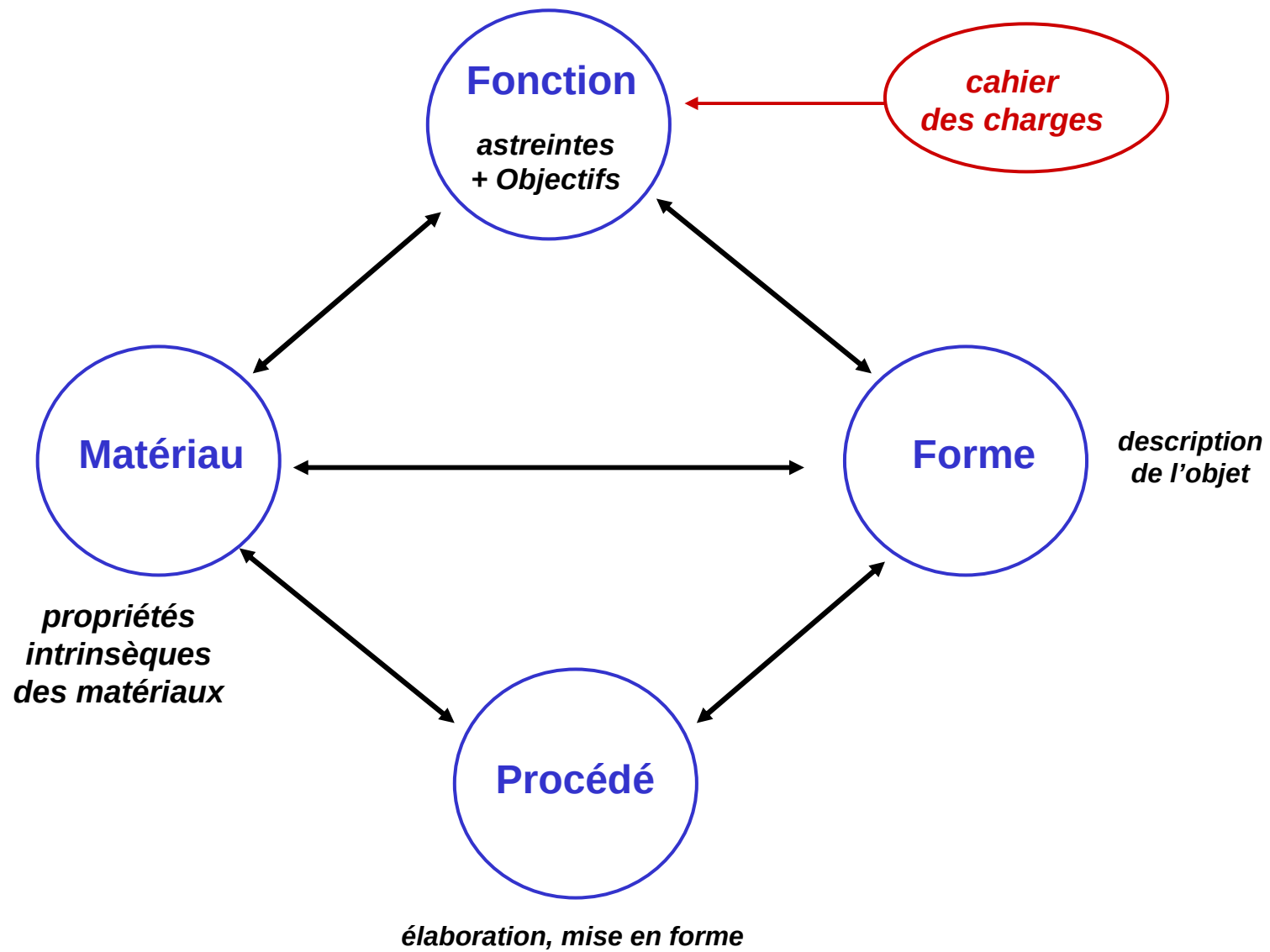
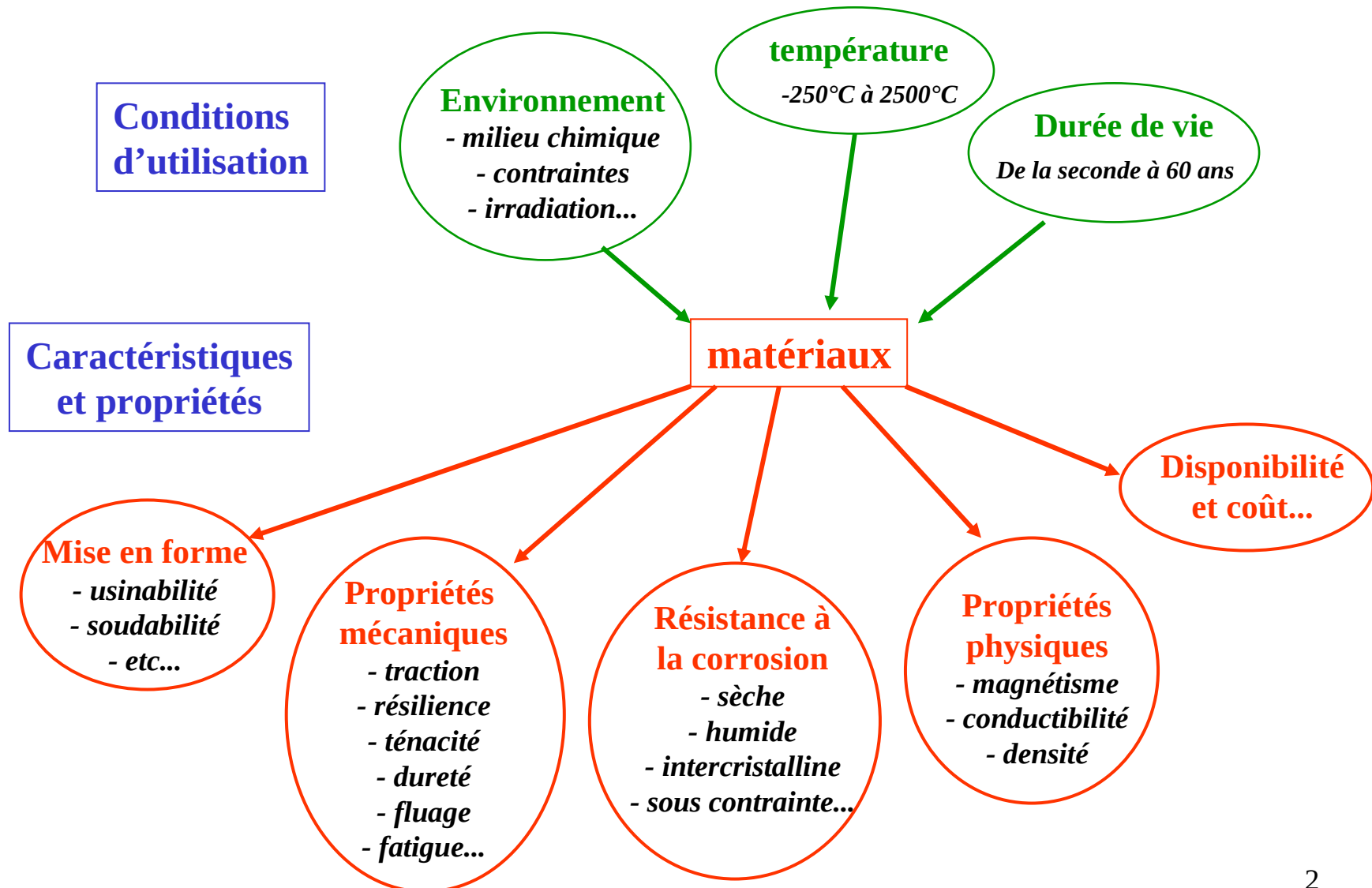


II - Critères de choix d'un matériaux



Critères de choix d'un matériaux



<i>Générales</i>	Volume atomique Densité Contenu énergétique Fraction recyclable Prix	
<i>Mécaniques</i>	Module d'Young Module de cisaillement Module de compressibilité Module de Poisson Limite d'élasticité Dureté	Résistance en traction Résistance en compression Ductilité Ténacité Limite d'endurance Coeff. d'amortissement
<i>Thermiques</i>	Point de fusion Transition vitreuse T. minimale d'utilisation T. maximale d'utilisation Chaleur latente de fusion	Chaleur spécifique Conductivité thermique Diffusivité thermique Coeff. de dilatation
<i>Electriques</i>	Résistivité Constante diélectrique Potentiel de claquage	

Principales caractéristiques des matériaux

Résistance à l'environnement chimique	Autres agressions
Résistance à l'eau douce Résistance à l'eau de mer Résistance aux acides forts Résistance aux acides faibles Résistance aux bases fortes Résistance aux bases faibles Résistance aux solvants organiques Résistance à l'oxydation à 500°C	Inflammabilité Résistance aux UV Résistance à l'usure

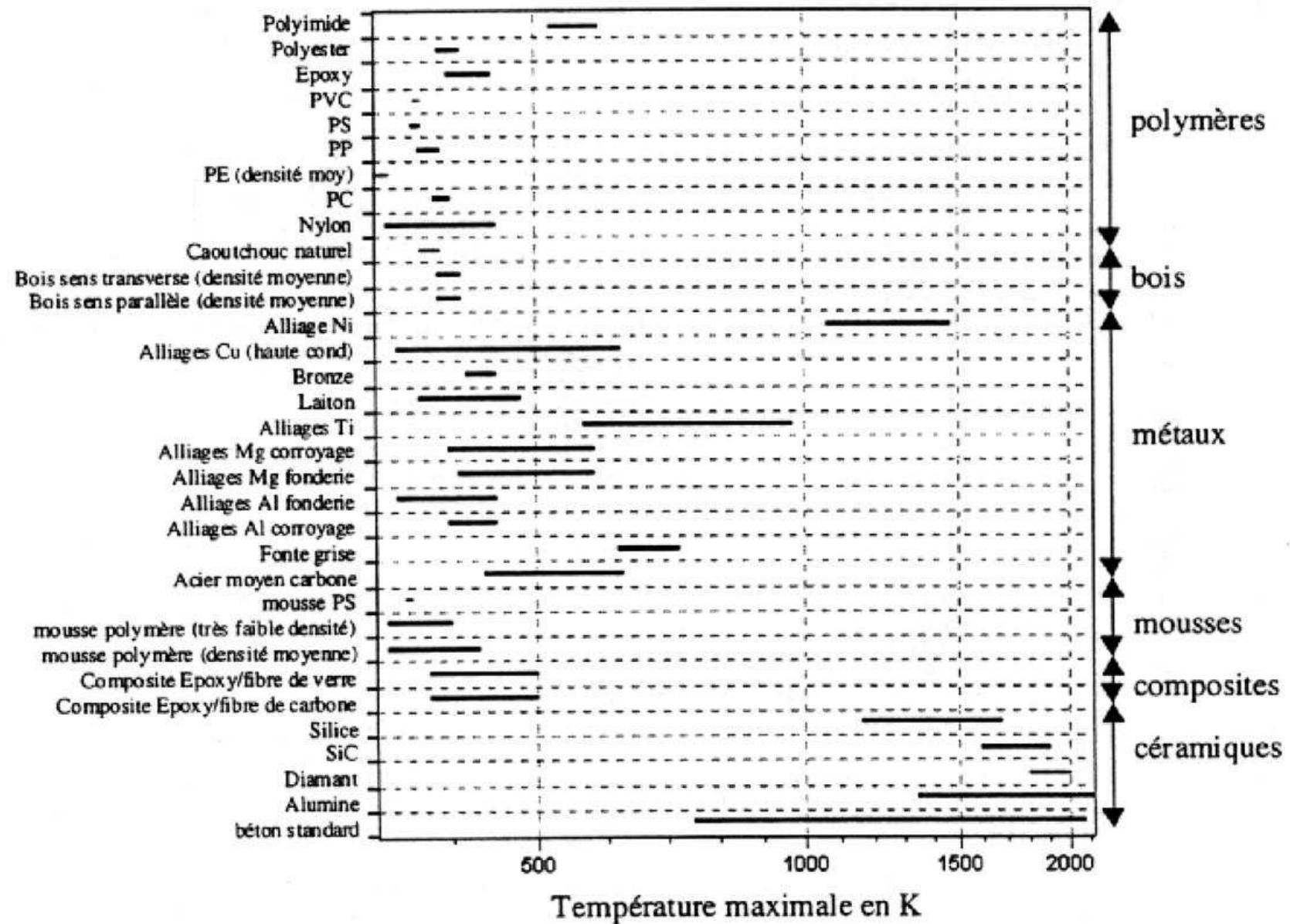
	Métaux	Céramiques	Polymères	Composites
Densité	Moyenne Elevée	Moyenne	Faible Très faible	Moyenne Faible
Prix	Faible Elevé	Elevé (techniques) Faible (gde diffusion)	Faible Elevé	Elevé
Elasticité	Elevée	Très élevée	Moyenne Faible	Elevée
Résistance mécanique	Elevée	Très élevée (compression)	Moyenne Faible	Elevée
Tolérance aux défauts et aux chocs	Très tenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Très tenaces
Température d'utilisation	Moyennes Hautes	Hautes Très hautes	Moyennes Faibles	Moyennes
Tenue aux Agressions chimiques	Moyennes Mauvaise	Bonne Très bonne	Moyenne	Moyenne
Conduction de la chaleur	Bonne Très Bonne	Moyenne Faible	Faible Très faible	Faible
Conduction de l'électricité	Bonne Très bonne	Faible Très faible		
Facilité de mise en forme	Facile	Difficile (techniques) Facile (gde. diffusion)	Très facile	Moyenne dépendant de la forme
Facilité d'assemblage	Facile	Moyenne	Facile	Difficile

**Quelques
caractéristiques
de
matériaux :
Comparaison**

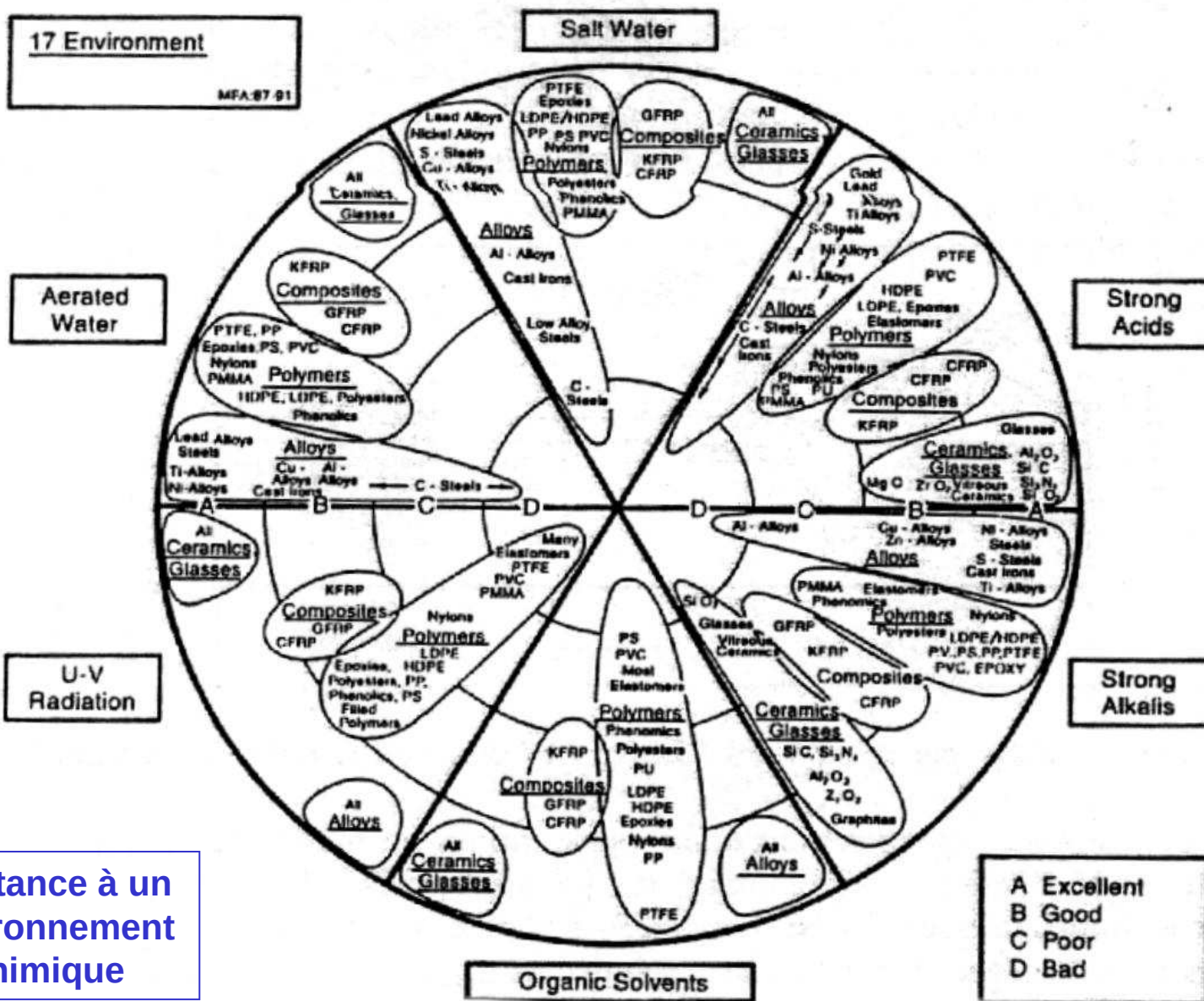
Intervalle de température °C	Principaux matériaux	Applications
-273 à -20	Alliages de Cuivre, Acier inoxydables austénitiques, Alliages d'aluminium	Superconduction, équipement O2, N2, pipeline
0 à 150	la plupart des polymères (jusqu'à 60°C ou 120°C) Alliages de Magnésium (jusqu'à 200°C) Alliages d'Aluminium (jusqu'à 250°C) Aciers,	construction civile automobile aérospatial appareils ménagers
150 à 400	Polymères : PEEK, PEK, PI, PPD, PTFE, PES Alliages de cuivre renforcés de fibres (400°C) Nickel, Ag-Ni	industrie alimentaire automobile (moteur)

**Choix des matériaux
en fonction du domaine
de température d'utilisation**

400 à 575	Acier ferritiques faiblement alliés Alliages de Titane (450°C) Inconels	échangeurs thermiques turbines à vapeur compresseurs de turbine à gaz
575 à 650	super alliages à base acier aciers inoxydables ferritiques aciers inoxydables austénitiques inconels et nimonics	turbines à vapeur échangeurs thermiques
650 à 1000	aciers inoxydables austénitiques Nichromes, nimonics super alliages base nickel super alliages base cobalt	turbines à gaz chimie et pétrochimie réacteurs composants de fours construction nucléaire
au dessus de 1000	métaux réfractaires Mo, W, Ta Alliages de Nb, Mo, W, Ta céramiques Al ₂ O ₃ , MgO, Si ₃ N ₄ , SiC ...	fours spéciaux turbines expérimentales



17 Environment
MFA.87.91



résistance à un
environnement
chimique

Résistance à l'usure

Polyimide		X					
Polyester			X				
Epoxy			X				
PVC		X					
PS			X				
PP			X				
PE (densité moy)				X			
PC			X				
Nylon		X					
Caoutchouc naturel				X			
Bois sens transverse (densité moyenne)		X					
Bois sens parallèle (densité moyenne)		X					
Alliage Ni-Cr						X	
Alliages Cu (haute cond)						X	
Bronze						X	
Laiton						X	
Alliages Ti			X				
Alliages Mg corroyage			X				
Alliages Mg fonderie			X				
Alliages Al fonderie			X				
Alliages Al corroyage			X				
Fonte grise						X	
Acier moyen carbone						X	
mousse PS	X						
mousse polymère (très faible densité)	X						
mousse polymère (densité moyenne)	X						
Composite Epoxy/fibre de verre				X			
Composite Epoxy/fibre de carbone				X			
Silice				X			
SiC						X	
Diamant						X	
Alumine						X	
béton standard		X					
	Très mauvais	Mauvais	Moyen	Bon	Très Bon		

polymères

bois

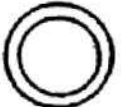
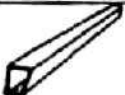
métaux

mousses

composites

céramiques

Classification des formes

Formes								
Axisymétrique			Prismatique		non axisymétrique non prismatique			
Uniforme	sections diverses	cuvette	uniforme	sections diverses	anguleuse	plaque	cuvette	complexe
pleine A10	pleine A20	cylindrique A30	pleine P10	pleine P20	pleine N10	plate N20	cylindrique N30	N40
	 		 	 	 			
creuse A11	creuse A21	conique A31	creuse P11	creuse P21	creuse N11	emboutie N21	conique N31	
	 	 	 	 	 			

Fiabilité et durée de vie...

très diverse !

lanceur spatial : quelques minutes avec une fiabilité de 100%

voiture : 10 ans (3.000 heures réel) usure et pannes acceptables

avion : 100.000 d'heures de vol... fiabilité maximale... (contrôles réguliers)

centrale nucléaire : 30 à 60 ans, suivi régulier, pannes légères acceptables

verre pour stockage de déchets nucléaires : 100.000 ans... contrôle ?

*dans un ensemble complexe, il n'est pas souhaitable d'une pièce ait une durée de vie supérieure à la durée de vie de l'ensemble :
marge de sécurité trop élevée, donc coût trop élevé...*

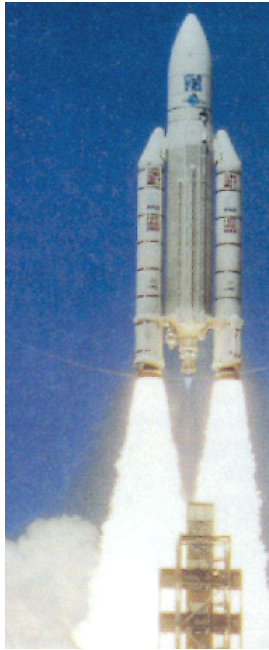
**Dans certains domaines où la sécurité est primordiale (aérospatiale, nucléaire)
on privilégiera des matériaux éprouvés à des matériaux innovants, peut être
très performants mais au comportement encore mal connu...**

Coût

doit prendre en compte tous les aspects :

- matière première
- usinage (équipement, outillage, main d'œuvre...)
- recherche, licences...
- utilisation et entretien (automobile, aviation)

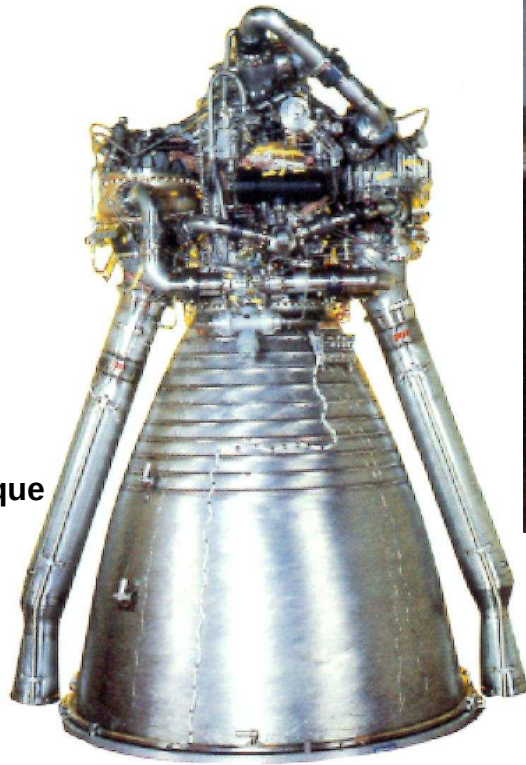
*Dans le bâtiment, la matière première représente 50% du coût total, dans l'industrie
bio-médical, aérospatiale... ce n'est que 0,1%...*



turbopompes

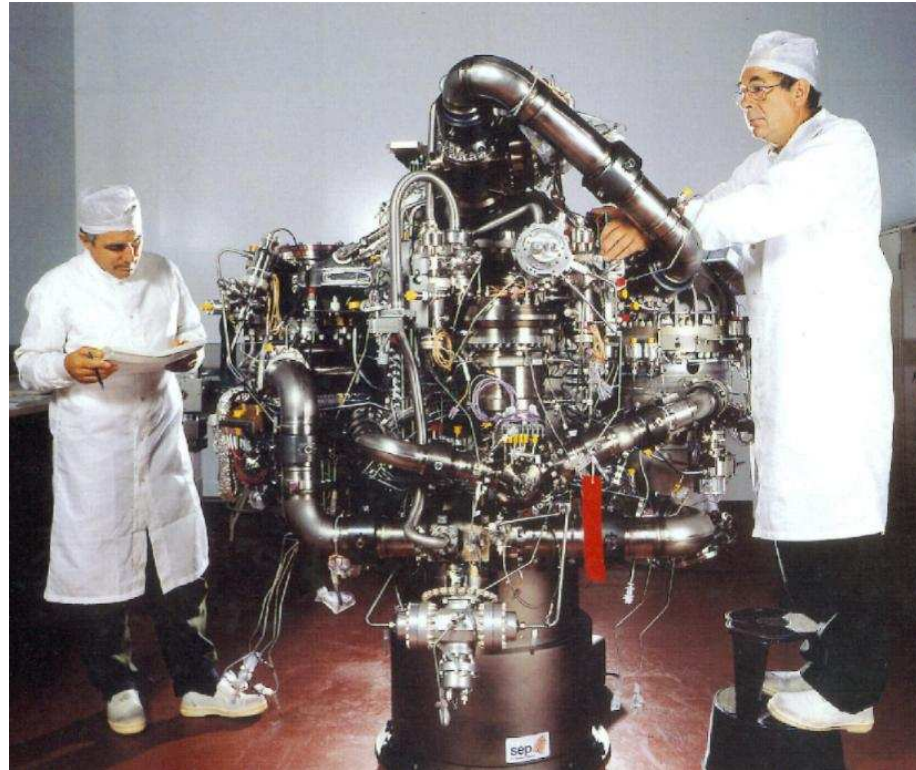
VULCAIN

**Moteur cryogénique
d'Ariane V**



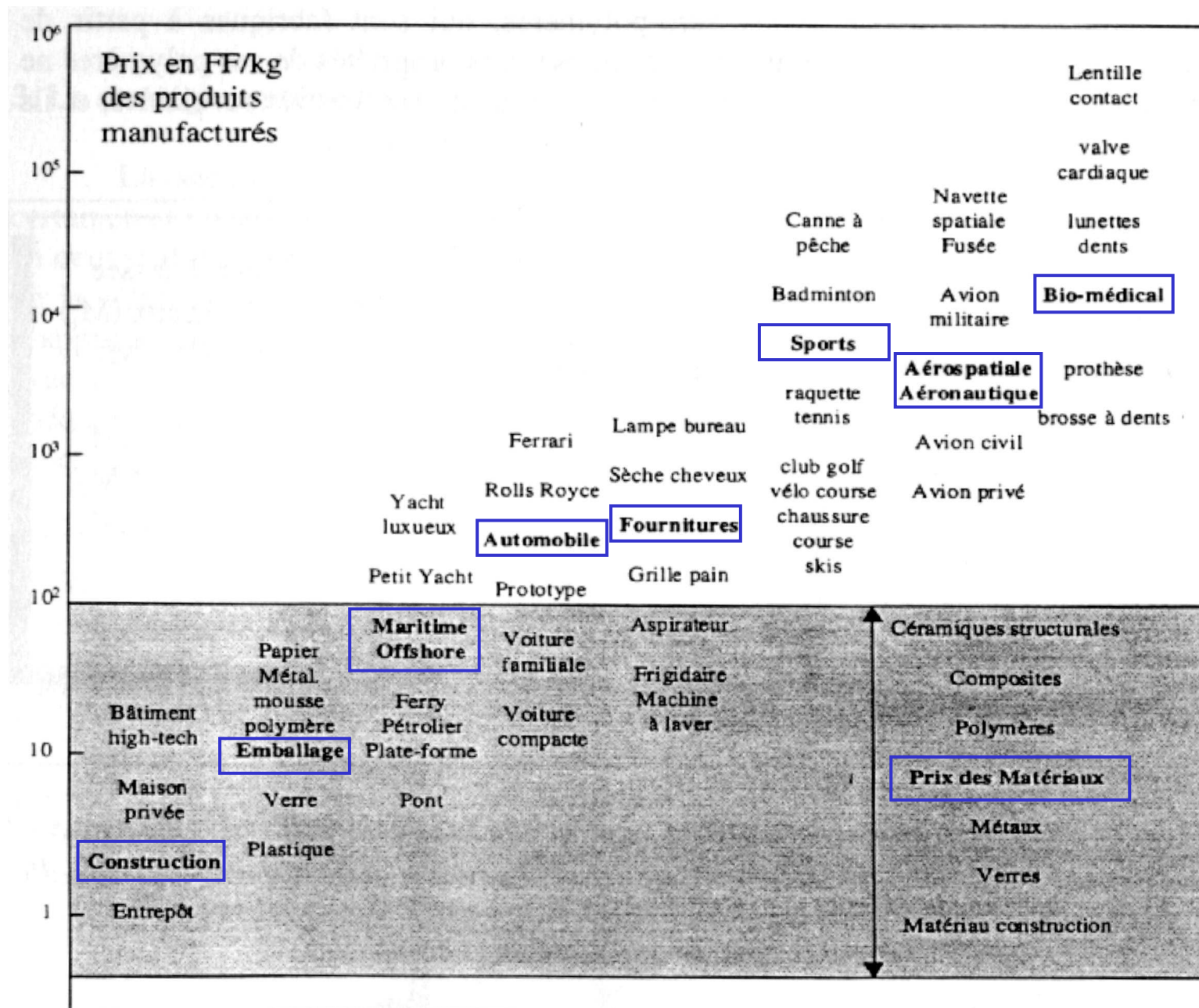
problèmes à résoudre :

- contraintes thermique (-253 à +2500°C)
- flux thermique élevée (8kW/cm² au col)
- fragilisation par l'hydrogène

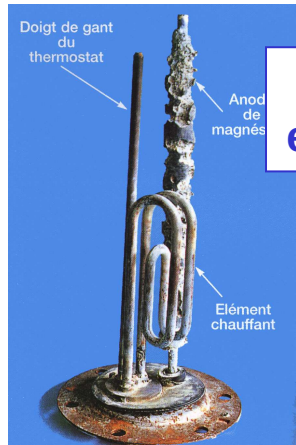


ergols : H₂ et O₂ liquides (-253 et -183°C)
 poussée : 115 T (1145 kN)
 poids : 1700kg
 3000 MW thermique (réacteur nucléaire !)
 turbopompe : 12 MW (2 TGV!) (250kg)
 débit d'H₂ : 600 l/s
 volume de la chambre : 100 litres
 durée de fonctionnement : 10 mn
 durée de vie : 1h30
 fiabilité exigée : 0,995

bilan actuel : 30 moteurs, 370 essais à feu, 36 heures de fonctionnement, 4 vols réels

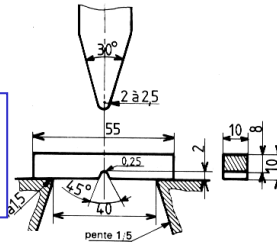
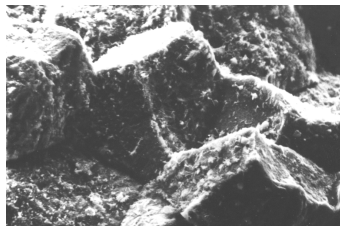


Caractérisation des matériaux

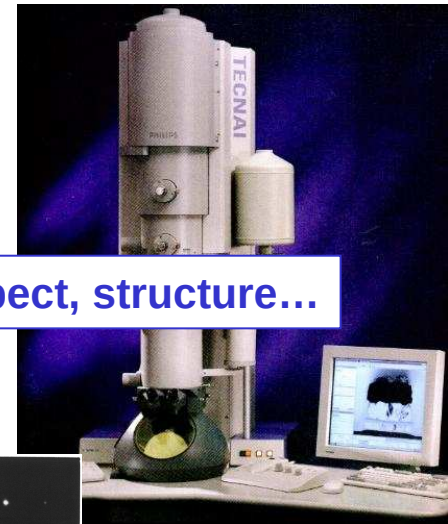


**comportement
environnemental**

mécanique, chimique

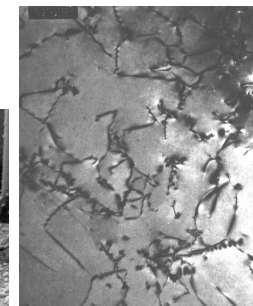
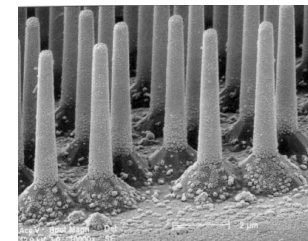
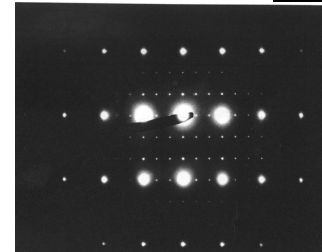


forme, aspect, structure...

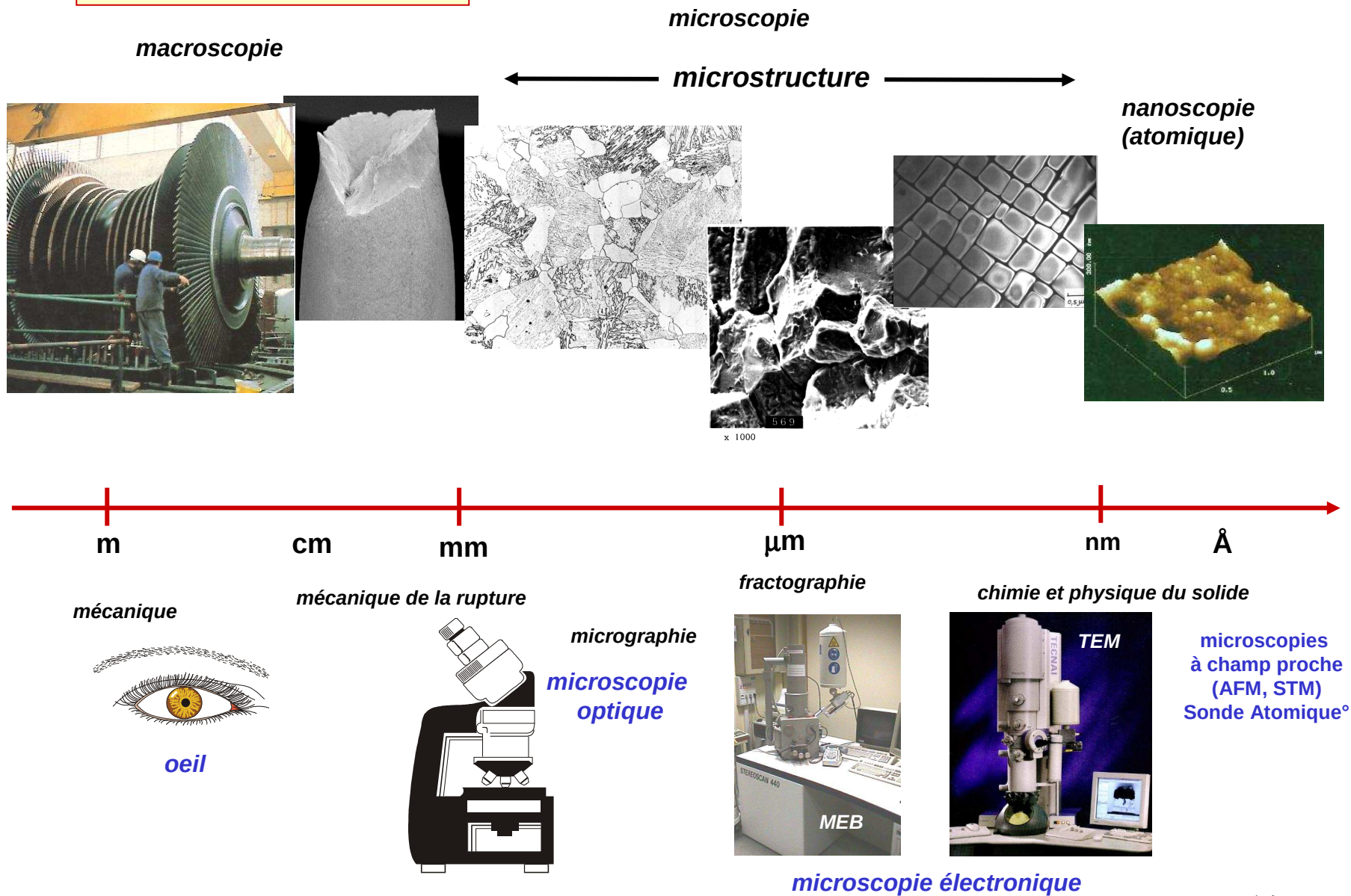


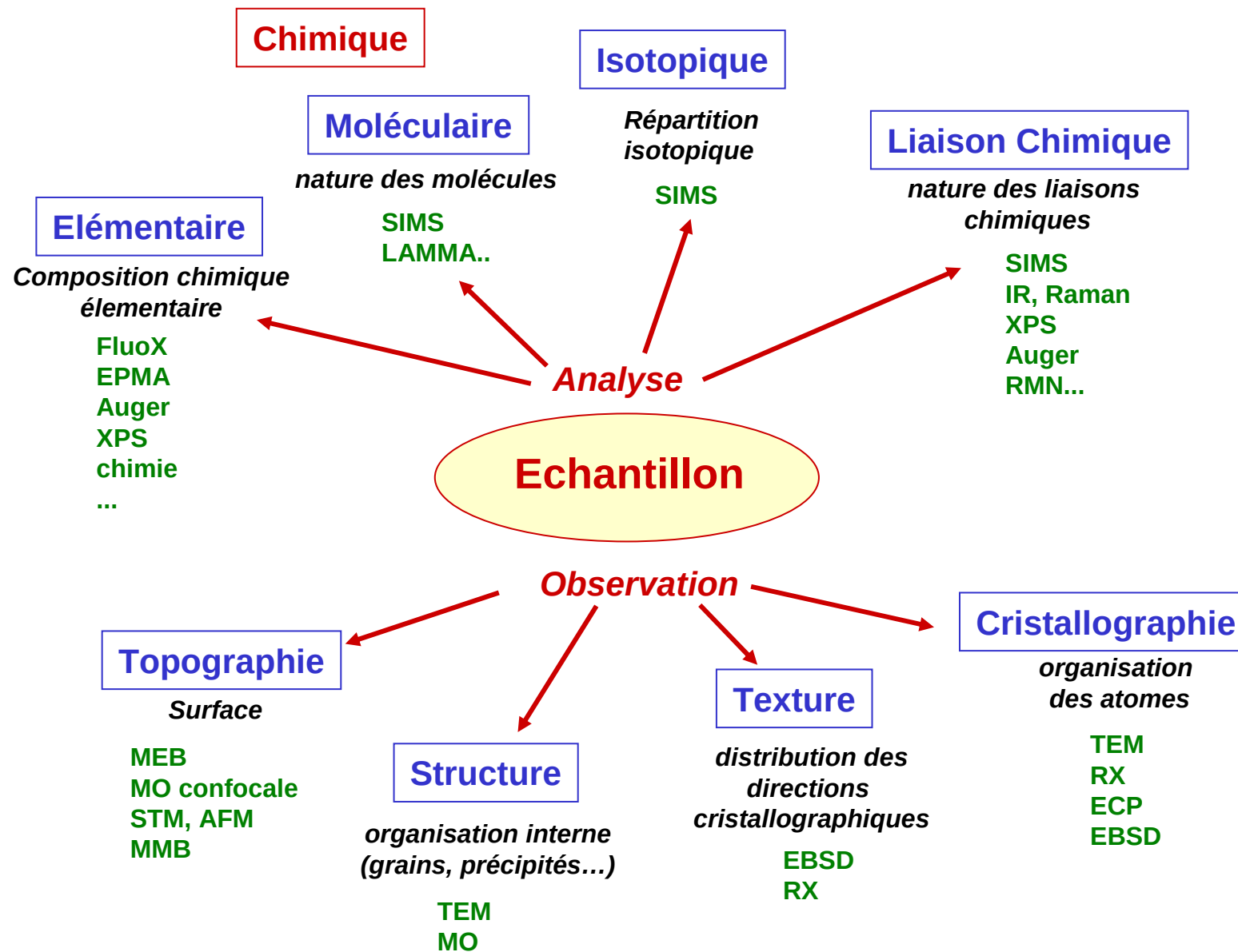
composition chimique

globale, locale..

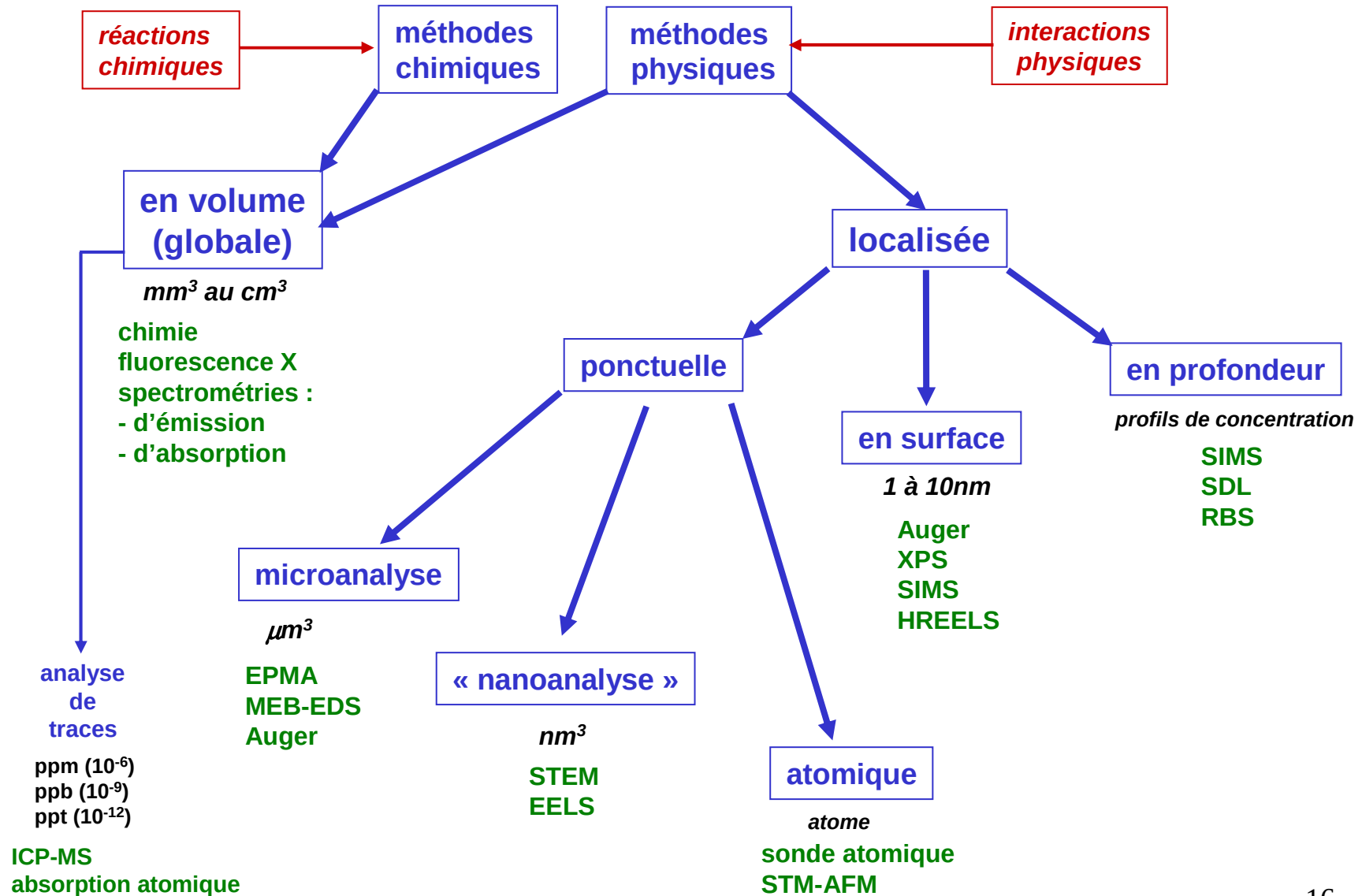


Les différentes échelles





Analyse chimique élémentaire



Matériaux et toxicologie...

effets toxiques :

- par accumulation : dose minimale avec seuil de toxicité (As, Pb..)
des médicaments utilisent l'As à très faible dose
- par sommation : pas de dose minimale ni seuil, seule compte la dose totale accumulée
(produits cancérogènes)
selon la rapport entre le taux d'absorption et le taux d'élimination

mode d'intoxication :

- voie buccale (ingestion)
- inhalation

nature chimique :

- ingestion : la nature métallique est moins toxique qu'une forme organique
Hg métal et sous forme de methyl-mercure (HgCH₃)(action sur le système nerveux)
- inhalation : variable...

Exemples de matériaux présentant une toxicité

- fibres (amiante), particules ou poussières (ciment, charbon)
affections pulmonaires (silicose) ou cancer
- polymères inflammables avec dégagement de vapeurs toxiques (CI)

- métaux toxiques

Pb (saturnisme) : canalisations, adjuvants de l'essence, peinture...

- canalisations : très dépendant de l'agressivité de l'eau (1 à 2 mg/jour)
(le Pb dans le vin est moins toxique que dans l'eau en raison des tanins)
- Pb tétraéthyle : antidétonant ajouté à l'essence... interdit
- peintures au Pb : cause actuelle importante du saturnisme
par ingestion ou inhalation
attaque les globules rouges, les os, le système nerveux, foie, rein...
(encéphalites, anémies, douleurs abdominales, retard psychomoteur)
normes : $Pb < 1\text{mg/cm}^2$, pas de fissures, d'écailles, de cloques

As : sous la forme d'As₂O₃ très dangereux (dose létale : 10 cg)

Hg : dose tolérable : 300µg/semaine ou 0,47µg/kg/j (dose moyenne absorbée : 112µg)
(méthyl-mercure : 200µg maximum)

déchets industriel (Minamata : 0,1g/semaine) attaque le système nerveux

Cd, Zn : déchets ou pollution industriels (sous forme de composés organo-métalliques)

Al (Alzheimer?) : emballage, cuisine...

Be, Cr, Cu, Ni, Se, Pu...

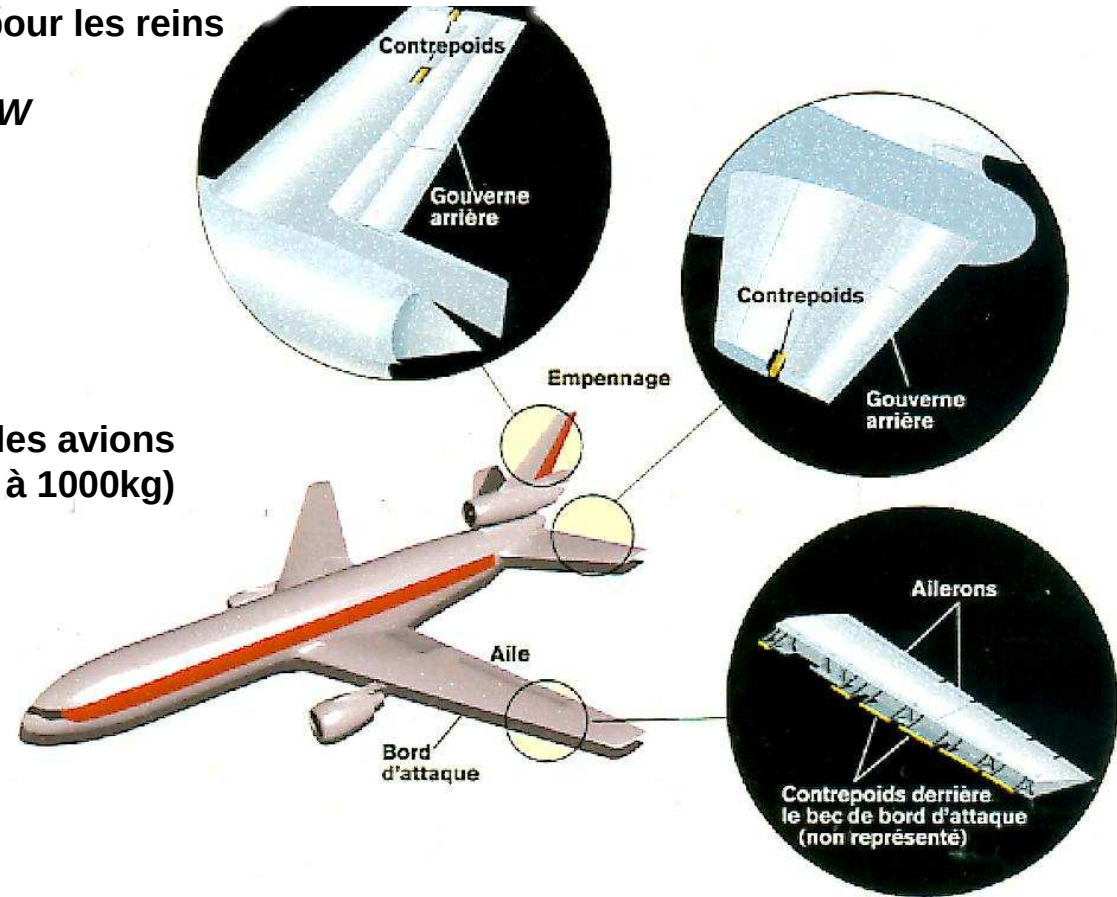
Lors de pollutions industrielles, il peut y avoir une concentration par la chaîne alimentaire...

plancton → petits poissons → gros poissons → hommes
plantes → animaux → hommes...

U appauvri (U238) : poison chimique pour les reins

- armes anti-char (*remplace souvent le W car moins cher*)
- contrepoids (en raison de sa densité)
 - quille de voilier
 - avion

**emploi de l'U appauvri dans les avions
(DC10, Boeing 747...)(de 680 à 1000kg)**



risques :

en cas de crash, brûle et forme à 500°C des particules d'oxydes (UO₂, UO₃)
facilement respirables... effets toxiques et radioactif...

U238 émetteur α de très longue durée de vie (4,5 milliards d'année)

- en exposition externe : inoffensif
- inhalé : très dangereux (cancers)

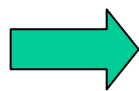
Risques d'irradiation

rayonnements ionisants { - destruction cellulaire
- altération de l'ADN

restauration si pas trop abîmée

- irradiation externe { - globale
- locale

- contamination, irradiation interne



période effective (T) qui tient compte de la période biologique T_b
(élimination par l'organisme du radioélément)

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_b}$$

	<i>période radioactive</i>		<i>période biologique</i>	<i>période effective</i>
K40	1,3 10 ⁹ ans	ensemble du corps	30 jours	30 jours
Mn54	303 jours	Foie	25 jours	23 jours
Fe59	45,1 jours	Rate	600 jours	42 jours
Co60	5,3 ans	ensemble du corps	99,5 jours	94,6 jours
Sr90	28 ans	Os	50 ans	20,6 ans
I131	8 jours	Thyroïde	138 jours	7,6 jours
Cs137	30 ans	ensemble du corps	70 jours	70 jours
Ra226	1.620 ans	Os	45 ans	44 jours
Pu239	24.400 ans	Os	200 ans	198 ans
		Poumon	500 jours	500 jours

Aubes de turbines des réacteurs d'avions

Moteur CFM 56-5C
(SNECMA - General electric)

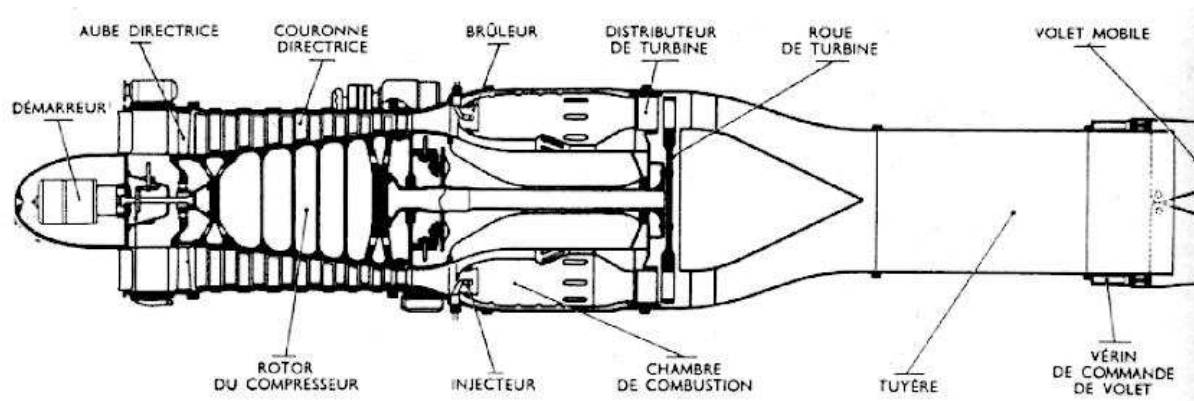
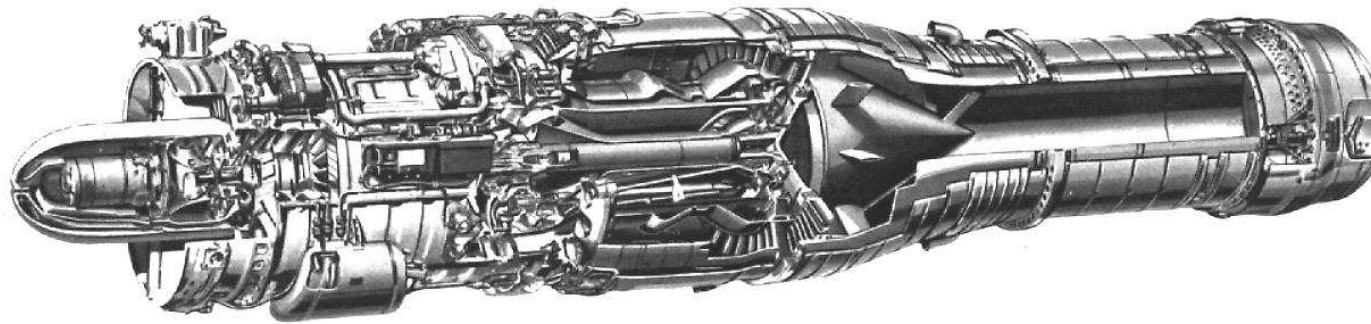
(AirBus, Boeing, McDonnell-Douglas)



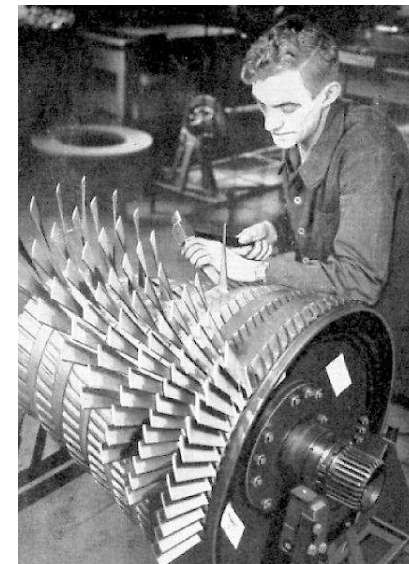
GE90 (SNECMA)



Schéma d'un turboréacteur



Montage des aubes du compresseur

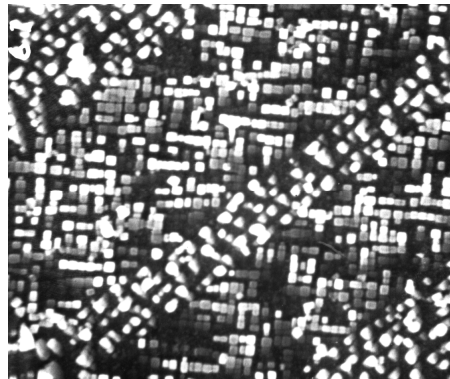
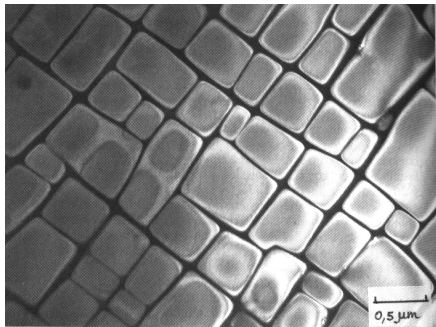


**Les aubes de turbine sont soumises à de très fortes contraintes (250 MPa)
et à des températures élevées (1550°C)**

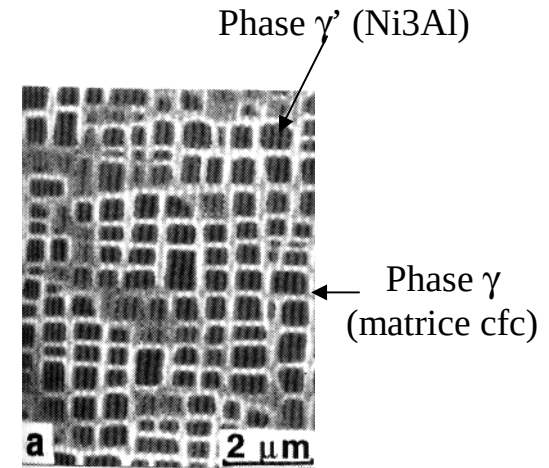
On va utiliser des superalliages de Ni

Durcissement par précipitation de Ni₃Al (γ')

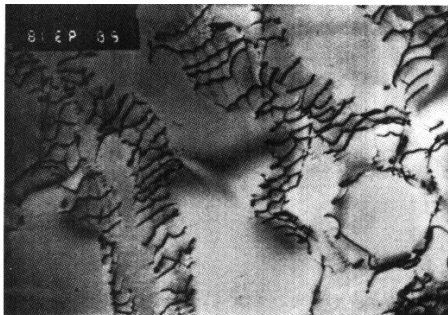
Les précipités forment des obstacles au déplacement
des dislocations, d'où le durcissement



Phases γ' observées en TEM



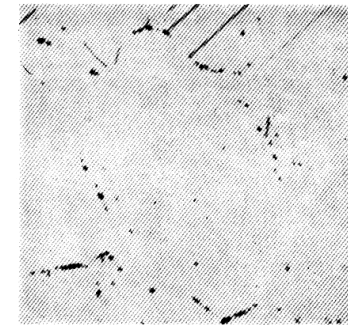
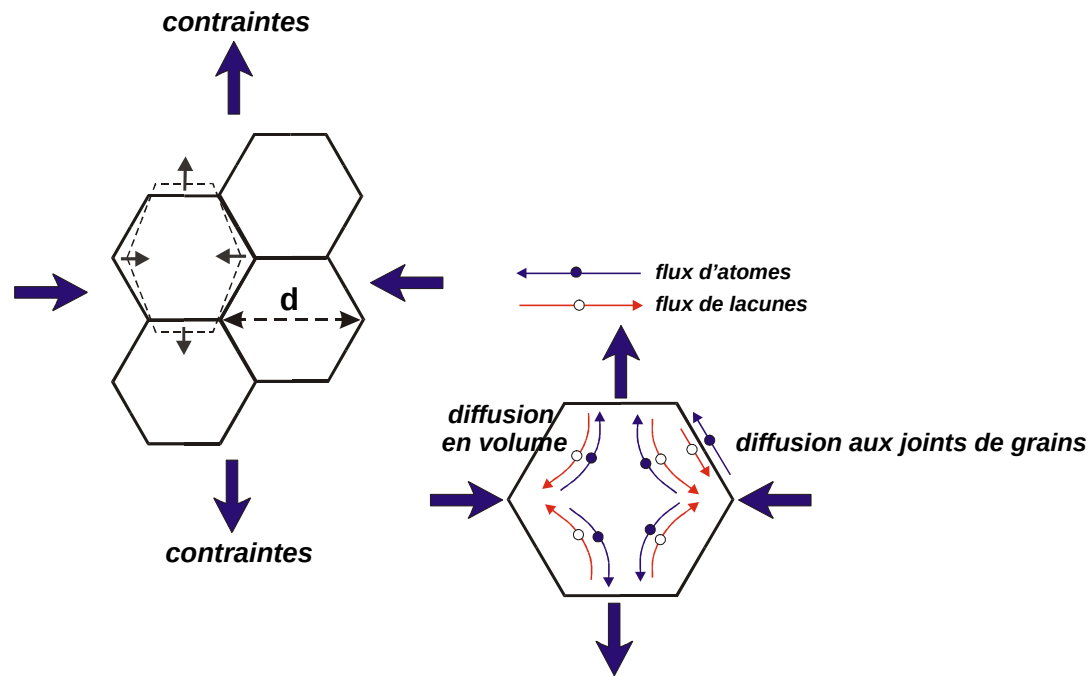
**Microstructure γ et γ' d'un superalliage
monocristallin de Ni recuit 1315°C +
revenu 16h 1050° et 24h 850°C
observé en TEM**



**Phase γ' dans un alliage base Ni, observé en TEM après essai de fluage
accumulation de dislocations entre les précipités**

Hautes températures : risque de rupture par fluage

- Diffusion de lacunes provoquée par la contrainte appliquée et favorisée par la température
- Accumulation de ces lacunes dans les joints de grains
- Formation de cavités et coalescence
- Affaiblissement de la résistance du matériau et rupture

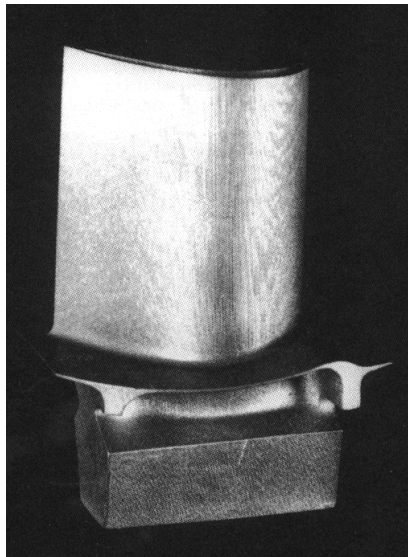


Cavités de fluage aux joints de grains

**Une solution :
réduire l'importance des joints de grains**

- solidification orientée (quelques grains allongés dans le sens de l'aube)
- solidification monocristalline (plus de joints de grains)

(SNECMA - Ecole des Mines de Paris)



Structure
polycristalline
à gros grains



Solidification
colonnaire
(solidification
orientée)



Structure
monocristalline

Aube monocristalline (SNECMA)

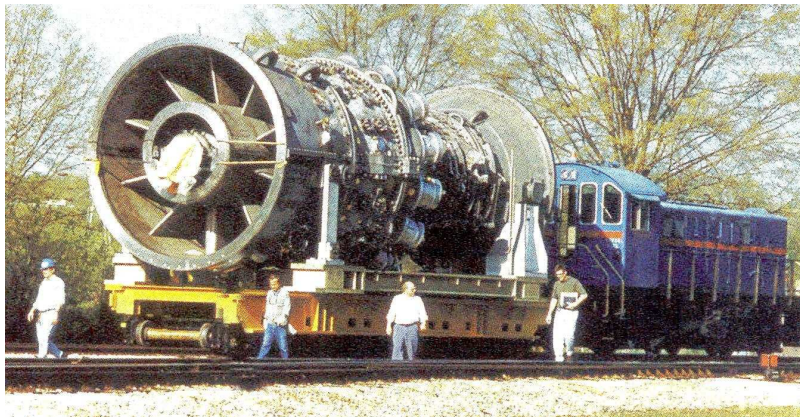
Turbines employées pour la production d'électricité (TAC)



La turbine (assez similaire à celle d'un réacteur d'avion) entraîne un alternateur

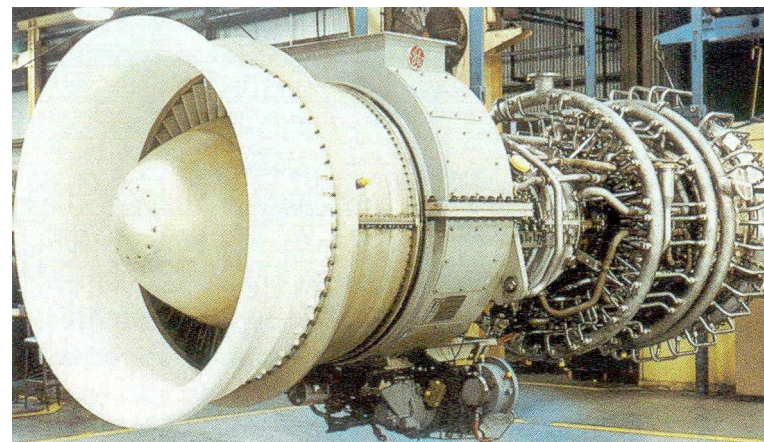
On retrouve la même structure : compresseur, chambre de combustion, turbine

But : palier les fortes demandes ponctuelles (« pointes de consommation »)
avantages : mise en route immédiate pour faire face à la demande



turbine General Electric MS9001H - 400MW
rendement 60% en cycle combiné

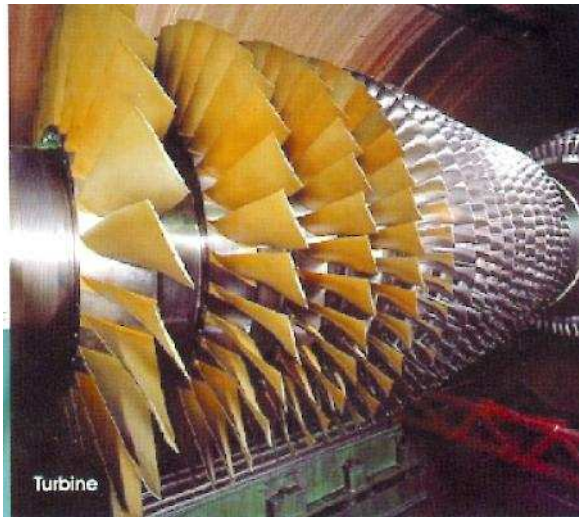
LM500 de General Electric - 50,8MW
rendement 43%



La température des aubes est moins importante que celle des aubes de turboréacteur

mais :

- la durée de vie doit être plus longue
- la corrosion est plus importante (fonctionne avec des fuels industriels et non du kérosène)
- les dimensions sont plus importantes (50 cm au lieu de 15 cm)

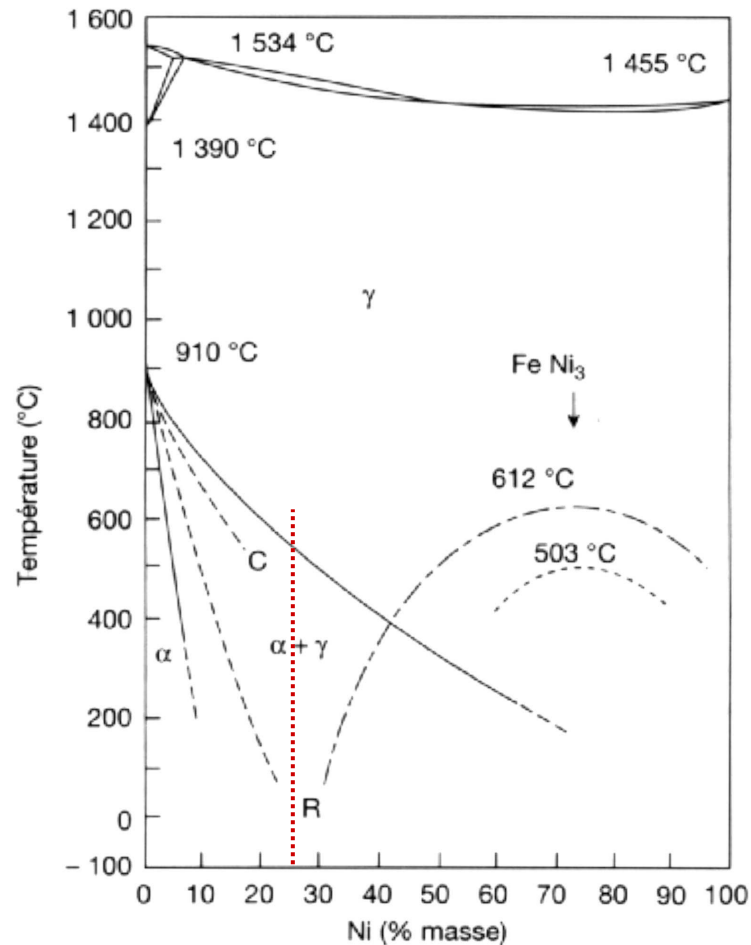


En collaboration avec Turmoméca, l'ONERA et Alstom, EDF a mis au point une technique de fabrication d'aubes monocristallines de grandes dimensions pouvant équiper des turbines de grande puissance

Les alliages Fer- Nickel

Un alliage aux propriétés surprenantes : l'INVAR

de la famille des alliages Fe-Ni, découvert en 1896 par Ch. Guillaume et fabriqué par la Société IMPHY, cet alliage à 36%Ni présente un très faible coefficient de dilatation thermique (30% inférieur au platine).

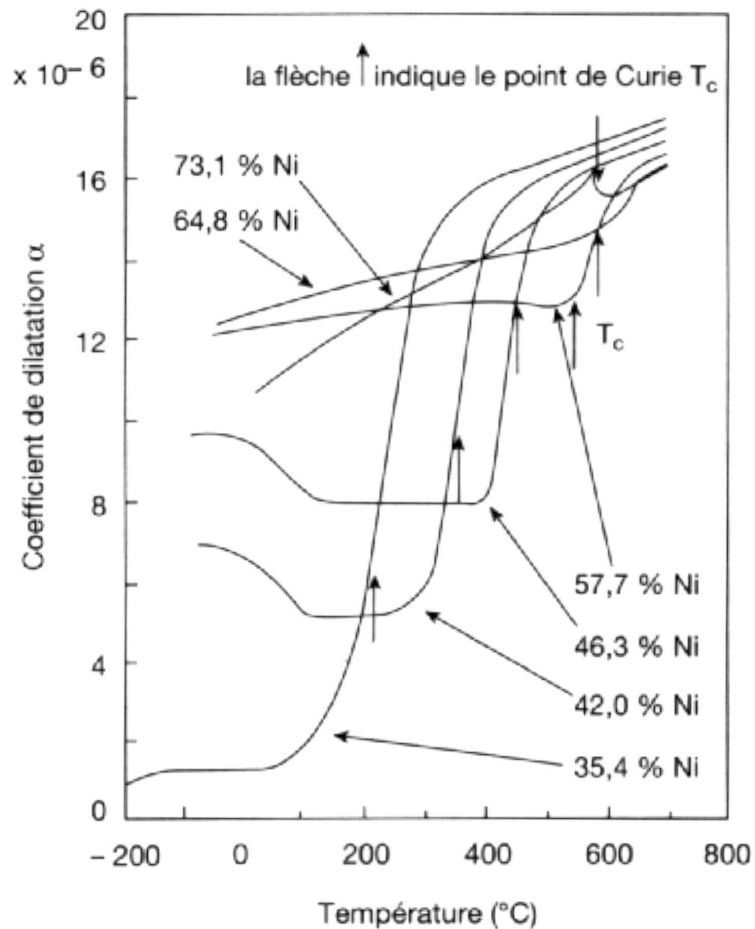


- α structure cubique centrée
- γ structure cubique à faces centrées
- diagramme d'équilibre
- - - diagramme métastable pratique (C chauffage, R refroidissement)
- - - diagramme de transformation magnétique (point de Curie) de la phase γ
- - - - diagramme de transformation ordre-désordre

diagramme Fe-Ni

Au delà de 27%Ni, la structure est cfc à température ambiante (diagramme métastable, R)

En dessous de 27%, la structure est cc (aciers au Ni)



Variation du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température pour différentes teneur en Ni

dilatation thermique :

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

α : coefficient de dilatation thermique ($\approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$)

Cr	Ti	Fe	Ni	Cu	
6	8,5	12	13	16,6	10^{-6} K^{-1}

entre l'hiver (0°C) et l'été (20°C) la Tour Eiffel va grandir de 7 cm

INVAR (36%Ni) : $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

(0,1mm/m pour $\Delta T = 100^\circ\text{C}$)

SuperINVAR : $\alpha = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

en dessous de sa température de Curie (210°C)

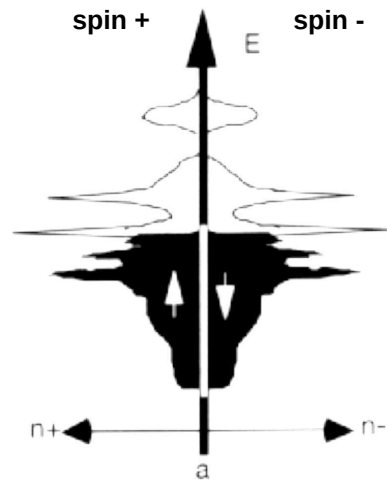
Température de Curie :

température de transformation
ferromagnétique-paramagnétique

Origine de cette anomalie de dilatation

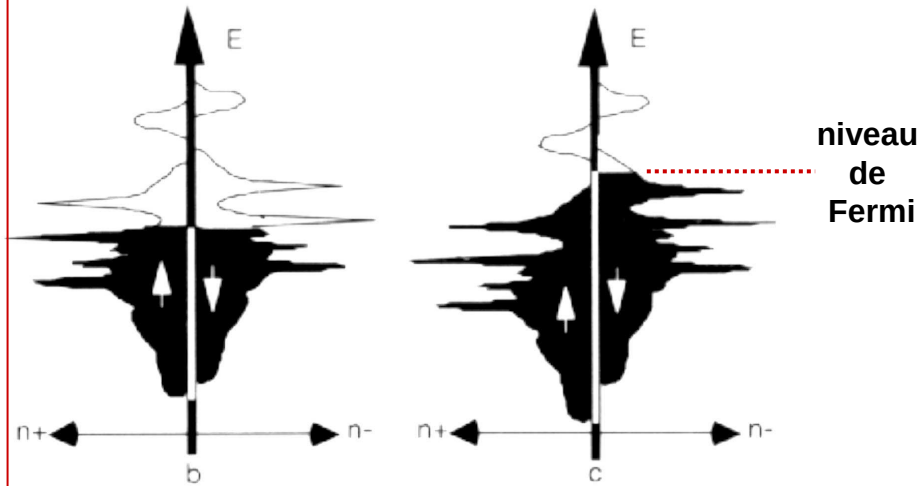
le magnétisme des métaux

bandes de niveaux électroniques



métal paramagnétique
(Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Ta, W..)

*les états à spin+ et à spin -
sont remplis également
pas de magnétisme propre
celui n'apparaît qu'en présence
d'un champ magnétique
extérieur qui modifie la
distribution des électrons*



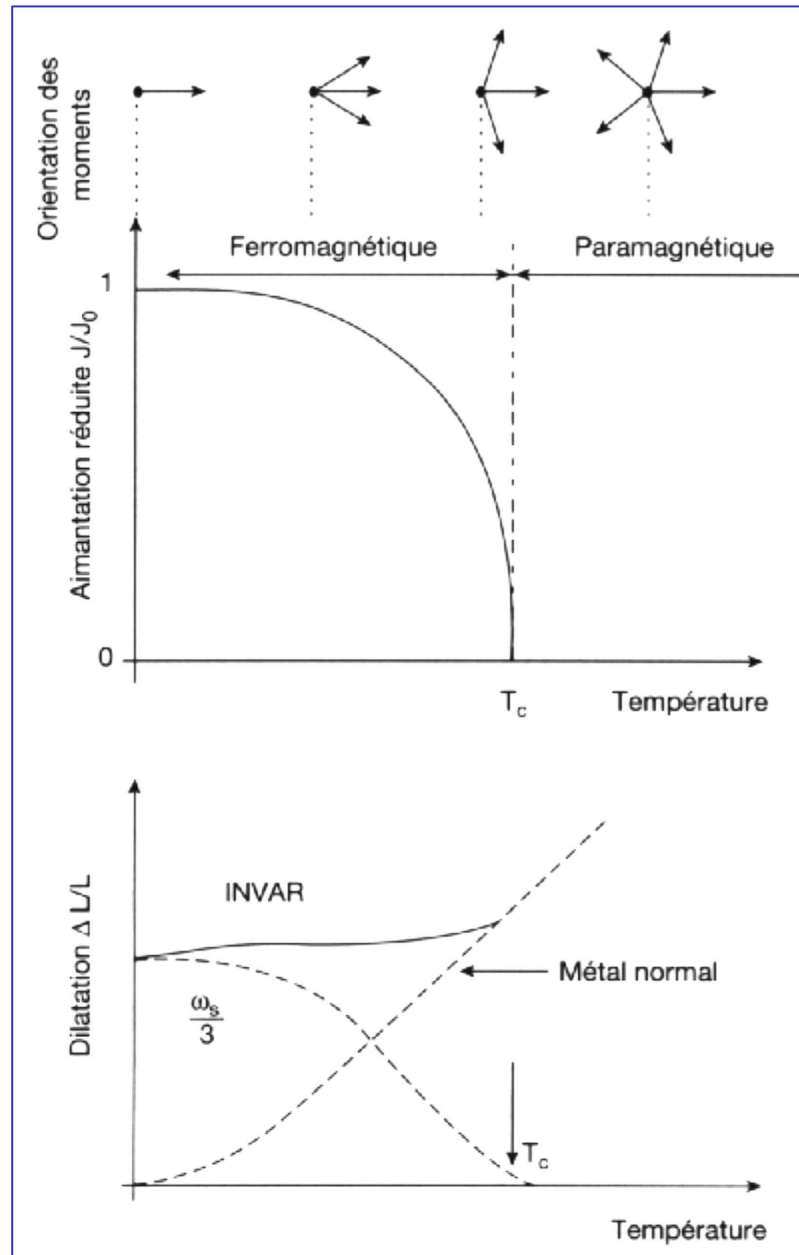
faible

fort

métal ferromagnétique
(Fe, Co, Ni, Gd, Dy, Er, Ho)

*déséquilibre entre le nombre d'électrons de spin+ et
ceux de spin - : moment magnétique propre*

*Au delà d'une certaine température (point de Curie)
l'agitation thermique détruit ce déséquilibre
et le métal devient paramagnétique.*



dans le cas de l'INVAR que se passe-t-il?

- la température entraîne une dilatation du métal
- dans un métal ferromagnétique, le couplage des spins entraîne une variation de volume (effet magnétostrictif volumique spontané)

Ces deux effets sont opposés

Dans le cas de l'INVAR, ils se compensent.

Lors du passage au point de Curie, l'effet magnétostrictif disparaît et la dilatation thermique seul subsiste, d'où l'augmentation rapide du coefficient de dilatation.

Cet effet existe dans tous les métaux et alliages ferromagnétique (avec discontinuité plus ou moins marquée au passage du point de Curie). Seul la composition de l'INVAR (36%Ni) permet cette compensation.

Applications des alliages Fe-Ni

*de très nombreuses applications qui nécessitent une très faible dilatation thermique
ou de bonnes performances magnétiques.....*

- horlogerie

-horlogerie classique : ressorts en spiral

(Elinvar 36%Ni-12%Cr, Nivarox 38%Ni-8%Cr, Thermolast 40%Ni-9%Mo)

-horlogerie électronique : quartz oscillant et moteur pas-à-pas (alliages magnétiques)

Supra50 (50%Ni)

Permimphy 80%Ni-5%Mo

- régulation thermique (thermostats)

bilames thermostatiques

2 lames minces rigidement liées ensemble et avec des coefficients de dilatation différents

- l'une est en INVAR (lame passive, à faible allongement)

- l'autre est active, à forte dilatation thermique ($\alpha \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) :

on utilise actuellement des alliages Fe-Ni-Mn ou Fe-Ni-Cr (15 à 25%Ni)

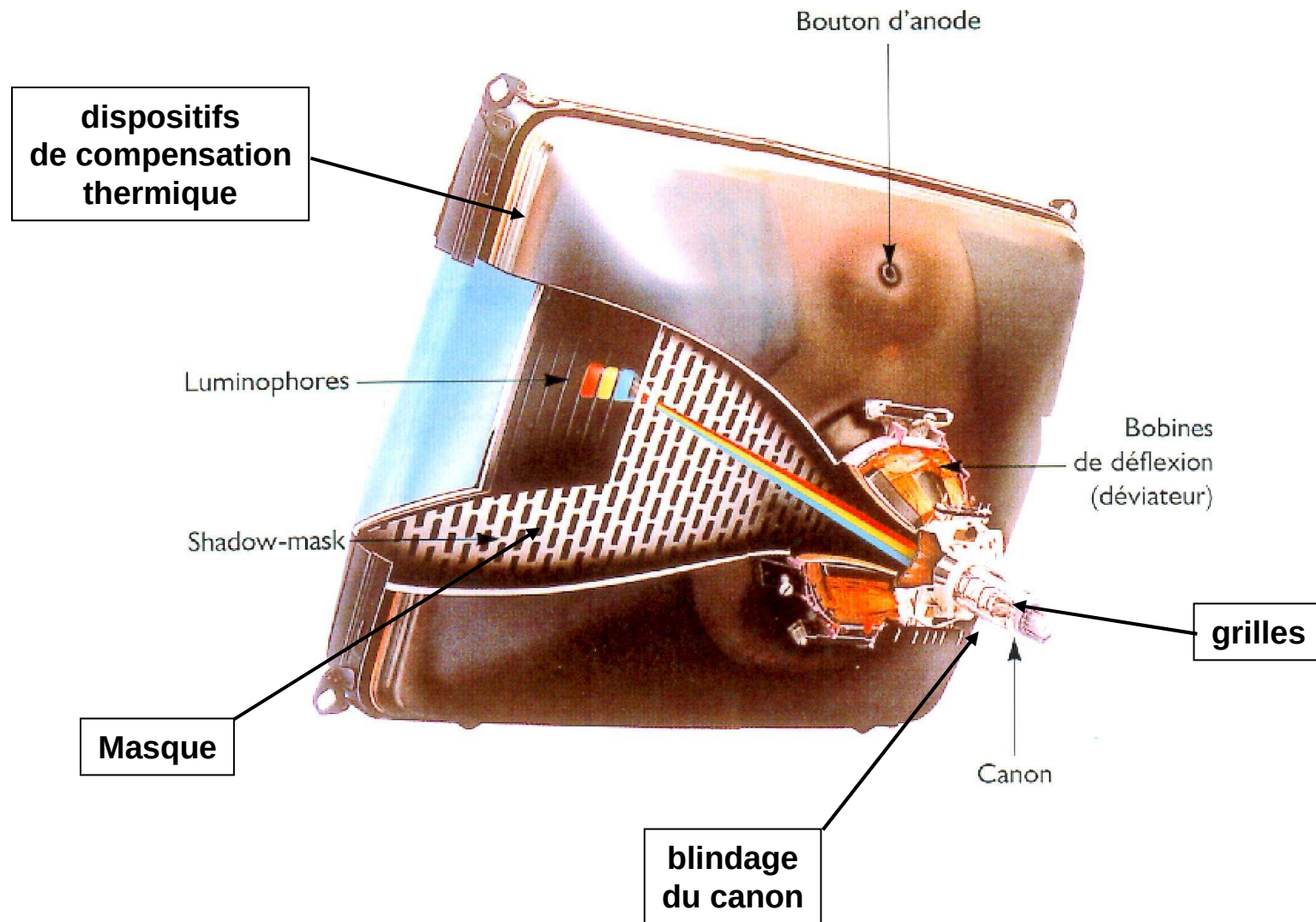
- boîtiers de circuits intégrés

permet de réaliser des boîtiers ultra-minces à faible dilatation thermique

Fe-42%Ni, Fe-29%Ni-17%Co...

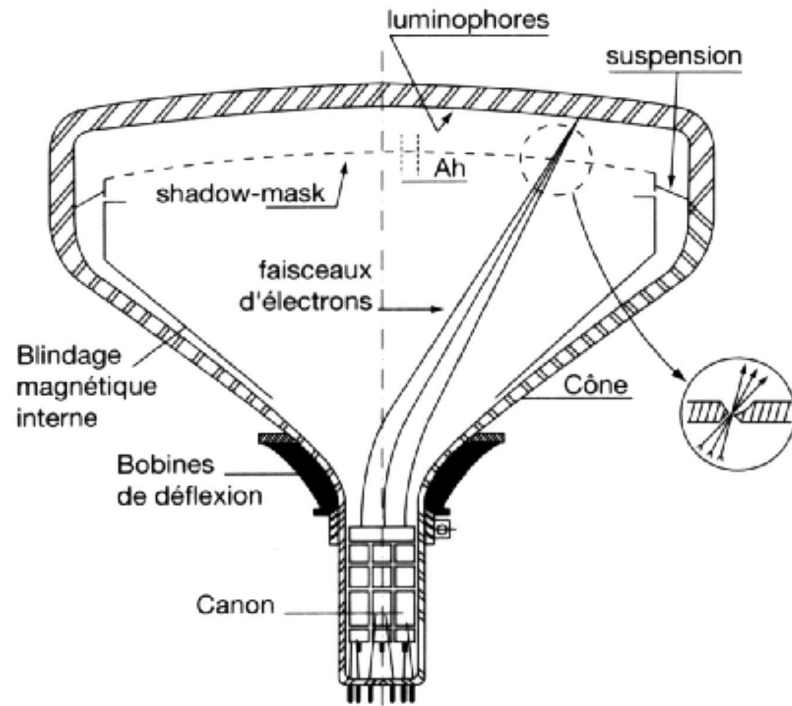
Tube de télévision

production annuelle : 120 millions de tubes

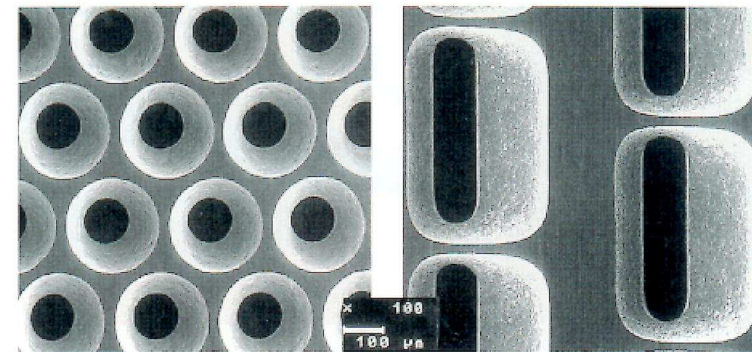
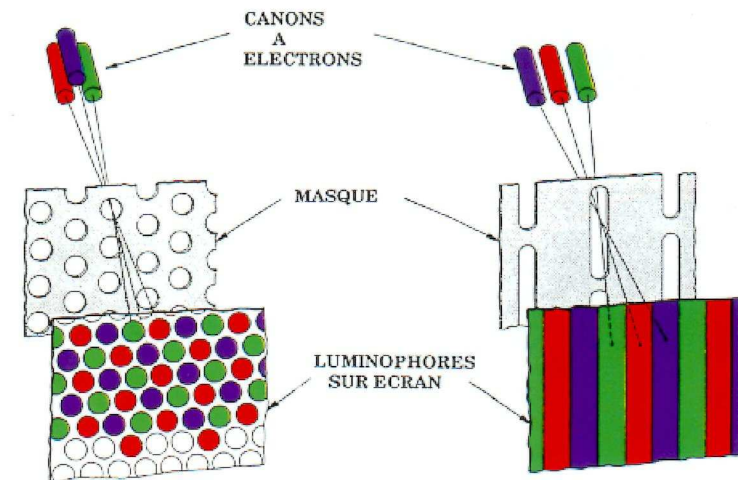


L'INVAR est utilisé à différents niveaux

le « shadow mask »

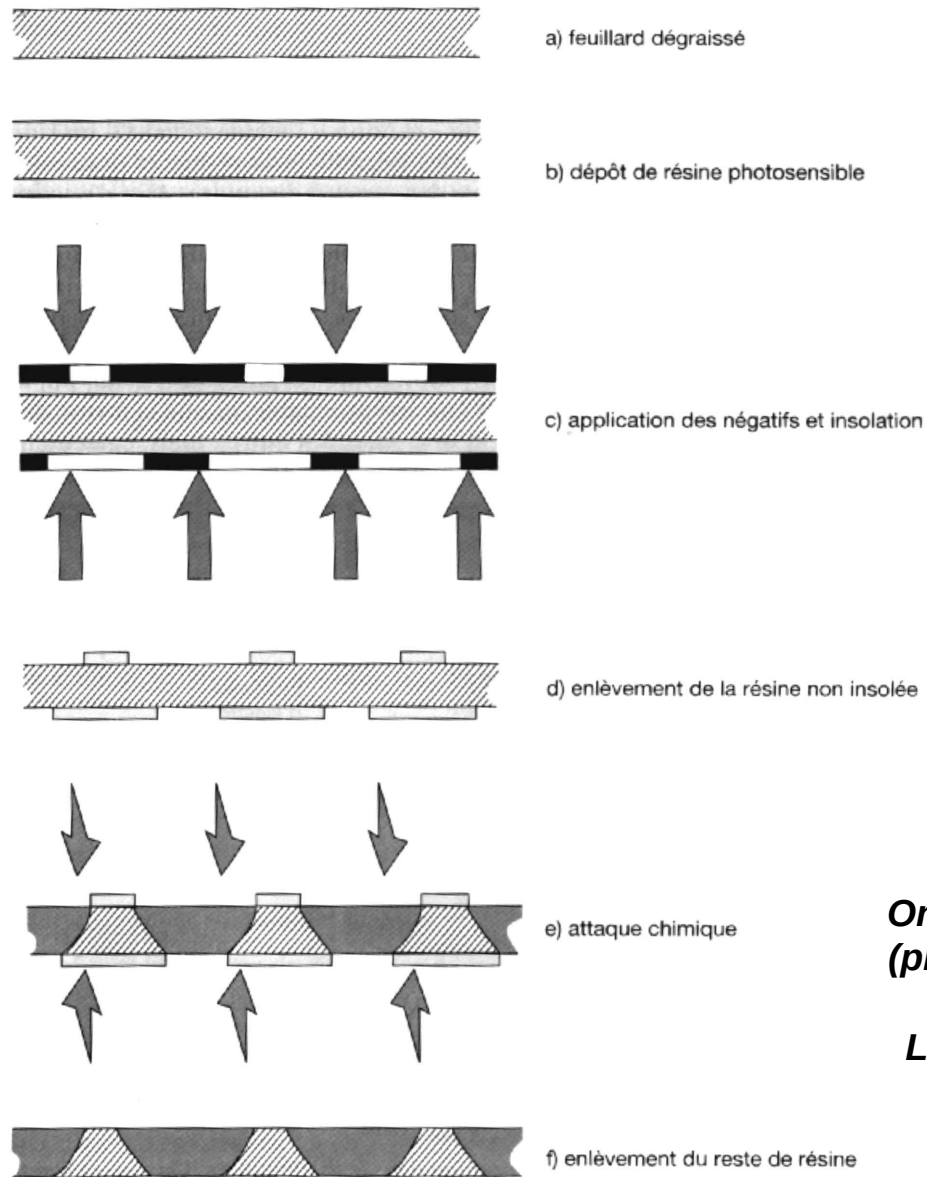


permet de distribuer les trois faisceaux électroniques
vers les luminophores
(particules d'oxydes à luminescence colorée)



structure hexagonale
(plus rigide et moins « voyante »)
pour moniteur d'ordinateur

structure linéaire
(plus simple, moins chère)
pour tube TV



Seuls 20% des électrons atteignent l'écran, 80% sont absorbés par la masque, d'où un échauffement qui, lorsque l'image est très contrastée, peut varier localement, ce qui peut entraîner une déformation locale (« flambage ») modifiant les couleurs.

Pour y remédier, on utilise une plaque en INVAR, plus stable que l'acier et qui est traitée par gravure chimique.

Principe de gravure d'un shadow mask

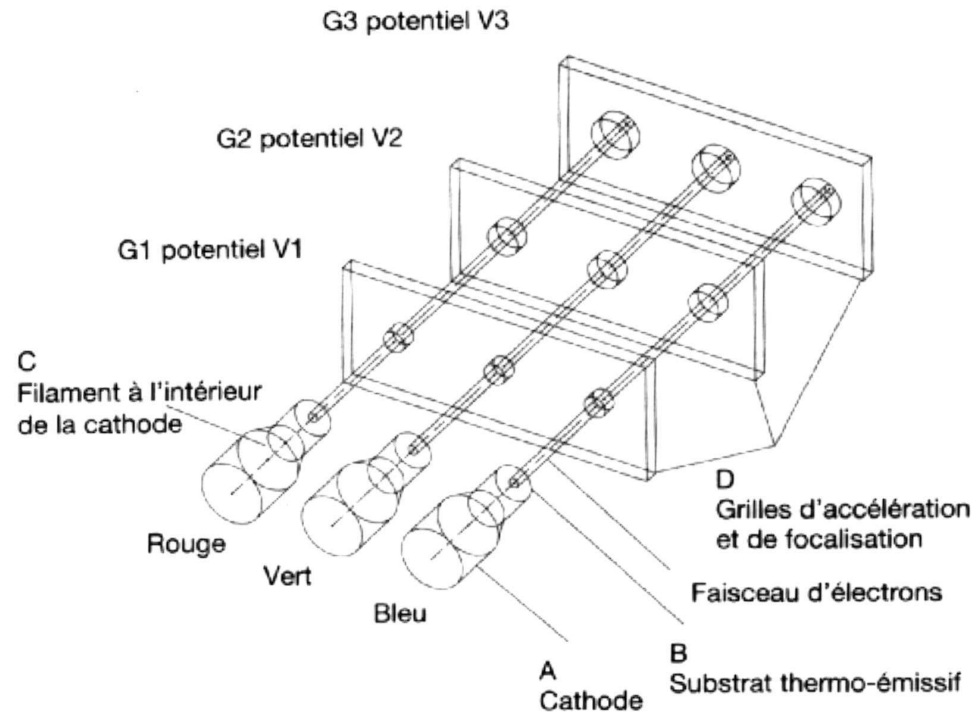
On utilise une résine photosensible aux UV (protéine avec du bichromate d'ammonium)

La partie protégée de la lumière peut être dissoute par attaque chimique

Le canon à électrons :

-cathode revêtue d'un dépôt thermo-émissif et qui est chauffée à 800°C.

-une série de grilles polarisées permettent l'accélération des électrons (30kV) et leur focalisation.



De plus ces grilles sont scellées dans des billes de verre pour assurer l'isolation électrique. Des variations importantes dans les coefficients de dilatation respectifs du métal et du verre poserait de gros problèmes.

Les méthaniers

Le transport du gaz naturel sous forme liquide permet de réduire de 600 fois le volume transporté mais nécessite des températures de -163°C à la pression atmosphérique.

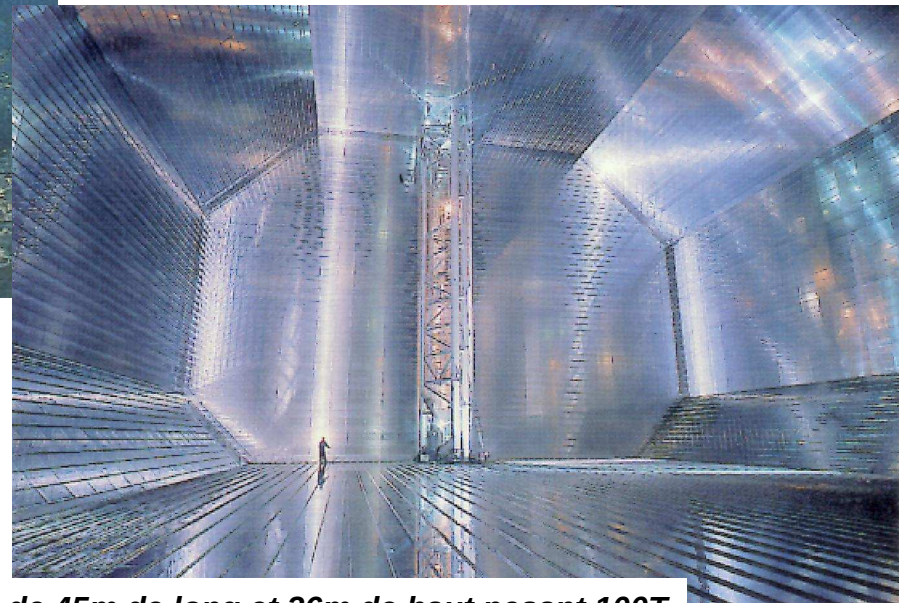
Depuis 1964, des navires méthaniers de grande capacité ($>25.000\text{ m}^3$) ont été mis en service.



navire méthanier de 130.000 m^3

Une des solutions choisies est de réaliser les cuves en INVAR

La très basse température du méthane liquide pose des problèmes de dilatation thermique.



Cuve de 45m de long et 36m de haut pesant 100T

b) « Métallurgie » des poudres

Pour les métaux et les céramiques...

Techniques courantes d'élaboration de pièces :

- fonderie

- directe (moule)(bronze)
- lingots (forgeage et usinage)
- *permet de réaliser des pièces assez compliquées*
- *nécessite souvent des températures élevées (Fe :1500°C, W : 3370°C...)*

- emboutissage

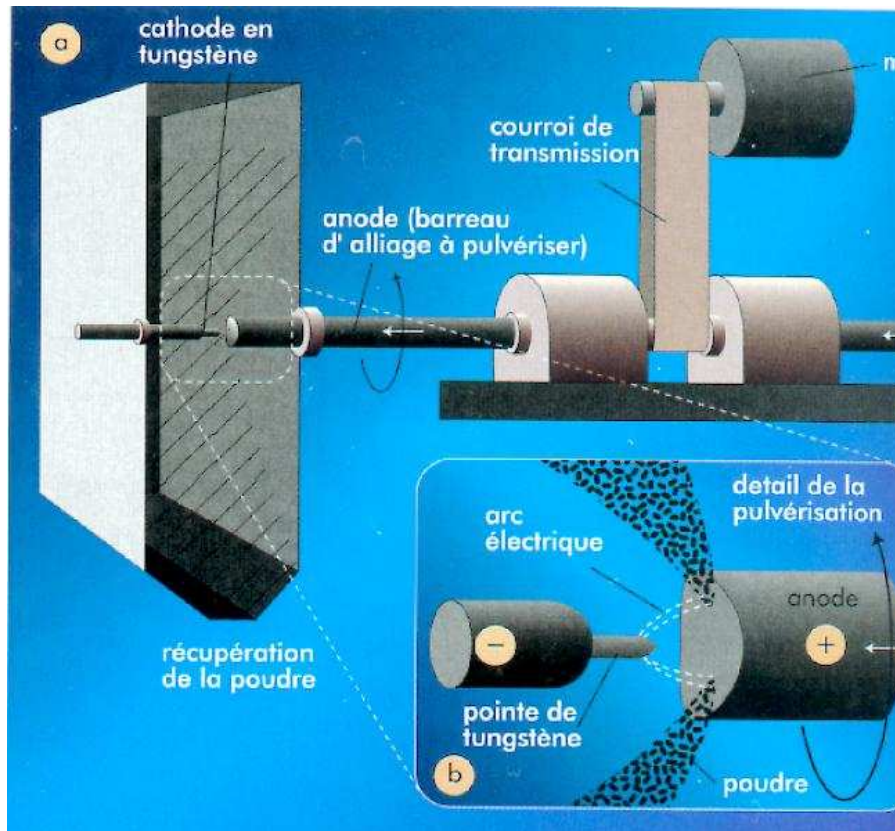
À partir de tôles, facile mais ne permet pas des pièces très compliquées
→ *automobile*

- électroérosion

- *permet de réaliser des pièces très compliquées*
- *très cher ! (perte importante de matière)*
→ *aéronautique..*

→ **Métallurgie des poudres**

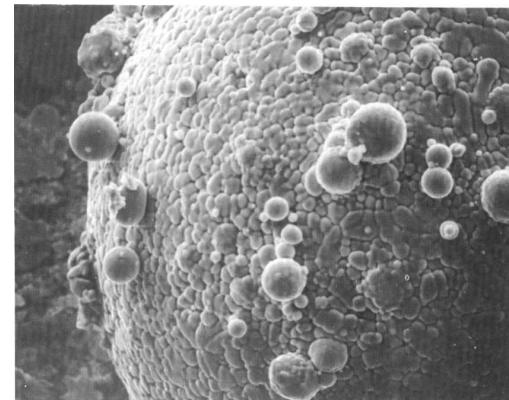
Au départ : de la poudre



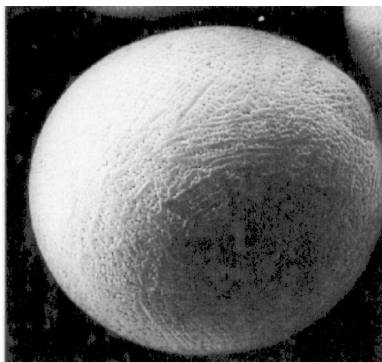
On peut obtenir la poudre métallique par pulvérisation de l'alliage sous l'effet de la « force centrifuge » après l'avoir fondu par arc électrique

Les gouttelettes se solidifient et sont récupérées dans la partie inférieure de la chambre

Elles sont généralement sphériques et présentent une structure de solidification (structure dendritique)

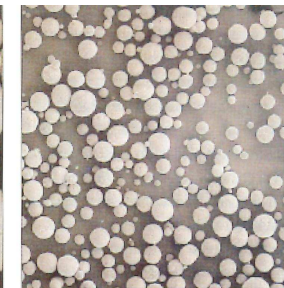
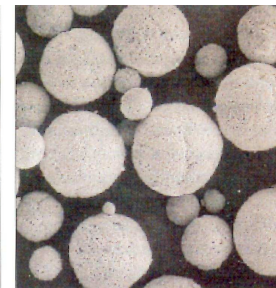
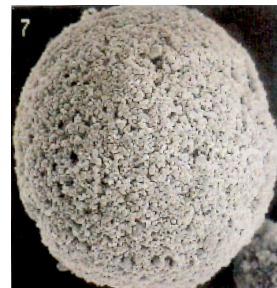


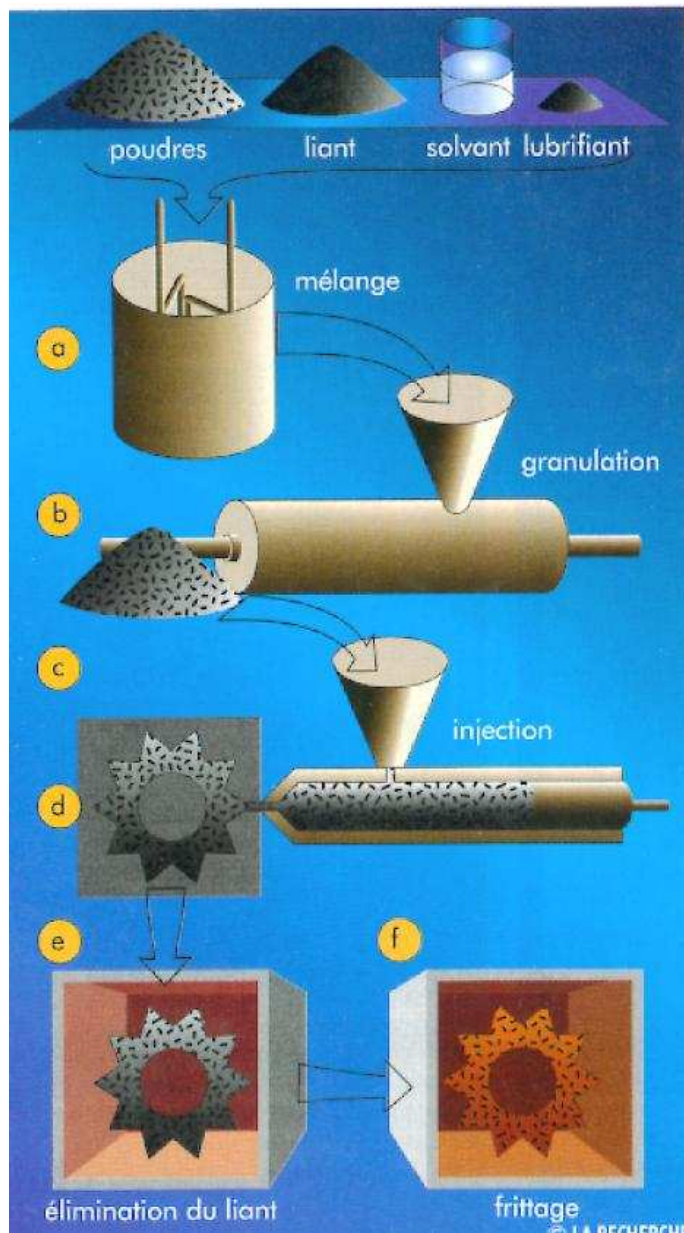
*Poudre de TA6V
(alliage de titane, Al et V)
diamètre 250µm*



*Poudre de
superalloy de Ni*

alliage de Zr





La poudre métallique est mélangée à un liant et à un solvant.

On l'injecte sous pression dans le moule de la pièce à réaliser (300 à 600 MPa)

Puis on chauffe (0,5 à 0,75TF) pour obtenir le frittage (collage et adhérence des grains par diffusion)

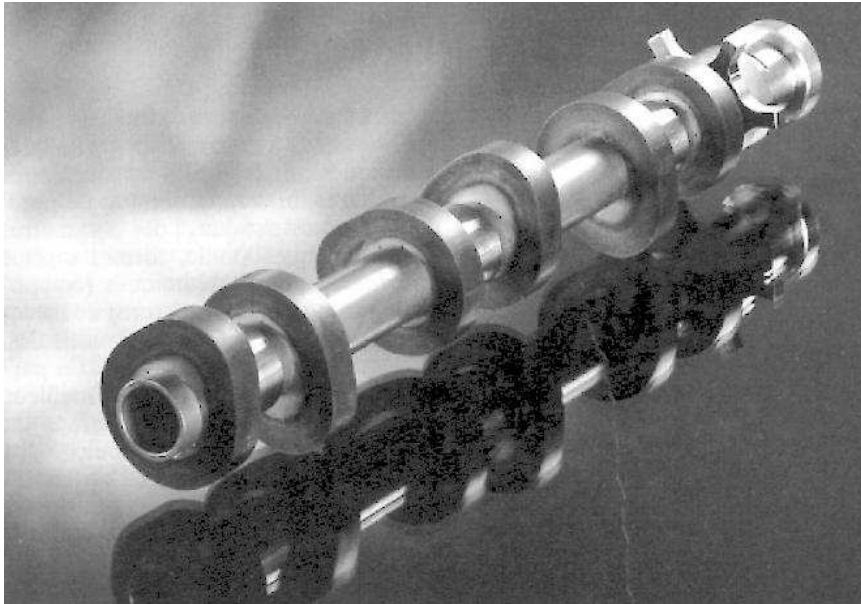
Avantages :

- adapter la porosité :
 - filtres (en bronze, inox...)
 - matériaux auto-lubrifiants (en injectant de l'huile dans les pores)
 (Fe, FeCu.. 25 à 35% porosité)
- mettre ensemble des matériaux très différents
 - pièces anti-friction en acier avec Pb, graphite, MoS₂...
 - alliages réfractaires avec W, Mo..

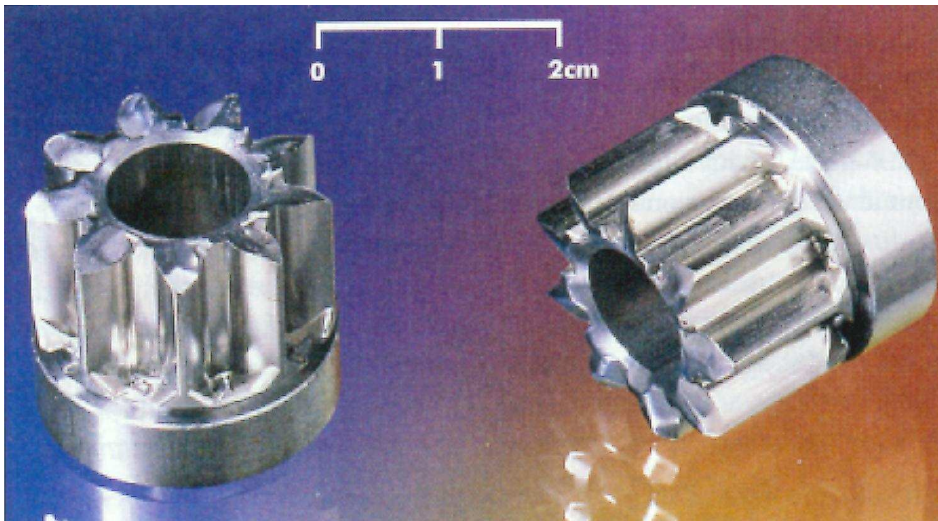
Boîtier de montre
avant après frittage



Exemples de pièces en alliage fritté

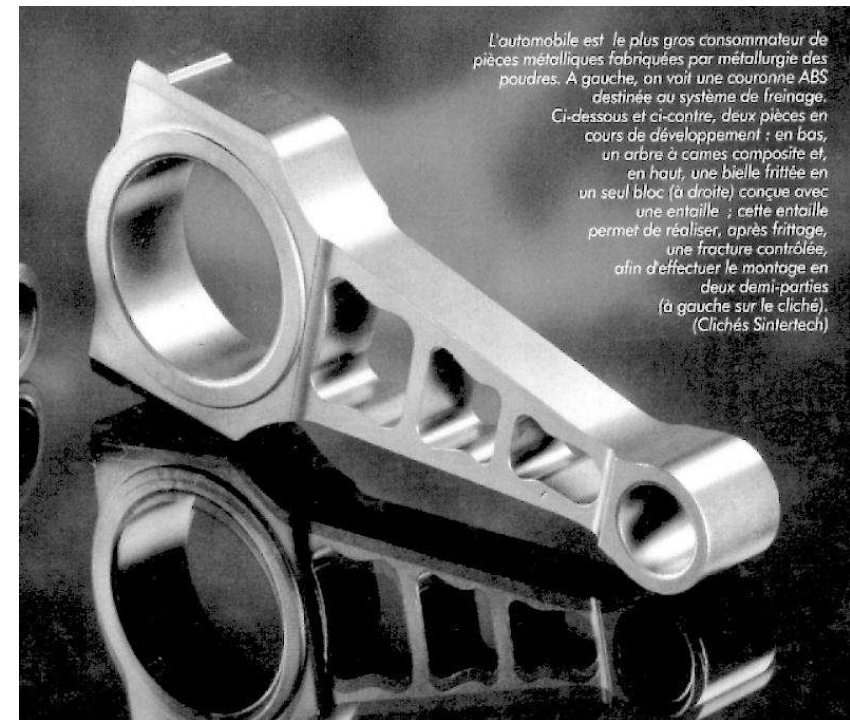


Arbre à cames



pignons de démarreur

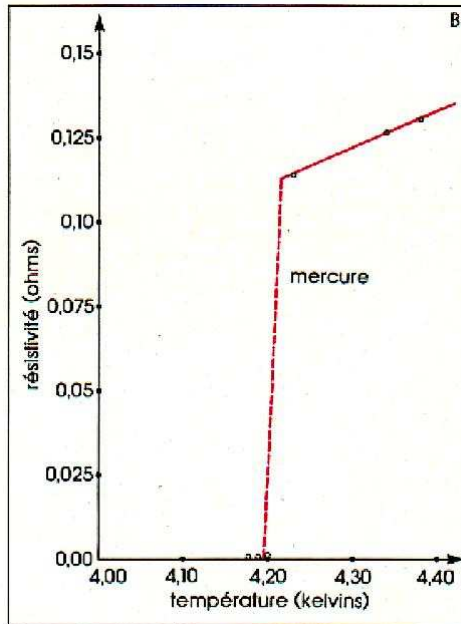
L'automobile, l'aéronautique



bielle

c) Les matériaux supraconducteurs

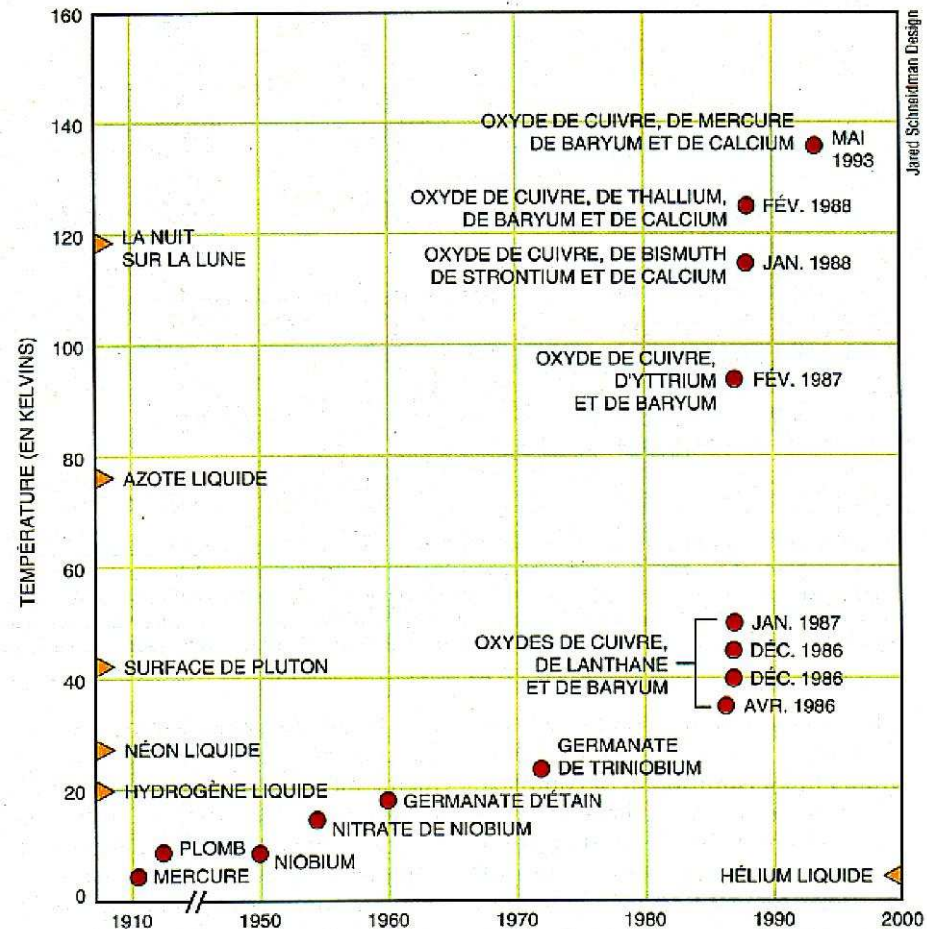
En dessous d'une certaine température, certains éléments ou composés présentent une très faible résistivité électrique.



Découverte en 1911 par Holtz et Onnes dans le mercure,

des composés supraconducteurs « haute-températures » ont été découverts ces dernières années.

- conditions normales :
133 K
- sous haute pression (300.000 atm) :
160 K ($\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$)
- en couche monoatomique (30 nm) :
-23 à 7°C

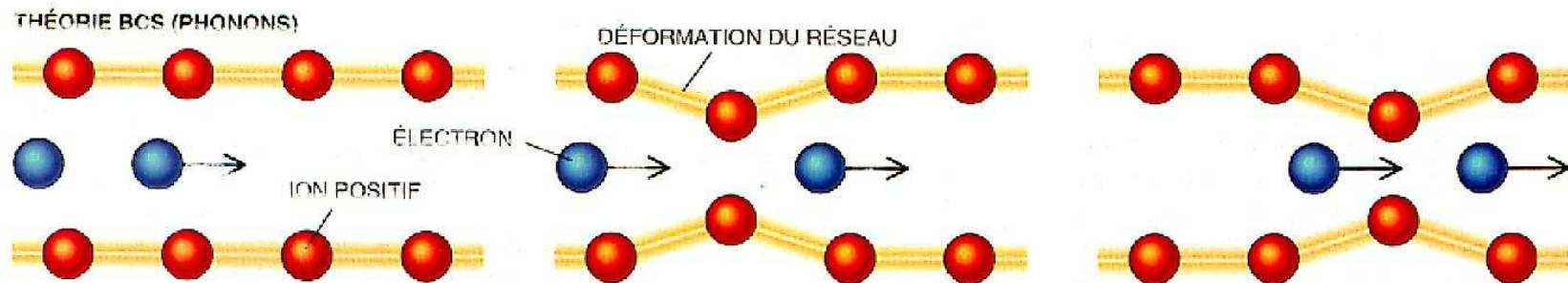


Principaux matériaux supraconducteurs :

- métaux : Zn (0,79K) Al (1,14K) Sn (3,69K) Hg (4,12K) Pb (7,26K)
- alliages : Nb-Ti (9K) Nb₃Sn (18K)
- composés : YBa₂Cu₃O₇ (93K), HgBa₂Ca₂Cu₃O₈ (133K)

d'où vient la supraconductivité ?

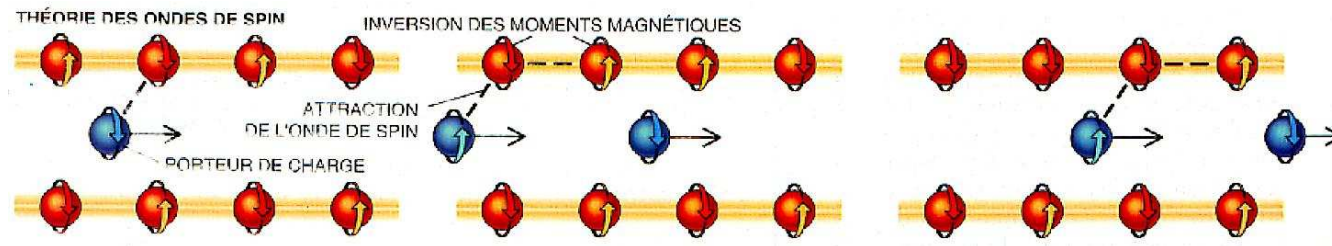
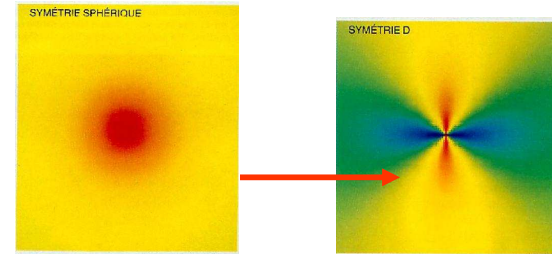
- dans un métal la conduction électrique est assurée par des électrons individuels
- dans un supraconducteur, il y aurait un couplage quantique entre 2 électrons appariés (paire de Cooper) et le réseau d'ions (interaction avec les phonons)
(*théorie BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer)*)



Mais cette interaction devrait se rompre au dessus de 30K !

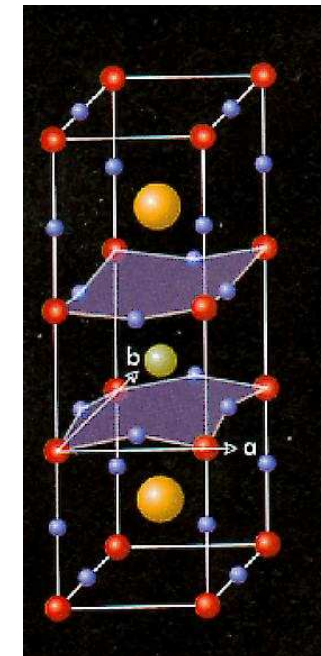
Plusieurs hypothèses sont avancées... :

- la fonction d'onde représentant le couplage entre électrons n'est plus sphérique mais présente 4 lobes
- ce ne sont plus des interactions avec les phonons mais avec les spins



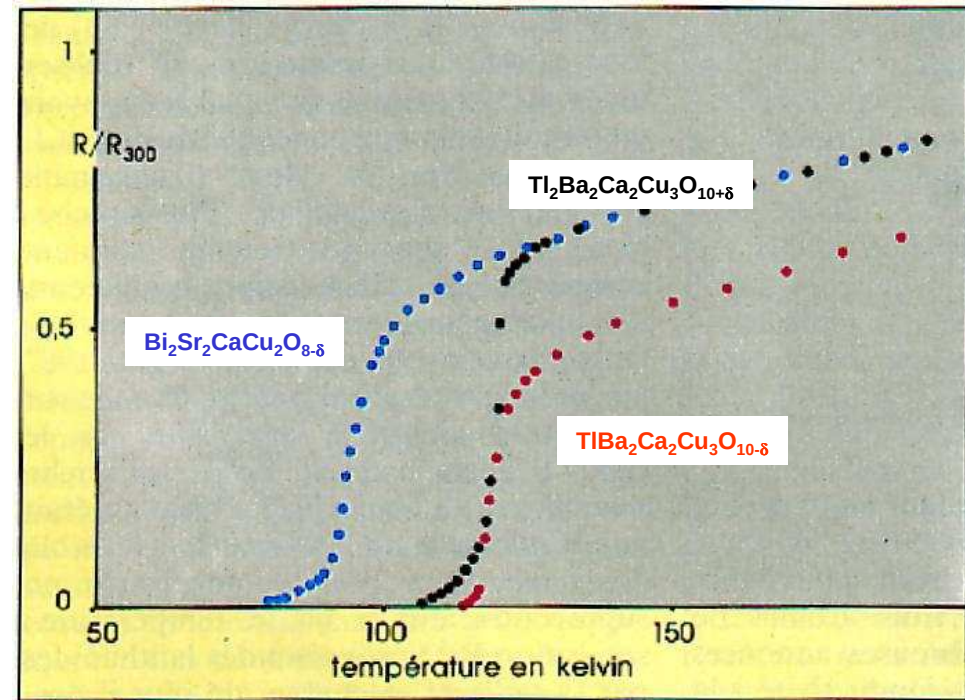
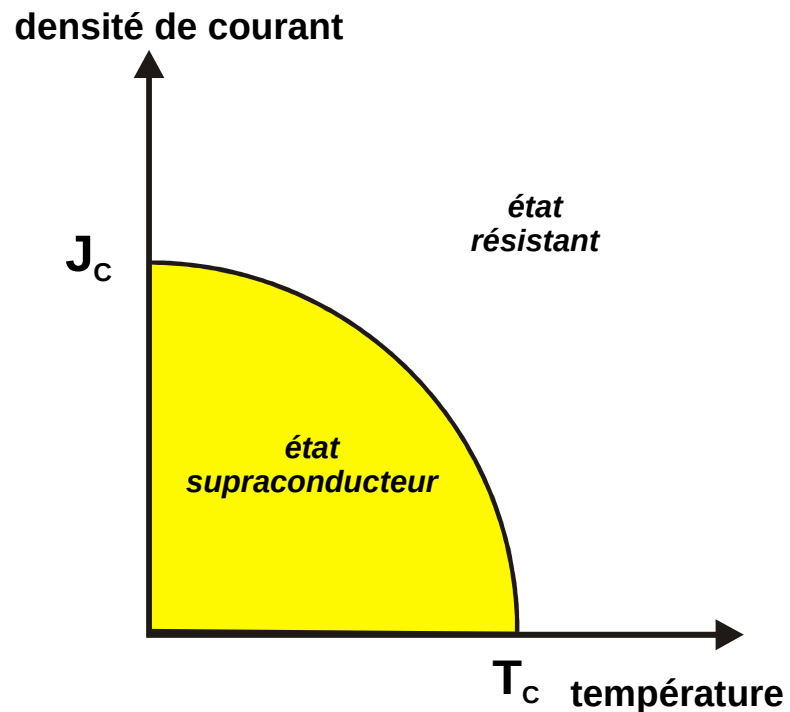
structure de l'oxyde de Cu, Ba et Y
(type perovskite)

*le courant supraconducteur circule
dans les plans Cu-O (violet)*



L'état supraconducteur dépend à la fois :

- de la température
- de la densité de courant
- du champ magnétique



Courbe de variation relative de la résistivité (par rapport à la température ambiante) pour trois composés « haute-température »

domaine de supraconductivité en fonction de la densité de courant et du champ magnétique

Caractéristique des principaux matériaux supraconducteurs

	Métaux basse T _c (J _c donné à 4K-He liquide)		Céramiques haute T _c (J _c donné à 77K-N ₂ liquide)		
Supraconducteurs	Nb-Ti	Nb ₃ Sn	YBaCuO	BiPbSrCaCuO	TlBaCaCuO
T _c température critique (K)*	9	18	93	110	125
J _c d ^{te} courant critique (A/mm ²) #	~ 3. 10 ⁴	~ 10 ⁴	600	470	
B _c induction critique à 4K (T)	15	27	> 60 ?*	> 60 ?*	
* le degré Kelvin, noté K, est l'unité de température absolue 10 K = - 273 °C ; 273 K = 0 °C) # en champ nul pour le matériau nu, et, pour les hautes T_c, meilleurs résultats publiés début 91 pour des matériaux polycristallins texturés (c'est-à-dire constitués, comme il est normal, de grains ou cristaux microscopiques, mais volontairement allongés dans le sens du courant) ≠ à 77 K, l'induction critique serait de l'ordre de 10 T, mais pour l'instant en pratique, l'induction maximale possible, en présence d'une densité de courant élevée, est inférieure au Tesla.					

Les matériaux supraconducteurs « hautes températures » ne permettent pas des densités de courant très élevées, ce qui en limite pour l'instant l'intérêt.... De plus ils sont fragiles et ne peuvent être mise en forme sous forme de filaments de grandes taille

Les matériaux supraconducteurs « basses températures » par contre nécessitent de l'hélium liquide qui est très cher...

(He T_c : 4K, N₂ T_c : 77K)

Autres matériaux supraconducteurs plus « exotiques »

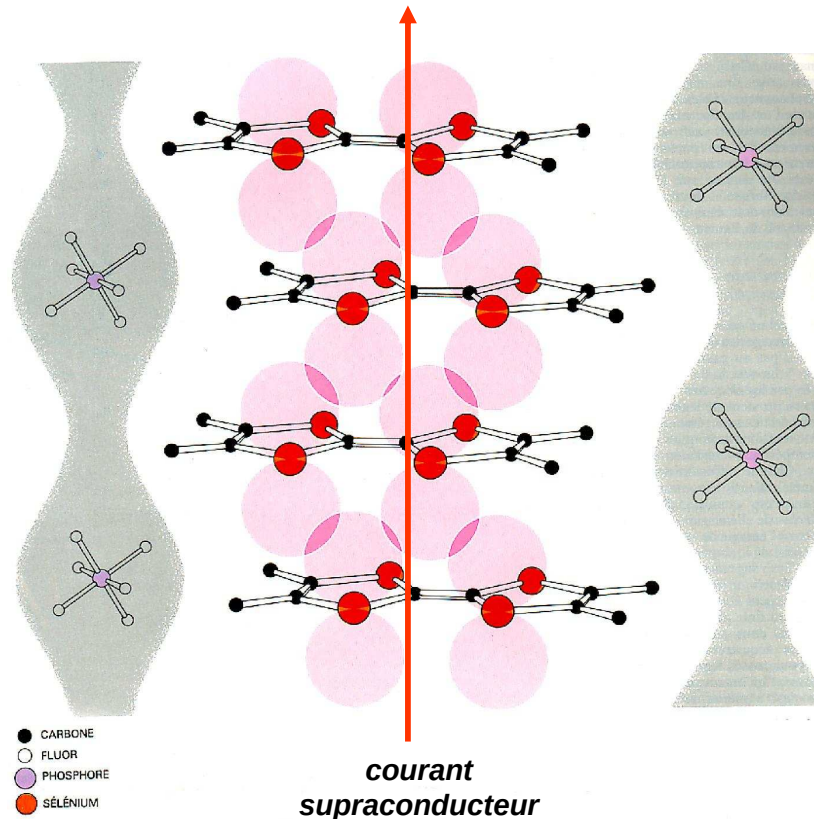
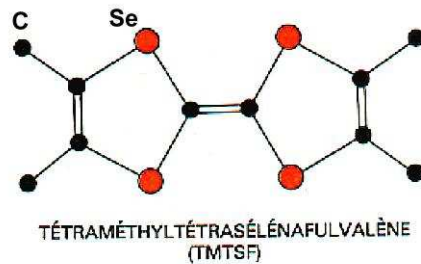
Alliages f-pd

UBe13, UPt3, CeAl3...

*un actinide ou un lanthanide (4 ou 5f) avec un métal normal, par couplage électrons f avec électrons p-d
Possède un champ critique magnétique très élevé...*

-supraconducteurs organiques

si on fait réagir du TMTSF (tétraméthyl-tétraseleña-fulvavène) avec des ions PF₆, on obtient un corps supraconducteur (20K)

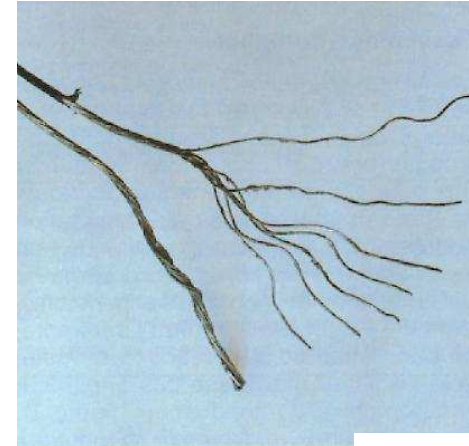


Applications

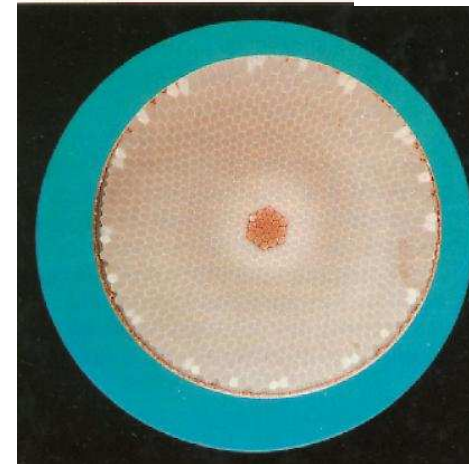
existantes, envisagées, envisageables, utopiques...

- aimants supraconducteurs
 - accélérateur de particules
 - fusion thermonucléaire (TOKAMAK)
 - trains à sustentation magnétique...
- stockage de l'énergie électrique
pas rentable actuellement (futur ?)
- cryoalternateur de 2500MW
a été étudié par Alsthom et EDF
pas de perspective prochaine...

***Tant que l'on ne disposera pas de supraconducteurs
« hautes températures » avec de bonnes propriétés
mécaniques et des facilité de mise en forme...***



GEC-Alsthom



En haut : 1969 fils supra constitués de 7 brins de 0,3μm de diamètre

En bas : fils actuels :

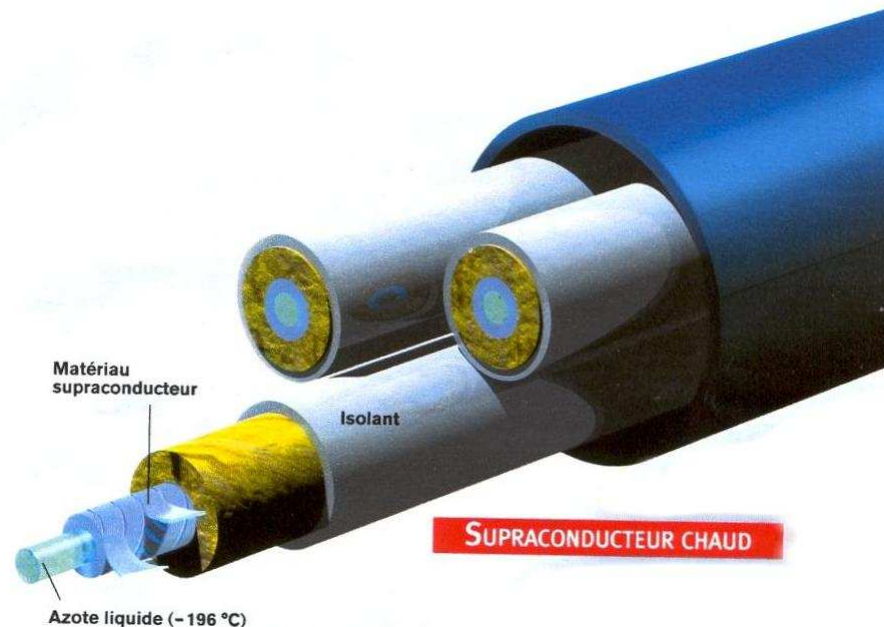
- âme en cupronickel
- 920.304 brins de 0,1μm de diamètre (913 filaments par hexagone) en Nb-Ti (pour limiter les effets d'auto-induction les fils sont constitués de nombreux filaments

Lignes électriques « haute-tension » supra conductrices

- expérience américaine

Detroit (Michigan) :
ligne de 120 mètres sous 24.000 volts
puissance transportée : 60 MW
alimente 14.000 foyers

poids : 110 kg (remplace 8.200 kg de Cu !)



câble : rubans supraconducteur enroulés, autour d'une gaine souple
où circule de l'azote liquide à -196°C

on évite une perte par effet Joule de 10 à 20% de l'énergie totale

Le gain de puissance n'est cependant que de 3 en raison du champ magnétique émis par le câble qui perturbe les câbles voisins...

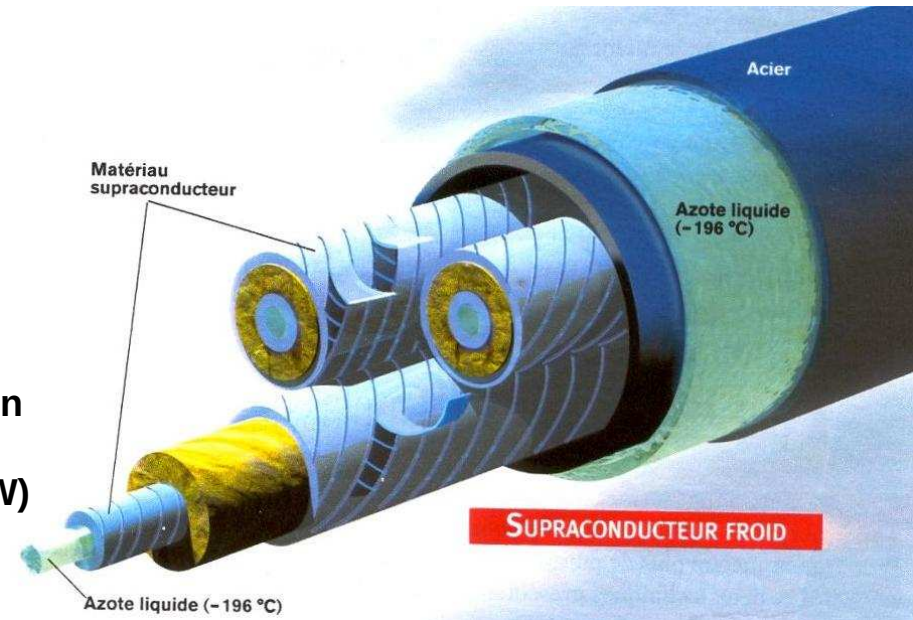
- expérience française (EDF)

Pour remédier à ce problème, on a conçu des câbles dits « diélectriques froids » dont le cœur et la périphérie sont parcourus par de l'azote liquide...

Plus chers mais plus efficaces, ces câbles peuvent transporter 10 fois plus de puissance que celui de Detroit.

Un câble expérimental de 225kV a été développé par « Pirelli-câbles et systèmes » en collaboration avec EDF R&D (fin 2000)

Une ligne prototype de 50m sous 225kV (>600MW) sera réalisée aux Renardières en 2002



avantages : forte puissance et absence de perte

inconvénients : coût et maintenance (azote liquide)

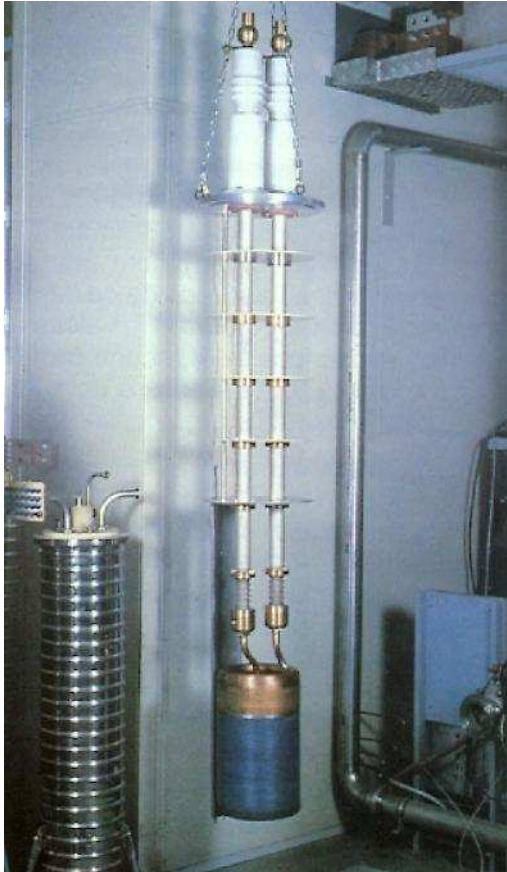
- expérience japonaise (Tokyo Electric Power)

câble constitué de rubans supraconducteurs entrecroisés pour mieux répartir le courant dans le câble, quelque soit l'intensité

câble de 100m, sous 66kV (114 MW)

gain (perte) : 30% par rapport à Detroit, 80% par rapport câble Cu

Une application réelle mise en œuvre à EDF :

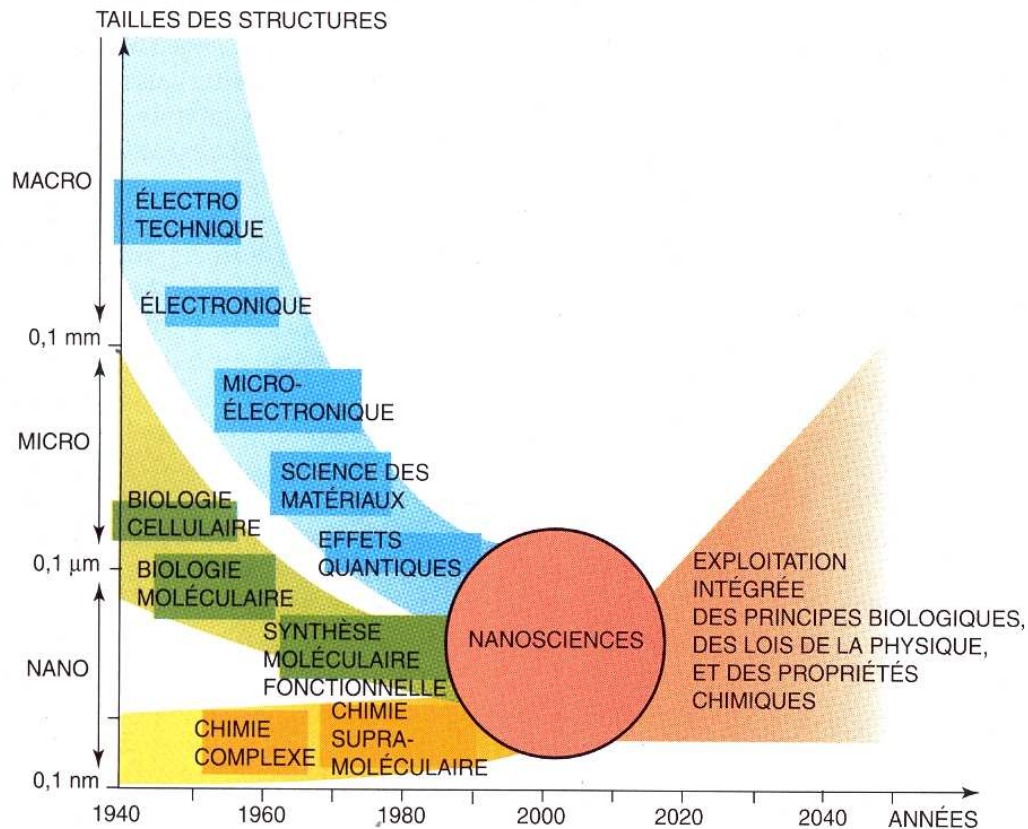


Un limiteur de courant réversible (Nb-Ti)

**Le circuit supraconducteur est inséré dans le circuit MT (15kV)
En cas de court-circuit la densité de courant augmente
brutalement (jusqu'à 11.000 A)
A ce moment le matériau perd sa supraconductivité et le courant
chute à 240 A**

**Le court circuit supprimé, le limiteur redevient opérationnel
en quelques secondes**

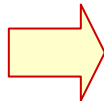
d) nanomatériaux, nanotechnologies, nanosystèmes, nanostructures...



exemple : la microinformatique

dimension d'un transistor :

- 1949 : quelques mm
- 1970 : quelques microns
- 2000 : 100 à 130 nm
- 2014 : 20 à 25 nm ?



2000 : P IV 40 millions de transistors

2015 : 5 milliards ?

limite physique de la microlithographie...

macrostructure



microstructure

haut

physique classique

bas

mésosstructure



?

nanostructure

haut

physique quantique

bas

atome

*méthode ascendante par
synthèse chimique à
partir d'atomes
puis de molécules*

*autre technologie : constructions
par déplacement atome par atome
(effet tunnel ou force de Van der Waals)*

exemples d'application des nanotechnologies

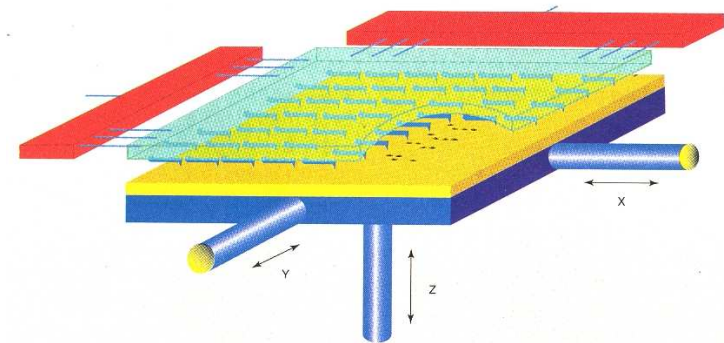
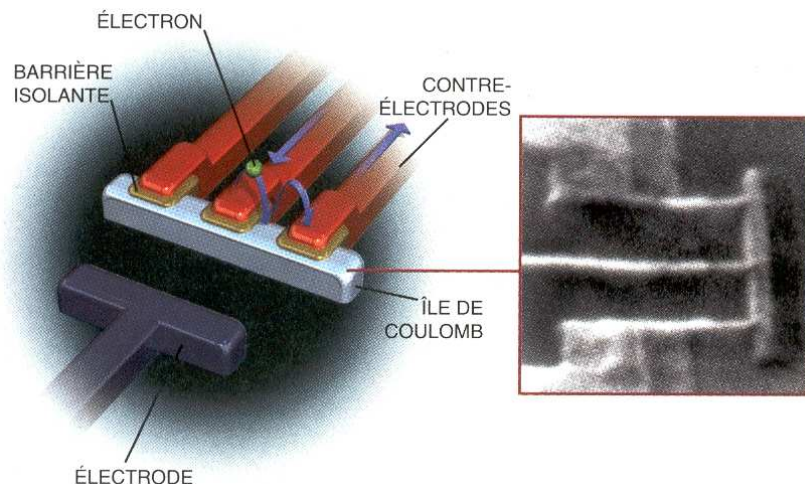
présent :

- particules nanoscopiques de carbone pour durcir la gomme des pneus
- utilisation de particules de TiO_2 nanoscopiques dans les crèmes antisolaires (agissent par diffusion des UV)
- couches alternées de Cr/Fe de 1 à 3 nm d'épaisseur :
obtenir une magnétorésistance très élevée pour des têtes de lecture de disques durs

futurs...

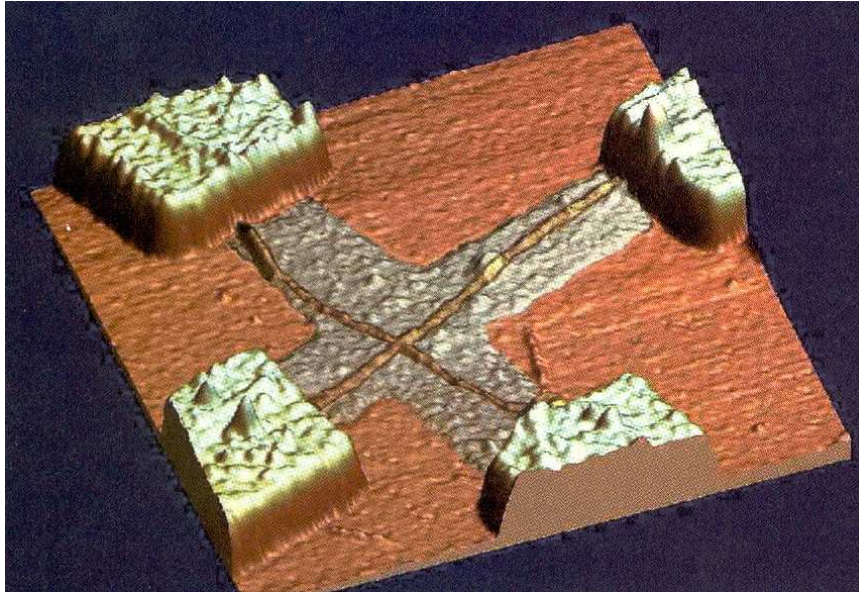
- « millipède » d'IBM utilisation de pointes d'AFM pour enregistrement de données (un milliard de bits au mm^2)

- thérapie
- matériaux intelligents (surface autonettoyante grâce à une nanostructure ➡ effet lotus)
- transistor à un seul électron....



1024 pointes « AFM » stockent et lisent l'information par gravure d'un film polymère de quelques nm d'épaisseur

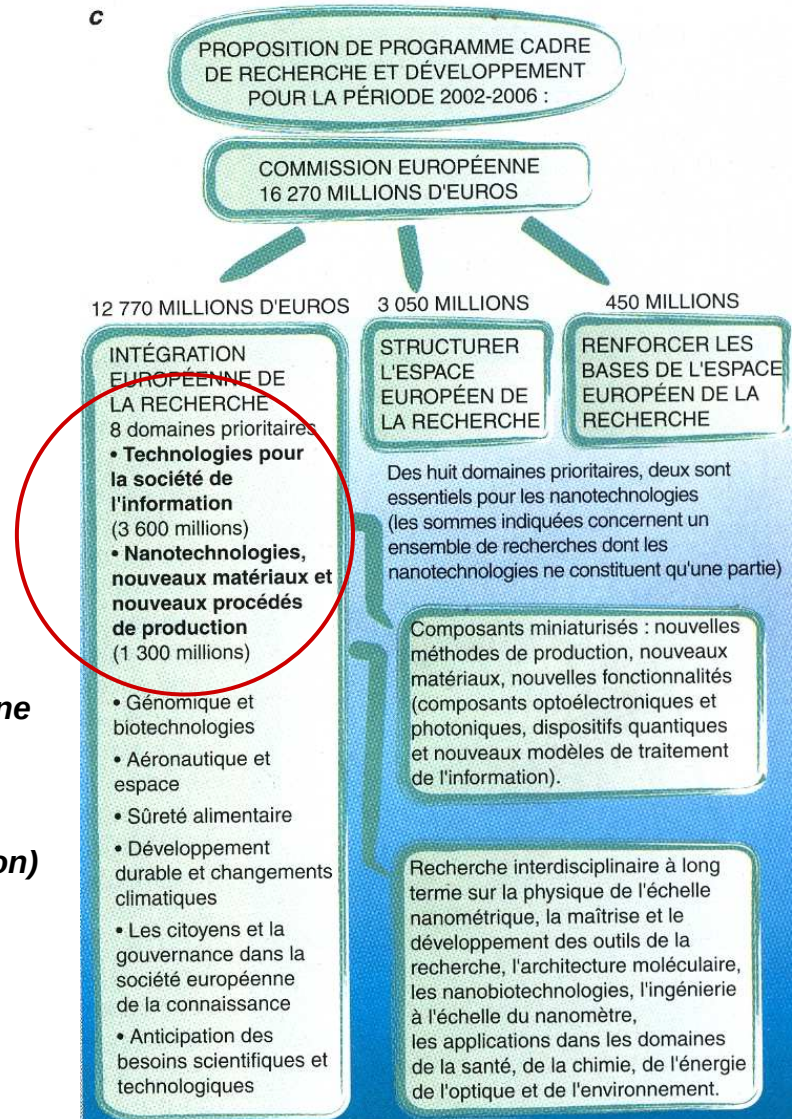
transistor à 1 électron
dimension actuelle de la « boîte » quantique :
30 à 100 nm



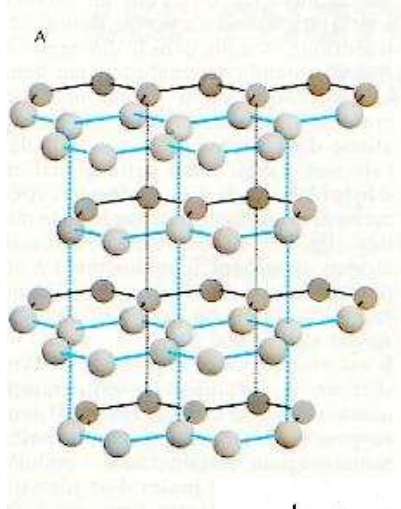
greffe de nanotubes de carbone sur 4 électrodes déposées sur une surface de silice par ancrage électrostatique

*projet de recherches de la communauté européenne
les 2 premiers domaines prioritaires sont sur la nanotechnologie*

(On observe un effort similaire aux USA et au Japon)



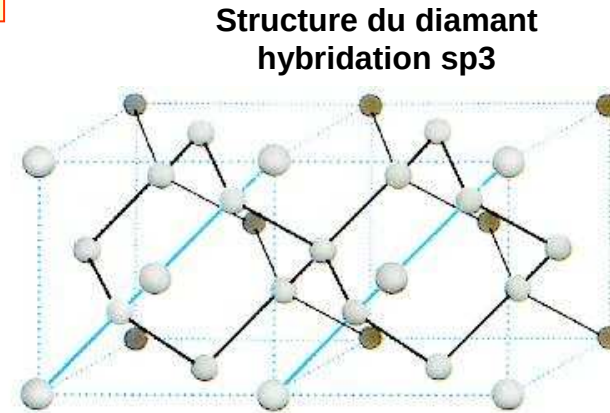
Les nanomatériaux : fullerènes et nanotubes



Structure du graphite
hybridation sp^2

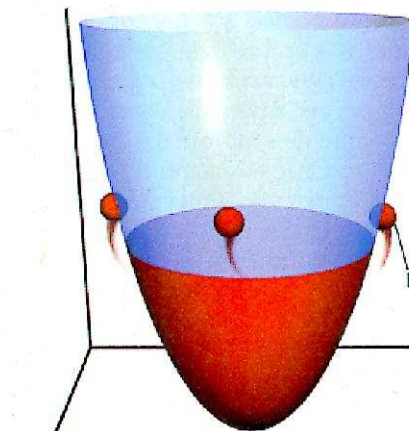
- 3 liaisons coplanaires fortes
- une liaison perpendiculaire faible

semi-métal

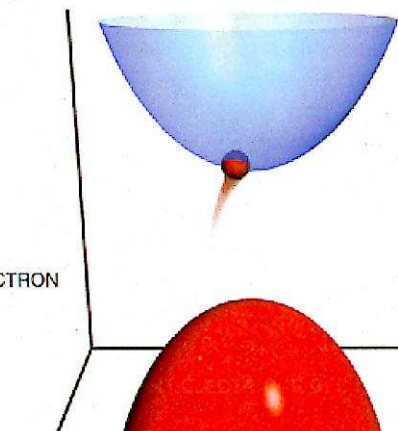
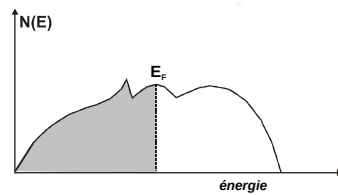


Structure du diamant
hybridation sp^3

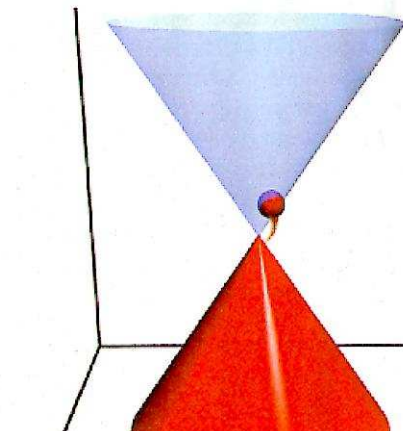
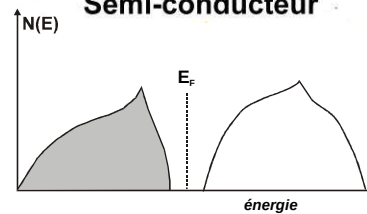
4 liaisons fortes isolant parfait



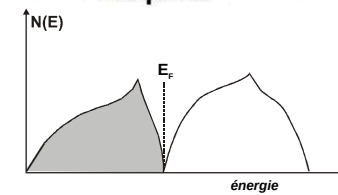
Métal



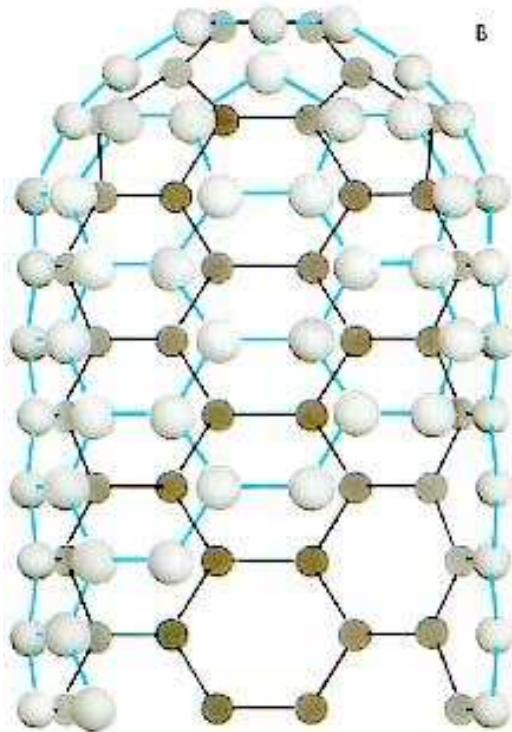
Semi-conducteur



Graphite

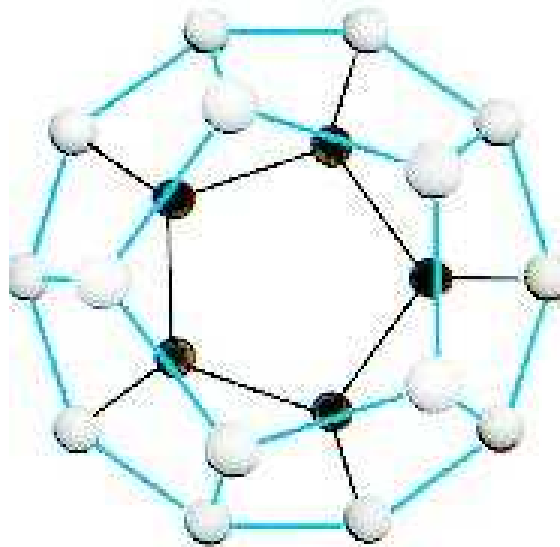
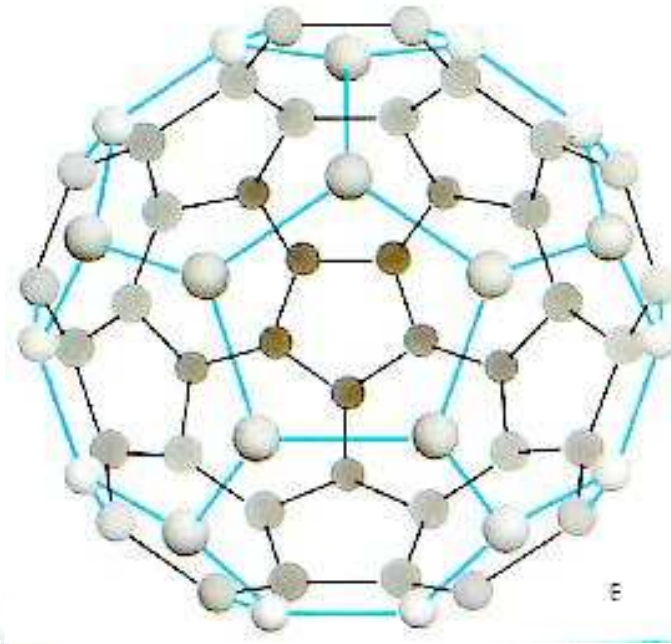


Les fullerènes ont été découverts en 1985
Ils sont obtenus par arc électrique à partir
d'électrodes en graphite



Fibre fullerénique
hybridation sp^2

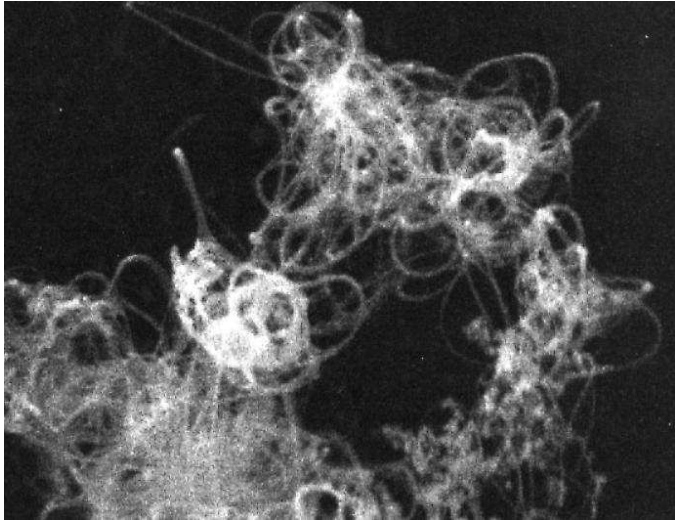
Fullerène C60
hybridation mixte
 $sp^2 - sp^3$



Fullerène C20
hybridation sp^3

Les nanotubes

Découverts en 1991 par Iijima (NEC)



Fibres de carbone observées en TEM. Ce sont des filaments de quelques dixièmes de mm de long et de 10 à 20 nm de diamètre. Elles sont constituées de nanotubes de carbone de 1,4 nm de diamètre.

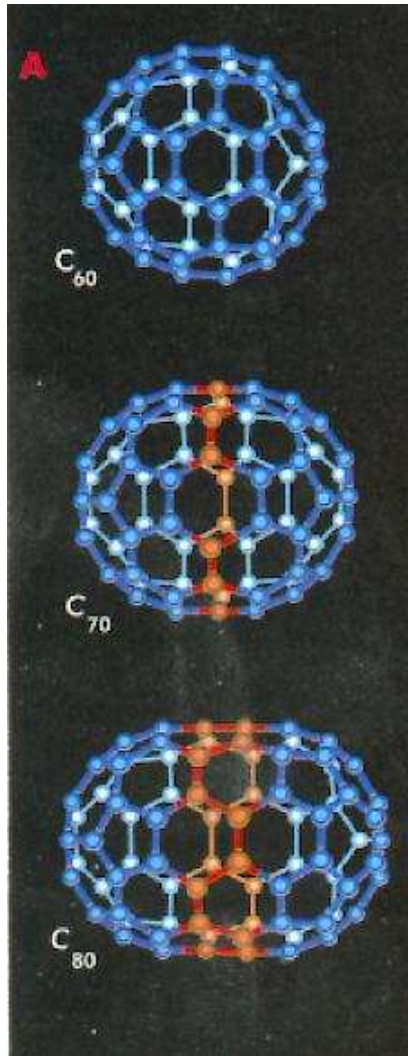
Ces nanotubes sont obtenus à partir de fullerènes (en utilisant certains métaux comme catalyseur)

Propriétés :

- supraconducteur (16 à 33K)
- magnétique à basse température (16,6K)
- extraordinaires propriétés mécaniques
 - module de Young (limite élastique) 4000 GPa (acier : 200)
 - contrainte de rupture : >300 GPa (acier 1 à 2 GPa)

L'expérimentation est impossible... seule la simulation numérique nous permet de comprendre ces matériaux...

Comment se forment les nanotubes ?



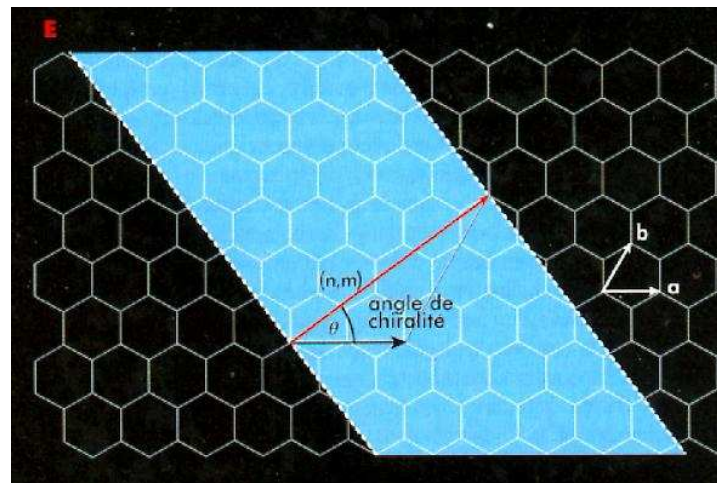
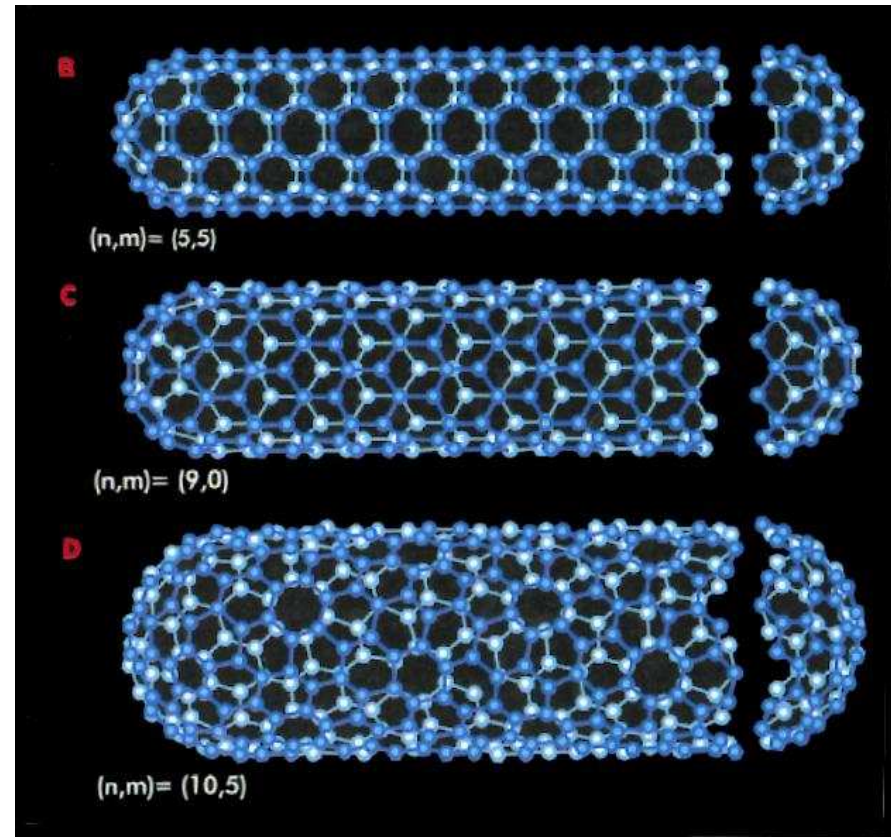
En ajoutant des ceintures
d'atomes au C_{60}
(footballène)

en fauteuil

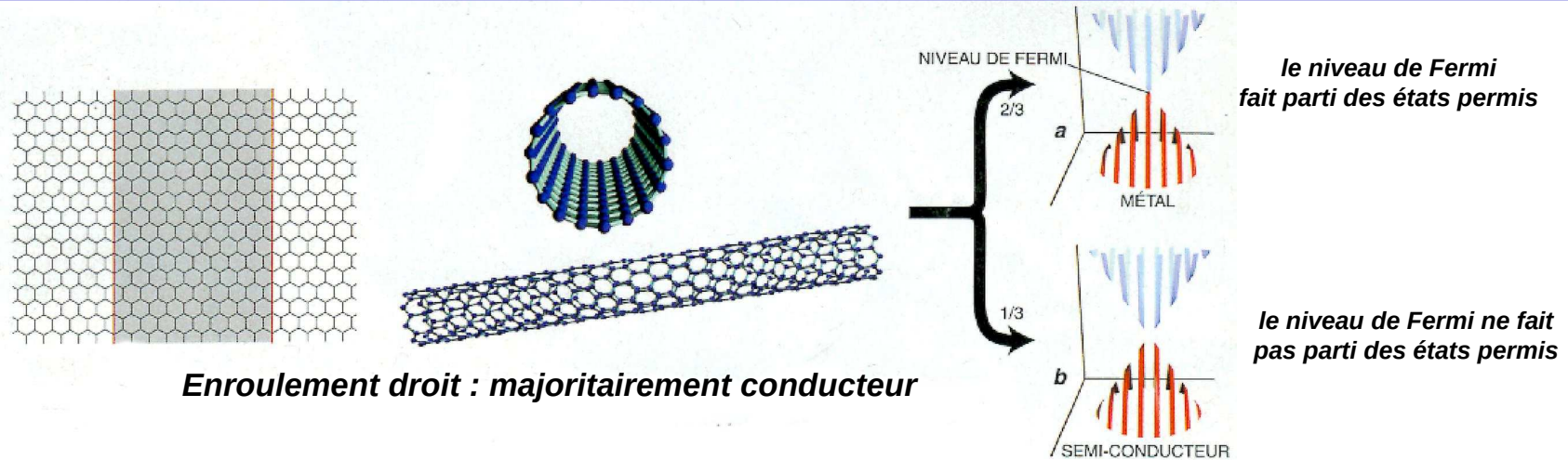
en zig-zag

quelconque

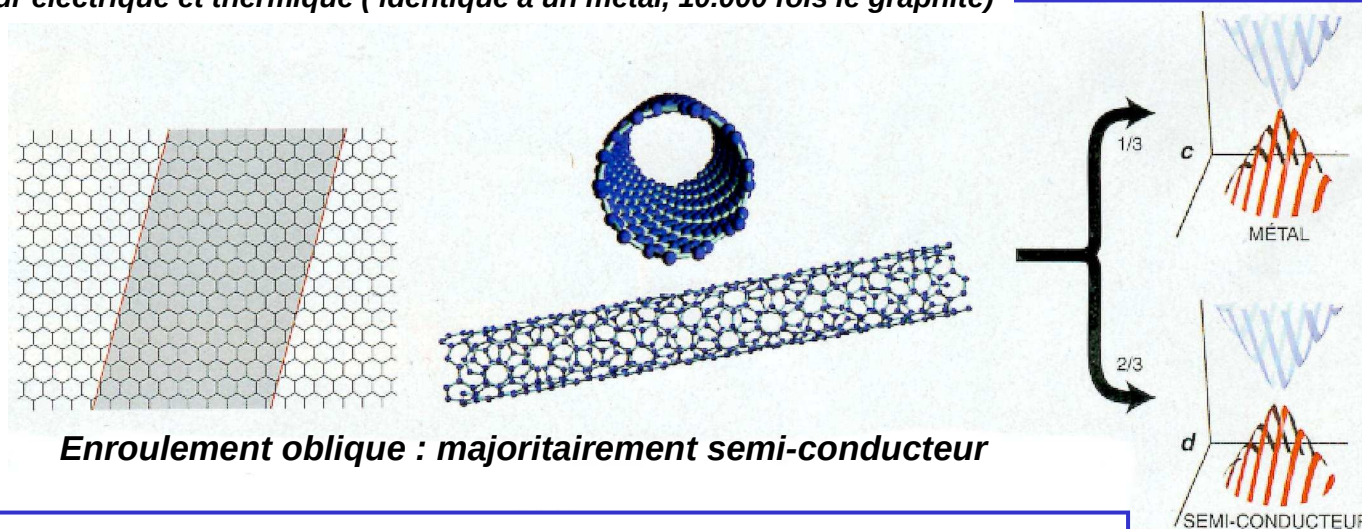
En enroulant un
feuillet de graphite
bidimensionnel



Suivant la manière dont ils sont réalisés, leurs propriétés électriques sont différentes



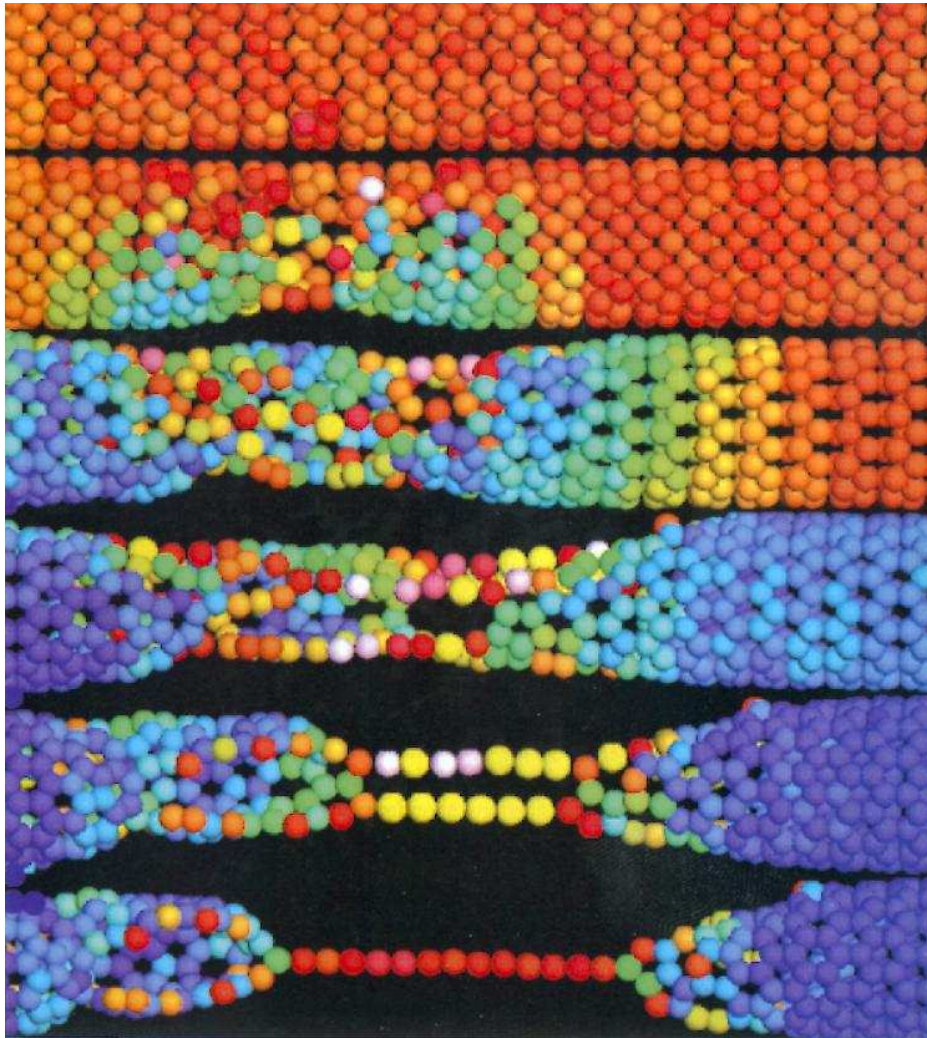
très bon conducteur électrique et thermique (identique à un métal, 10.000 fois le graphite)



Les nanotubes ont des gaps compris entre 0 (métal) et 1,14 eV (semi-conducteur) en fonction du diamètre du tube (plus le diamètre augmente et plus le gap diminue)

malheureusement, on ne sait pas encore maîtriser la production d'un type donné

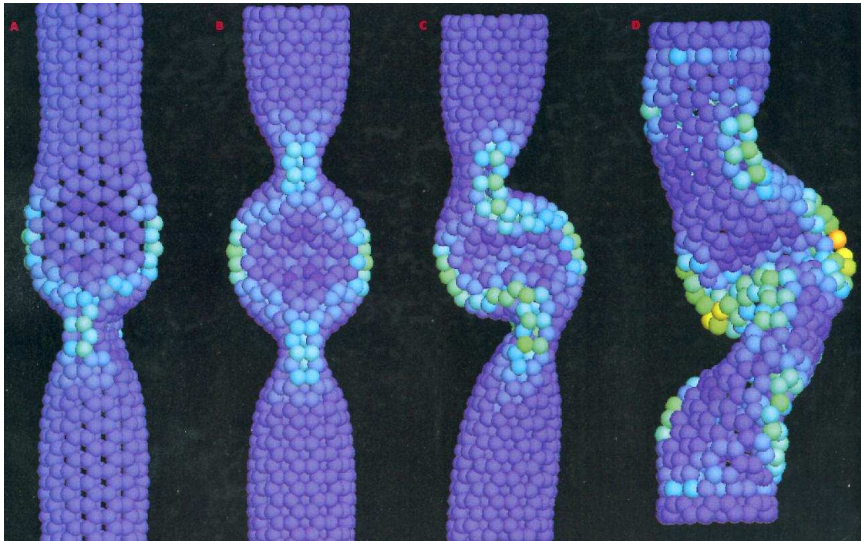
Simulation d'un essai de traction sur un nanotube « zig-zag »



L'application d'une tension élevée provoque un germe de fracture qui s'étend

les chaînes monoatomiques dégénèrent pour former une chaîne unique.

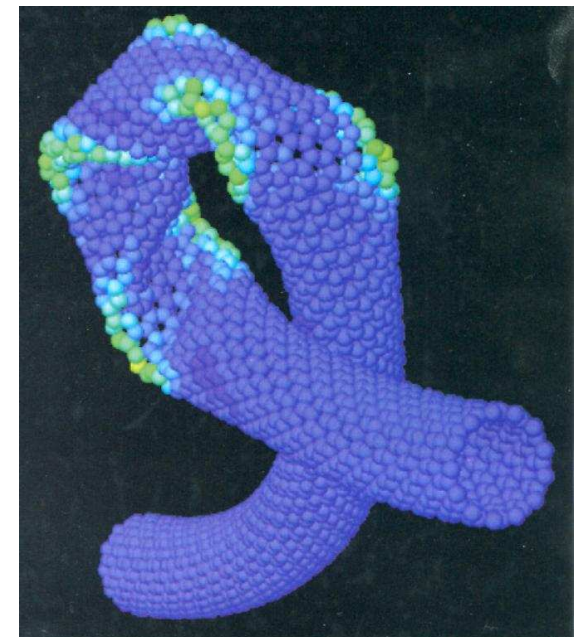
Si la tension persiste, cette chaîne s'allonge en « détricotant » le nanotube.



Simulation d'un essai de compression



Simulation d'un essai de torsion



On peut réaliser des fibres en nanotubes, 100 fois plus résistants que l'acier et 6 fois plus légers...

La fabrication de longues fibres est techniquement possible (CRPP-CNRS Bordeaux)

nœud formé avec une fibre de 30 μ m de diamètre



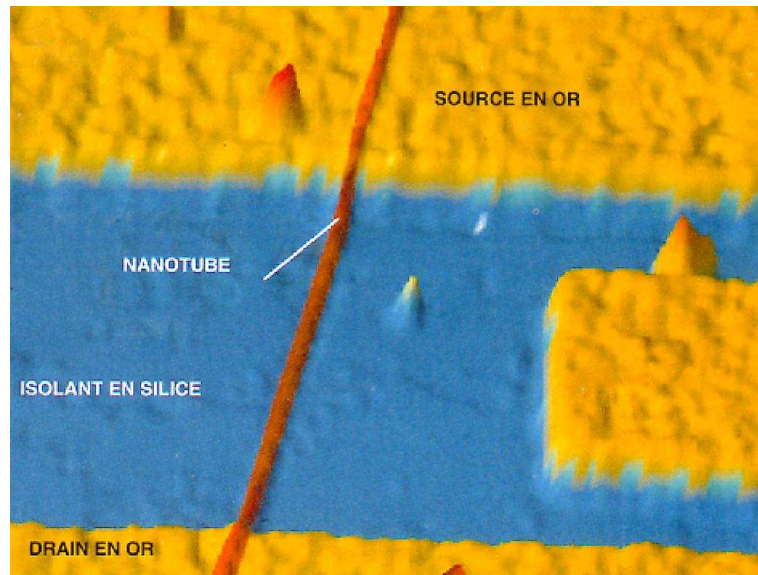
De plus ces fibres peuvent se déformer sous l'effet d'un champ électrique (et inversement produire de l'énergie électrique lorsqu'ils sont déformés)

On peut envisager d'en faire des muscles artificiels, plus résistants que les muscles humains et très rapides (étude menée par l'Université de Bordeaux 1 et Honeywell)

On peut aussi imaginer des « voiles » de nanotubes qui fournirait de l'énergie sous l'effet du vent !

l'extrémité d'un nanotube peut émettre des électrons par effet de champ mais avec des tensions faibles et sans dommage... ils pourraient servir à réaliser des écrans plats en remplacement des cristaux liquides...

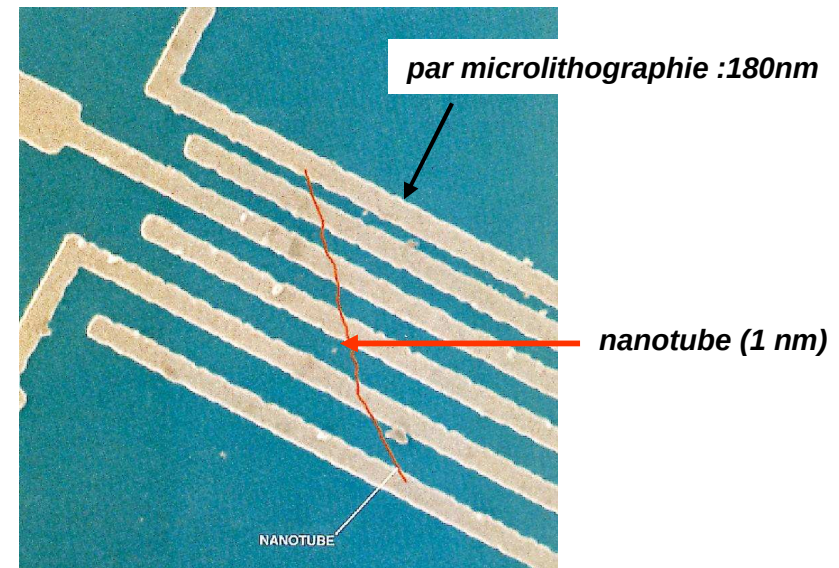
Motorola envisage prochainement des écrans de 50 pouces et en 2006 iNanov (France) espère commercialiser des écrans plats (1 mm) souples pouvant être enroulés...



En microélectronique, les nanotubes conducteurs et semi-conducteurs pourraient remplacer les fils et certains composants, réduisant considérablement les dimensions et la consommation d'énergie...

des transistors à l'échelle du nanomètre admettant des fréquences de 1 THz !

L'utilisation de nanotubes comme mémoire vive non volatile est envisagée (avec des capacités de l'ordre de 1 petaoctet/cm²)



solution originale proposée par l'Université du Michigan (avec brevet) :

une molécule sphérique de C est emprisonnée dans un nanotube fermé ; sa position (stable) détermine un 1 ou un 0... et ne nécessite aucune énergie pour être maintenue en place !

Les propriétés mécaniques exceptionnelles pourrait en faire un matériau de structure de haute performance et léger (automobile, aéronautique, bâtiment...)
Sa très grande élasticité en ferait un matériau absorbeur de choc..

Problème : *les nanotubes coûtent encore 10 à 1000 fois plus cher que les fibres de carbone utilisées dans les composites...*

Médecine : nanopaille, nanosonde génétique et chimique (pour des microscopes à force atomique)

Energie : Les nanotubes peuvent permettent de stocker l'énergie de façon très efficace :

- utilisés comme « super électrodes » en remplacement du graphite
- stockage de l'hydrogène ; il pourrait emprisonner plus la moitié de son poids en hydrogène ce qui beaucoup plus que toutes les autres techniques (hydrures solides, liquides organiques etc...)

et pourquoi pas réaliser l'idée saugrenue d'Arthur Clark dans un de ses romans de SF :

relier un satellite géostationnaire par un ascenseur !
avec les nanotubes, il serait possible de fabriquer les câbles nécessaires (36000km de long !)...
c'est ce que propose la société US HighLift System ...

**Problème à résoudre :
les fabriquer en grande quantité et à un coût raisonnable !**

techniques de fabrication actuelles :

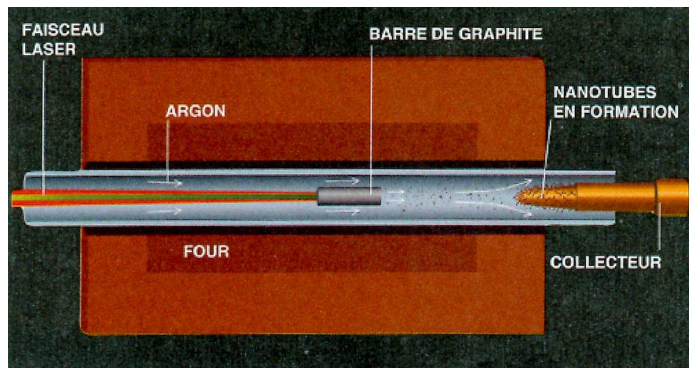
1) étincelle

*On crée une forte décharge électrique (100 ampères) entre 2 électrodes de graphite ; dans le plasma chaud il se forme des nanotubes
rendement : 40% - mais tubes de petites longueurs et d'orientation aléatoires*

2) gaz chaud

*On envoie sur un substrat porté à 600°C un gaz carboné (méthane par exemple) qui se décompose et forme des nanotubes.
rendement : 20 à 100% - méthode simple et tubes de bonne longueur
inconvénient : nanotubes à parois multiples et bourrés de défauts... peu résistants*

3) bombardement laser



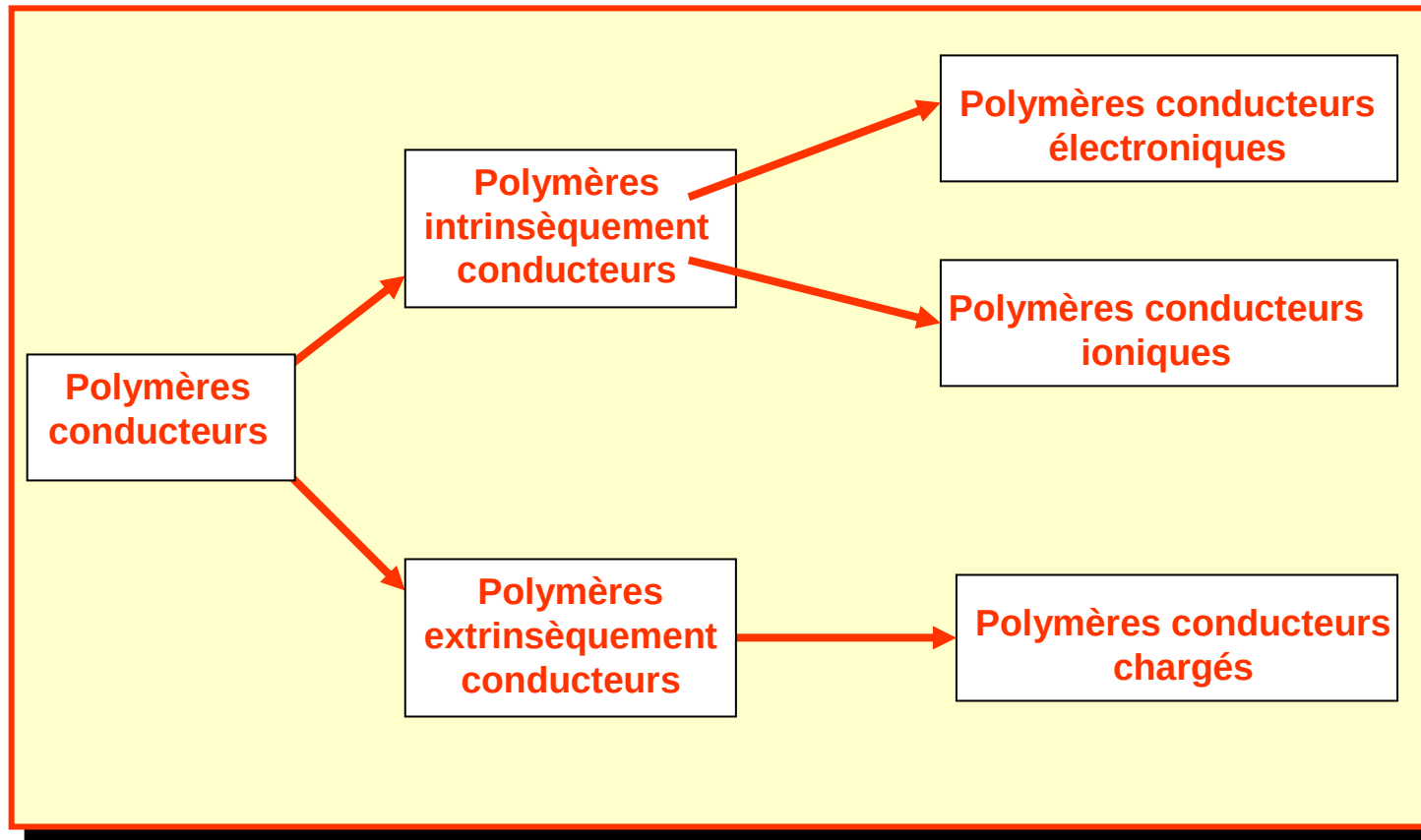
On vaporise une barre de graphite à l'aide d'un laser de puissance.

rendement : 70%

on produit des nanotubes à parois unique, et on contrôle leur diamètre par la température

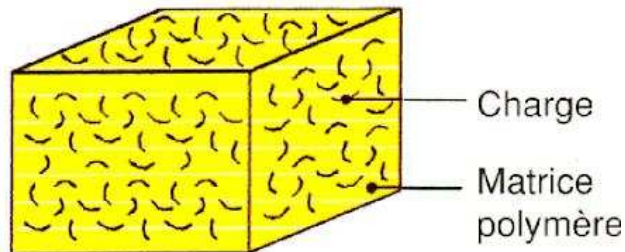
inconvénient : plus coûteuse... (laser!)

e) Les polymères conducteurs

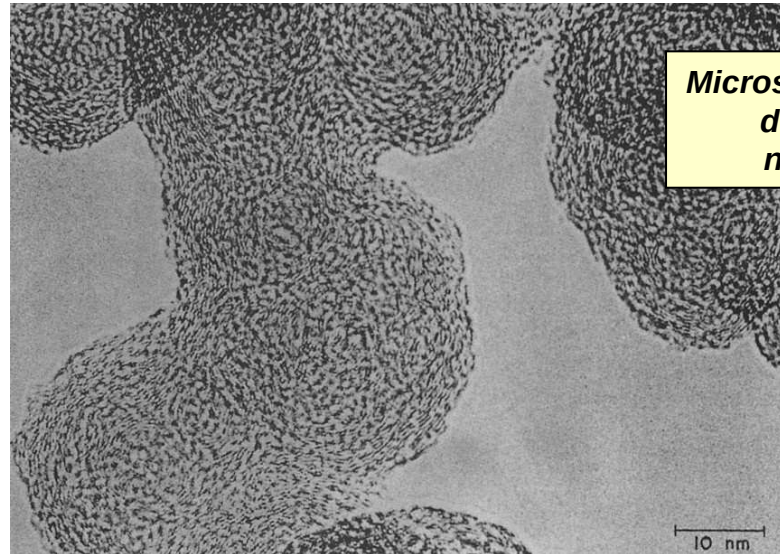


Les polymères conducteurs chargés

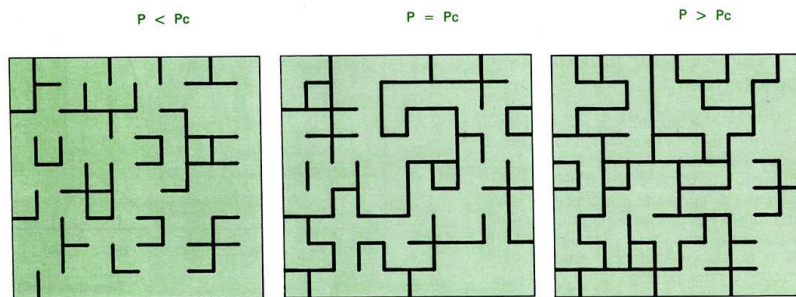
On introduit dans le polymère une poudre conductrice, « la charge »



*Poudre de carbone ou
métallique*



*Microscopie électronique
d'un agrégat de
noir de carbone*



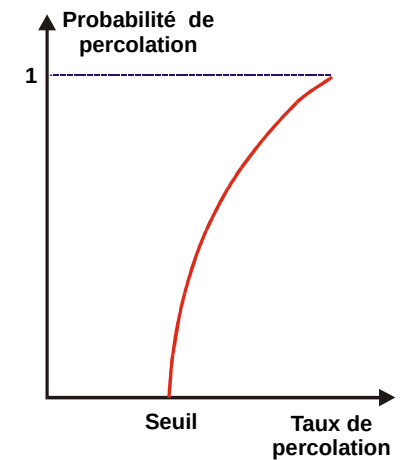
*En dessous
du seuil*

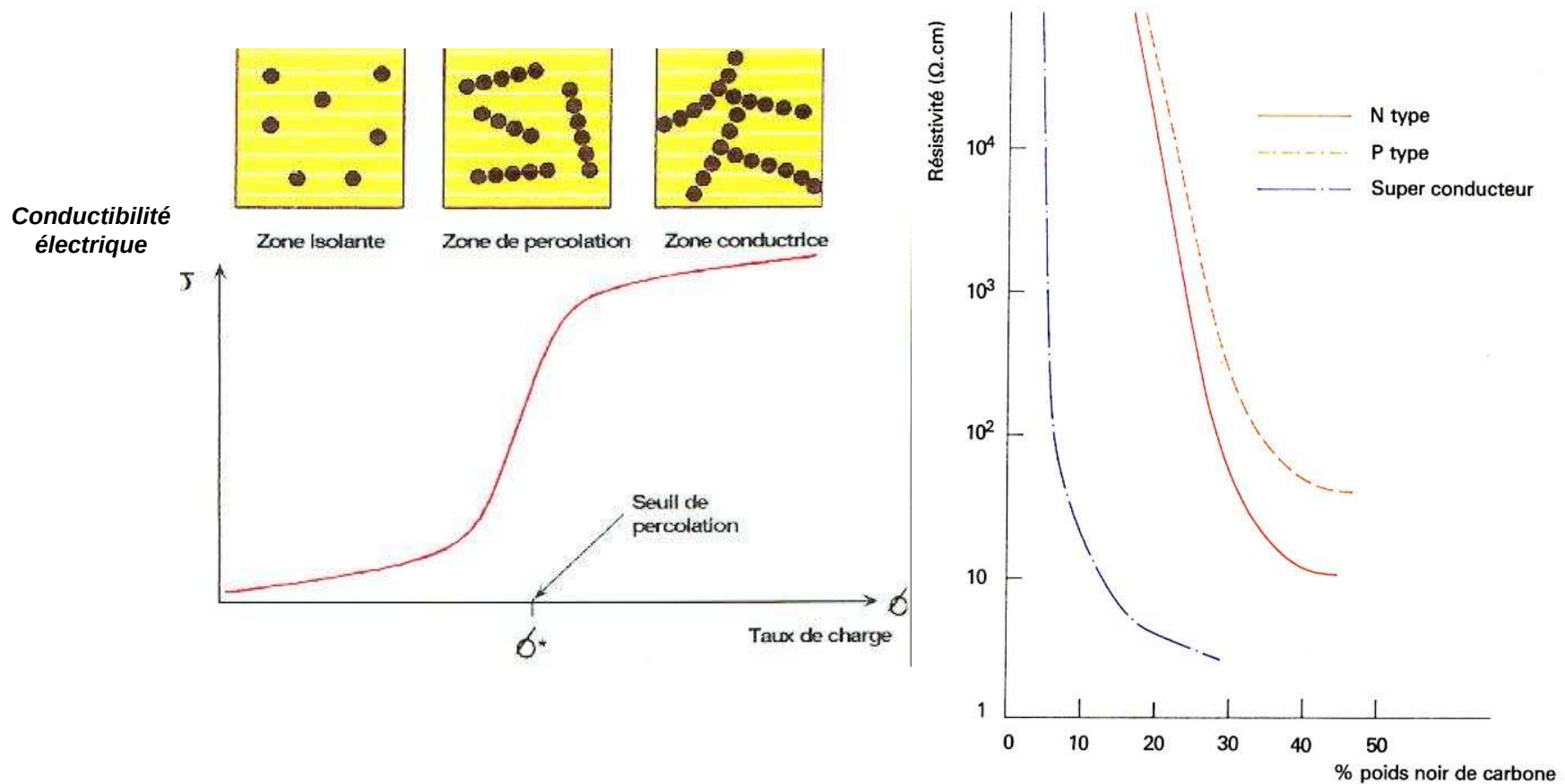
Au seuil

*Au dessus
du seuil*

Notion de percolation :

- en dessous d'une certaine densité les agrégats sont isolés
- au delà d'un certain seuil, il existe un amas infini et la probabilité pour qu'un objet appartienne à cet amas est donnée par la probabilité de percolation





Le taux de charge détermine le seuil de percolation

En dessous d'une certaine valeur de la charge, il n'y a aucun contact entre les grains de poudre et le polymère est isolant

Au delà, il y a percolation des charges conductrices et le polymère devient conducteur.

Au voisinage du seuil de percolation , la conductibilité électrique peut varier rapidement de plusieurs ordres de grandeurs

Applications :

- un polymère légèrement en dessous le seuil de percolation (isolant) soumis à une contrainte de compression peut passer le seuil et devenir conducteur...

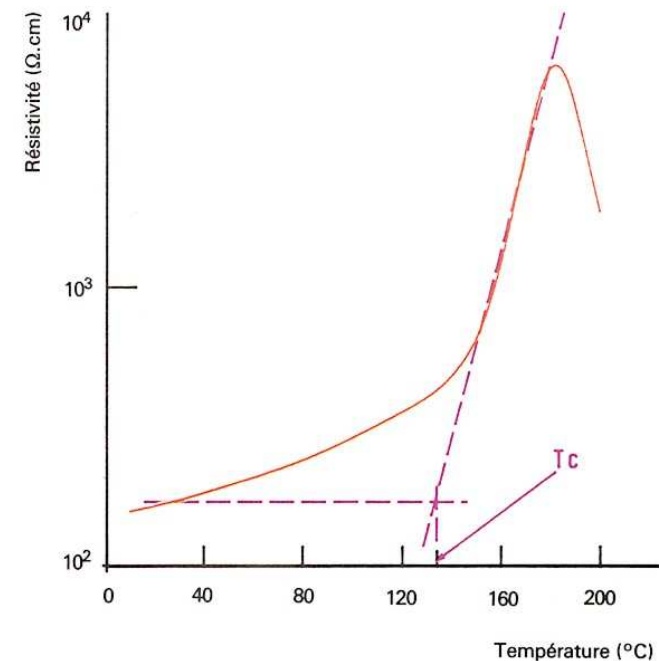
« piézo-résistance »

contacts électriques, clavier tactile...

- un polymère légèrement au-dessus du seuil de percolation (conducteur) peut sous l'effet de la température, se dilater et passer en dessous le seuil et devenir isolant...

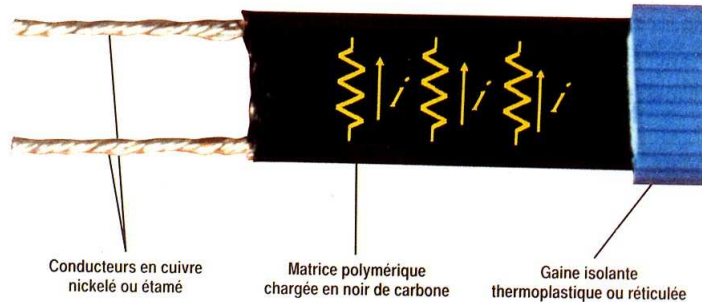
« thermo-résistance »

régulateur de température, câble auto-régulant, limiteur de courant...



Applications industrielles :

Le câble chauffant autorégulant



Cordon constitué par 2 fils de cuivre en parallèle, séparés par 1 cm de polymère à effet CTP (coefficient de température positif) et alimentés sous 220 volts.

Le polymère se comporte comme une infinité de résistances en parallèle. Selon la température locale de la gaine, la résistance est modifiée

La puissance dissipée par effet Joule est égale à V^2/R :

- lorsque la température augmente, la résistance augmente également et la puissance dissipée diminue..
- et inversement...

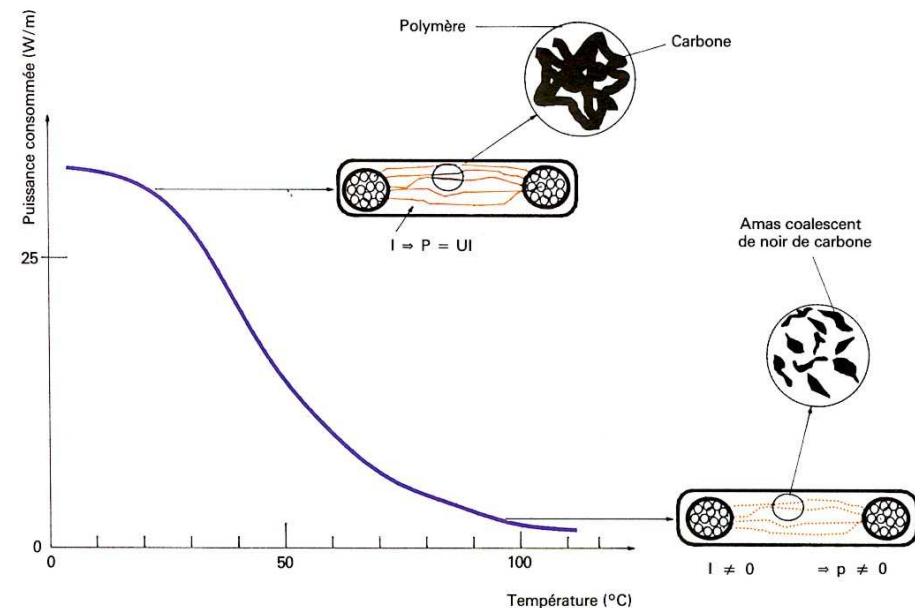
On peut ainsi éviter les points chauds ou froids et contrôler la température automatiquement...

Avantages :

- simplicité
- économie d'énergie

Problèmes à résoudre :

- coût (qui doit être compétitif)
- vieillissement



Perspectives : plusieurs centaines à milliers de km/an

- câble unipolaire 400kV à isolation synthétique (lignes enterrés)

Chaque année, 12000 km de lignes 20kV sont enterrées

1993 : 20% des lignes BT et MT (20kV) et 3% HT (225kV) et THT (400kV)

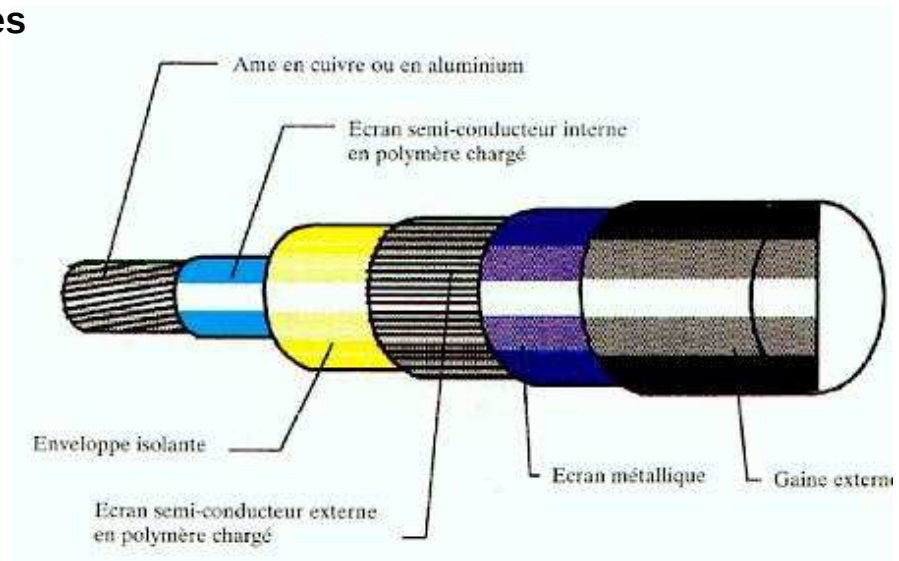
**Lignes THT (400kV)
(2000 à 3000 MW) :**

- isolation gazeuse (N₂ + SF₆ sous pression)(CIG)
- isolation synthétique (CIS)

Le contact entre le métal et le polymère n'est pas parfait et le manque d'adhérence provoque des décharges électriques qui endommagent le câble et limite sa durée de vie.

On place entre le métal et l'isolant un polymère conducteur qui assure une adhérence parfaite avec l'isolant (sans provoquer de décharge, étant au potentiel du métal !)

Idem entre l'isolant et l'écran métallique extérieur



Coût :

- ligne aérienne : 0,8 - 1 M€/km
- CIG : 5 à 10 M€/km (x 7 à 10)
- CIS : 8 à 12 M€/km (x 10 à 12)

Câble à isolation synthétique CIS

Les polymères conducteurs électroniques

Présentent une structure de bande métallique

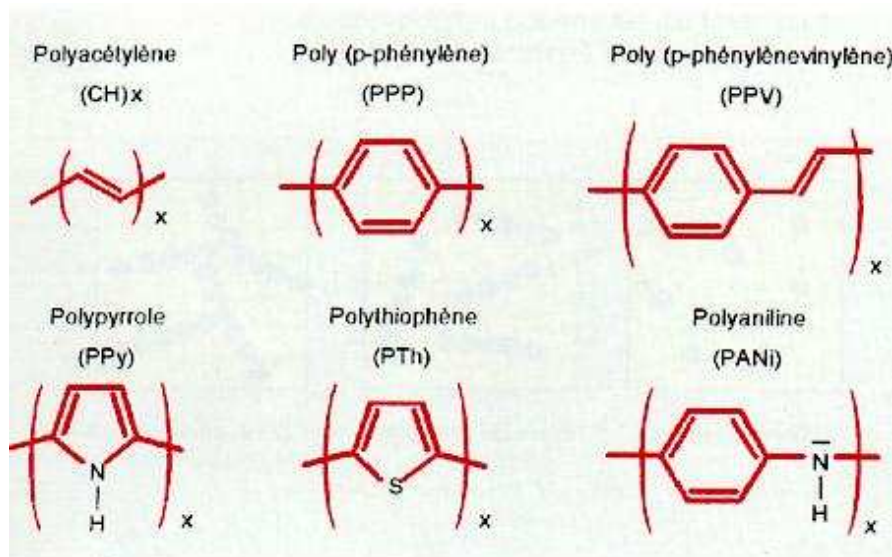


Figure 4

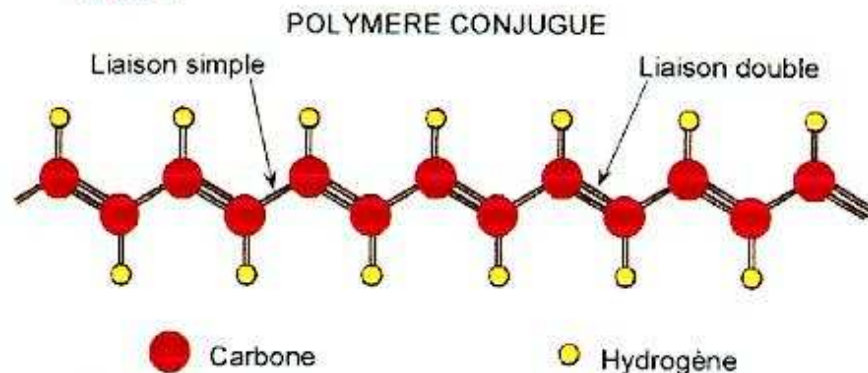


Figure 5

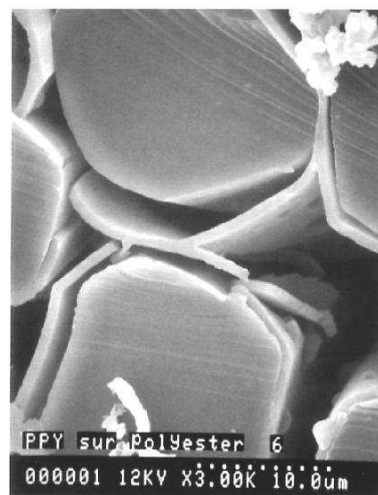
Conductibilité entre 10^{-12} et 10^2 à 10^4 S/cm

Due à une alternance de simple et de double liaison C (avec des électrons délocalisés) on les appelle aussi « polymères conjugués »

Très difficile à mettre en œuvre (insolubles et infusibles)

On les trouve sous la forme :

- de poudre
(pour charge de polymères chargés, ou en suspension dans des peintures...)
- de films conducteurs
- de fibres conductrices



Molécules de polypyrrole imprégnant les fibres d'un textile en polyester pour en faire un tissu chauffant (ameublement, vêtement..) (CEA/CEREM)

Les polymères conducteurs ioniques

Conductibilité électrique par transport d'ions

Conductibilité : 10^{-9} à 10^{-2} S/cm

- membranes échangeuses d'ions

- électrolytes solides polymères

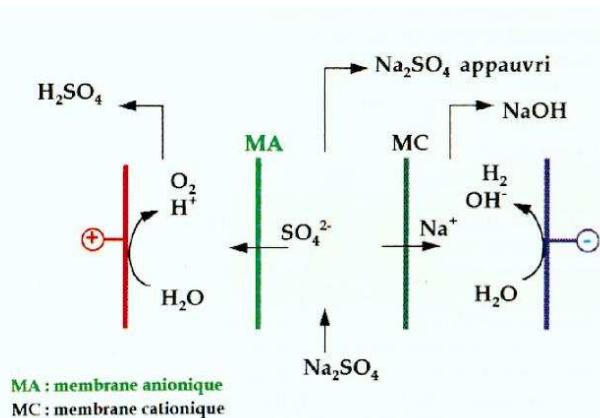
Matrice polymère halogénée
(chlorée ou fluorée)
contenant des groupements ionisés
(membrane anionique ou cationique)



Applications :

- membranes échangeuses d'ions
- dessalement eau de mer
- électrodialyse
- électrolyse
- synthèse du chlore et de la soude

synthèse de la soude



Chargées en sel

Polyoxyde d'éthylène (POE) + sel de Li (LiClO₄)

Polyacrylonitriles...

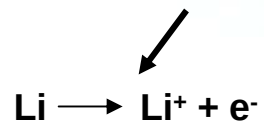
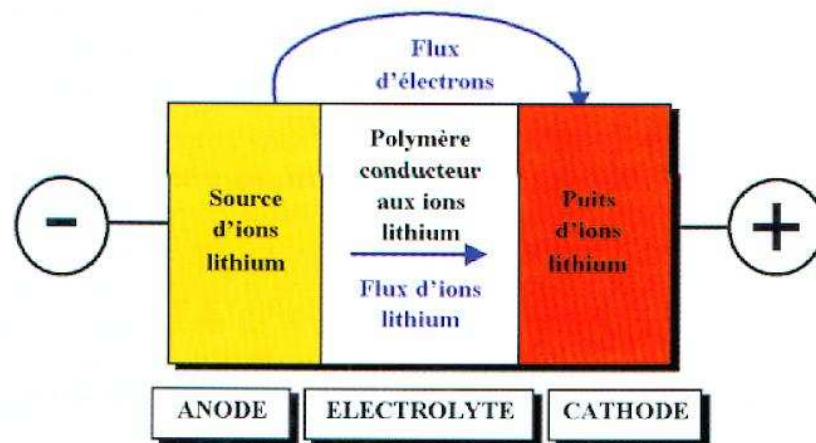
Application :

- électrolytes solides
- piles au Li
- vitrages électrochromes

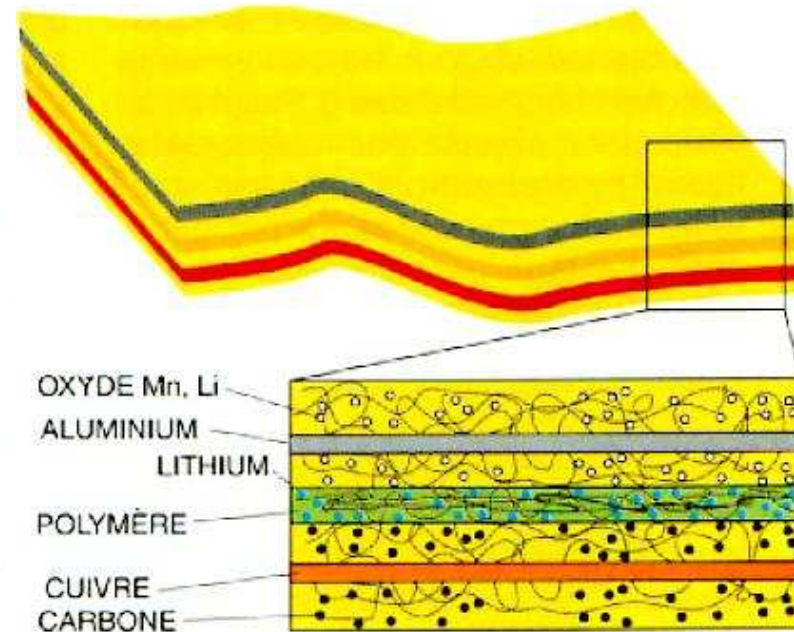
Faciles à mettre en œuvre
coût élevé

Les batteries polymère-lithium

Batteries rechargeables solides



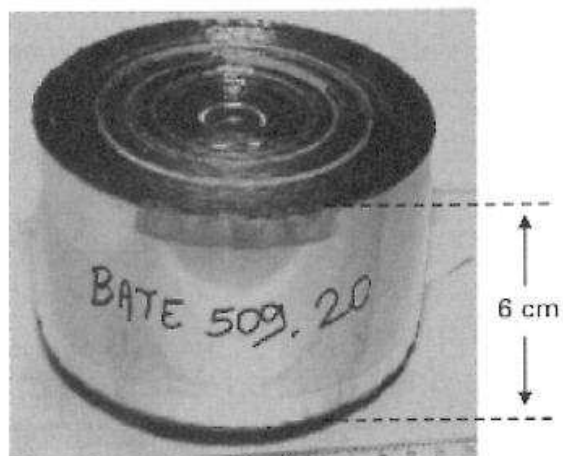
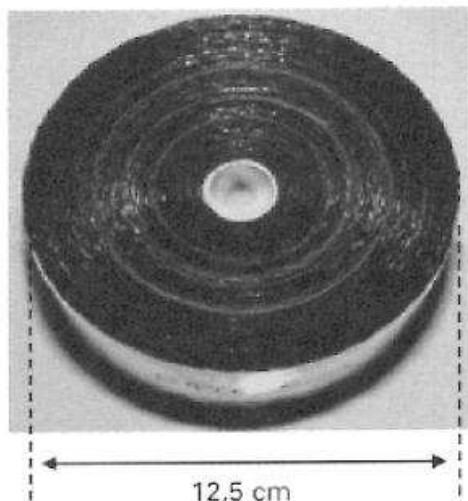
Polyoxyde d'éthylène (POE)
au sel de Li



Sous forme de bande de faible épaisseur (200 µm)

Faible encombrement : 1litre = 10 m²

Possibilité de répartir la batterie dans la carrosserie etc...



Batterie Polymère/Li
(40 Ah ou 100 Wh)

Pour une capacité de 30 kWh il faudra 20 km de bande

<i>batteries</i>	Densité d'énergie spécifique	Densité d'énergie pratique
Pb-acide	250 Wh/kg	30 Wh/kg
Ni-Cd	245 Wh/kg	50 Wh/kg
Poly/Li	560 Wh/kg	150 Wh/kg

Nombre de charges : 3000 (1000 pour Ni-Cd)

Autonomie d'un véhicule électrique :

Poly/Li	60 à 90 km/h	200 à 300 km
Ni-Cd	60 à 90 km/h	60 à 80 km

2002 : création de la société BATSCAP (80% Bolloré- 20% EDF) et construction d'une usine pilote destinée à la fabrication de batteries à électrolyte solide polymère/Li

f) Les vitres « intelligentes »



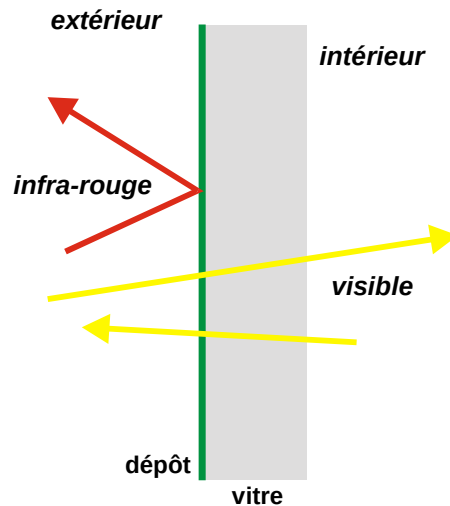
Le vitrage a pris de plus en plus d'importance dans la vie quotidienne (habitation, voiture etc...)

Problèmes pratiques :

- *intimité*
- *isolation et climatisation*
- *éblouissement (voiture)...*

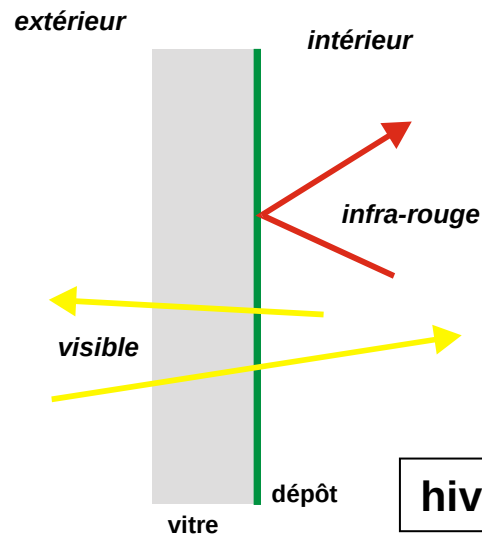
Solutions statiques :

- double vitrage (deux plaques de verres séparées par du vide)
- revêtement réfléchissant l'infra-rouge



été

L'effet de serre



hiver

Déperdition de la chaleur...

Pour éviter...

Pas très souple...

Autres usages des revêtements statiques :

Vitrages autonettoyants :

On dépose par bombardement cathodique⁽¹⁾ une fine couche métallique hydrophobe sur la surface du verre.

l'eau coule sur la vitre entraînant les poussières...

Acquaclean, Bioclean (Saint-Gobain), Activ (Pilkington)

Pour éliminer les dépôts organiques adhérents, on dépose une 2^{ème} couche mince de TiO_2 qui provoque sous l'effet de la lumière une décomposition de ces pollutions organiques qui sont alors entraînées par la pluie. L'isolation thermique peut être renforcée par un dépôt supplémentaire très mince (1 nm) à base d'Ag

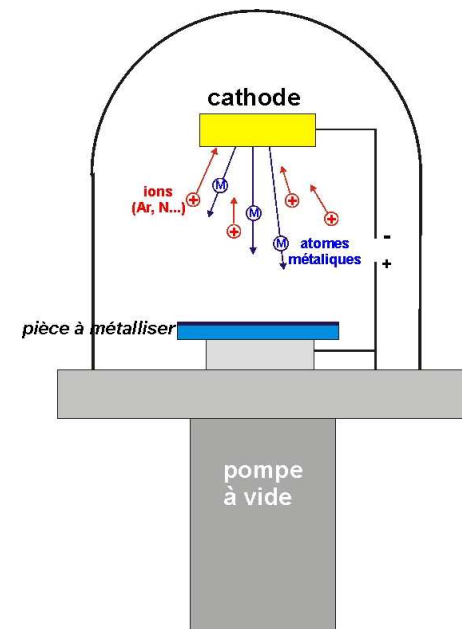
employé sur Bioclean (Saint-Gobain) et Activ (Pilkington)

On peut envisager une action de dépollution de l'environnement local à l'aide de ces vitres

Principe de la métallisation par pulvérisation cathodique :

La pièce à métalliser est placée dans une enceinte sous vide (10^{-9} bars) qui est ensuite remplie par un gaz neutre (Ar, N..) sous faible pression (10^{-1} à 10^{-2} bars).

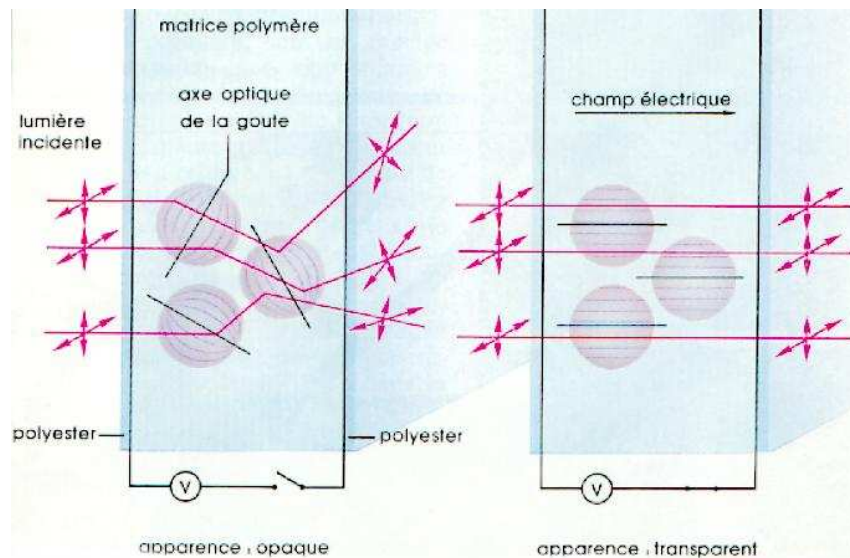
Ce gaz est ionisé à l'aide d'un magnétron, les ions sont projetés sur une électrode métallique (Au, Ag, Sn, Zn...) polarisée négativement. Les atomes métalliques sont pulvérisés sous l'effet du bombardement ionique et viennent se déposer sur la pièce à métalliser.



Solutions « dynamiques » :

Vitrages à cristaux liquides

Film de polymère transparent dans lequel ont été dispersées de microgouttes d'un cristal liquide nématique⁽¹⁾, pris en sandwich entre deux feuilles de verres ou de polymère, revêtues d'une couche conductrice transparente (ITO) (ITO : oxyde d'indium et d'étain)



Hors tension, les microgouttes diffusent la lumière de manière aléatoire, la vitre est opaque

Sous tension, les axes optiques des microgouttes s'alignent et la vitre devient transparente



**Commercialisation par Saint-Gobain :
Priva-Lite**

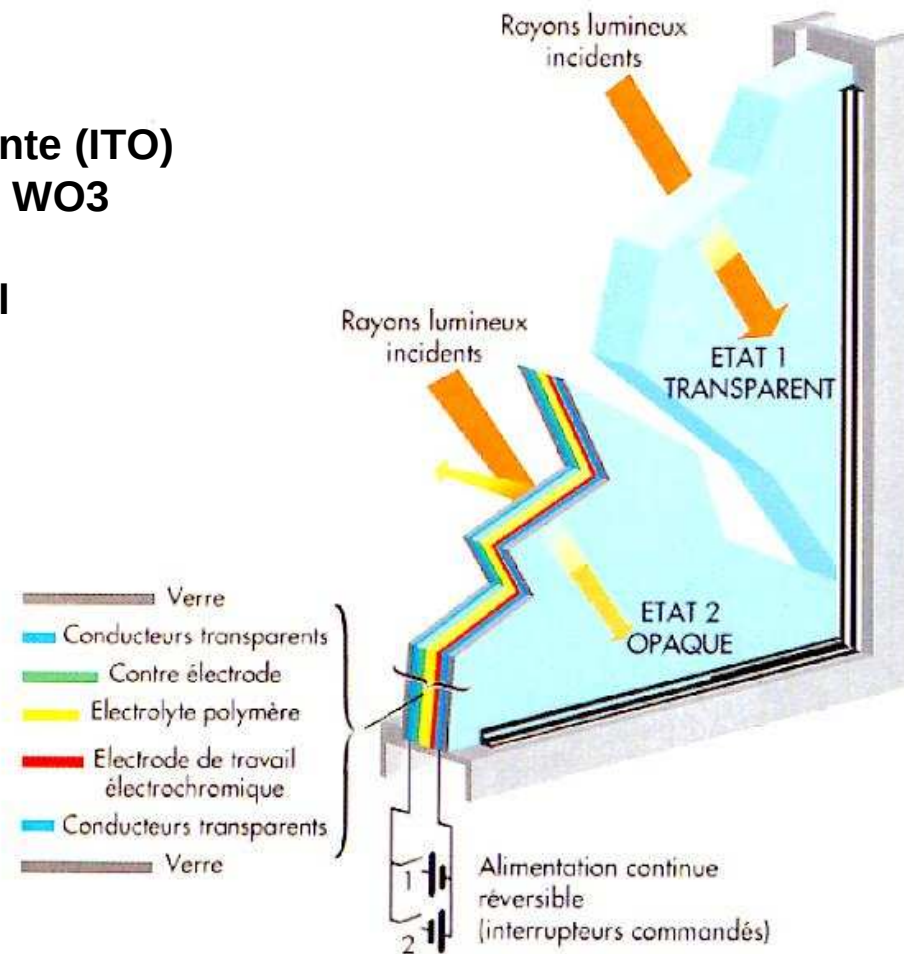
(1) cristaux nématiques : molécules allongées qui s'alignent sous l'effet d'un champ électrique

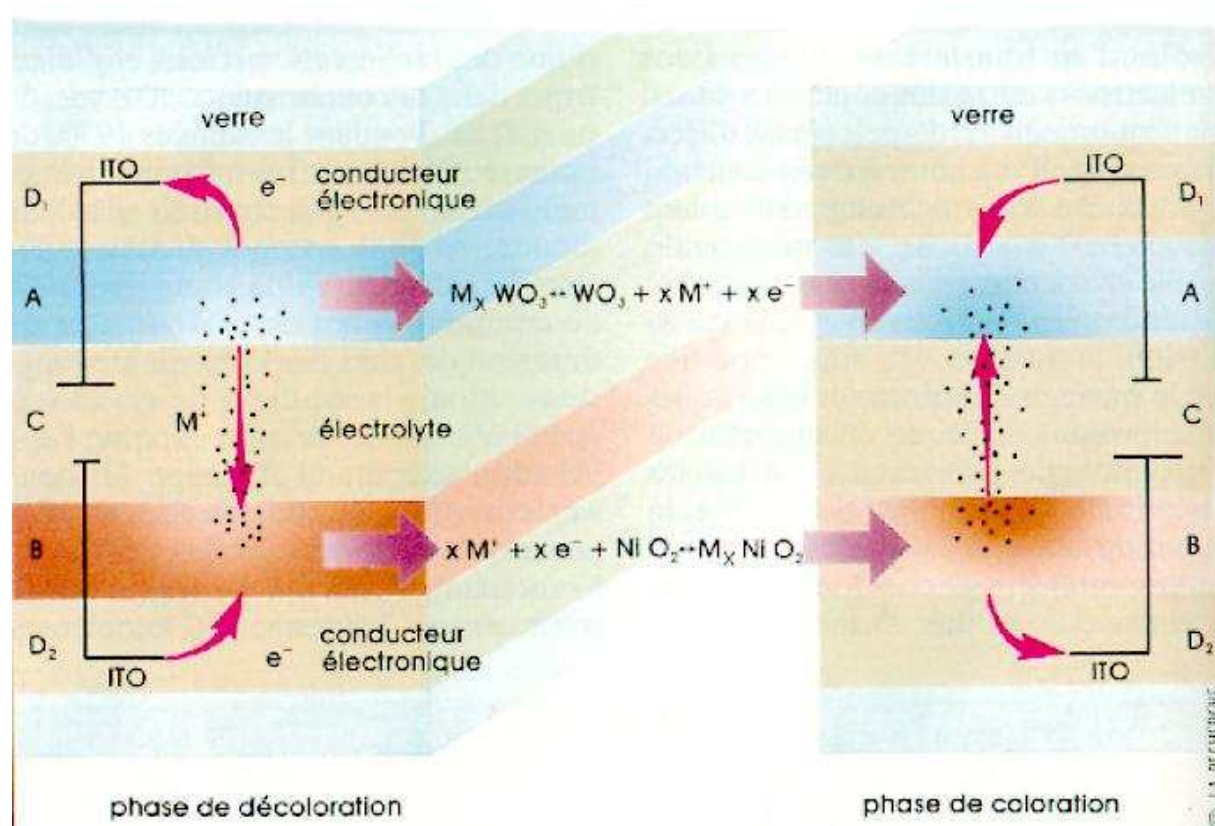
Vitrages électrochromes

Transfert de charges ions-électrons

Entre deux couches de verre :

- une couche conductrice transparente (ITO)
- une couche d'oxyde de tungstène WO_3
- un électrolyte (polymère)
- une couche d'hydroxyde de nickel
- une autre couche d'ITO





Les phases coloration (opaque) et décoloration (transparence) sont obtenues par un transfert d'ions entre les couches d'oxydes :

WO_3 est incolore, mais s'il y a des ions en insertion M_xWO_3 est de couleur bleue avec un taux de transmission de la lumière fonction de x

(pour une épaisseur de $0,3 \mu m$ $T=90\%$ pour WO_3 et $<10\%$ pour $M_{0,2}WO_3$)

Le phénomène est inverse pour la couche d'hydroxyde de nickel (bien que sa capacité d'opacité soit très inférieure à celle de WO_3)

Polymères conducteurs : polyaniline, polypyrole, polythiophène ..
Électrolyte : ions alcalins (Na, K).



*Exemple de vitre électrochrome à différents stades de polarisation
(Saint-Gobain)*

**Un tel dispositif doit être parfaitement réversible
et stable dans le temps...**

**Des essais réalisés par le CEA – Le Ripault sur des films polymères
(sandwich de couches de mylar recouvertes de couches minces
conductrices transparentes et d'un gel électrolyte au Li) ont montré
qu'en appliquant une tension de 2V pendant 30 secondes, on obtenait
un changement permanent de l'opacité, jusqu'à la prochaine
commutation et ceci plus de mille fois sans perte d'efficacité...**

**De nombreux problèmes restent encore à résoudre (vieillessement, réversibilité, coût etc...)
*surtout pour des vitres de grandes dimensions..***

Seule application commercialisée : rétroviseur de voiture s'adaptant à l'éclairement

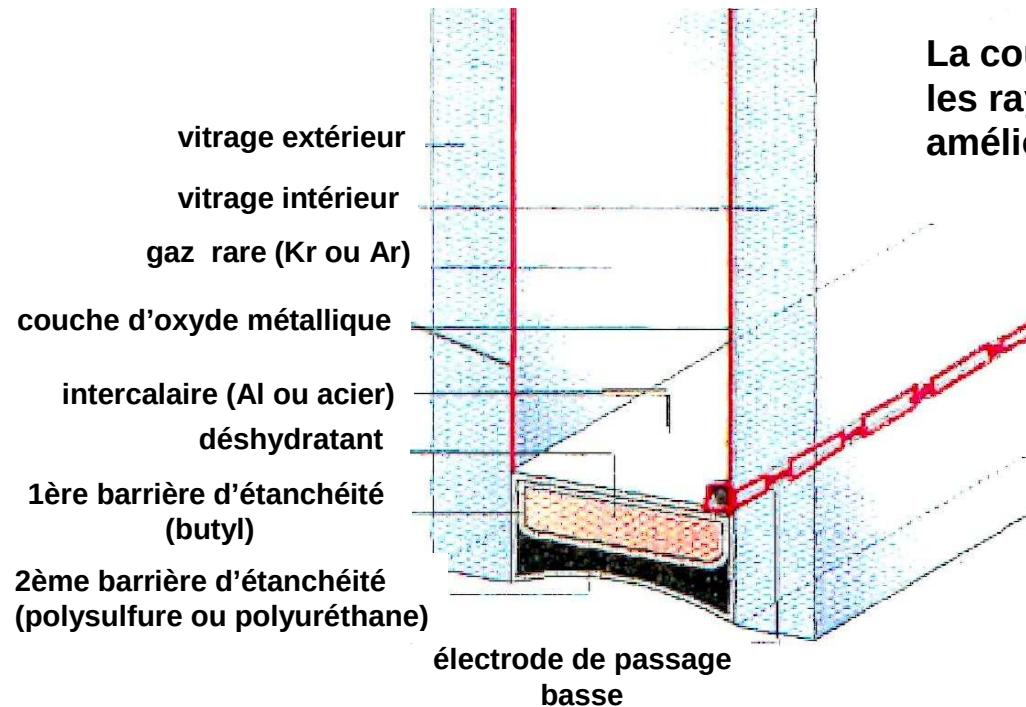
Intérêt :

- esthétique**
- confort**
- économie d'énergie**

Autres développement : le vitrage chauffant

- Vitrage chauffant**
- soit double vitrage avec gaz plasmagène (éclairage, chauffage)
 - soit revêtement conducteur

« verres à couche » à faible émissivité utilisés pour les double-vitrages à isolation renforcée



bâti : menuiserie à rupture de pont thermique

La couche extérieure permet de réfléchir les rayons ultra-violets (utile en été) et améliore l'hiver l'effet directif du chauffage

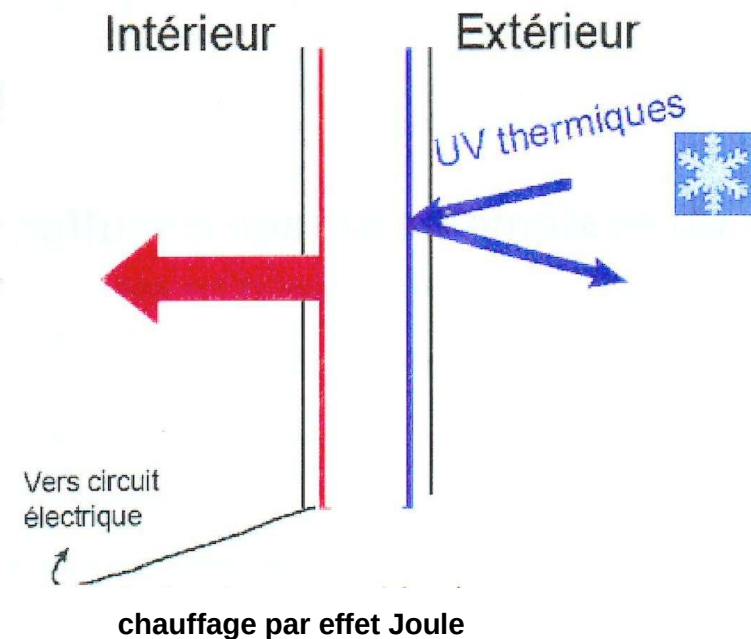


Schéma d'une vitre chauffante

quelques chiffres...

dimensions maximales (verre trempé) : 2050x3500 mm

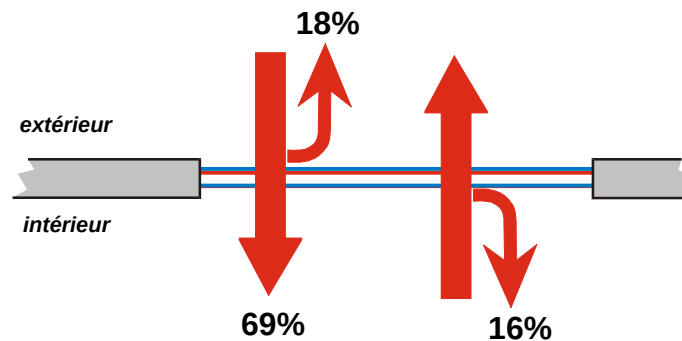
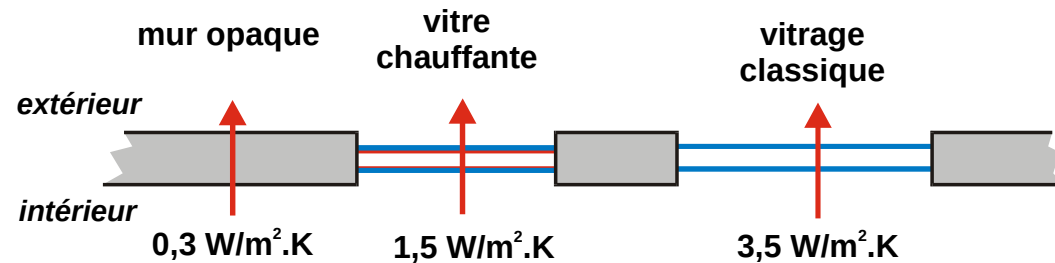
puissance nominale : 250W/m² (peut varier entre 50 et 600 W/m²)

température de surface : 35 à 40°C

rendement : 93% (sur 100W dissipés, 7 seulement sont perdus vers l'extérieure)

coût : 3.000 Frs/m² posé (soit 4 fois le coût d'un vitrage à isolation renforcée et 30% de plus que le coût « vitrage + chauffage »)

Le niveau de déperdition est comparable à celui des vitrages à isolation renforcée de haute performance...



Excellent facteur de transparence et faible réflectivité

Avantages :

- plus de convecteur (gain de place)
- les vitres ne sont plus une source froide mais une source de chaleur
- plus de courant de convection et donc température plus homogène (meilleur confort)
- plus faible consommation électrique (3% par rapport au plafond rayonnant et 5% par rapport aux convecteurs)
- adaptable facilement en rénovation

Fabricants :

- IQ Glass NV (Sint-Niklaas, Belgique)
- E-Glass Ltd (Finlande)(63% St Gobain)

état du marché ?

12 ans d'expérience en Belgique et 10 ans en Scandinavie

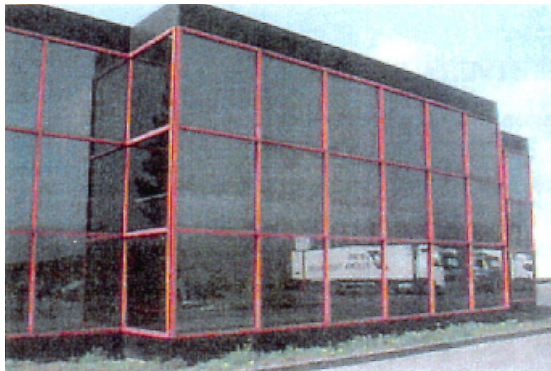
entre 2.500 et 3.000 m²/an
(100.000 m² au total)

2 à 3.000 m²/an
soit 20.000m² en Finlande en 1999
3 à 4.000 m² en 2000 en Suède
début prometteurs en Norvège...

but : 50.000m²/an en Europe

Utilisations :

- maisons individuelles
- vérandas
- bâtiments administratifs...



siège social d'un transporteur belge



maison finlandaise



auvents de l'aéroport d'Helsinki