



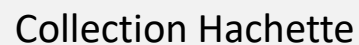
Journée d'actualisation
des connaissances scientifiques

Le Monde Nano : Fullerènes, Nanotubes, Graphène ou la Révolution du Carbone

Piétrick HUDHOMME
pietrick.hudhomme@univ-angers.fr

Angers, 26 / 06 / 2018



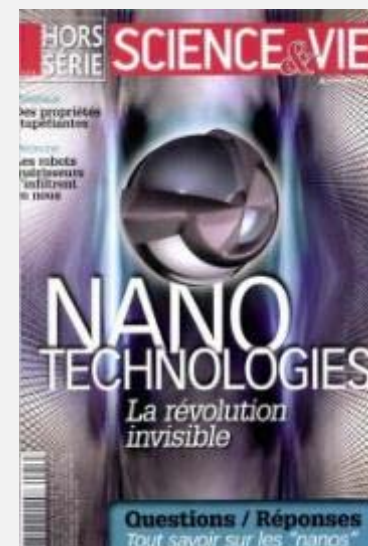


De la Terre à l'Atome :

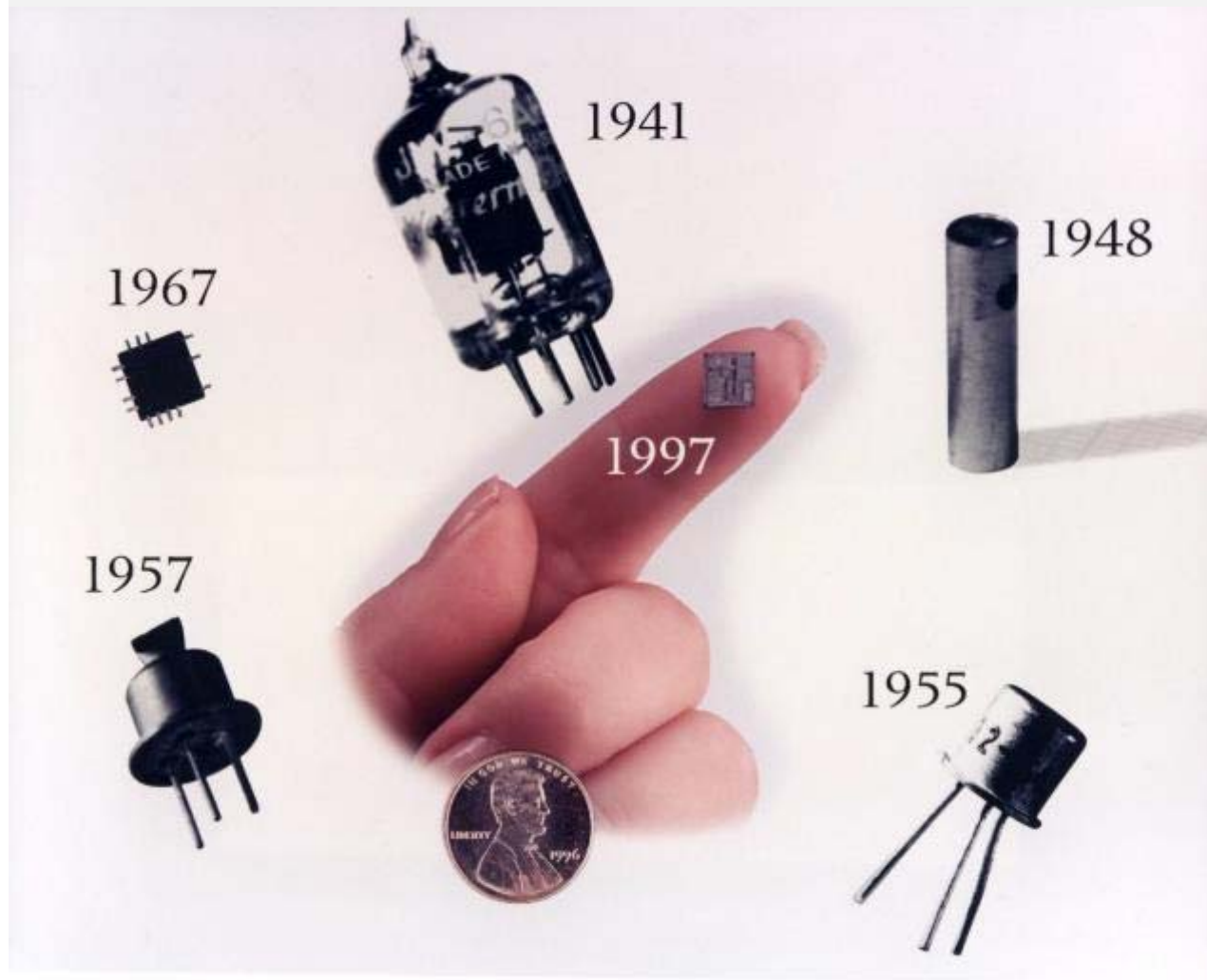


Nano : du latin *nanos*,
signifiant *nain*

Nanosciences : Sciences qui
étudient les propriétés des
objets de taille inférieure à
quelques centaines de
nanomètres (nm).



Electronique : toujours plus petit...



Une encyclopédie sur une tête d'épingle...

Richard FEYNMAN (1918 – 1988) :

Pionnier des nanotechnologies

Physicien américain, **Prix Nobel de Physique en 1965** pour le développement de la théorie de la physique quantique

En **1959**, Feynman suggère la possibilité de manipuler les matériaux à l'échelle de l'atome et de la molécule, imaginant que **toute l'Encyclopédie *Britannica* pouvait être écrite sur la tête d'une épingle**. Il prévoyait la capacité d'observer et de contrôler la matière à l'échelle du nanomètre :

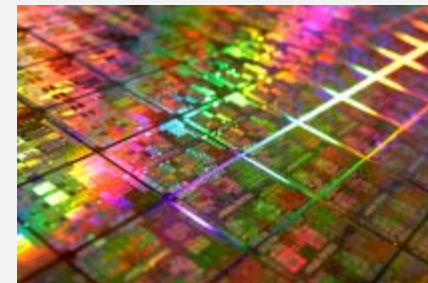
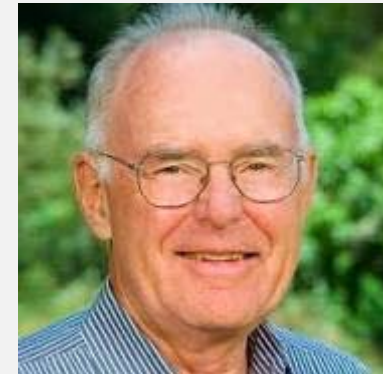
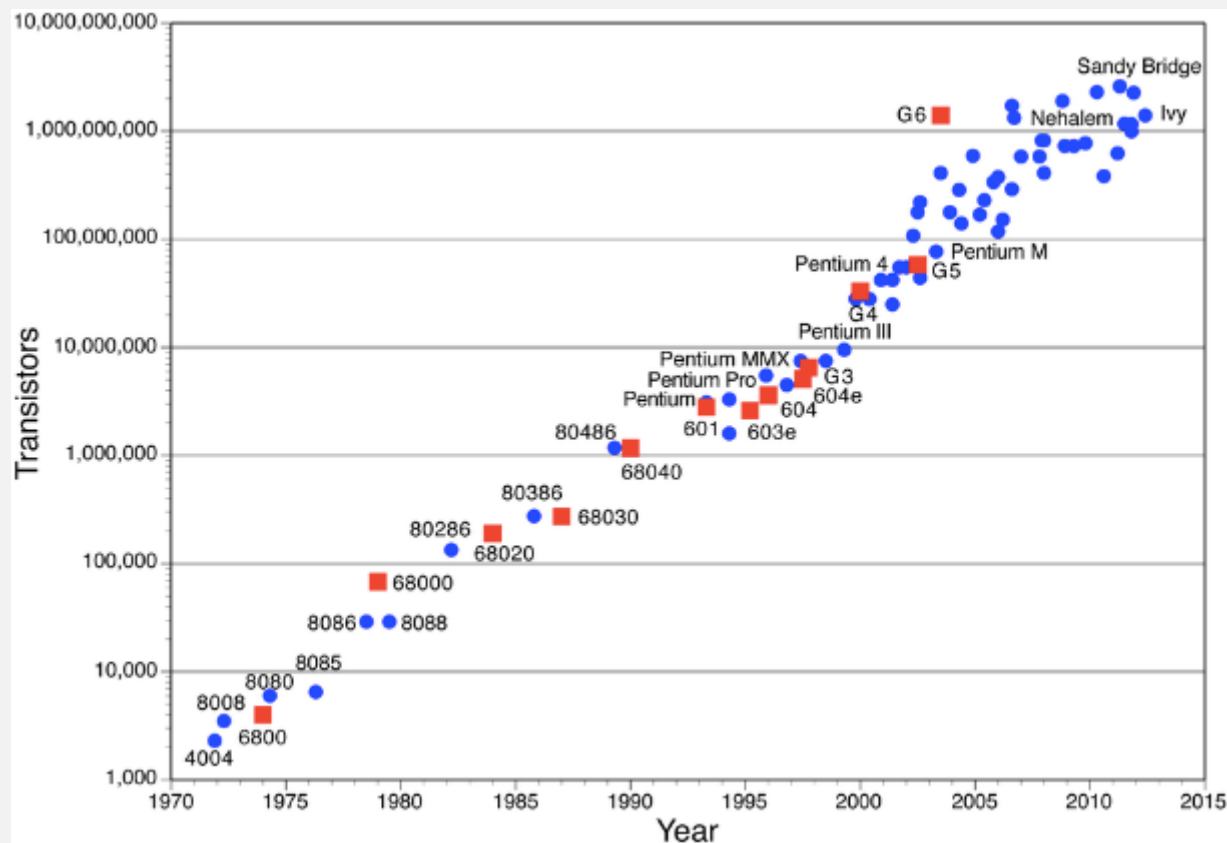
« There 's plenty of room at the bottom »



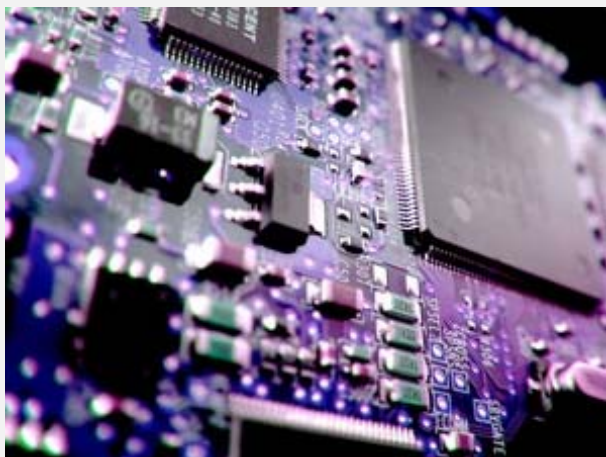
Miniaturisation : la Loi de Moore

1965 : Gordon Earle **MOORE**, cofondateur d'Intel,
formule sa célèbre loi :

***Le nombre de transistors sur une puce de circuit intégré
double tous les dix-huit mois***



Hier et Aujourd'hui : Le Silicium...



1																	18
1 H 1.0079	2 He 4.0026																
3 Li 6.941	4 Be 9.0122																
11 Na 22.990	12 Mg 24.305	3															
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc -	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po -	85 At -	86 Rn -
87 Fr -	88 Ra -	89-103	104 Rf -	105 Db -	106 Sg -	107 Bh -	108 Hs -	109 Mt -	110 Ds -	111 Rg -							
			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm -	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05	71 Lu 174.97
			89 Ac -	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np -	94 Pu -	95 Am -	96 Cm -	97 Bk -	98 Cf -	99 Es -	100 Fm -	101 Md -	102 No -	103 Lr -

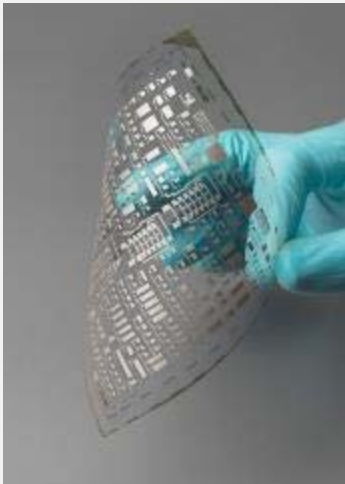
²⁸₁₄Si

Hier et Aujourd'hui : Le Silicium...



On distingue trois niveaux de pureté du silicium :

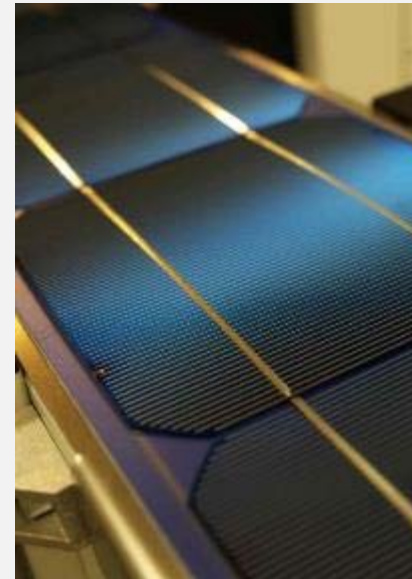
- **silicium métallurgique** (pureté 99 %),
noté MG-silicium (en anglais : metallurgical grade) ;
- **silicium de qualité solaire** (pureté 99,999 9 %),
noté SoG-silicium (solar grade) ;
- **silicium de qualité électronique** (pureté 99,999 999 99 %),
noté EG-silicium (electronic grade).



Circuits imprimés



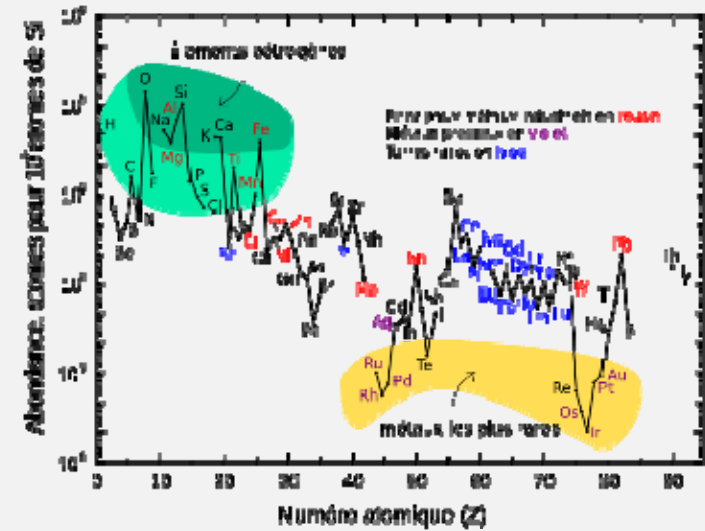
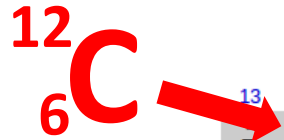
Composants électroniques



Panneaux solaires

Aujourd'hui et...Demain : La Révolution du Carbone...

1																	18
1																	2
H																	He
1.0079																	4.0026
3	4																10
Li	Be																Ne
6.941	9.0122																20.180
11	12																18
Na	Mg																Ar
22.990	24.305																39.948
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
39.098	40.078	44.956	47.867	50.942	51.996	54.938	55.845	58.933	58.693	63.546	65.38	69.723	72.64	74.922	78.96	79.904	83.798
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
85.468	87.62	88.906	91.224	92.906	95.96	-	101.07	102.91	106.42	107.87	112.41	114.82	118.71	121.76	127.60	126.90	131.29
55	56		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	57-71	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
132.91	137.33		178.49	180.95	183.84	186.21	190.23	192.22	195.08	196.97	200.59	204.38	207.2	208.98	-	-	-
87	88		104	105	106	107	108	109	110	111							
Fr	Ra	89-103	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							
-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			138.91	140.12	140.91	144.24	-	150.36	151.96	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26	168.93	173.05	174.97
			89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
			-	232.04	231.04	238.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



- 4^{ème} élément le plus abondant dans le système solaire
- 6^{ème} plus abondant dans l'univers,
- 10^{ème} au niveau de l'abondance terrestre

Le nom *carbone* vient du latin *carbo*, *carbōnis* signifiant « charbon ».

Le nom *carbone* n'apparaît dans le dictionnaire de l'Académie française, qu'à sa 6^e édition (1832-5).

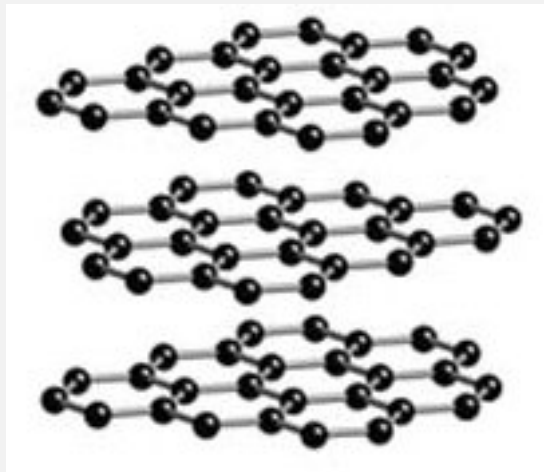
Formes moléculaires du carbone

GRAPHITE

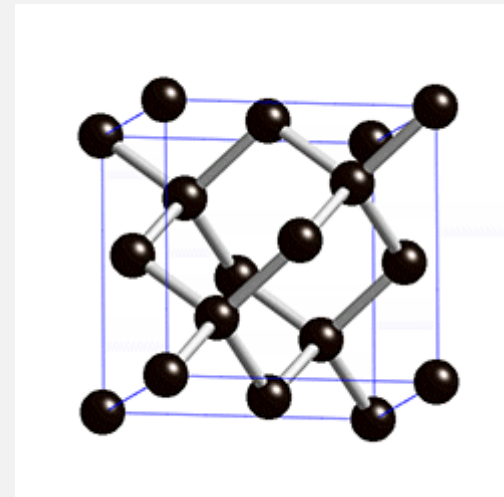


Structure est constituée de feuillets hexagonaux non compacts, nommés **graphènes**, séparés d'environ $0,336 \text{ nm} = 3,4 \text{ \AA}$

Structure
trigonale :
hybridation sp^2
du carbone

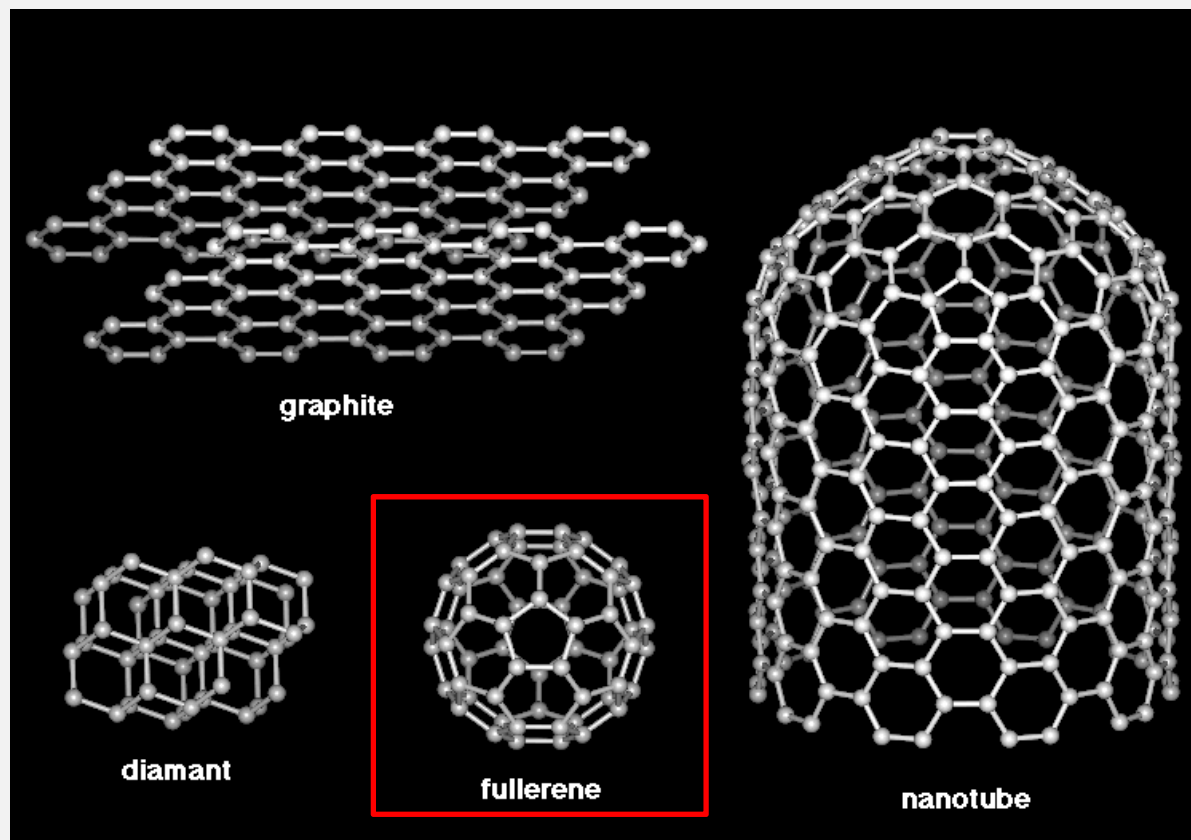


DIAMANT



Structure
tétraédrique :
hybridation sp^3
du carbone¹⁰

Formes moléculaires du carbone



Le 09 septembre 1985...

En cherchant à comprendre les mécanismes de formation des longues chaînes de carbone dans l'espace interstellaire , Kroto *et coll.* vaporisèrent un disque de graphite par irradiation laser :

letters to nature

Nature **318**, 162 - 163 (14 November 1985); doi:10.1038/318162a0

C₆₀: Buckminsterfullerene

H. W. KROTO*, J. R. HEATH, S. C. O'BRIEN, R. F. CURL & R. E. SMALLEY

Rice Quantum Institute and Departments of Chemistry and Electrical Engineering, Rice University, Houston, Texas 77251, USA

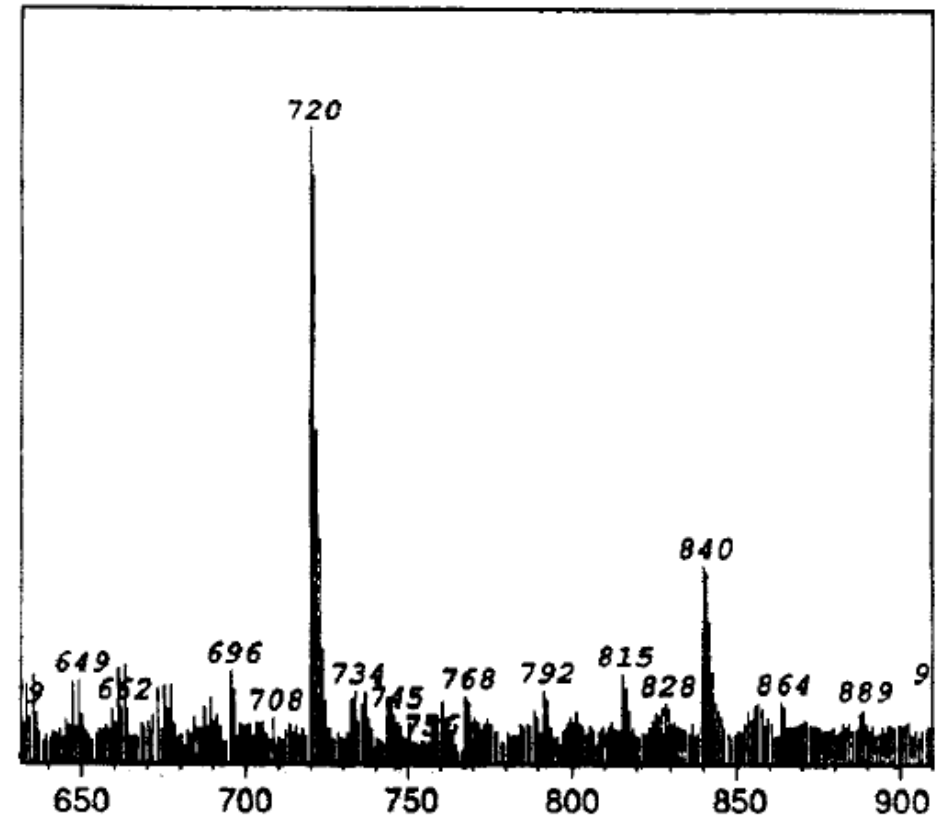
*Permanent address: School of Chemistry and Molecular Sciences, University of Sussex, Brighton BN1 9QJ, UK.

During experiments aimed at understanding the mechanisms by which long-chain carbon molecules are formed in interstellar space and circumstellar shells¹, graphite has been vaporized by laser irradiation, producing a remarkably stable cluster consisting of 60 carbon atoms. Concerning the question of what kind of 60-carbon atom structure might give rise to a superstable species, we suggest a truncated icosahedron, a polygon with 60 vertices and 32 faces, 12 of which are pentagonal and 20 hexagonal. This object is commonly encountered as the football shown in Fig. 1. The C₆₀ molecule which results when a carbon atom is placed at each vertex of this structure has all valences satisfied by two single bonds and one double bond, has many resonance structures, and appears to be aromatic.

H. Kroto et al., *Nature* **318**, 162 (1985)

Le 09 septembre 1985...

Spectrométrie de masse :

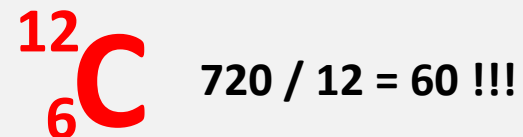
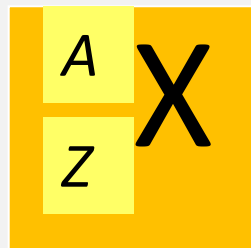


Nombre de Masse A

Nombre de protons
+ neutrons

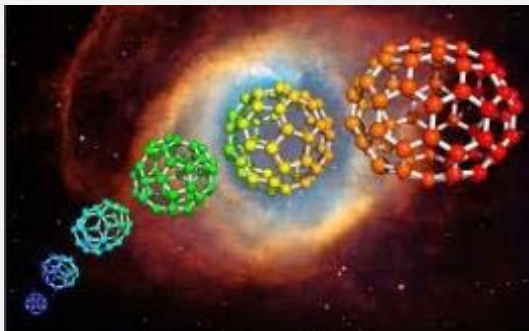
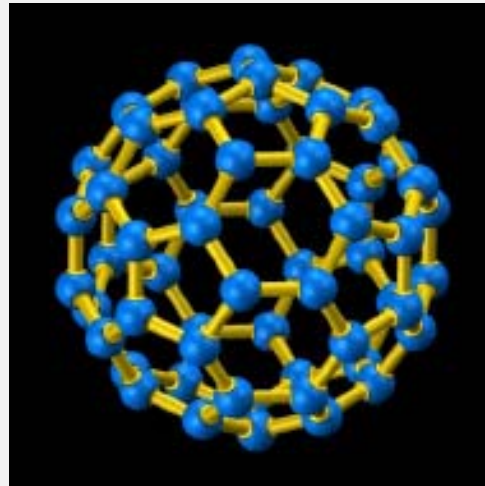
Numéro Atomique Z

Nombre de protons



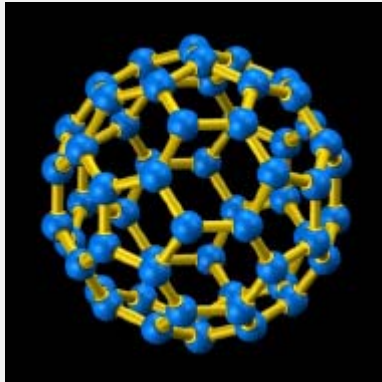
Structure du C_{60} ?

Dès 1970, [Eiji OSAWA](#) avait émis l'hypothèse qu'une molécule en forme de ballon de football pouvait exister

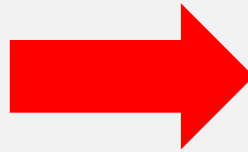


- Symétrie I_h
- 20 hexagones et 12 pentagones

Buckminsterfullerène C_{60}



C_{60}

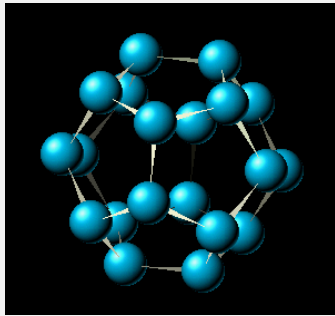


Pavillon USA construit à Montréal
pour l'Exposition Universelle de 1967

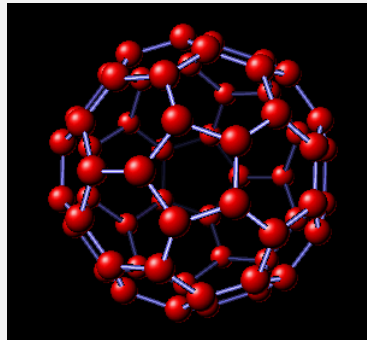


Richard Buckminster Fuller
(1895 – 1983)

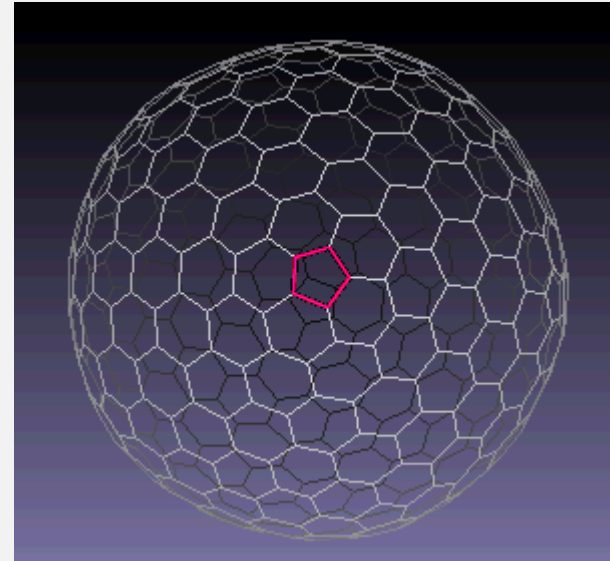
Structure des Fullerènes



C_{20}

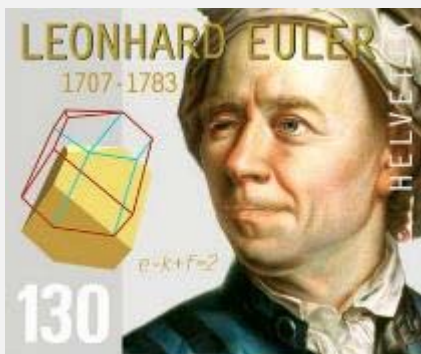


C_{60}



C_{540}

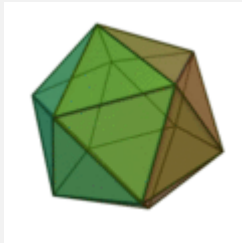
Règle d'EULER sur les polyèdres :



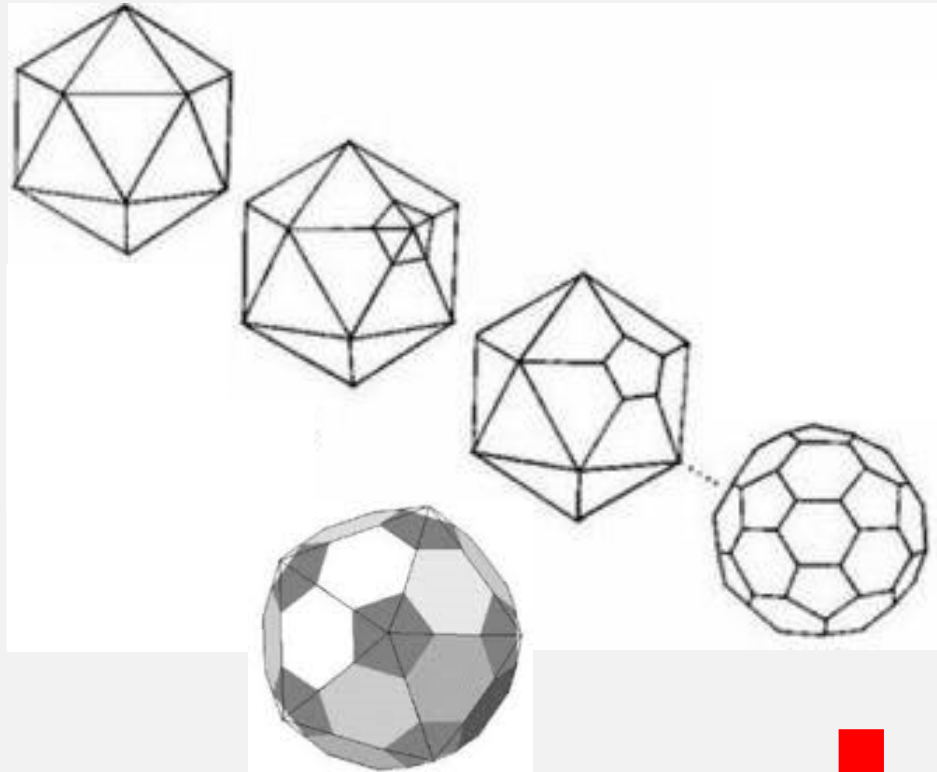
Quelque soit le fullerène C_{2n} , il sera composé de :

$$\frac{(2n - 20)}{2} \text{ hexagones} \\ + 12 \text{ pentagones}$$

Structure des Fullerènes



Icosaèdre :
12 sommets
20 faces triangulaires
30 arêtes



Chaque solide de Platon répond à la formule d'Euler (1752), obtenue avec un nombre F de faces, A d'arêtes et S de sommets :

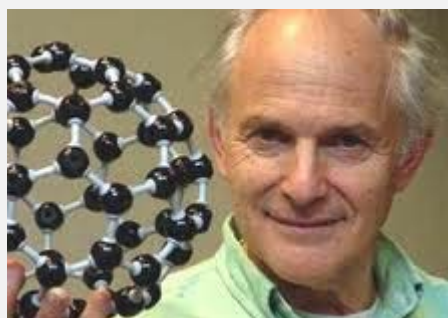
$$F + S - A = 2$$



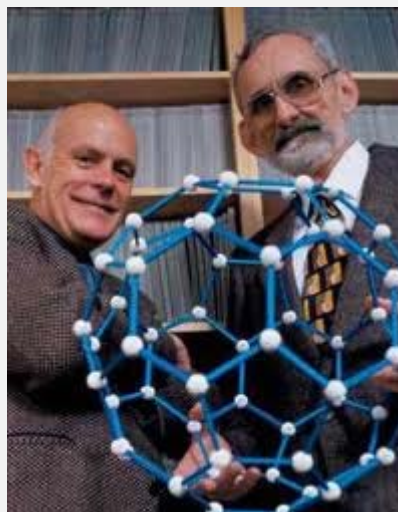
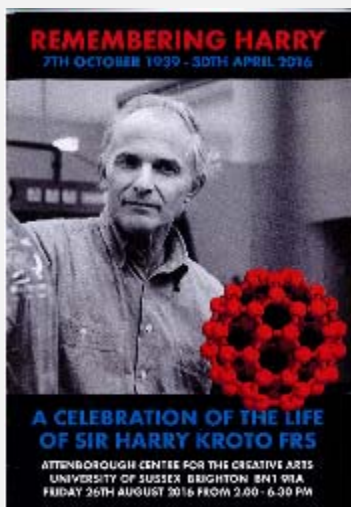
Icosaèdre tronqué :
60 sommets
12 pentagones
20 hexagones
90 arêtes

Prix Nobel de Chimie 1996

1996 : Prix Nobel à H. Kroto, R. Smalley, R. Curl



Harold KROTO (GB; 1939 - 2016)



Richard SMALLEY (USA; 1943 - 2004)
Robert CURL (USA; 1933 -)



Synthèse et structure du Fullerène C₆₀

1990 : W. Krätschmer

- Synthèse du C₆₀
- Confirmation de la structure cristallographique du C₆₀



Wolfgang KRATSCHMER
(D; 1942-)

article

Nature **347**, 354 - 358 (27 September 1990); doi:10.1038/347354a0

Solid C₆₀: a new form of carbon

W. KRÄTSCHMER^{*}, LOWELL D. LAMB[†], K. FOSTIROPOULOS^{*} & DONALD R. HUFFMAN[†]

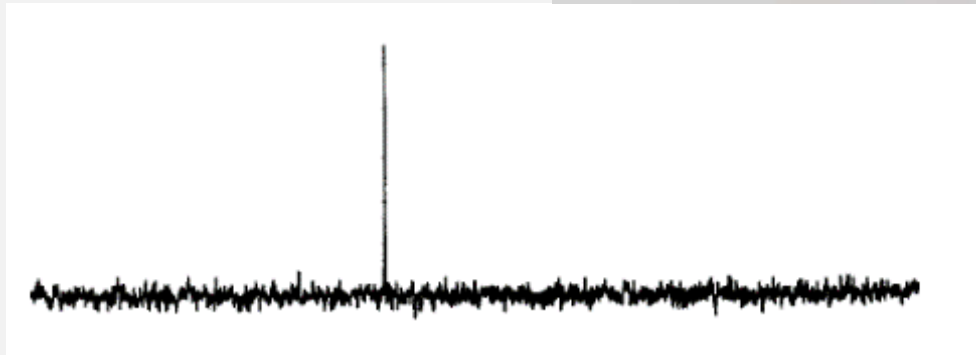
^{*}Max-Planck-Institut für Kernphysik, 6900 Heidelberg, PO Box 103980, Germany

[†]Department of Physics, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA

A new form of pure, solid carbon has been synthesized consisting of a somewhat disordered hexagonal close packing of soccer-ball-shaped C₆₀ molecules. Infrared spectra and X-ray diffraction studies of the molecular packing confirm that the molecules have the anticipated 'fullerene' structure. Mass spectroscopy shows that the C₇₀ molecule is present at levels of a few per cent. The solid-state and molecular properties of C₆₀ and its possible role in interstellar space can now be studied in detail.



Structure du Fullerène C_{60}

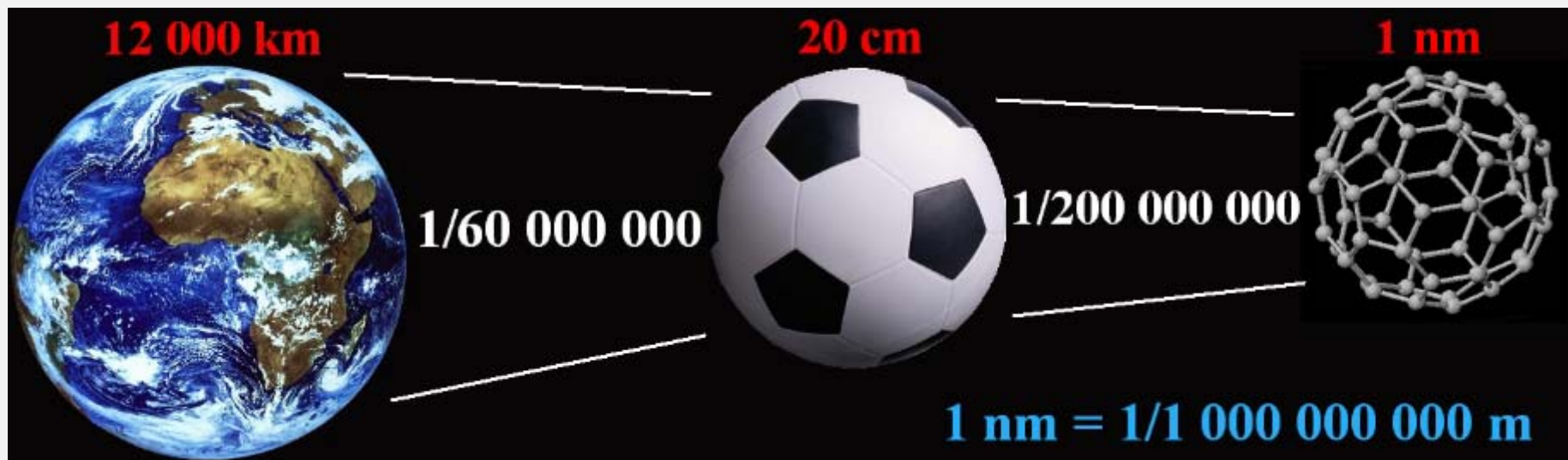


- Symétrie I_h
- 20 hexagones et 12 pentagones
- Liaison [5,6] = 1,45 Å
- Liaison [6,6] = 1,38 Å

RMN ^{13}C = un seul signal à 143,2 ppm

Structure du C_{60}

Que représente un nanomètre ?



Fullerène C_{60}

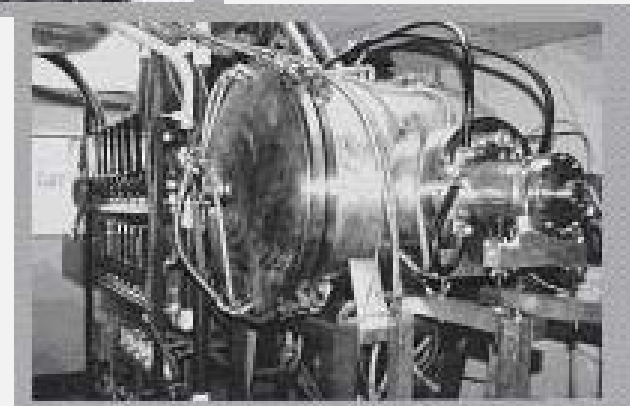
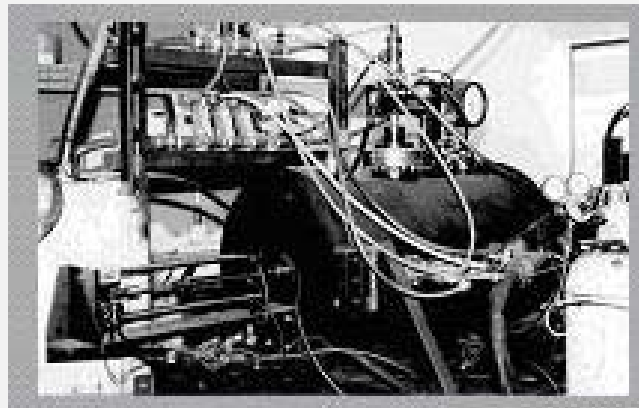
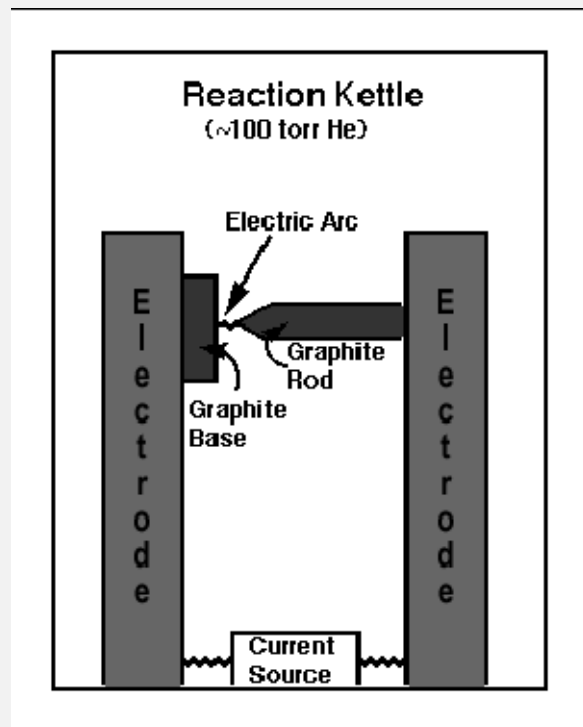
Diamètre : $8\text{ \AA} = 0.8\text{ nm}$



NANOTECHNOLOGIES

Synthèse du Fullerène C_{60}

1) Arc électrique entre deux électrodes de graphite (2500-3000°C) sous atmosphère d'hélium



Obtention d'une suie qui contient environ 13% d'un mélange de fullerènes

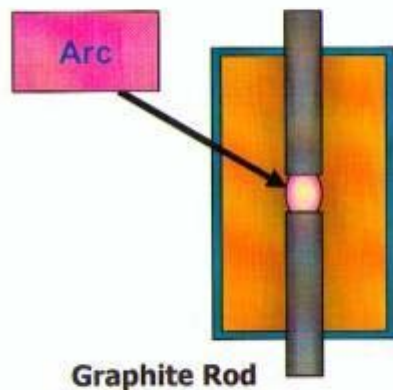
Synthèse du Fullerène C_{60}

2) Méthode récente :

Combustion incomplète contrôlée du benzène ou toluène

Conventional Method (Arc Method)

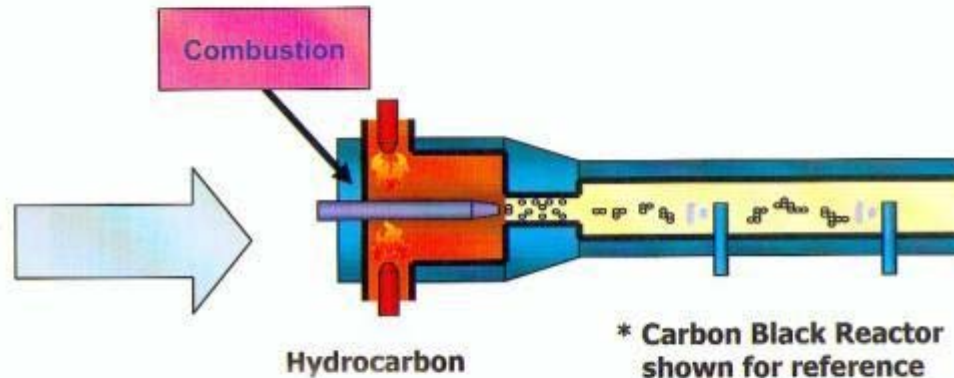
Fullerenes produced in a batch system from graphite rods



- Expensive Process
- Batch Process Not Suitable for Mass Production

New Method (Combustion Method)

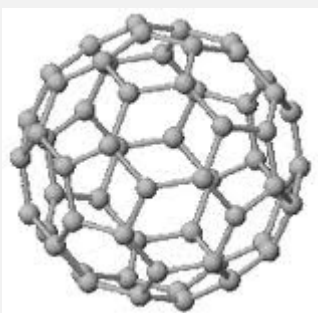
Fullerenes produced in a continuous system from hydrocarbon



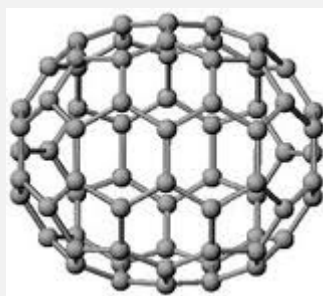
- Cost Efficient Process
- Continuous Process Suitable for Mass Production

Synthèse du Fullerène C_{60}

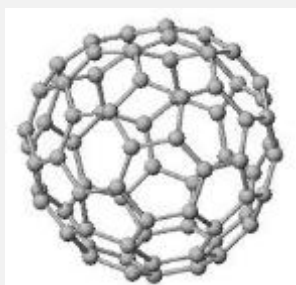
➔ 2) Séparation des fullerènes :
Extraction Soxhlet puis Chromatographie HPLC



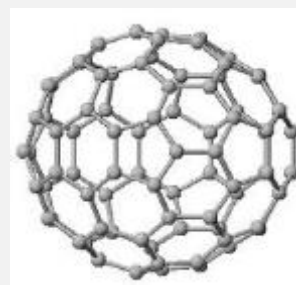
C_{60} : 80-85%



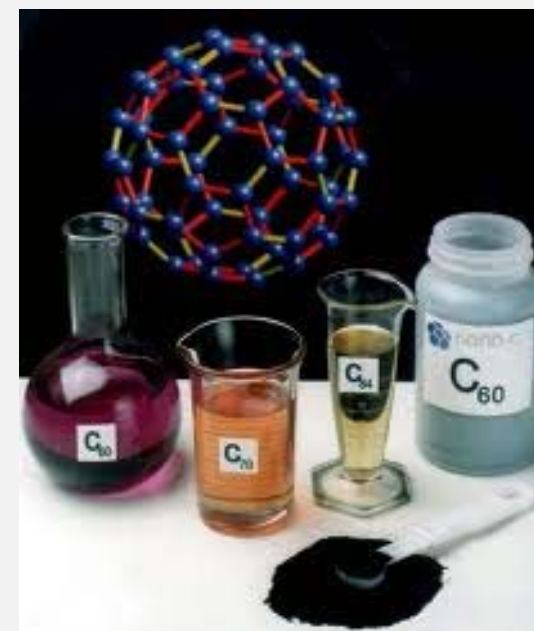
C_{70} : 10-15%



C_{76}

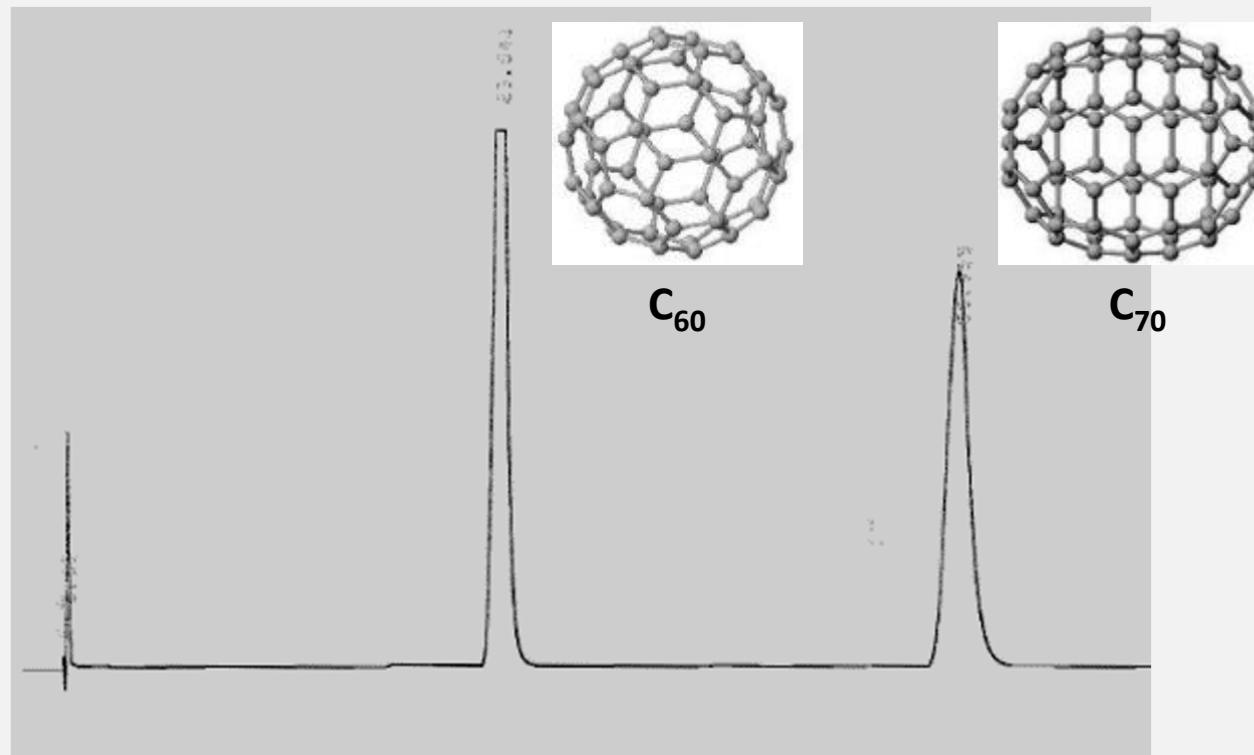


C_{84}



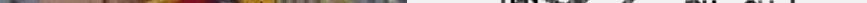
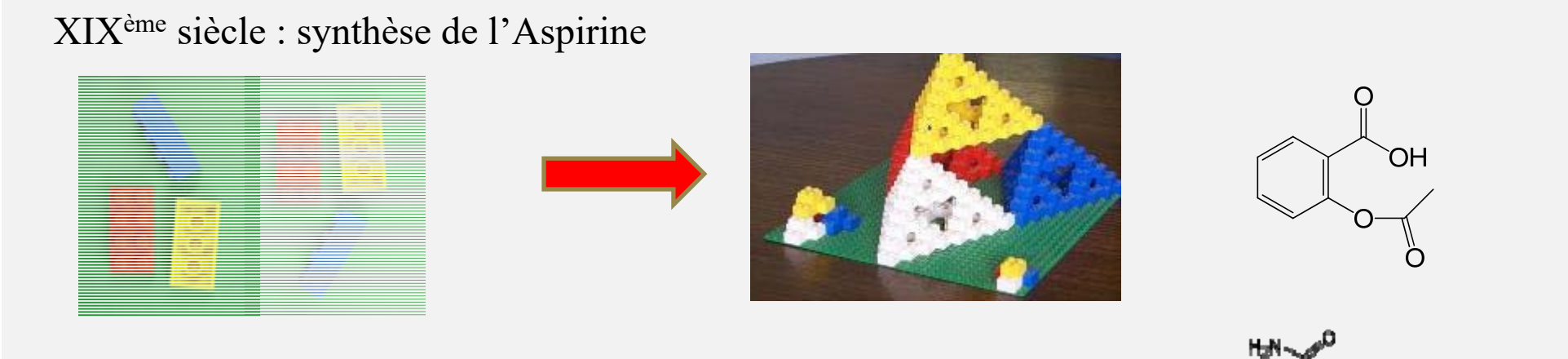
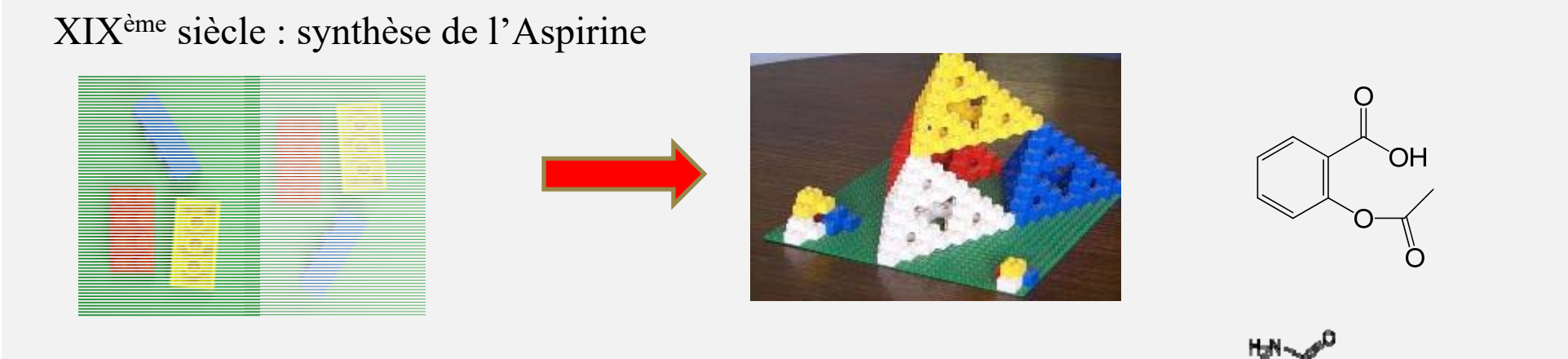
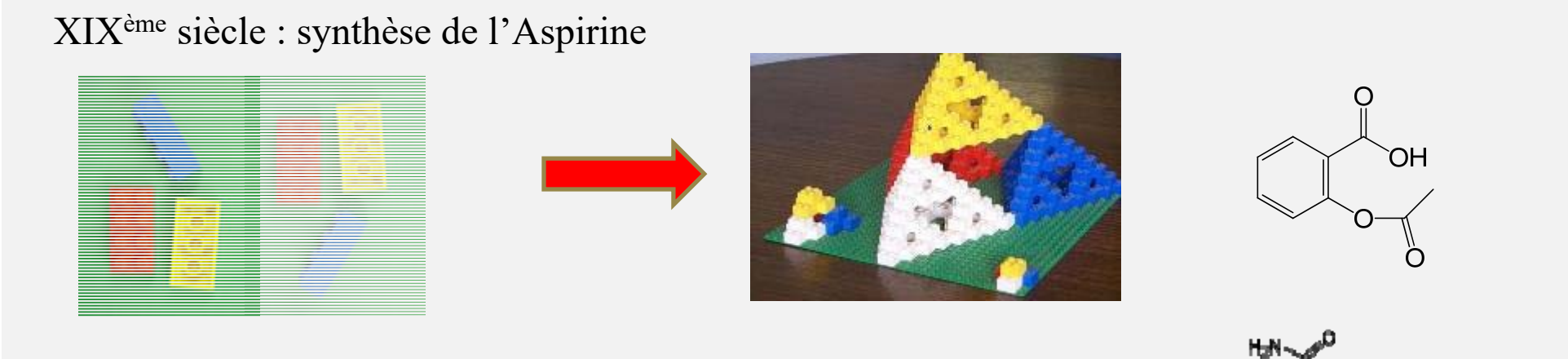
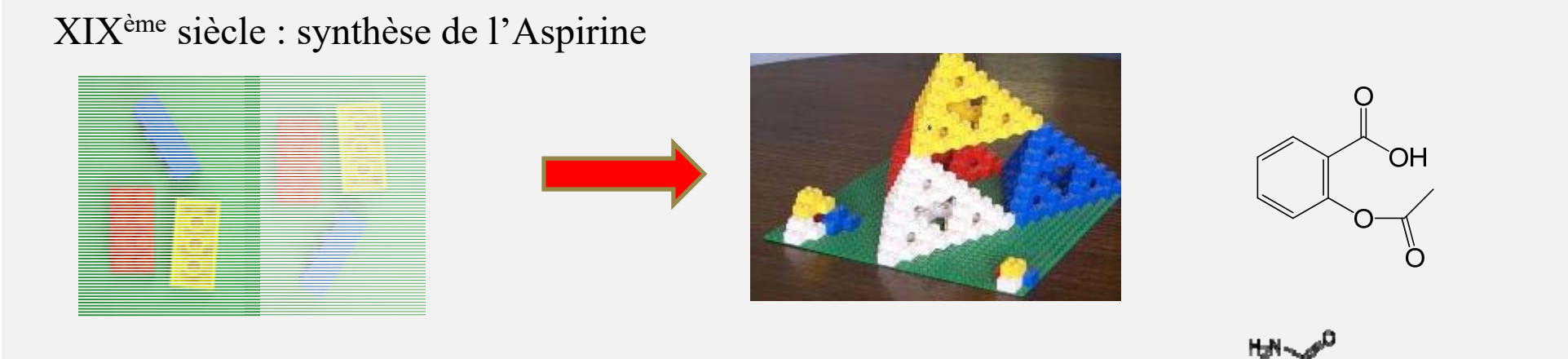
Synthèse du Fullerène C_{60}

Chromatographie HPLC :



C_{60} : 5000 \$ / g en 1990 \longrightarrow 15 \$ / g en 2018

La Synthèse organique = un jeu de L go  !!!

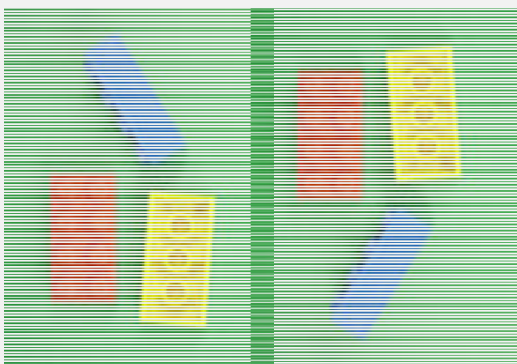


Chemical structure diagram showing a peptide bond (amide linkage) and a carboxyl group (COOH).



La Synthèse organique = un jeu de L go  !!!

Le Fullerène = un nouveau L go  ... sphérique :

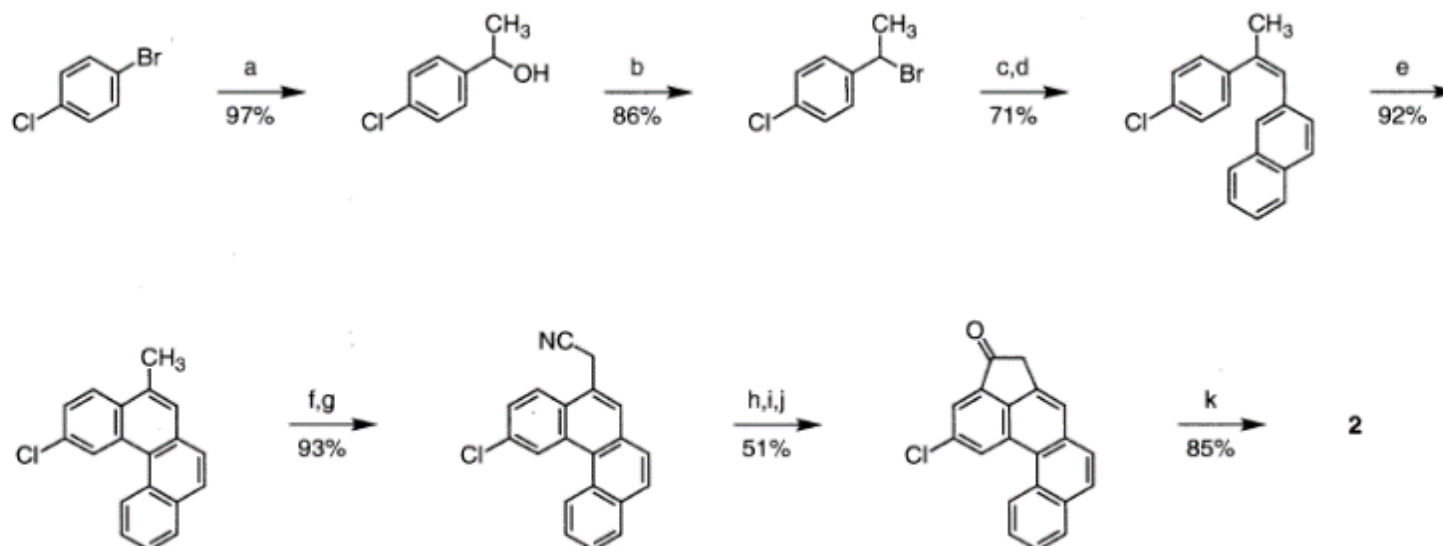


Synthèse totale du Fullerène C_{60} ???

Un exercice de style pour un chimiste organicien

Fig. 2. Synthesis of the C_{60} precursor **2** ($C_{60}H_{27}Cl_3$).

Step a: Treatment with Mg in ether, then acetaldehyde. b: Bromination with PBr_3 in benzene. c: Treatment with $P(C_6H_5)_3$ in toluene. d: Treatment with $LiOCH_2CH_3$ and 2-naphthaldehyde in ethanol/dichloromethane. e: Irradiation with UV light (254 nm) in cyclohexane containing iodine and propylene oxide. f: Bromination with *N*-bromosuccinimide and dibenzoylperoxide in carbon tetrachloride. g: Displacement with KCN and tetrabutylammonium hydrogensulfate in water/dichloromethane. h: Hydrolysis with KOH in ethylene glycol. i: Chlorination with $SOCl_2$. j: Cyclization with $AlCl_3$ in dichloromethane. k: Trimerization with $TiCl_4$ in *ortho*-dichlorobenzene.



Synthèse totale du Fullerène C_{60} ???

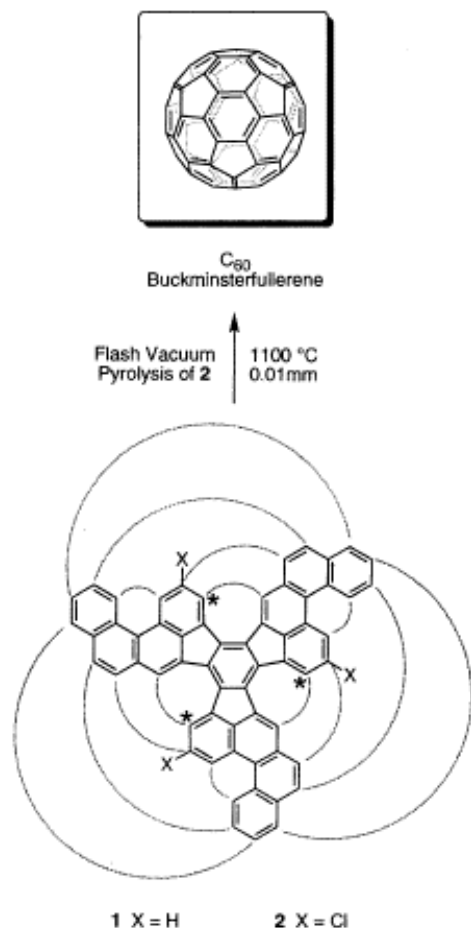


Fig. 1. Final step in the synthesis of C_{60} . Curved lines indicate where the new bonds are formed in the molecular precursor 2 ($C_{60}H_{27}Cl_3$). The fjord regions mentioned in the text are marked with asterisks. We have previously generated C_{60} in a mass spectrometer by laser-induced cyclodehydrogenation of the corresponding hydrocarbon, 1 (2).

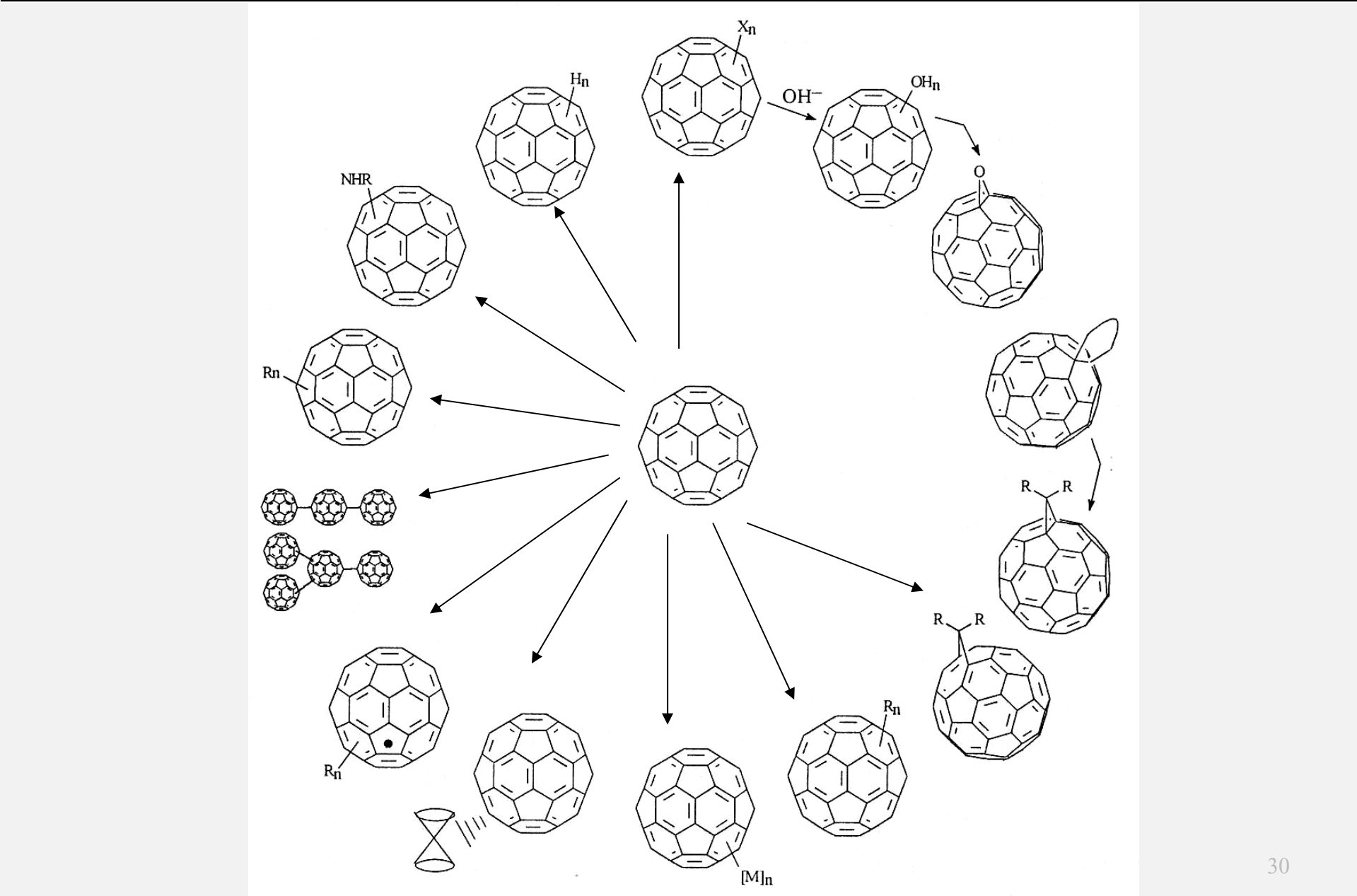
Flash vacuum pyrolysis à 1100°C : C_{60} et pas d'autres fullerènes comme sous-produits

**Rendement de cyclisation trop faible
(0.1 à 1%) et nombre total d'étapes (12)
trop important : pas d'intérêt économique !!!**

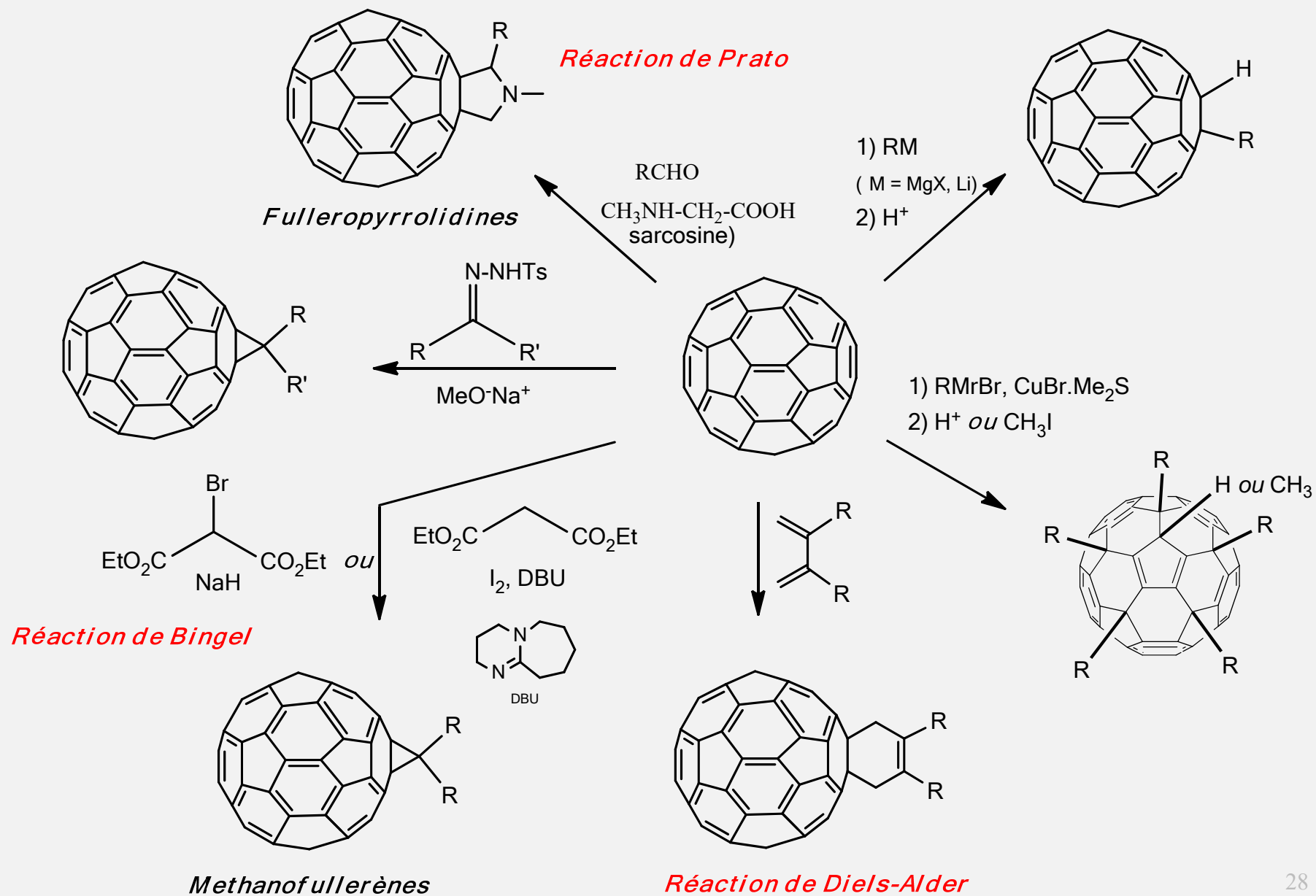
Le Fullerène = un nouveau Léo®
... sphérique :



Maintenant, les chimistes de synthèse : au travail !!!



La réactivité du C₆₀

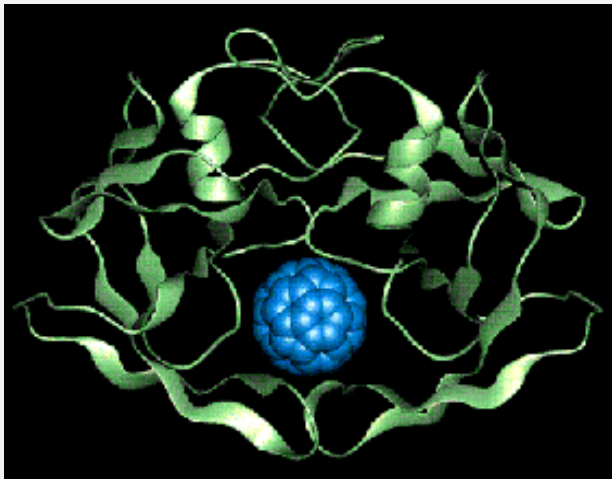


Applications des fullerènes en médecine et biologie

C_{60} : insoluble dans l'eau !!



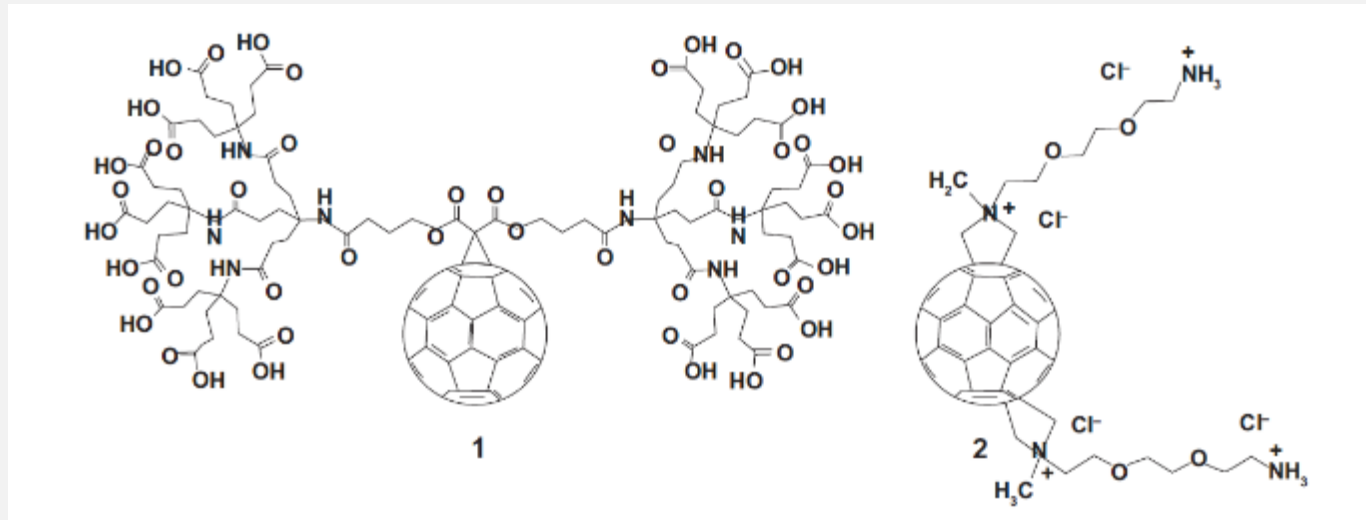
Accrochage de groupements
permettant de travailler en
milieu biologique



solvant	Solubilité (mol / L)
1-Chloronaphtalène	7.10^{-2}
1,2-Dichlorobenzène	4.10^{-2}
Disulfure de carbone	1.10^{-2}
Chlorobenzène	1.10^{-2}
Toluène	4.10^{-3}
Benzène	2.10^{-3}
Décane	1.10^{-3}
Acétone	1.10^{-6}
Eau	2.10^{-24}

Applications des fullerènes en médecine et biologie

1. Activité antivirale

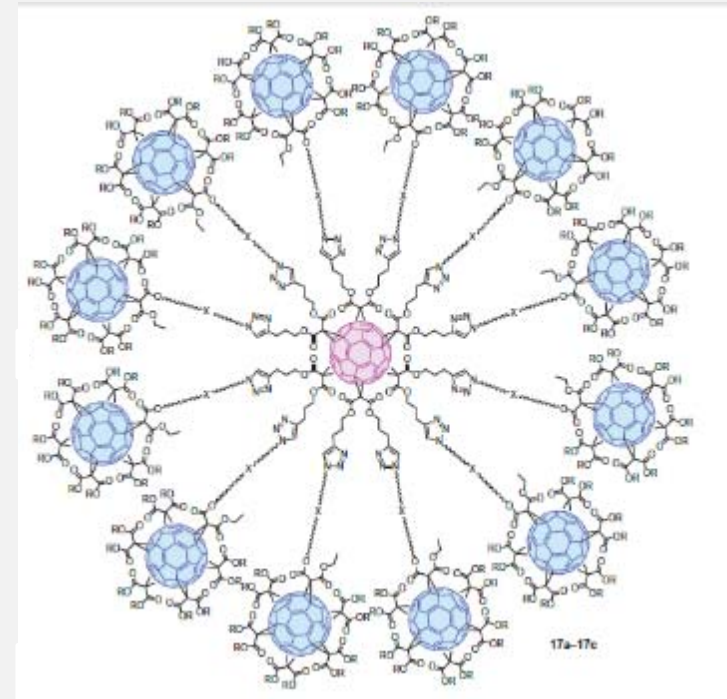
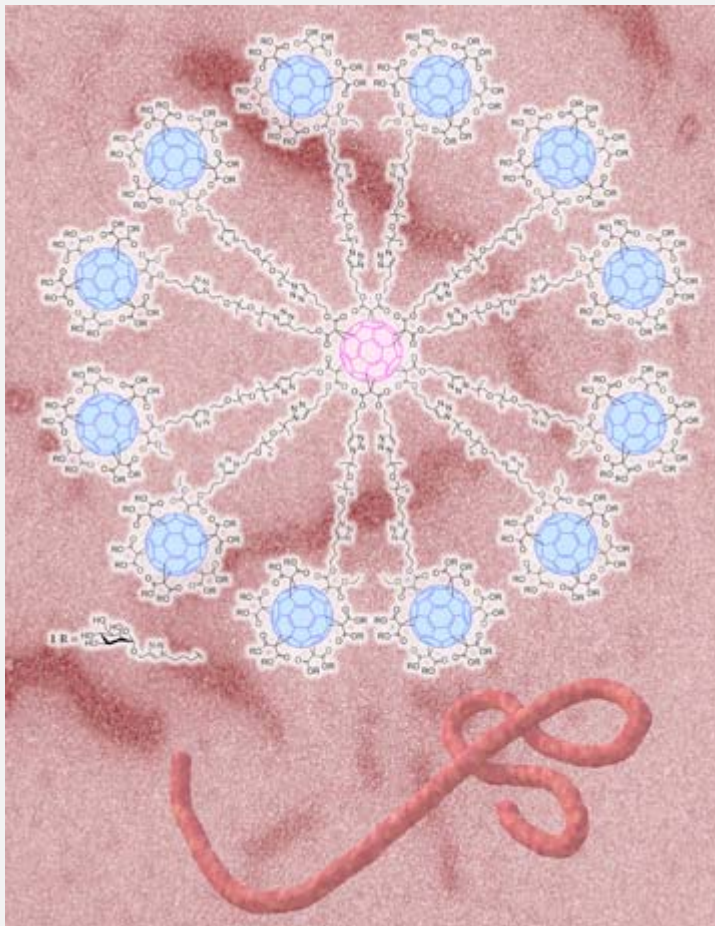


Activité antioxydante et inhibition de la replication de l'HIV-protease (HIV-1 et HIV-2)

Applications des fullerènes en médecine et biologie

1. Activité antivirale

Une molécule géante contre le virus Ebola ?



nature
chemistry

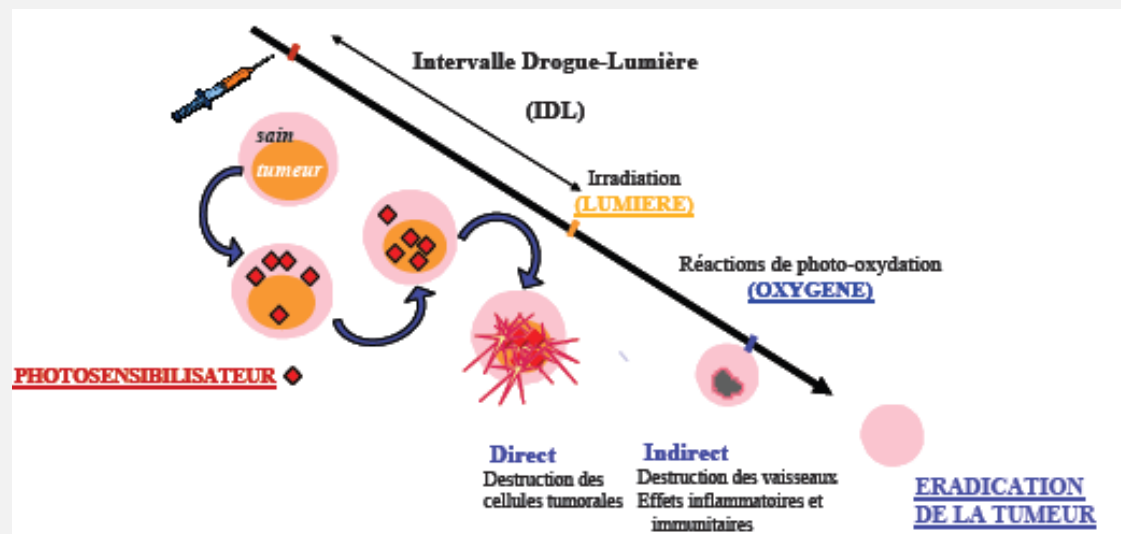
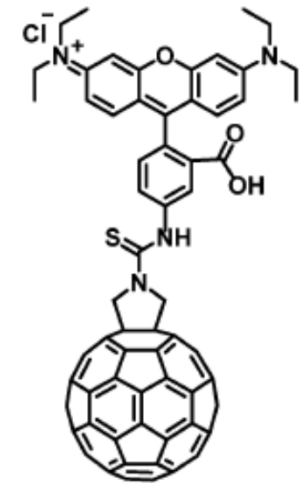
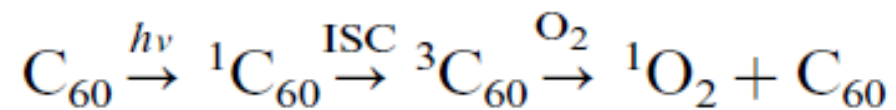
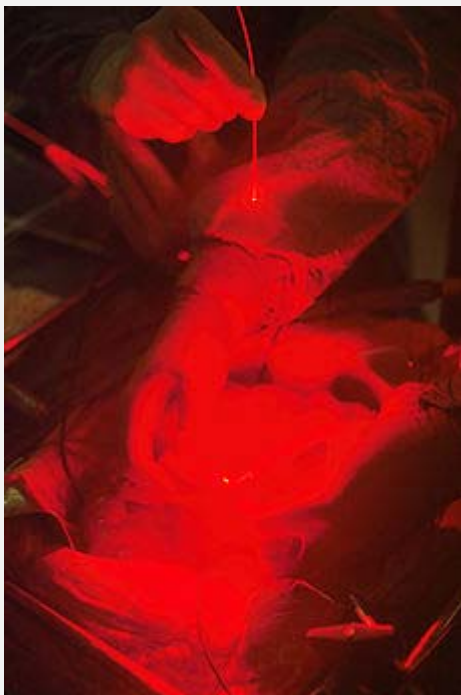
ARTICLES
PUBLISHED ONLINE 9 NOVEMBER 2018 | DOI: 10.1038/NATCHEM.2018.007

Synthesis of giant globular multivalent glycofullerenes as potent inhibitors in a model of Ebola virus infection

Antonio Muñoz¹, David Sigwalt^{2,3}, Beatriz M. Ilcaso¹, Joanna Szczepaniak⁴, Laura Rodríguez-Pérez¹, Iwona Nierengarten⁵, Michel Heller⁶, Jean-Serge Remy⁶, Kevin Buffet⁶, Stéphane P. Vincent⁶, Javier Roy^{6*}, Rafael Delgado^{6*}, Jean-François Nierengarten^{1*} and Nazario Martín^{1,4*}

Applications des fullerènes en médecine et biologie

2. Thérapie Photodynamique



Applications des fullerènes en médecine et biologie

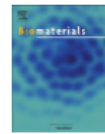
3. La Fontaine de Jouvence ???



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Biomaterials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/biomaterials



The prolongation of the lifespan of rats by repeated oral administration of [60] fullerene

Tarek Baati^{a,b}, Fanchon Bourasset^c, Najla Gharbi^d, Leila Njim^b, Manef Abderrabba^e, Abdelhamid Kerkeni^b, Henri Szwarc^d, Fathi Moussa^{d,*}

^a UMR CNRS 8512, Faculté de Pharmacie, Université Paris Sud XI, Rue J-B Clément-F92296, Châtenay-Malabry, France

^b Unité Elements Trace et Antioxydants, Laboratoire de Biophysique and Service d'anatomie et de Cytologie Pathologiques, CHU de Médicine de Monastir, 5000, Tunisie

^c Barrières Physiologiques et Réponses Thérapeutiques (EA 4123), Faculté de Pharmacie, Université Paris Sud XI, Rue J-B Clément-F92296, Châtenay-Malabry, France

^d Laboratoire d'Etude des Techniques et Instruments d'Analyse Moléculaire, GCAPS, EA 4041, IUT d'Orsay, Université Paris Sud XI, Plateau de Moulon, 91400 Orsay, France

^e Unité de Physico-Chimie Moléculaire, Ipest, Université de Carthage, 2070 Carthage, Tunisie

ARTICLE INFO

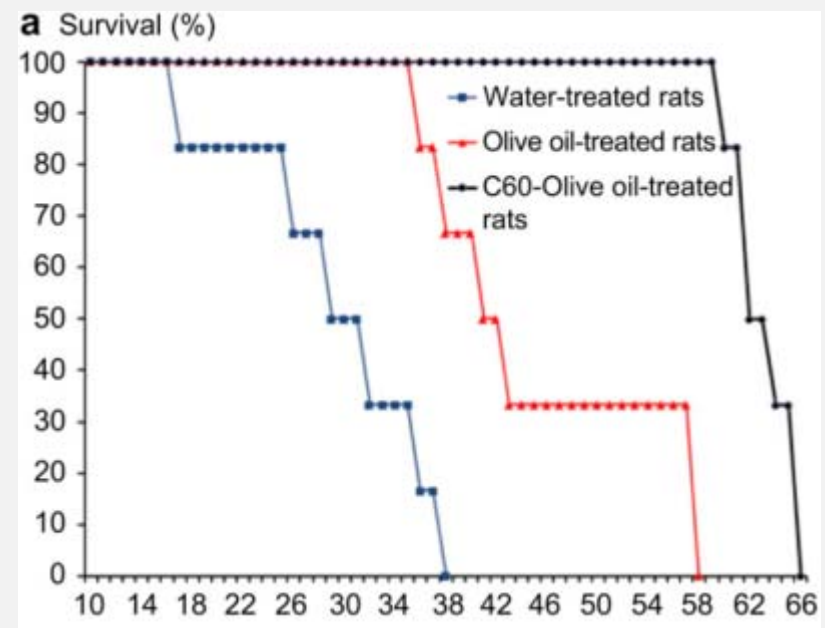
Article history:
Received 10 January 2012
Accepted 10 March 2012
Available online 10 April 2012

Keywords:
Fullerenes
Toxicity
Pharmacokinetics
Ageing
Oxidative stress

ABSTRACT

Countless studies showed that [60]fullerene (C_{60}) and derivatives could have many potential biomedical applications. However, while several independent research groups showed that C_{60} has no acute or sub-acute toxicity in various experimental models, more than 25 years after its discovery the *in vivo* fate and the chronic effects of this fullerene remain unknown. If the potential of C_{60} and derivatives in the biomedical field have to be fulfilled these issues must be addressed. Here we show that oral administration of C_{60} dissolved in olive oil (0.8 mg/ml) at reiterated doses (1.7 mg/kg of body weight) to rats not only does not entail chronic toxicity but it almost doubles their lifespan. The effects of C_{60} -olive oil solutions in an experimental model of CCl_4 intoxication in rat strongly suggest that the effect on lifespan is mainly due to the attenuation of age-associated increases in oxidative stress. Pharmacokinetic studies show that dissolved C_{60} is absorbed by the gastro-intestinal tract and eliminated in a few tens of hours. These results of importance in the fields of medicine and toxicology should open the way for the many possible -and waited for- biomedical applications of C_{60} including cancer therapy, neurodegenerative disorders, and ageing.

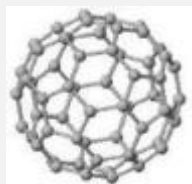
© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.



mois

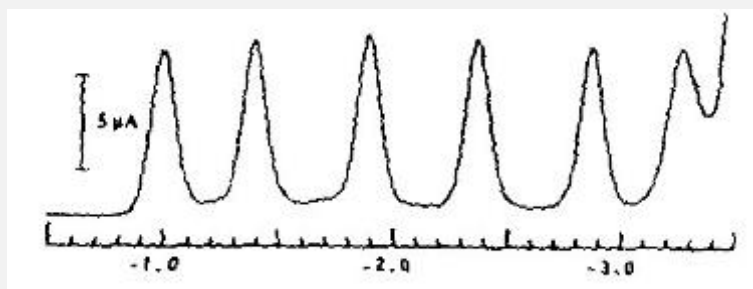
ATTENTION : Résultats qui restent sujets à polémique ...

Propriétés du Fullerène C_{60}



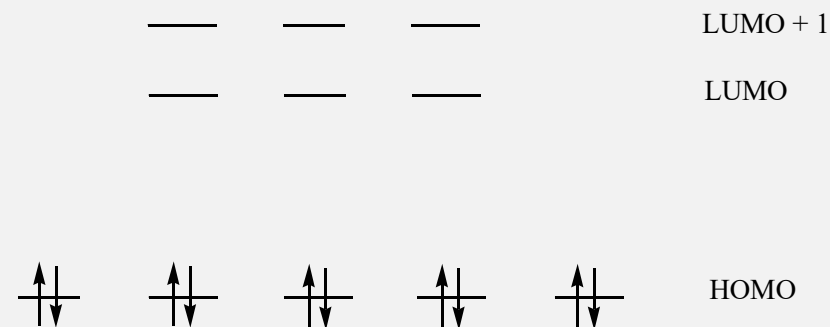
C_{60}

- Grande affinité électronique
- Faible énergie de réorganisation
- Propriétés de transport intéressantes



Potentiel de réduction en V vs Fe^+ / Fe ,
 $v = 100 \text{ mV.s}^{-1}$ obtenus à -10°C dans un
 mélange $CH_3CN / \text{Toluène}$

E



Couple monoélectronique	Réduction
$C_{60} / C_{60}^{\cdot -}$	- 0.98
$C_{60}^{\cdot -} / C_{60}^{2-}$	- 1.37
$C_{60}^{2-} / C_{60}^{3-}$	- 1.87
$C_{60}^{3-} / C_{60}^{4-}$	- 2.35
$C_{60}^{4-} / C_{60}^{5-}$	- 2.85
$C_{60}^{5-} / C_{60}^{6-}$	- 3.26

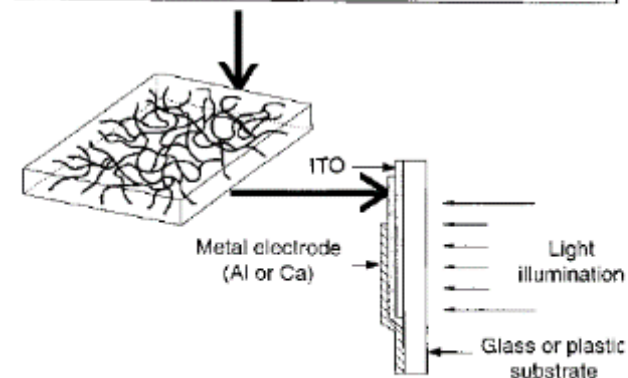
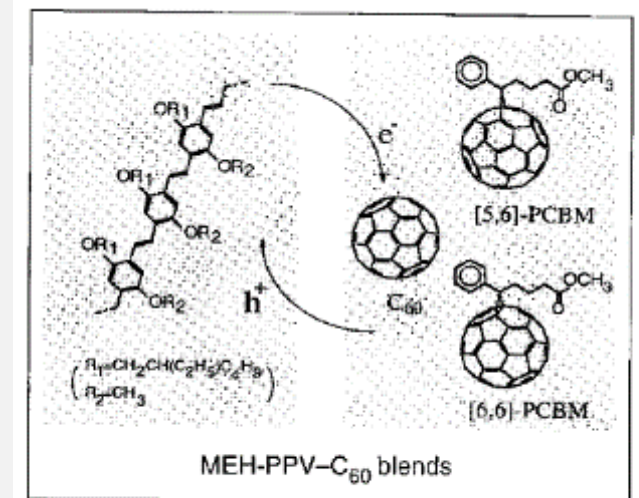
Propriétés du Fullerène C₆₀

Science, 1995, 270, 1789-91

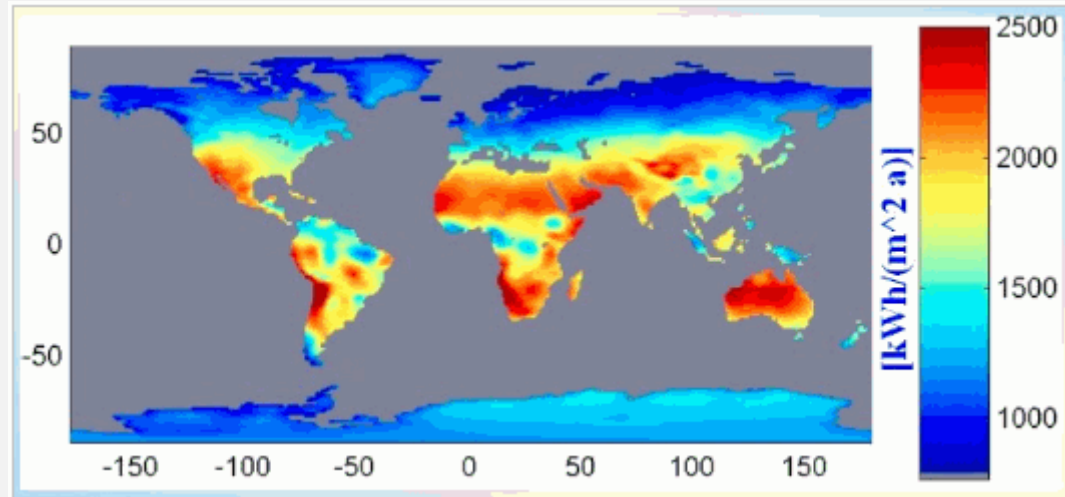
Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions

G. Yu,* J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, A. J. Heeger

The carrier collection efficiency (η_c) and energy conversion efficiency (η_e) of polymer photovoltaic cells were improved by blending of the semiconducting polymer with C₆₀ or its functionalized derivatives. Composite films of poly(2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene vinylene) (MEH-PPV) and fullerenes exhibit η_c of about 29 percent of electrons per photon and η_e of about 2.9 percent, efficiencies that are better by more than two orders of magnitude than those that have been achieved with devices made with pure MEH-PPV. The efficient charge separation results from photoinduced electron transfer from the MEH-PPV (as donor) to C₆₀ (as acceptor); the high collection efficiency results from a bicontinuous network of internal donor-acceptor heterojunctions.



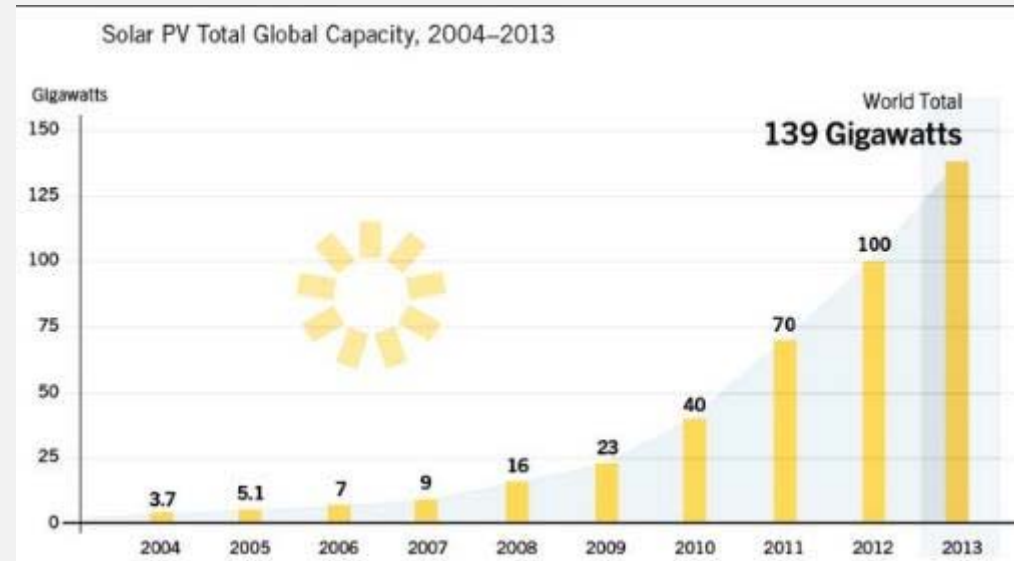
Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



L'énergie solaire reçue par la Terre est de $1,75 \cdot 10^{17}$ joules par seconde ou encore $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh par an.

0,02% de l'énergie solaire reçue par la Terre en un an est nécessaire pour assurer les besoins à l'échelle mondiale.

Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



Rendements :

- Si monocristallin 15%,
- Si Polycristallin 12%,
- Amorphe 7%

Problèmes :

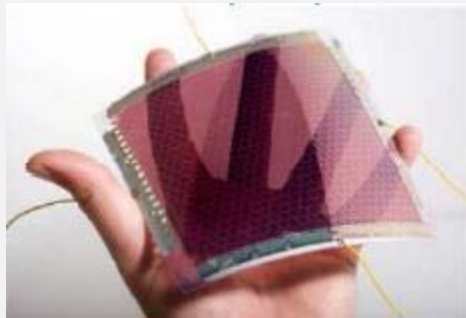
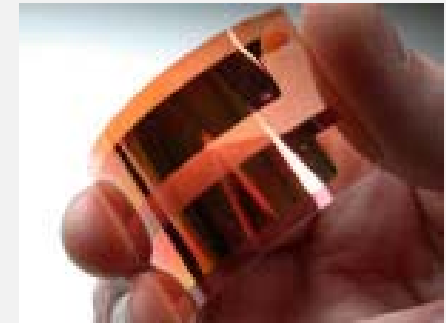
- Coût, disponibilité, impact environnemental
- Il faut 2 à 3 ans pour qu'une cellule en silicium monocristallin restitue l'énergie consommée pour sa fabrication

**Marché dominé par
la technologie du silicium**

Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

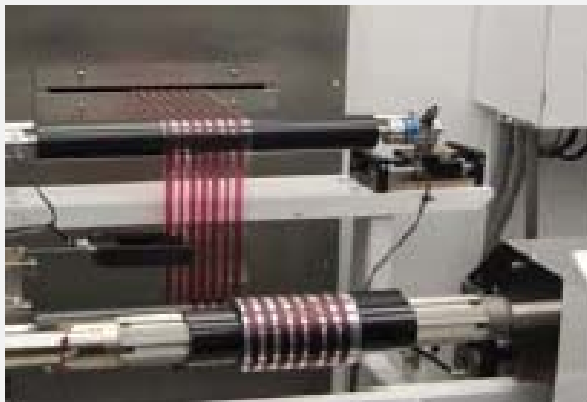
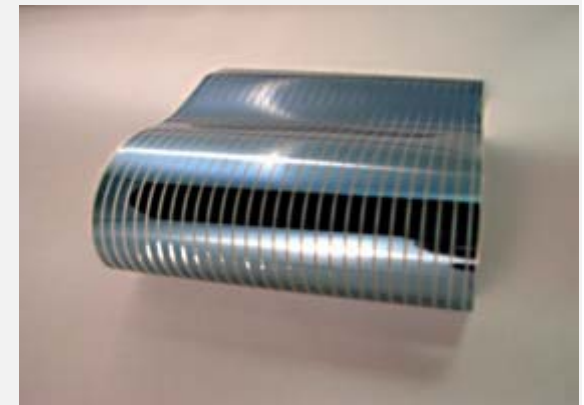


Solution alternative : Cellules Solaires Organiques



Avantages :

- Faible coût
- Légèreté
- Support flexible
- Grandes surfaces
- Faible impact environnemental



RESEARCH ARTICLE

A comparative human health, ecotoxicity, and product environmental assessment on the production of organic and silicon solar cells

Michael P. Tsang^{1,2}, Guido W. Sonnemann^{1,2*} and Dario M. Bassani^{1,2}

¹ Univ. Bordeaux, ISM, UMR 5255, F-33400 Talence, France

² CNRS, ISM, UMR 5255, F-33400 Talence, France

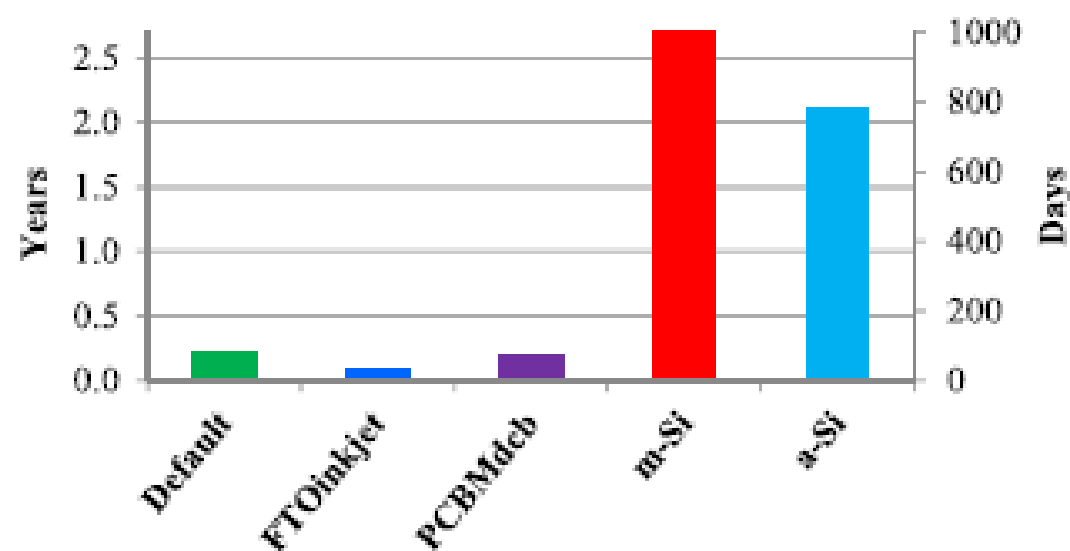
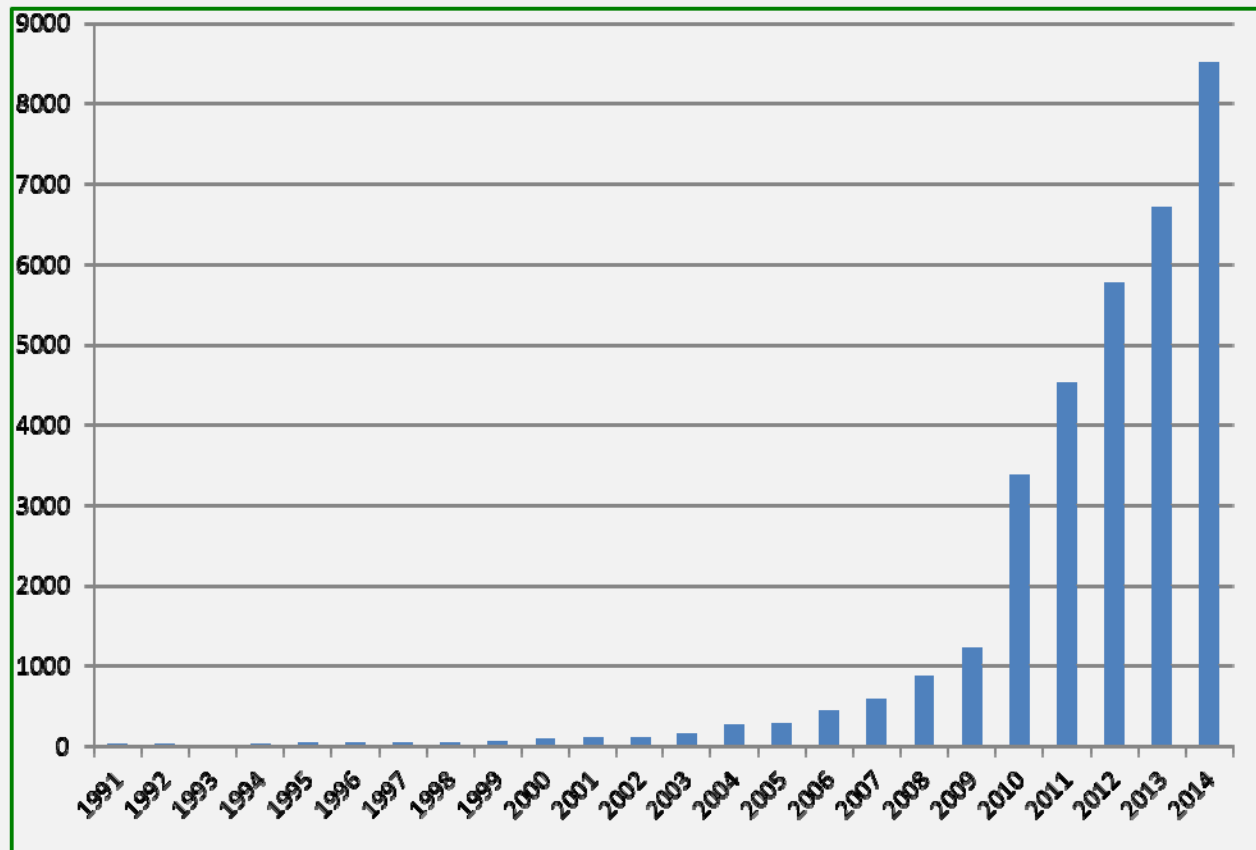


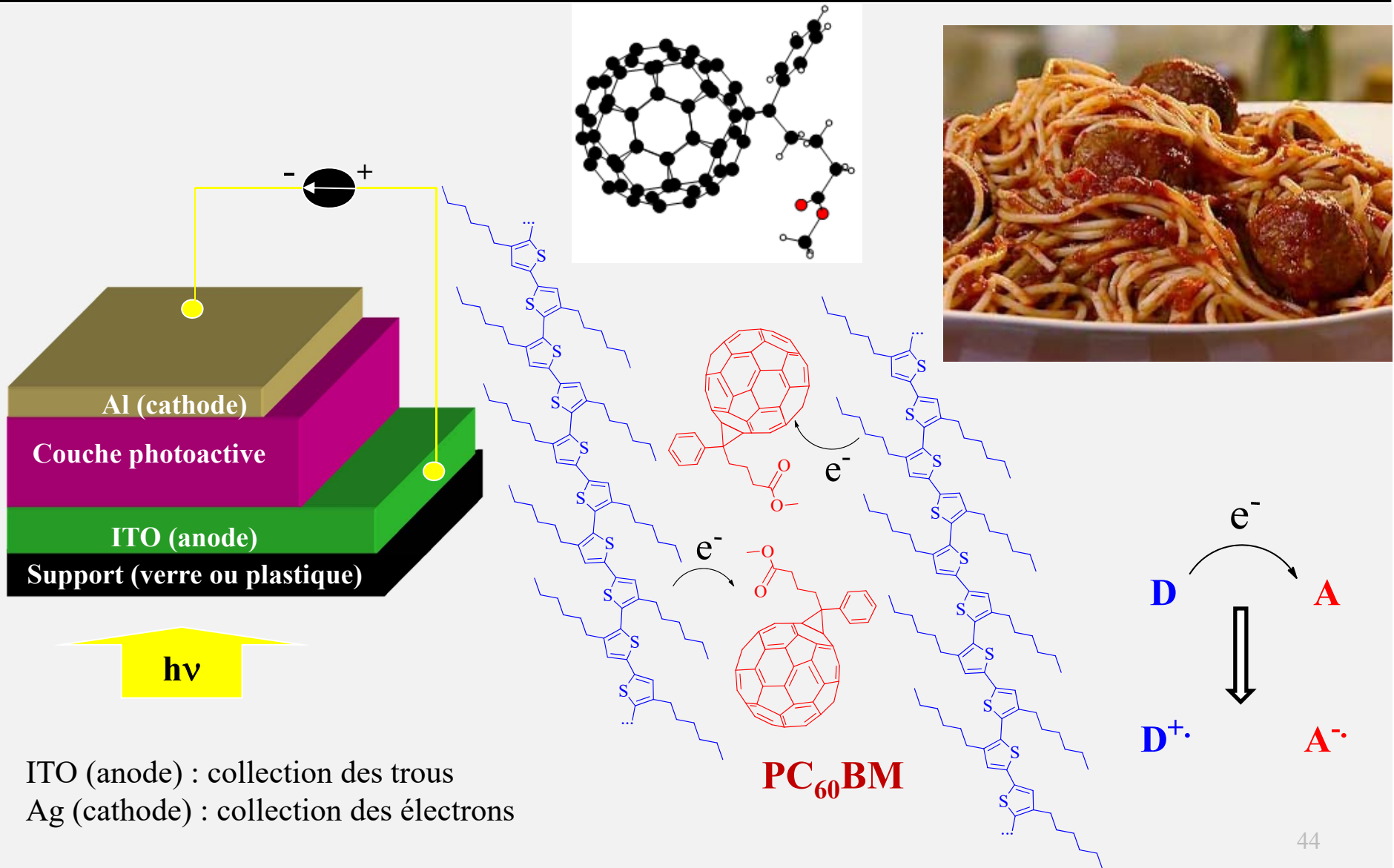
Figure 7. Energy payback time for each solar cell considered in this study displayed in both days and years per square meter of cell.

Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

Nombre de publications internationales sur les Cellules Solaires Organiques



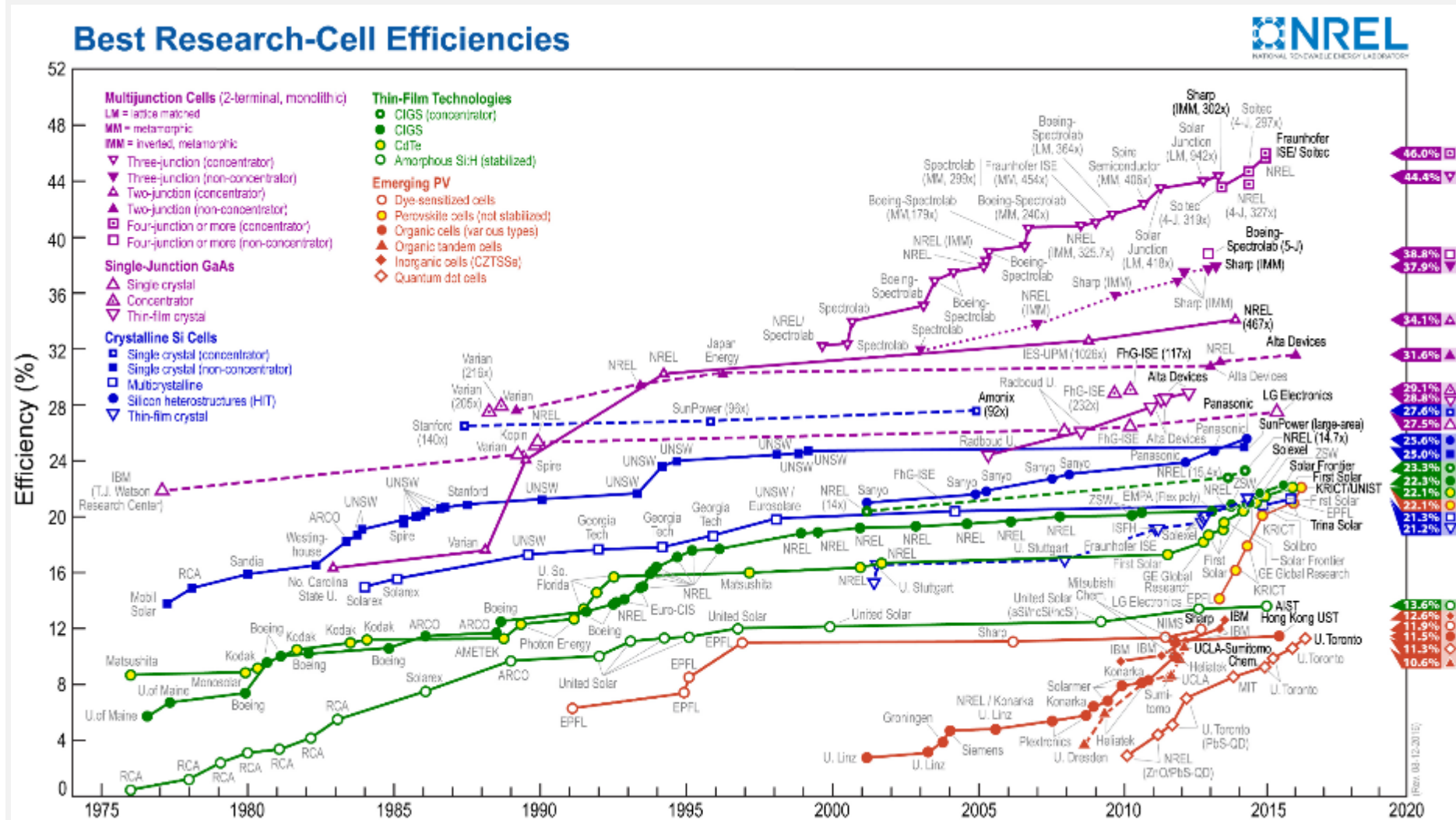
Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

Mars 2011 :

Rendement de conversion du photovoltaïque organique à 8,5% !

05/03/2011



Le photovoltaïque organique continue sa course à la performance avec un nouveau record de rendement à 8,5%. La société japonaise Mitsubishi Chemical bat ainsi le récent record de 8,3% détenu par l'américaine Konarka Technologies. En mars 2010, l'entreprise japonaise avait présenté une cellule photovoltaïque organique en couche mince avec un rendement de 7,44%. En un [...]

[\[lire la suite...\]](#)

Janvier 2012 :

Record de rendement à 9,8% pour une cellule photovoltaïque organique

03/01/2012



La société allemande Heliatek a battu en décembre 2011 le record de rendement pour des cellules solaires organiques en atteignant 9,8% de conversion de l'énergie solaire en électricité. La société n'en est pas à son premier exploit, c'est déjà la troisième fois qu'elle bat le record mondial de rendement pour du photovoltaïque organique. Pour arriver [...]

[\[lire la suite...\]](#)

Juin 2012 :

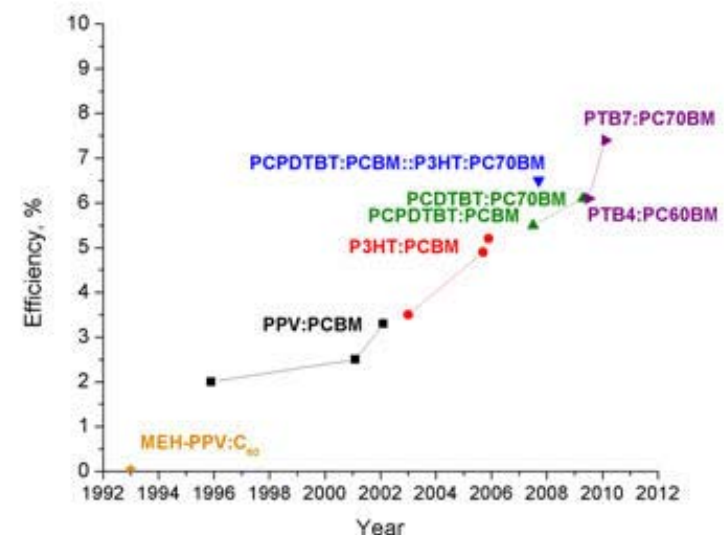
11% de rendement pour le photovoltaïque organique : record battu !

10/06/2012

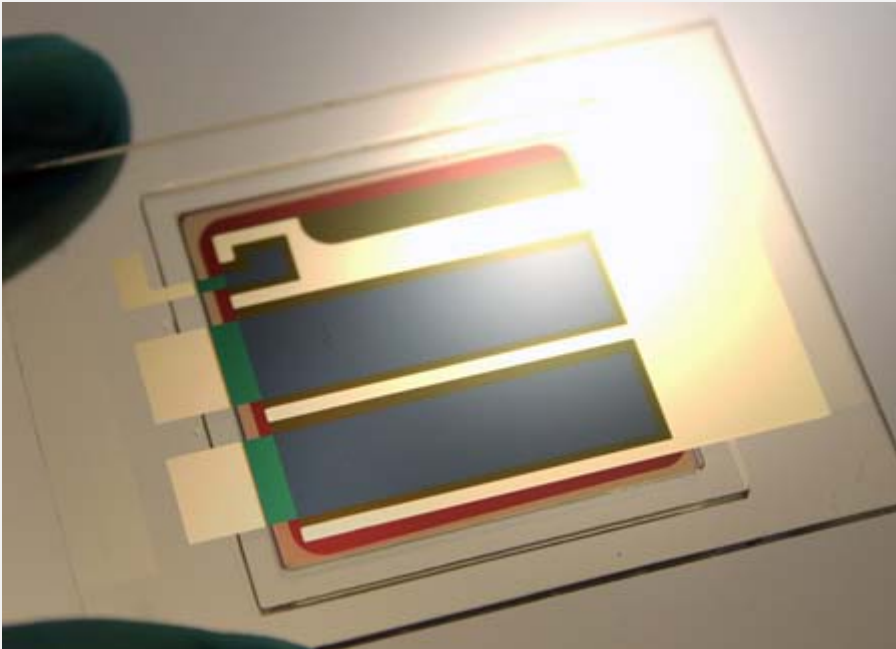


Les mois se suivent et les records s'enchaînent dans le photovoltaïque organique. En décembre dernier, la société allemande Heliatek avait atteint le record de 9,8%. Au mois de mars, des chercheurs de l'université UCLA aux Etats-Unis sont arrivés à un rendement de 10,6% avec des cellules solaires organiques en tandem. Record battu a nouveau par [...]

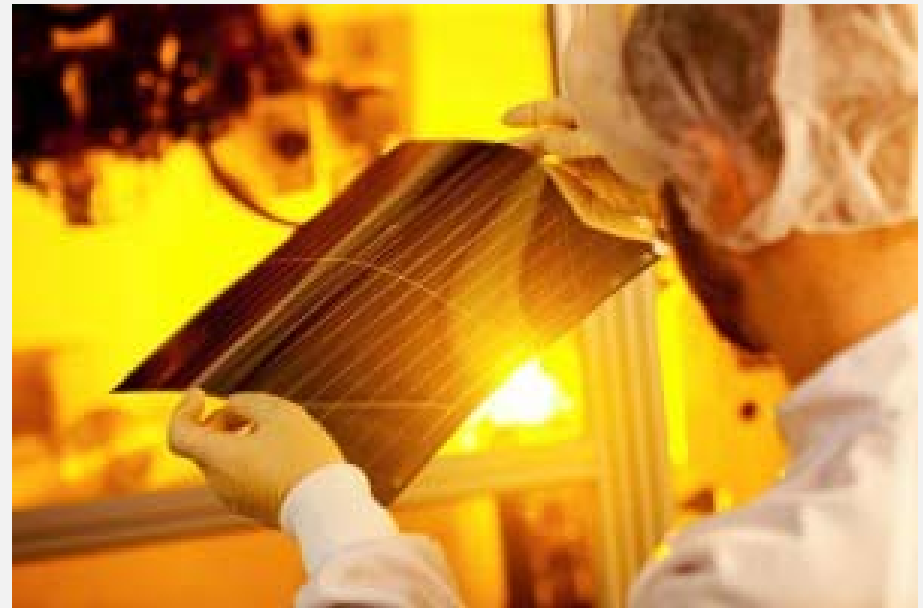
[\[lire la suite...\]](#)



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



Heliatek : 12%
23 Janvier 2013



**13,2% de rendement de
conversion pour Heliatek**
Février 2016

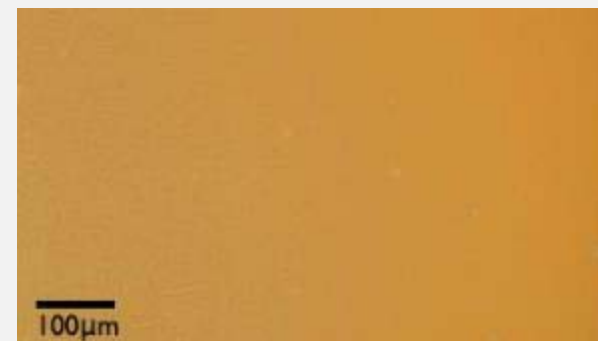


Problème : Stabilité de la couche photoactive !!!

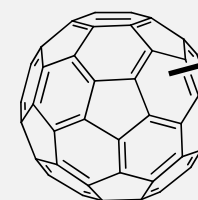
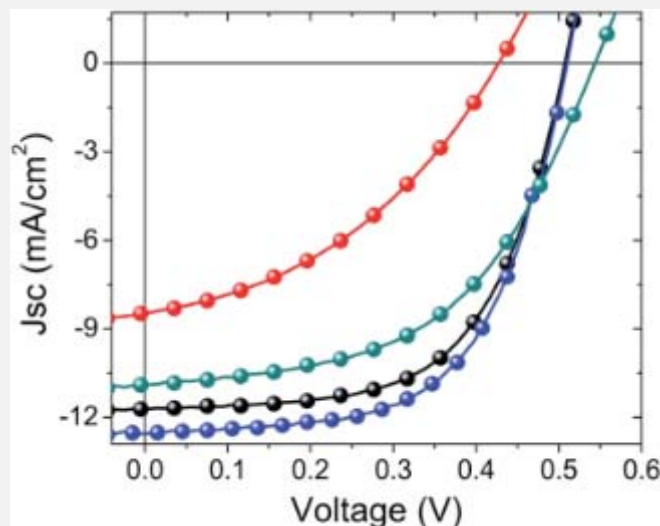


Cellule P3HT / PCBM

Concept de « fullerènes
cross-linkable »



Cellule P3HT / Fullerene
cross -linkable



Cross-linkable
group(s)

G. Wantz, L. Derue, O. Dautel, B. Pavageau,
A. Diacon, P. Hudhomme,
ANR Cephorcas, Programme Habisol 2010-003 :
Brevet déposé en avril 2012
ANR Helios 2014-2017



Journal of Materials Chemistry C



COMMUNICATION

[View Article Online](#)
[View Journal](#) | [View Issue](#)



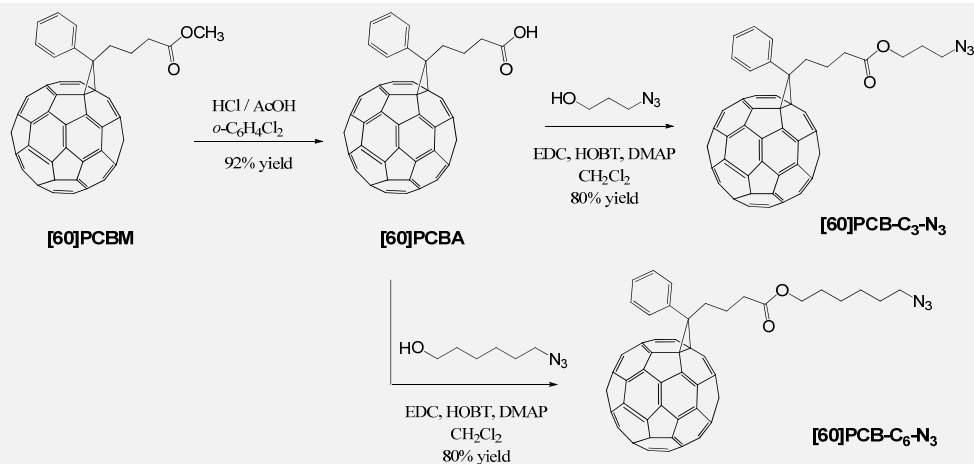
Cite this: *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2, 7163

Received 4th June 2014
 Accepted 11th July 2014

DOI: 10.1039/c4tc01178c

Cross-linkable azido C₆₀-fullerene derivatives for efficient thermal stabilization of polymer bulk-heterojunction solar cells†

Aurel Diacon,^{†a} Lionel Derue,^{†b} Clémence Lecourtier,^{bc} Olivier Dautel,^d
 Guillaume Wantz^{*b} and Pi  trick Hudhomme^{*a}



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

Utilisation pour chargeurs téléphones, ordinateurs...



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

Utilisation pour textiles, sacs...



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

Utilisation pour textiles, applications militaires...



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

Utilisation pour transport, habitat ...

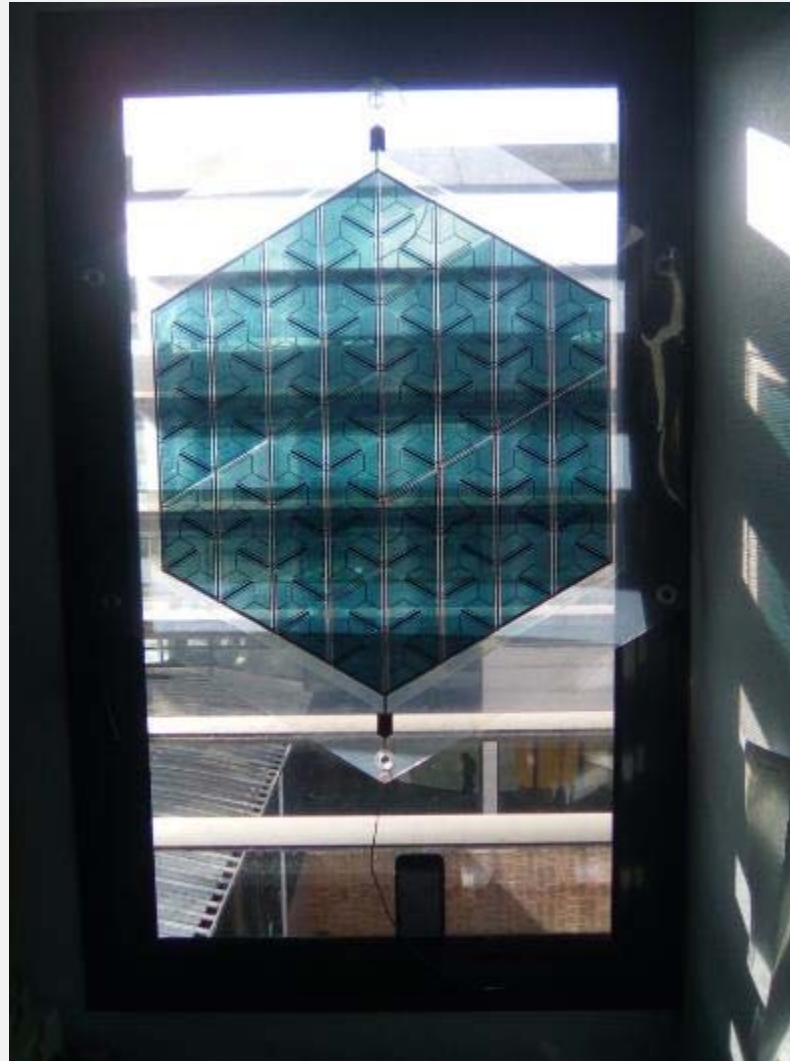
TER - Région Poitou
Charentes



San Francisco



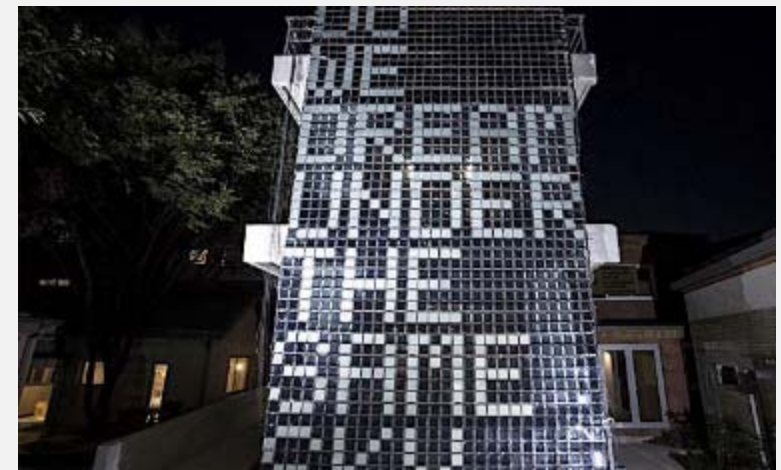
Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



Bâtiment Merck (Séoul, 2017)



Francfort

Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

Extension du groupe scolaire de Pontiacq (64):

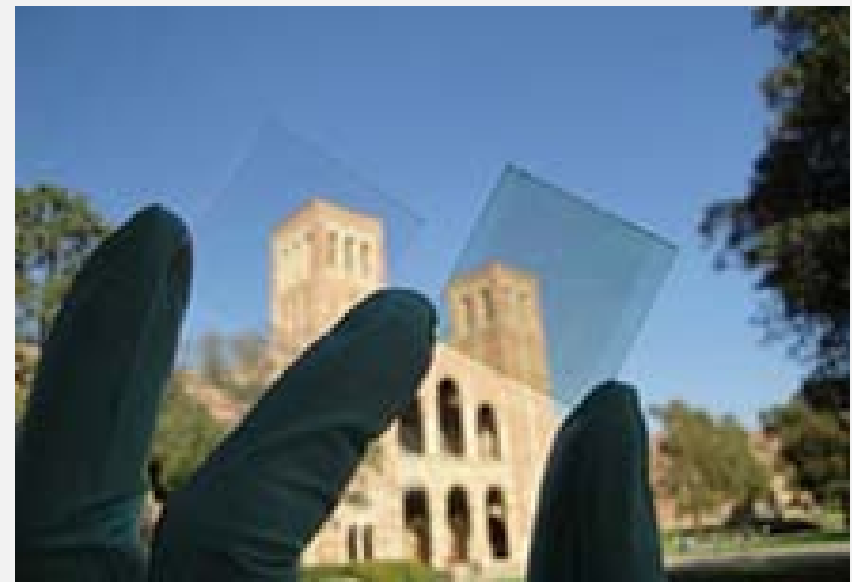


Le film photovoltaïque transparent : une technologie futuriste



Wysips ©

Des vitrages qui génèrent de l'électricité, des smartphones tactiles qui se rechargent seuls, des capteurs domotiques et du mobilier urbain énergétiquement autonomes... Telles sont quelques-unes des applications possibles du film photovoltaïque transparent multi-support. Développée par plusieurs sociétés, dont une start-up française, cette technologie pourrait révolutionner le quotidien.

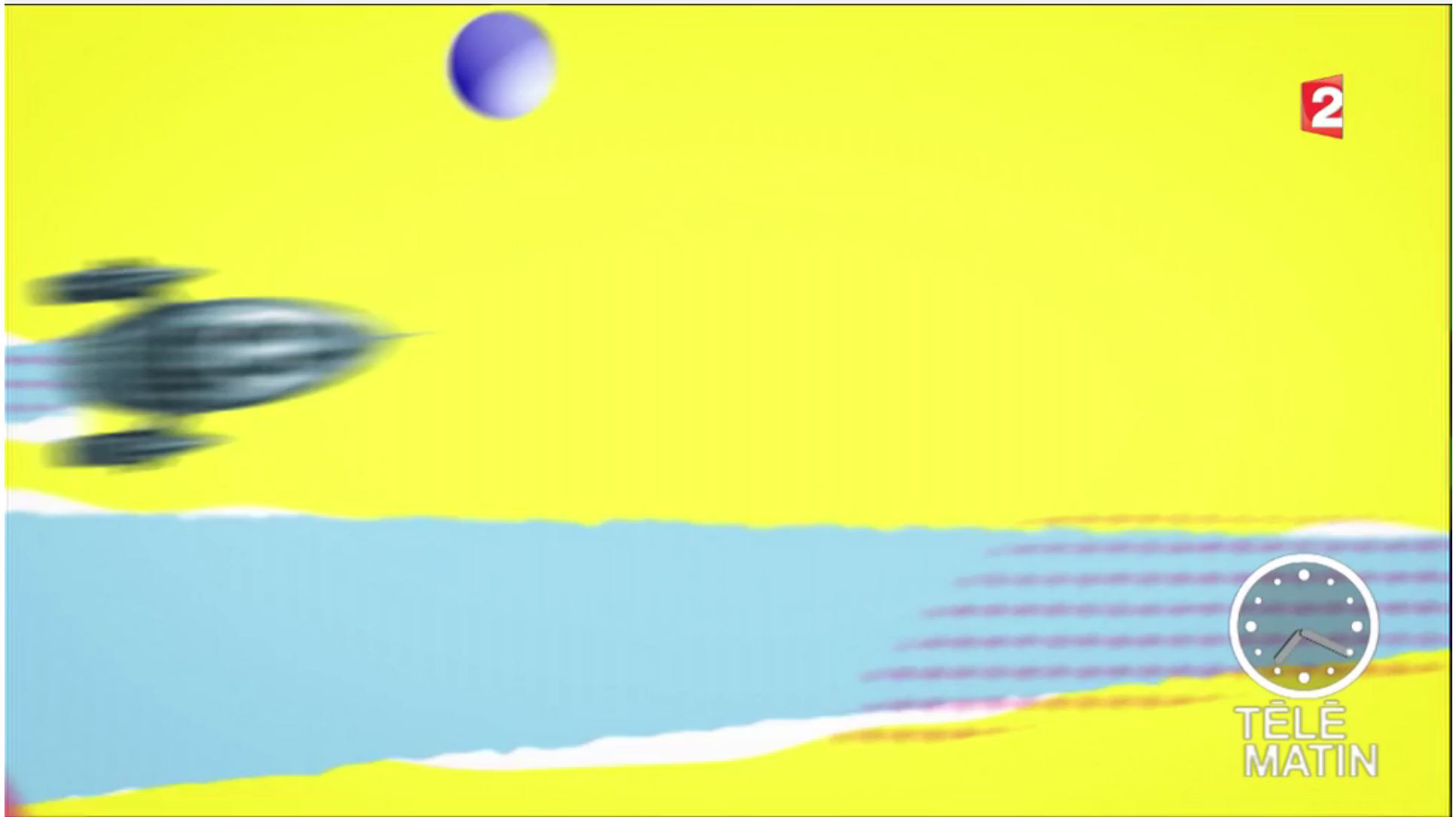


13 juillet 2012

<http://www.batiactu.com/edito/le-film-photovoltaïque-transparent---une-technolog-32656.php>



**Expo universelle Milan 2015
(stand allemand : Bielectric)**



Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque

28/03/2018

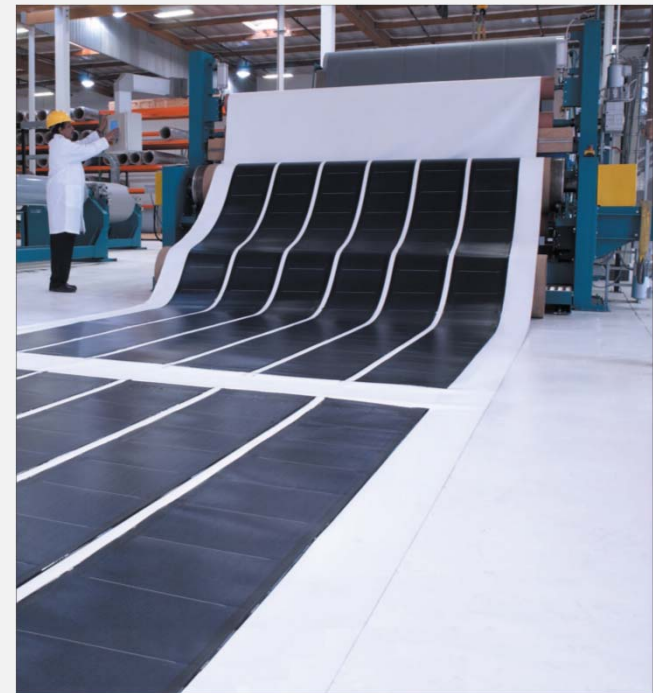
ARMOR

ARMOR produit un module OPV de 60 cm de large et jusqu'à 30 m de long avec un rendement de 40 Wc par m² de surface : une première sur le marché !!!



Principales applications concernées par l'élargissement des modules photovoltaïques :

- **bâtiment**
- **serres solaires**
- **automobile**
- **aéronautique**
- **ferroviaire**
- **nautique.**



JC Decaux - ARMOR



<http://www.armor-group.com/fr/roland-garros-2018-Armor-avec-son-film-ASCA-remporte-l-appel-a-projet-d-Engie>

Roland Garros 2018 : ARMOR remporte l'appel à projet d'Engie

En panne de batterie de portable à Roland Garros ? Rendez-vous à la station mobile photovoltaïque équipée de film solaire ASCA[®] et développée par Engie Innovation. Une solution photovoltaïque flexible, légère et bas carbone pour tous les spectateurs de Roland Garros 2018 qui pourront recharger leur smartphone à tout moment !

Applications des fullerènes pour la conversion photovoltaïque



ARMOR

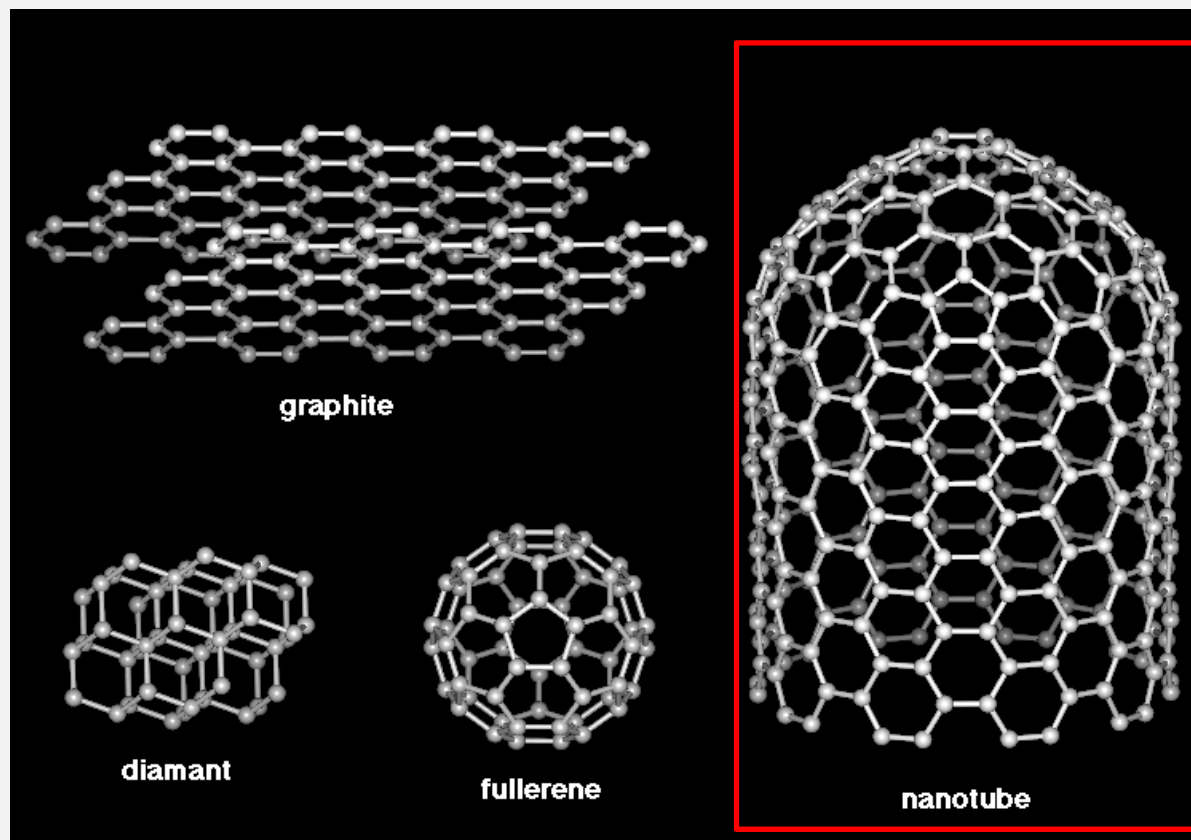
<http://www.beautiful-light.eu/fr>



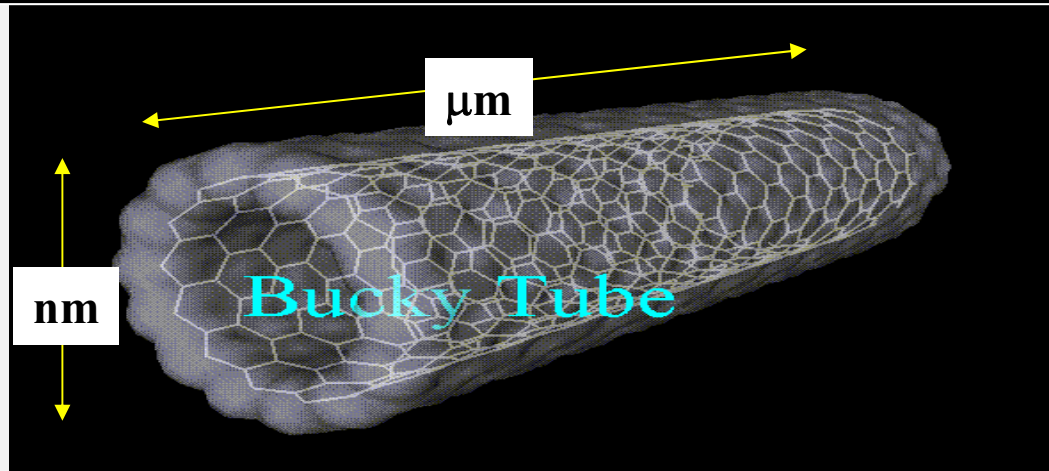
Le prototype de lampe Orion, réalisé par des étudiants de L'École de design Nantes Atlantique dans le cadre d'un partenariat avec le Groupe ARMOR, et intégrant le film photovoltaïque organique souple du Beautiful Light Project®, vient d'être récompensé d'une « Etoile » par le Prix Observateur du Design 2015.



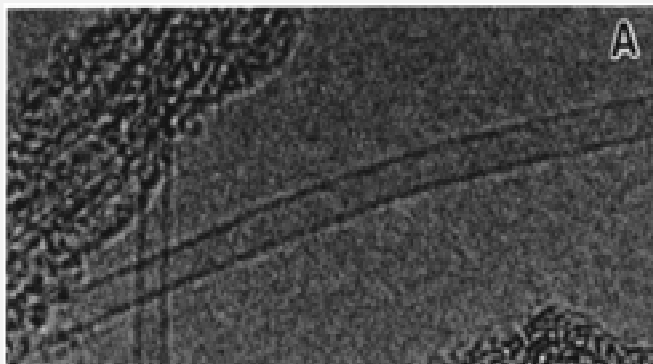
Formes moléculaires du carbone



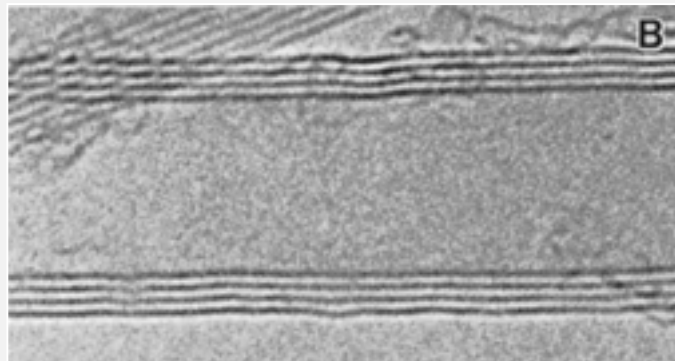
1991 : Découverte des Nanotubes



$l \approx \text{quelques mm}$ $d = 1 \text{ à } 10 \text{ nm}$



Nanotubes monoparois (SWNT)



Nanotubes multiparois (MWNT)



Sumio Iijima
(1939 -)

Production mondiale de nanotubes :

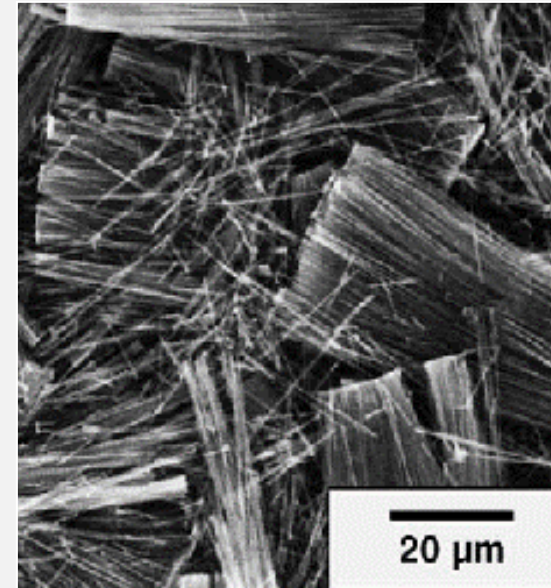
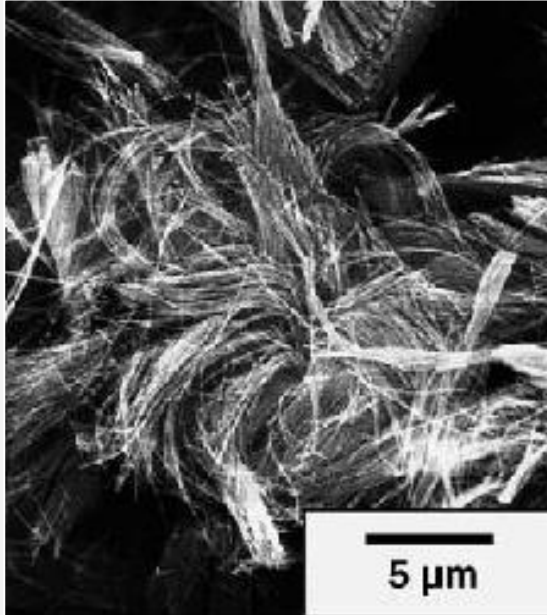
2002 = 10 kg / an

2010 = 80 tonnes / an

SWNT : 60 € / g

MWNT : 5 € / g

1991 : Découverte des Nanotubes



"armchair" CNT
(metallic)

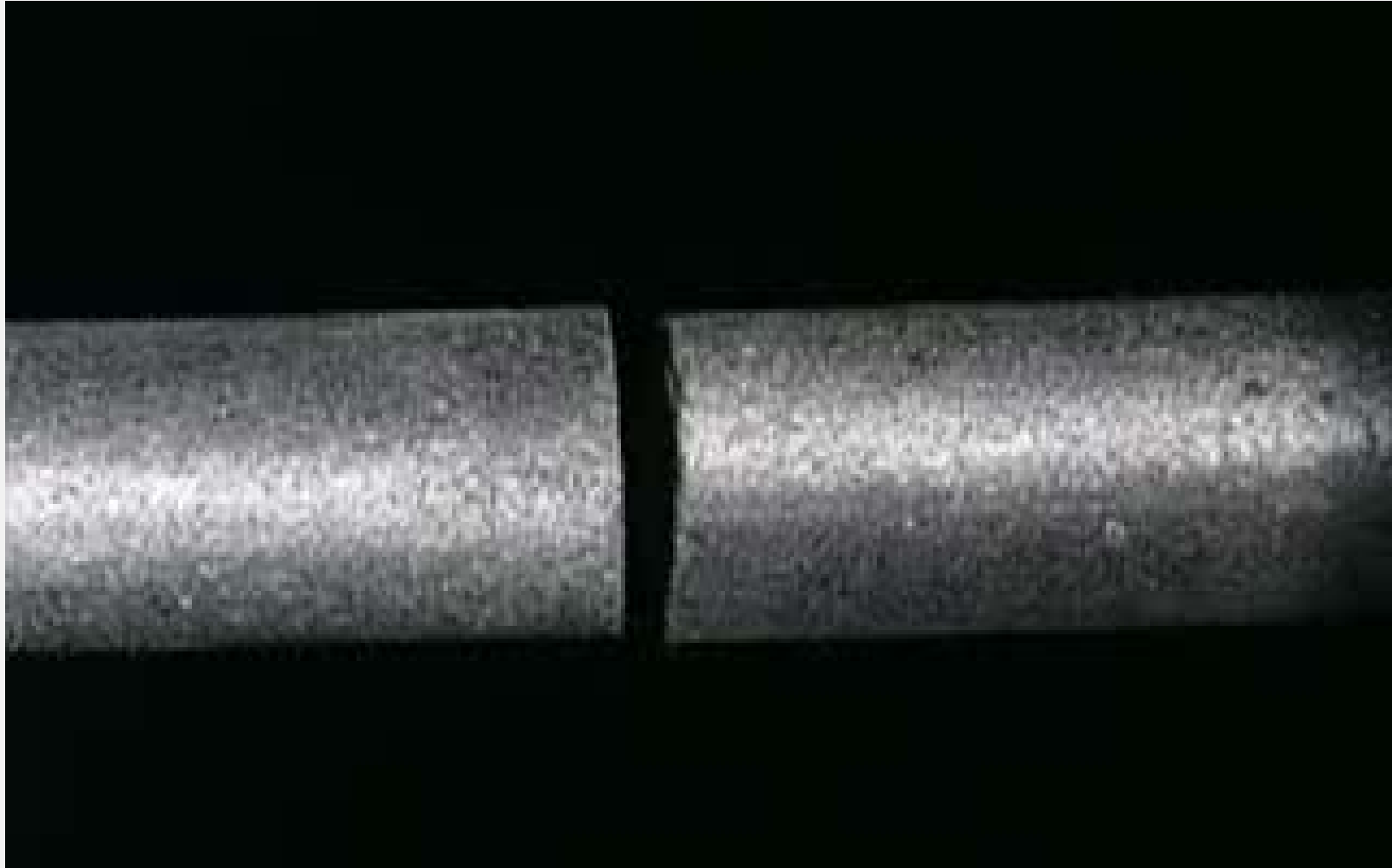


"zigzag" CNT
(semiconducting)



chiral CNT
(metallic or
semiconducting)

1991 : Découverte des Nanotubes

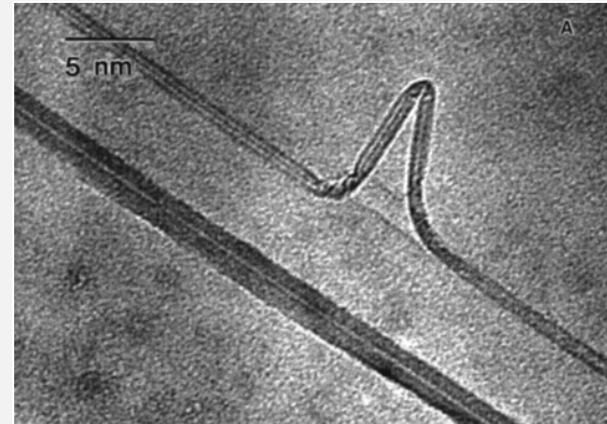


Applications des Nanotubes comme Matériaux

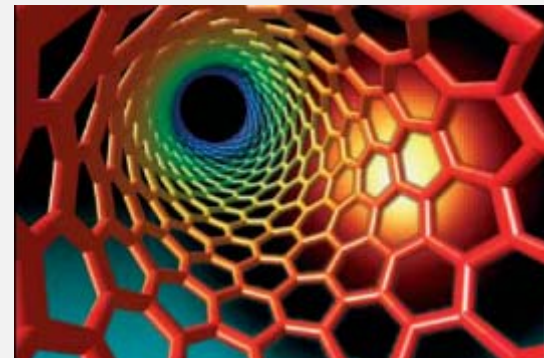
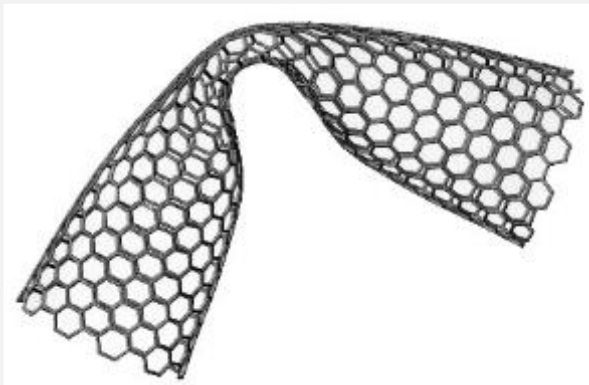


nanotube

cheveu

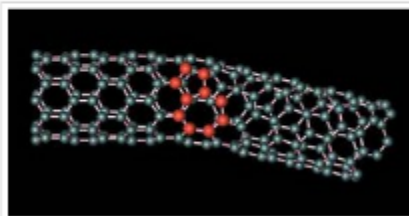


**100 000 fois plus fin qu'un cheveu,
mais 6 fois plus légers et 100 fois plus résistants que
l'acier, et meilleur conducteur que le cuivre !!!**



Applications des Nanotubes comme Matériaux

Un nouveau matériau pour la F1, les nanotubes de carbone



Les ingénieurs de la F1, pour qui le coût n'est pas un paramètre (dans la première moitié de la grille en tout cas), pourraient mettre à profit dès l'année prochaine l'avancée révolutionnaire faite par l'**University of Texas** dans la production de ruban de nanotubes de carbone. C'est du moins l'avis du **professeur Barron**, de l'université Rice de Houston, qui est par ailleurs fan de sport auto. Jusqu'à

présent, on ne pouvait produire qu'avec difficulté ce matériau nouveau, mais les chercheurs de Dallas ont trouvé le moyen de sortir 10 mètres par minute de ce ruban magique. Pourquoi magique ? Tout d'abord, les nanotubes de carbone ont des propriétés de résistance théorique 200 fois supérieures à l'acier, pour une masse 6 fois moindre à section égale. Même si assemblé en ruban les propriétés mécaniques du matériau se dégradent, elles restent très supérieures à la fibre de carbone employée aujourd'hui. Mais ce n'est pas tout. Le ruban de nanotubes de carbone a également des propriétés de semi-conducteur, est transparent, et produit de l'électricité par exposition à la lumière dans certaines conditions, entre autres propriétés sympathiques.

Quel que soit le coût actuel, cet appel du pied au petit monde de la F1 ne sera sûrement pas ignoré, et on pourrait donc voir apparaître rapidement ce matériau miracle tant dans la construction du châssis que dans la motorisation. Les applications de cette technologie sont sans limites dans l'**industrie automobile** et ailleurs, et ses promoteurs parlent d'une révolution industrielle équivalente à l'apparition du plastique. Alors, même si quelques inquiétudes sur la toxicité du matériau existent, on n'a pas fini de parler des nanotubes de carbone.



Accueil > Matériaux

Imprimer

Les nanotubes s'invitent sur le Tour de France

Par THIERRY LUCAS - Publié le 13 juillet 2005 | L'Usine Nouvelle n° 2972

Les vélos de l'équipe Phonak sont équipés d'un cadre renforcé par des nanotubes de carbone. Une première.

Le fabricant suisse de vélos haut de gamme BMC a choisi le Tour de France pour franchir une nouvelle étape : après les vélos en fibres de carbone, les vélos en nanotubes de carbone ! Plus précisément, l'équipe Phonak (fabricant de prothèses auditives, suisse lui-aussi) qui a pris le départ du Tour 2005 est équipée de vélos dont le cadre est renforcé par l'addition de nanotubes de carbone. Résultat : un cadre de moins de 1 kilo, et qui, selon BMC, est d'une rigidité sans égale pour ce poids.

Les cadres de vélo en carbone ne sont certes pas nouveaux : les composites en résine-fibres de carbone savent depuis des années combiner résistance et légèreté. Mais le vélo Pro Machine de BMC va plus loin encore dans la technologie. Il adopte une solution qui permet de renforcer le maillon faible du composite, la matrice en résine, par l'addition de nanotubes de carbone. Une technologie mise au point pour les composants de cycles par Easton, fabricant américain d'équipements de sport.

A vrai dire, si les nanotubes de carbone sont connus pour leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, tout le problème est de transférer ces caractéristiques au matériau renforcé, donc à la matrice en résine. Tout d'abord, il est nécessaire de disperser les nanotubes dans la matrice, ce qui est loin d'être facile avec des particules de taille nanométrique, qui ont tendance à s'agglomérer. Par ailleurs, il faut assurer une bonne cohésion entre les particules et la résine, cohésion qui n'est pas facilitée par la nature chimique des parois des nanotubes. C'est pourquoi Easton a mis au point sa solution avec Zyvex, fournisseur d'additifs, qui se charge de « fonctionnaliser » (modification chimique à la surface du tube) les nanotubes de carbone, afin de les rendre effectivement utilisables dans une matrice de composite. Discrets sur la composition et les performances du matériau, les deux partenaires affirment toutefois que la formulation comprenant des nanotubes permet de gagner 25 % de résistance à la flexion.

Des pièces obtenues par moulage

De son côté, BMC a mis au point le procédé de fabrication du cadre. Une seule pièce, le filetage de boîtier de pédalier, reste en métal. Le reste est fabriqué par moulage du composite. Autre avantage : les pièces n'ont pas besoin d'être usinées après moulage, évitant d'endommager les fibres de carbone. Easton, qui fabrique aussi des guidons et des roues en carbone, a l'intention d'appliquer les nanotubes à d'autres composants.



Applications des Nanotubes comme Matériaux

Ice hockey stick glides ahead with nanotubes

Finnish company Montreal Sports has incorporated multiwalled carbon nanotubes made by Bayer, Germany into its Nitro Lite range of ice hockey sticks. The sticks were on display at the Nanotech 2006 trade show in Tokyo in late February while German foreign minister Frank-Walter Steinmeier made a flying visit to take a look.

According to Montreal Sports, the ice hockey sticks have 60-70% better impact resistance than those made from traditional composites. They contain carbon nanotubes with a diameter of 5-20 nm in the shaft of the stick, which increases flexibility over that of a carbon fibre composite. The company says that the flexibility of the new stick "allows for softer pass reception and an easier handling of the puck".



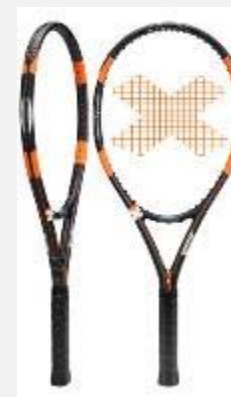
Nanotubes in action

The sticks were made with the help of Finnish company NanoLab Systems, which functionalizes the nanotubes so that they bond well with epoxy resin and incorporates them into the resin. Montreal Sports has dubbed the result "Hybtonite nano epoxy material".

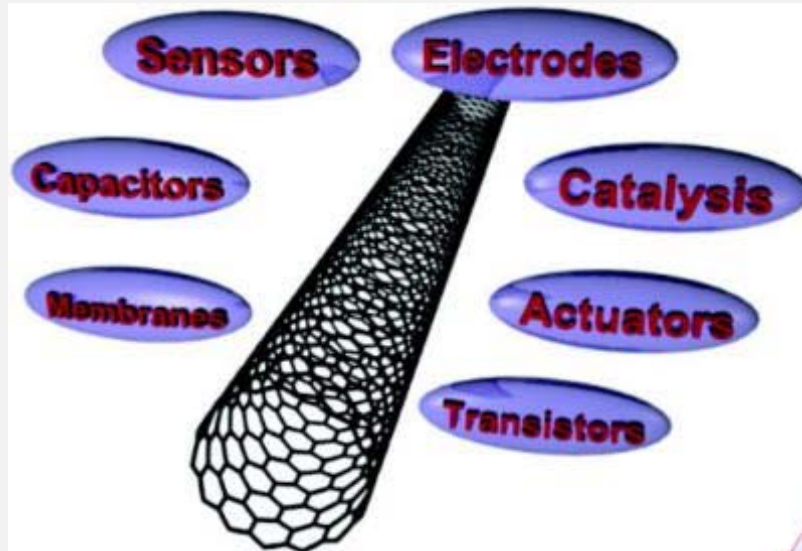


Raquette Badminton
Nano speed 8000

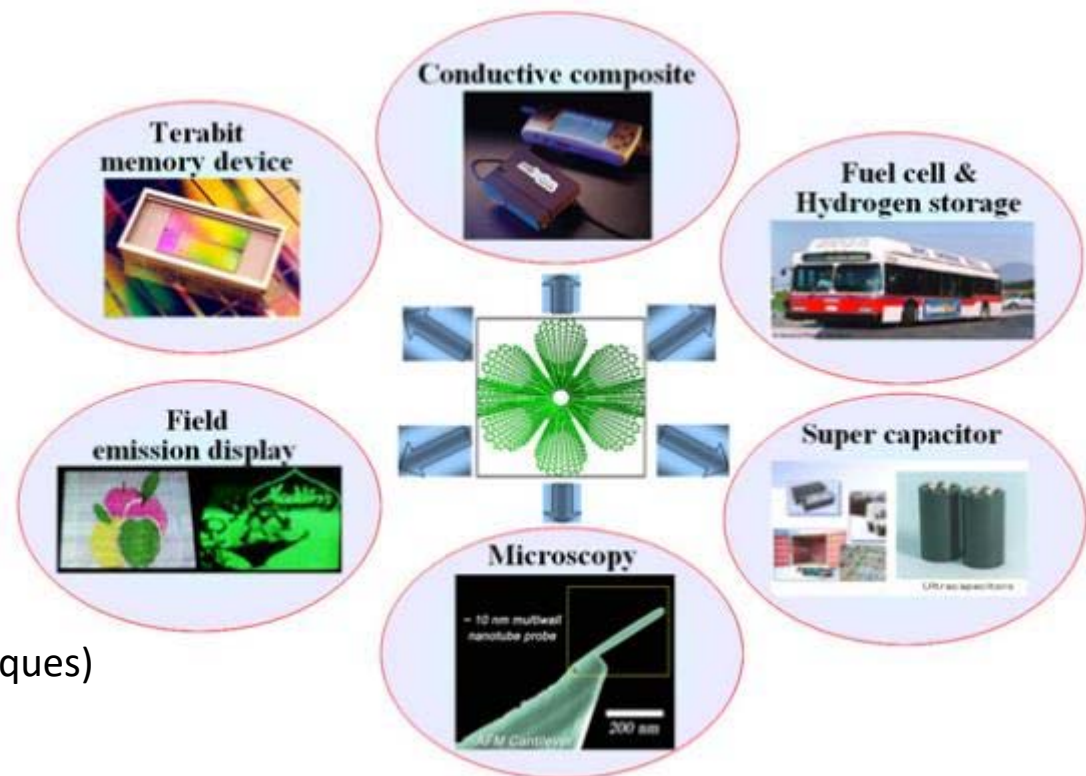
Des nanotubes de carbone entrent dans la composition du cadre de certaines raquettes de tennis pour leur conférer à la fois légèreté et solidité.
Yonex E-Zone Xi 98



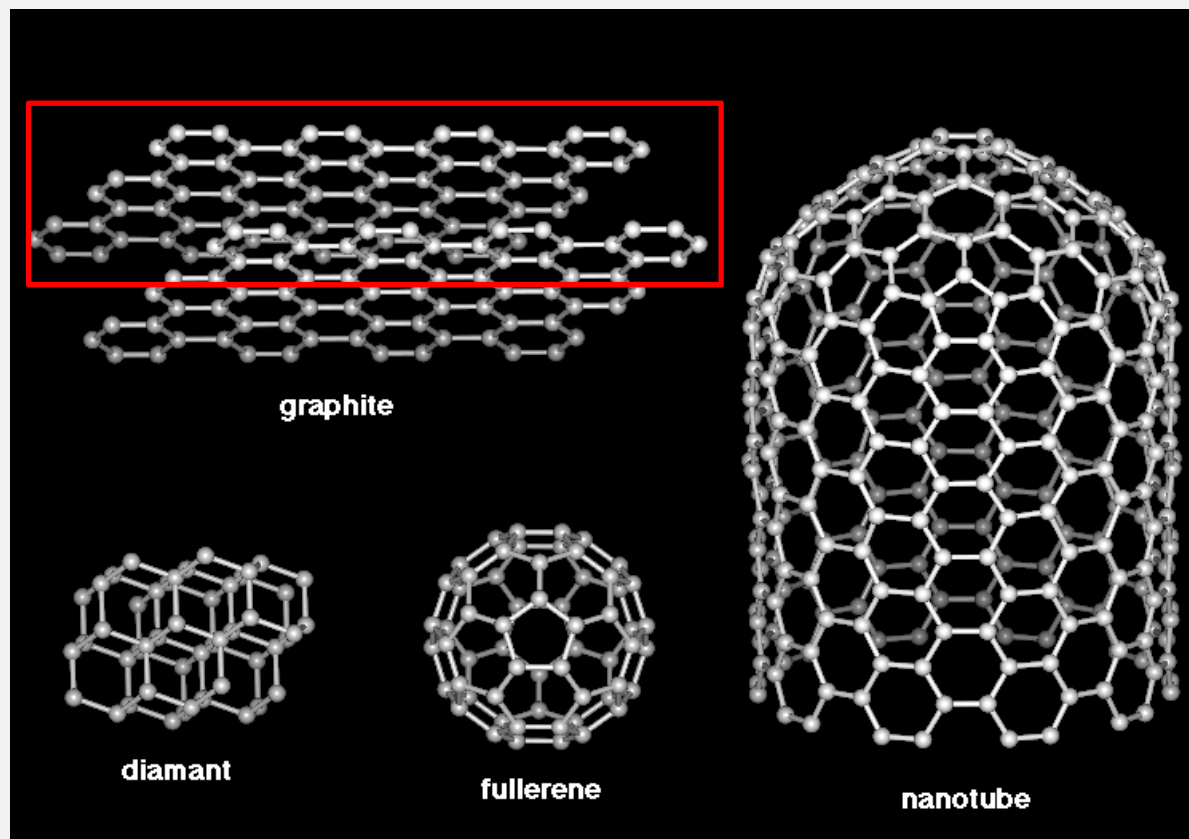
Applications des Nanotubes comme Matériaux



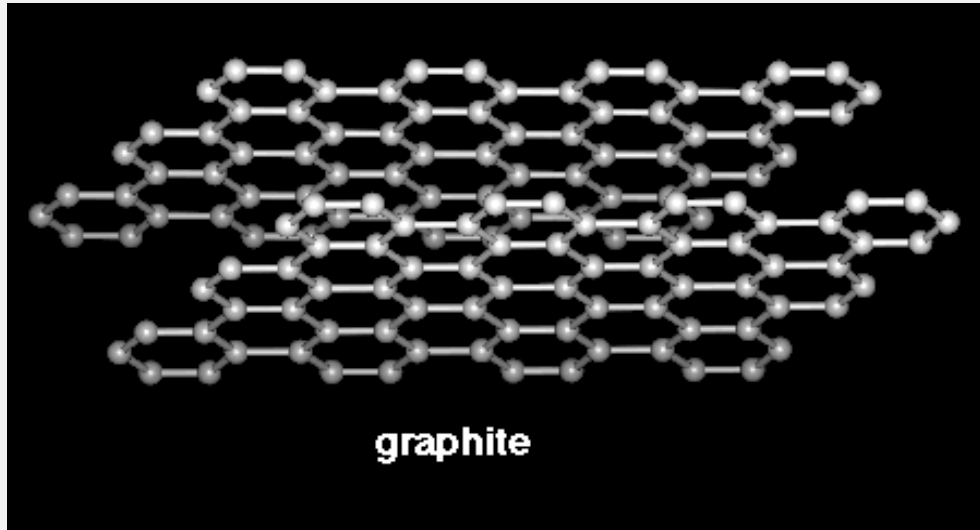
Sensors = capteurs
Capacitors = condensateurs
Actuators = actionneurs (moteurs électriques)



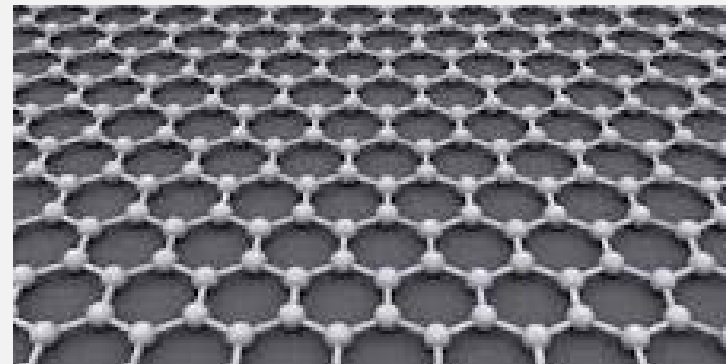
Formes moléculaires du carbone



2004 : Découverte du Graphène



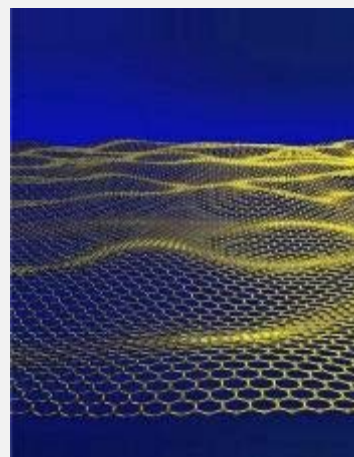
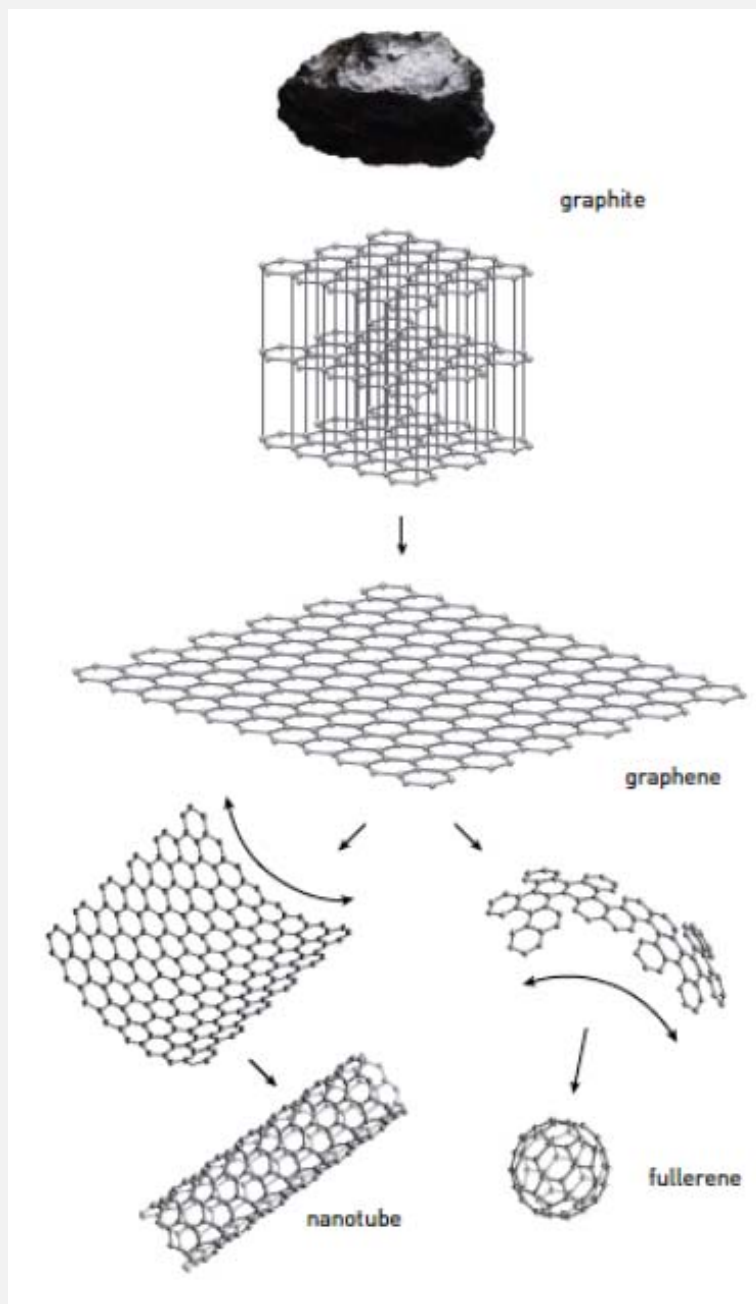
André Geim et Konstantin Novoselov
(Rus, 1958 -) (Rus, 1974 -)



www.youtube.com/watch?v=ZzBLsjkNqVc



<http://phys.org/news/2010-12-graphene-pencil-sticky-tape-videos.html>



3 millions de feuilles de graphène pour obtenir un morceau de graphite d'un millimètre d'épaisseur !!!

Production actuelle du graphène :

Au Georgia Tech (USA), un bloc de carbure de silicium est enfourné deux heures à 1400°C , le temps d'évaporer le silicium et de ne laisser en surface qu'un plan de carbone.

Structure du Graphène

Image du graphène obtenu par la technique du rouleau de scotch montrant une superposition plus ou moins importante de plans :

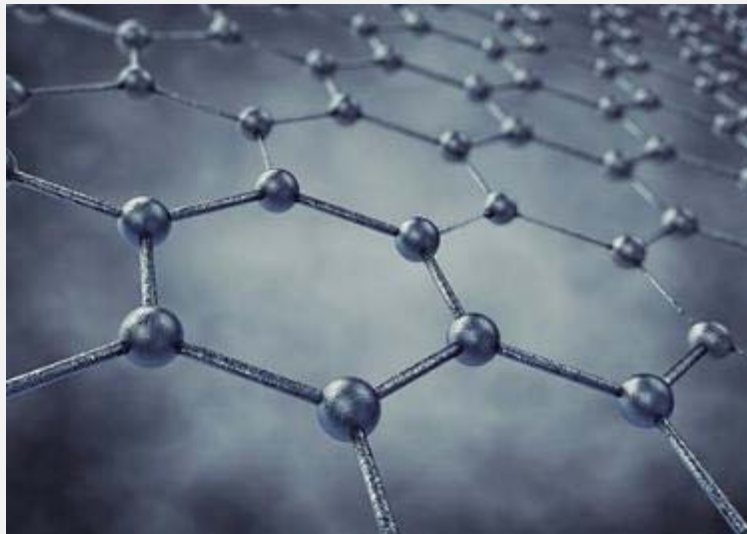
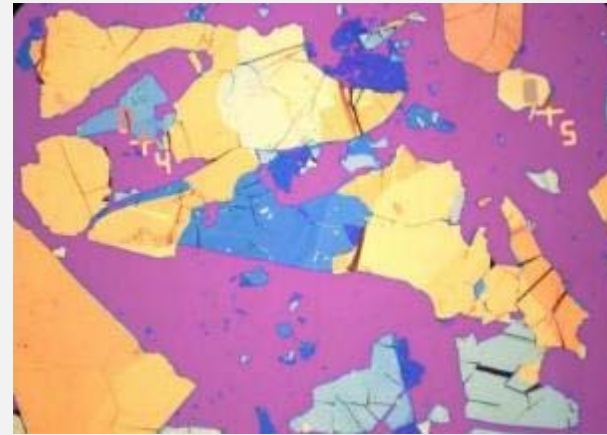
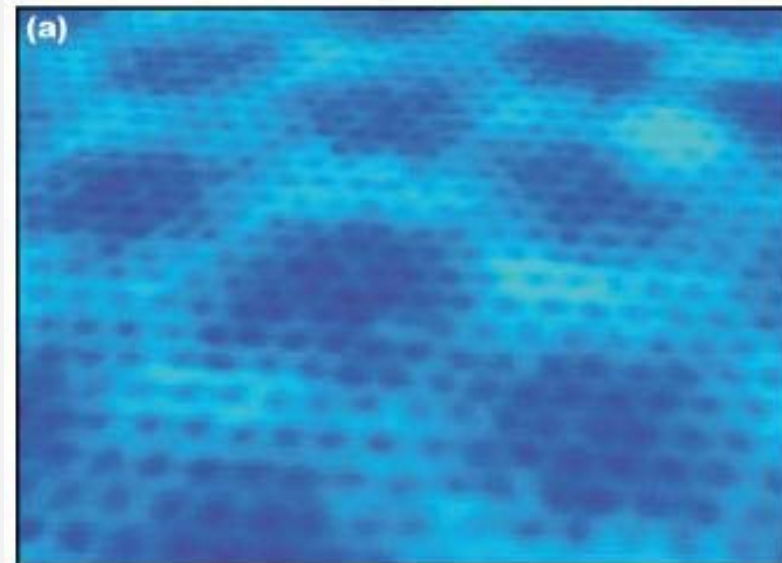
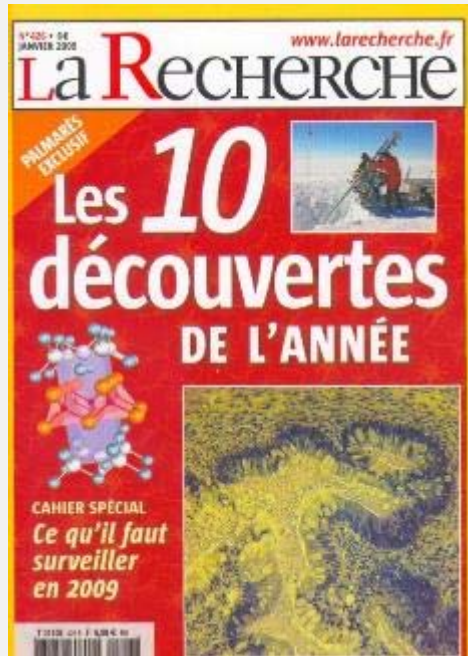


Image du graphène obtenu par la technique de vaporisation du carbure de silicium montrant la formation d'un seul plan :



Découverte du Graphène



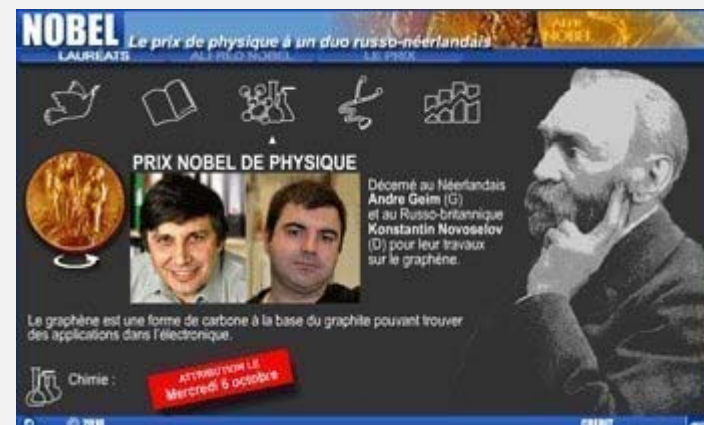
PALMARÈS 2008

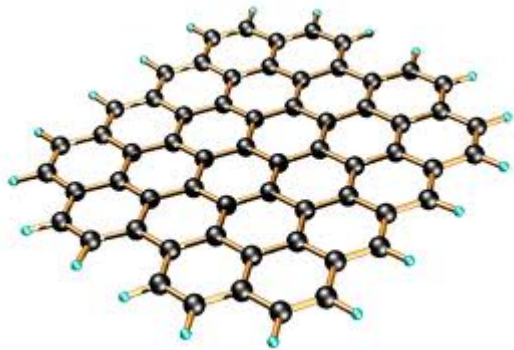
Le graphène, matériau de l'année

L'électronique fondée sur des transistors en silicium atteindra bientôt ses limites de miniaturisation. Pour remplacer le silicium, le meilleur candidat est un matériau que l'on trouve... dans les mines de crayon !

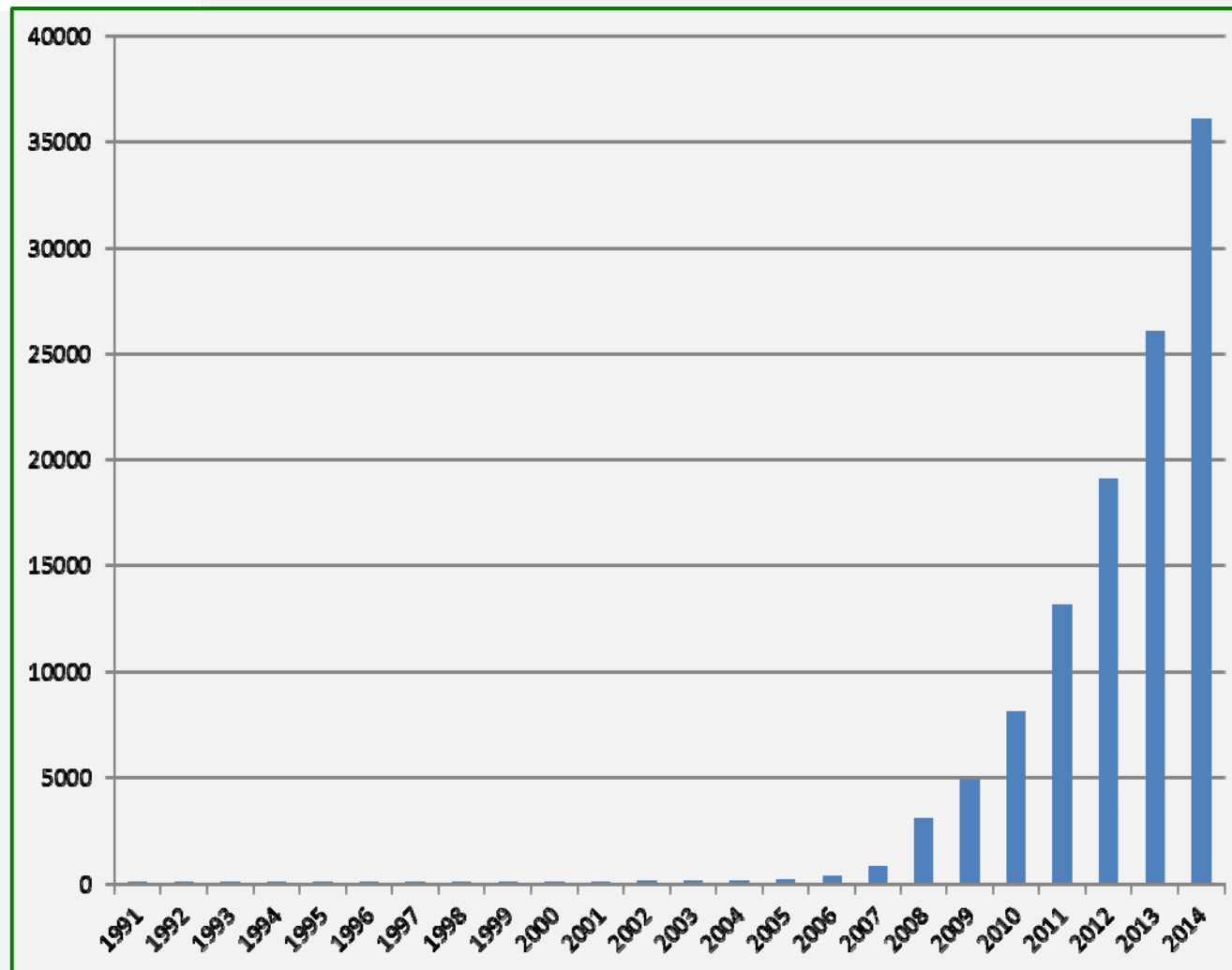


Geim et Novoselov :
Prix Nobel Physique 2010





Nombre de publications internationales sur le Graphène

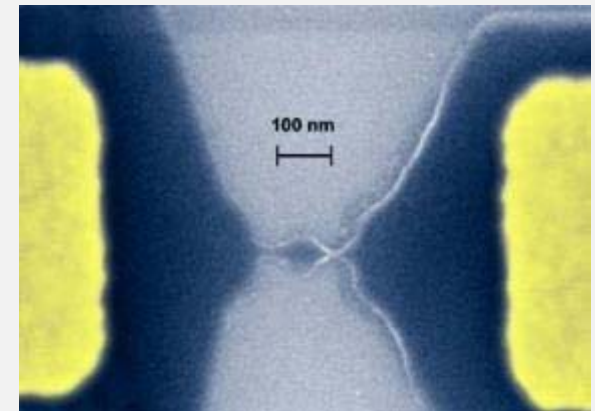


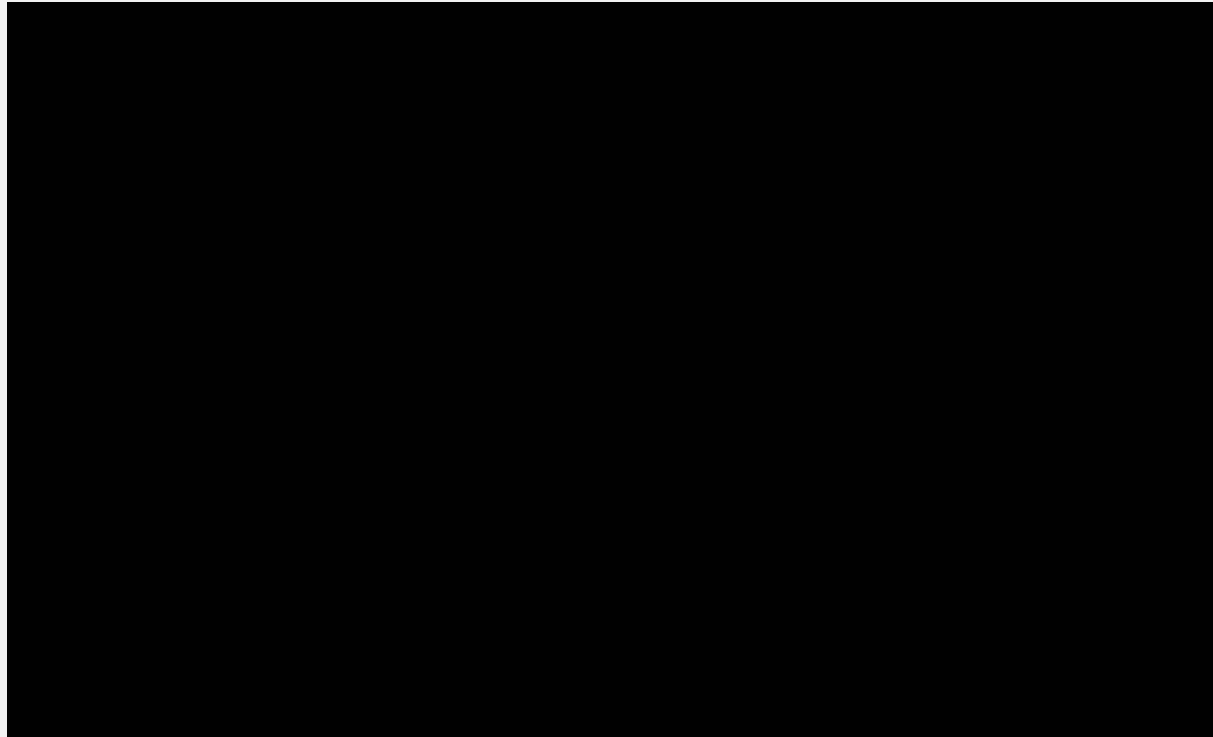
Propriétés du Graphène

- Plus résistant et plus rigide que le diamant
- Peut être étiré jusqu'à 125% de sa longueur initiale tout comme le caoutchouc.
- Son ratio surface/poids est le plus grand connu.

2008 : Novoselov crée un transistor de graphène mesurant 1 nm

- Une largeur de 10 atomes et une épaisseur d'un seul atome,
- Plus petit que le plus petit transistor au silicium possible





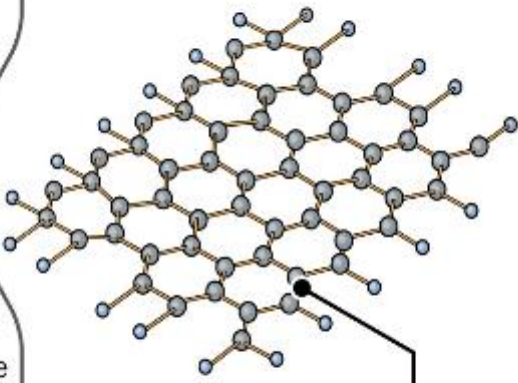
<https://www.youtube.com/watch?v=RTp8kEuZ1eY>

Applications du Graphène

Le graphène, matériau du futur

Présent à l'état naturel dans le graphite des mines de crayon

Qu'est-ce que c'est ?
Cristal de carbone en 2 dimensions, de l'épaisseur d'un atome (matériau le plus fin existant à ce jour)



Structure hexagonale semblable aux alvéoles d'un nid d'abeilles


+ Avantages

- **conductivité thermique** exceptionnelle
- **vitesse des électrons** à sa surface : 1 000 km par seconde (30 fois plus vite que dans le silicium)
- **200 fois plus résistant** que l'acier
- Pratiquement transparent

- Inconvénient

- **Prix** : 600 milliards d'euros par m²

Applications futures :
Transistors ultra-rapides, écrans tactiles transparents, panneaux lumineux, capteurs solaires...



Jean-Noël Fuchs, physicien :

« On lit parfois que la production d'un mètre carré de graphène reviendrait à 600 milliards d'euros. Il s'agit d'un calcul qui avait été fait il y a quelques années en tenant compte du fait qu'un très petit nombre de groupes étaient capables d'en produire, en très petite quantité, de l'ordre du millimètre carré. En réalité, le matériau de base n'est rien d'autre que du carbone, ce qui ne coûte pas très cher ! ».

Applications du Graphène

Graphite: le nouvel or noir

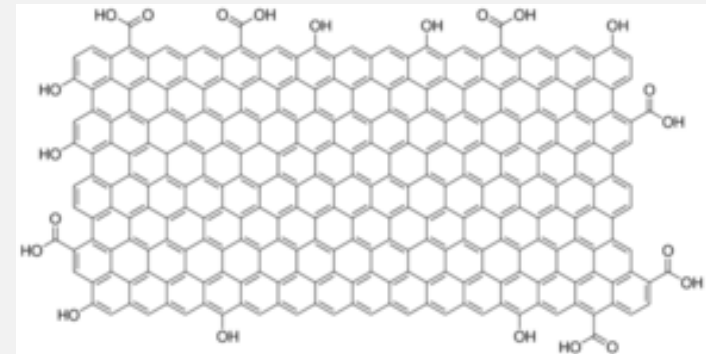
Publié le 03 octobre 2012 à 06h40 | Mis à jour le 03 octobre 2012



Photo Ivanoh Demers, La Presse

[Agrandir](#) 

«Le graphène allie tellement de qualités que c'est difficile de déterminer laquelle de ses propriétés sera la plus porteuse», explique Alexandre Champagne, professeur de physique à l'Université Concordia qui étudie les propriétés mécaniques et électriques du graphène et des nanotubes de carbone.



Graphene oxide :
250 mg = 200 €

<http://affaires.lapresse.ca/economie/energie-et-ressources/201210/03/01-4579755-graphite-le-nouvel-or-noir.php>

Graphene producer's shares jump by 40% in market debut

Shareholders pile in to buy a slice of Applied Graphene Materials, which has found a way to mass produce graphene

Juliette Garside

Follow @JulietteGarside Follow @guardian

The Guardian, Wednesday 20 November 2013 21.56 GMT



Graphene is already used in tennis rackets, with future applications including aircraft bodies and membranes for DNA sequencing. Photograph: Shaun Botterill/Getty Images for HEAD

A British firm which has found a way to produce industrial quantities of graphene, the wonder material expected to revolutionise the fields of medicine and manufacturing, saw its share price rise 40% during its stock market debut on Wednesday.

Shareholders piled in to buy a slice of Applied Graphene Materials (AGM), which is based in Cleveland and was spun out of Durham University, in a float that was more than two times oversubscribed.

Graphene is difficult to make in large quantities, but AGM, which raised £11m by selling a 42% stake, has found a way to mass produce the material in powder and is working with companies including Dyson and Procter & Gamble to develop commercial uses for the material.

"This funding will allow us to begin the next phase of development and to strengthen relationships with our partners," said chief executive John Mabbitt. "Applied Graphene Materials is now well positioned to meet the growing global appetite for graphene as a wonder material of the 21st century."

The float on London's Aim market for smaller companies saw [shares](#) pop from the initial placing price of 155p to 216p by the close of the first day's [trading](#), valuing the company at £36m. AGM is forecast to become profitable in 2017.

Founder and technical director Karl Coleman, professor of inorganic [chemistry](#) at Durham University, retains a 10% stake, having reduced his holding from 24% before the float. Early backer IP Group, which invests in patent-based businesses, has reinvested and retains a 20% stake.

AGM will use the capital raised on Aim to expand the capacity of its Teesside production facility from one tonne a year to eight over the next 18 months. The company's 10-strong workforce will also increase, with engineers and scientists recruited to develop commercial applications for its products.

Most graphene production relies on natural supplies of graphite, which has to be mined, but AGM has found a way to produce it using carbon atoms sourced from ethanol. Its product can then added to resins, plastics, oils and lubricants.

Dyson wants to use graphene in the plastic casing for its vacuum cleaners, because of its strength, and because its ability to conduct electricity reduces static, which in turn helps the machine suck in more dust.

Added to paints, graphene could help protect the hulls of boats from rust and, as a dry lubricant, reduce drag as the ship moves through water.

While the UK pioneered the discovery of graphene, Asian companies have made the greatest efforts to commercialise it, with electronics giant Samsung leading the way.

WELCOME TO THE GRAPHENE AGE



George Osborne on a visit to the Manchester University lab of Professors Geim and Novoselov

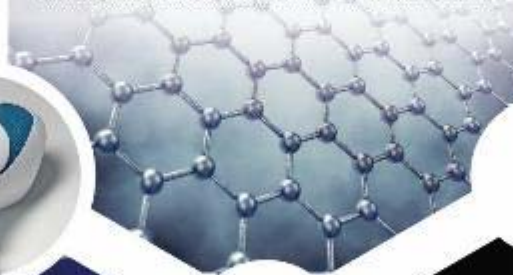
SOLAR PANELS

MIT professors have shown how graphene could be used to make the electrodes in organic solar cells cheaper, lighter and more flexible than in current systems



A CLOSER LOOK AT GRAPHENE

Graphene is a one-atom-thick form, or allotrope, of carbon – other allotropes include diamond and graphite. It is often described as an atomic-scale chicken wire constructed of carbon atoms and their bonds. When graphene sheets are stacked, three million sheets would be needed to create a 1mm thickness. It's been claimed that it is the strongest material known to man, that a clingfilm-thick layer could support an elephant. Despite its strength it can be stretched by 20% without being damaged. It is also an excellent conductor of electricity and the best conductor of heat that has been discovered



AIR TRAVEL

Using graphene would enable aeroplane manufacturers to develop extremely strong yet light components – bringing down weight and therefore reducing fuel costs



MOBILE PHONES

Nokia is exploring the potential uses of graphene in mobile devices. Aside from smaller, more flexible phones, it may allow built-in solar power and transparent electronics



FLEXIBLE SCREENS

Researchers in South Korea have produced a continuous layer of graphene 63cm wide. This has opened up possibilities in electronics. "You could theoretically roll up your iPhone and stick it behind your ear like a pencil," claims one scientist



PROSTHETICS

Aside from allowing for the construction of stronger, more flexible and lighter limbs, its conductivity opens up new possibilities for its use in the electrodes used to turn brain signals into movement

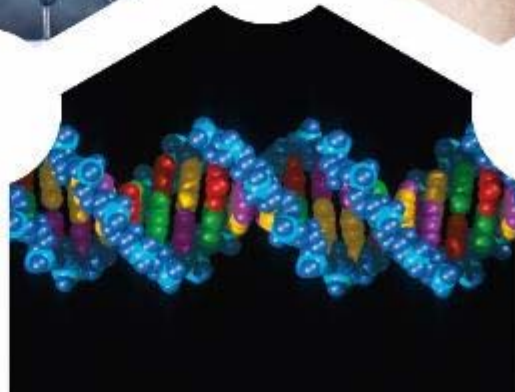
COMPUTER CHIPS

Geim and Novoselov have been working on demonstrating how graphene could replace silicon as the key material in electronic circuits. IBM is one of many electronics firms experimenting with graphene conductors



DNA SEQUENCING

Researchers at British firm Oxford Nanopore, building on discoveries made at Harvard, claim that using graphene could reduce the cost and speed up the process of DNA sequencing



GRAPHIC: PETER GUEST

Applications du Graphène

Bientôt en vente, l'ampoule à graphène



Par Joël Ignasse
[Voir tous ses articles](#)

Publié le 31-03-2015 à 09h33
Mis à jour à 09h34

A+ A-

C'est une des premières applications grand public de ce matériau annoncé comme révolutionnaire lors de sa découverte.



L'ampoule à graphène sera disponible à la vente dans quelques mois. UOM

L'ampoule à graphène consommerait environ **10% d'électricité en moins qu'une LED** et a une **durée de vie d'environ 25 ans**.

Des performances rendues possibles par la **capacité du graphène à conduire l'électricité et à dissiper la chaleur plus efficacement**.

Les premières ampoules devraient être mises en vente d'ici quelques mois pour un prix avoisinant **20 euros**.



BYE BYE LES AMPOULES LEDS, BONJOUR LA RÉVOLUTIONNAIRE AMPOULE À GRAPHÈNE !

De William - Posté le 31 mars 2015 à 16h19 dans Science

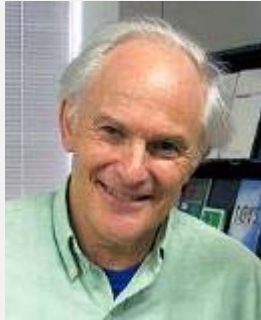


<https://www.youtube.com/watch?v=0ell4jGDHrw>

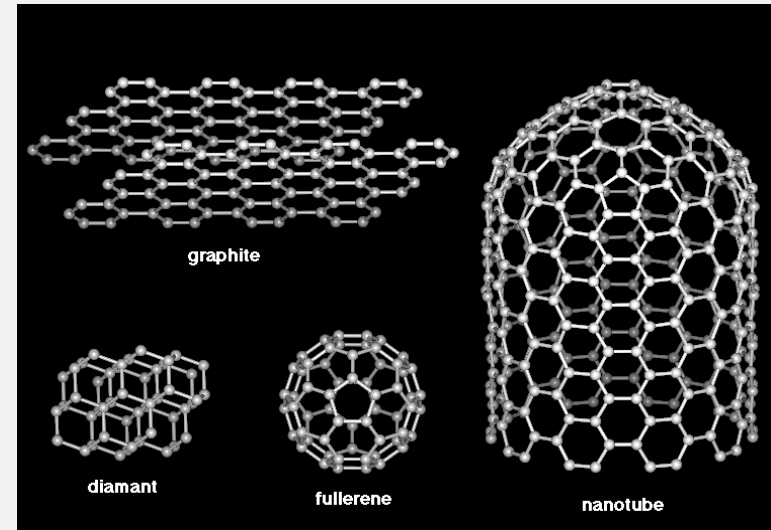


<https://www.youtube.com/watch?v=-YbS-YyvCl4>

Conclusion



Harold Kroto



« Aujourd'hui c'est la Révolution du Carbone mais... sans recherche fondamentale, il n'y a pas de recherche appliquée !!! »

https://www.youtube.com/watch?v=APu9fs_7NHc



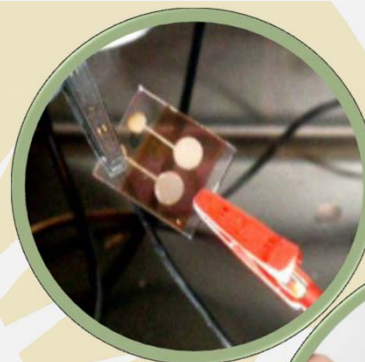
MASTER de CHIMIE

Matériaux Moléculaires pour L'électronique et la photonique organiques

appliqués à :

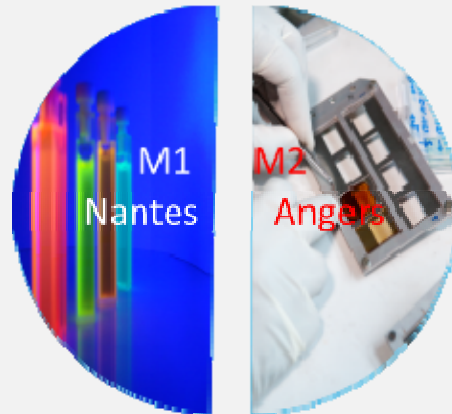
- *L'énergie (Photovoltaïque 3^{ème} génération, combustibles solaires, OLED)*
- *La santé (Capteurs et sondes moléculaires pour la santé et l'environnement)*
- *Le stockage de l'information (Nano systèmes structurés et imagerie)*

- Une forte ouverture vers l'international
- 10 mois de stage minimum



Une formation transversale

De la molécule au matériau :



*Chimie
organique*

*Chimie
analytique*

*Fabrication de
composants*

