

Les différentes facettes du diamant

Conférence donnée dans le cadre de la cérémonie d'accueil
des nouveaux émérites de l'Université de Lorraine
le jeudi 28 novembre 2019



Elisabeth BAUER-GROSSE
Professeur émérite UL



Les différentes facettes du diamant

Plan :

- Introduction
- Le diamant naturel
- La synthèse du diamant
- Le diamant de synthèse
- Conclusion

Diamant : son origine chimique

Tableau périodique des éléments

IA																	VIIIA						
H 1 1,00794 1 ⁺ Hydrogène																	He 2 4,002602 - Hélium						
IIA	III A	IV A	V A	VI A	VII A																		
Li 3 6,941 1,0 1 ⁺ Lithium	Be 4 9,012182 1,5 2 ⁺ Béryllium	B 5 10,811 2,0 3 ⁺ Bore	C 6 12,011 2,5 4 ⁺ Carbone	N 7 14,00674 3,0 3 ⁺ -3 ⁻ Azote	O 8 15,9994 3,5 2 ⁻ Oxygène	F 9 18,9984032 4,0 1 ⁻ Fluor	Ne 10 20,1797 - Néon																
Na 11 22,989768 0,9 1 ⁺ Sodium	Mg 12 24,3050 1,2 2 ⁺ Magnésium																	Al 13 26,981539 1,5 3 ⁺ Aluminium	Si 14 28,0855 1,8 4 ⁺ Silicium	P 15 30,973762 2,1 5 ⁺ Phosphore	S 16 32,066 1,8 4 ⁺ Soufre	Cl 17 35,4527 3,0 1 ⁻ Chlore	Ar 18 39,948 - Argon
IIIB		IVB	VB	VIB	VIIB	VIII		IB	IIB														
K 19 39,0983 0,8 1 ⁺ Potassium	Ca 20 40,078 1,0 2 ⁺ Calcium	Sc 21 44,955910 1,3 3 ⁺ Scandium	Ti 22 47,88 1,5 4 ⁺ Titane	V 23 50,9415 1,6 5 ⁺ Vanadium	Cr 24 51,9961 1,8 3 ⁺ Chrome	Mn 25 54,93805 1,5 2 ⁺ Manganèse	Fe 26 55,847 1,8 3 ⁺ Fer	Co 27 58,9332 1,5 2 ⁺ Cobalt	Ni 28 58,6934 1,8 2 ⁺ Nickel	Cu 29 63,546 1,9 2 ⁺ Cuivre	Zn 30 65,39 1,8 2 ⁺ Zinc	Ga 31 69,723 1,6 3 ⁺ Gallium	Ge 32 72,61 1,6 4 ⁺ Germanium	As 33 74,92159 2,0 3 ⁺ -3 ⁻ Arsenic	Se 34 78,96 2,4 4 ⁺ Sélénium	Br 35 79,904 2,8 1 ⁻ Brome	Kr 36 83,80 - Krypton						
Rb 37 85,4678 0,8 1 ⁺ Rubidium	Sr 38 87,62 1,0 2 ⁺ Strontium	Y 39 88,90585 1,3 3 ⁺ Yttrium	Zr 40 91,224 1,4 4 ⁺ Zirconium	Nb 41 92,90638 1,6 5 ⁺ Niobium	Mo 42 95,94 1,8 6 ⁺ Molybdène	Tc 43 98,9063 1,9 7 ⁺ Technétium	Ru 44 101,57 2,2 3 ⁺ -4 ⁺ Ruthénium	Rh 45 102,9055 2,2 3 ⁺ Rhodium	Pd 46 106,42 2,2 2 ⁺ Palladium	Ag 47 107,8682 1,9 1 ⁺ Argent	Cd 48 112,411 1,7 2 ⁺ Cadmium	In 49 114,82 1,7 3 ⁺ Indium	Sn 50 118,71 1,8 4 ⁺ Étain	Sb 51 121,757 1,9 3 ⁺ -3 ⁻ Antimoine	Te 52 127,60 2,1 4 ⁺ Tellure	I 53 126,90447 2,5 1 ⁻ Iode	Xe 54 131,29 - Xénon						
Cs 55 132,90543 0,7 1 ⁺ Caesium	Ba 56 137,327 1,0 2 ⁺ Baryum	La 57 138,9055 1,3 3 ⁺ Lanthane	Hf 72 178,49 1,3 4 ⁺ Hafnium	Ta 73 180,9479 1,5 5 ⁺ Tantale	W 74 186,207 1,7 6 ⁺ Tungstène	Re 75 186,207 1,9 7 ⁺ Rhénium	Os 76 192,22 2,2 4 ⁺ Osmium	Ir 77 192,22 2,2 4 ⁺ Iridium	Pt 78 195,08 2,2 4 ⁺ Platine	Au 79 196,96654 2,0 3 ⁺ Or	Hg 80 200,59 2,4 3 ⁺ Mercure	Tl 81 204,3833 1,8 1 ⁺ Thallium	Pb 82 207,2 1,8 2 ⁺ Plomb	Bi 83 208,98037 1,9 3 ⁺ Bismuth	Po 84 208,9824 2,0 2 ⁺ Polonium	At 85 208,9871 2,2 1 ⁻ Astate	Rn 86 222,0176 - Radon						
Fr 87 223,0197 0,7 1 ⁺ Francium	Ra 88 226,0254 0,9 2 ⁺ Radium	Ac 89 227,0278 1,1 3 ⁺ Actinium	Rf 104 261,1 - Rutherfordium	Db 105 262,11 - Dubium	Sg 106 263,12 - Seaborgium	Bh 107 262,12 - Bohrium	Hs 108 264 - Hassium	Mt 109 266,1078 - Meitnerium	Uun 110 269 - Ununium	Uuu 111 272 - Ununium	Uub 112 277 - Ununium												



A.L. de Lavoisier (1743-1794)



38

MÉMOIRES DE LAVOISIER.

6	Ce 58 140,115 1,1 3 ⁺ Cérium	Pr 59 140,90765 1,1 3 ⁺ Praséodyme	Nd 60 144,24 1,1 3 ⁺ Néodyme	Pm 61 144,9127 1,1 3 ⁺ Prométhium	Sm 62 150,36 1,2 3 ⁺ Samarium	Eu 63 151,965 1,2 3 ⁺ Europium	Gd 64 157,25 1,2 3 ⁺ Gadolinium	Tb 65 168,92534 1,2 3 ⁺ Terbium	Dy 66 162,50 1,2 3 ⁺ Dysprosium	Ho 67 164,93032 1,2 3 ⁺ Holmium	Er 68 167,26 1,2 3 ⁺ Erbium	Tm 69 168,93421 1,2 3 ⁺ Thulium	Yb 70 173,04 1,1 3 ⁺ Ytterbium	Lu 71 174,967 1,2 3 ⁺ Lutécium
7	Th 90 232,0381 1,3 4 ⁺ Thorium	Pa 91 231,03588 1,5 5 ⁺ Protactinium	U 92 238,0289 1,4 6 ⁺ Uranium	Np 93 237,042 1,3 5 ⁺ Neptunium	Pu 94 244,0642 1,3 4 ⁺ Plutonium	Am 95 243,0614 1,3 3 ⁺ Américium	Cm 96 247 1,3 3 ⁺ Curium	Bk 97 247,0703 1,3 3 ⁺ Berkélium	Cf 98 251,0796 1,3 3 ⁺ Californium	Es 99 252,03 1,3 - Einsteinium	Fm 100 257,0951 1,3 - Fermium	Md 101 258,1 1,3 - Mendélévium	No 102 259,1069 1,3 - Nobélium	Lr 103 260,1053 - Lawrencium

Les masses atomiques sont basées sur l'isotope 12 du carbone.

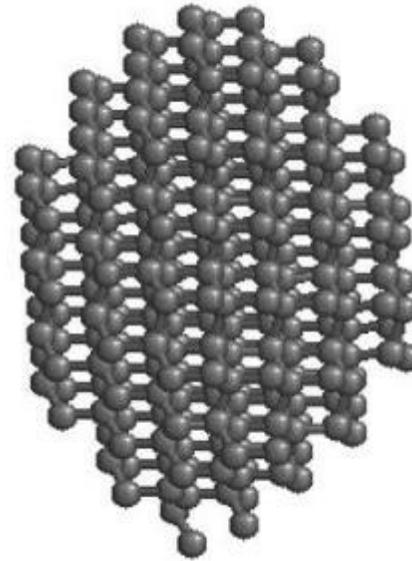
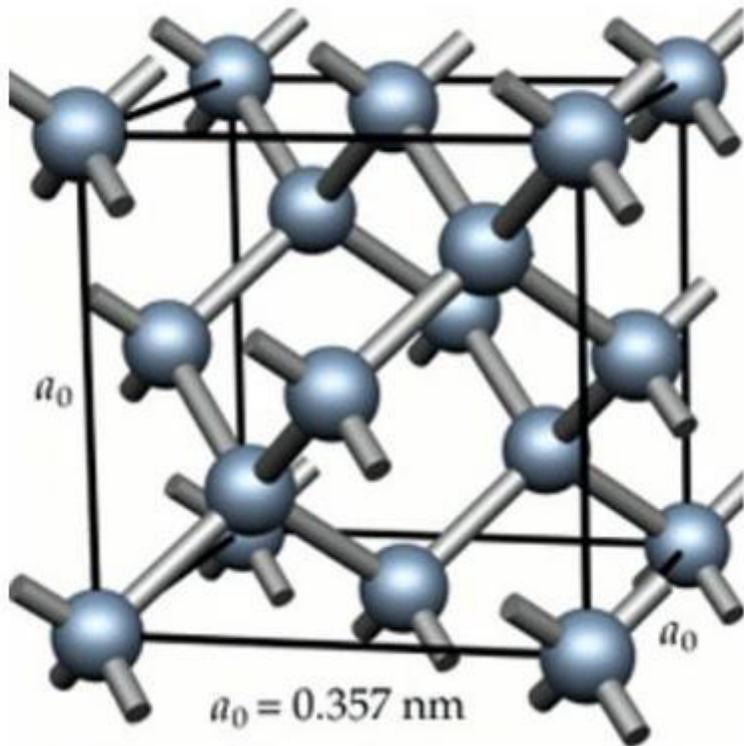
Le style du symbole chimique représente la phase aux conditions normales. En **gras**, élément en phase solide, en **gras italique** élément en phase liquide, en *italique* élément en phase gazeuse et en normal, élément synthétique en phase solide. En dessous de la masse atomique il y a, à gauche, l'indice d'électronégativité et, à droite, le nombre d'oxydation le plus courant.

SUR LA DESTRUCTION DU DIAMANT

PAR LE FEU.

CRAS (1772) par Louis Dieulafoy

Diamant : sa structure cristallographique conventionnelle



Modèle de la structure du diamant
Museum of the Royal Institution, Londres

Maille cubique à faces centrées contenant
8 atomes de carbone en liaisons covalentes

Le **nanomètre** vaut un milliardième de mètre
 $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-3} \mu\text{m}$.



W. H. Bragg, W. L. Bragg,
The Structure of diamond,
Proc. R. Soc. London
A **89**, 277–291 (1913).

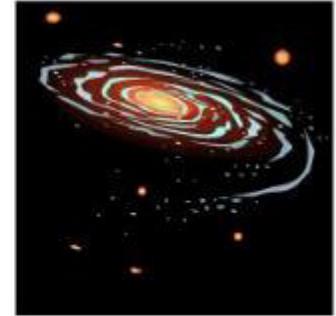
Confère des propriétés qui se déclinent le plus souvent au superlatif

Diamant : son âge....



Les plus vieux, au moins 2,5 milliards d'années

Diamants naturels

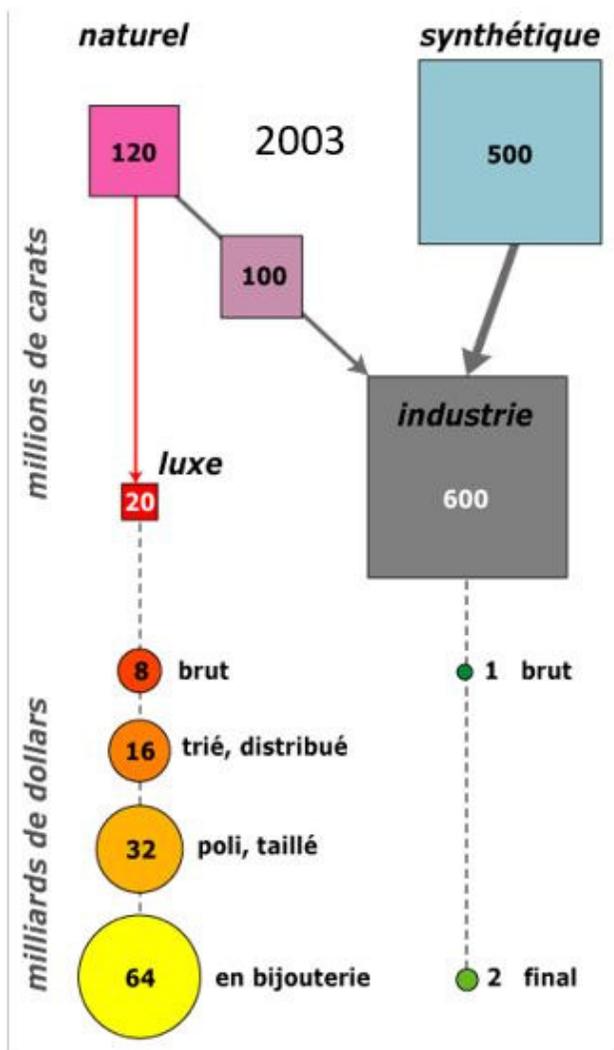


Les plus jeunes, au plus 65 ans

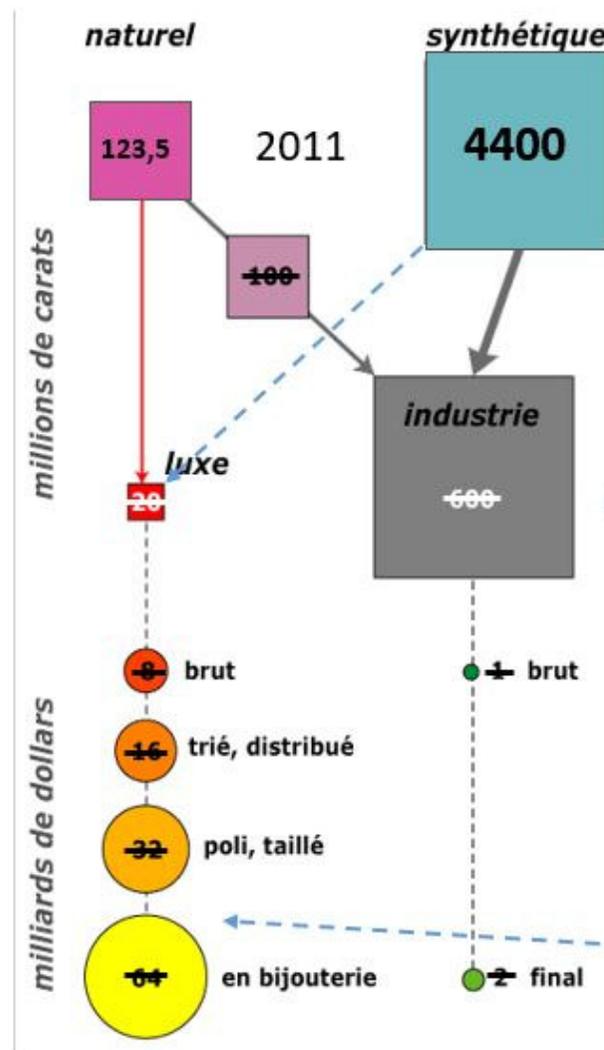
Diamants de synthèse



Diamant : sa filière



Filière diamant en 2003



Tendance actuelle (chiffres à remettre à jour): 1 à 2% de diamants de synthèse en bijouterie

1 carat = 0,2 g



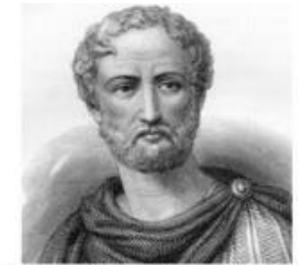
Premiers diamants de synthèse en industrie du luxe (0,14-0,32 carat) vers 2006



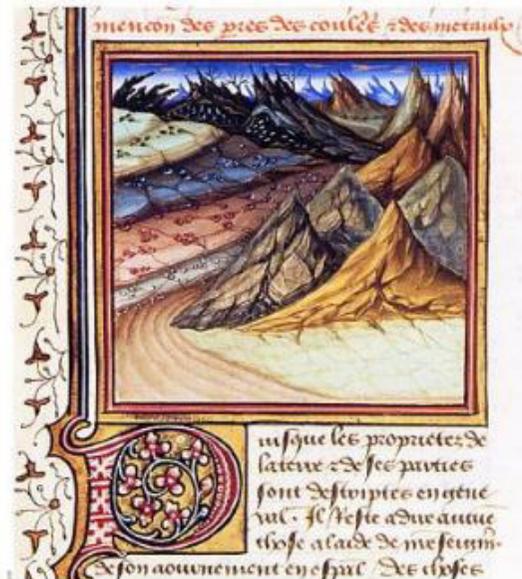
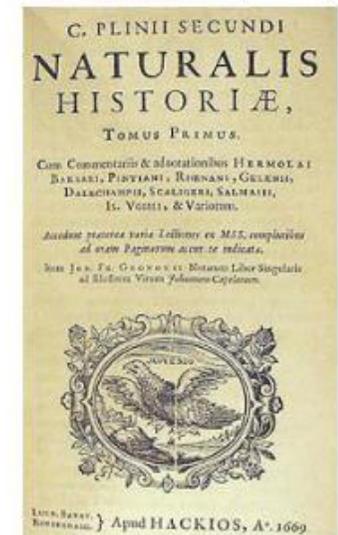
Diamant : les premières découvertes

- Moment de la découverte du diamant par l'homme: inconnu.
- IV^e siècle av. JC: caractéristiques d'une gemme et de son commerce concernant le diamant mentionnées pour la première fois avec certitude dans un manuscrit hindou.
- An 60 ap. JC : description du diamant par Pline l'Ancien dans l'encyclopédie *Naturalis Historia* avec:

- Une beauté déjà reconnue dans les ornements.
- Une dureté déjà mise en œuvre dans l'utilisation:
 - des poudres de diamant comme abrasifs
 - des outils pour graver et forer.
- Un constat émis: **'Seul le diamant peut entamer le diamant'**

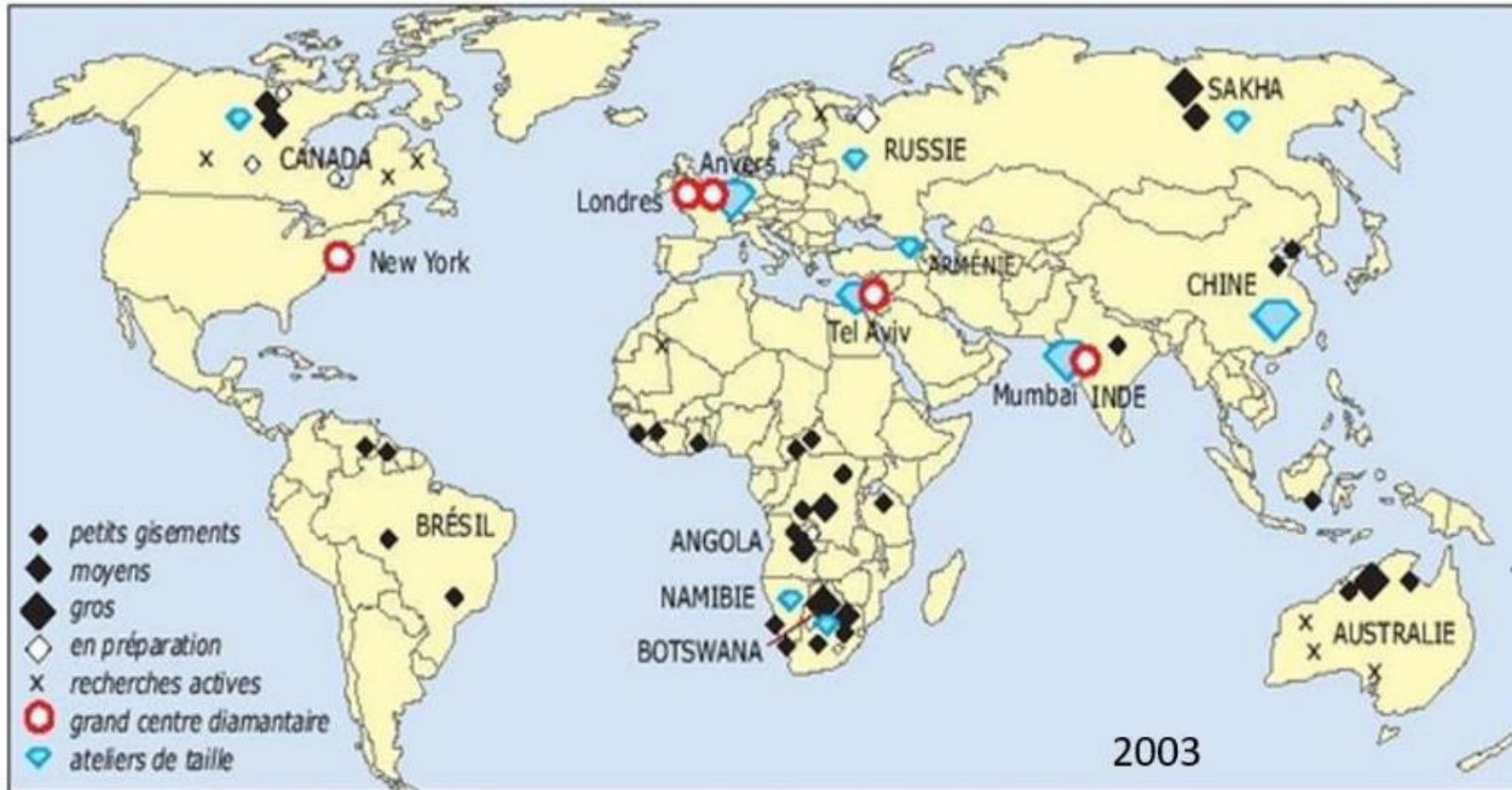


Pline l'Ancien (23-79)

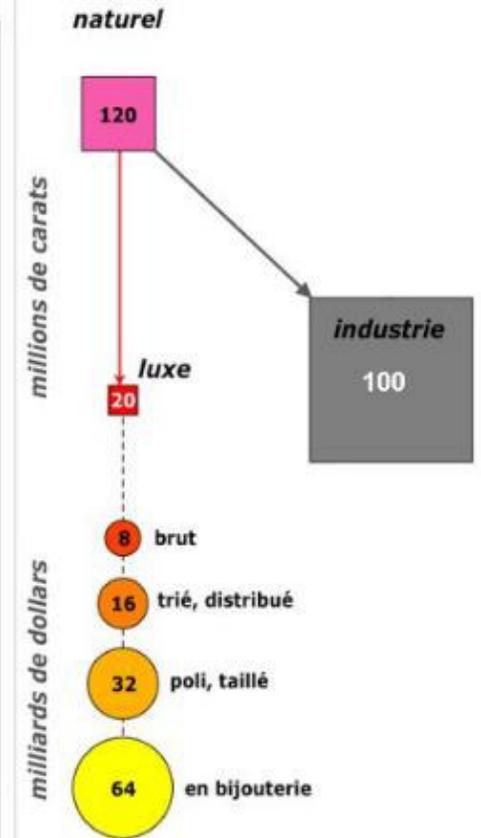


- 1240: peinture et enluminure extraites du livre des propriétés des choses de Barthélémy l'Anglais
- Traducteur Jean Corbechon (1370)
- BNF, Manuscrits occidentaux

Le diamant naturel dans le monde

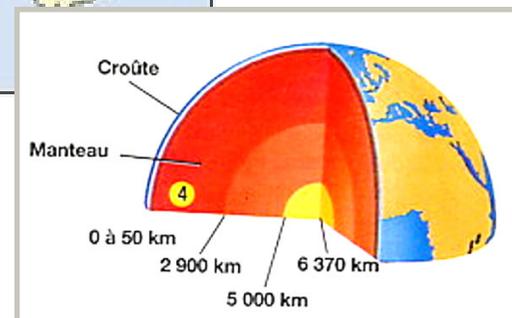
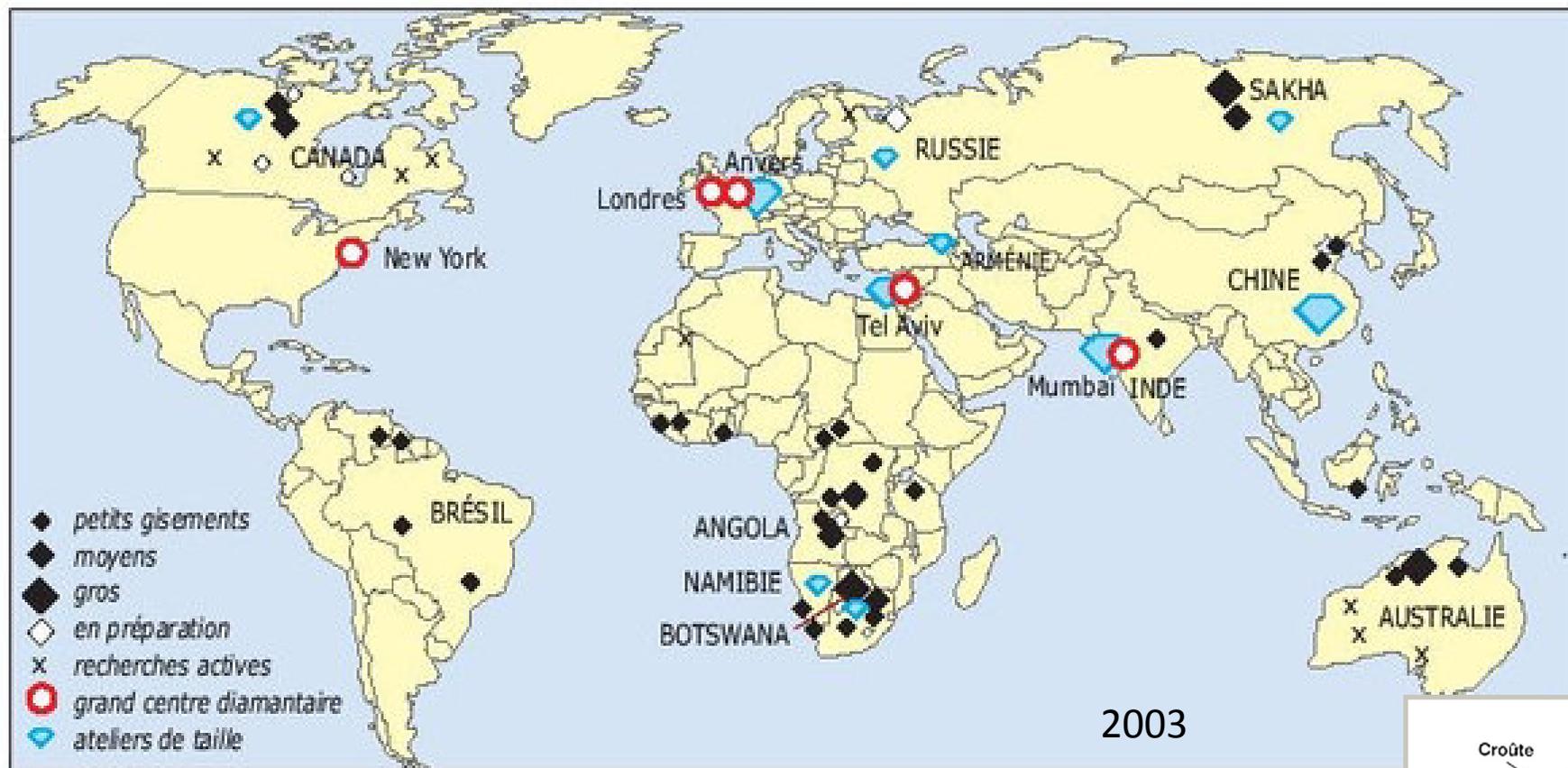


Filière diamant en 2003



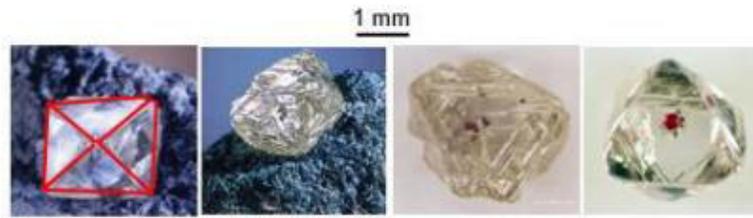
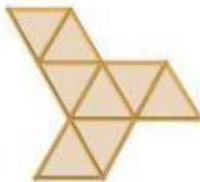
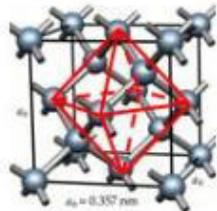
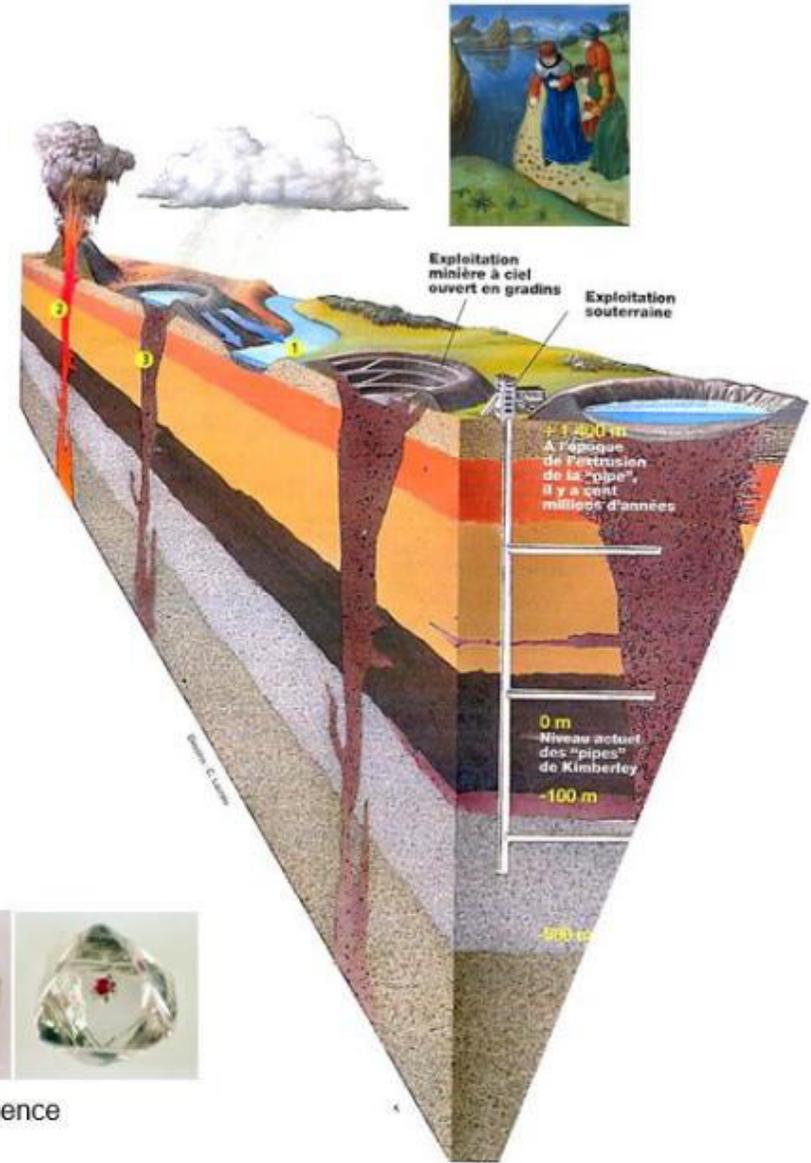
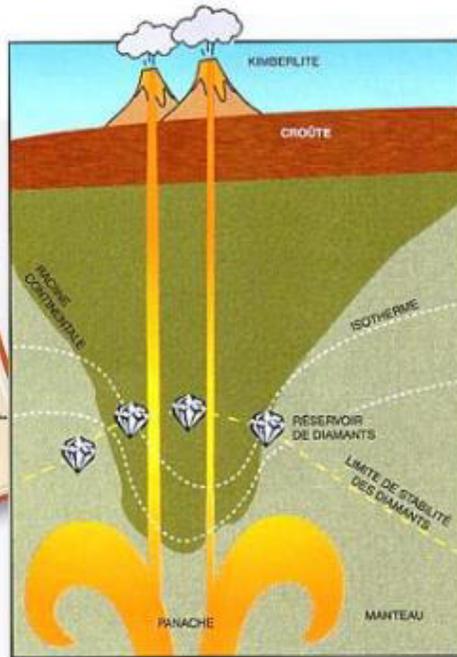
En moyenne, 1 carat de diamants est extrait de 100 tonnes de minerai.

En savoir un peu plus sur le diamant naturel brut



En savoir un peu plus sur le diamant naturel brut

Science & Vie, n°938, nov. 1995



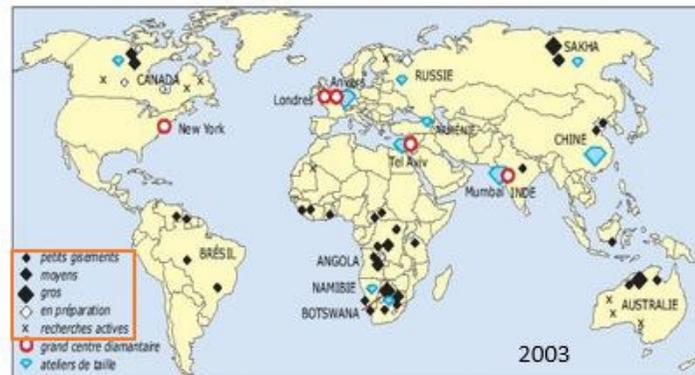
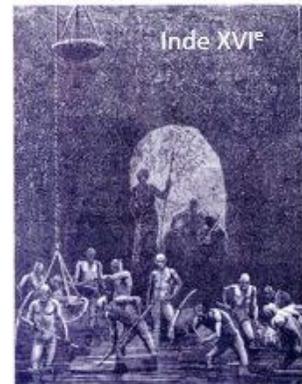
Luxe

Industrie

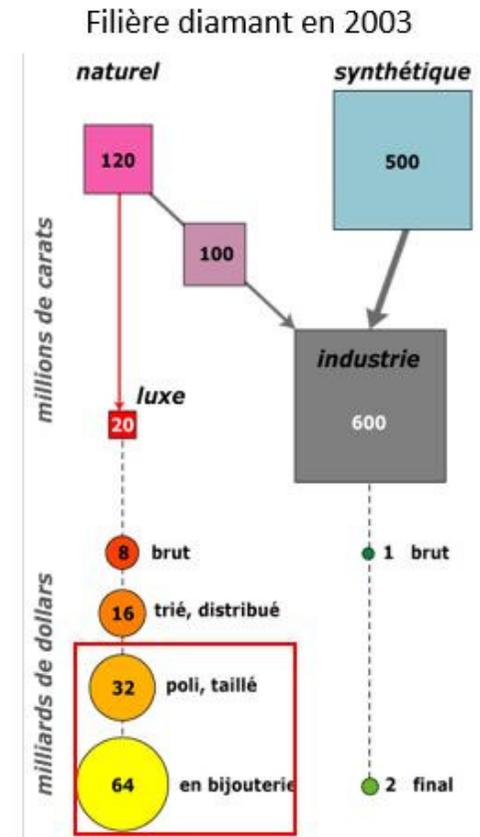
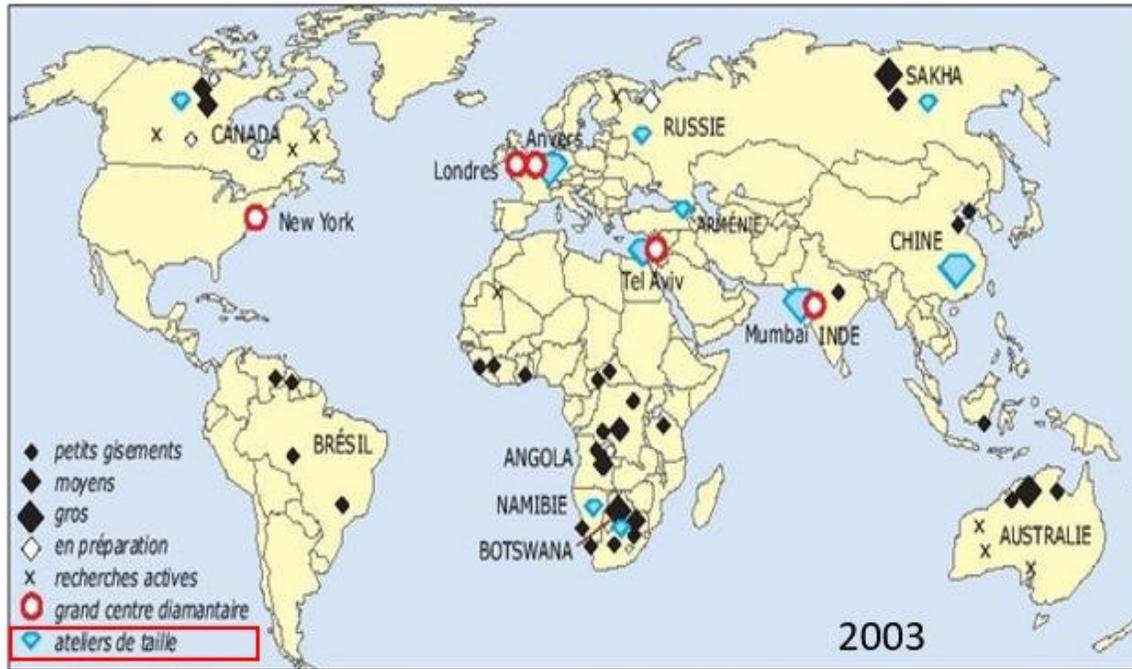
Science

Diamants bruts

En savoir un peu plus sur l'exploitation des gisements



Branche du luxe: en savoir un peu plus sur les ateliers de taille



Diamant naturel brut octaédrique, 2 carats

'Seul le diamant peut entamer le diamant'



Diamant naturel forme ronde brillant

Branche du luxe: en savoir un peu plus sur les ateliers de taille

Fin du XV^e siècle: Louis von Bergen invente la meule diamantée en fonte imprégnée d'un mélange d'huile d'olive et de poudre de diamant.



Dans l'esprit "Seul le diamant peut entamer le diamant"



1483

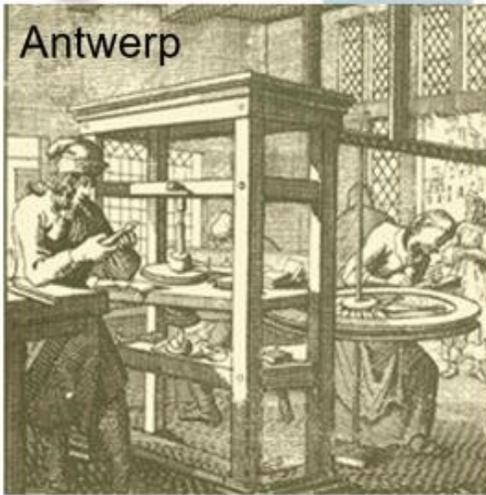


1748

1867

2017 Surat (India)

2018, une machine entièrement automatique



Antwerp



England



Paris

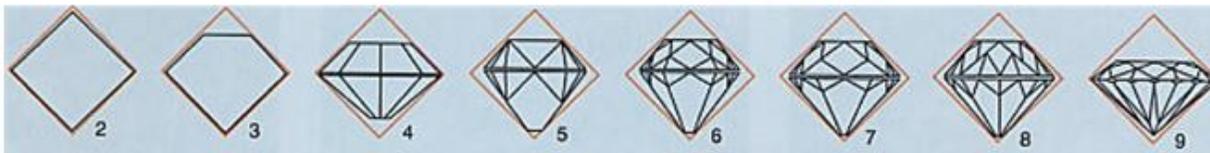


Antwerp

Exposition universelle

Une journée pour tailler un diamant de 1 carat

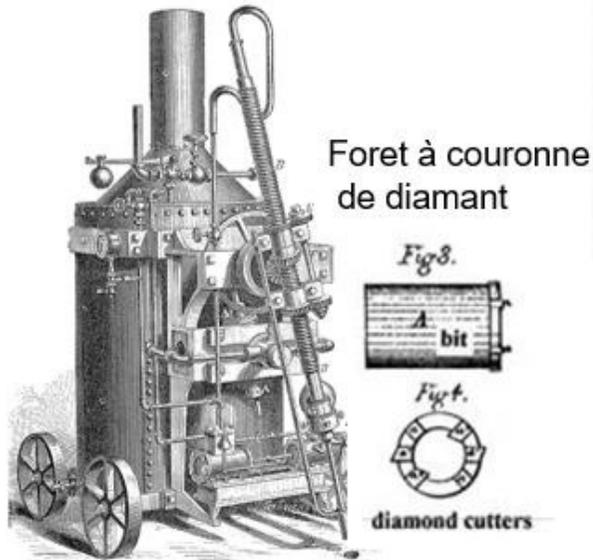
Première mondiale: une heure pour tailler un diamant de 1 ct avec une machine répondant aux exigences de l'industrie 4.0



Branche de l'industrie : diamant, matériau stratégique

Première utilisation dans les matériaux de polissage, puis à partir de 1870, énorme demande industrielle pour le façonnage de l'acier, le forage pour le pétrole et d'autres minéraux, l'industrie automobile, les transports souterrains (tunnels, métros), les gratte-ciels, la fabrication des avions, des armes, le tréfilage des fils de tungstène,

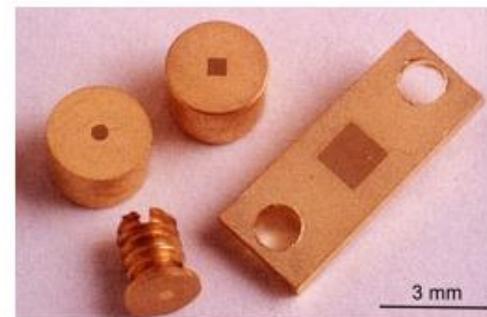
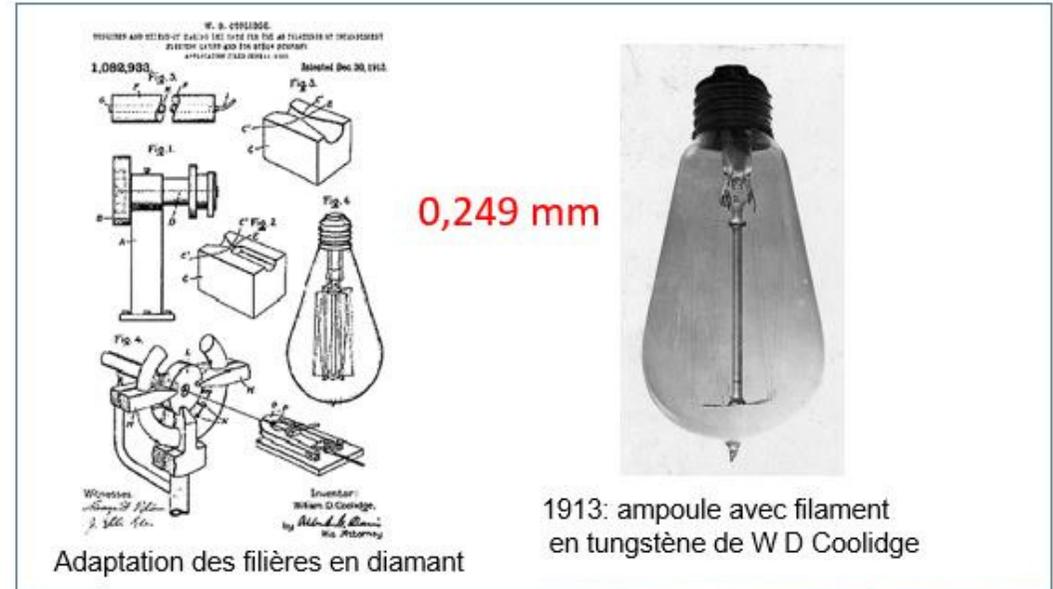
1863: machine perforatrice à diamant Inventée en par Georges-Auguste Leschot



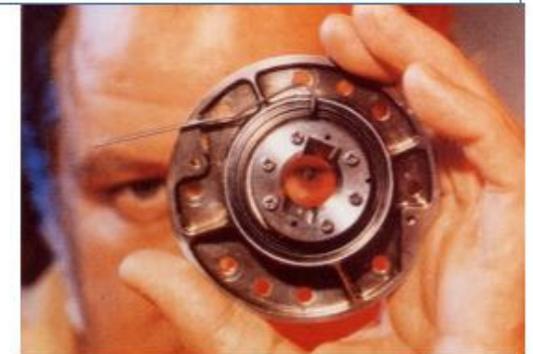
1800-1884

Rotation 250-300 tr/min

Fait marquant: 60 jours pour perforer 475 m au lieu de 2 ou 3 ans



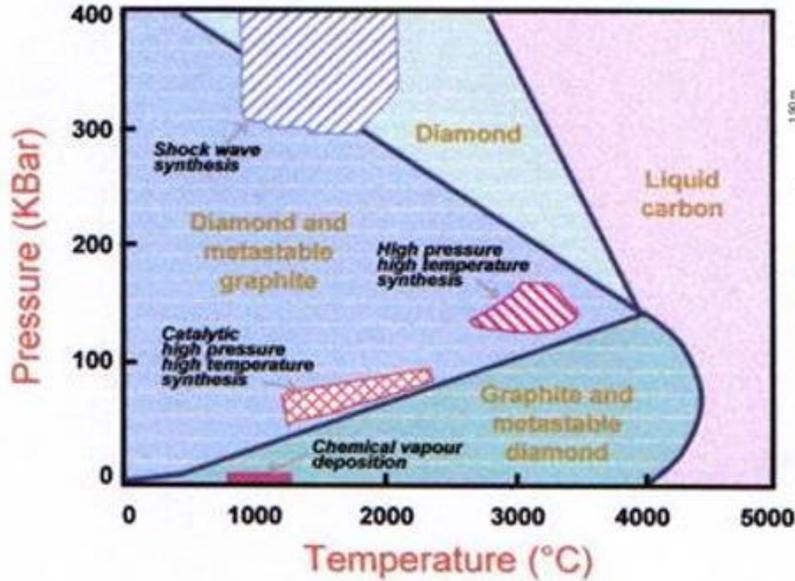
Dissipateurs de chaleur en diamant pour composants électroniques



1977: fenêtre en diamant naturel pour le vaisseau spatial Pioneer Venus (NASA)

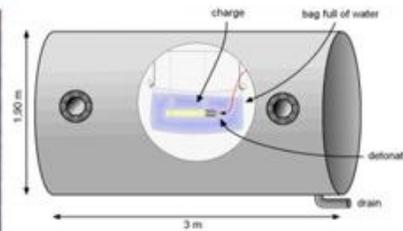
Le diamant : quelques moyens de synthèse

The phase diagram for diamond, graphite and liquid carbon (1980 *J. Geophys. Res.* **85** 6930)

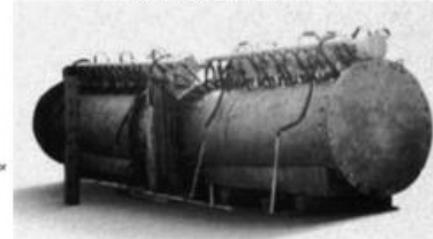


Shock wave diamond synthesis

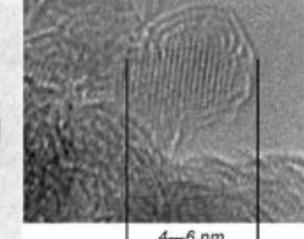
Schematic diagram



Industrial machine

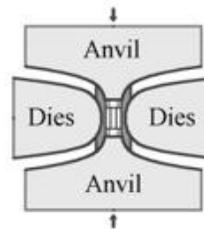


Manufactured diamond



DND: detonation nanodiamond

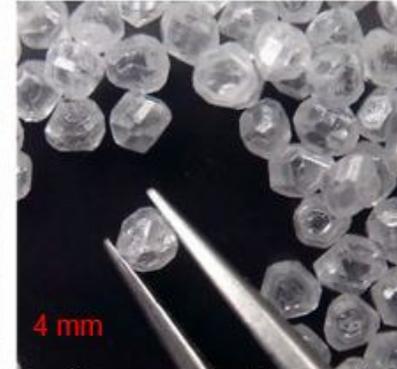
HPHT diamond synthesis



CVD diamond synthesis



MCD: microcristalline diamond



Gem-grade diamonds

Diamant de synthèse : vers un diamant sur mesure commercialisable

E. g.: CVD diamond synthesis

SINGLE CRYSTAL CVD DIAMOND GRADES

SINGLE CRYSTAL	Engineered replacement for natural type IIa diamond
OPTICAL GRADE	Low absorption and birefringence diamond
DETECTOR GRADE	Ultrahigh purity for quantum optics and electronics

POLYCRYSTALLINE CVD DIAMOND

OPTICAL GRADE	Engineered for far infrared laser optical applications
ELECTRONIC GRADE	Ultrahigh purity material for large area passive electronics
THERMAL GRADES	High thermal conductivity diamond heat spreading
MECHANICAL GRADES	High strength diamond for precision machining
ELECTRO-CHEMISTRY GRADES	Boron doped diamond for electrochemical applications

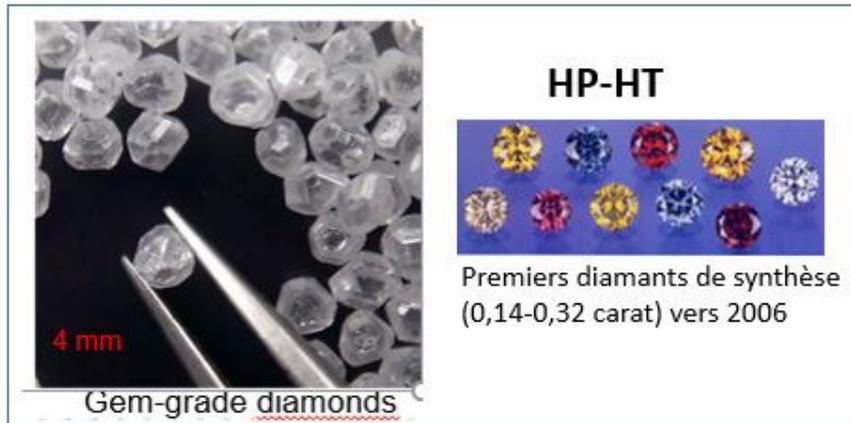
www.e6cvd.com

Type de diamant	Ia	Ib	IIa	IIb
Proportion en ‰	989 ‰		10 ‰	1 ‰
Principal élément de trace	Agrégats d'azotes	Azotes isolés	Néant	Bore
Couleurs possibles	Incolore, brun, Jaune, rose, Orange, vert, violet	Jaune, orange, brun	Incolore, brun, rose, vert	Bleu, gris
Absorption Infra-Rouge caractéristique	1282 cm ⁻¹ (IaA) 1175 cm ⁻¹ (IaB)	1344 cm ⁻¹ 1130 cm ⁻¹	Néant	2458 cm ⁻¹ , 2803 cm ⁻¹ , 4090 cm ⁻¹ .
Inclusions	Diverses	« nuages », « aiguilles »	Cristaux (rares)	Cristaux (rares)
Florescence sous rayons Ultra-Violets	Nulle, bleu, jaune, orange	Nulle à orangé	Nulle, bleu, orange	Nulle à bleuté (UVL) Nulle à bleuté ou jaunâtre (UVC)
Transparence UVC	Opaques	aux U.V.Courts	Transparents	aux U.V. courts
Caractéristiques facilement observables	Spectre d'absorption « Cape » (absorption majeure à 415 nm)	Forte absorption jusques 450nm	Tensions d'aspect « tatami » entre	« tatami » entre polaroïds croisés Phosphorescence bleue, parfois rouge.

Principales caractéristiques des quatre types de diamants

Diamant de synthèse : quelques applications

Actions dans le marché de la joaillerie avec des diamants de synthèse "éco-responsable"



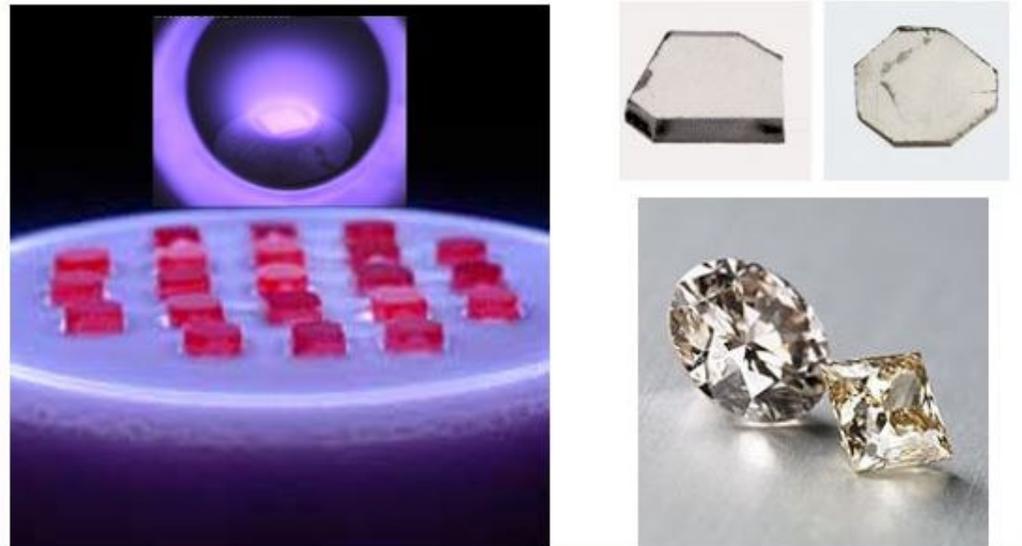
Stratégie du marché:

- prix plus bas
- atténuer les préoccupations concernant l'impact environnemental de l'exploitation minière
- atténuer les inquiétudes liées à l'achat potentiel de diamants "de conflit" ou "de sang"

Produits en quelques semaines



Dépôts chimiques de diamant en phase vapeur (CVD)

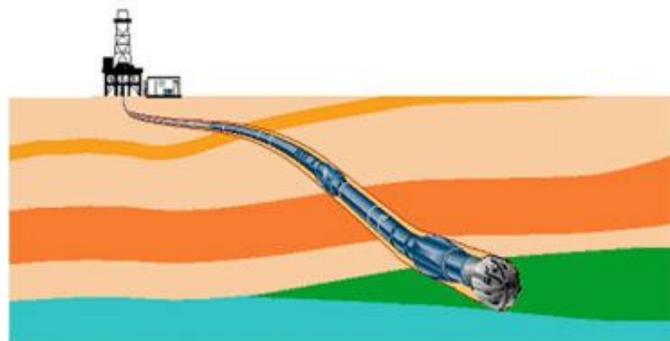


Quelques sociétés:

- USA:
 - CVD Apollo Diamonds, Boston, 2005 devenu SCIODIAMOND depuis 2011
 - Diamond Foundry depuis 2013, San Francisco
- France:
 - Diam Concept depuis mai 2016

Diamant de synthèse: quelques applications

Actions en environnements sévères



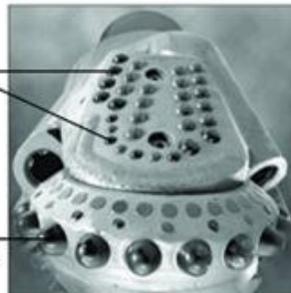
Well being drilled through layers of rock to oil & gas reserves



Preparation of the drill bit and of the guidance system

Polycrystalline diamond (PCD) inserts

Sharp tooth covered with diamond particles



Ancestor tool (1906)

Opération de forage



Scie circulaire diamantée robotisée pour le démantèlement des centrales nucléaires

View of the control room



A cut pile



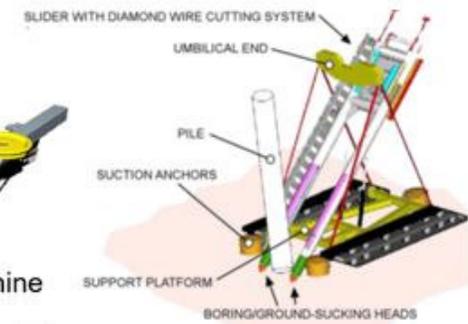
Deployment of the robot prototype



The diamond wire machine



The wire structure



The robot platform.

Scie à fil diamanté robotisée pour travailler en fonds sous-marins 2012 Autom. Constr. 24 213-23

Diamant de synthèse: quelques applications

Actions en environnements sévères

Fenêtre en diamant équipant un gyrotron-Projet ITER

Diamond window



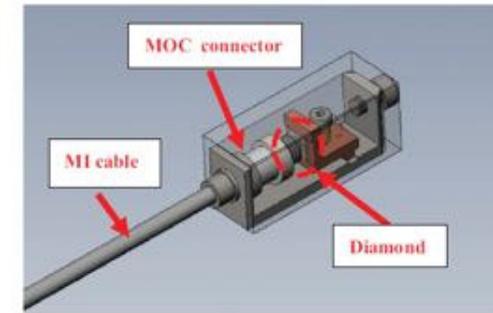
CVD Diamond disc
'Optical grade' type
Diameter: ~ 100 mm
Thickness: ~ 2 mm



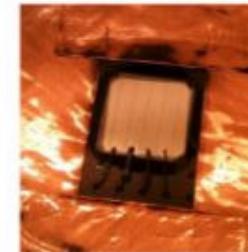
ITER gyrotron

2017, EPJ Web of Conferences **149**, 01002

Détecteur diamant pour irradiation neutronique à haut flux- Projet ITER



Diamond detector design for high-temperature operation



CVD diamond film
'electronic grade' type
Area: $4.3 \times 4.3 \text{ mm}^2$
Thickness: $500 \mu\text{m}$

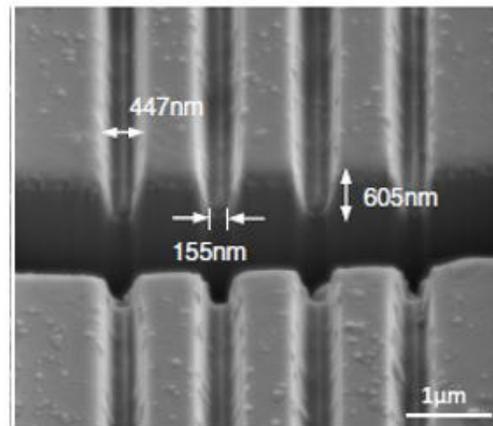
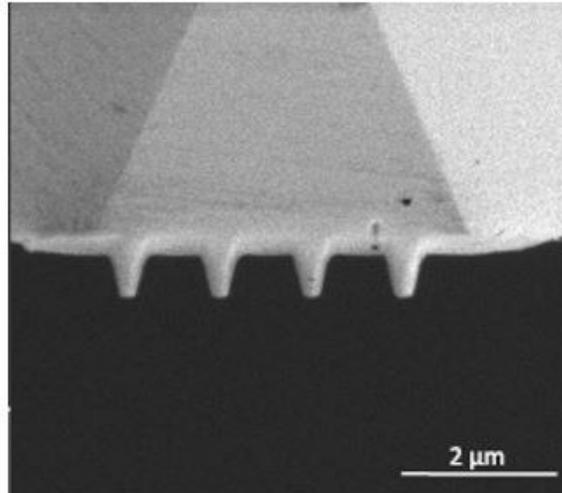
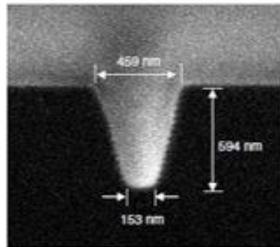
2016 R. Pilotti et al *EPL* **116** 42001

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor

Diamant de synthèse: quelques applications

Actions en usinage de précision

Exemple: fabrication de nanostructures périodiques
2012, J. Micromech. Microeng. 22 115014



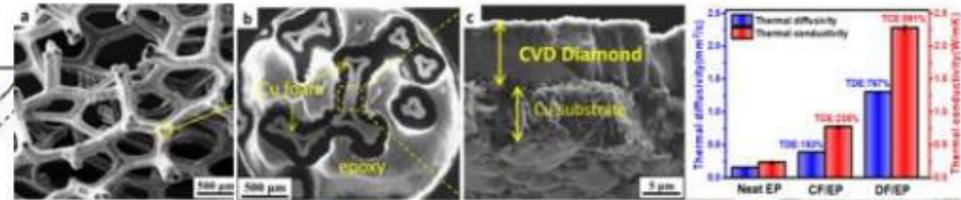
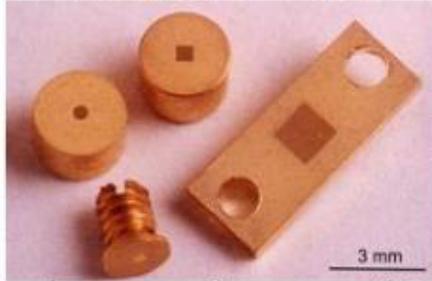
pour augmenter la performance des
cellules solaires



Diamant de synthèse: quelques applications

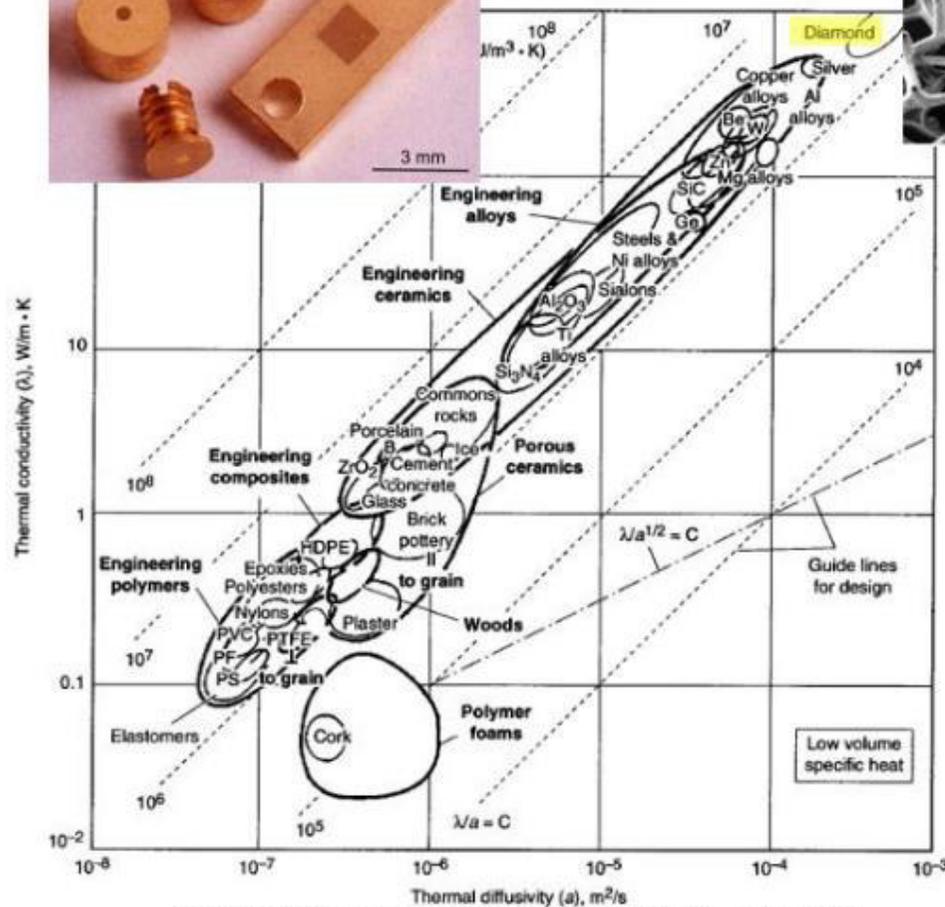
Actions en aménagement thermique

Dissipateurs de chaleur en diamant incorporés dans du cuivre



Mousse de diamant élaborée "sur mesure" pour la gestion thermique de composants électroniques.

2018 *Mater. Des.* 156 32–41

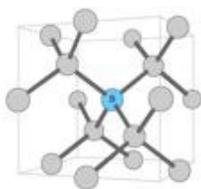


Material Property Chart made by M. F. Ashby

Diamant de synthèse: quelques applications

Actions avec les électrodes diamant dopées au bore (BDD)

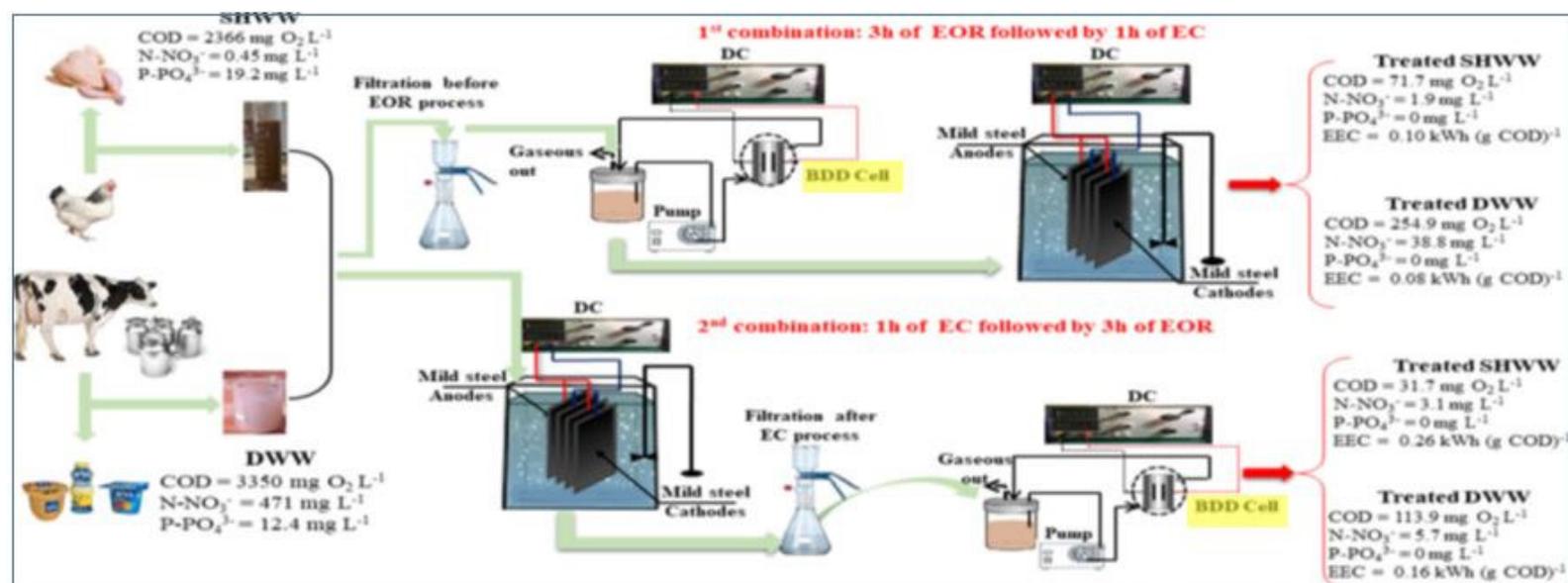
Group 5 B 10.81	Group 6 C 12.01	Group 7 N 14.01
Group 13 Al 26.98	Group 14 Si 28.09	Group 15 P 30.97



Le dopage au bore confère au diamant un caractère semi-conducteur de type p
 10^{18} à 10^{21} at.cm⁻³

'A designer electrode material for the twenty-first century' 2018 *Annu. Rev. Anal. Chem.* 11 46-84

Beaucoup d'actions pour les traitements des déchets et des effluents dans des cellules d'électrolyse



Stack BDD electrodes

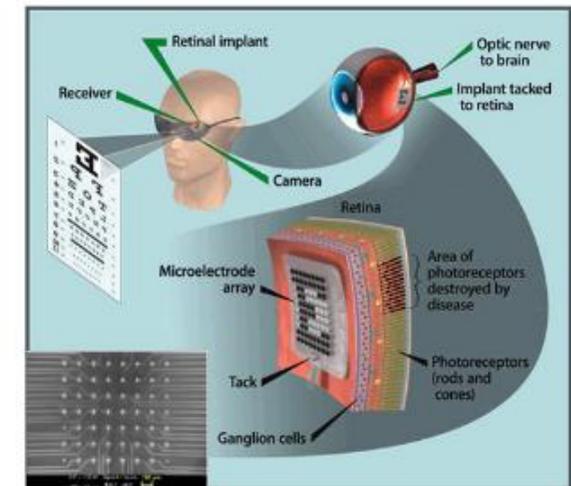
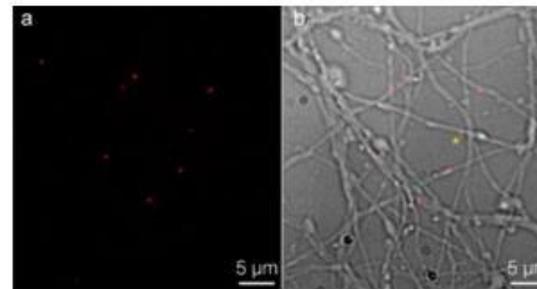
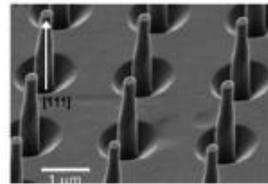
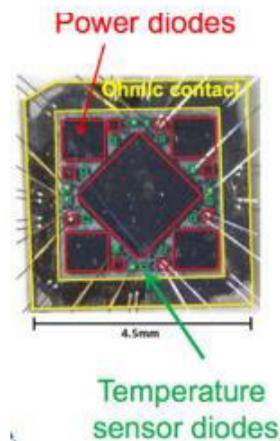
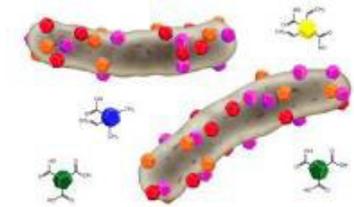
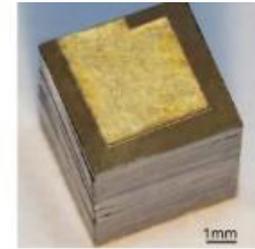
CVD BDD electrode
 'Diameter: ~ 138 mm
 Thickness: ~ 0.6 mm

Traitement des eaux usées issues des activités agroalimentaires 2019 *Sci Total Environ* 647 1651-64

Diamant de synthèse : le rôle qu'il pourra jouer dans un futur proche

De façon très globale, pourra jouer un rôle dans la :

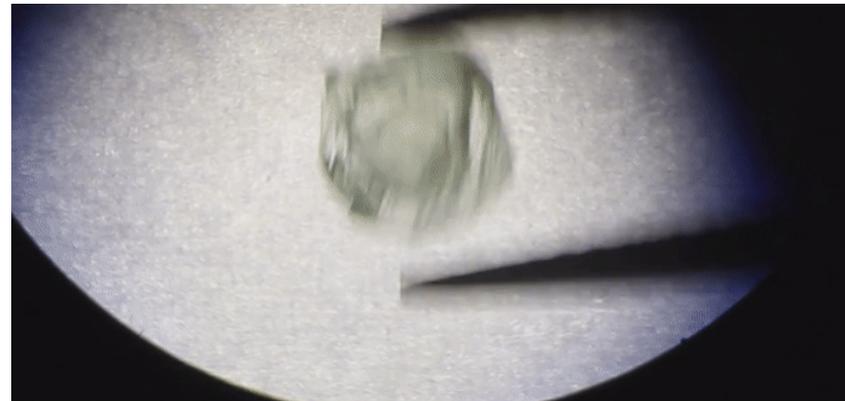
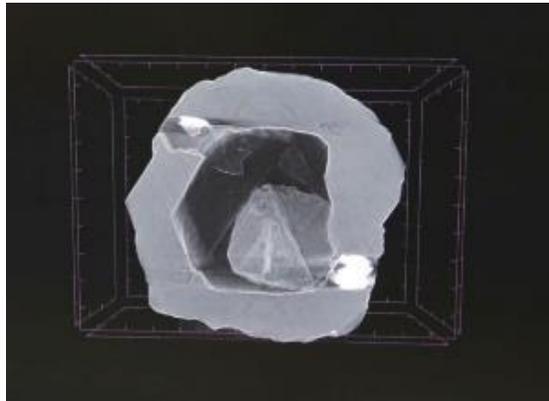
- recherche pour le progrès des connaissances,
- réponse aux défis de la société,
- recherche, développement et innovation pour compétitivité industrielle durable.



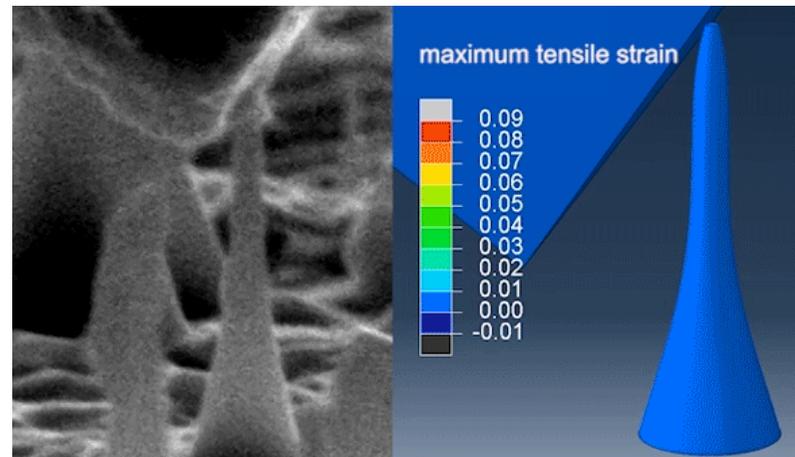
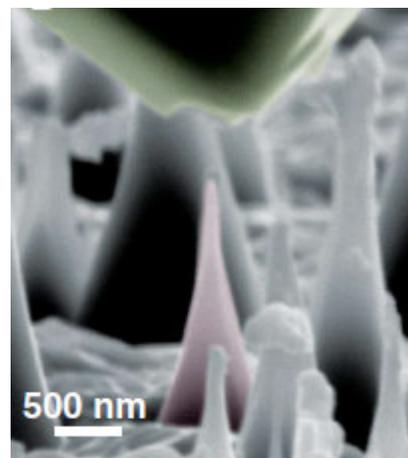
- Implant rétinien
- Diode Schottky pour électronique de puissance
- Nanodiamants dévorant des bactéries
- Détail d'un capteur magnétique en diamant
- Nanodiamants dans des neurones
- Batterie nucléaire dix fois plus puissante qu'une batterie électrochimique ordinaire
- Nanomédicaments pour le traitement du cancer et des maladies du système nerveux
- ...

Conclusion

Le diamant, qu'il soit naturel ou de synthèse n'en finit pas de nous étonner...



https://www.sciencesetavenir.fr/videos/le-diamant-matryochka_p8sxp1



<https://phys.org/news/2018-05-team-method-elastic-diamonds.html>

Principales sources de documentation utilisées

- Diamants au cœur de la terre, au cœur des étoiles, au cœur du pouvoir, H. Bari et V. Sauter (2001)
- Articles publiés dans des revues scientifiques
- Articles publiés dans des magazines de vulgarisation scientifique
- Sites Internet des instituts et laboratoires de gemmologie, des producteurs et des utilisateurs de diamants, de la bibliothèque nationale de France, du muséum d'histoire naturelle, du musée du Louvre



Les différentes facettes du diamant



Merçi pour votre attention



Conférence, 28 -10- 2019, UL, E. Bauer Grosse

