c.à.d. au détriment de la prise en compte des organismes dans ce qu'ils ont de plus situés. Ce que propose le transhumanisme, c'est le contraire de sortir de toute decontextualisation, c.à.d. de couper toute information de son contexte référentiel, de ne plus considérer comme pertinent la manière dont vivent les gens, ce qu'ils ont à dire puisqu'on abandonne la culture du signe reconnaissable, interprétable, du texte, du langage humain au profit d'une culture du pur signe insignifiant, du pur signal numérique insignifiant, recombinaison, calculable, une culture de l'algorithme.

C'est une illusion de penser que le posthumanisme va être émancipateur pour les catégories du vivant qui sont les moins bien représentées en politique. Comme le disait Arendt, c'est par l'action politique qui transcende à la fois la nécessité de survivre et la nécessité de la reproduction de l'espèce et aussi, à la fois, par l'utilitarisme social que l'humain conquiert son humanité. Cela a tout son sens car l'humanité n'est jamais acquise. Nous n'avons jamais été humain. C'est un projet. On pourrait considérer que l'humanité, c'est quelque chose qui est en projet, que nous avons à devenir plus humain. L'humanité n'est jamais acquise de même que la justice est un processus continu dont nous avons à prendre soin en évitant la tentation très forte de recouvrir cette exigence et cette responsabilité par des moyens du « techno-solutionnisme », parce que l'humanité est irréductible à l'éternel répétition du « même ».

Qu'est-ce que l'action politique ? Pour l'oratrice, l'action politique a besoin pour surgir de certaines conditions matérielles, physiques, temporelles, qui doivent être présentes pour que celle-ci puisse se produire. Il faut d'abord un lieu, une localisation, qu'on appelle l'espace public. L'espace public est le lieu dans lequel on est exposé à des choses qui n'ont pas été pré-

vues pour moi. C'est le lieu aussi d'exposition des limites de toute représentabilité. C'est le lieu d'ouverture à ce qui n'est pas prévisible, ce qui n'est pas échu, par exemple les besoins ou les droits des générations futures. Elles n'ont pas de voix actuellement. Il faut un espace public pour faire surgir ces besoins. Faire valoir les intérêts de la vie même contre ces processus d'optimisation qui, en fait, l'épuisent au profit de l'actualité pure. Ils ont besoin d'un espace public pour s'exprimer. Donc c'est un espace d'exposition irréductible à l'irreprésentabilité, à l'imprévisibilité, « l'incalculabilité ». Ce n'est donc qu'à être exposé à cette irréreprésentabilité, à cette imprévisibilité, à cette « incalculabilité » que nous avons la possibilité de devenir humain. De la même manière que depuis assez longtemps, on a cette idée que la raison n'a pas besoin d'être assurée pour être la raison. Il y a un fond « d'incalculabilité » qui est toujours présupposé dans la raison alors que l'idée de la raison que se font les transhumanistes, ce n'est plus du tout cela. C'est l'idée, au contraire, que tout est calculable, qu'il n'y a pas d'incalculabilité, que la raison donc n'a même plus à évoluer. Elle peut être tout à fait figée puisqu'il a tout pris en compte et que de toute façon, ce qu'elle n'aurait pas pris en compte ne vaut pas la peine d'être pris en compte puisque c'est sale, c'est le corps, c'est les affects. C'est toutes ces choses que finalement les transhumanistes ne veulent plus.

Qu'est-ce donc cette l'espace public ? C'est un espace d'hospitalité pour ce qui n'a pas été prévu pour l'inoptimalisable. C'est un espace de dépendance et d'interdépendance lorsque nous sommes exposés en commun à de l'imprévisibilité. C'est un espace dans lequel peuvent être pris en compte des vulnérabilités. C'est un espace qui ne peut exister qu'à condition d'exercer une extrême méfiance par rapport à tous les réductionnismes idéologiques.

C'est très difficile de résister à la tentation du réductionnisme. D'une part le réductionnisme méthodologique est indispensable en science, cela fait partir de la formalisation. Ce que l'oratrice a en ligne de mire dans sa critique, c'est davantage cette extrapolation au départ d'un

réductionnisme méthodologique bien maîtrisé par les scientifiques, une extrapolation dans la sphère publique, dans la sphère médiatique, etc..., enfin un réductionnisme idéologique qui, parfois aussi, séduit les scientifiques eux-mêmes car cela peut rapporter pas mal d'argent de dire qu'on va enfin avoir le grand livre de l'humanité.

Aujourd'hui, on parle beaucoup d'intelligence artificielle alors qu'il s'agit du début de l'artificiel que l'oratrice souligne en rappelant que le « machine learning » est codé en « Python » tandis que « l'apprentissage profond » de l'intelligence artificielle est codé en « Powerpoint ». C'est politiquement important car cela génère des attentes dans la population. Cela absout les politiciens ou ceux qui auront à prendre soin du monde car ils se disent que de toute façon on aura l'intelligence artificielle qui va tout faire pour nous, qui va tout régler. On va avoir les NBIC qui vont tout régler aussi, qui vont... faire naître des bébés parfaits.

En conclusion, si les NBIC posent de nouvelles questions : questions éthiques, juridiques, sociales, elles font surtout resurgir de vieilles questions qui avaient été un peu oubliées en raison de notre prédisposition à apercevoir le monde à travers une série de dichotomies conceptuelles qui nous paraissent bien établies : science, technique. Cela semble parfois problématique puisque la science vise à des publications. Cela ne rapporte pas beaucoup d'argent mais la technique mène à des brevets. On a tendance parfois de passer rapidement de la science, quand on a obtenu des résultats scientifiques probants, à la technique, c.à.d. faire des applications sur base de cette science. Mais là, il y a quelque chose qui coince entre les deux parce que précisément quand on veut appliquer la technique, il y a l'environnement qui se rapplique. Du coup, cela foire. On a parfois un manque de prudence pour des raisons d'incitants économiques.

Distinction entre faits et valeurs, distinction entre naturel et l'artifice, distinction entre le vivant et l'inerte, distinction entre sujet et objet, entre liberté et déterminisme, entre chance et choix, entre santé, maladie et handicap, entre normal et anormal, toutes ces dichotomies à tra-

vers lesquelles on nous a habitués à percevoir et évaluer le monde et ces habitants semblent aujourd'hui trembler, se dissoudre et donc on est face vraiment à la nécessité d'inventer une nouvelle manière d'appréhender ces questions. Alors une proposition que l'oratrice ferait, c'est peut-être de remplacer cette dichotomie par une nouvelle définition de l'être humain : l'être humain comme marqué par de l'altération, par la « différance », (comme l'écrit J. Derrida) c.à.d. cette tendance qu'on a toujours à différer de nous-même. Nous ne sommes jamais complètement dans le présent. Nous faisons des projets mais nous sommes rattrapés par des rêves qu'on a faits pendant la nuit passée. Nous sommes totalement inadéquats à nous-mêmes. Nous sommes toujours en constant dépassement. Nous sommes un angle mort pour nous-mêmes : impossible de nous voir nous-mêmes. Ce principe de « différance » est absolument essentiel.

Si nous ne sommes jamais contenus dans un aucun présent mais si nous nous vivons dans une durée escomptée par des rythmes et qui est instituée par des rites, la question pour nous, question à la fois politique, éthique, juridique, est justement comment ré-instituer ces rites, ces rythmes pour ne pas se dissoudre dans les flux. Il me semble qu'à cet égard l'engouement pour les NBIC peut s'analyser essentiellement, d'une part comme le symptôme d'une très grande déception envers les promesses de l'humanisme qui n'ont pas été tenues, une sorte de fatalisme ou de pétainisme à l'égard de la capacité qu'on a politiquement de nous gouverner nous-même, alors on aimerait sous-traiter cela à des machines. D'autre part, une sorte de dépression, une haine de soi que les posthumanistes ou les transhumanistes considèrent que l'on est tellement imparfait que vraiment il faudrait mieux qu'on abandonne cet homosapiens qui nous avait fait assez de mal et devenons quelques choses d'autre. Face à cela, il est urgent d'être plutôt joyeux autant que faire ce peu, autant aller à la catastrophe avec le sourire ou en tout le cas de faire en sorte, suivant Frédéric Neyrat, que notre pessimisme tout à fait justifié ne nous empêche pas d'agir.

## 7. Conclusions

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

<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 perspectives dans le développement des nanotechnologies et 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 États-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 États-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 fondées sur la recherche 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 cents millions d'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 nanomachines 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 de calcul et de stockage énormes pour pouvoir utiliser l'intelligence artificielle (Text mining, Text matching, Machine learning) dans la vie quotidienne. Un autre type d'interaction est celui qui existe entre la biologie et l'informatique pour donner la bioinformatique. 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 que la frontière entre ces différentes disciplines devient de plus en plus floue.

De l'exposé très dense d'Antoinette Rouvroy, il ressort que le posthumanisme et le transhumanisme résultent d'une convergence « algorithmique » entre les différentes disciplines citées plus haut : convergence des NBIC soutenue par la puissance idéologique -donc aveugle- du capitalisme néolibéral, convergence qui risque de conduire à la négation de *l'imprévisibilité*, de *l'irreprésentabilité* et de « *l'incalculabilité* » intrinsèques de la vie humaine. Et, en corollaire, conduire à l'effacement de l'action poli-

tique dans l'espace public, base de la démocratie.

Rappelant la version légendaire du mythe faustien de Goethe, l'orateur se demande si le transpost-humanisme ne nous propose pas une forme réductrice, plus inquiétante et angoissante, de ce mythe :

- la substitution du mythe de l'Homme-algorithmique à l'Homme-prométhéen ?
- le doute dans les valeurs d'un humanisme contemporain, voire leur refus, face à la crise de la démocratie ?
- et le refuge aveugle dans les mirages des populismes ?

## Références

- [1] Primo Levi, "The periodic table", New York, Schocken Books, 1984 <https://www.bbc.co.uk/programmes/b07ksr39>, retrieved 5 august 2016.
- [2] van den Brule et al., Part Fibre Toxicol 13 :38 (2016).
- [3] Converging Technologies for Improving Human Performance: nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science. NSF/DOC report. National Science Foundation 2002.
- [4] Frédéric Neyrat La Part inconstructible de la Terre. Critique du géoconstructivisme, Seuil, 2016.
- [5] Hannah Arendt, *Condition de l'homme moderne*. Paris, Calman-Lévy, 2018.
- [6] Miguel Benasayag, *Fonctionner ou exister ?* Paris, Le Pommier, 2018.
- [7] Alain Supiot, *Homo juridicus. Essai sur la fonction anthropologique du droit*, Points, 2009.
- [8] La Découverte, 2013.
- [9] W.S. Bainbridge, *Journal of Medicine and Philosophy*, 32, 197-216, 2007.

Laurent KOSBACH

C.E.O. Nanocyl SA, Laurent.KOSBACH@nanocyl.com

# Les Applications Industrielles des Nanotubes de Carbone : Un début de Maturité ?

## Résumé

25 années se sont écoulées entre la découverte et l'intégration industrielle des nanotubes de carbone dans des applications de B2B (business-to-Business). Il sera proposé de discuter du cycle de vie des produits et de la phase de maturité des marchés.

Avec un marché en forte croissance, malgré des « exit-stratégies » marquantes, des producteurs asiatiques continuent d'apparaître et de se focaliser sur le marché des batteries. De nombreuses formes de nanotubes de carbone sont apparues et dans la famille une certaine catégorisation apparaît clairement. Les nanotubes de carbone multi-parois (MWCNT) font partie de la famille des carbones conducteurs utilisés depuis des années dans les câbles, plastiques. Des facteurs macro-économiques soutenant le démarrage de la technologie des nanotubes de carbone sont discutés.

Bénéficiant des économies d'échelle lors des phases de décollages, les prix se stabilisent à un niveau qui dans le cas de Nanocyl permettent un réinvestissement dans la technologie. Les multiples concurrents qui souhaitent intégrer le dossier REACH, mené par Nanocyl, annoncent-ils la maturité des participants face à REACH et leur projection vers un futur industriel confirmé ? L'augmentation de la concurrence, la baisse des prix, la croissance encore forte dans la durée et le renforcement des réglementations sont-ils les signes annonciateurs d'une certaine maturité ? Peut-être pas encore, car l'analyse du dossier

MWCNT l'an prochain sera une étape discriminante des participants à cette industrie. De même, cette étape franchie, nous attendons une réduction forte des incertitudes générales des « nano » et une relance encore plus importante des développements.

## Summary

It has taken more than 25 years to get the multi-walled nanotubes to the industrial level. Mostly for B2B applications in the Automotive, Electronic, Energy and Industrial domains, these materials have found their position versus the historical other sources of conductive materials – the carbon black industry. Over the last 20 years the materials have gained ground in the anti-static plastics and battery applications. Enabling technology, MWCNT is key to the development of batteries for Electric Vehicles and for weight reduction needs. However, the REACH dossier analysis of 2019-2020 will clarify the relative competitors' preparation to the regulations.

## Keywords :

nanotubes, Cycle ; maturity ; REACH

## Nanocyl SA

Nanocyl 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. Les validations de ses études toxicologiques auprès de REACH ont pris des années, le développement des marchés également. Mais le positionnement unique de Nanocyl en tant que leader du dossier européen est affirmé. Reconnue comme fournisseur industriellement un nanotube de carbone performant depuis dix ans, Nanocyl voit son avenir avec confiance.

### 1. Les facteurs de « maturités » des marchés en fonction du cycle de vie

La théorie du cycle de vie d'un produit est communément acceptée aujourd'hui pour être en 4 ou 5 phases (Figure 1) : Lancement, Croissance, Maturité, Saturation, Relance ou Déclin [1].

Ces phases classiquement décrites dans les analyses marketing des 40 dernières années ne sont pas fonction du temps, mais plus rationnellement des investissements divers et variés, internes et externes à l'entreprise, dans le produit développé.

En général, les investissements sont en R&D, en développements de produits, en dépôt de bre-

vets, en process, en staff, en marketing (image), en benchmarking de la concurrence éventuelle (directe ou indirecte), en études sanitaire et sécurité, en contrôle des coûts, pour ne citer que quelques éléments.

C'est donc la somme des travaux et des analyses que la société et toutes ses équipes mettent en action qui détermine en grande partie le cycle de vie d'un produit. L'autre partie reste bien entendu la demande pour ce service ou ce produit.

Il est clair que rien n'est inéluctable et que des investissements en productivité, innovation, etc., peuvent amener des phases de relance d'un produit vieillissant. En cela l'exemple de la « box » internet de Free sur le marché européen illustre bien l'importance de l'action des entreprises pour reprendre une dynamique faiblissante (Figure 2).

Effet « ESCALIER » dû aux politiques de relance commerciale et d'innovation des entreprises permettant de repousser la phase de maturité et d'éventuel déclin. [2]

La connaissance de ses marchés, des attentes de ses clients ou des innovations techniques nécessaires pour rester à l'avant de la concurrence sont des points critiques pour le développement « innovation », booster de la croissance.

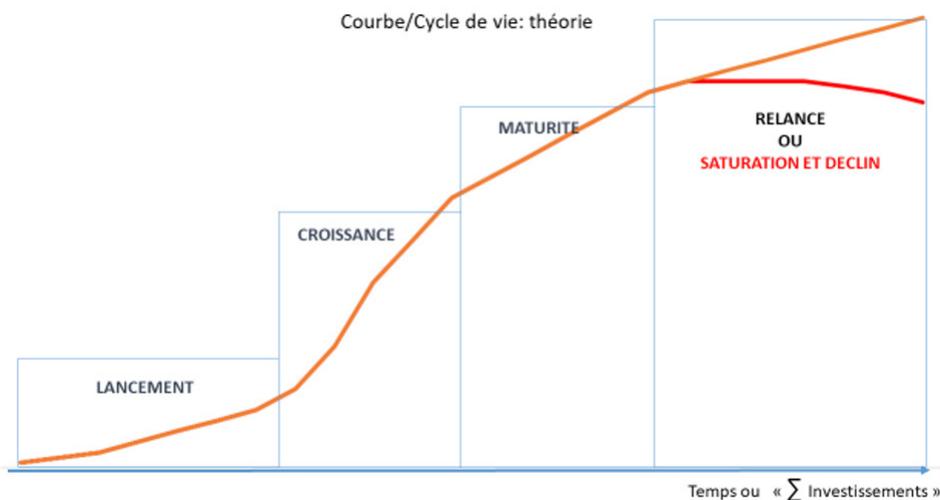


Figure 1

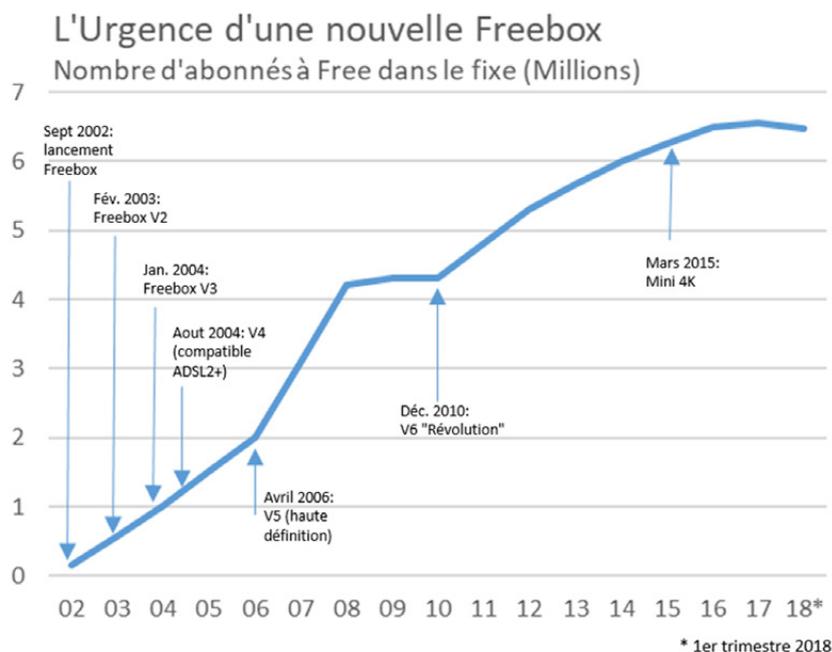


Figure 2

## 2. Nanocyl, brève description

Ce développement est à recadrer dans un environnement macro-économique et technique plus large où nombre de nouveautés industrielles ont préparé à la nécessité de trouver des particules carbonées plus performantes que les matériaux en place depuis 150 années.

À titre d'exemple :

- **La miniaturisation électronique** a permis le développement de l'électronique portable à grande ampleur. Mais elle a généré aussi des besoins croissants de pureté des matériaux lors de la fabrication. Plus la pièce est miniaturisée, plus la plus petite impureté devient un problème. Sans entrer dans des détails techniques, depuis plus de 10 années les MWCNTs ont démontré industriellement leur avantage particulier face aux noirs de carbone conventionnels : plus purs, plus résistants et plus recyclables, les matériaux polymères composites MWCNT ont su répondre à des besoins accrus de performances.
- **Les normes de sécurité** plus strictes en développement constant: les définitions ATEX [3] se développent pour de nombreuses applications, même si aujourd'hui cela ne représente qu'un poids commercial faible. Mais il est clair que pour obtenir des productivités accrues, la vitesse d'exécution des tâches ou de transfert des matériaux peuvent amener la nécessité de limiter le risque d'explosivité des zones de production. Cela rend les coûts d'investissements d'infrastructure de plus en plus élevés – augmentation forte de la valeur des investissements en équipement et en informatisation. La mise en sécurité des pièces anti-statiques fabriquées avec les MWCNT peuvent répondre à ces besoins.
- **L'augmentation de la demande de protection** électro-magnétique (EMI shielding) ne cessera de croître dans l'automobile où, là encore, la miniaturisation sera requise pour intégrer au mieux toute l'électronique embarquée dans les voitures. Plus d'électronique, plus de concentration va exiger plus de protection électro-magnétique et donc plus d'innovation dans ce domaine.
- Besoin de sécurité **Anti-feu** : Dans ce domaine, nos nanotubes de carbone ont su démontrer une performance anti-feu (Fire retardant) dans la câblerie. Mais comme précédemment, également pour des raisons de sécurisation d'investissements machine/

informatique élevés. Cet effet réducteur de feu a été démontré lors de tests qui ont clairement mis en évidence l'élimination de l'effet lave (lava effect) que les polymères en feu génèrent habituellement

- Le besoin de **réduire les poids** des véhicules est aussi un driver important. Les efforts dans le domaine aéronautique sont connus, mais l'automobile est également un domaine où les matériaux pèsent moins. Ce besoin fait face au coût de l'énergie – tant décrié aujourd'hui en France – qui exige une économie d'énergie au kilomètre parcouru sans cesse renouvelée. Même si peu d'entre nous s'aperçoivent que les matériaux se sont améliorés, car le poids global des voitures répond aussi à la demande d'espace des consommateurs, les performances de consommation ont été impactées par l'allègement de certaines pièces des véhicules.
- Finalement : le besoin accru en puissance, charge rapide ou/et autonomie des véhicule hybride ou électrique (100%) ne semble pas pouvoir être indissociable d'un soutien technologique des MWCNT.

Commentaires sur les travaux sur le retard au feu dans le cadre du projet Européen DEROCA : Je

suis convaincu que seuls les CNT sont capables de performer ainsi. Je vous laisse imaginer la réduction des conséquences que cela aurait eu sur le feu de câbles qui a eu lieu à Paris dans les bâtiments SNCF lors des vacances dernières : interruption des grandes lignes pendant 5 jours, au pic de la demande de transport, danger sur l'intervention des techniciens pendant l'incident (fumée toxique etc.).

### Historique et Cycle d'Expansion-concentration

Une croissance annuelle à deux chiffres. Des équipes technico-commerciales, de développements et de gestion de projets (nombre projets leader etc.).

Net exportateur avec 90% des ventes hors Belgique et 50% asiatiques.

Passons par un rapide rappel du temps (Figure 3). Bien que le concept de carbone structuré « nano » soit dans nos vies depuis bien longtemps [4, 5], c'est vers la fin des années 1980s que la Recherche Collaborative permet de mettre à disposition des laboratoires une théorie de fabrication des nanotubes de carbone [6]. À ce stade, de nombreuses structures se mettent en place pour transformer ces innovations théoriques en produits réels, reproductibles et commercialement attractifs.

A dynamic company

	Founded in 2002, BELGIUM. Solid historical confidence of private ownership
	~40 people : Highly skilled staff
	Industrial MWCNT capacity : 400 tons 3500 tons of thermoplastic compounds capacity
	Provide the most <b>electrically conductive</b> multiwall carbon nanotube in the world
	Unique and proprietary (patented) catalyst composition and production processes Intellectual property (IP): >45 international patents covering our entire value chain still active
	<b>Worldwide</b> distribution & agency network and reliable <b>supply</b> : EU, Japan, South Korea
	2 facilities: R&D and Production, Sambreville, Belgium 1 off-site warehouse
	<b>International certification</b> : ISO 9001:2015 <b>NC7000 registration</b> : REACH (EU), TSCA PMN granted (USA), CEPA NSN Schedule 5 (CANADA)

Figure 3

Créée en 2002, fusion des innovations développées au sein des centres de recherche de l'UNamur et l'ULg, financée par des investisseurs publics et privés wallons avec un objectif de leadership et d'industrialisation d'une technologie nouvelle, la société a aussi pour but de soutenir un environnement industriel de pointe en Belgique.

Il est ici important de saluer les travaux des universités, l'UNamur et l'ULg, et tout particulièrement des professeurs J. B.Nagy et J.-P. Pirard, les précurseurs. De ces travaux, il en résultera les éléments fondamentaux créateurs de process et de matériaux catalyseurs qui par leur réunion vont éveiller l'intérêt de financeurs belges et engendrer la création de Nanocyl SA en 2002.

Nous allons ici nous cantonner au domaine déjà bien large des nanotubes de carbone multi-parois (MWCNT). En effet, bien que les « simple parois » fassent toujours énormément rêver la recherche car leur potentiel technique est encore à découvrir, leur fabrication industrielle est nulle part.

Après une phase de R&D où les acteurs divers et variés de l'industrie en création (laboratoires, investisseurs industriels, start-ups) se sont concentrés sur la transition de la théorie vers la production – en d'autres termes sur la fabrication

de grammes, vers la fabrication de kilos, puis celle de tonnes annuelles de matériaux – nous avons assisté, de 2011-2018 à une phase de création d'entreprises ou de grands groupes focalisée sur le lancement de produits divers et variés (Figure 4).

En effet, dès les années 1990, Hyperion Catalysis et des grands groupes industriels tels que Samsung se lancent dans l'aventure des MWCNT, soit parce que le drive innovant est dans leur culture, soit parce qu'a priori ils contrôlent les débouchés en aval et leur sont donc « faciles » d'accès. Ces précurseurs sont suivis début 2000 par Bayer, Nanocyl, Arkema et un certain nombre d'entreprises asiatiques, tel que Showa Denko.

Le choix stratégique de la technologie ou des marchés ciblés rencontrera les besoins en cash d'investissements inhérents au développement à long terme d'une nouvelle technologie. La réalité de la concurrence, déjà établie, par la prédominance des capacités installées et les performances comparatives des produits, va pousser certains à une réflexion plus approfondie.

Il s'ensuivra rapidement les premières « exit-stratégies » avec la disparition de Bayer, Samsung, Showa-Denko, Southwest Nanotechnologies et autres centres de développement de matériaux.

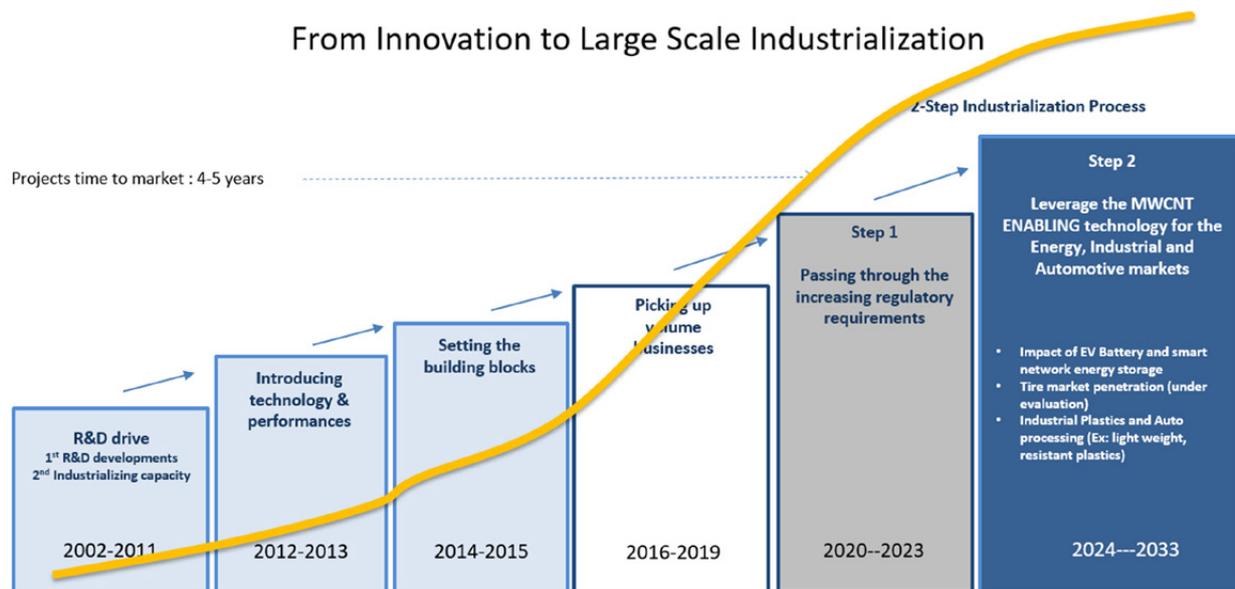
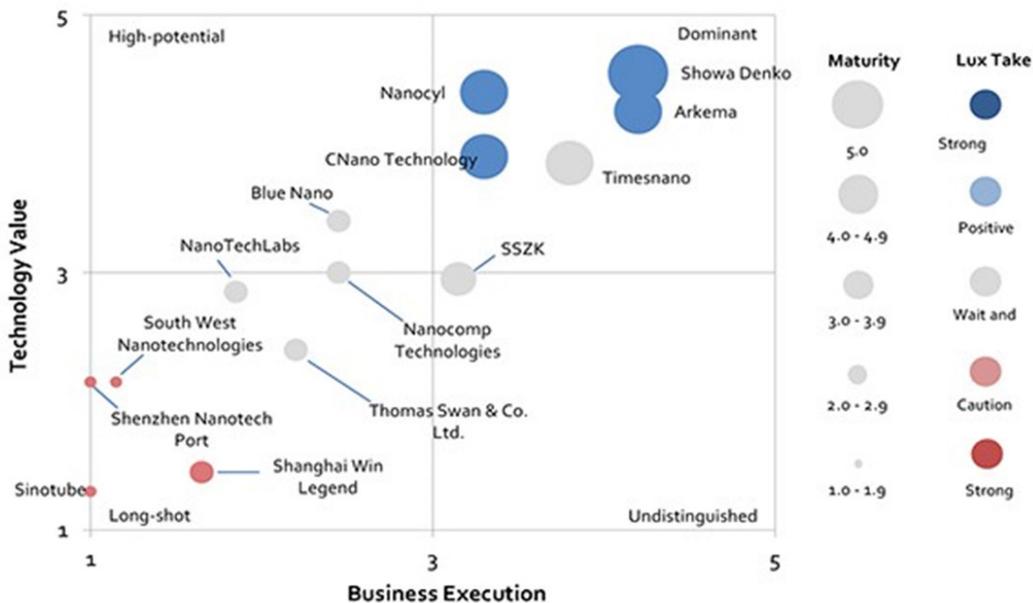


Figure 4

### Chinese CNT Players on the Lux Innovation Grid



Source: Lux Research, Inc. [www.luxresearchinc.com](http://www.luxresearchinc.com)

Figure 5

La sortie de Bayer est pour nous un élément marquant, car de partenaire REACH avec cette société, l’opportunité nous était donnée de reprendre le leadership du dossier. Ceci renforça notre détermination à valider la sécurité de nos produits et de mener plus avant les études nécessaires pour REACH.

En 2014, Lux Research, Boston, analyse la contribution de certains participants au marché des Nanotubes (Figure 5).

Quelles que puissent être les conclusions de Lux Research quant au potentiel de chacun, le fait marquant de ce graphe est le développement de la concurrence asiatique (Figure 6). Depuis, Showa-Denko est vraiment sorti des MWCNT, mais reste dans le domaine des nano-fibres avec leur produit VGCF. Arkema n’a – à notre connaissance – pas évolué vers la maturité, mais CNano, Shenzhen et d’autres groupes Chinois ont définitivement investi en capacité ces 3 dernières années, ainsi que 2 groupes sud-Coréens. En effet en 2013 les conglomérats coréens Kumho et Hanwha annoncent le lancement de capacités. Hanwha se retire en 2016,

### Est. Capacity share Top 10 + Others

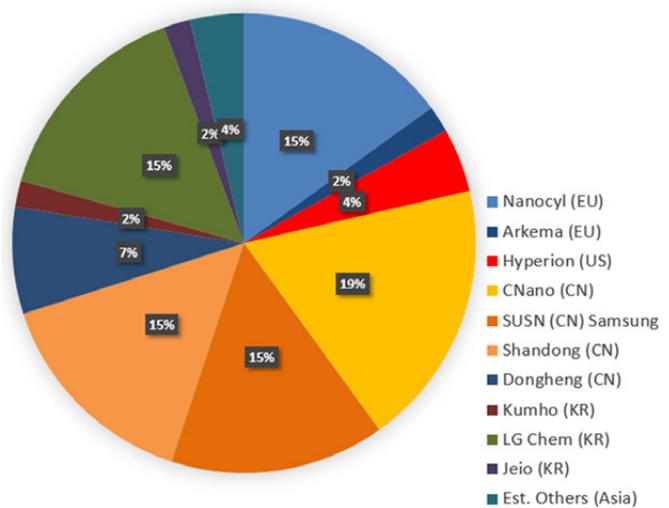


Figure 6

Nanocyl est aujourd’hui le seul européen, leader des multi-parois, focalisé sur les applications de l’automobile, l’électronique, le stockage d’énergie et des besoins industriels techniques.

Cependant, la concurrence asiatique est majeure. La qualité, la performance et la durabilité (focus de Nanocyl en font cependant aujourd'hui le fer de lance de cette technologie, et l'Europe une terra incognita pour les concurrents. Mais la connaissance des marchés reste évolutive et il n'est pas à exclure que la forte croissance de la demande pour les batteries des véhicules électriques attire la concurrence asiatique en Europe.

### 3. Des applications définies, un prix raisonnable et un développement industriel soutenu par la croissance commerciale et non plus les subsides

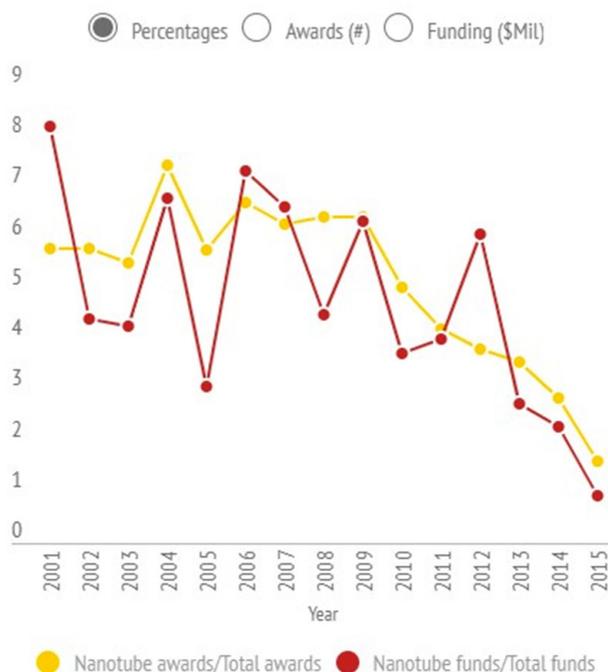
En cela, il ne faut pas laisser penser que la recherche, et les éventuels supports financiers

à celle-ci, ne soient pas nécessaires au futur de l'industrie des nanotubes de carbone et des entreprises participantes. Mais si l'on constate depuis environ 5 ans que les subsides et financements publics en R&D ont largement baissé, il n'en reste pas moins que cela indique un signe de maturité industrielle du marché des CNT qui font maintenant principalement appel aux systèmes de financements commerciaux et privés pour leur croissance (banques, fonds indépendants etc.).

La pénétration dans des applications de marché permet aujourd'hui aux fabricants de MWCNT de produire, vendre et rentabiliser leurs unités de production. Les prix ont effectivement baissé au fil des 15 dernières années pour arriver aujourd'hui à des niveaux bien sous les \$100 par kilo attendus dès le début des années 2010.

## Nanotubes By The Numbers

Although funding for nanotube research has declined, it has always represented a small portion of NSF's Nanoscale Science & Engineering budget.

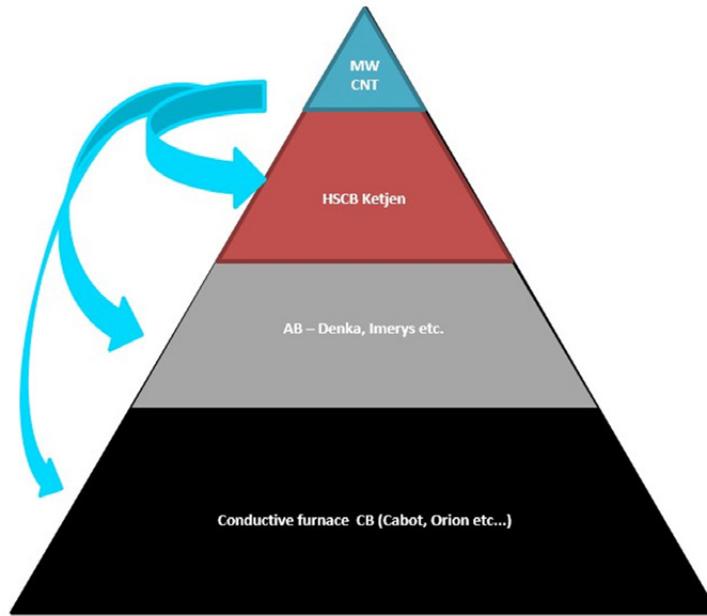


Note: The graphs show data for new grants awarded in each year with carbon nanotube in their title or abstract through May 1, 2015.  
Source: Mihail C. Roco/NSF

Figure 7

L'article de 2015 de C&EN [7] (les dépenses de la National Science Foundation) indiquait effectivement une tendance à la baisse des fonds disponibles pour la recherche sur les nanotubes de carbone (Figure 7). En Europe, une tendance similaire est survenue à cette même période. En effet, les candidatures de recherche plus abondantes auprès de l'Europe de par l'élargissement du nombre de pays européens qualifiables, mais aussi le changement du « hype » CNT vers les graphènes au milieu des années 2010s, ont réduit mécaniquement les fonds disponibles/alloués à la recherche sur les CNT.

Aux USA, les dernières actions du Président Obama, dans « THE NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE Supplement to the President's 2017 Budget », daté de mars 2016, ont clairement indiqué la nécessité de continuer à subventionner la recherche appliquée via les différentes entités du gouvernement (Defense, Energy, Nasa) ainsi que la recherche sur les mesures de sécurisation (NiOSH) avec le nanoHSE



Copyright © 2016 Nanocyl SA. All rights reserved.

Figure 8

#### 4. Des marchés existants moins exotiques qu’imaginés

Même s’il n’est pas ici question de réfuter que les CNTs projettent l’imaginaire de la recherche fondamentale sur des projets très exotiques, il faut considérer les nanotubes de carbone multi-parois comme un membre de la famille industrielle des produits carbonés conducteurs (Figure 8). Ils sont tous, carbonés, nano et conducteurs par nature.

En cela, le temps moyen de développement d’un produit n’est plus 20-30 ans comme la recherche fondamentale, mais 5-10 ans. Les MWCNT participent à des marchés définis depuis plus de cinquante années pour certaines applications comme les peintures, les encres, les plastiques ou les caoutchoucs. Dans les 20 dernières années c’est aussi dans le domaine des batteries que les noirs de carbone sont présents (par exemple les batteries Lithium-ion).



Figure 9

Les MWCNT viennent donc renforcer la palette des chercheurs-développeurs de produits dans les industries où les divers noirs de carbone se sont établis au fil du temps. Cela se traduit par une concurrence accrue, mais aussi par les bénéfices de synergies possibles lors des combinaisons de matériaux.

Des bénéfices techniques marqués :

L'introduction de ces matériaux dans des applications existantes apportent des performances accrues par rapport aux produits existants.

La figure 9 montre plusieurs applications communes.... (automobiles, batteries, courroies de transmission, tubes et tuyaux, les caoutchoucs industriels etc.).

KEY : LiB utilise fortement les CNT (Chine). Il faut noter que l'addition de MWCNT dans les batteries est un facteur critique à l'augmentation des performances pour les batteries EV (Enabling technology).

L'apport de performances accrues à des marchés matures a permis aux MWCNT de rencontrer la concurrence des produits existants comme celle des concurrents directs.

Cependant, par rapport au potentiel de croissance dans les applications historiques des plastiques anti-statiques, la marge de croissance reste élevée. De plus, le panier d'applications nouvelles encore en développements laisse présager une continuité de la croissance et des besoins.

Facteur 4 :  
une responsabilité sanitaire assumée  
et contrôlée

Aujourd'hui, Nanocyl est le chef de file de la coordination des travaux réglementaires en développement autour de l'aspect HSE des nanoparticules. Nous travaillons de façon étroite avec ECHA – le groupe gestion de la procédure REACH.

Nous représentons un groupe de 5 et plus fabricants de MWCNT, mais sommes aujourd'hui les seuls à avoir pu démontrer la non dangerosité de notre produit par des études in vivo de 90 jours. Nous avons mis en place une analyse et les recommandations sanitaires pour cycle de vie du produit contrôlé (Figure 10).

Nous avons l'obligation de couvrir, de par notre dossier d'enregistrement, tout produit qui sera

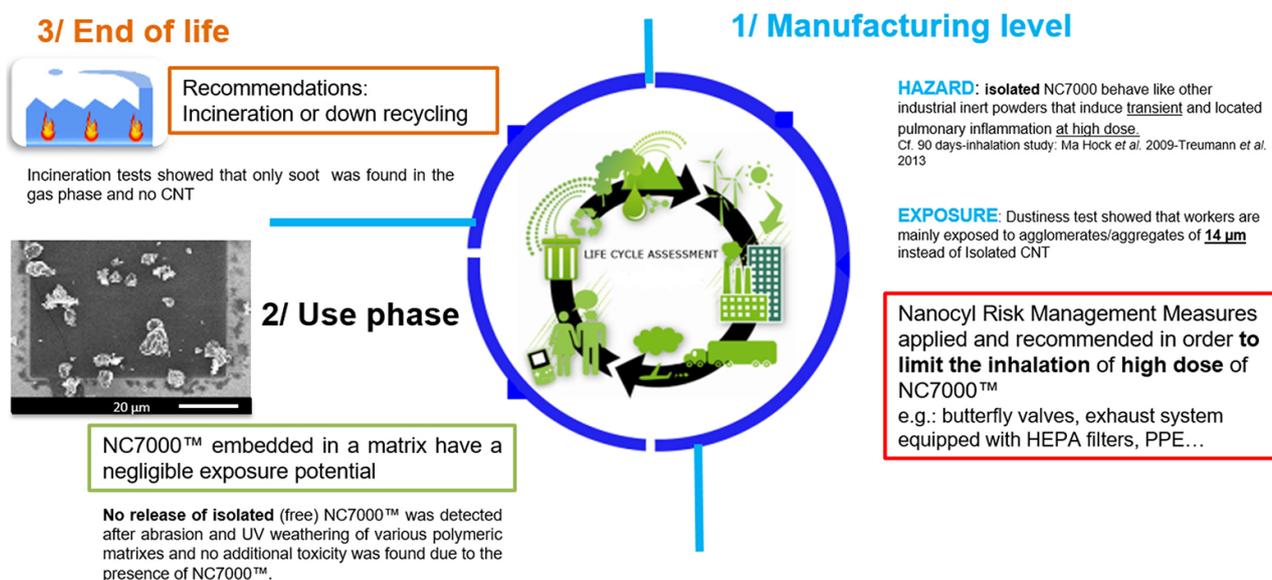


Figure 10

## Références

défini – par le producteur lui-même – comme similaire au NC7000™. Cela se traduit par des demandes nombreuses de producteurs chinois et coréens, qui avec un minima de data sur la sécurité de leurs produits, ou aucune donnée, peuvent se présenter aux portes de l'Europe sous notre dossier.

Dans le cadre des analyses en profondeur des dossiers d'enregistrement REACH – procédure Corap – les autorités sanitaires allemandes étudieront, de mars 2019 à mars 2020, les risques éventuels liés à la commercialisation à grande échelle des MWCNT. Nous sommes à la pointe de la coopération avec les autorités afin d'apporter les réponses aux interrogations liées aux nouveaux produits nano.

## 5. Conclusions :

### Des signes de maturité mais pas encore

Les taux de croissance sont un peu plus faibles que par le passé – mais toujours à deux chiffres –, les subsides sont beaucoup plus réduits, la concurrence est accrue, les prix se sont ajustés aux marchés...

Tous ces signes indiquent, selon la théorie du cycle de vie, une tendance de renversement de la croissance à la maturité. Mais en fait, les marchés des batteries et les caoutchoucs sont des espaces de croissance, et les indicateurs macro-économiques soutenant le besoin en innovation restent présents et nous font entrevoir un effet en escalier de la croissance des nanotubes de carbone MWCNT.

Il n'en reste pas moins que tous les acteurs devront suivre les réglementations européennes REACH, qui restent le benchmark mondial.

- [1] Les deux dernières étapes peuvent dans certaines approches être considérées comme une seule et unique phase.
- [2] « Free doit repartir à la conquête des abonnés »; Challenge n°576, 6 septembre 2018, pp. 38-39
- [3] Simplement résumé « anti-explosivité ».
- [4] Éviter les interférences électro-magnétiques entre toutes les pièces électroniques embarquées.
- [5] Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency: "Nanotechnology and Materials R&D in Japan (2015): An Overview and Analysis" CRDS-FY2015-XR-07, January 2016
- [6] ResearchGate; "Multi-Walled Carbon Nanotubes in Water Filtration Systems: From New Material Innovation to New Product Innovation." Rachel A. Parker, University of California, Santa Barbara; Richard Appelbaum, University of California, Santa Barbara, pp 6-9
- [7] C&EN, Volume 93 Issue 23 > "Twists And Shouts: A Nanotube Story" pp10-15, Matt Davenport, 8 June, 2015

---

**Pour vous faire membre de la SRC et accéder gratuitement à la revue Chimie Nouvelle :**

---

il vous suffit de verser au compte BNP Paribas Fortis : BE60 2100 4208 0470  
la somme indiquée dans le tableau ci-dessous :

**Membres résidant en Belgique et au Luxembourg**

Membres effectifs : **50 euros**

- participation gratuite ou à prix réduit à toutes les activités de la SRC
- abonnement gratuit à la revue "Chimie Nouvelle"
- accès gratuit à la bibliothèque de la SRC.

Membres associés : **25 euros**

- réservé, avec les mêmes avantages que les membres effectifs, aux jeunes diplômés du deuxième cycle pendant deux ans, aux professeurs de l'enseignement secondaire et aux retraités.

Membres Juniors : Gratuit

- réservé aux étudiants de dernière année du 2<sup>e</sup> cycle universitaire (2<sup>e</sup> master), des Ecoles d'Ingénieurs industriels et des graduats en Chimie et Biochimie avec les mêmes avantages que les membres effectifs.

Demandeurs d'emploi : **15 euros**

- mêmes avantages que les membres effectifs + insertion gratuite dans Chimie Nouvelle d'une annonce de demande d'emploi.

**Membres résidant à l'étranger**

Membres effectifs : **60 euros**

Membres associés : **35 euros**