

Matériaux: de la chimie aux propriétés

V. Michaud (MX)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne



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

TiO_2 Nanoparticles



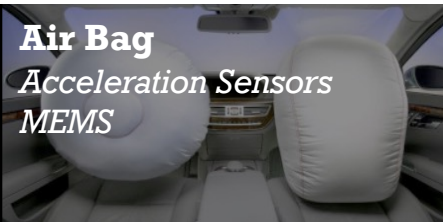
Artificial Hips

Biocompatible Material



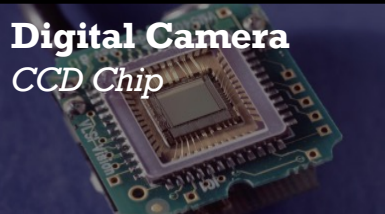
Air Bag

Acceleration Sensors
MEMS



Digital Camera

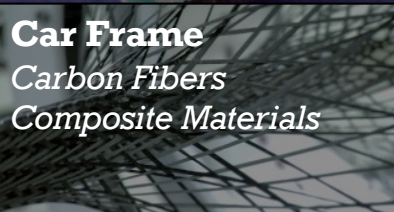
CCD Chip



Car Frame

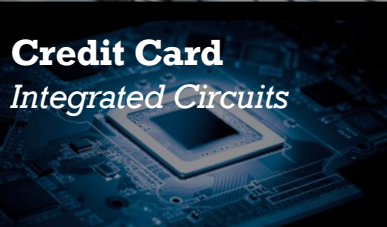
Carbon Fibers

Composite Materials



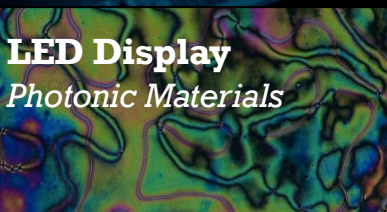
Credit Card

Integrated Circuits



LED Display

Photonic Materials



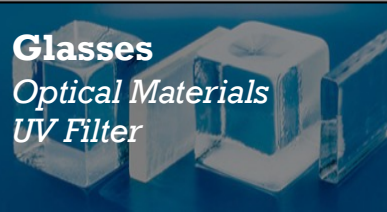
Pace maker

Li-Batteries



Glasses

Optical Materials
UV Filter



Tissue Engineering

Regenerate humans



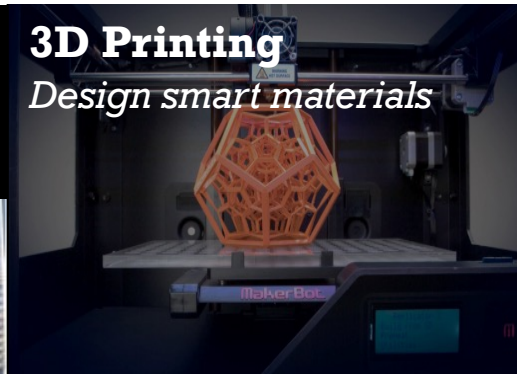
Self-healing

Auto reparable materials



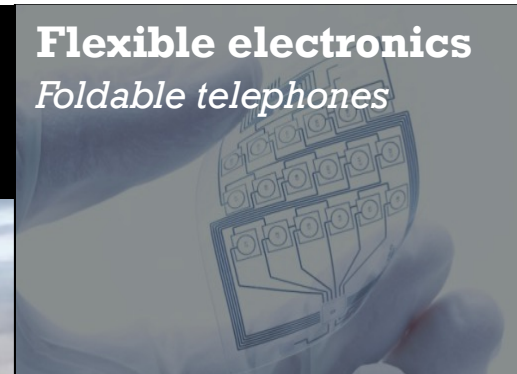
3D Printing

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.

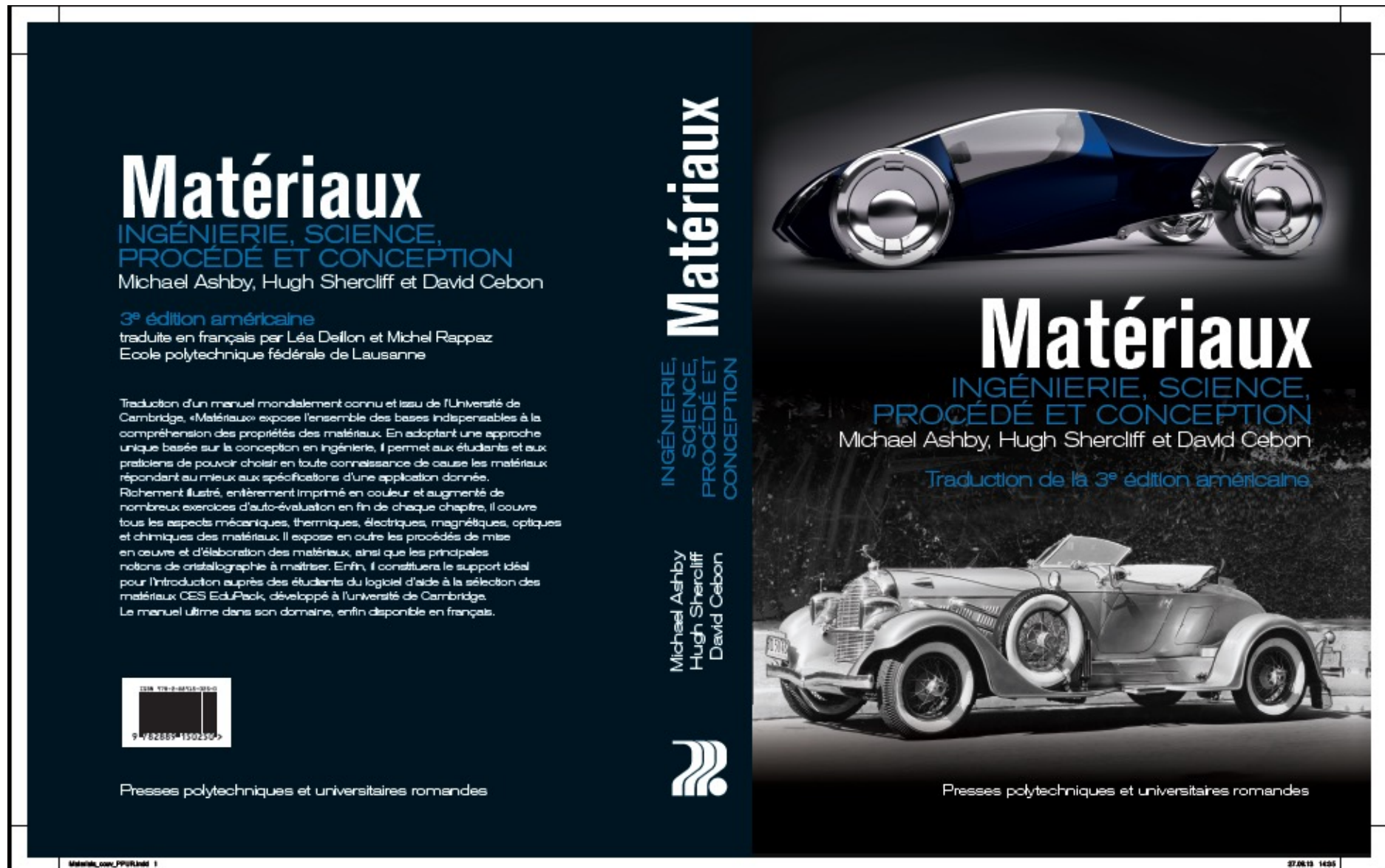
Compétences transversales

- 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.

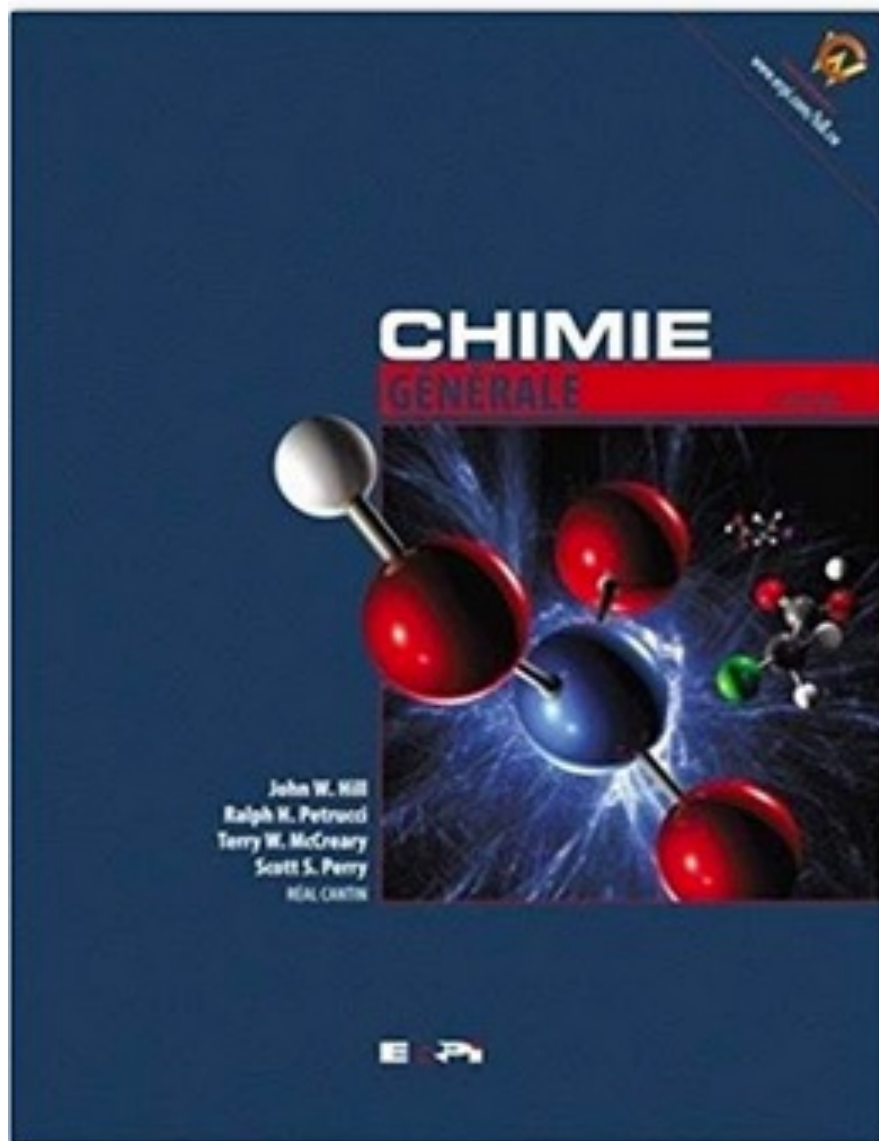
Documentation pour le cours

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

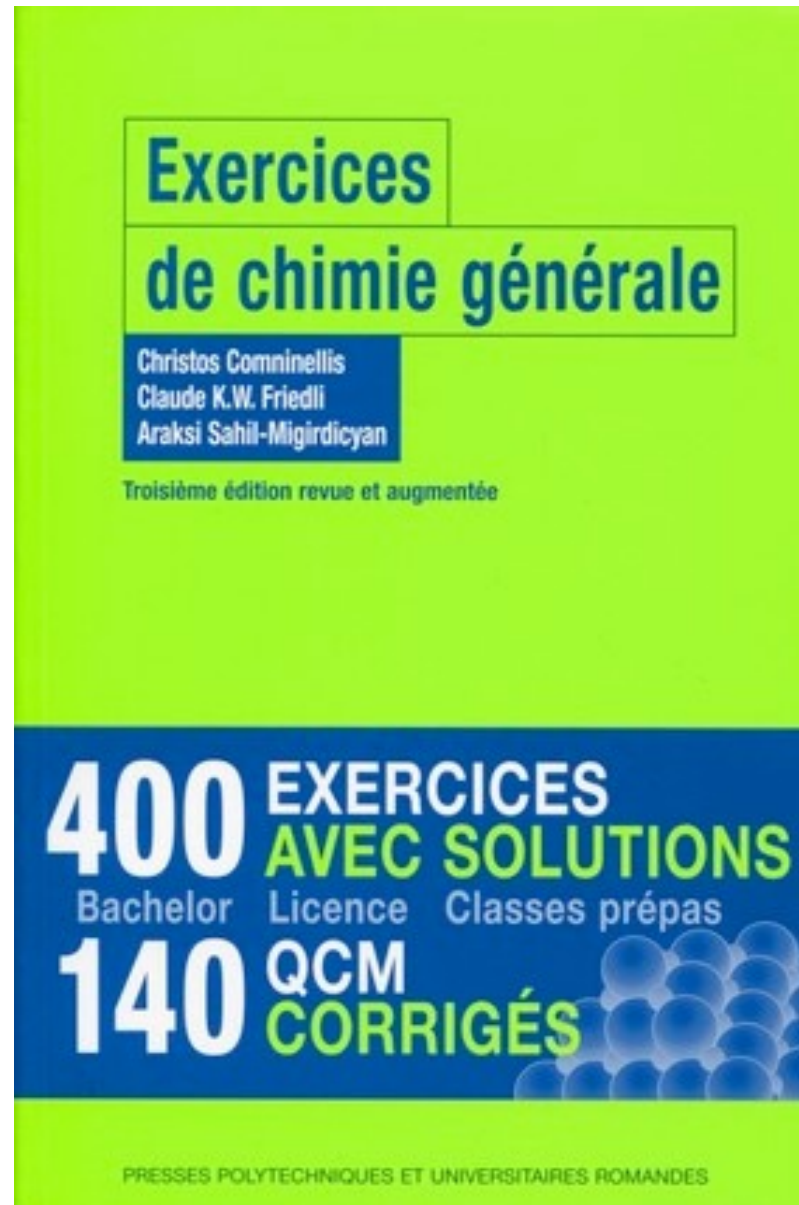
Documentation pour le cours



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 + 20 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, CM 1113, CE 1100, CE 1101, CE 1105, CM 012,
INF213.

Jeudi 13h15 – 14h (Cours) CO1 et CO2

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, 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



Quelques règles utiles à suivre



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

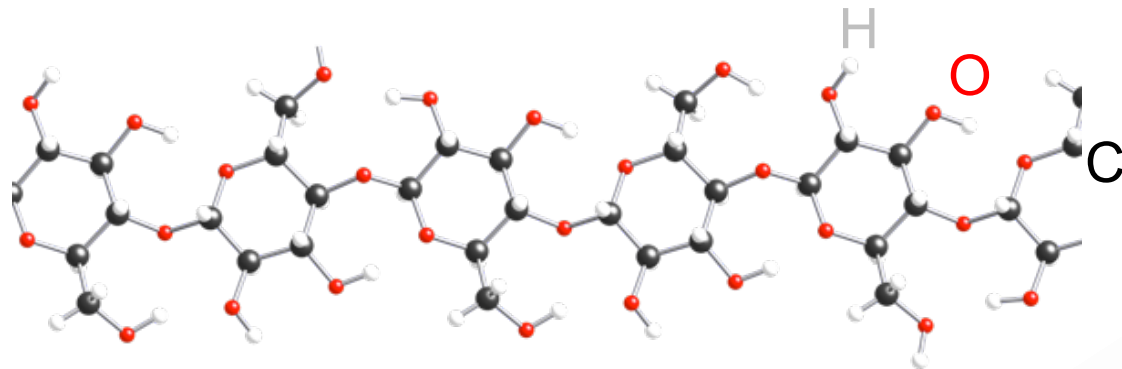
Matériaux assemblant de façon non miscible au moins deux matériaux des trois catégories précédentes

Classification des Matériaux

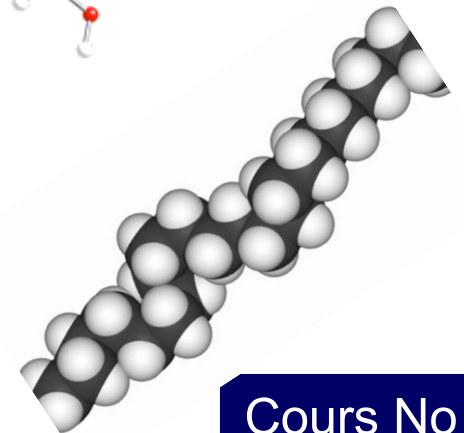
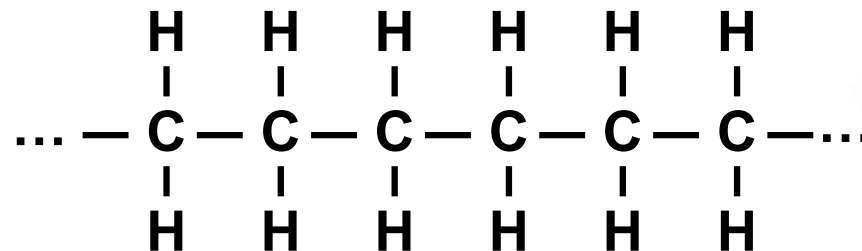
Matériaux organiques vs. inorganiques ?

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)

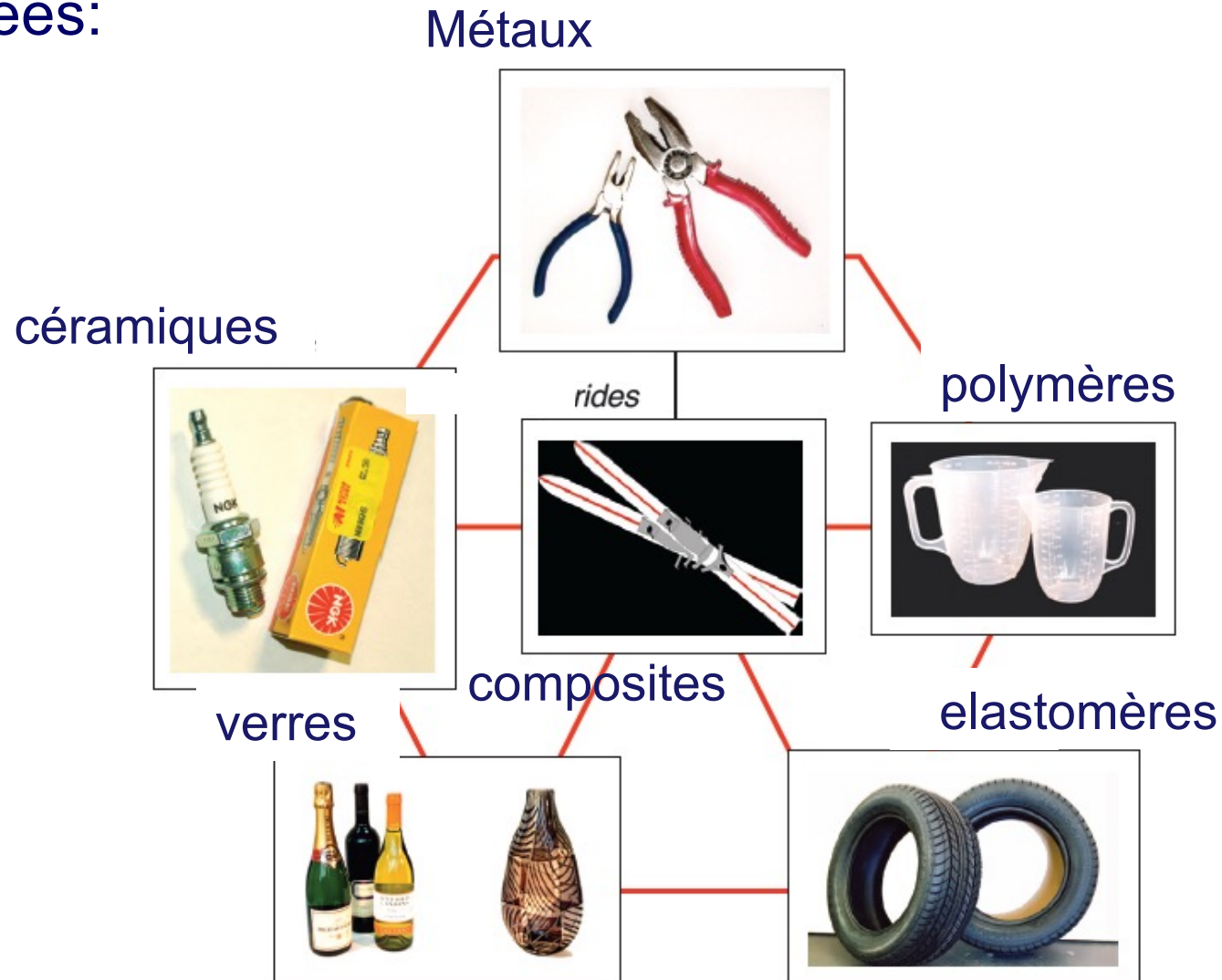


Polyéthylène (PE)
(synthétique)



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:

Tableau périodique des éléments

I A

1 H Hydrogène 1.008
3 Li Lithium 6.941
11 Na Sodium 22.99
19 K Potassium 39.10
37 Rb Rubidium 85.47
55 Cs Césium 132.9
87 Fr Francium (223)

II A

4 Be Béryllium 9.012
12 Mg Magnésium 24.31
20 Ca Calcium 40.08
38 Sr Strontium 87.62
56 Ba Baryum 137.3
88 Ra Radium 226.0

III B

21 Sc Scandium 44.96
39 Y Yttrium 88.91
57 La Lanthane 138.9
89 Ac Actinium 227.0

Nombré atomique — 26 Fe — Symbole (a)

Nom — Fer — Masse atomique (u)

Etats d'oxydation (b) — 2, 3 —

Electronégativité — 1.83 — Point de fusion (en °C)

Masse volumique (c) — 7.86 — Point d'ébullition (en °C)

26 Fe — Fer — Masse atomique (u) — 55.85 — Point de fusion (en °C) — 1538 — Point d'ébullition (en °C) — 2871

(a) La couleur représente l'état à 25°C
Noir: solide - Bleu: liquide - Rouge: gaz
En évide: les éléments artificiels

(b) Les plus courants sont en gras

(c) en g/cm³ pour les solides et les liquides (à 20°C)
en g/l pour les gaz (à 0°C et 1 atm).
Ces derniers sont marqués d'une *

VIII A

2 He Hélium 4.003
10 Ne Néon 20.18
18 Ar Argon 39.95
36 Kr Krypton 83.80
54 Xe Xénon 131.3
86 Rn Radon (222)

III A

5 B Bore 10.81
13 Al Aluminium 26.98
31 Ga Gallium 69.72
49 In Indium 114.8
81 Tl Thallium 204.4

IV A

6 C Carbone 12.01
14 Si Silicium 28.09
32 Ge Germanium 72.59
50 Sn Étain 118.7
82 Pb Plomb 207.2

V A

7 N Azote 14.01
15 P Phosphore 30.97
33 As Arsenic 74.92
51 Sb Antimoine 121.8
83 Bi Bismuth 208.98

VI A

8 O Oxygène 16.00
16 S Soufre 32.06
34 Se Sélénium 78.96
52 Te Tellure 127.6
84 Po Polonium (209)

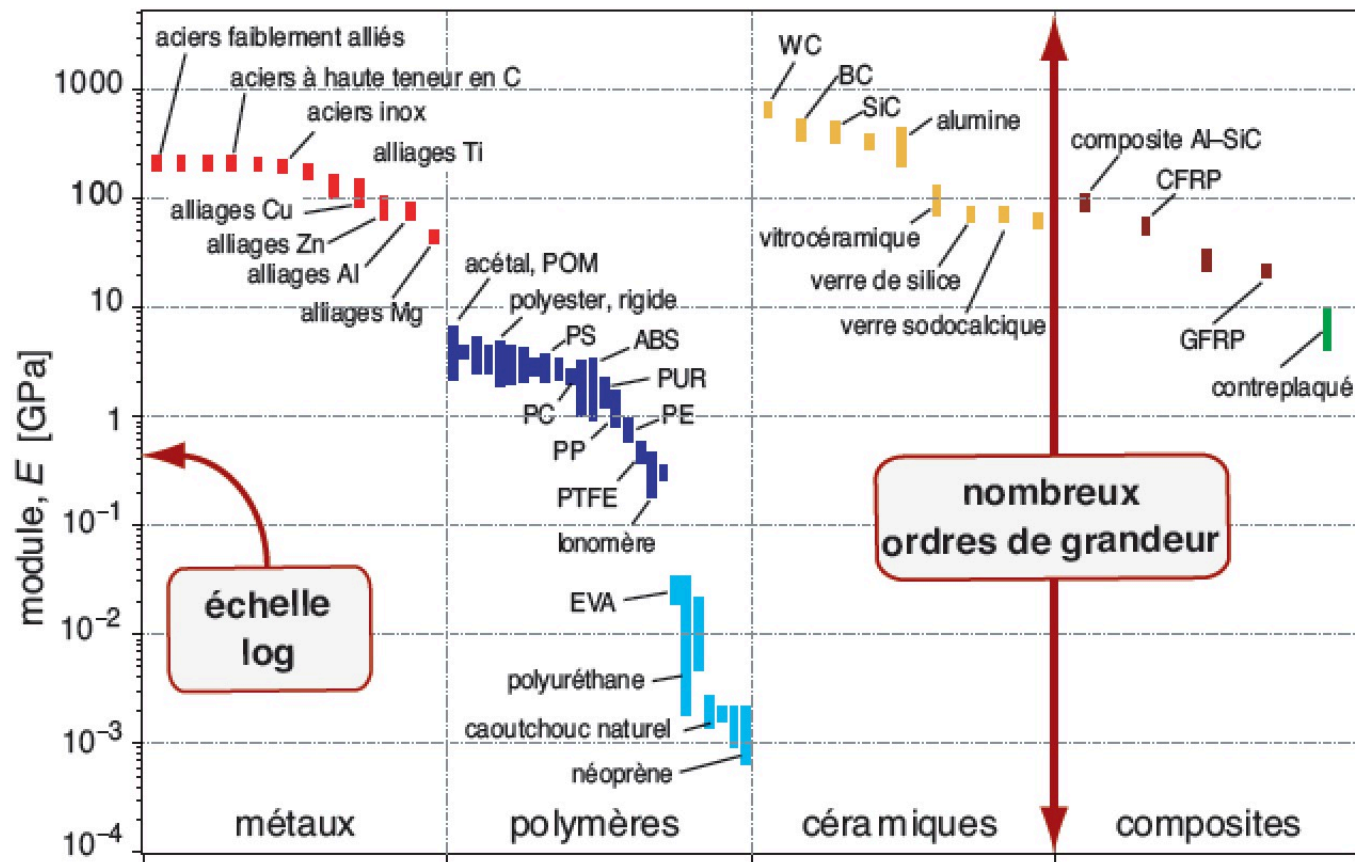
VII A

9 F Fluor 18.99
17 Cl Chlore 35.45
35 Br Brome 79.90
53 I Iode 126.9
85 At Astate (210)

Les valeurs sont tirées de David R. Lide, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90 44, 2009

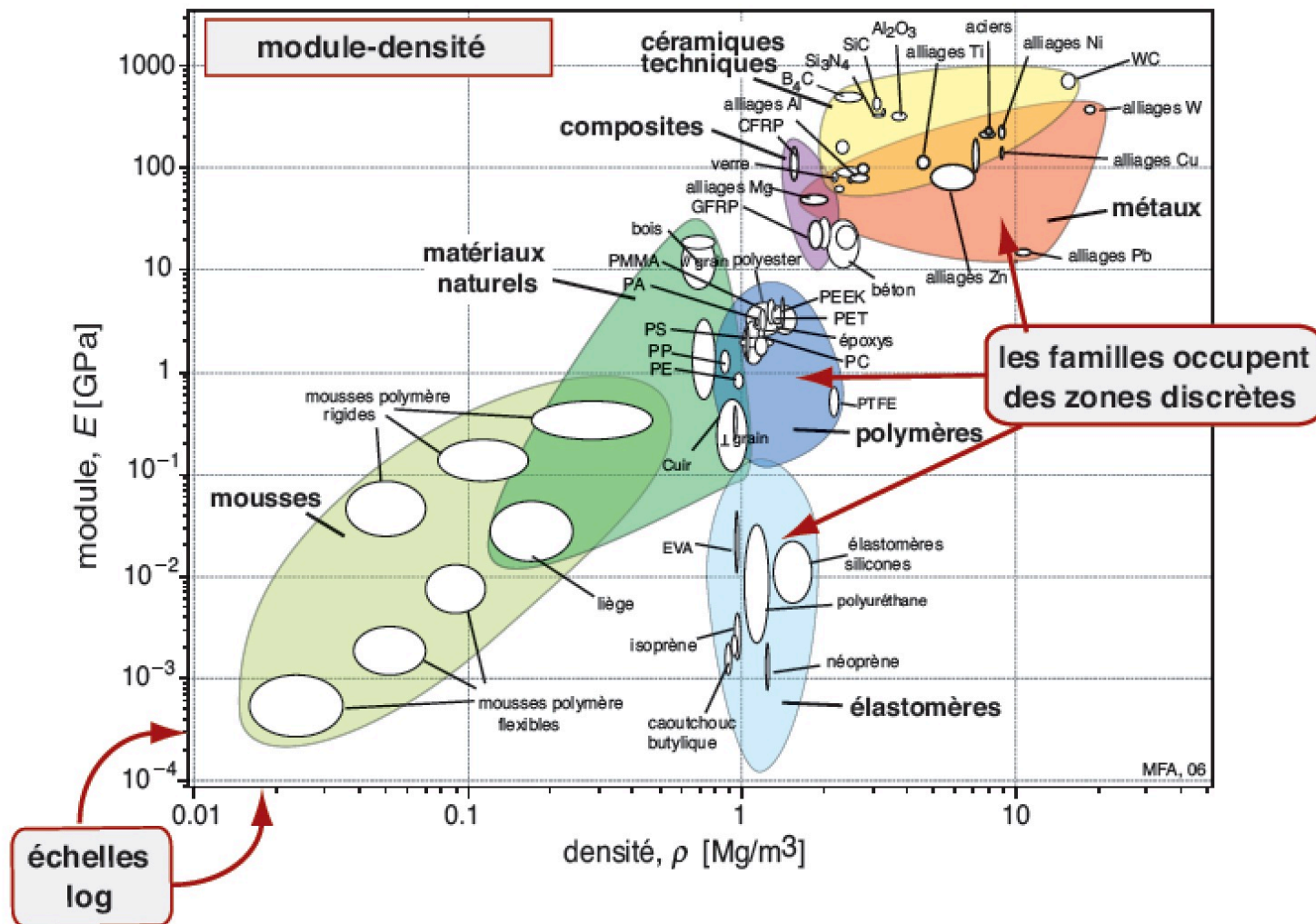
Choix des matériaux

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)



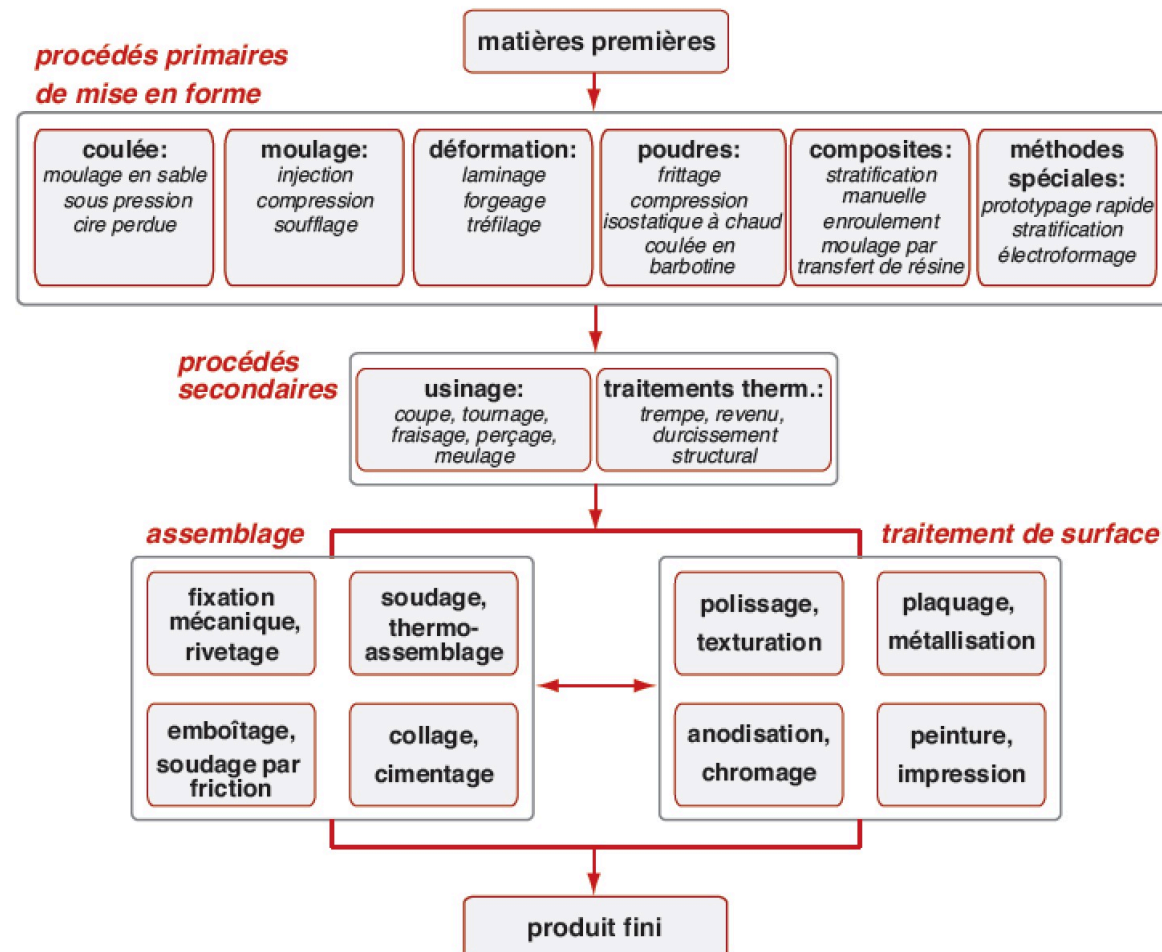
Choix des matériaux

Souvent ces cartes représentent une propriété en fonction d'une autre, exemple: rigidité/masse volumique

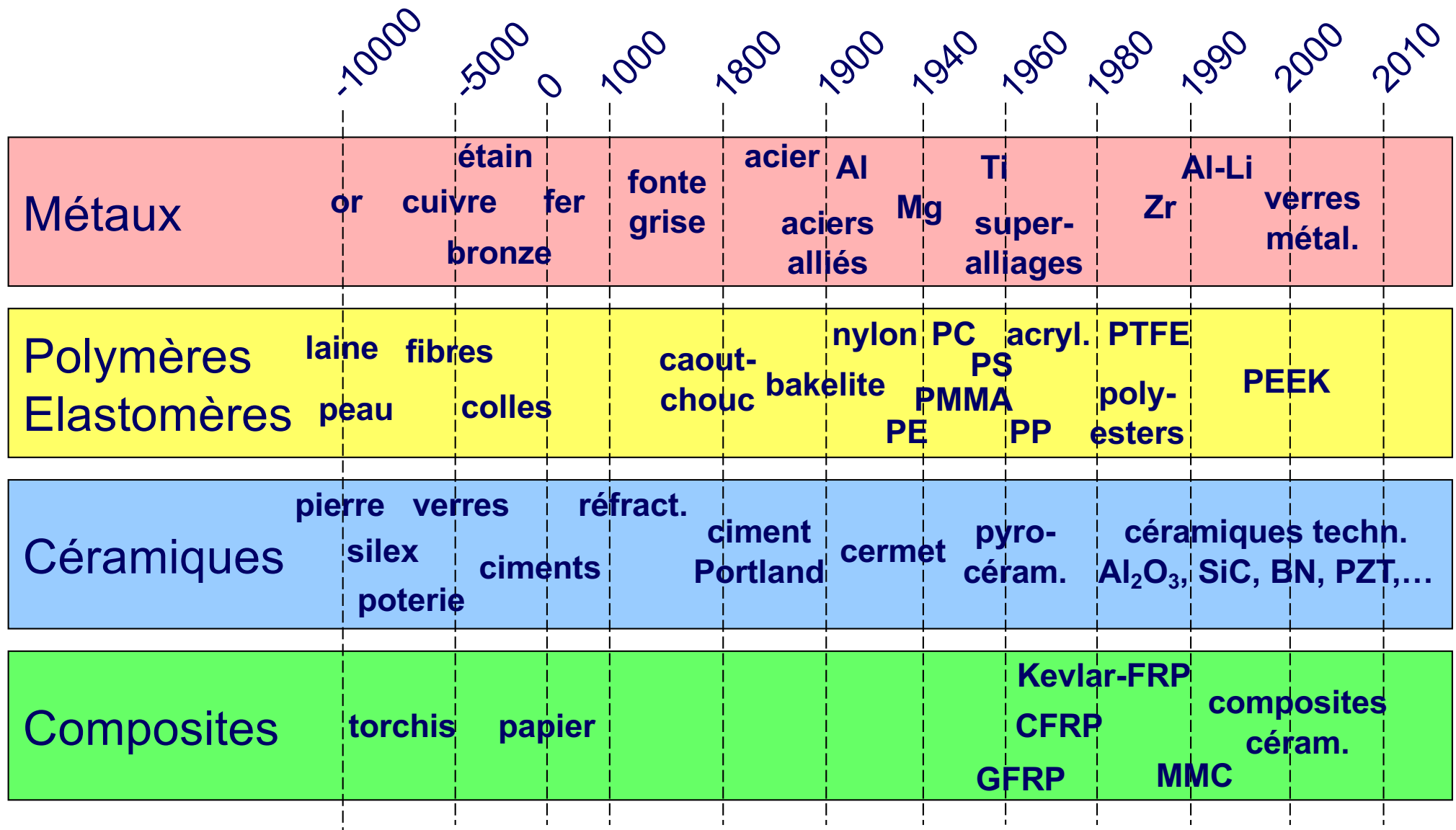


Choix des matériaux

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



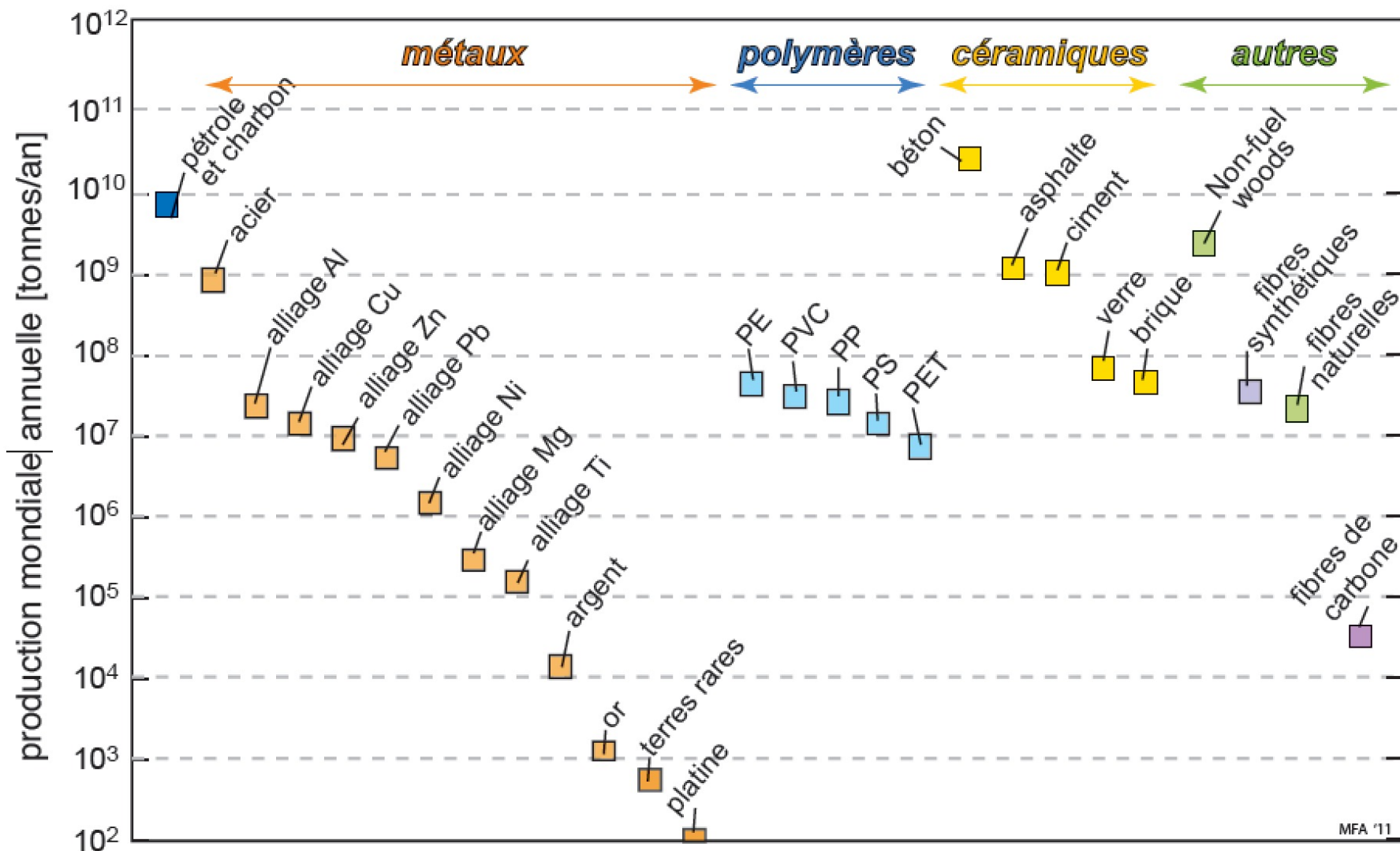
Historique



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

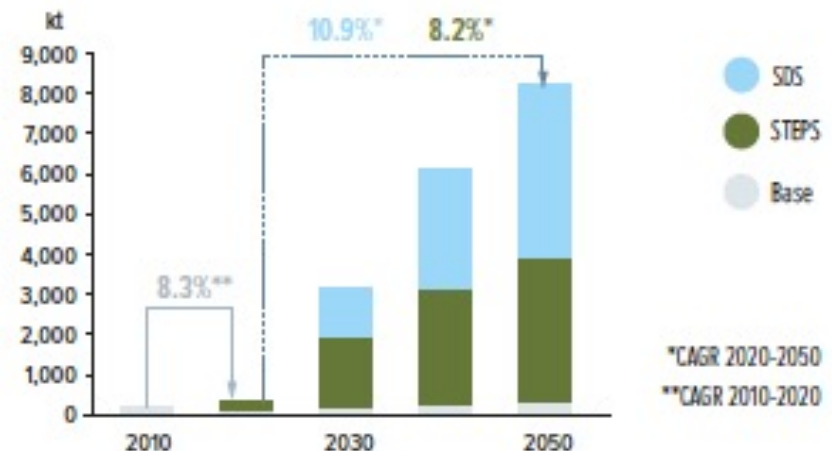
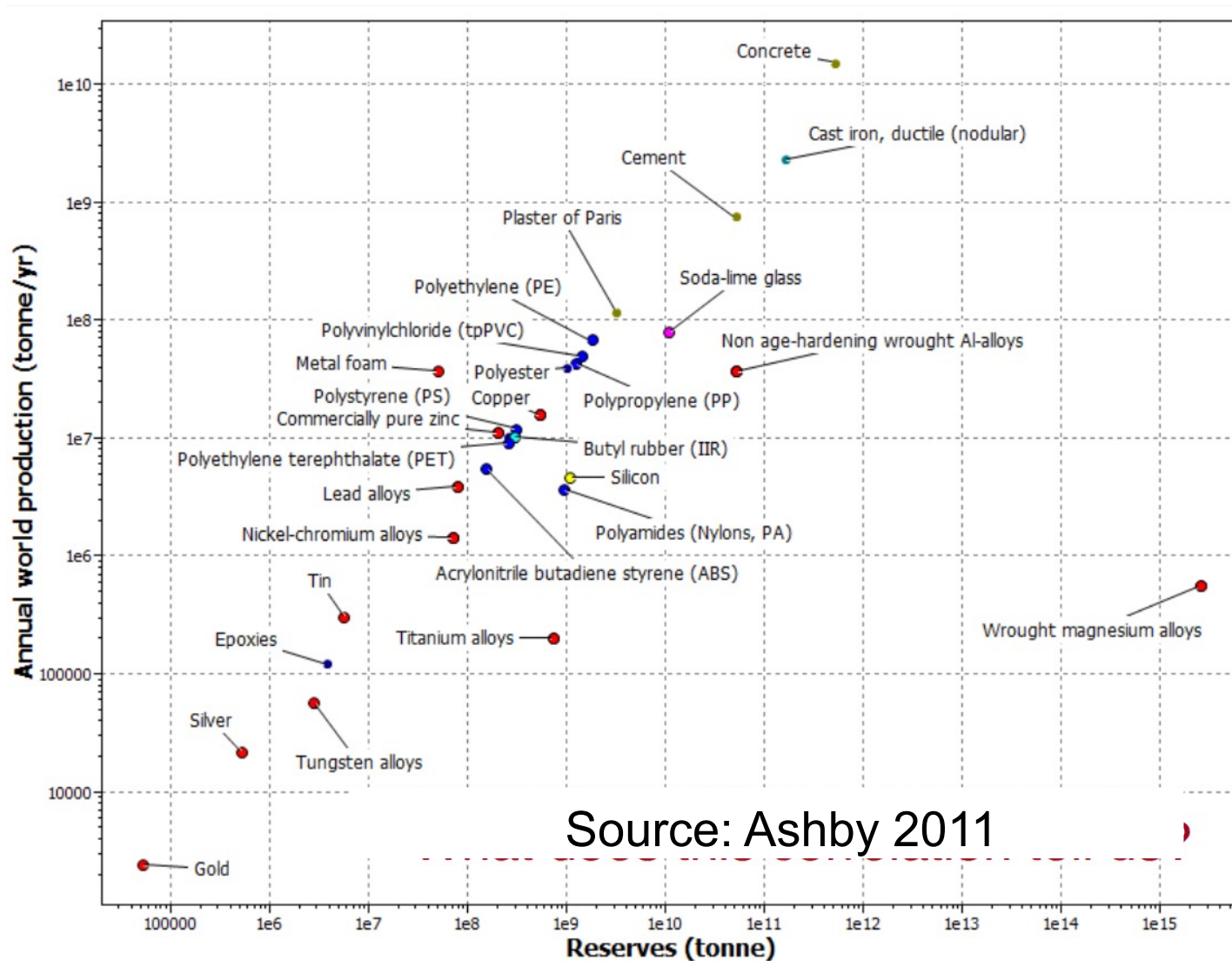


Figure 25. Lithium global total demand by scenario (STEPS and SDS)

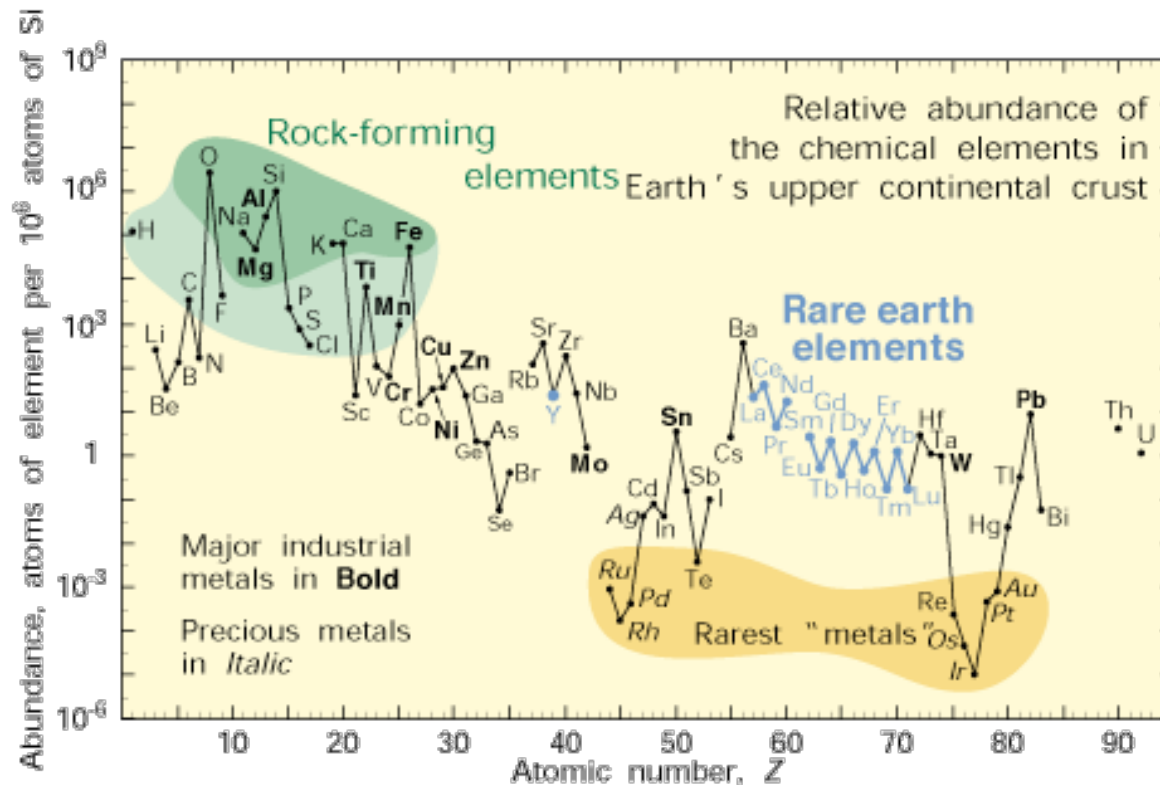
Source: Avril 2022, Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge, bit.ly/EMpolicy

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

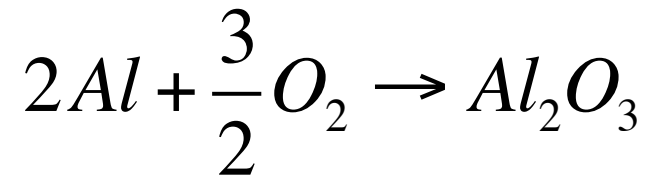
Consommation et recyclage

Le cas de l'Aluminium est très intéressant:

- Abondamment utilisé....

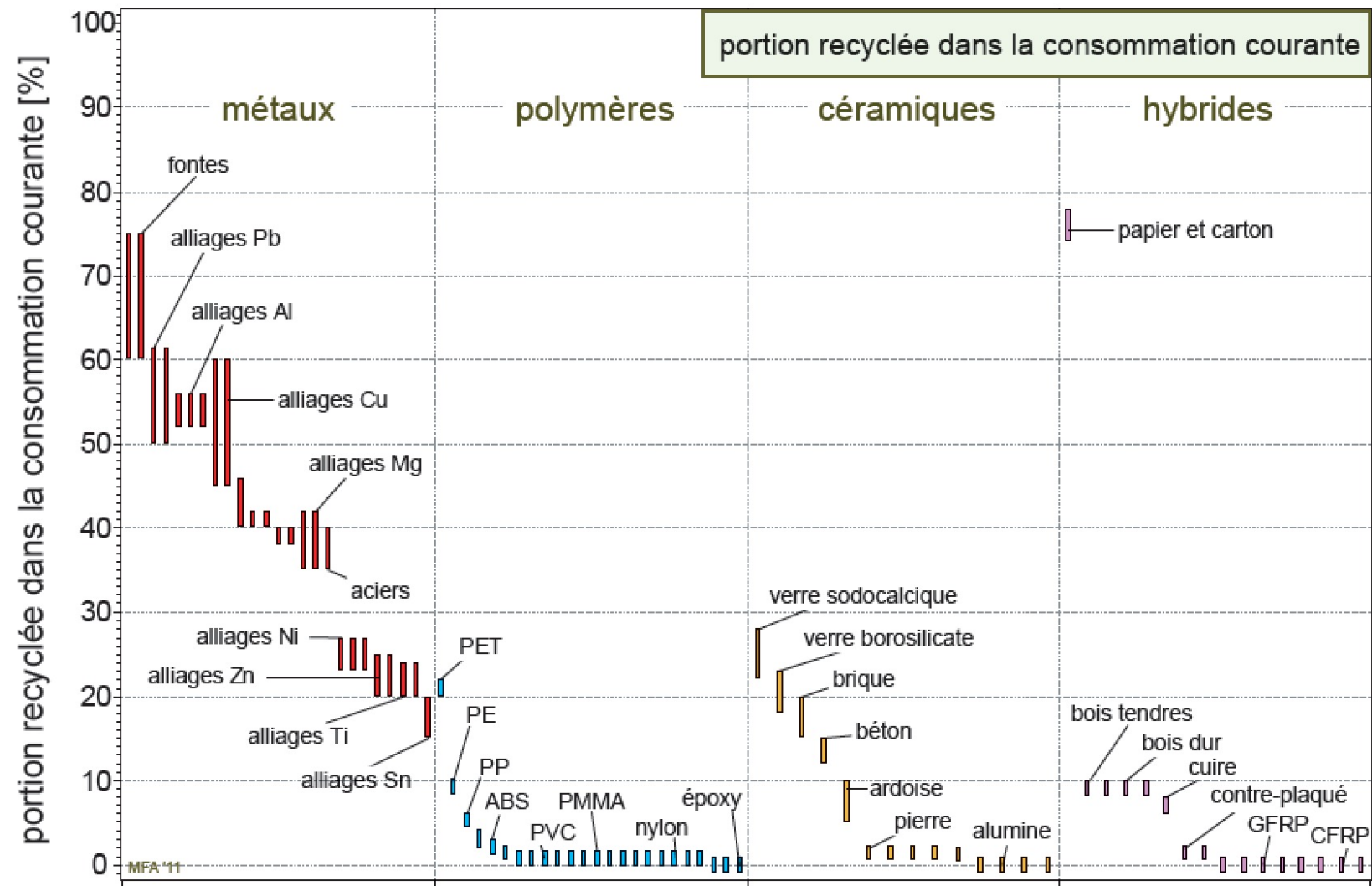


- Extrait de son oxyde l'Alumine (Al_2O_3), sa production nécessite environ $10^5 - 10^6$ MJ.m⁻³



- 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?



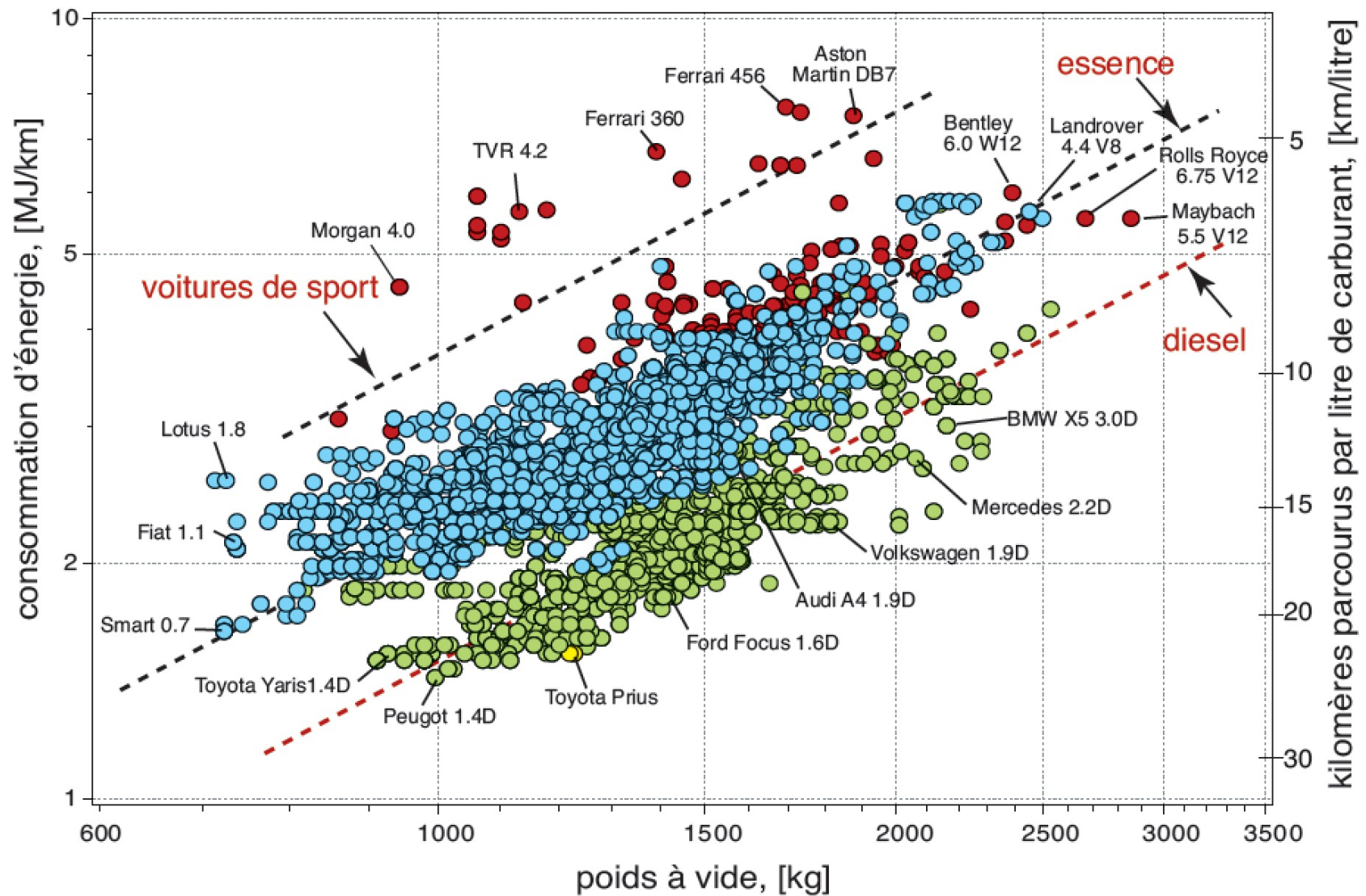
Développements grâce aux matériaux



http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l'automobile

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



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/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, et summit d'IBM, 2019: 122 Pflops.

Contenu du cours

1. Introduction/structure atomique, tableau périodique
2. Stoechiométrie, liaisons chimiques
3. Liaisons chimiques, Structure des matériaux I
4. Structure des matériaux II
5. Propriétés mécaniques: Elasticité linéaire/plasticité
6. Propriétés mécaniques: Ductilité et dureté
7. Propriétés mécaniques: Ténacité, Fatigue et usure

Contenu du cours

8. Test blanc, étude de cas /Thermodynamique
9. Thermodynamique/ Equilibres
10. Diagrammes de phases/transformations
11. Propriétés thermiques/ Comportement à haute température
12. Réactions chimiques: acide base /oxydo-réduction
13. Réactions chimiques, piles et electrolyse
14. Propriétés électriques, magnétiques, résumé du cours et film

A retenir du cours d'aujourd'hui

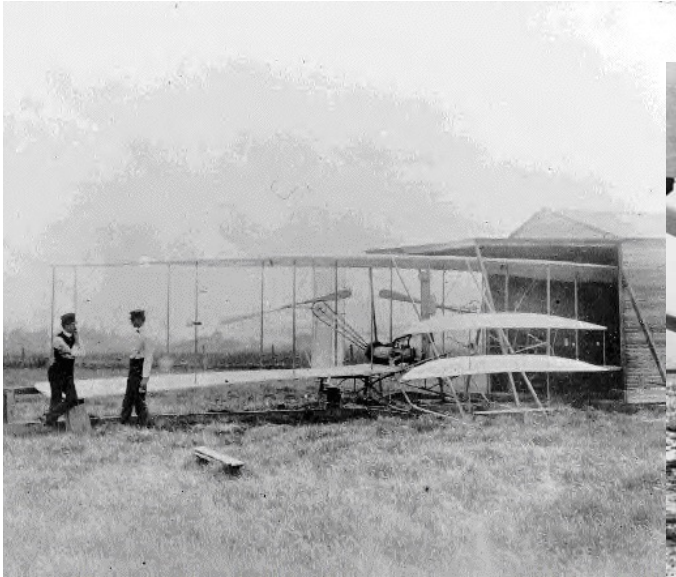
- *La Science des matériaux a pour principal fondement la compréhension du lien entre leur nano- et micro-structure, et leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles*
- *Elle est à la base des développements technologiques modernes*
- *Les notions de ressources, de consommation et de recyclage mais aussi 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



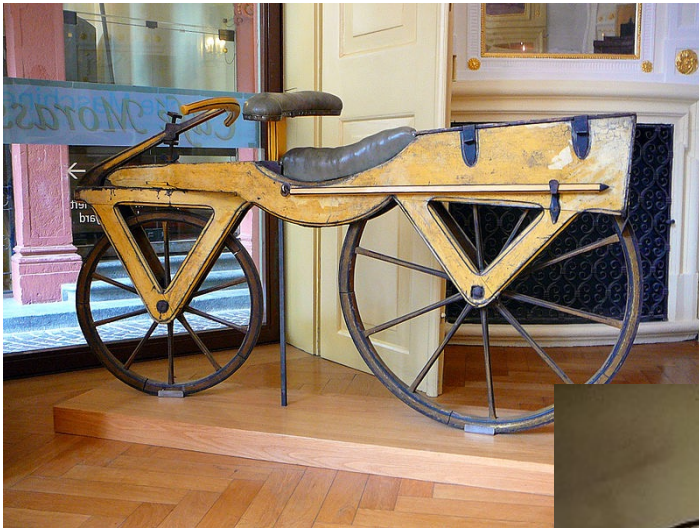
<http://www.learning-to-fly.com/first-airplane-made.html>

<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 (pédivele). 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



La photographie a subi la même évolution. Depuis les Daguérréotypes (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.