

# Introduction à la Science des Matériaux

F. Stellacci (MX)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

# Bonjour!

---

- Prof. Francesco Stellacci
- MXG 030, [francesco.stellacci@epfl.ch](mailto:francesco.stellacci@epfl.ch)
- Ekaterina Poliukhina ([ekaterina.poliukhina@epfl.ch](mailto:ekaterina.poliukhina@epfl.ch))
- Trois Étudiants Assistants

# Table des matières

---

- But, contenu et organisation du cours
- Introduction générale des matériaux:
  - Classification
  - Historique: de l'atome aux matériaux
  - Consommation et recyclage
- Développements technologiques grâce aux matériaux

# Le cours

---

- Le cours est composé de trois parties
  - Une partie est théorique
  - Une partie est pratique
  - Une partie est basée sur un projet
- 
- **Le but de ce cours est de vous plonger dans l'univers de la science et ingénierie des matériaux**

# Le cours

---

- L'évaluation final est composée de quatre parties
- L'examen écrit final (50%)
- Le labos (25%)
- Le projet (25%)

# Le cours

---

MSE 100 Structure des mx	Cours et exercices																											
2025																												
	TP																											
Projet																												
Semaines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14														
Dates	18.févr	25.févr	04.mars	11.mars	18.mars	25.mars	01.avr	08.avr	15.avr	29.avr	06.mai	13.mai	20.mai	27.mai														
Mardi 8-11	exo et TP										TP matin	Projets presentations																
Mardi 13-14 ELA1	Intro	Projets Source d'info	Projets Source d'info	TP après-midi																								
Mardi 14-16 ELA1 et ou labo TP	Projet et TP																											

# But du cours

---

- La plupart des applications ou des développements technologiques sont limités par les matériaux
- La **chimie** regarde les atomes et les molécules
- La **physique** (du solide) regarde des arrangements réguliers d'atomes (cristaux)
- La **science des matériaux** regarde la matière dans son ensemble, de l'atome à l'échelle macroscopique, pour comprendre et contrôler les propriétés utiles pour **l'ingénieur**

**Le but de ce cours est de vous plonger dans cet univers**

# But du cours

---

- Nous ferons un peu de chimie, un peu de physique, et des maths !
- Notions de base:
  - Concepts mathématique clés
  - Les dimensions
  - Les ordres de grandeur
  - Les matrices et les opérations avec les matrices
- Un bon ingénieur doit développer une intuition et une bonne compréhension des lois physiques, et être capable de les exprimer de façon mathématique et numérique.



# Contenu du cours

---

1. Introduction
2. Diagrammes de phases
3. Propriétés
  - i. mécaniques: Elasticité linéaire, Plasticité et ductilité, Ténacité et dureté, Fatigue, usure et contraintes thermiques
  - ii. thermiques et de diffusion
  - iii. électriques, magnétiques, optiques

# Contenu du cours

---

## 4. Structure des matériaux

- i. Etat cristalline
- ii. Etat amorphe
- iii. Défauts

# Le Vrai But du Cours

---

1. Pourquoi?
2. Vrai ou pas?
3. A Quelle échelle?
4. Quelle expérience peut le montrer?

# Exemple

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18												
1 <b>H</b> Hydrogen 1.008	2 <b>Be</b> Beryllium 9.0122	3 <b>C</b> Carbon 12.011	4 <b>Alkali metals</b>	5 <b>Alkaline earth metals</b>	6 <b>Lanthanoids</b>	7 <b>Actinoids</b>	8 <b>Transition metals</b>	9 <b>Post-transition metals</b>	10 <b>Metalloids</b>	11 <b>Other nonmetals</b>	12 <b>Noble gases</b>	13	14	15	16	17	18												
1 <b>Li</b> Lithium 6.94	2 <b>Mg</b> Magnesium 24.305	3 <b>Na</b> Sodium 22.990	4 <b>Ca</b> Calcium 40.078	5 <b>Sc</b> Scandium 44.956	6 <b>Ti</b> Titanium 47.867	7 <b>V</b> Vanadium 50.942	8 <b>Cr</b> Chromium 51.996	9 <b>Mn</b> Manganese 54.938	10 <b>Fe</b> Iron 55.845	11 <b>Co</b> Cobalt 58.933	12 <b>Ni</b> Nickel 58.693	13 <b>Cu</b> Copper 63.546	14 <b>Zn</b> Zinc 65.38	15 <b>Ga</b> Gallium 69.723	16 <b>Ge</b> Germanium 72.630	17 <b>As</b> Arsenic 74.922	18 <b>Se</b> Selenium 78.971	19 <b>Br</b> Bromine 79.904	20 <b>Kr</b> Krypton 83.798										
21 <b>Rb</b> Rubidium 85.468	22 <b>Sr</b> Strontium 87.62	23 <b>Y</b> Yttrium 88.906	24 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	25 <b>Nb</b> Niobium 92.906	26 <b>Mo</b> Molybdenum 95.95	27 <b>Tc</b> Technetium (98)	28 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	29 <b>Rh</b> Rhodium 102.91	30 <b>Pd</b> Palladium 106.42	31 <b>Ag</b> Silver 107.87	32 <b>Cd</b> Cadmium 112.41	33 <b>In</b> Indium 114.82	34 <b>Sn</b> Tin 118.71	35 <b>Sb</b> Antimony 121.76	36 <b>Te</b> Tellurium 127.60	37 <b>I</b> Iodine 126.90	38 <b>Xe</b> Xenon 131.29	39 <b>At</b> Astatine (210)	40 <b>Rn</b> Radon (222)										
41 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	42 <b>Ta</b> Tantalum 180.95	43 <b>W</b> Tungsten 183.84	44 <b>Re</b> Rhenium 186.21	45 <b>Os</b> Osmium 190.23	46 <b>Ir</b> Iridium 192.22	47 <b>Pt</b> Platinum 195.08	48 <b>Au</b> Gold 196.97	49 <b>Hg</b> Mercury 200.59	50 <b>Tl</b> Thallium 204.38	51 <b>Pb</b> Lead 207.2	52 <b>Bi</b> Bismuth 208.98	53 <b>Po</b> Polonium (209)	54 <b>At</b> Astatine (210)	55 <b>Rn</b> Radon (222)	56 <b>Cs</b> Caesium 132.91	57 <b>Ba</b> Barium 137.33	58 <b>Fr</b> Francium (223)	59 <b>Ra</b> Radium (226)											
60 <b>La</b> Lanthanum 138.91	61 <b>Ce</b> Cerium 140.12	62 <b>Pr</b> Praseodymium 140.91	63 <b>Nd</b> Neodymium 144.24	64 <b>Pm</b> Promethium (145)	65 <b>Sm</b> Samarium 150.36	66 <b>Eu</b> Europium 151.96	67 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	68 <b>Tb</b> Terbium 158.93	69 <b>Dy</b> Dysprosium 162.50	70 <b>Ho</b> Holmium 164.93	71 <b>Er</b> Erbium 167.26	72 <b>Tm</b> Thulium 168.93	73 <b>Yb</b> Ytterbium 173.05	74 <b>Lu</b> Lutetium 174.97	75 <b>Ac</b> Actinium (227)	76 <b>Th</b> Thorium 232.04	77 <b>Pa</b> Protactinium 231.04	78 <b>U</b> Uranium 238.03	79 <b>Np</b> Neptunium (237)	80 <b>Pu</b> Plutonium (244)	81 <b>Am</b> Americium (243)	82 <b>Cm</b> Curium (247)	83 <b>Bk</b> Berkelium (247)	84 <b>Cf</b> Californium (251)	85 <b>Es</b> Einsteinium (252)	86 <b>Fm</b> Fermium (257)	87 <b>No</b> Nobelium (259)	88 <b>Lr</b> Lawrencium (266)	
89 <b>Ac</b> Actinium (227)	90 <b>Th</b> Thorium 232.04	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.04	92 <b>U</b> Uranium 238.03	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Americium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkelium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 <b>No</b> Nobelium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (266)	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (267)	105 <b>Db</b> Dubnium (268)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (269)	107 <b>Bh</b> Bohrium (270)	108 <b>Hs</b> Hassium (270)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (278)	110 <b>Ds</b> Darmstadtium (281)	111 <b>Rg</b> Roentgenium (282)	112 <b>Cn</b> Copernicium (285)	113 <b>Nh</b> Nihonium (286)	114 <b>Fl</b> Flerovium (289)	115 <b>Mc</b> Moscovium (290)	116 <b>Lv</b> Livermorium (293)	117 <b>Ts</b> Tennessine (294)	118 <b>Og</b> Oganesson (294)

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Periodic Table Design & Interface Copyright © 1997 Michael Dayah, Ptable.com Last updated Jun 16, 2017

57 <b>La</b> Lanthanum 138.91	58 <b>Ce</b> Cerium 140.12	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.91	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.24	61 <b>Pm</b> Promethium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.96	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.93	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.50	67 <b>Ho</b> Holmium 164.93	68 <b>Er</b> Erbium 167.26	69 <b>Tm</b> Thulium 168.93	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.05	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.97
89 <b>Ac</b> Actinium (227)	90 <b>Th</b> Thorium 232.04	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.04	92 <b>U</b> Uranium 238.03	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Americium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkelium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 <b>No</b> Nobelium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (266)

# La masse de un atome de C est 12.011

---

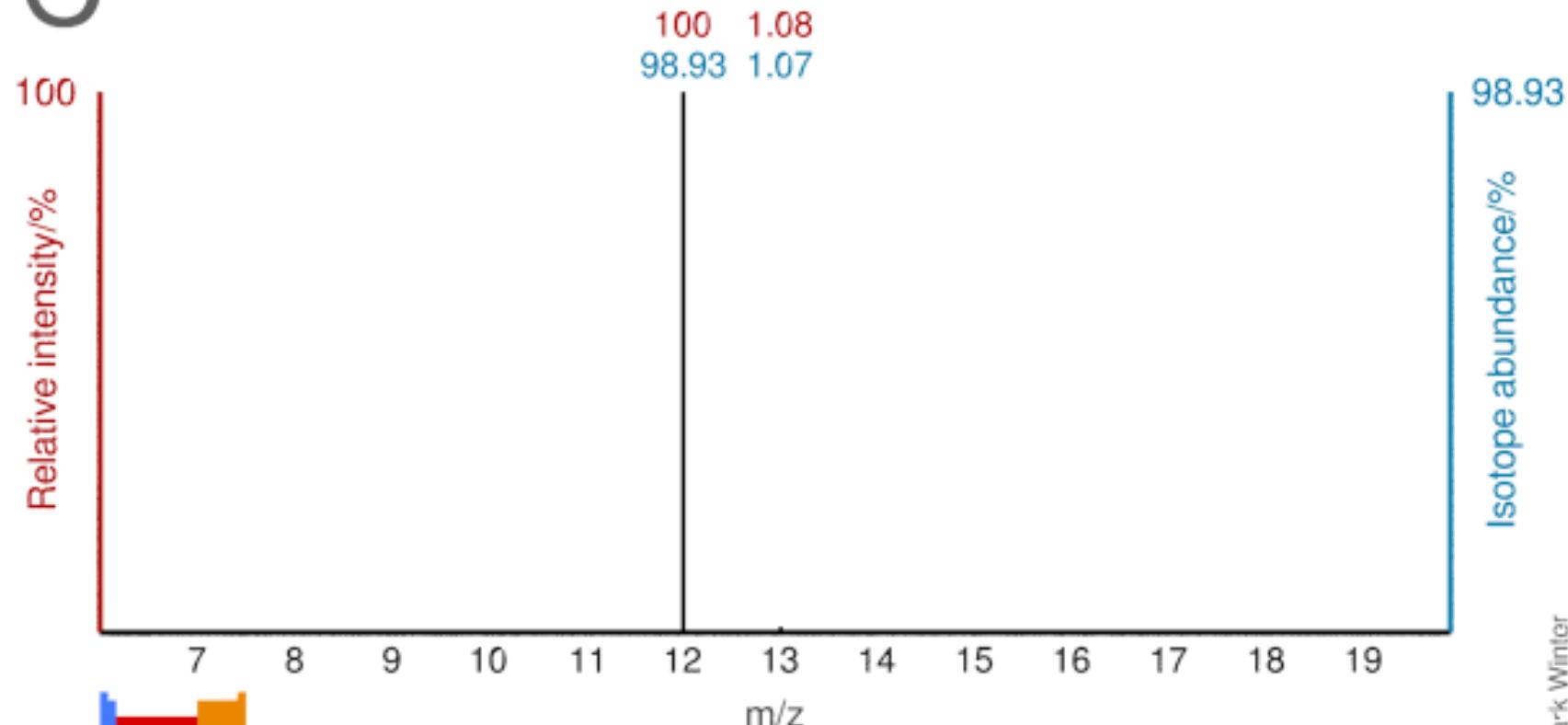
1. Pourquoi?
2. Vrai ou pas?
3. A Quelle échelle?
4. Quelle expérience peut le montrer?





C

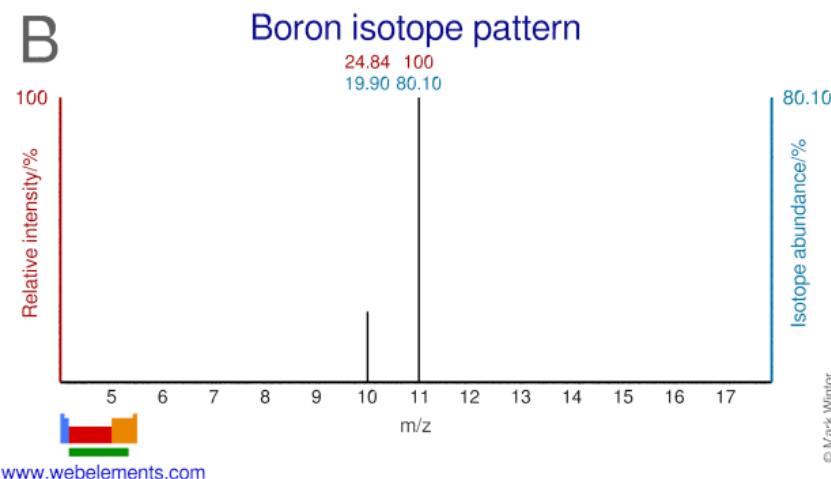
## Carbon isotope pattern



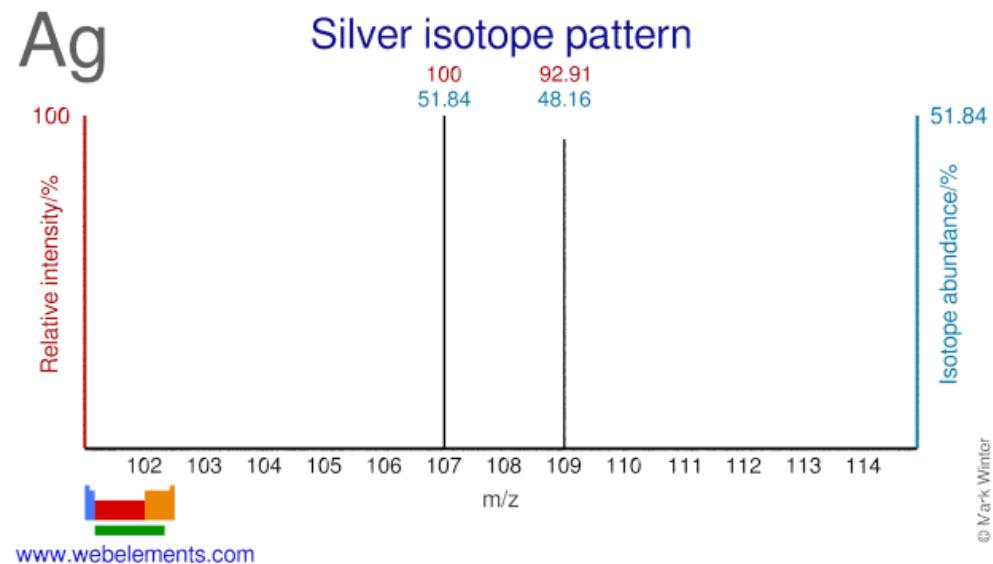
[www.webelements.com](http://www.webelements.com)

© Mark Winter

B



Ag



# Documentation pour le cours

---

- Une copie des transparents, les données des exercices, les corrigés et autres documents se trouvent sur le site  
<https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=6251>
- Vous devez vous habituer à prendre des notes personnelles

# Documentation pour le cours

---

- Pour la premier partie du cours
  - Vidéos du Prof. M. Rappaz mises sur Moodle
  - Le livre:

***Matériaux: ingénierie, science, procédé et conception,  
PPUR (2013)***

M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon

Accessible sur le site de la librairie de l'EPFL !

Traduit **en français** et en couleur, il constitue un **ouvrage de base** de tout ingénieur (Librairie La Fontaine, prix < 60 Frs).

# Exercices

---

Il est **essentiel de faire les exercices** (learning by doing)  
et **de lire le livre support de ce cours.**

**4 Responsables des exercices (Ekaterina Poliukhina, 3 EA)**  
**+ professeur** seront à votre disposition

**Examen propédeutique sous forme écrite**  
**(livre ouvert!)**

# Quelques règles utiles à suivre

---

1. Début du cours
2. Téléphones mobiles et ordinateurs portables
3. Conversations
4. Pique-nique
5. Questions
6. Notes personnelles

# Contexte: de l'atome aux matériaux

---

# De l'atome aux liaisons... aux matériaux

---

Certaines grandeurs permettent de faire le lien entre les valeurs (masse, énergie...) aux échelles atomiques et macroscopiques

**La Mole (Nombre d'Avogadro) :**  $\approx 6.02 \times 10^{23}$  « entités »

Unité de base du SI (quantité de matière), se définit comme le nombre d'atomes de Carbone 12 (6 neutrons) dans 12g de cet élément.

**La Masse Molaire:**  $M_m = N_a \times m_{\text{atome}}$  (en g.mol<sup>-1</sup>)

La masse d'une mole de l'élément concerné. La constante d'Avogadro  $N_A$  a donc une dimension en mol<sup>-1</sup>

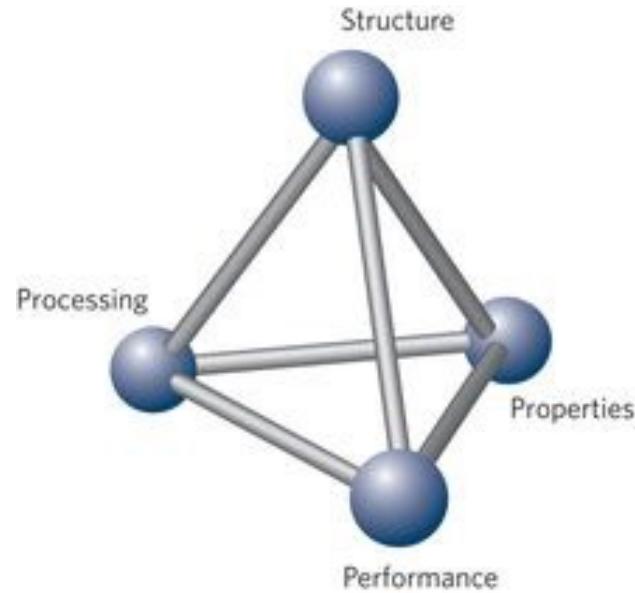
**L'Electron-volt (unité d'Energie, eV)**

Energie d'une charge d'1 C, dans un potentiel d'1 V.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

# La Science de Matériaux

---



# Classification des Matériaux

---

Les matériaux sont usuellement catalogués en 4 grandes catégories selon leur structure atomique:

## Céramiques et verres

Matériaux inorganiques avec liaisons covalentes ou ioniques; résistant thermiquement et mécaniquement mais fragiles; faible conductivité électrique

## Métaux

Matériaux avec des liaisons métalliques conférant une bonne conductivité électrique et thermique, réfléchissant la lumière et se déformant avant de casser (ductiles).

## Polymères et élastomères

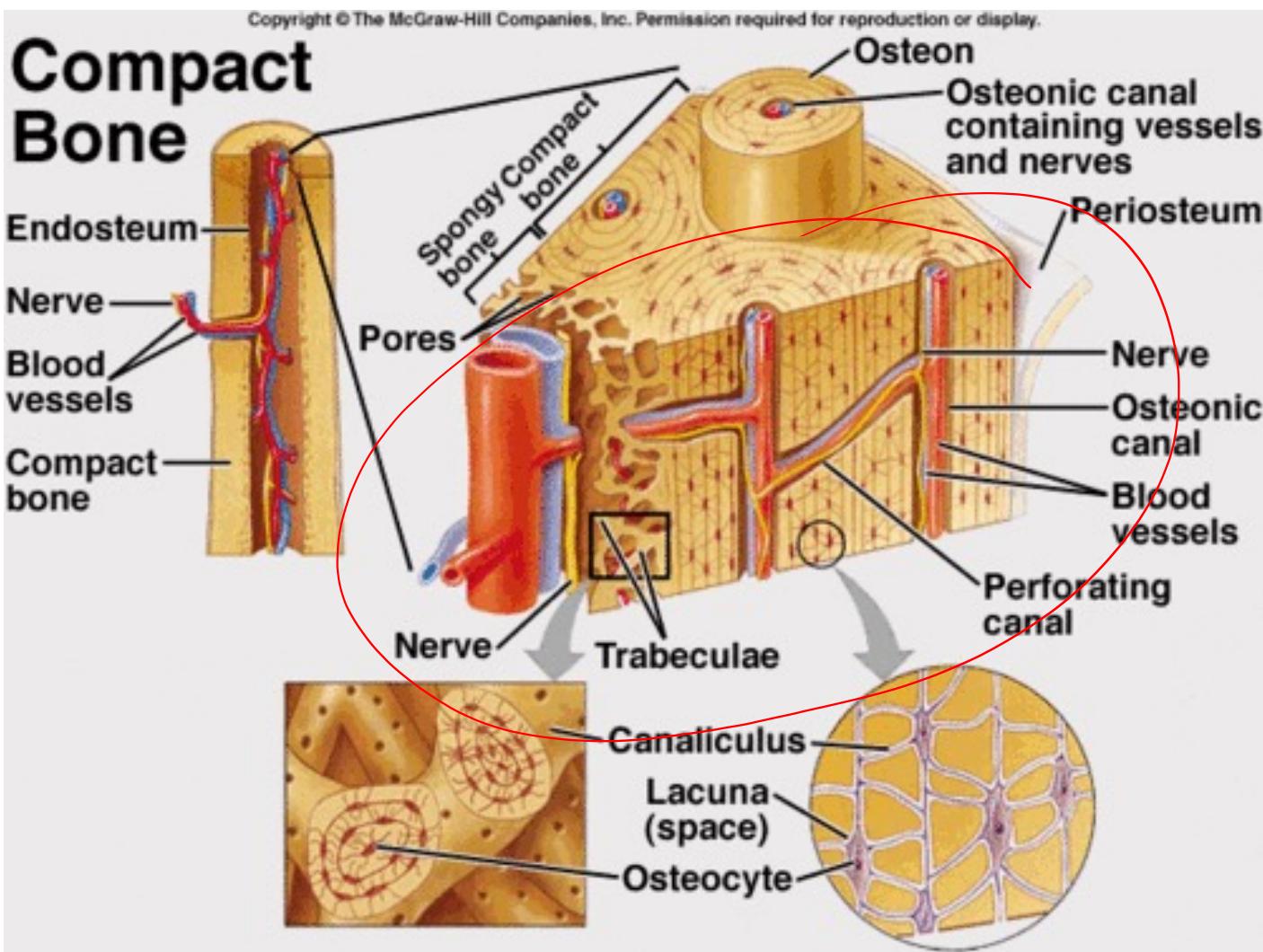
Longues chaînes de molécules organiques avec des liaisons covalentes (C-C) au sein des chaîne et des liaisons faibles entre celles-ci. Plutôt isolants électriques et thermiques.

## Composites

Matériaux assemblant de façon non miscible au moins deux matériaux des trois catégories précédentes.





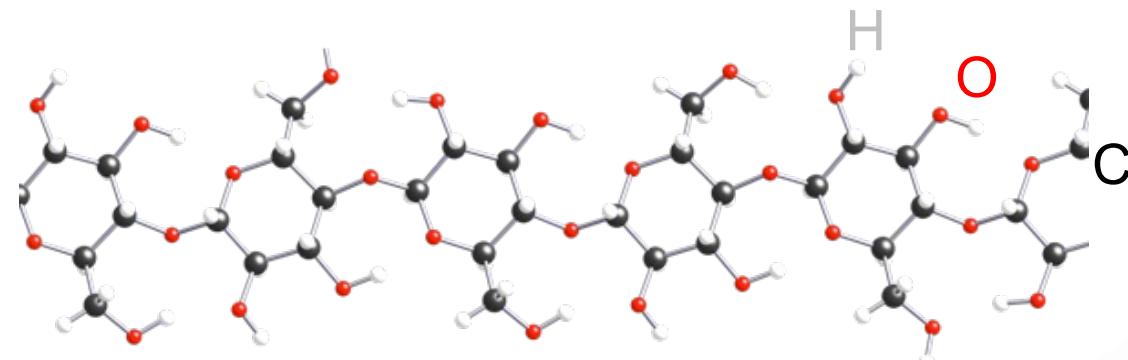


# Classification des Matériaux

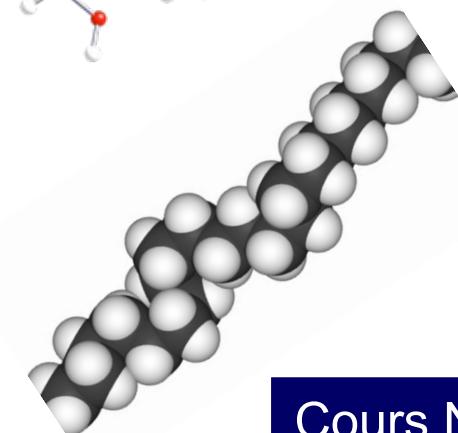
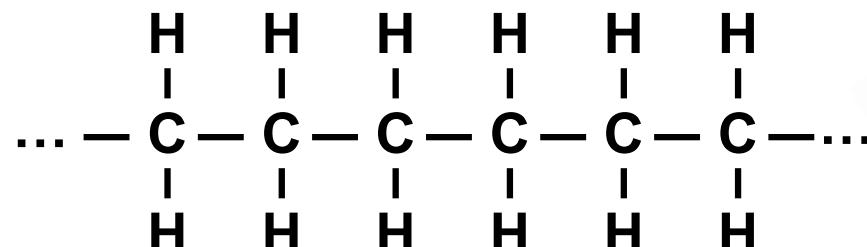
Matériaux organiques vs. inorganiques ?

**Matériaux (ou composés) organiques:** Tout composé contenant au moins l'élément carbone (C) et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote, à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates et bicarbonates inorganiques.

Cellulose:  
(naturel)



Polyéthylène (PE)  
(synthétique)





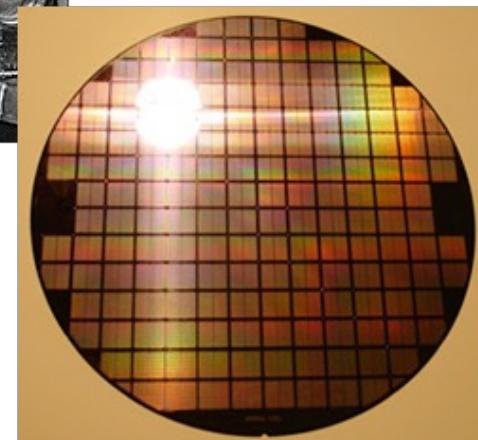
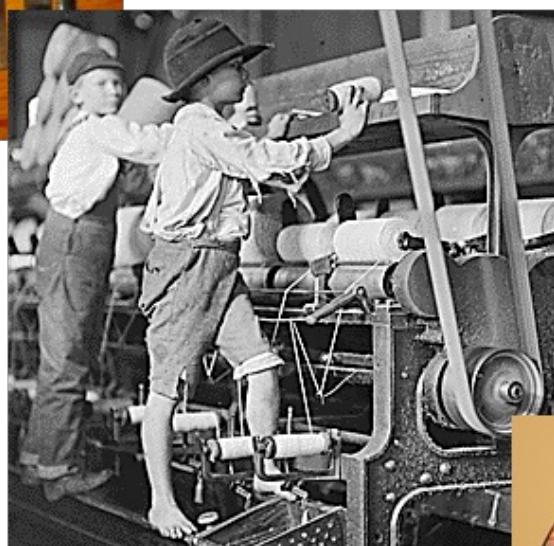
# Historique: de l'atome aux matériaux

---

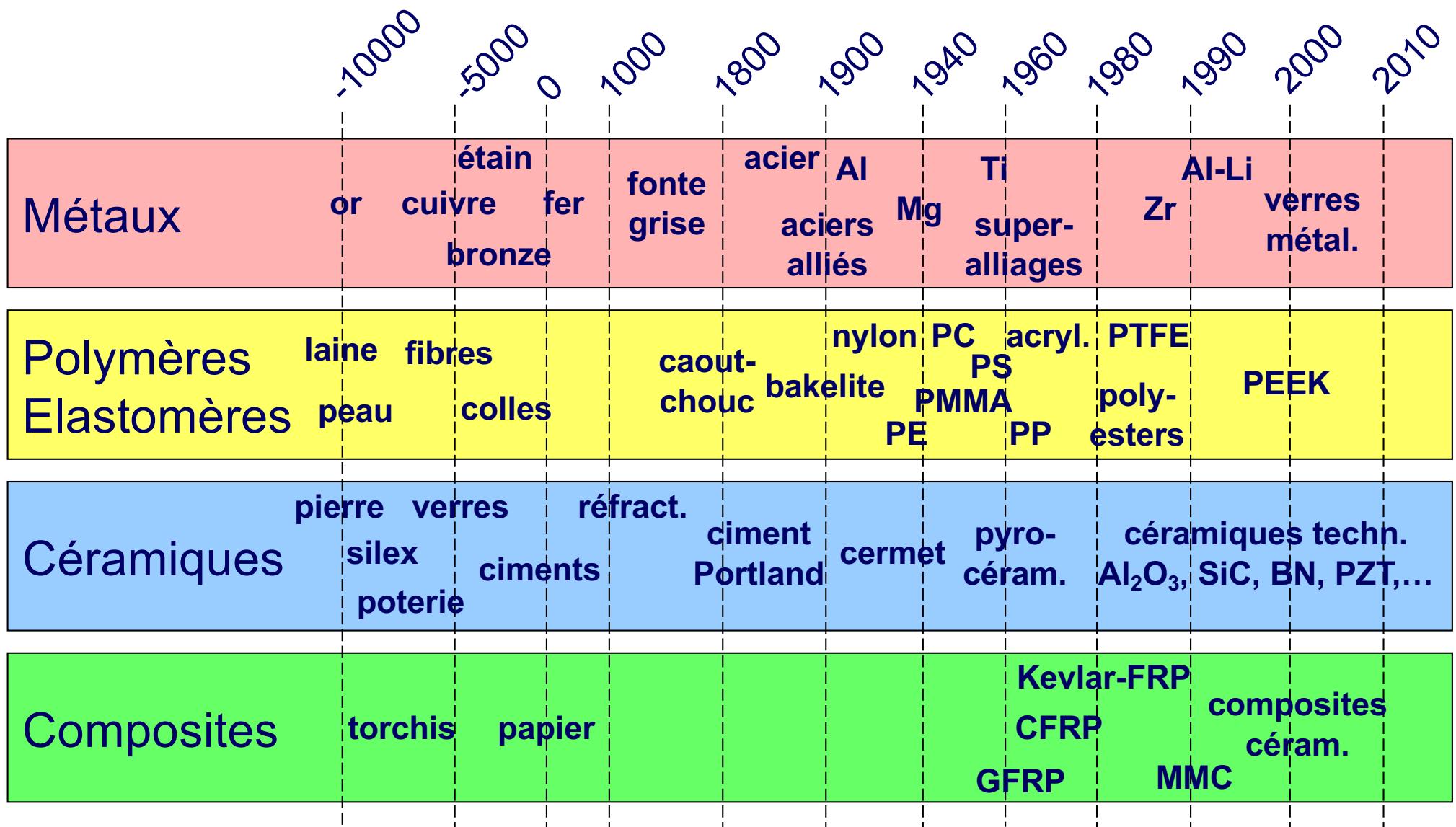


# Historique: de l'atome aux matériaux

---



# Historique



Redessiné à partir de M. Ashby et al., Materials

# Développements grâce aux matériaux

---



# Développements grâce aux matériaux

---



# Développements grâce aux matériaux



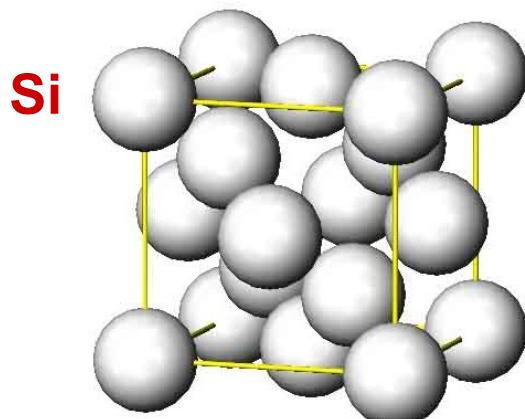
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire\\_de\\_l%27automobile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l%27automobile)



Les premiers balbutiements de la voiture commencent avec les machines à vapeur (milieu du 18<sup>ème</sup> siècle). Le gaz remplace ensuite la vapeur (Benz, 1876), avant d'arriver aux moteurs à essence modernes et la construction en chaîne.

# Le Silicium

Le Silicium s'est imposé comme le matériau de choix pour la microtechnique et l'ingénierie électrique.



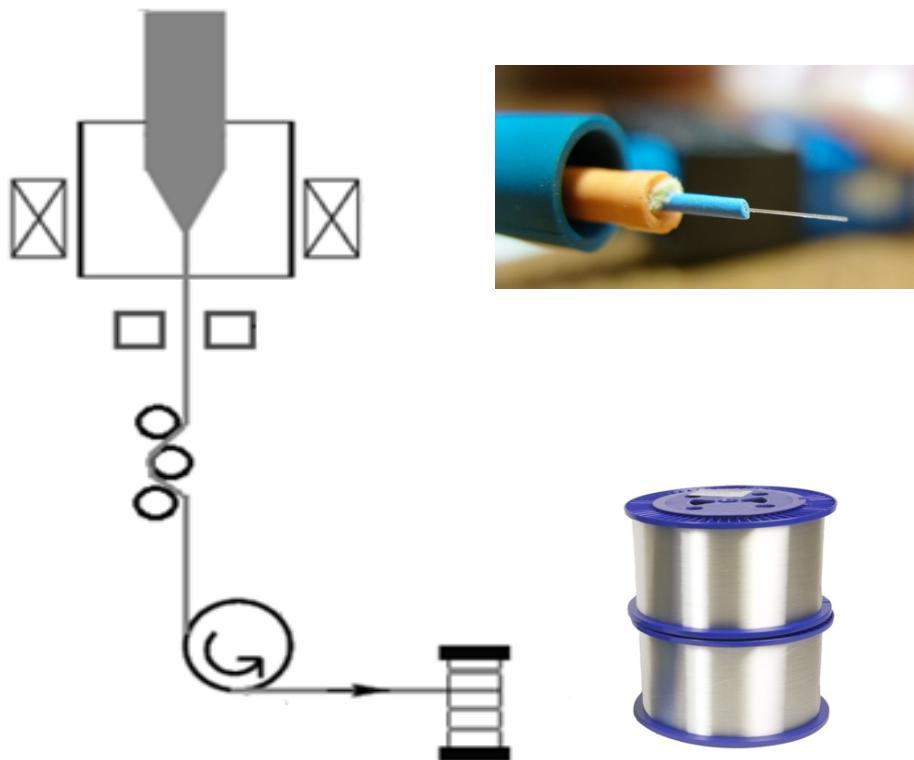
Il est aussi le matériau le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque:

- Il est très abondant;
- Il peut être rendu très efficace pour convertir l'énergie solaire en électricité
- C'est paradoxalement un assez mauvais absorbeur de lumière visible !

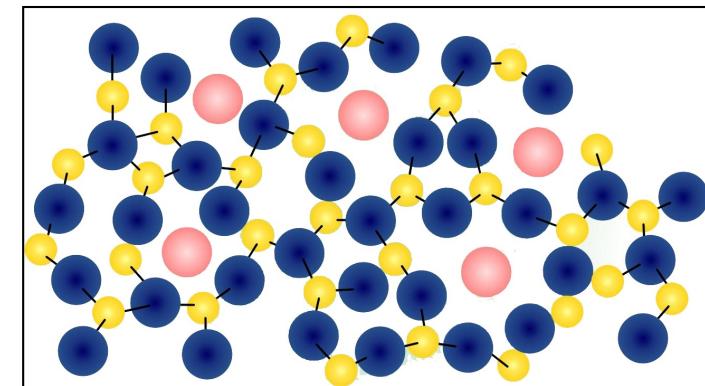
# Télécommunication: La Silice

Le professeur Kao a reçu le prix nobel de Physique pour son invention des fibres optiques en 2009.

Le matériau qui a permis cette révolution pour la communication est encore le Silicium, mais sous forme d'oxyde  $\text{SiO}_2$ , la Silice !



Silice: matériau *amorphe*



# Choix des matériaux

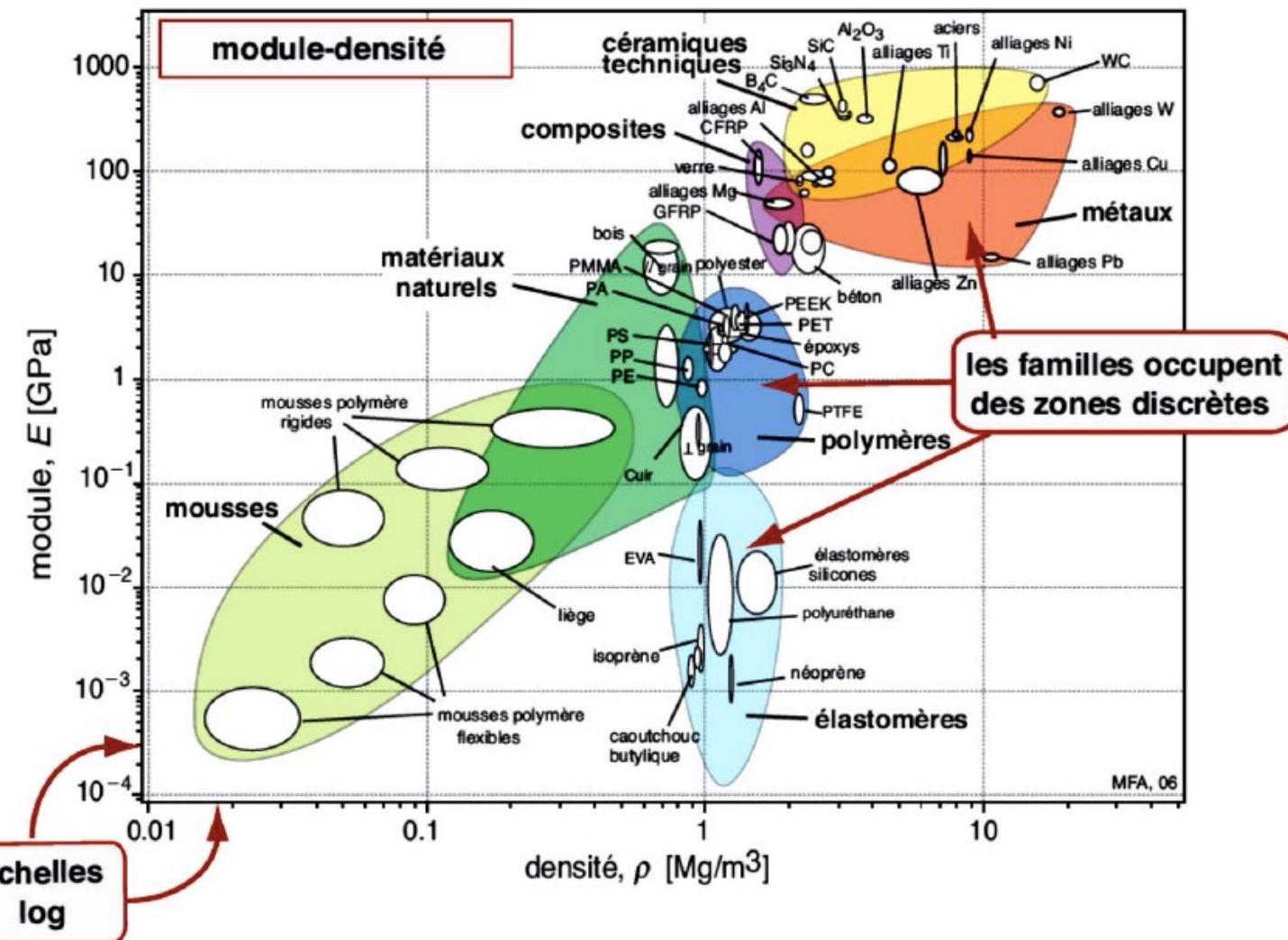
---

Dans de nombreuses applications, un ingénieur va être confronté au choix des matériaux: quel matériau pour quelle(s) fonction(s)?

- Fonctionnalité
- Les contraintes: mécaniques, thermiques etc...
- L'impact sur l'environnement: caractère toxique, procédés de fabrication polluant, recyclage...
- Coût: matière première, procédés etc...

# Choix des matériaux

Nous verrons un outil utile pour aider à ce choix: les cartes d'Ashby qui permettent de comparer les différents matériaux...



# Choix des matériaux

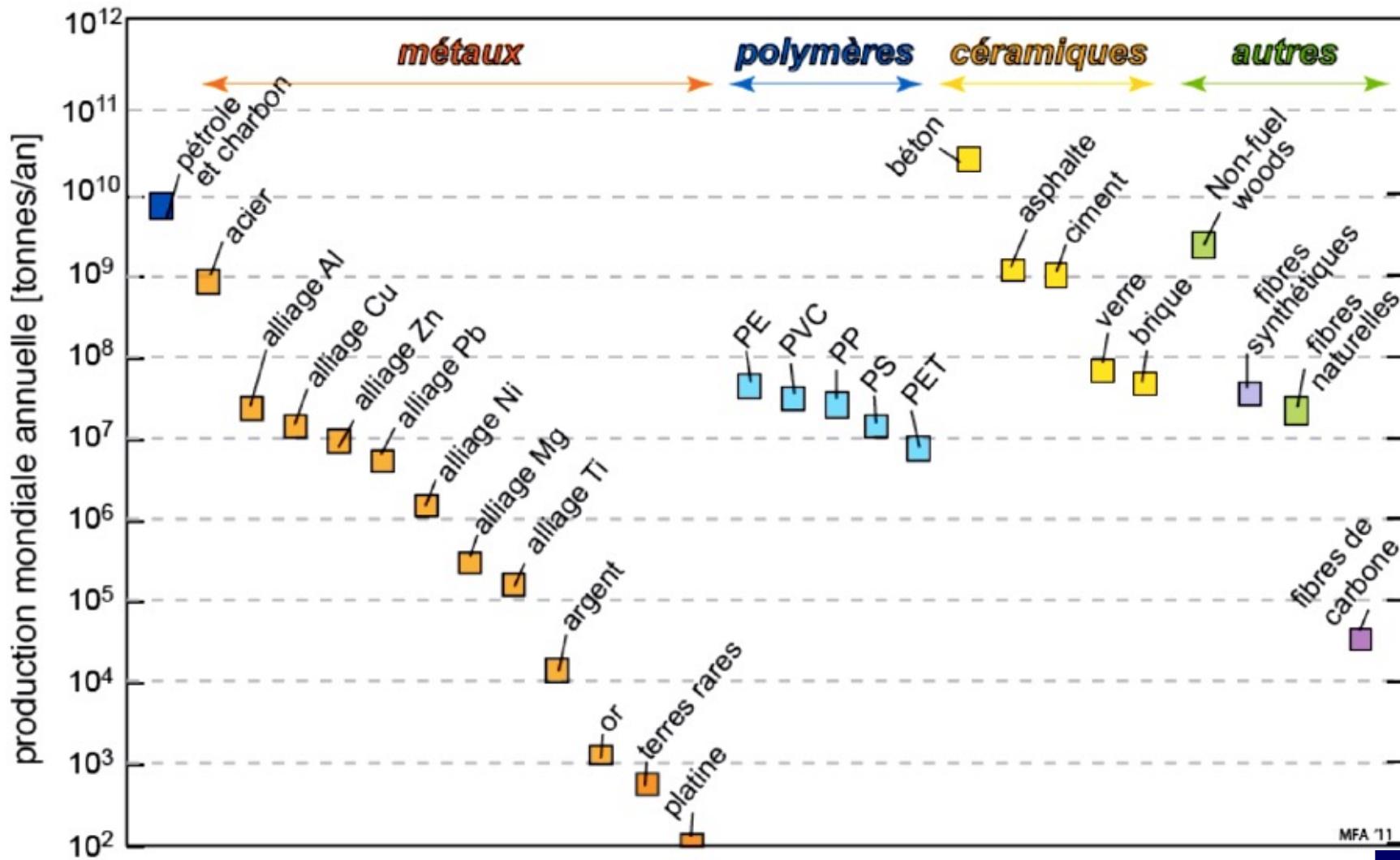
---

Un exemple du quotidien: quelle assiette choisir pour un repas?



# Consommation

Notre société est « multi-matériaux » et très consomériste:



# Consommation

La consommation par habitant est impressionante...:

	$10^6$ t/an	kg/an/ h
Acier	1129	185.8
Aluminium	32	5.3
Cuivre	30	4.9
Zinc	9.7	1.6
Plomb	5	0.8
Titane	2	0.3
Nickel	1.3	0.2
Magnésium	0.6	0.1
Silicium	5.	0.8

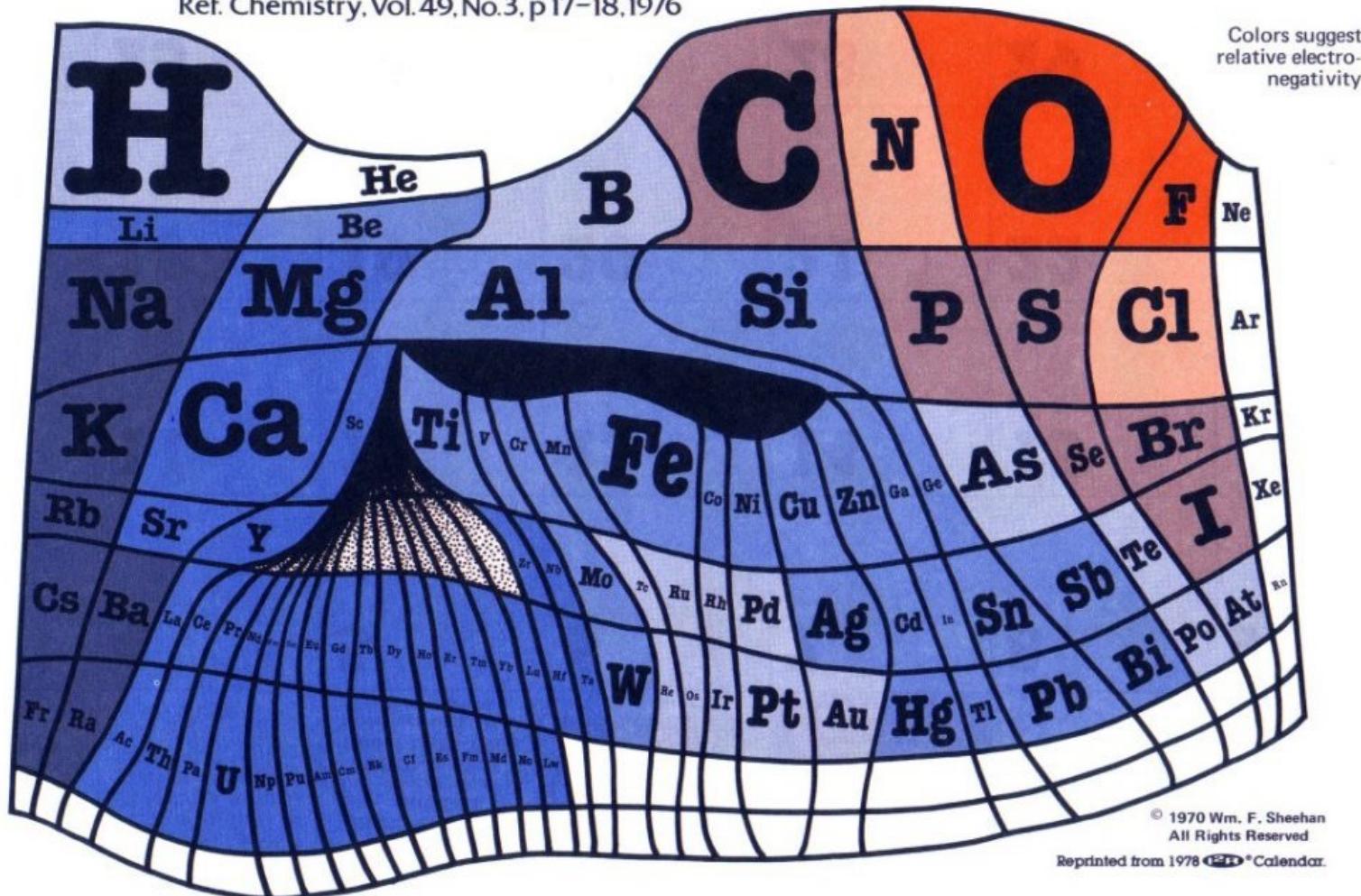
	$10^6$ t/an	kg/an/h
Huile et charbon	9000	1481
Béton	12000	1975
Ciment	1100	181
Bois	1100	181
Verre	70	11.5
PE	65	10.7
PVC	50	8.2
PP	50	8.2
PET	9	1.5

# Consommation

## The Elements According to Relative Abundance

A Periodic Chart by Prof. Wm. F. Sheehan, University of Santa Clara, CA 95053

Ref. Chemistry, Vol. 49, No. 3, p 17-18, 1976

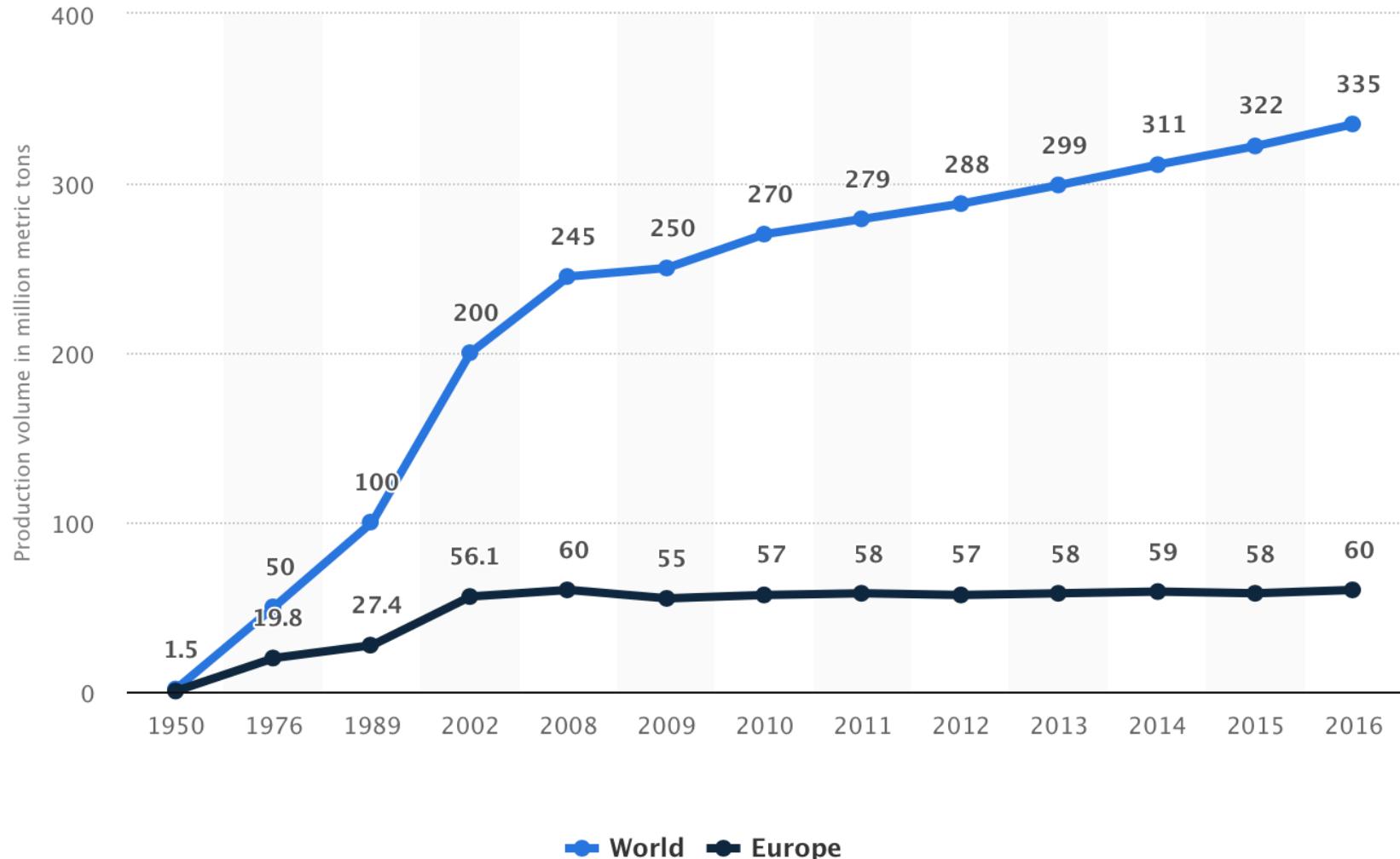


Roughly, the size of an element's own niche ("I almost wrote square") is proportioned to its abundance on Earth's surface, and in addition, certain chemical similarities (e.g., Be and Al, or B and Si) are sug-

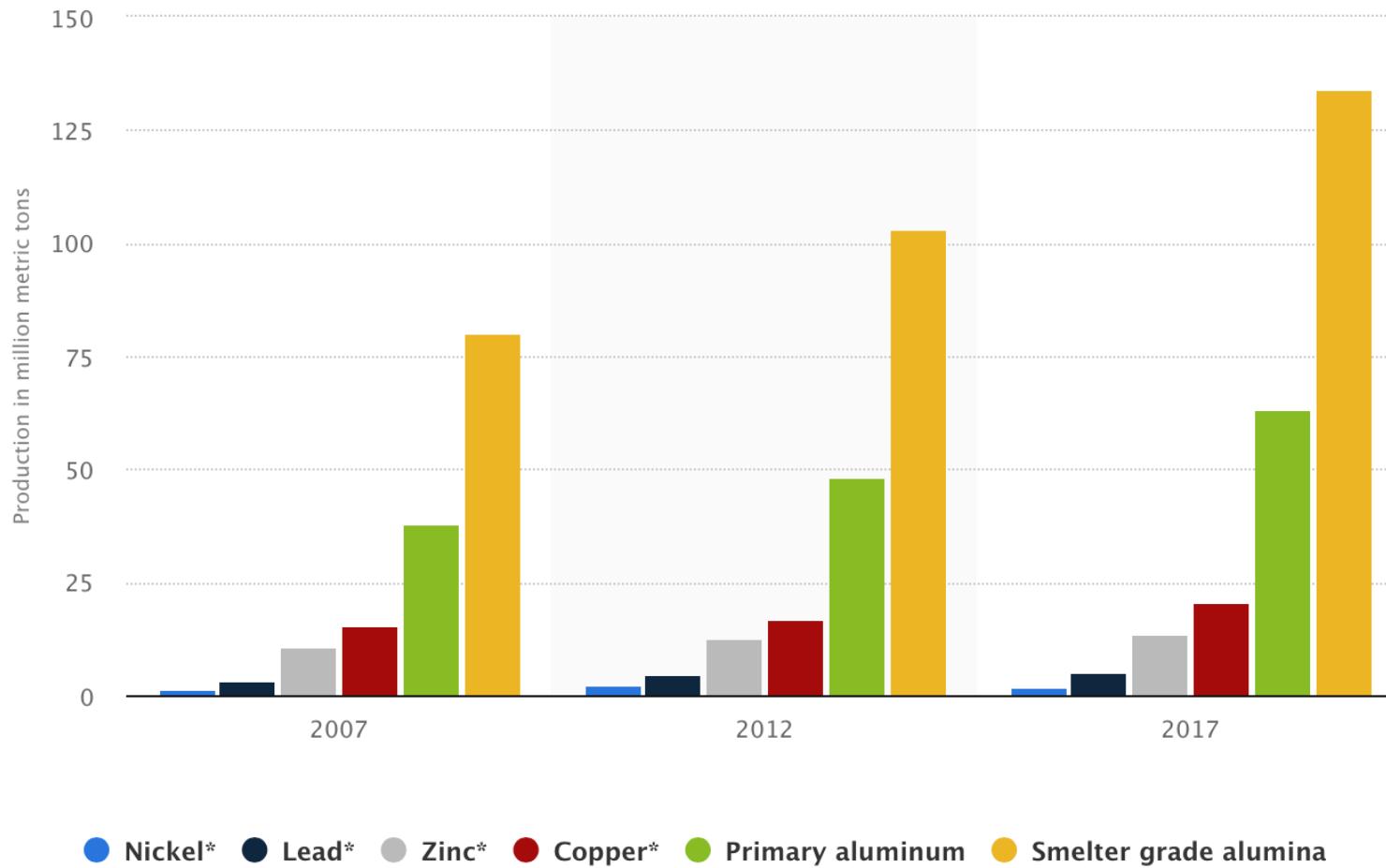
gested by the positioning of neighbors. The chart emphasizes that in real life a chemist will probably meet O, Si, Al, ... and that he better do something about it. Periodic tables based upon elemental abundance would, of course, vary from planet to planet. . . W.F.S.

NOTE: TO ACCOMMODATE ALL ELEMENTS SOME DISTORTIONS WERE NECESSARY, FOR EXAMPLE SOME ELEMENTS DO NOT OCCUR NATURALLY.

# Consommation



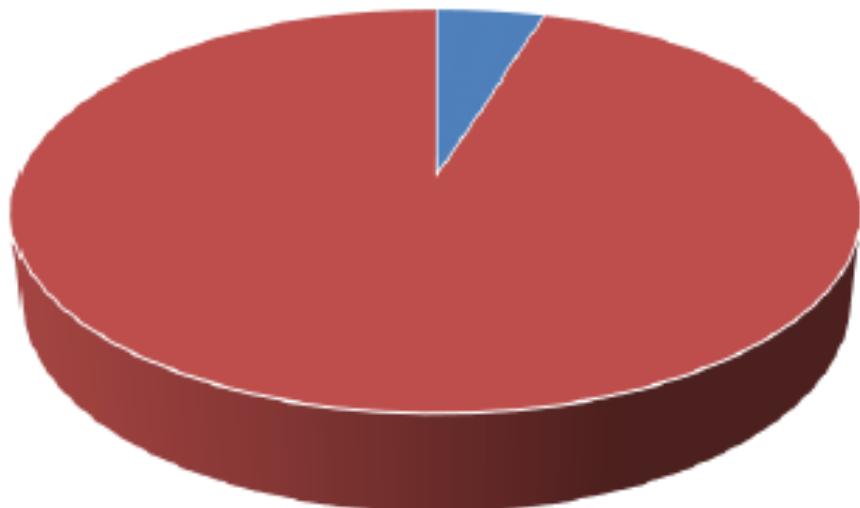
# Consommation



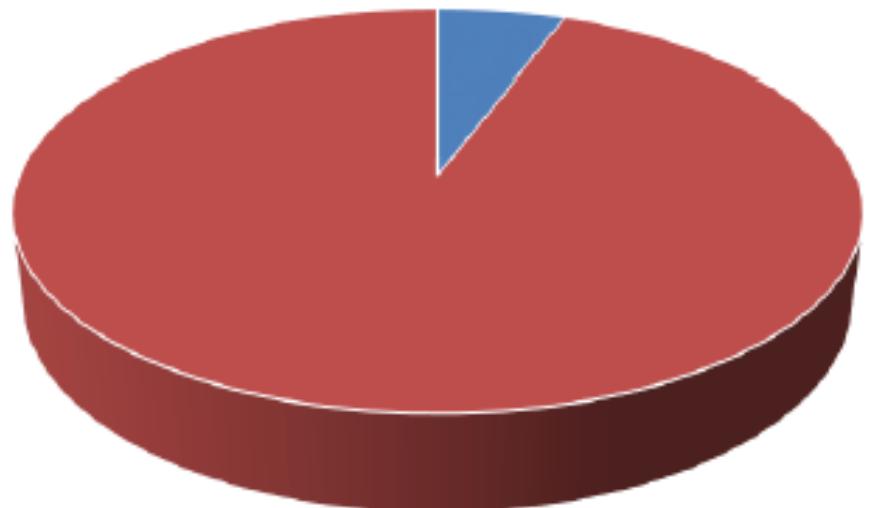
# Recyclage

Certains matériaux sont pourtant peu abondant sur Terre:

Or: 55'000 tonnes



Etain: 4'800'000 tonnes

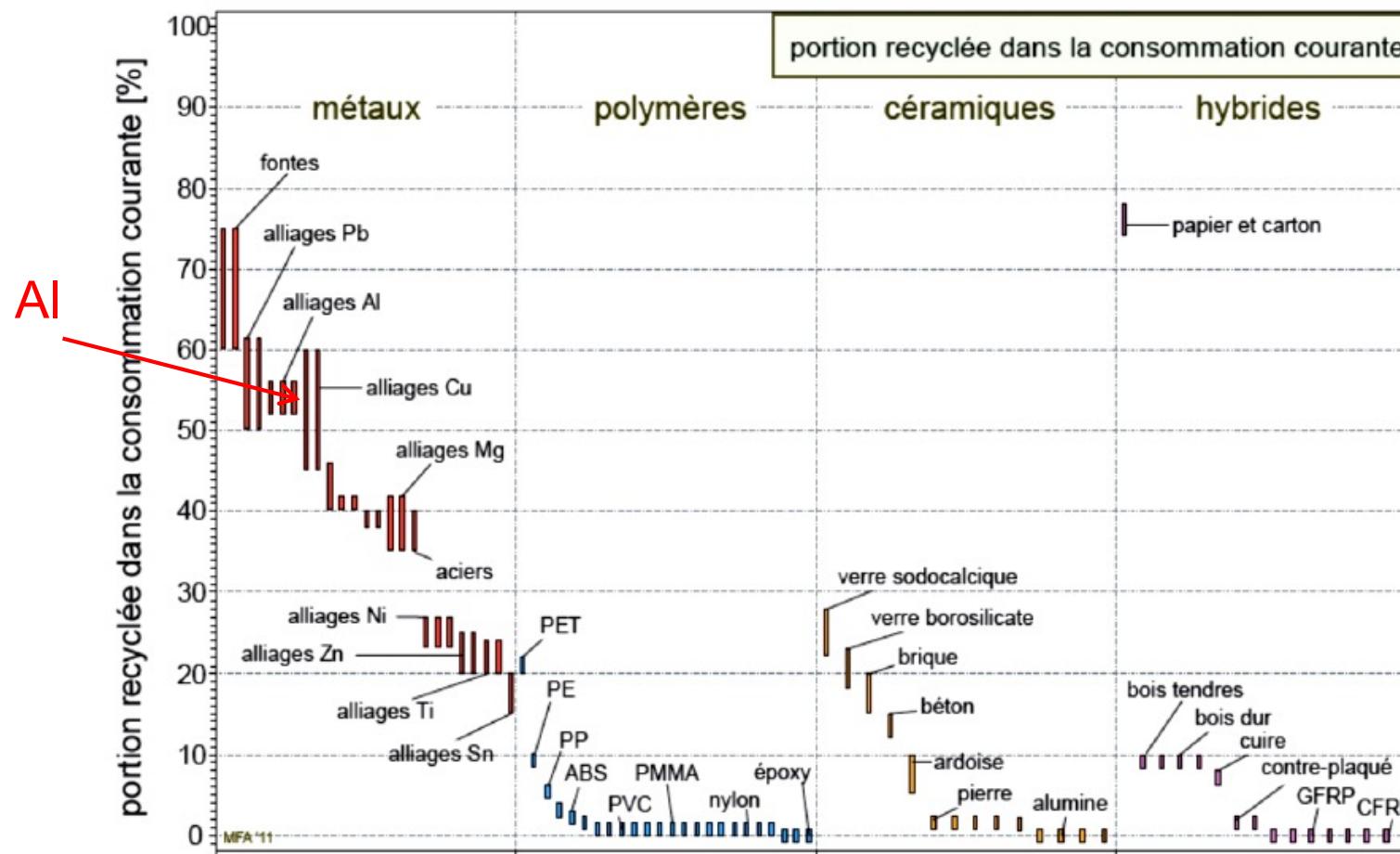


En rouge, les réserves estimées aujourd'hui  
En bleu, la production annuelle

# Recyclage

D'où l'importance de recycler les matériaux

- rares
- « difficiles » (coûteux, polluant,...) à produire



# Consommation et recyclage

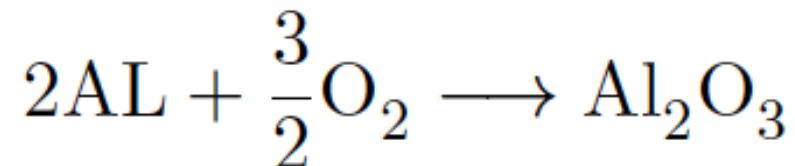
---

Le cas de l'Aluminium est très intéressant:

- Abondamment utilisé....



- Extrait de son oxyde l'Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sa production nécessite environ  $10^5$  - $10^6$  MJ.m<sup>-3</sup>

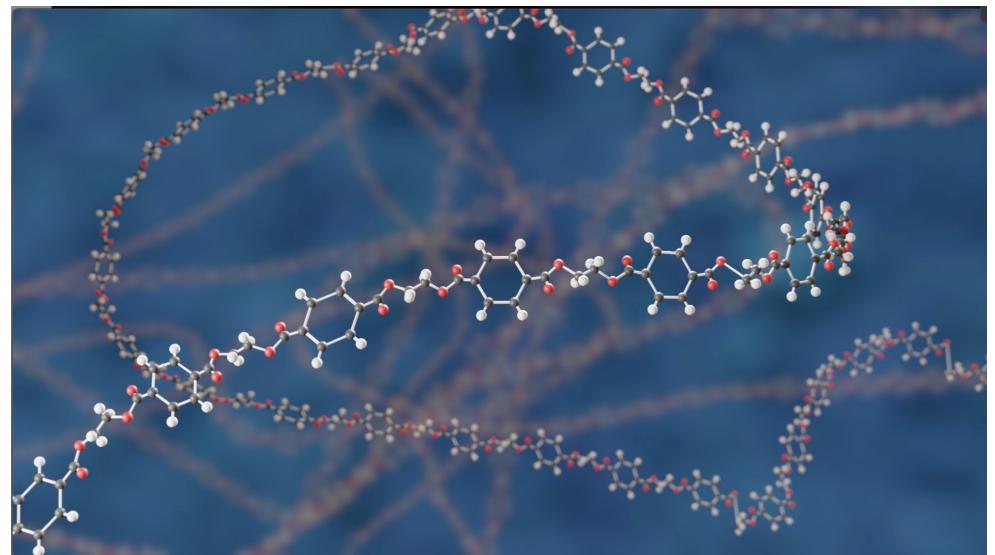


- Il faut seulement environ 3% de cette énergie pour le recycler !

# Histoire et Définitions

---

- Le **caoutchouc** était déjà utilisé par les Aztèques pour fabriquer des balles à des fins ludiques.
- Au XIII<sup>e</sup> siècle, des rapports en Europe font état de l'utilisation de **matériaux plastiques** d'origine naturelle.
- En 1823, Macintosh utilise du caoutchouc pour imperméabiliser le coton.
- En 1839, Goodyear découvre le caoutchouc vulcanisé.
- En 1885, Kodak brevète une machine pour fabriquer des films en nitrate de cellulose.
- En 1907, Baekeland découvre la première résine synthétique : le bakélite.
- En 1908, Brandeberger invente le cellophane.
- En 1909, les plastiques de caséine, dérivés du lait, sont développés par Erinoid.
- En 1920, Staudinger, alors à l'ETHZ, postule l'existence de macromolécules sous forme de polymères, le constituant principal des plastiques.
- En 1932, l'injection plastique est brevetée.
- En 1938, première production de fibres de Nylon 6.
- Vers 2000, première production de LED en plastique.



Qu'est-ce qu'un polymère

Un polymère est une macromolécule composée de nombreuses unités répétitives (les "mers"). Si tous les "mers" sont identiques, on parle d'un homopolymère. Si les "mers" diffèrent, on parle d'un co-polymère.

# Le Problème

"Les matériaux à base de polymères font partie des meilleures classes de matériaux qui existent, car ils sont légers, polyvalents, faciles à traiter et, jusqu'à présent, peu coûteux. En tant que tels, ils sont omniprésents, étant présents dans pratiquement tous les domaines de la technologie."

Mais:

La fin de vie des polymères pose problème, ils ne sont pas conçus pour se dégrader et (en raison de leur contenu élevé en entropie) ils sont intrinsèquement très difficiles à dissoudre.

Et alors:

La fin de vie des polymères pose problème, aujourd'hui l'une des trois choses suivantes se produit avec les plastiques à la fin de leur cycle de vie.

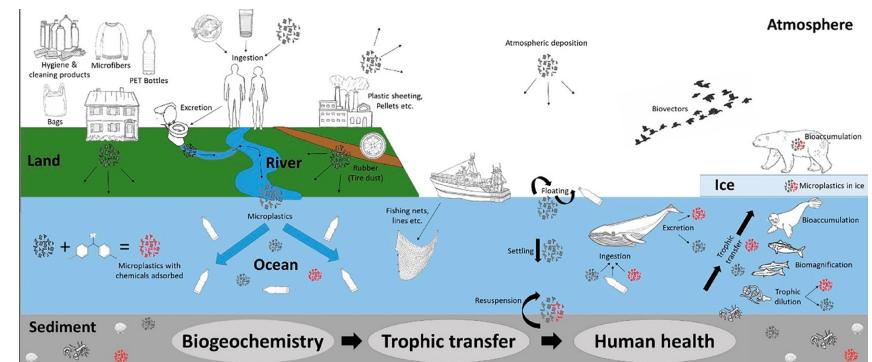
Ils sont brûlés



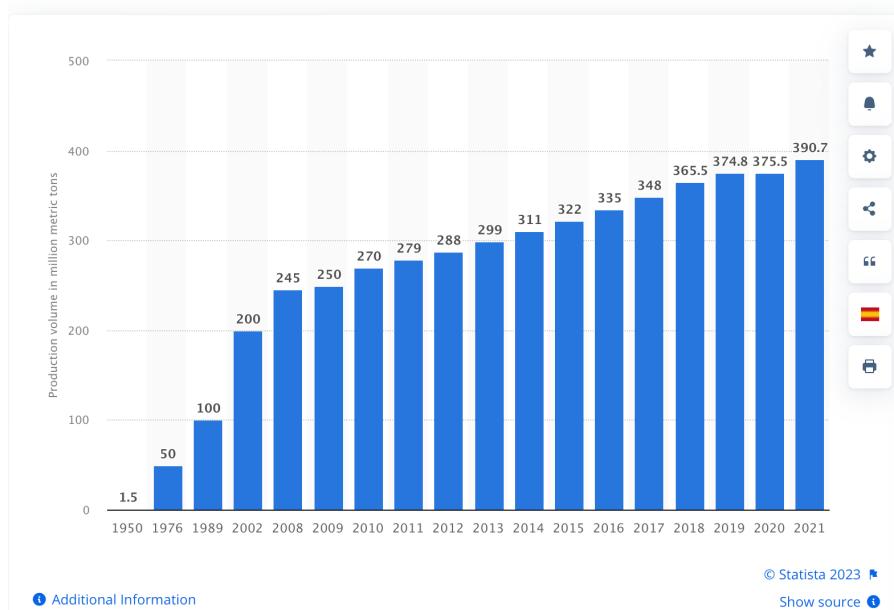
Ils finissent dans l'océan



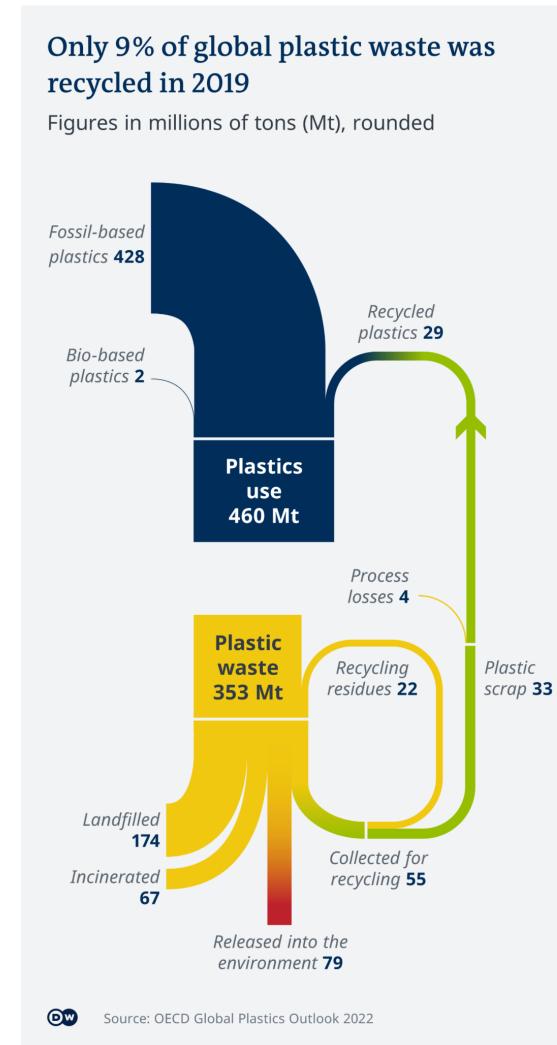
Ils se dégradent lentement en microparticules



# La Taille du Problème



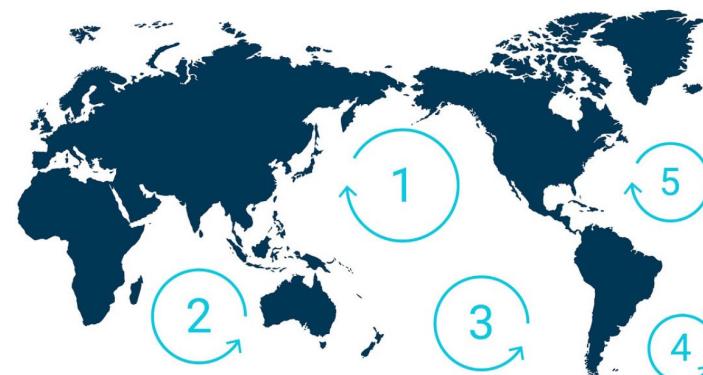
~50 kg par personne par an



# La Taille du Problème



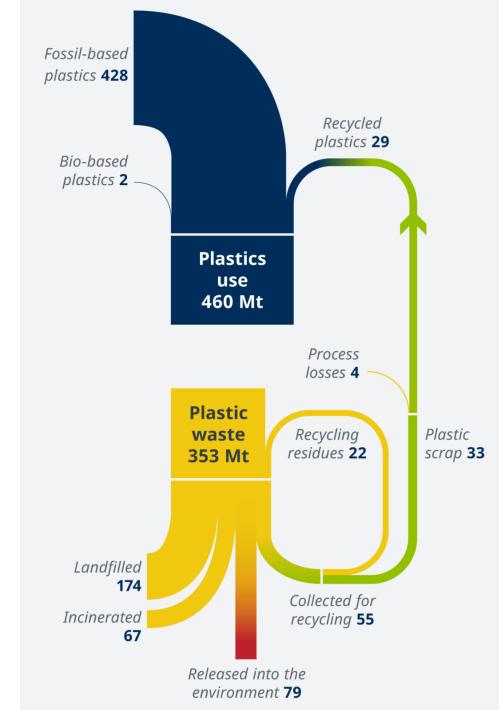
Microplastiques :  
~7000 tonnes sur les routes de la Suisse  
~400 000 tonnes sur les routes de l'Europe



Le Grand Patch de déchets du Pacifique couvre une superficie estimée de 1,6 million de kilomètres carrés, soit trois fois la taille de la France

Only 9% of global plastic waste was recycled in 2019

Figures in millions of tons (Mt), rounded



Source: OECD Global Plastics Outlook 2022

# Solutions Actuelles

---

Théoriquement, 75% du plastique que nous produisons est recyclable, mais :

- le plastique vierge est trop bon marché
- le recyclage avec la plupart des approches actuelles implique une perte de performance des matériaux
- il existe des pays entiers sans infrastructure pour le recyclage



# Résumé et notions importantes

---

- *On peut classer les matériaux en 4 grandes catégories*
- *La Science des matériaux a pour principale fondement la compréhension du lien entre leur nano- et micro-structure, et leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles*
- *Elle est à la base des développements technologiques modernes*
- *Les notions de ressources, de consommation et de recyclage mais aussi de coût sont primordiales pour le choix de matériaux pour l'ingénieur*
- *Le Silicium est un matériaux qui a joué un rôle clé dans le développement technologique de l'électricité, de la microtechnique, de l'énergie et de l'optique.*