

Matériaux: de la chimie aux propriétés

V. Michaud (MX)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

EPFL

Table des matières

- But et organisation du cours
- Introduction générale des matériaux:
 - Classification
 - Choix des matériaux
 - Historique, consommation et recyclage
- Développements technologiques grâce aux matériaux
- Contenu du cours

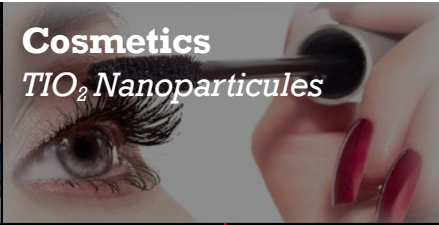
GPS Navigation
Functional material



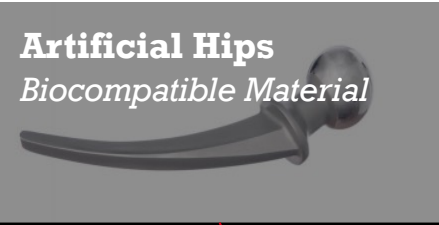
Mobile Phone
SAW Structures



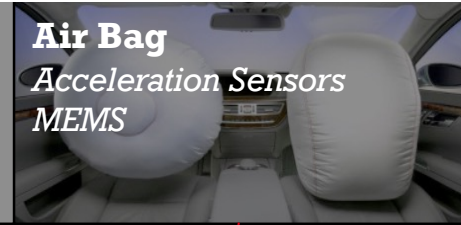
Cosmetics
TiO₂ Nanoparticles



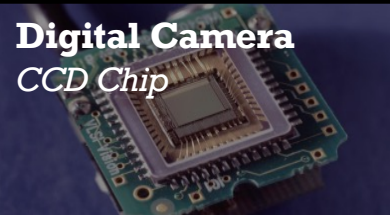
Artificial Hips
Biocompatible Material



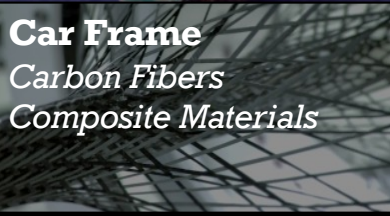
Air Bag
Acceleration Sensors
MEMS



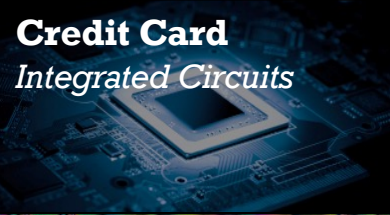
Digital Camera
CCD Chip



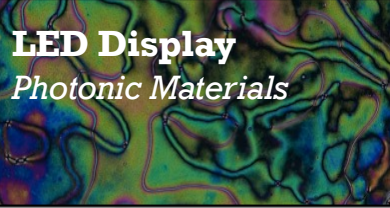
Car Frame
Carbon Fibers
Composite Materials



Credit Card
Integrated Circuits



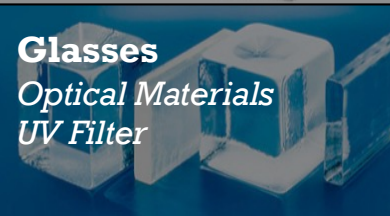
LED Display
Photonic Materials



Pace maker
Li-Batteries



Glasses
Optical Materials
UV Filter



Tissue Engineering

Regenerate humans



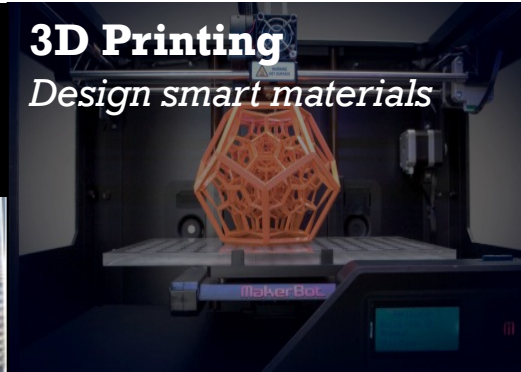
Self-healing

Auto reparable materials



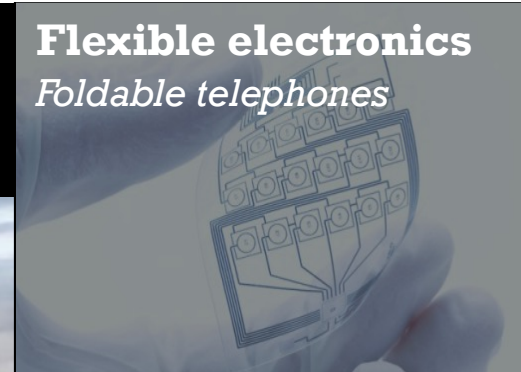
3D Printing

Design smart materials



Flexible electronics

Foldable telephones



Invisible Cloak

Metamaterials



Superhydrophobicity

Self-cleaning materials



Light composite

*High performance cars
Aerospace*



Metal foams

*Energy saving
Strong and light buildings*



Objectifs du cours

Dans le cadre de votre futur métier d'ingénieur(e) en mécanique, vous serez amenés à concevoir des pièces, des mécanismes, à utiliser et à choisir des matériaux.

Lesquels choisir? Comment faire? Comment savoir les risques au niveau de la durabilité? Comment la pièce va résister à la chaleur? Quel impact en termes d'usure, de bruit?

Qu'est ce qui fait que tel matériau va résister plus que tel autre, sera plus rigide, ou plus souple?

Si je choisis un métal donné, par exemple l'Aluminium, comment savoir si je prends un métal pur ou un mélange avec du Cuivre, du Magnésium, etc? Si je demande un revêtement de surface?

Motivation du cours

- La plupart des applications ou des développements technologiques sont limités par les matériaux.
- 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 et 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 pratiques (fiche du cours)

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
- Calculer le pH d'une solution aqueuse
- Etablir la loi de vitesse d'une réaction chimique
- 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 de leur composition
- Calculer des propriétés de matériaux en respectant les ordres de grandeur et les unités.

Compétences transversales

- Utiliser une méthodologie de travail appropriée, organiser un/son travail.
- Etre responsable des impacts environnementaux de ses actions et décisions.
- Evaluer sa propre 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 et planifier ses prochains objectifs d'apprentissage.
- Accéder aux sources d'informations appropriées et les évaluer.

Documentation pour le cours

1. Une copie des transparents, les données des exercices, les corrigés et tous autres documents se trouvent sur Moodle
<https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=15748>
2. Les vidéos de Michel Rappaz:
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLiUzDFqS-HE2BTomCK0ImNJapEa1cvoXm>
3. Les livres
 - ***Matériaux: ingénierie, science, procédé et conception, PPUR (2013)***
M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon
 - ***Chimie générale (livre 1) et chimie des solutions (livre 2), (2008)*** J. W. Hill, R. H. Petrucci, T. W. McCreary et S.S. Perry, éditions du renouveau pédagogique

Documentation pour le cours

Matériaux

INGÉNIERIE, SCIENCE,
PROCÉDÉ ET CONCEPTION

Michael Ashby, Hugh Shercliff et David Cebon

3^e édition américaine

traduite en français par Léa Deillon et Michel Rappaz
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Traduction d'un manuel mondialement connu et issu de l'Université de Cambridge, «Matériaux» expose l'ensemble des bases indispensables à la compréhension des propriétés des matériaux. En adoptant une approche unique basée sur la conception en ingénierie, il permet aux étudiants et aux praticiens de pouvoir choisir en toute connaissance de cause les matériaux répondant au mieux aux spécifications d'une application donnée. Richement illustré, entièrement imprimé en couleur et augmenté de nombreux exercices d'auto-évaluation en fin de chaque chapitre, il couvre tous les aspects mécaniques, thermiques, électriques, magnétiques, optiques et chimiques des matériaux. Il expose en outre les procédés de mise en œuvre et d'élaboration des matériaux, ainsi que les principes notions de cristallographie à maîtriser. Enfin, il constituera le support idéal pour l'introduction auprès des étudiants du logiciel d'aide à la sélection des matériaux CES EduPack, développé à l'université de Cambridge. Le manuel ultime dans son domaine, enfin disponible en français.



Presses polytechniques et universitaires romandes

Matériaux

INGÉNIERIE,
SCIENCE,
PROCÉDÉ ET
CONCEPTION

Michael Ashby
Hugh Shercliff
David Cebon



Matériaux

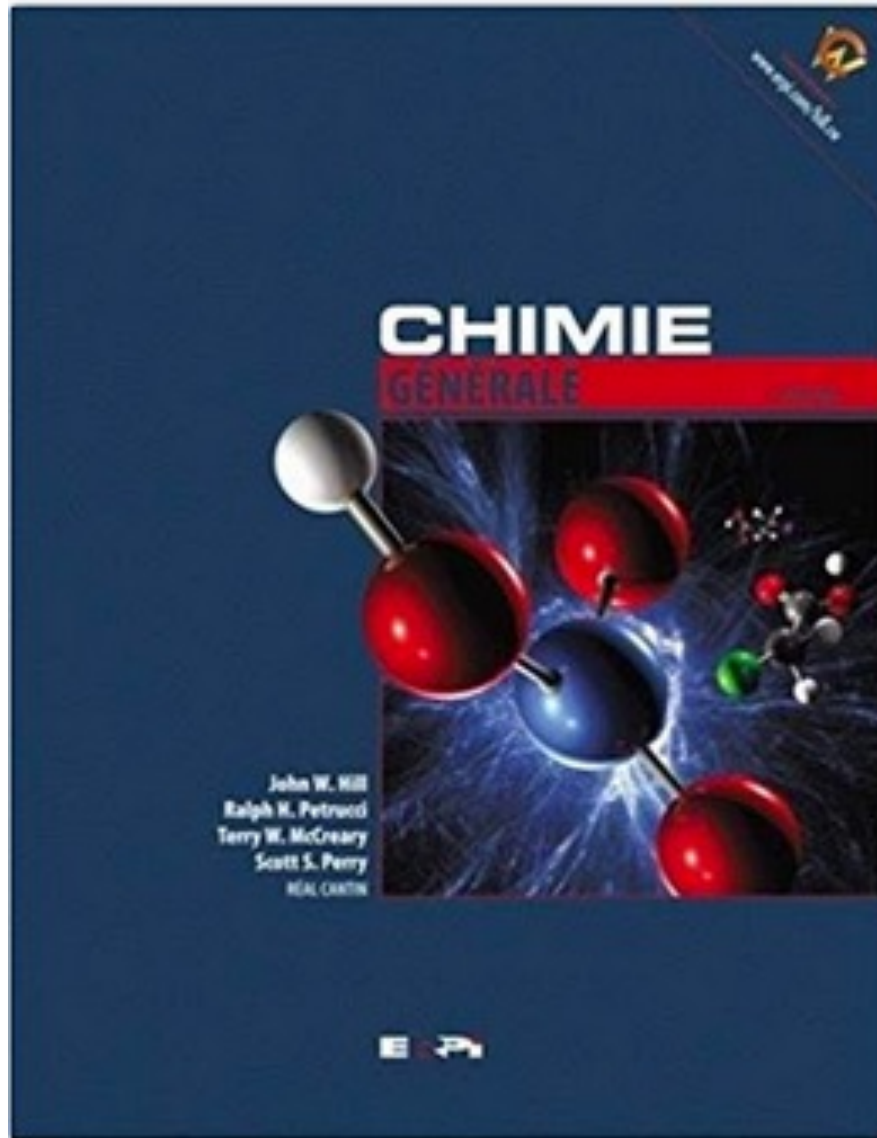
INGÉNIERIE, SCIENCE,
PROCÉDÉ ET CONCEPTION
Michael Ashby, Hugh Shercliff et David Cebon

Traduction de la 3^e édition américaine

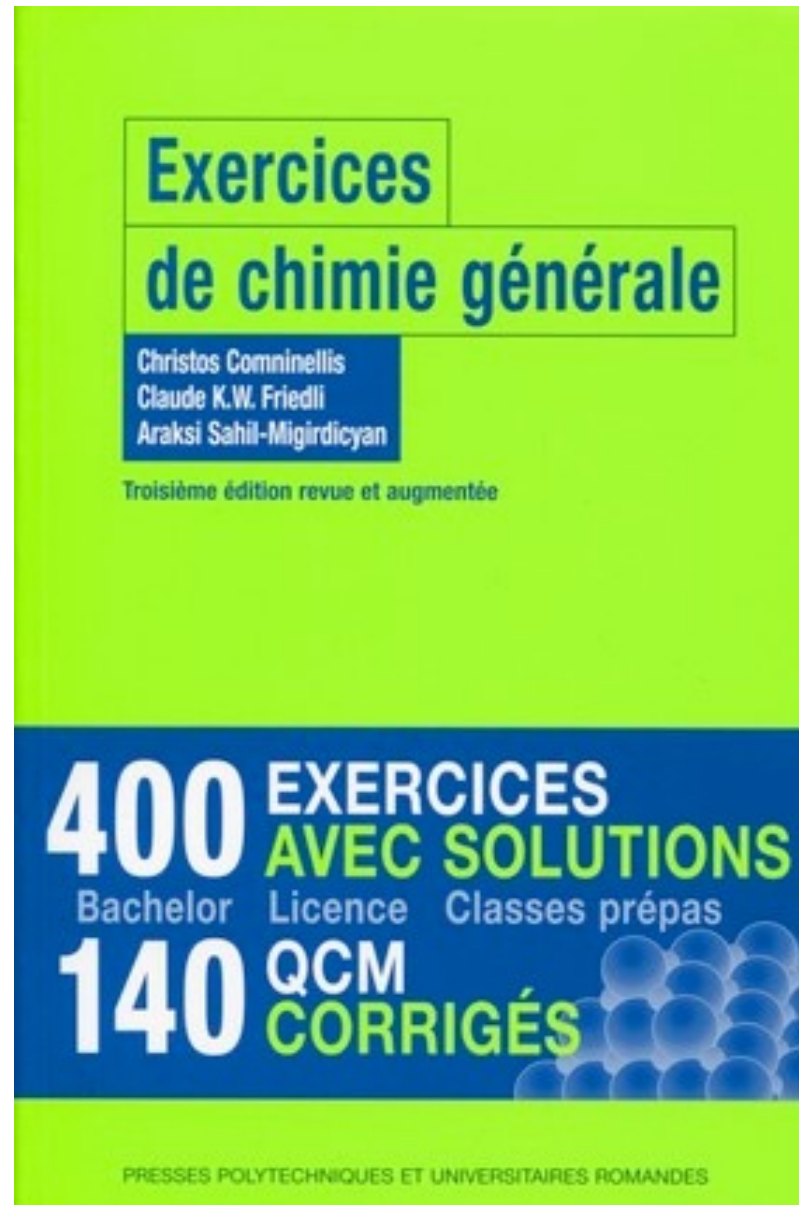


Presses polytechniques et universitaires romandes

Documentation pour le cours



Exercices de chimie



Exercices

Il est **essentiel de faire les series d'exercices** et si besoin de lire les livres supports de ce cours selon recommandations.

12 assistant(e)s-doctorant(e)s ou post-doc/ingénieur + 17 assistant(e)s-étudiant(e)s + professeure seront à votre disposition pendant les séances.

Exercices interactifs sur Mathematica et vidéos disponibles aussi sur moodle.

Organisation du cours et des exercices

Mardi	11h15 – 13h (cours)	Rolex
Jeudi	10h15-12h (exercices)	CM1100, CM1104, CE 1100, CE 1101, CE 1104, GRA 331 et GRA 332.
Jeudi	13h15 – 14h (Cours)	SG1138 et SG 0211, (SG 0213)

Pour les exercices, apportez une calculatrice simple, de quoi écrire et imprimez les énoncés qui seront disponibles sur Moodle (ou ayez une tablette, mais le téléphone est un peu trop petit!). Parfois il faut aussi trouver des informations sur internet...

Examen

Examen propédeutique sous forme écrite en janvier, durée 3 heures.

- avec calculette non programmable (ou mode examen), et **1 formulaire fourni.**
- Examen blanc au cours du semestre pour se préparer, séance de révision en Janvier.

Quelques règles utiles à suivre

1. Début du cours
2. Téléphones mobiles et ordinateurs portables
- 3. Conversations (à proscrire..)**
4. Pique-nique
5. Questions
6. Notes personnelles
7. E-mail? Non, utilisez
Ed discussion



Quelques règles utiles à suivre



Contenu du cours

Introduction, les matériaux

Partie I: De l'atome à la structure des matériaux (11/09-2/10)

- Structure atomique, tableau périodique,
- Liaisons chimiques, Structure des matériaux

Partie II: Propriétés mécaniques (7/10-4/11)

- Elasticité linéaire/plasticité,
- Ductilité et dureté,
- Ténacité,
- Fatigue et usure, étude de cas

Contenu du cours

Partie III: Phénomènes thermodynamiques, concepts du rôle de la chaleur, du temps, des équilibres (6/11-9/12)

- Dans les corps purs, dans les mélanges réactifs (réactions chimiques) Réactions chimiques: acide base /oxydo-réduction, piles et électrolyse
- dans les mélanges non réactifs (alliages, diagrammes de phase)

Partie IV: Propriétés fonctionnelles des matériaux (11-18/12)

- Propriétés thermiques/ Comportement à haute température,
- Propriétés électriques, magnétiques.

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.

3. Polymères et élastomères

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

4. Composites

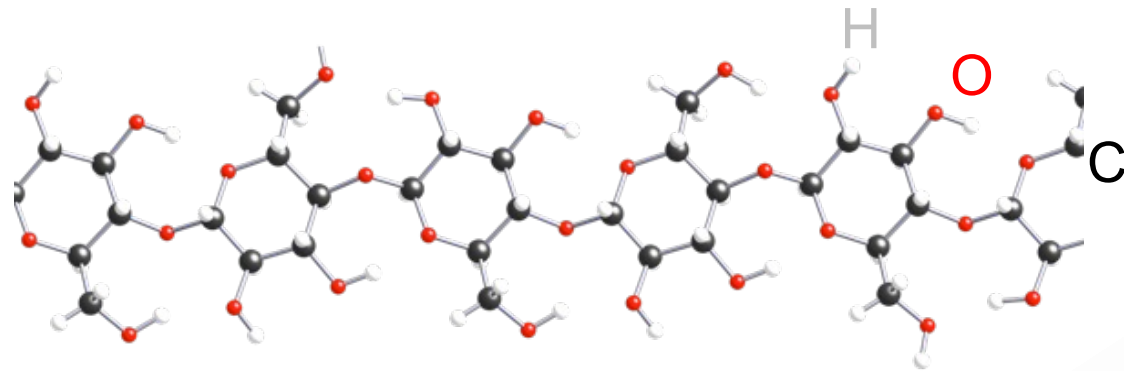
Matériaux assemblant de façon non miscible au moins deux matériaux des trois catégories précédentes

Classification des Matériaux

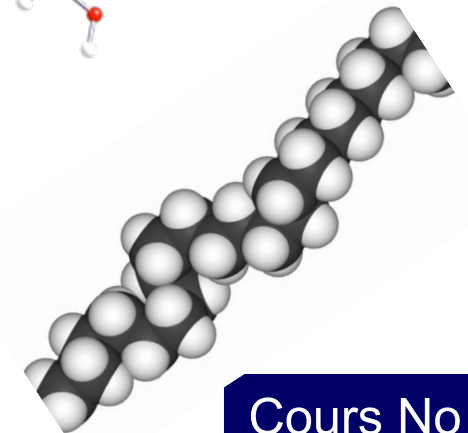
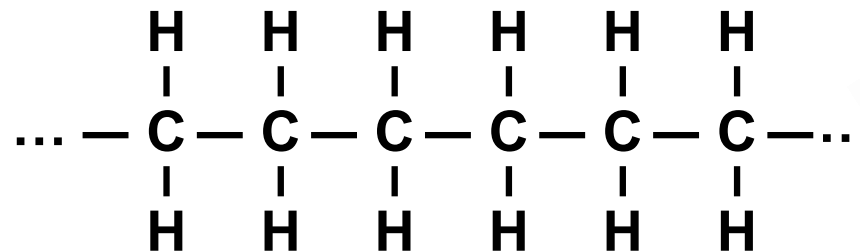
Matériaux organiques vs. inorganiques ?

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)

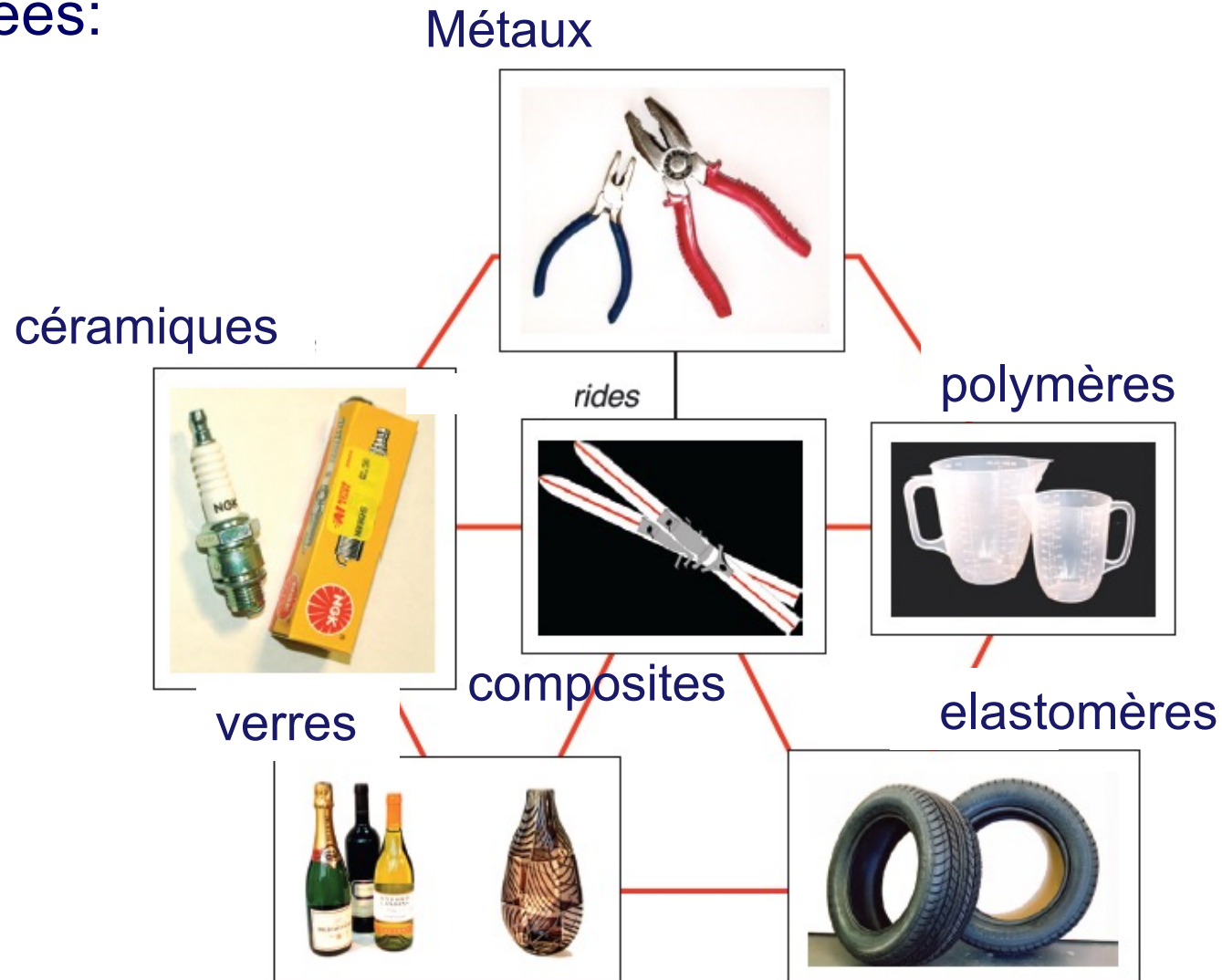


Polyéthylène (PE)
(synthétique)



Classification des Matériaux

Les matériaux peuvent aussi être classés selon leur fonction ou utilisation. Six catégories sont alors en général présentées:



Choix des matériaux

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

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



Choix des matériaux

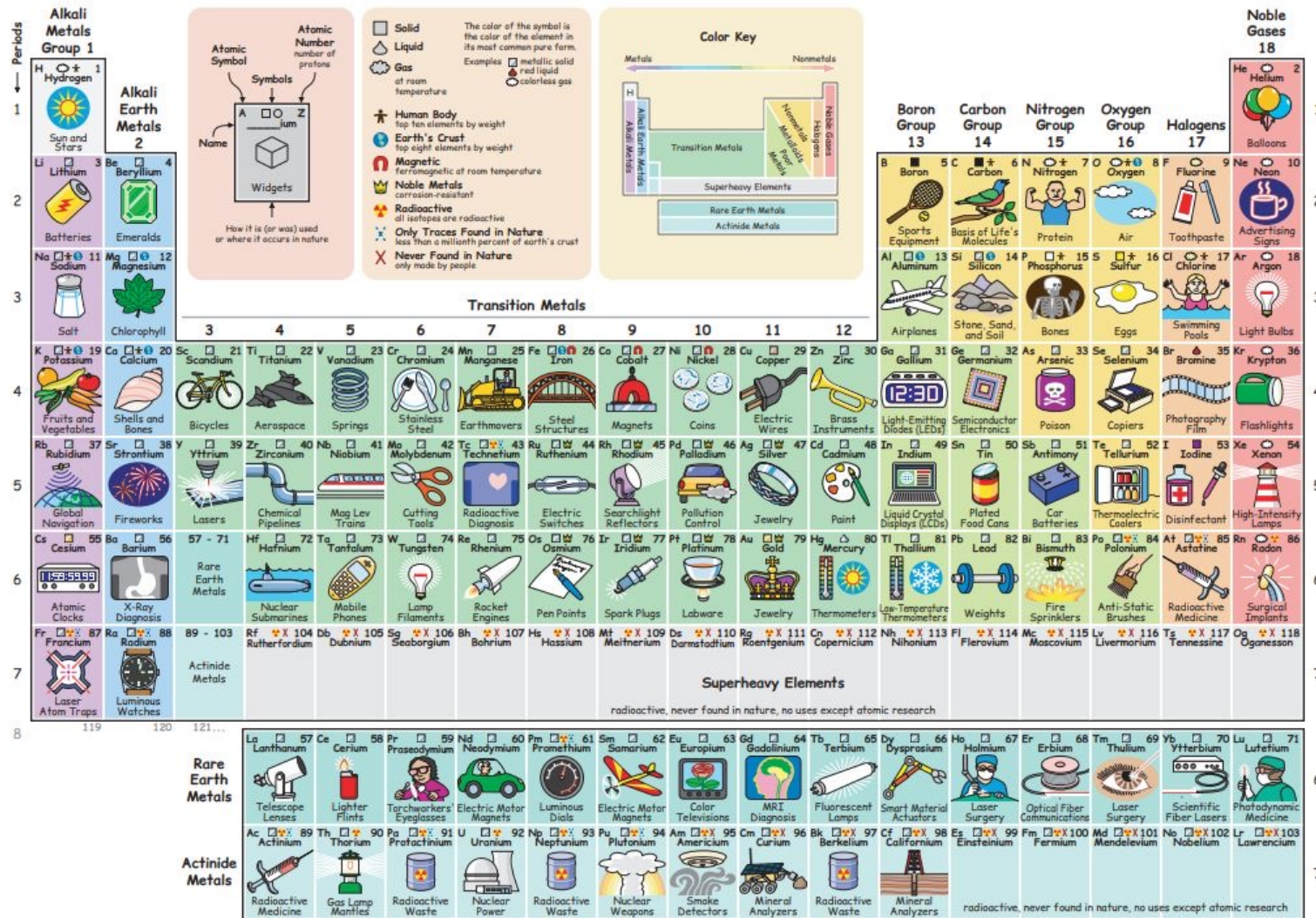
Critères de choix:

- Fonctionnalité, cahier des charges
- Propriétés mécaniques (rigidité, résistance)
- Propriétés physiques (conductivité thermique, électrique, propriétés magnétiques)
- Propriétés chimiques (corrosion, inflammabilité...)
- L'impact sur l'environnement: caractère toxique, procédés de fabrication polluant, recyclage...
- Coût: matière première, procédés etc...

Choix des matériaux

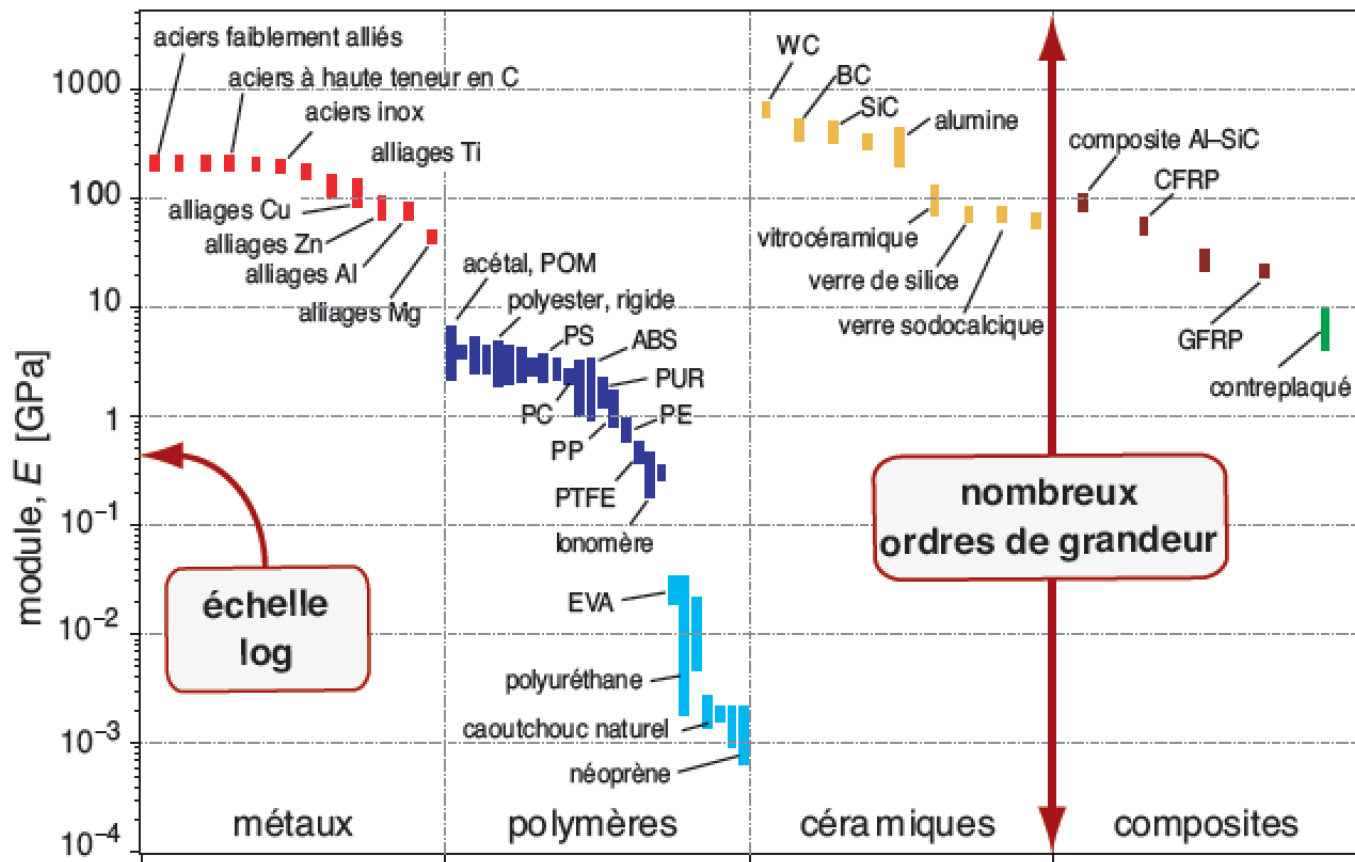
Les matériaux sont tous basés sur ce qui existe dans la croute terrestre, souvent combinés naturellement ou artificiellement:

The Periodic Table of the Elements, in Pictures



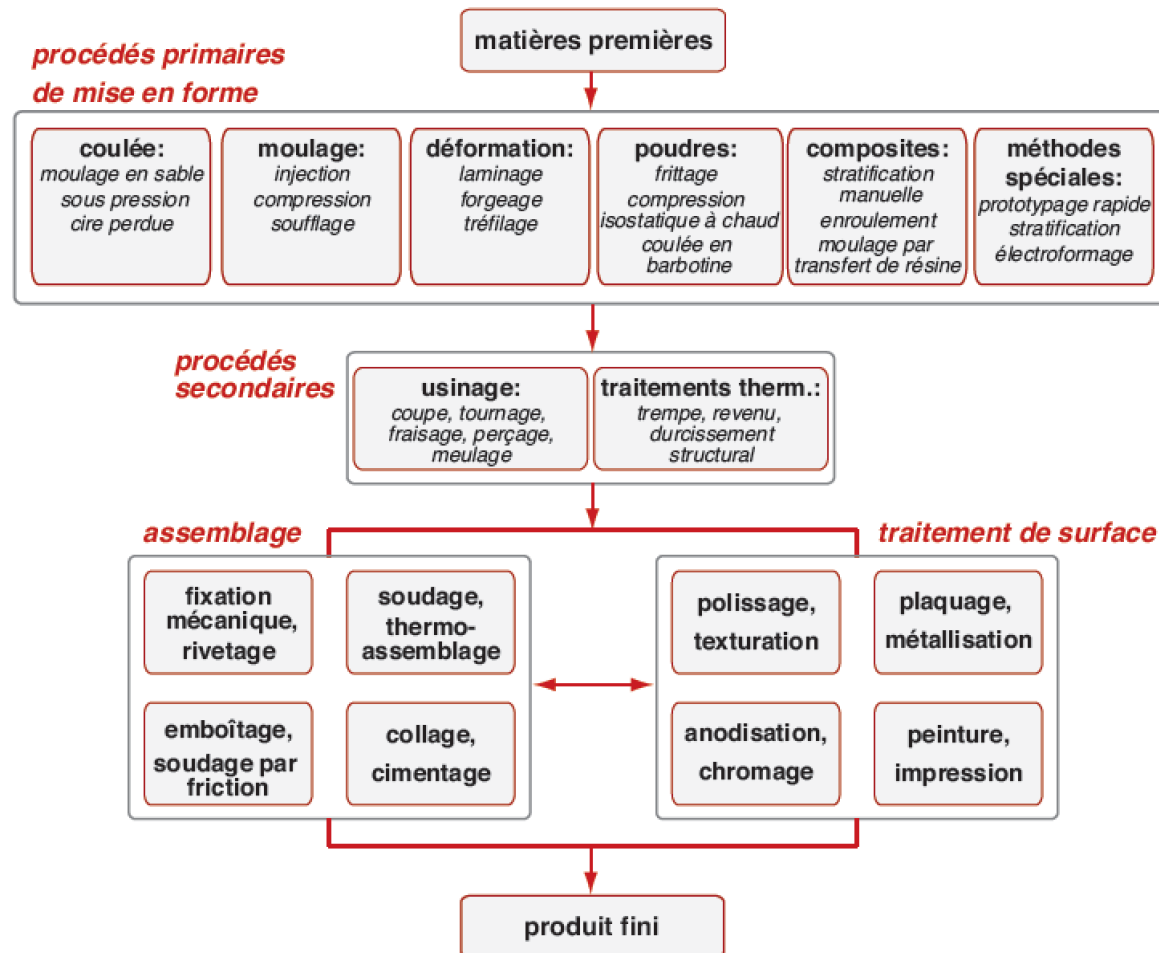
Choix des matériaux

Pour aider au choix des matériaux, nous verrons que certaines propriétés sont mises sous forme de cartes (dites cartes d'Ashby car c'est le prof qui les a développées à Cambridge, UK)

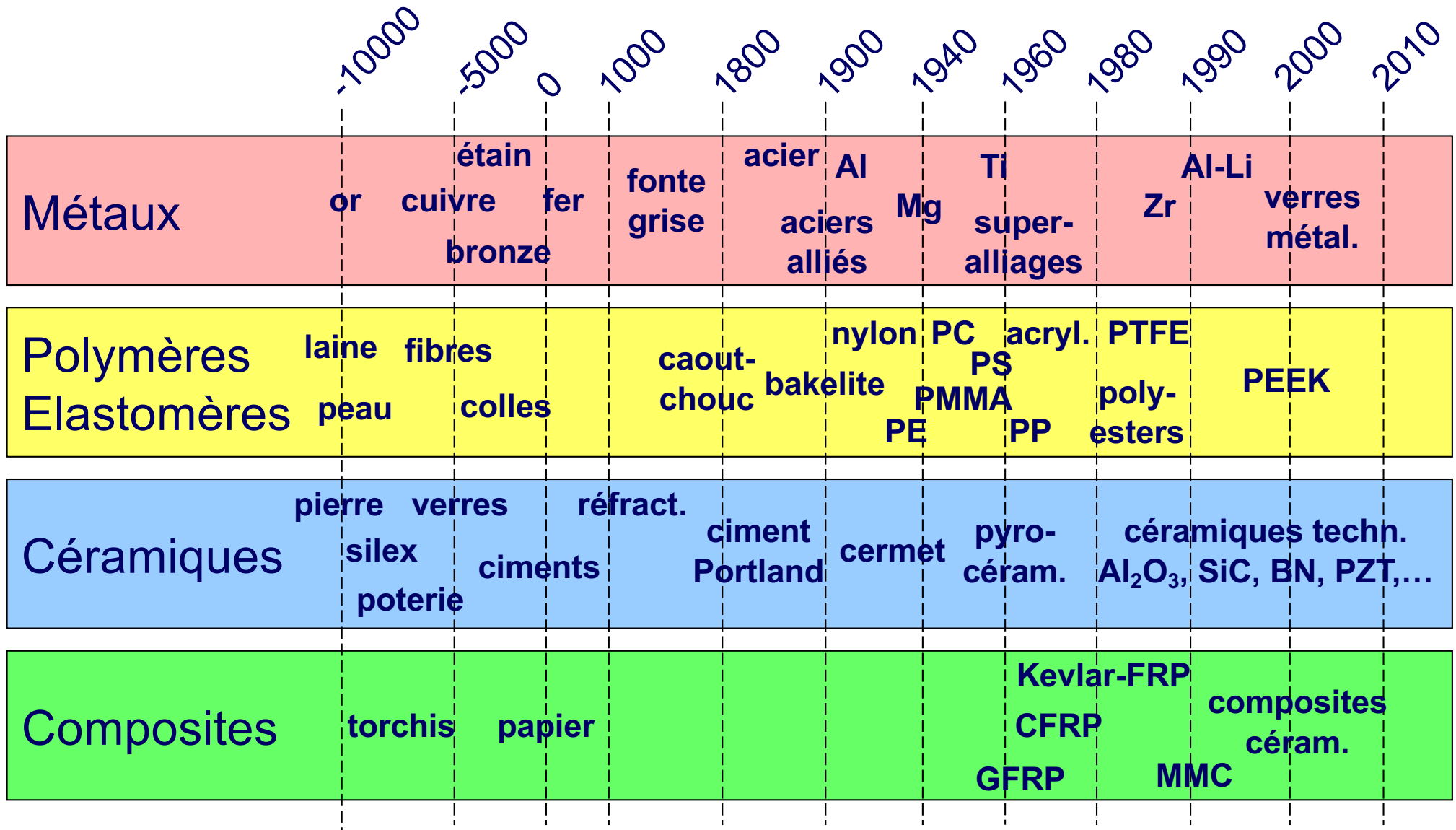


Choix des matériaux

Et finalement il ne faut pas non plus négliger les méthodes de fabrication, qui influent fortement sur le résultat final et son coût...



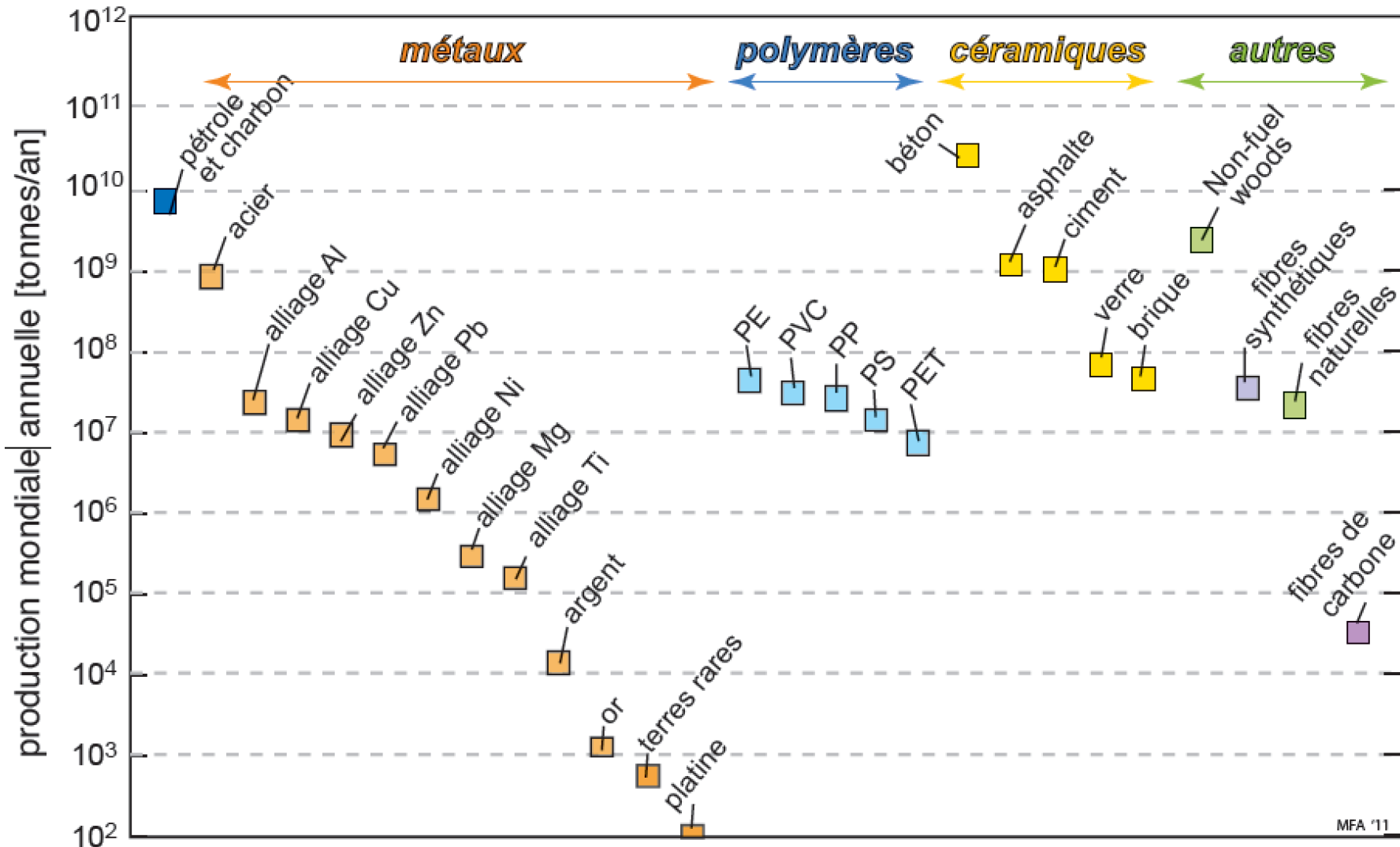
Historique



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

Consommation

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



MFA '11

Consommation

	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

Source: M. Ashby et al., Materials et web, en 2010

Consommation maintenant?

	10 ⁶ t/an	kg/an/ h
Acier	1808	241
Aluminium	64	8.5
Cuivre	30	2.8
Zinc	13.8	1.84
Plomb	4.7	0.62
Titane	1.9	0.25
Nickel	2	0.26
Magnésium	0.6	0.1
Silicium	3	0.4

	10 ⁶ t/an	kg/an/h
charbon	3500	466
Béton	12000	1600
Ciment	4600	613
Bois	3200	434
Verre	135	18
PE	100	13.3
PVC	44.3	5.9
PP	56	7.4
PET	30.3	4.04

Source: 2018, planetoscope.com, plastics insight, FAO.

Consommation demain?

Transition énergétique, mobilité électrique...

Augmentation des besoins en lithium, cobalt, nickel, terres rares, cuivre..Iridium, Scandium et Tellurium, et aussi en Aluminium.

Global total demand

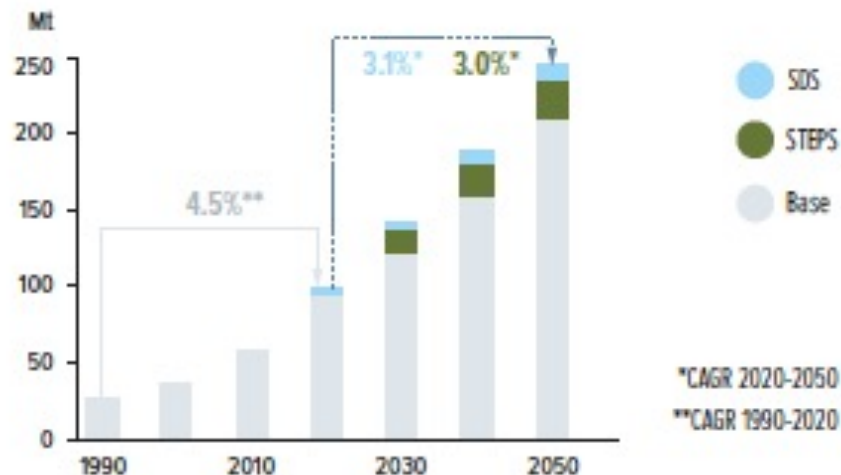


Figure 9. Aluminium global total demand by scenario (STEPS and SDS)

Global total demand

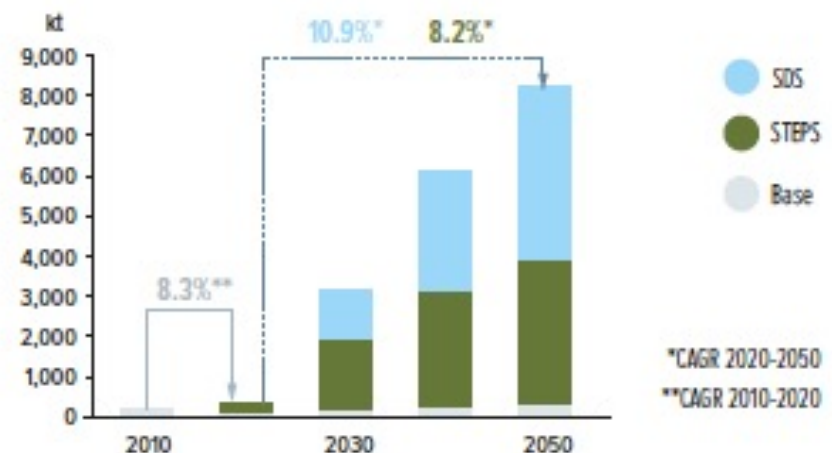
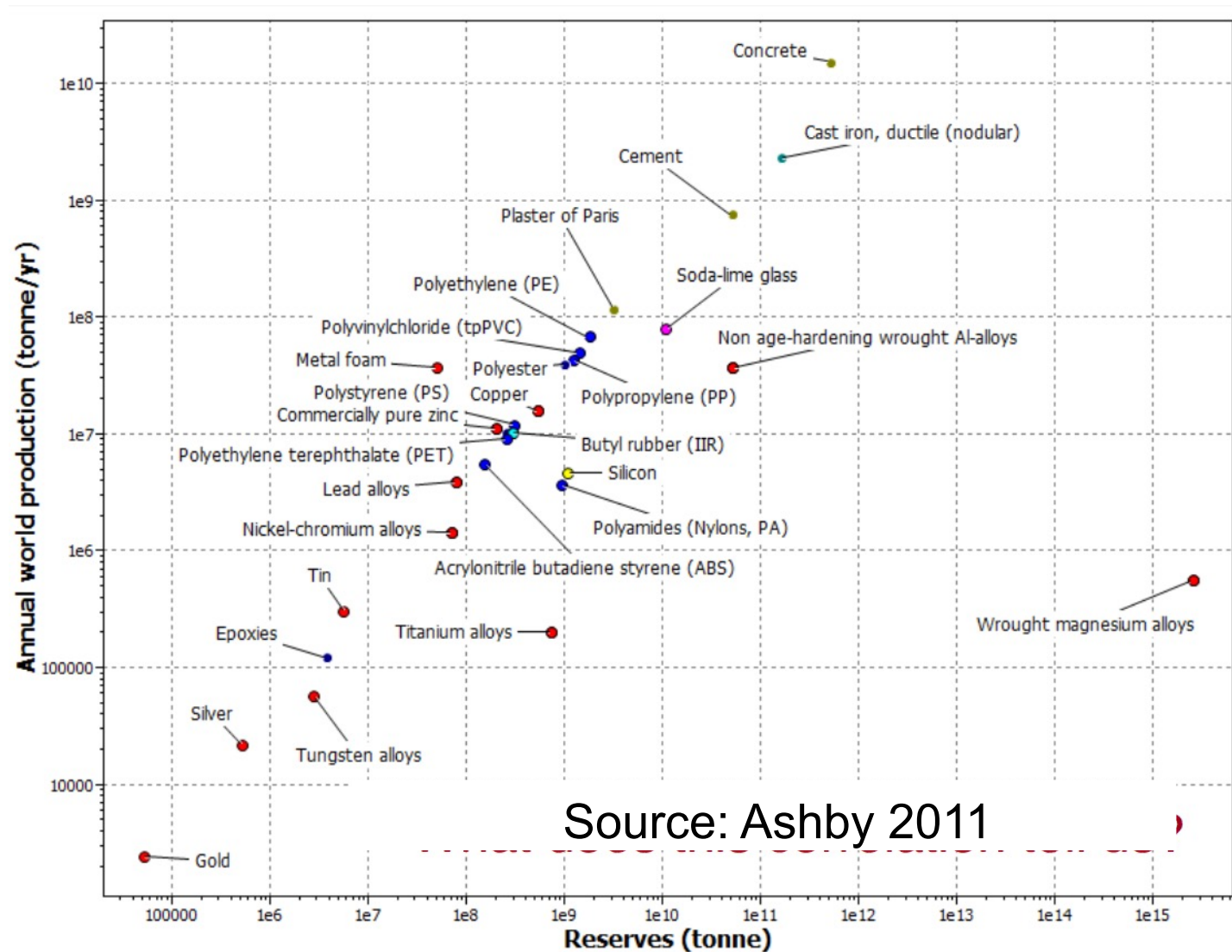


Figure 25. Lithium global total demand by scenario (STEPS and SDS)

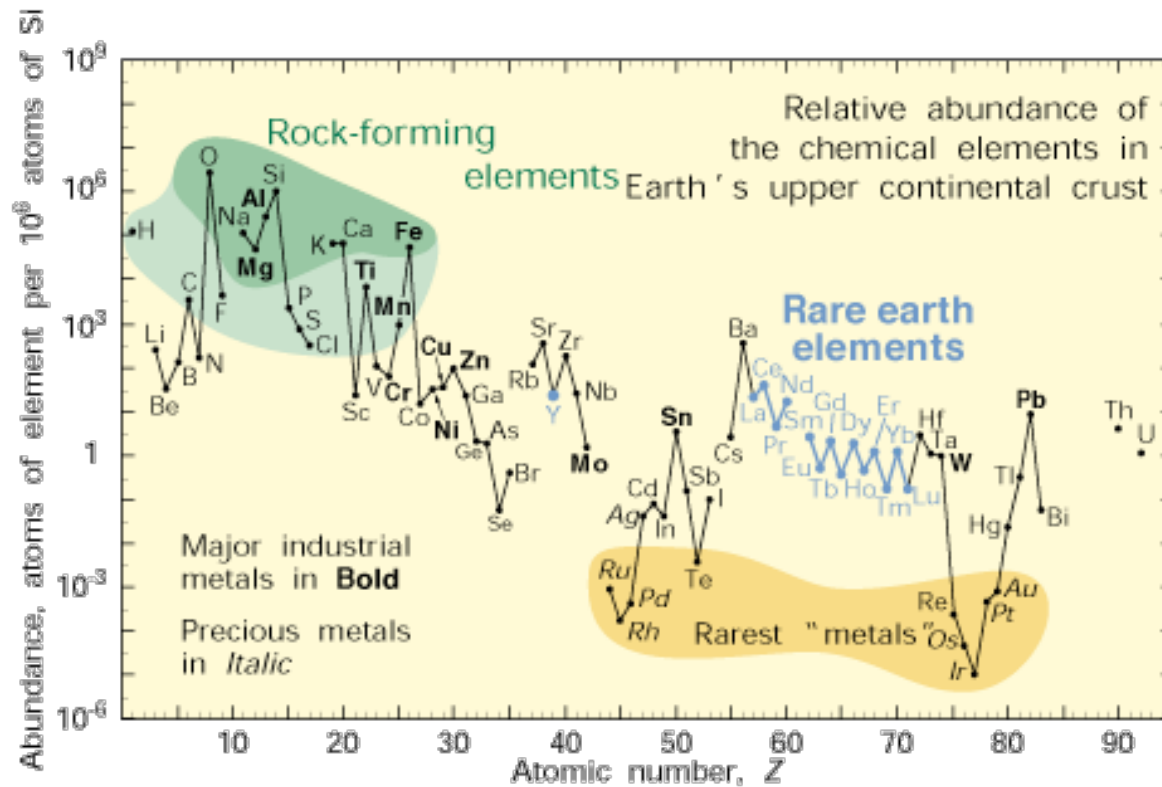
Source: Avril 2022, Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge, bit.ly/EMpolicy

Consommation et disponibilité

Certains matériaux sont pourtant peu abondants sur Terre:



Consommation pour combien de temps?



Production mondiale de Lithium en 2022: 130'000 tonnes, en augmentation de 21% par rapport à 2021

Consommation mondiale de Lithium en 2022: 134'000 tonnes, en augmentation de 41% par rapport à 2021.

Réserves mondiales: 26'000'000 tonnes.

Source: US Geological Survey

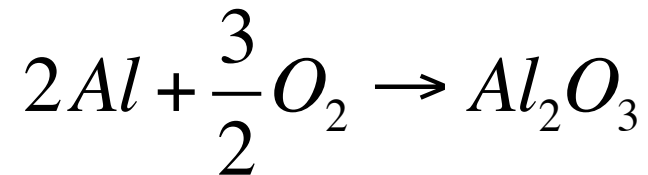
Consommation et recyclage

Le cas de l'Aluminium est très intéressant:

- Abondamment utilisé....

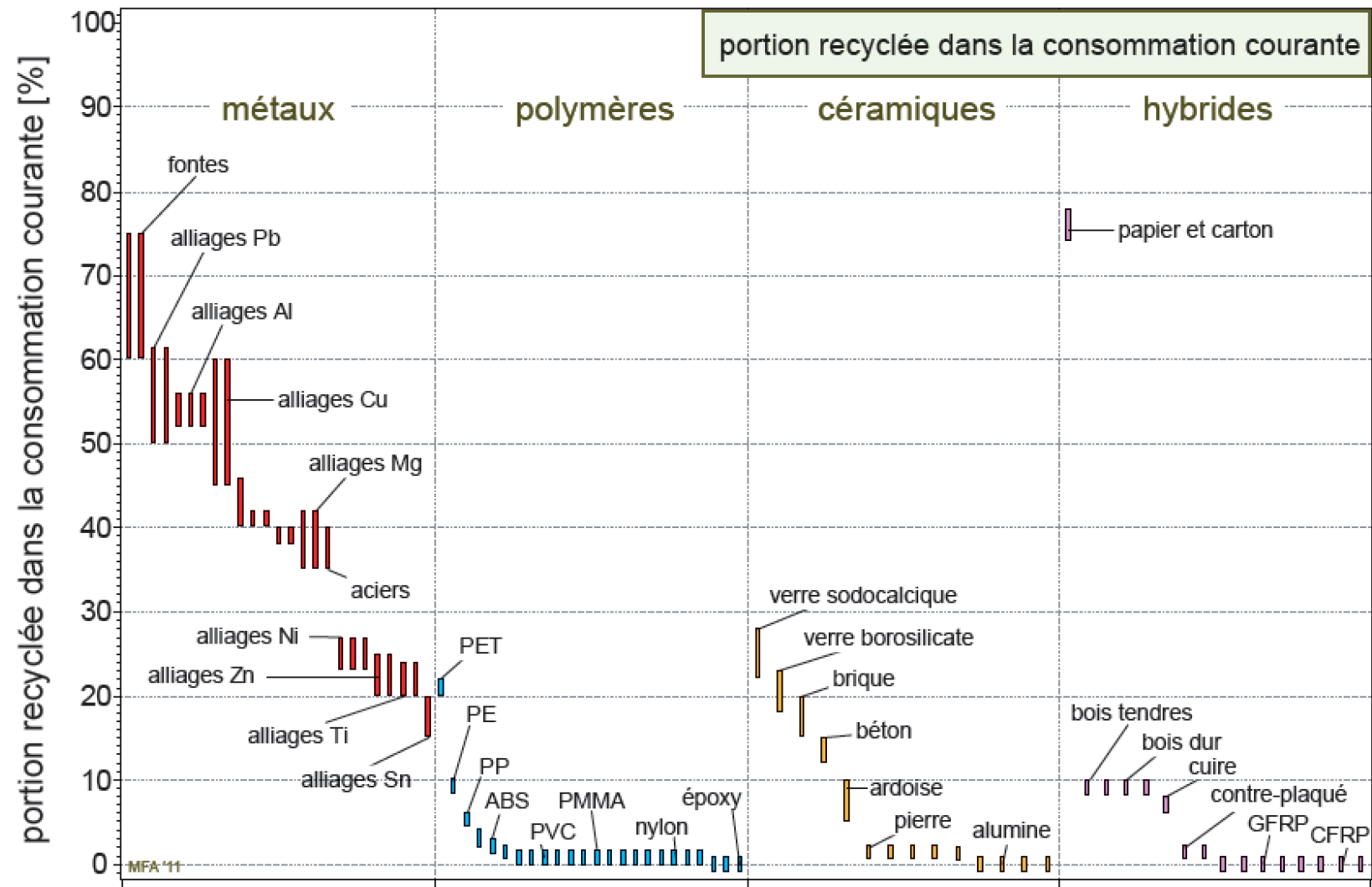


- Extrait de son oxyde l'Alumine (Al_2O_3), sa production nécessite environ $10^5 - 10^6$ MJ.m⁻³



- Il faut seulement environ 5% de cette énergie pour le recycler !

Consommation et recyclage



Choix des matériaux

Revenons à nos assiettes...

Quels sont les critères de choix?



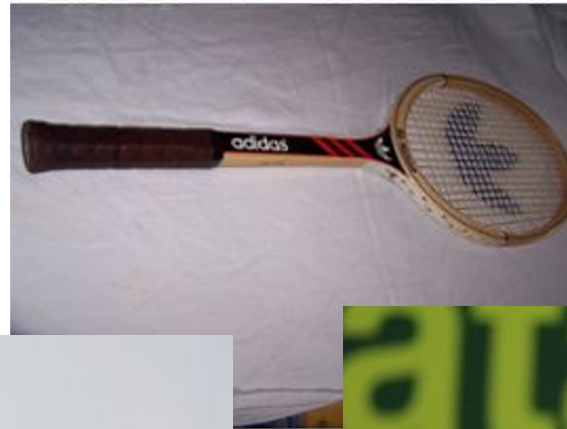
Développements grâce aux matériaux



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. Puis aux voitures électriques?

Développements grâce aux matériaux

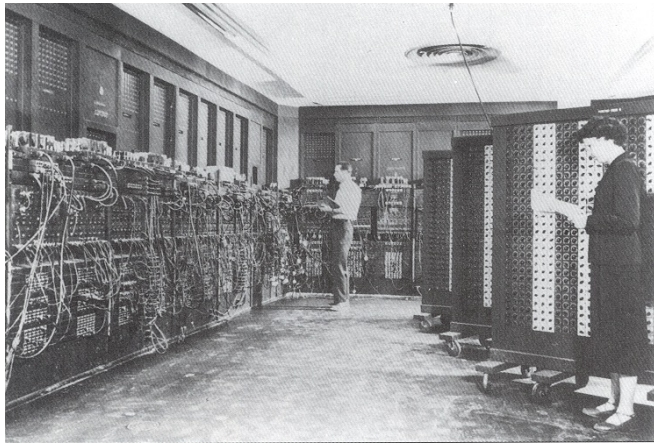


<http://www.tennis-histoire.com/invention.html>

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 Nylon.

Développements grâce aux matériaux



http://expomedias2009.uqam.ca/profs/cp/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, et summit d'IBM, 2019: 122 Pflops, Jupiter (2025): 793 Pflops! (1Pflop= 10^{15} operations par 41seconde)

A retenir du cours d'aujourd'hui

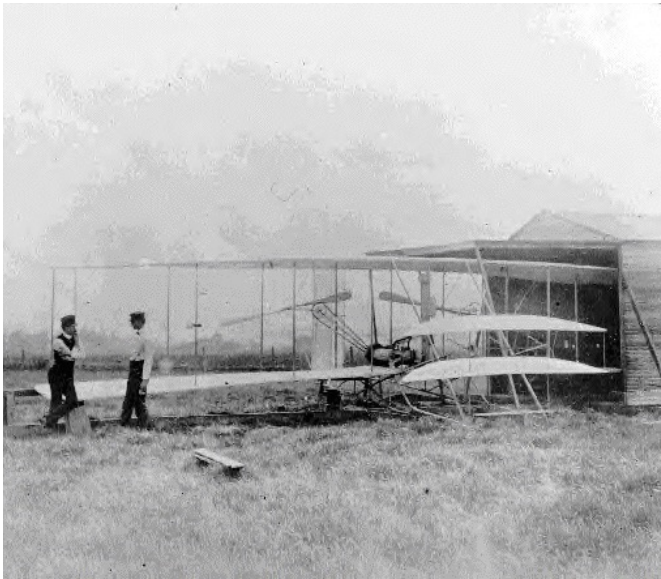
- *La Science des matériaux a pour principal fondement la compréhension du lien entre leur nano- et micro-structure, et leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles*
- *Elle est à la base des développements technologiques modernes*
- *Les notions de ressources, de consommation et de recyclage mais aussi de coût sont primordiales pour le choix de matériaux pour l'ingénieur, en plus des performances techniques.*
- *Vous devez vous familiariser avec les classes de matériaux, les aspects de ressources/utilisation, et vous rappeler (ou vite apprendre) les notions de base de chimie niveau gymnase.*

Pour la prochaine fois

- *Imprimez les énoncés des exercices, et commencez à essayer de les résoudre*
- *Révissez un peu de chimie, en lisant Chimie Générale (Hill1), Chapitre 1.2 et Chapitre 4. Voir extrait sur Moodle.*
- *En cas de doute, Moodle est la source principale d'information, possibilité de poser des questions sur le forum.*

Diaporamas supplémentaires

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://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://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 Batolommeo 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



Fig. 327.

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

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

Développements grâce aux matériaux



<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.