

Génie électrique et électronique
Microtechnique

Cours MSE-101(b)

Introduction (partie matériaux)

Roland Logé

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne



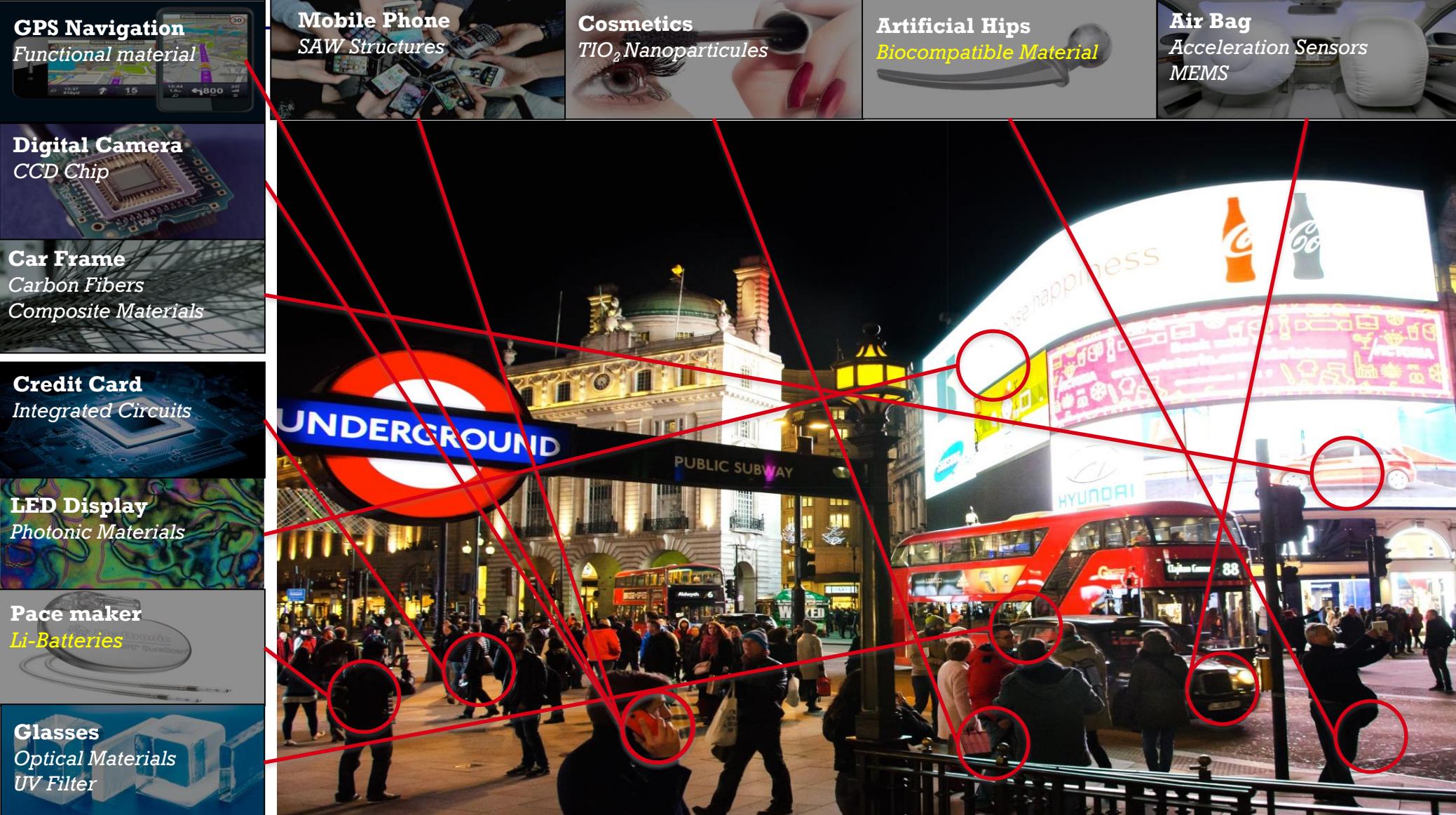
Table des matières

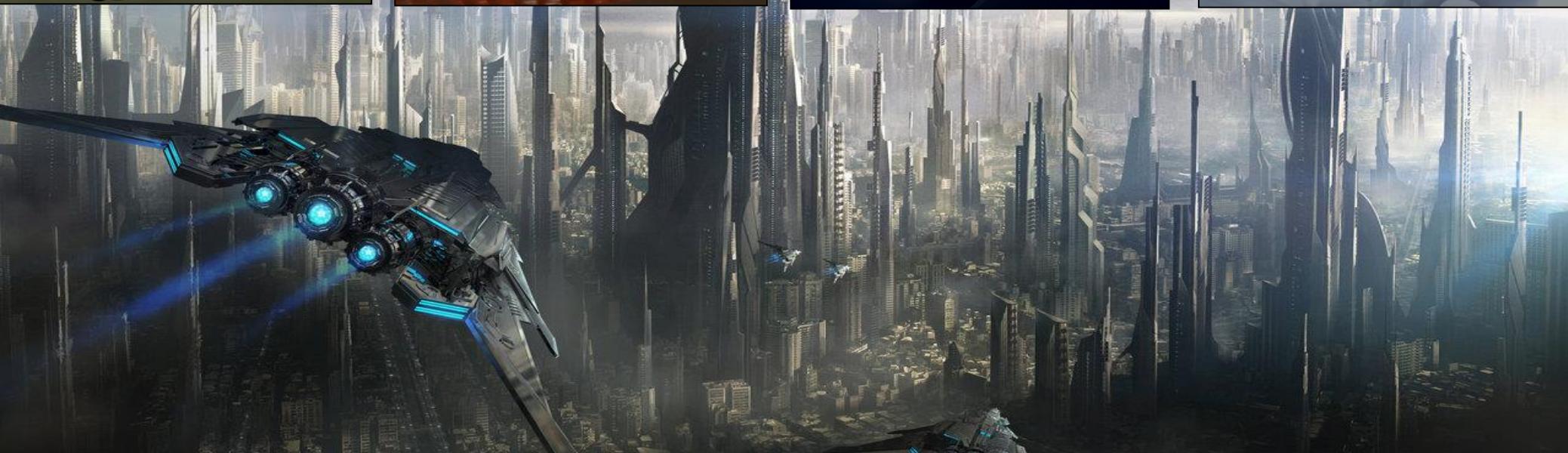
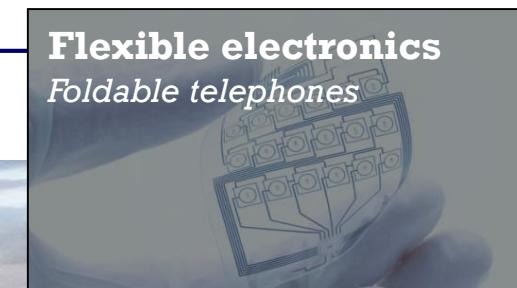
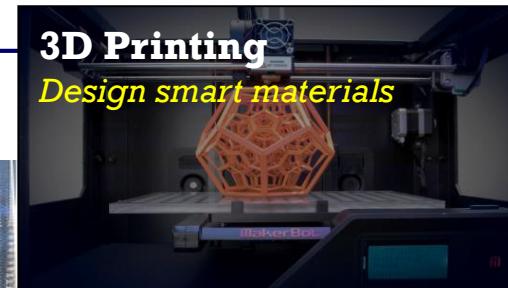
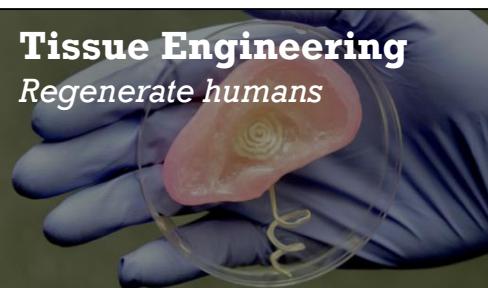
- But, contenu et organisation du cours
- Introduction générale des **matériaux**:
 - Classification
 - Historique: de l'atome aux matériaux
 - Consommation et recyclage
- Sélection des matériaux
- De l'extraction à l'utilisation
- Développements technologiques grâce aux matériaux

But du cours

- La plupart des applications ou des développements technologiques sont limités par les matériaux et les procédés d'élaboration et de fabrication.
- La **science des matériaux permet de** concevoir et élaborer un matériau à l'échelle atomique (composition, structure), en vue d'obtenir des propriétés et des performances optimales par un procédé de fabrication économique, et respectueux de l'environnement.
- Pour atteindre les **propriétés** mécaniques, optiques, magnétiques etc. voulues, il faut donc comprendre la structure atomique de la matière, les **liaisons chimiques**, et les **réactions chimiques**.

Le but de ce cours est de vous plonger dans cet univers et de vous donner les outils de base pour y évoluer





Objectifs du cours

Les matériaux, est-ce important pour moi ?

- Concevoir des pièces, mécanismes
- Utiliser et choisir des matériaux. Métal pur ou alliage ?
- Risques ? Durabilité ?
- Résistance à la chaleur, fissuration ? Revêtement de surface ?
- Rigidité et dureté souhaitées ?

Objectifs pratiques

A la fin du cours, vous devez être capables de:

Expliquer la structure et les propriétés de base des atomes et des liaisons chimiques

Appliquer les principes de la thermodynamique à la résolution de problèmes d'équilibre

Formuler un problème lié aux matériaux en termes d'équations simples

Choisir ou sélectionner un type de matériau en fonction de son cahier des charges

Analyser des propriétés des matériaux en fonction de leur structure et composition

Calculer des propriétés de matériaux en respectant ordres de grandeur et unités

Compétences transverses:

Utiliser une méthodologie de travail appropriée, organiser un/son travail

Etre responsable des impacts environnementaux de ses actions et décisions

Evaluer sa performance dans le groupe, recevoir du feedback et y répondre de manière appropriée

Etre conscient des implications sociales et humaines liées au métier de l'ingénieur

Auto-évaluer son niveau de compétence acquise, planifier ses prochains objectifs d'apprentissage

Accéder aux sources d'informations appropriées et les évaluer

Organisation du cours

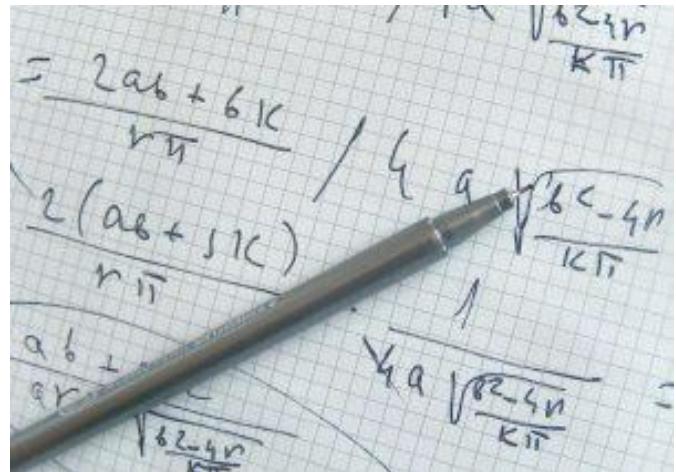
Cours:	Mardi 9h15-11h00	<u>SG1 138</u>
	Mercredi 12h15-13h	<u>CE1 6</u>
 Exercices:		
	Jeudi 13h15-15h00	CE1101
		CE1103
		CE1105
		CE1106

- **Pour les exercices: 4 assistants-doctorants + 10 assistants-étudiants + 1 professeur** à votre disposition dans les salles d'exercices.
- Notes du cours sur Moodle, au plus tard au début de chaque semaine
- Données des exercices sur Moodle, le mardi matin
- Les corrigés sur Moodle, le jeudi soir

Pour réussir l'examen, il ne suffit pas de lire les solutions : **Il est essentiel de faire les exercices par soi-même** (learning by doing).

Contenu du cours

- De la chimie, un peu de physique... et des maths
- Notions de base:
 - Concepts mathématiques clés
 - Les dimensions
 - Les ordres de grandeur
- Un bon ingénieur doit développer une intuition et une bonne compréhension des lois physiques et chimiques, et être capable de les exprimer de façon mathématique et numérique.



Contenu du cours (partie matériaux)

1. Structure des matériaux
2. Propriétés mécaniques: élasticité, plasticité, ductilité, dureté, ténacité
3. Fatigue, propriétés thermiques, diffusion
4. Diagrammes de phases
5. Propriétés électriques, magnétiques et optiques
6. Résumé

Documentation pour le cours

1. Une copie des transparents, les données des exercices, les corrigés et autres documents se trouvent sur Moodle

2. Les vidéos de Michel Rappaz:

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLiUzDFqS-HE2BTomCK0ImNjapEa1cvoXm>

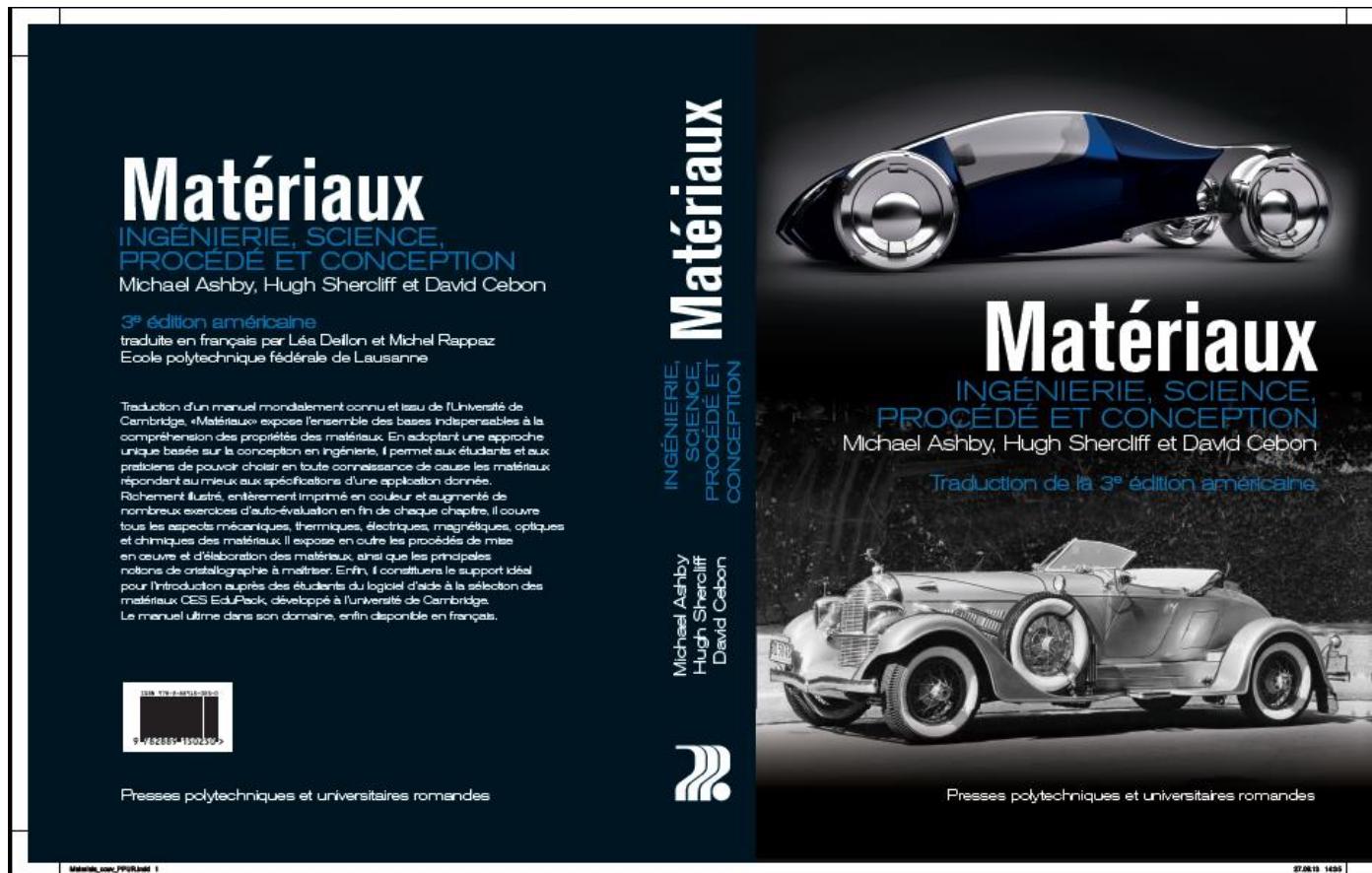
3. Livre de référence

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

M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon

Extraits sur Moodle + Bibliothèque EPFL

Documentation pour le cours



- Aller sur : https://beast-epfl.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/search?vid=EPFL&lang=en_US
- Insérer: Matériaux: ingénierie, science, procédé et conception
- Cliquer sur l'onglet vert “Online” ou “Disponible en ligne”

Classification des Matériaux

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

1. Céramiques et verres

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

2. Métaux

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

3. Polymères et élastomères

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

4. Composites

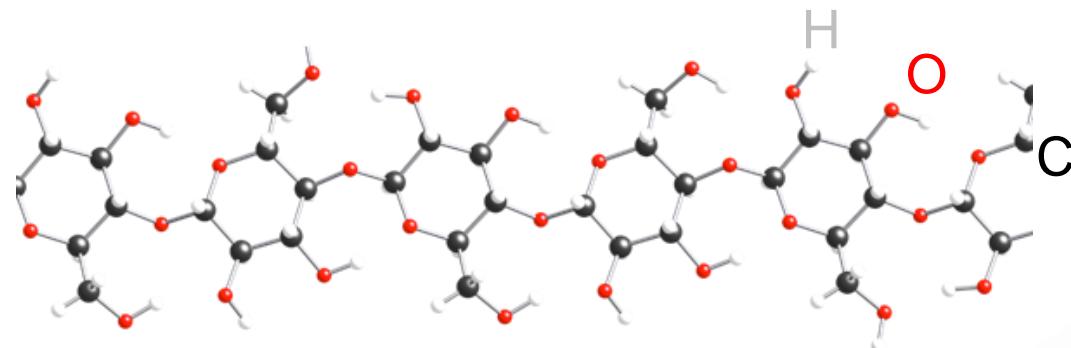
Matériaux assemblant de façon non miscible au moins deux matériaux des trois catégories précédentes.

Classification des Matériaux

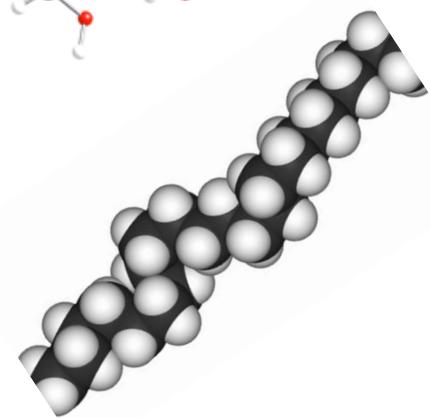
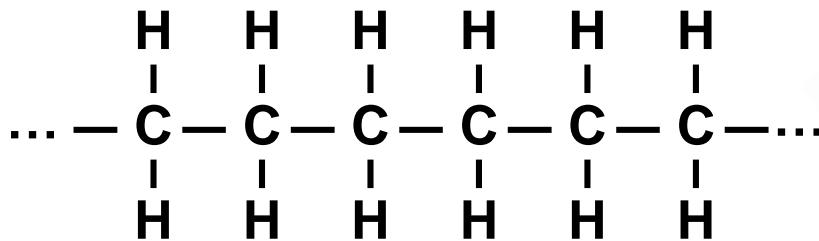
Matériaux **organiques** vs. inorganiques ?

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)



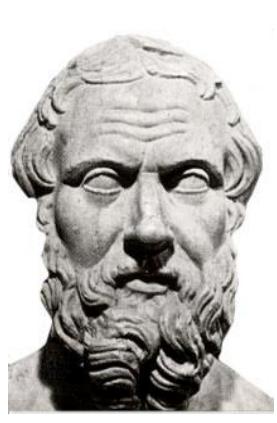
Polyéthylène (PE)
(synthétique)



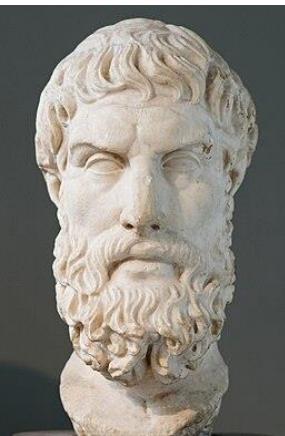
Des atomes aux liaisons... aux matériaux



Leucipe



Démocrite



Epicure

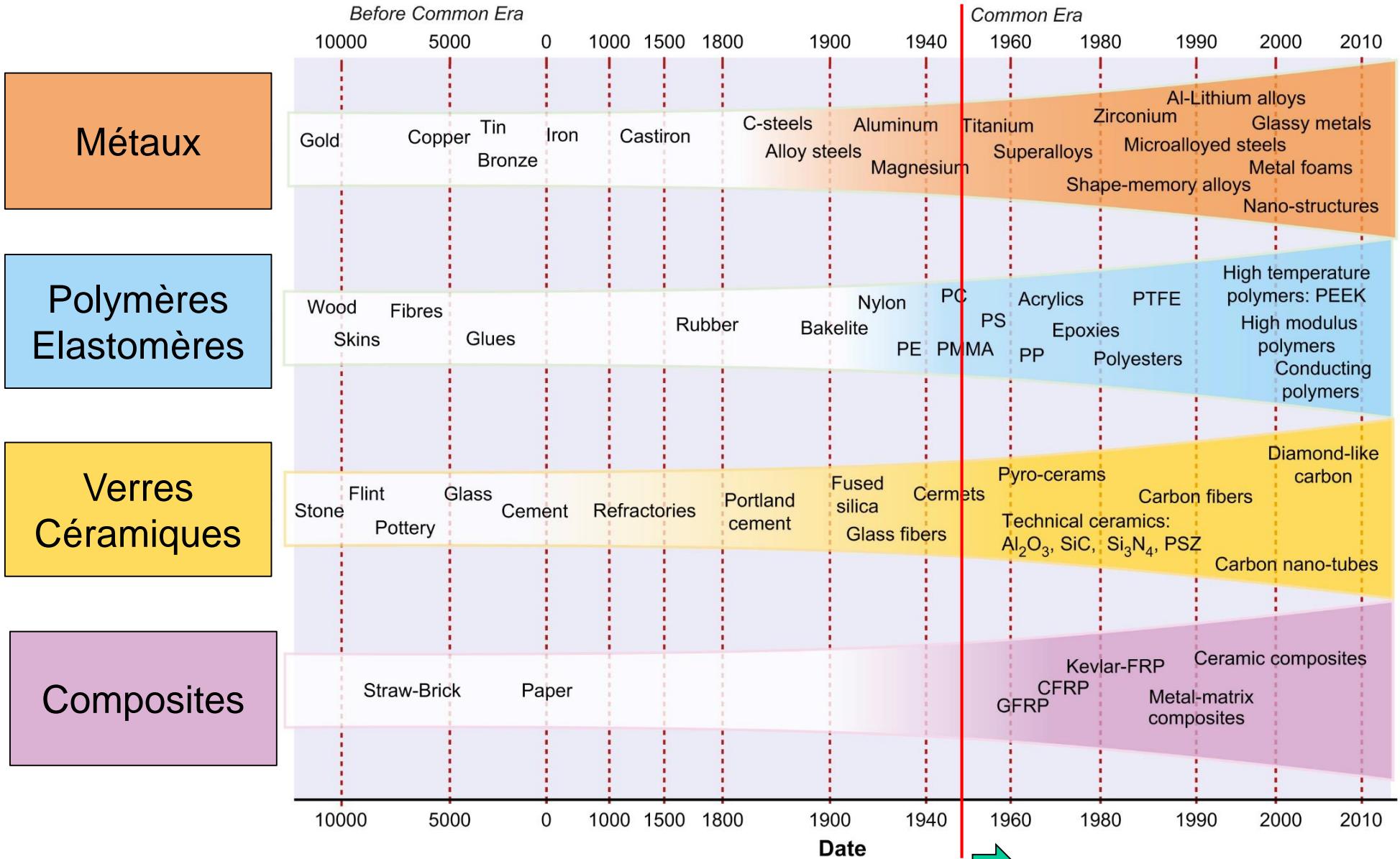
Les philosophes grecs, surtout Démocrite (470-360 ac), sont les premiers “atomistes” qui émettent l’hypothèse que **la matière est composée de “grains”, indivisibles.**

- Les atomes et surtout **les liens** assurés entre eux par les électrons de leurs couches externes, ainsi que **les défauts**, sont la source des **propriétés** des matériaux.
- Mis à part les forces de gravité, les forces impliquées dans les propriétés des matériaux sont **électromagnétiques**, puisque liées aux électrons.
- La compréhension de ce qui sera enseigné dans ce cours s'est faite sur de nombreuses décennies (siècle)



Suivant le type de liaison, le **carbone pur** peut être dur et transparent (diamant) ou opaque et friable (charbon)!

Historique des matériaux



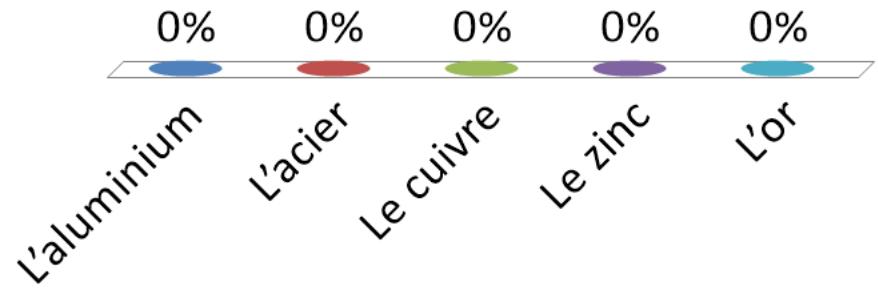
Utilisation des clickers par smartphone

1. Avec un navigateur Web, utiliser l'url
<http://responseware.eu>
2. Saisir le numéro de session : **mse101**

(le numéro de session sera toujours le même)

Quel est le matériau métallique le plus consommé au monde ?

- A. L'aluminium
- B. L'acier
- C. Le cuivre
- D. Le zinc
- E. L'or



Rappel : Consommation de matériaux

	10^6 t/an	10^6 kg/h
Acier	1' 781	203
Aluminium	69	7.9
Cuivre	22	2.5
Zinc	12.9	1.5
Plomb	5	0.6
Nickel	2.7	0.31
Magnésium	0.76	0.1
Or	0.003	3×10^{-4}
Silicium	6	0.68

	10^6 t/an	10^6 kg/h
Charbon	8' 300	947
Pétrole	4' 400	550
Ciment	4' 100	502
Bois**	4' 000	457
Verre	1' 416	162
PE	130	14.8
PP	87	9.9
PVC	59	6.7
PET	28.5	3.2

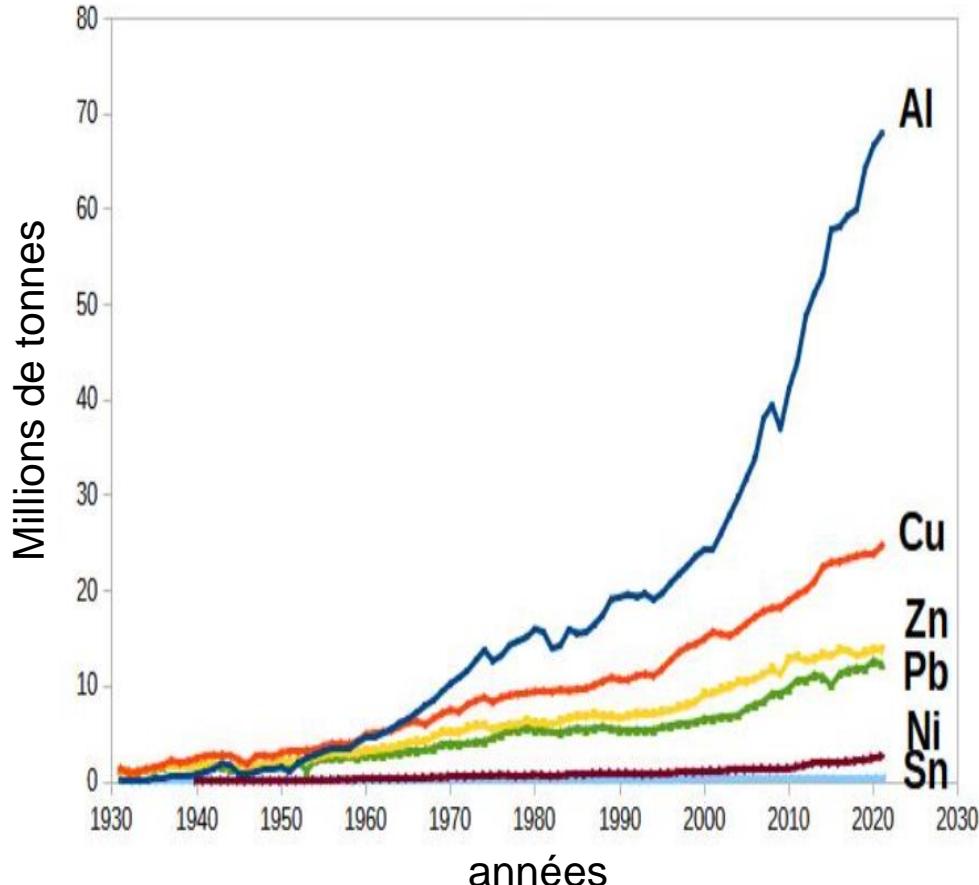
**Bois: consommation répartie environ 50% chauffage, 50% industrie

* Source: M. Ashby et al., Materials et web (année > 2020)

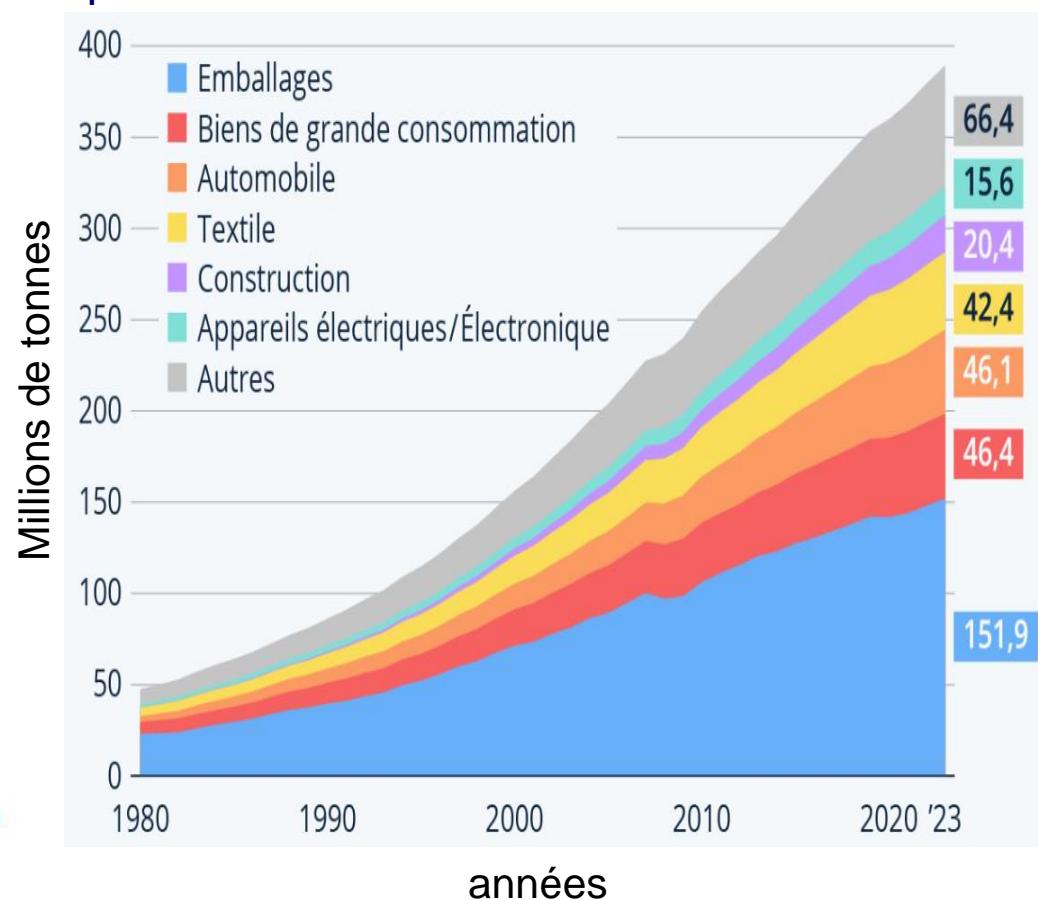
Consommation de matériaux

La production mondiale de métaux et de plastiques au cours du temps a **explosé**.

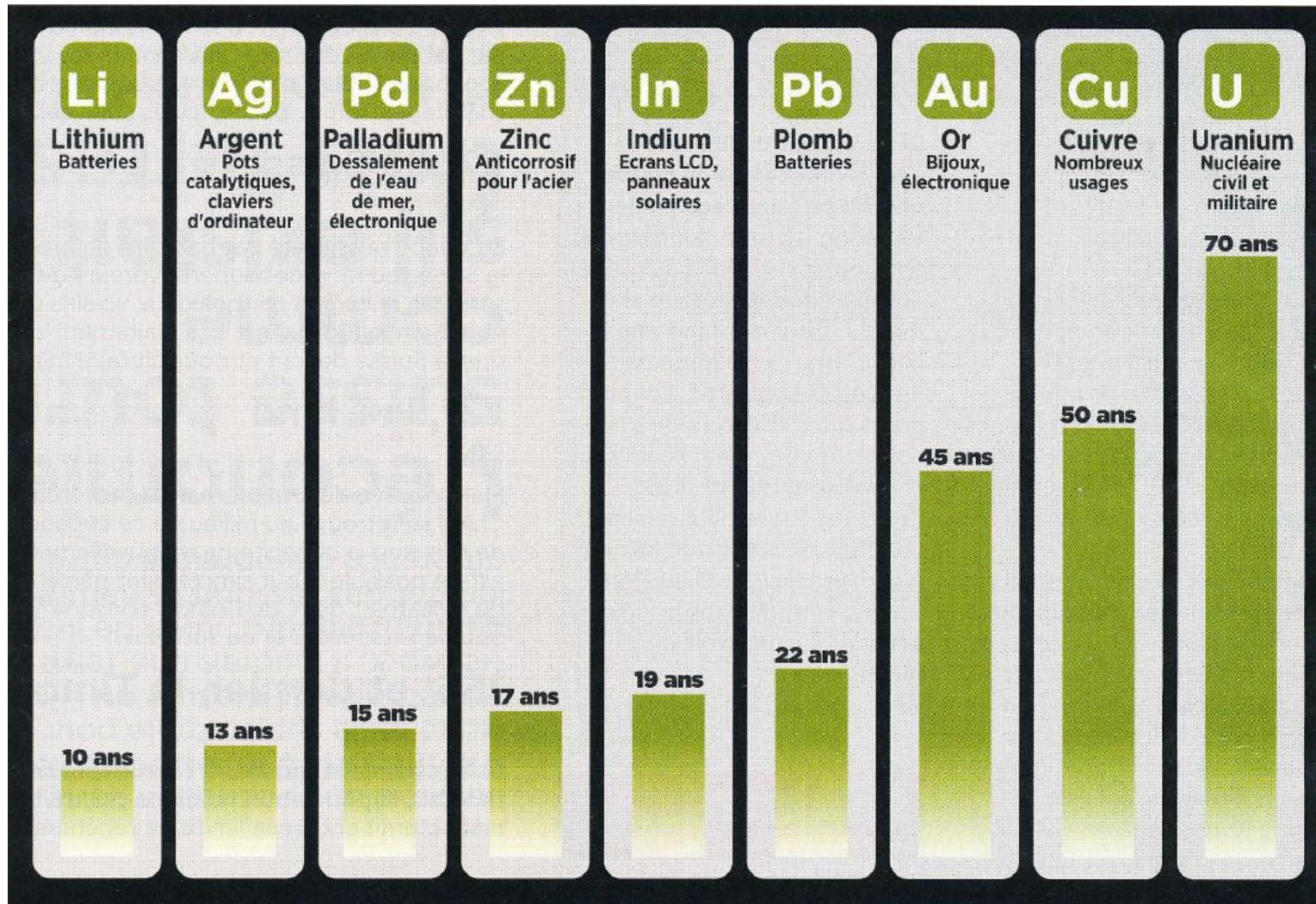
Pour **Al**, production multipliée par un **facteur 5** entre 1973 et 2023.



Pour les **plastiques**, quantités multipliées par un **facteur 8** entre 1980 et 2023.



Consommation pour combien de temps?

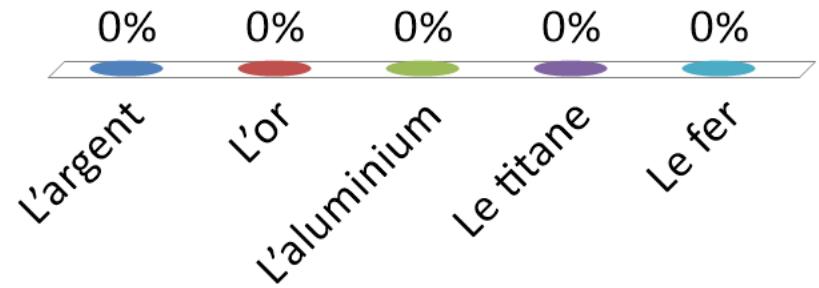


Source: Illustré 2011, No 06/11

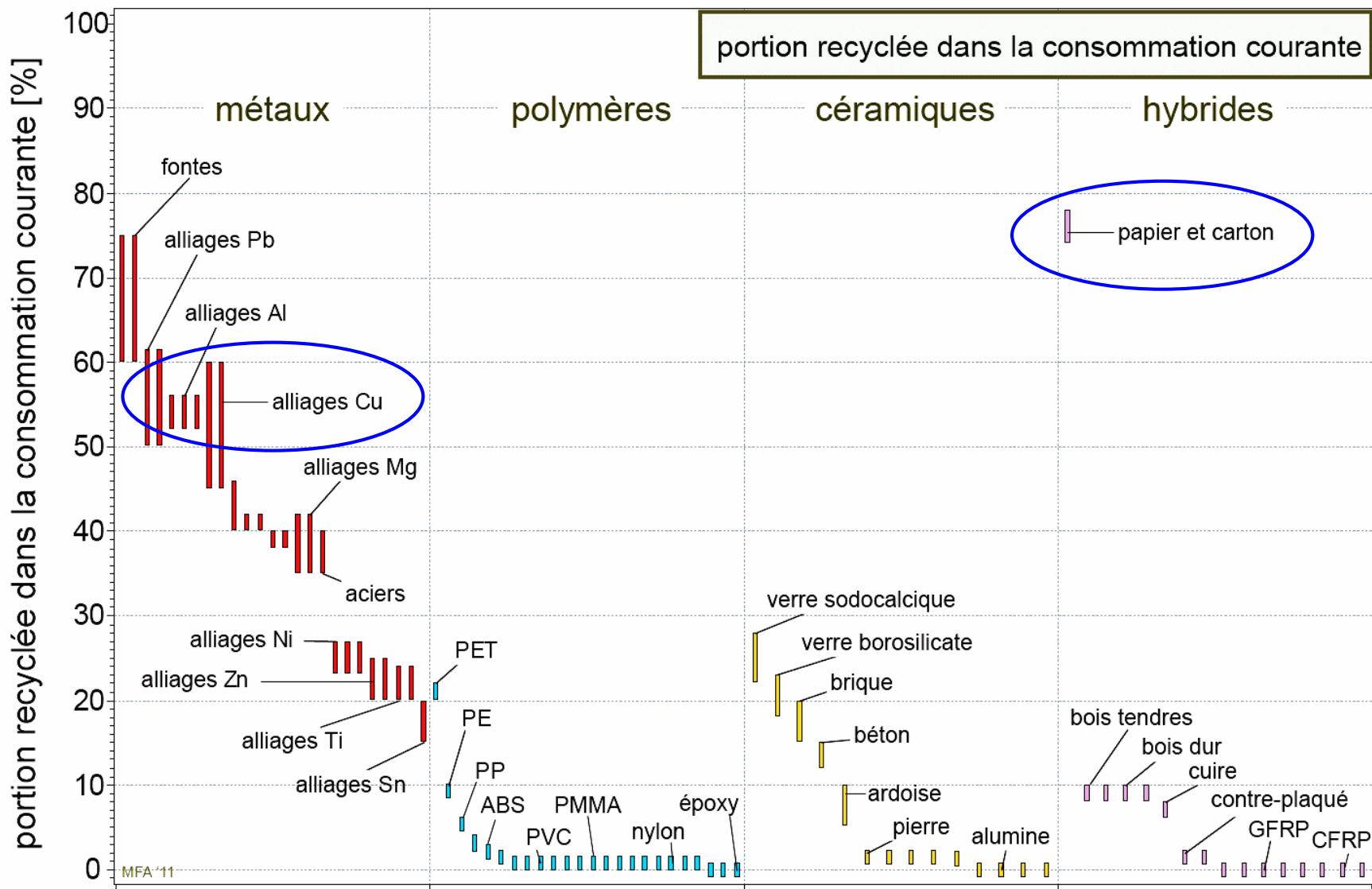
Source: US Geological Survey

Si le cuivre commence à manquer, quel matériau pourrait contribuer à le remplacer ?

- A. L'argent
- B. L'or
- C. L'aluminium
- D. Le titane
- E. Le fer



Consommation: nécessité de recycler plus



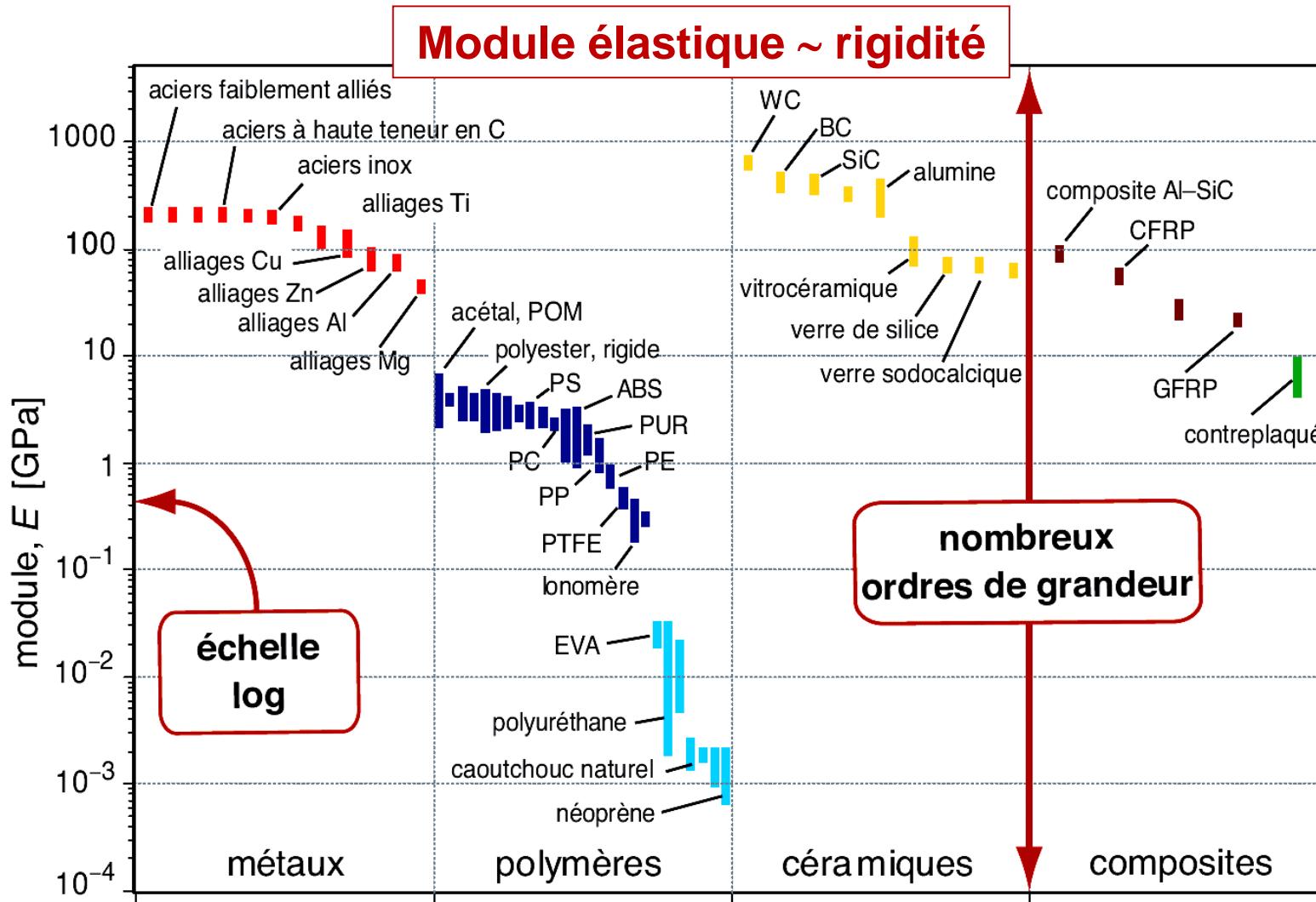
Sélection des matériaux

Dans la plupart des applications, un ingénieur sera confronté au **choix des matériaux**. Quel matériau pour quelle fonction ?

- Quelle(s) fonction(s), quelle(s) spécificité(s)?
- Propriétés **mécaniques** nécessaires (rigidité, résistance, ténacité, ...)
- Propriétés **fonctionnelles** (thermiques, électriques, magnétiques, optiques,...)
- Propriétés **chimiques** (corrosion, flammabilité...)
- Quels **impacts environnementaux** (émissions toxiques, ressources utilisées, pollution, possibilité de recyclage,...)
- ... et avec quels **coûts** (matière, traitements, ...)

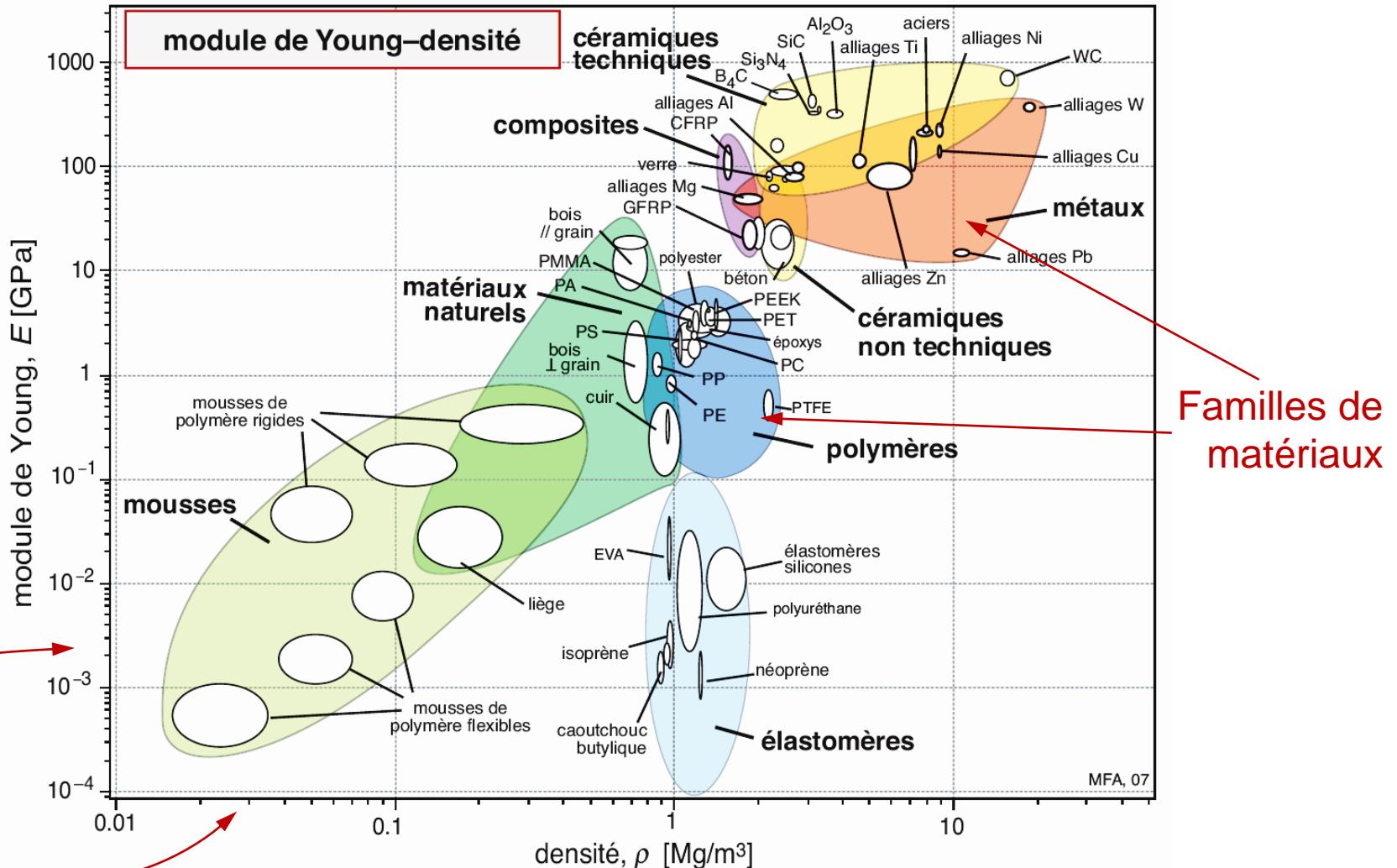
Sélection des matériaux

Afin d'aider à choisir quel matériau choisir pour une application donnée, les **cartes d'Ashby*** sont un moyen de faire une première sélection



Sélection des matériaux

Ces cartes mettent souvent en relation une propriété (e.g. la masse spécifique sur l'axe x) avec une autre propriété sur l'autre (e.g. le module élastique sur l'axe y)



Sélection des matériaux

Vous avez certainement déjà été confrontés à un problème de choix de matériaux.....

Un exemple de la vie courante: quelle type d'assiette pour quelle utilité ?



Résumé

- On distingue essentiellement **4 classes de matériaux**: les céramiques, les métaux, les polymères et les composites
- La plupart des applications/réalisations sont limitées par les matériaux
- Les **propriétés macroscopiques** des matériaux (mécaniques, thermiques, optiques, électromagnétiques,...) sont liées à des aspects **microscopiques**: types d'atomes, liaisons, structures de grains et défauts qu'ils contiennent
- Les différentes **opérations** nécessaires pour obtenir ces matériaux, puis les utiliser pour en faire des systèmes, sont extrêmement **coûteuses** et impactent l'environnement
- Il est donc essentiel de **recycler** les matériaux et de penser à ces aspects économiques et environnementaux lors de la conception

De l'extraction à l'utilisation des matériaux

Lorsque vous achetez un profilé en aluminium, un vélo ou un téléphone portable, avez-vous pensé aux matériaux qui les composent et aux très nombreuses opérations qui ont été nécessaires pour les fabriquer ?

- Extraction du mineraï
- Procédé chimique pour isoler le mineraï intéressant
- Transformation du mineraï en matériau dit primaire
- Fusion et affinage (ajout d'éléments chimiques)
- Extrusion, moulage, coulée continue
- Laminage, soudage, usinage
- Revêtement ou traitement de surface
- Dopage, diffusion, procédés photo-lithographiques
- Assemblage, conditionnement, etc

De l'extraction à l'utilisation: Al et Fe

Les matériaux sont limités par leur abondance naturelle. Tout commence par l'extraction de minerais dans des mines.



Mine de lignite de Hambach
(8 km x 5 km x 0.4 km)



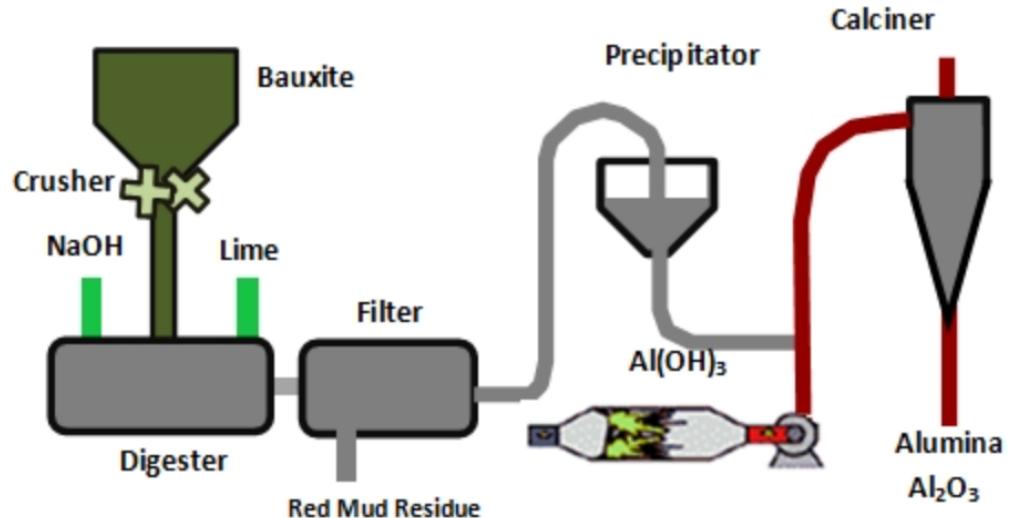
Mine de fer
au Labrador

Pour extraire 1 g d'or, il faut « remuer » 1 tonne de matière!

De l'extraction à l'utilisation: Al et Fe

Il faut ensuite séparer de la masse extraite **le minerai** qui vous intéresse.

Procédé Bayer pour la séparation de
l'alumine à partir de la bauxite



1. Dissolution à chaud de l'alumine contenue dans la bauxite à l'aide de soude
2. Elimination des impuretés par décantation
3. Re-précipitation d'un hydrate d'alumine
4. Obtention de l'alumine après calcination

Résidus (boues rouges)

De l'extraction à l'utilisation: Al et Fe

La plupart des métaux ne se trouvant pas à l'état natif, il faut ensuite rompre les liaisons chimiques (avec O, F, SO_4 , ...)



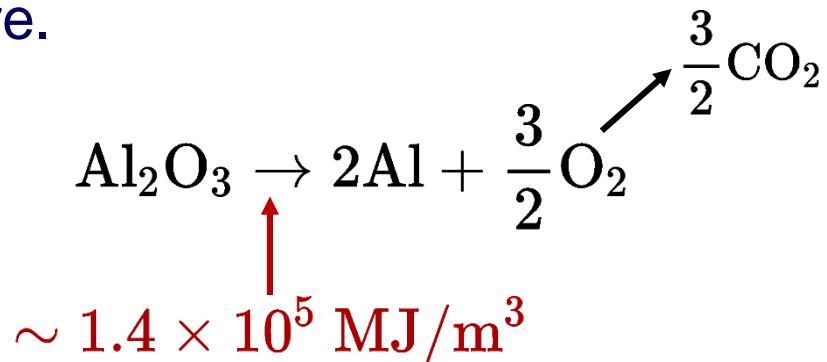
Transfert de l'oxygène du Fe à C
dans un haut-fourneau



Electrolyse de Al_2O_3 dans une cuve
avec une anode en C

De l'extraction à l'utilisation: Al et Fe

Le cas de l'aluminium est intéressant, car il est de plus en plus utilisé... mais sa liaison avec l'oxygène est très forte, d'où les difficultés de le produire.



Energie injectée dans l'électrolyse
(l'oxygène attaque l'anode en graphite)



Pour comparaison, l'énergie pour refondre l'aluminium (recyclage):

$\sim 6'300 \text{ MJ/m}^3$

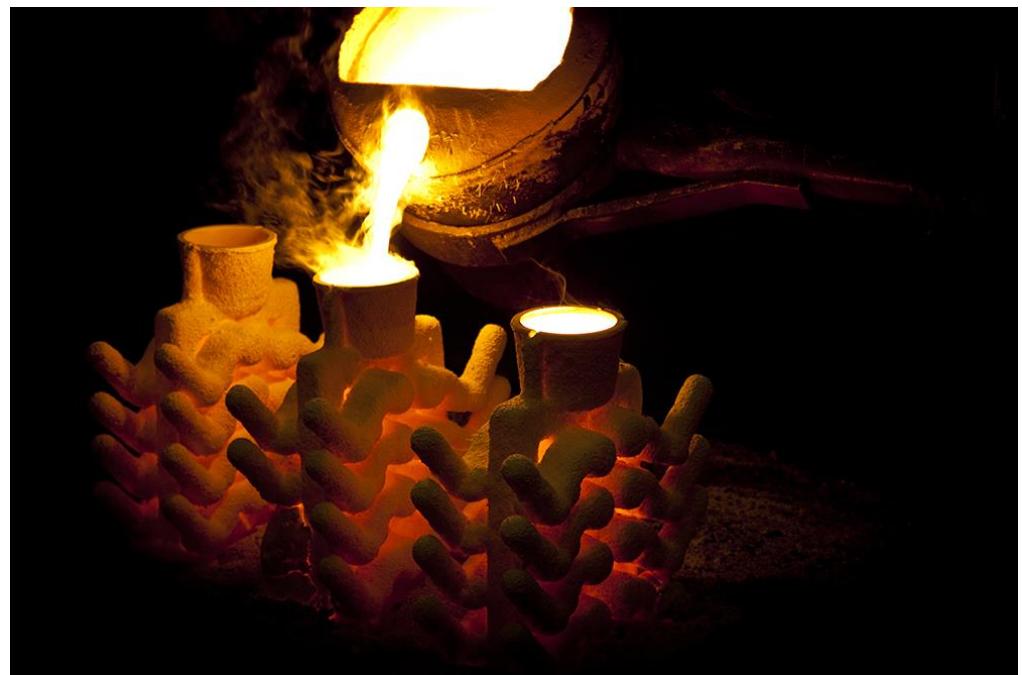
i.e. environ 22 fois moins !

De l'extraction à l'utilisation: Al et Fe

Après avoir récupéré le métal, il faut ensuite **ajuster sa composition** (par ajout ou retrait), puis le couler (en continu ou dans un moule)



Coulée en continu de l'acier



Coulée d'un superalliage base-Ni
dans un moule

De l'extraction à l'utilisation: Al et Fe

Enfin, il faut **finaliser** le produit par différents procédés mécaniques ou chimiques (usinage, laminage, extrusion, revêtement, etc.)



Usinage



Laminage à froid



Extrusion



Zingage

Energie grise des matériaux et composants

Dans tout produit manufacturé, l'ensemble des opérations (extraction, élaboration, production,...) a **un coût énergétique**:

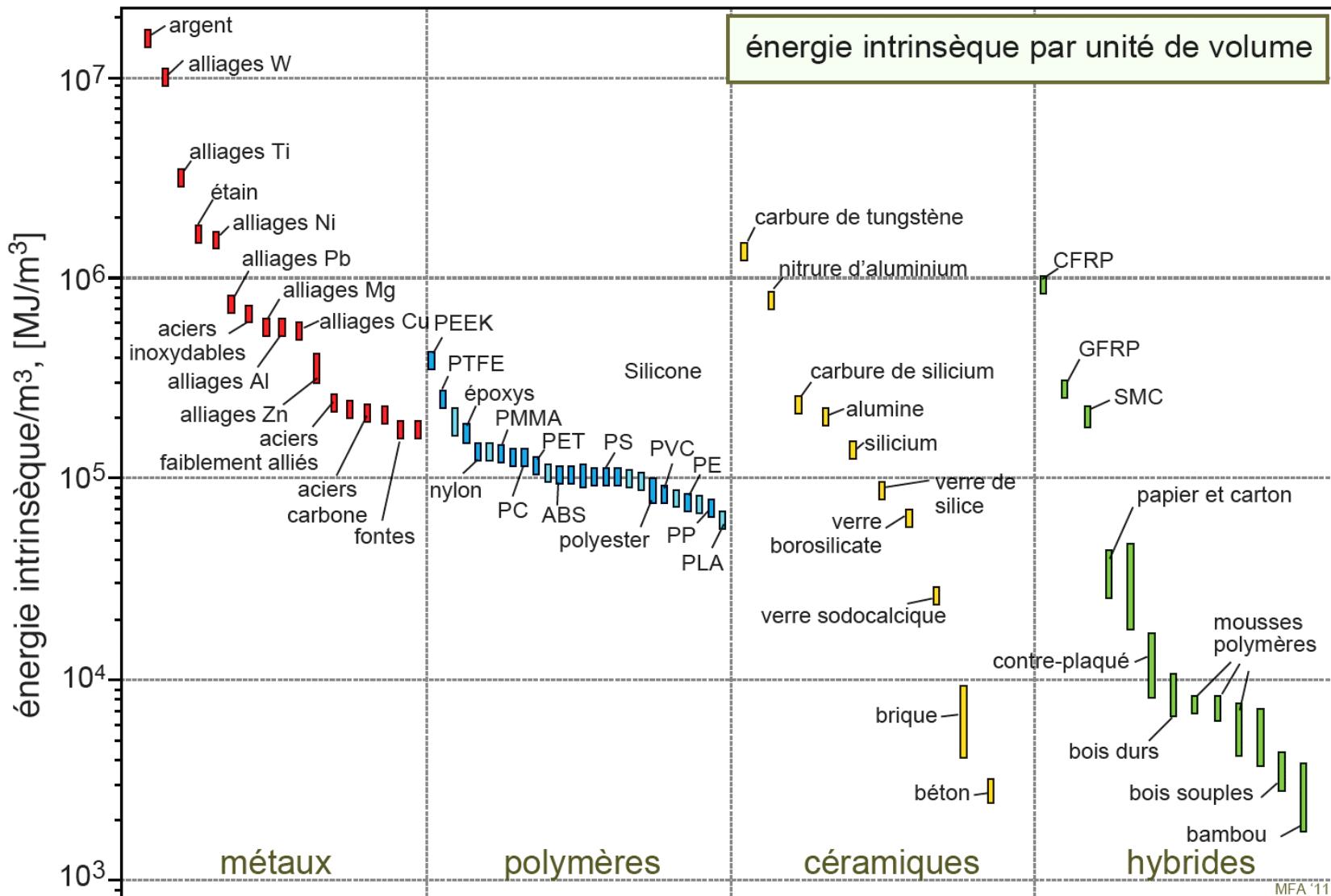
L'énergie grise

... et **un impact environnemental** (déchets, rebus, production de gaz indésirables, eau, etc.)

D'où la loi des 5R pour minimiser l'impact de la technologie:

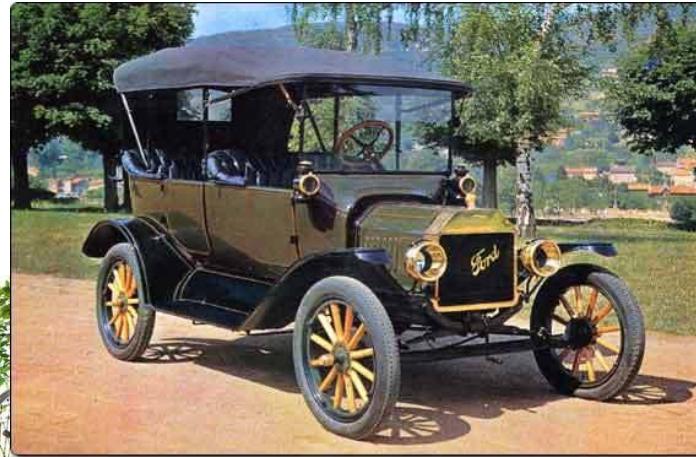
- **Refuser** les objets inutiles
- **Réduire** la consommation de produits
- **Réutiliser** et donc privilégier la seconde main
- **Recycler** les matériaux des produits
- **Retourner** ou rendre à la terre de manière écologique

Energie grise des matériaux



$$3.6 \text{ MJ} = 1 \text{ kWh} \approx 0.20 - 0.30 \text{ Frs}$$

Développements grâce aux matériaux



http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l%27automobile

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

Développements grâce aux matériaux



<http://bilan.usherbrooke.ca/bilan/pages/collaborations/8350.html>

Depuis le brevet déposé en 1876 par A.G. Bell,
l'évolution du téléphone a suivi comme l'informatique une
évolution extraordinaire.

Développements grâce aux matériaux



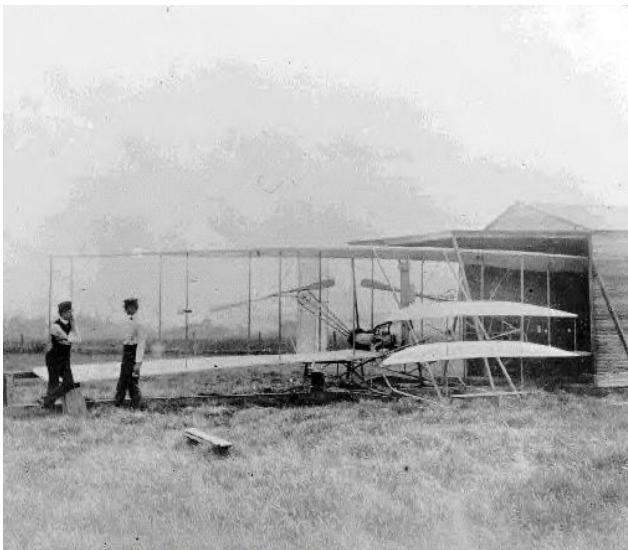
http://expomedias2009.uqam.ca/profs/lcp/rheto/v_02/automates/calcul_electr.html

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cray-1-deutsches-museum.jpg>

<http://www.alcf.anl.gov/computing-resources>

Depuis l'ENIAC (1945), en passant par le Cray 1 (1976, 80 Mflops) puis le Cray 2 (1985, 1.9 Gflops), on est arrivé à des ordinateurs massivement parallèles tels que Blue Gene P (555 Tflops) ou Q (2012, 10 Pflops) installés à Argonne.

Développements grâce aux matériaux



<http://www.learning-to-fly.com/first-airplane-made.html>

<http://hillermuseum.wordpress.com/2010/09/01/charles-lindberg-erik-lindberg-the-spirit-of-st-louis/>

<http://www.airbus.com/>

<http://laconqueteduciel.free.fr/eurofighter%20typhoon.htm/>

Depuis les frères Wright au début du 20^{ème} siècle, à la première traversée de l'Atlantique en 1927 par Lindbergh, l'aviation moderne est illustrée maintenant par l'Airbus A380, ou encore l'Eurofighter.

Développements grâce aux matériaux



<http://fr.wikipedia.org/wiki/Bicyclette>

Après la draisienne (ou vélocipède), on inventa les pédales en 1861 (pédivelle). L'acier a ensuite été remplacé par l'aluminium, puis par les fibres de carbone: ci-dessus deux vélos de 1920 (Columbia Westfield) et de 2012 (vélo de Cancellara).

Développements grâce aux matériaux



<http://physinfo.org/chroniques/concertospiano.html>



http://www.perspicace.com/search.php?id_dep=95&id_mat=all

Les arts ont aussi profité de l'évolution des matériaux. A gauche, un piano de Bartolomeo Cristofori (Gravicembalo col piano e forte, 1709), à droite un piano de concert moderne (charge totale sur l'ensemble des cordes (acier eutectoïde): 20 t).

Développements grâce aux matériaux



http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_photographie

La photographie a subi la même évolution. Depuis les Daguerreotypes (1839) en passant par les appareils à soufflet, on est là aussi entré dans l'ère du numérique.

Développements grâce aux matériaux



journaldugeek.com

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Phonographe>

L'audio a subi une évolution similaire. Depuis le phonographe d'Edison (1877), on passa ensuite au disque vinyle, puis au disque CD-laser et maintenant à la musique complètement numérique.

Développements grâce aux matériaux



<http://www.tennis-histoire.com/invention.html>

http://fr.wikipedia.org/wiki/Cordage_%28tennis%29

Tous les sports ont bénéficié de l'évolution des matériaux, le tennis en particulier. Depuis la raquette du jeu de paume à la raquette en bois de Nastase, les joueurs de tennis bénéficient maintenant de raquettes en composite, de cordages en boyaux ou en nylon.

Pour revoir les notions abordées

- *Lire le **Chapitre 1** du livre de Ashby disponible sur Moodle (qui résume cette introduction)*