Physique des matériaux - Introduction

Anne Mertens

LIÈGE université

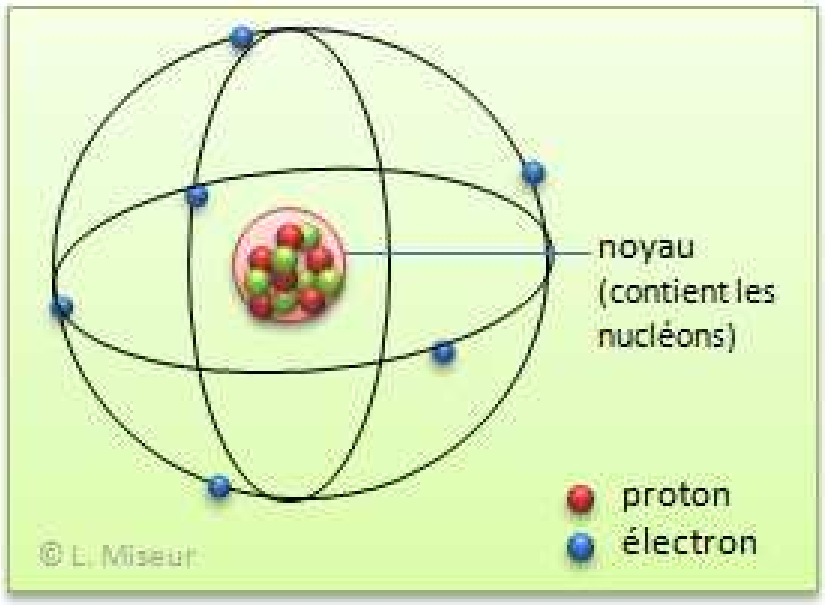
M.M.S Metallic Materials Science

Objectif

Comprendre le lien entre la **structure interne** des matériaux et leurs **propriétés d'usage**

Structure de la matière

- Matière: faite d'atomes
- **Atome** = noyau (neutrons et protons: +) + électrons (-)

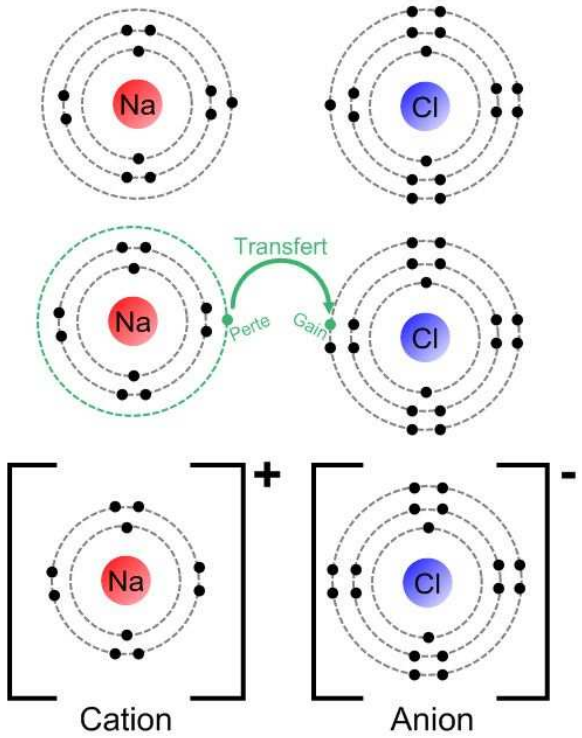


- Les atomes tendent à avoir leur dernière couche électronique remplie (8 électrons)

Structure de la matière

- Matière: faite d'atomes
- Cohésion assurée par les **liaisons chimiques** qui peuvent être de différents types

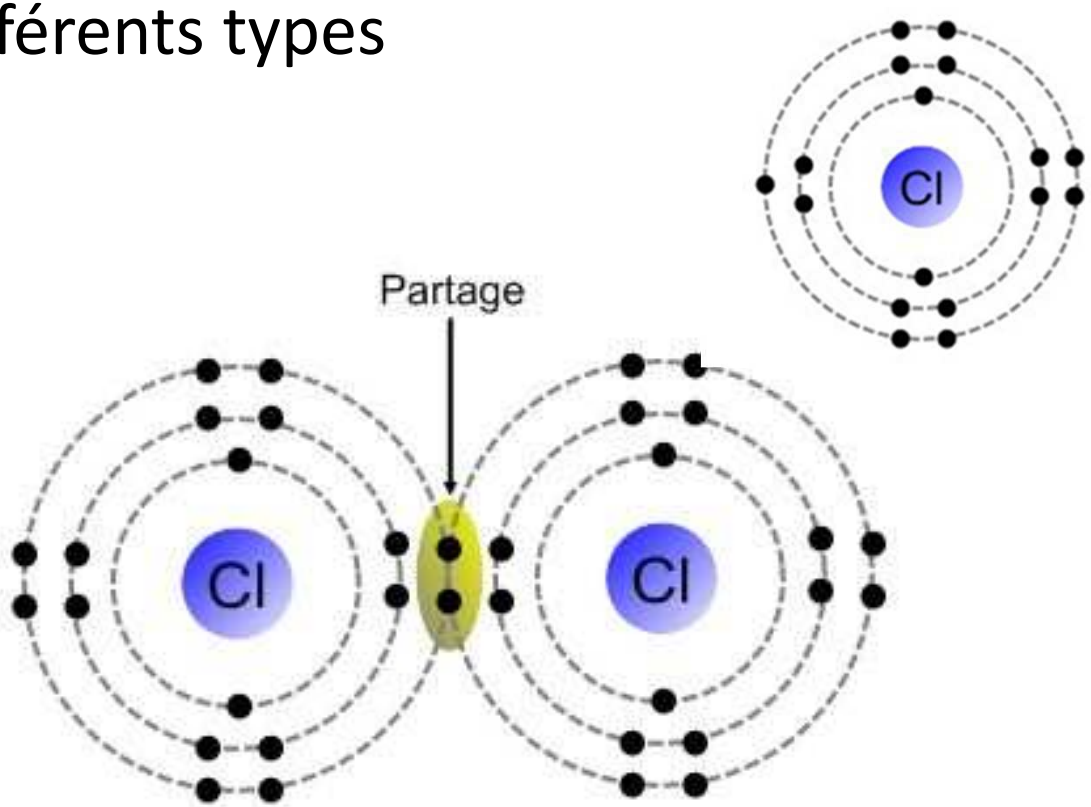
I. Liaison ionique



Structure de la matière

- Matière: faite d'atomes
- Cohésion assurée par les **liaisons chimiques** qui peuvent être de différents types

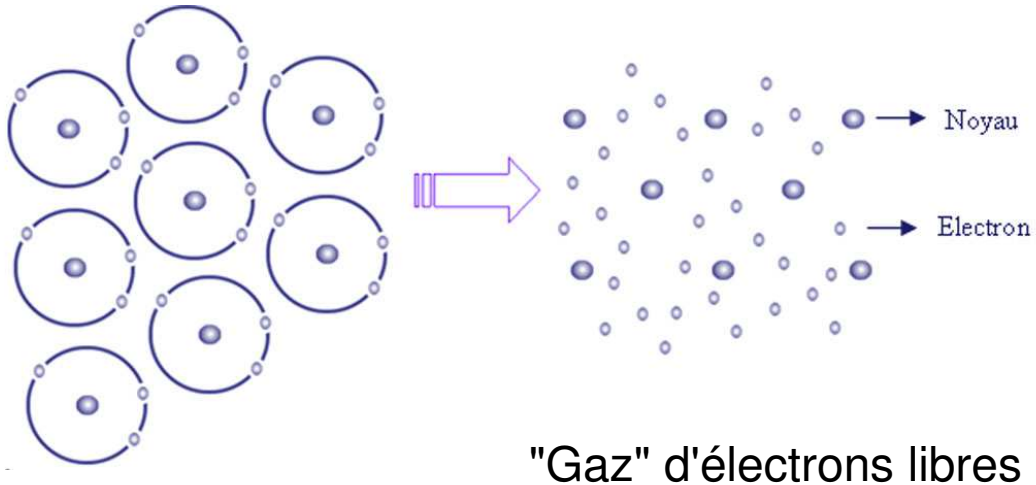
II. Liaison covalente



Structure de la matière

- Matière: faite d'atomes
- Cohésion assurée par les **liaisons chimiques** qui peuvent être de différents types

III. Liaison métallique

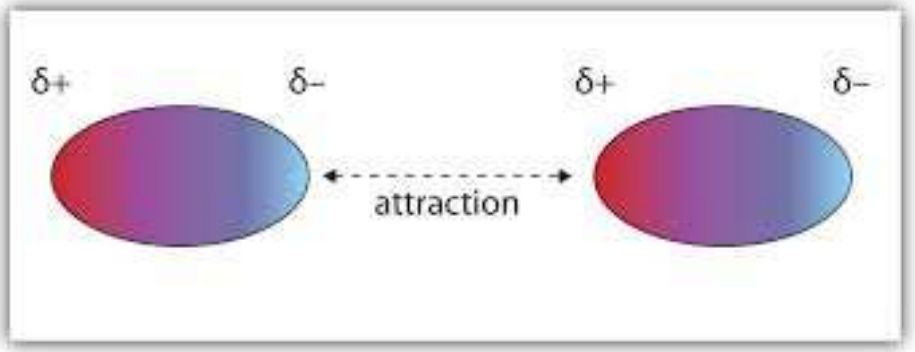


"Gaz" d'électrons libres

Structure de la matière

- Matière: faite d'atomes
- Cohésion assurée par les **liaisons chimiques** qui peuvent être de différents types

IV. Liaison de Van der Waals

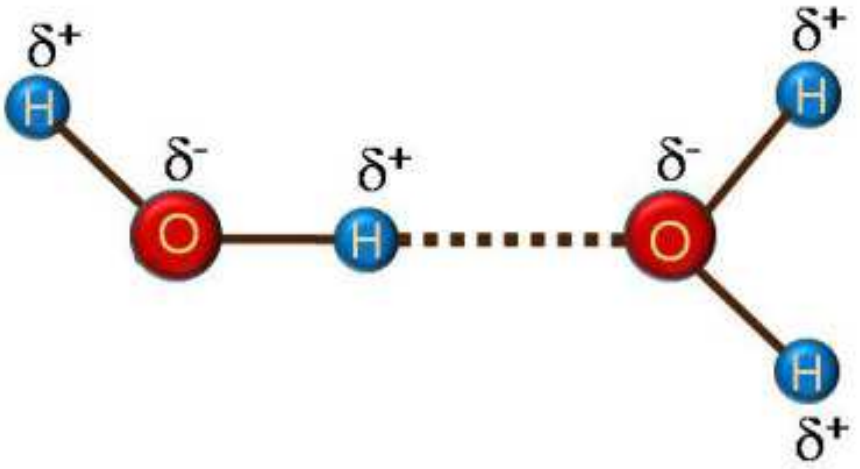


Interaction électrostatique faible entre 2 molécules

Structure de la matière

- Matière: faite d'atomes
- Cohésion assurée par les **liaisons chimiques** qui peuvent être de différents types

V. Pont hydrogène



Interaction électrostatique faible entre 2 molécules

Structure de la matière

- Matière: faite d'atomes
- Cohésion assurée par les **liaisons chimiques** qui peuvent être de différents types

I. Liaison ionique
II. Liaison covalente
III. Liaison métallique

Liaisons fortes

IV. Liaison de Van der Waals
V. Pont hydrogène

Liaisons faibles

Structure de la matière

- L'**arrangement** des atomes et la **nature des liaisons** chimiques définissent la structure de la matière et ses propriétés d'usage

Exemples:

Conductivité électrique

Module de Young

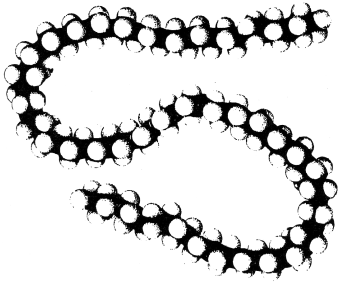
Limite d'élasticité

....

Focus sur 2 familles de matériaux

- Matériaux métalliques
  - Matériaux cristallins
  - Cohésion par liaisons métalliques

- Matériaux polymères



  - Macro-molécules
  - Cohésion intra-moléculaire par liaisons covalentes
  - Cohésion inter-moléculaires par liaisons faibles

MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

Métaux: utilisés depuis l'antiquité

Group	1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period																			
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

***Lanthanoids**	*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
****Actinoids**	**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Au, Ag, Hg, Cu, Sn, Pb, Fe + Pt

Les alliages aussi sont connus dès l'antiquité bronze (Cu/Sn)

Les métaux aujourd'hui

>1 Gt/an
>10 M/an
>1 Mt/an
>100 kt/an
>10 kt/an
> 1 kt/an
> 100 t/an
> 10 t/an

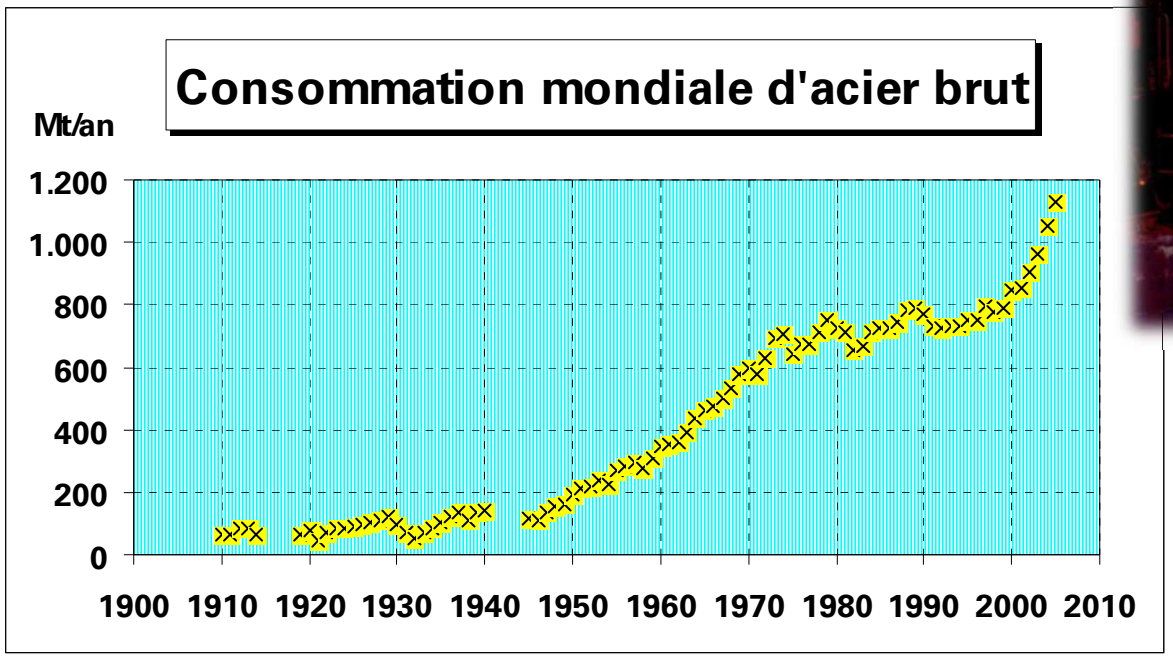
Group	1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period																			
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

*Lanthanoids	*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
**Actinoids	**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

- Tous les métaux peuvent maintenant être élaborés, y compris les plus difficiles comme Al, Mg, Ti, Zr, U et les difficilement séparables comme les terres rares (Y→Yb).
- Certains n'existent pas dans la nature (Tc, et tous les éléments à partir du Neptunium).

Matériaux métalliques

- Métallurgie = Industrie importante
- En croissance.



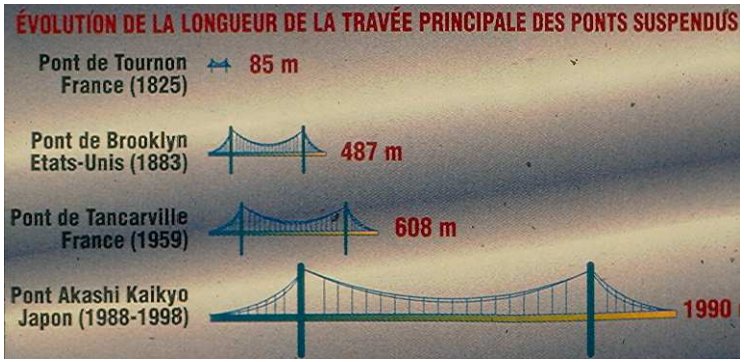
Production mondiale de quelques métaux

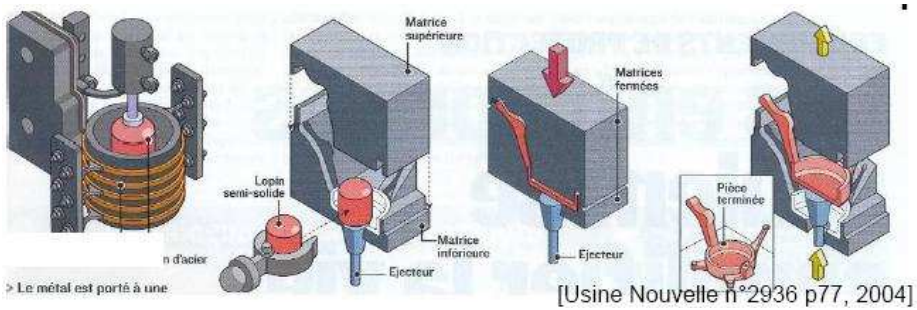
Métaux : 1250 Mt/an

- Acier : 1125 Mt/an
- Fontes : 75 Mt/an
- Aluminium & alliages : 35 Mt/an
- Cuivre & alliages : 10 Mt/an
- Zinc & alliages : 7.5 Mt/an
- Plomb & alliages : 5 Mt/an
- Silicium :100 kt/an
- Argent : 15 kt/an
- Or : 2 kt/an
- Platinoïdes : 275 t/an

Matériaux métalliques : Objectifs

- Améliorer les performances des matériaux
- Développer des méthodes de fabrication efficaces
- Minimiser l'impact sur l'environnement





[Usine Nouvelle n°2936 p77, 2004]

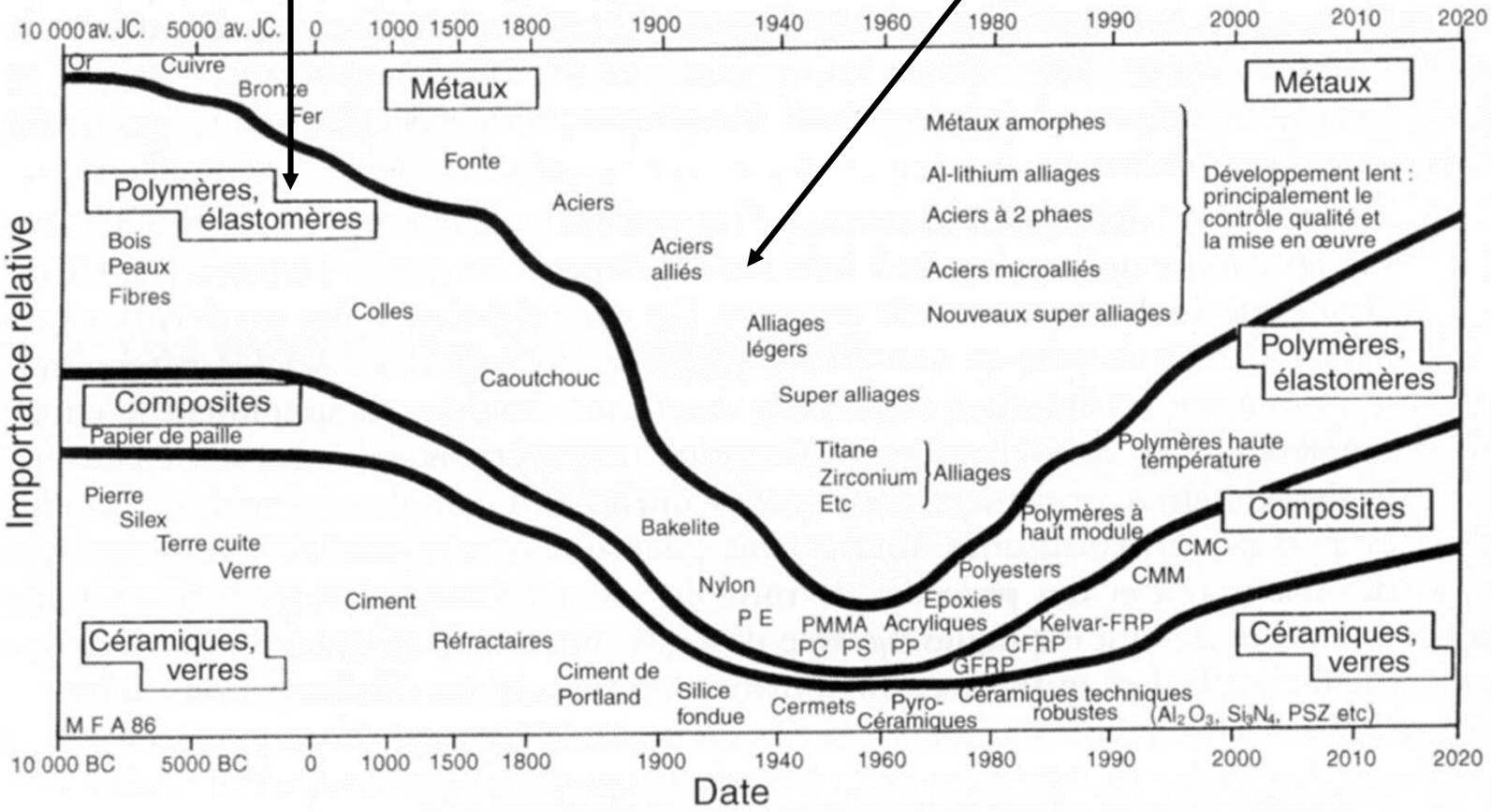
Matériaux métalliques

- Extraction – Elaboration - Mise en œuvre
  (MECA0526 High T processes for recycling and remanufacturing;
  MECA0473 Ingénierie des matériaux métalliques; MECA0139 3D printing)
- Physique des matériaux
  - lien structure-propriétés
- Caractérisation et sélection (= f(application))
  (MECA0462 Materials selection)
- Développement de matériaux nouveaux (alliages, composites...)
  (MECA0473 Ingénierie des matériaux métalliques; MECA0139 3D printing)

MATÉRIAUX POLYMÈRES

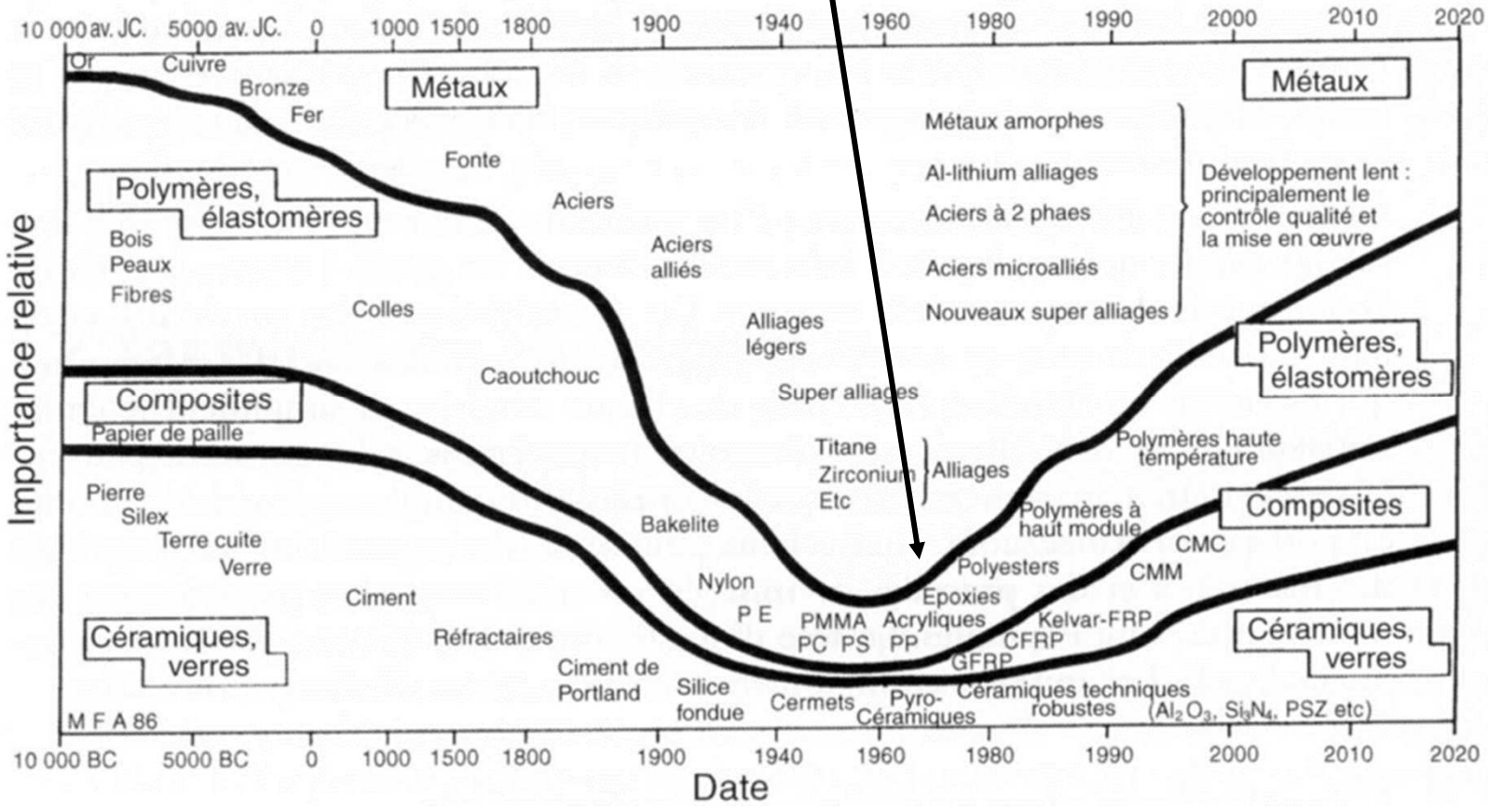
Historique et perspectives

- Les matériaux polymères naturels (bois, peaux, fibres) sont utilisés depuis l'Antiquité.
- Ils sont progressivement supplantés par les métaux (productivité ↑)



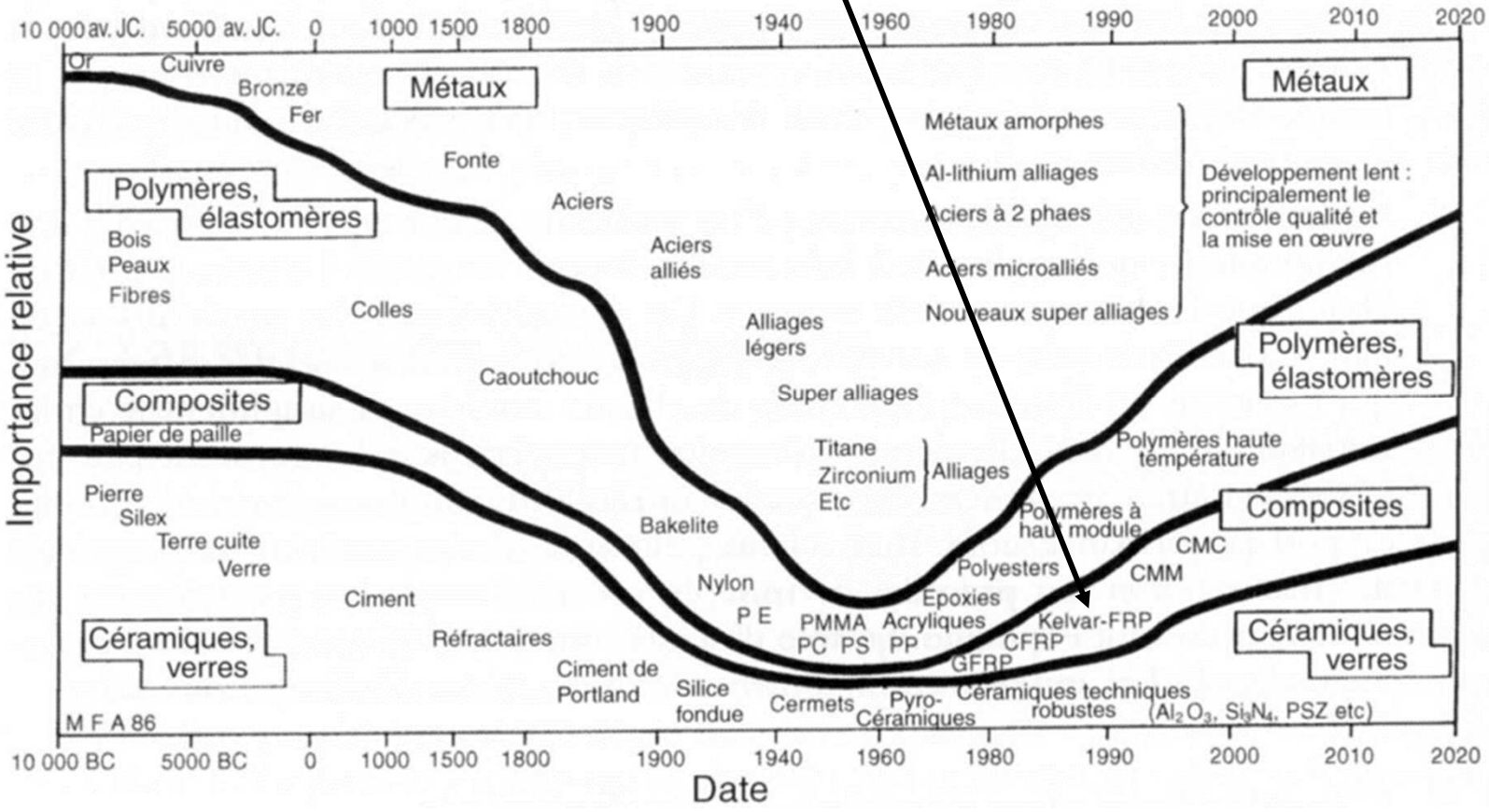
Historique et perspectives

- A partir des années 1930-1960, retour en grâce avec l'invention du nylon (1935), du polyéthylène (1933), du PMMA (1936), du polycarbonate (1953) et du polystyrène (1950), dérivés du **pétrole**



Historique et perspectives

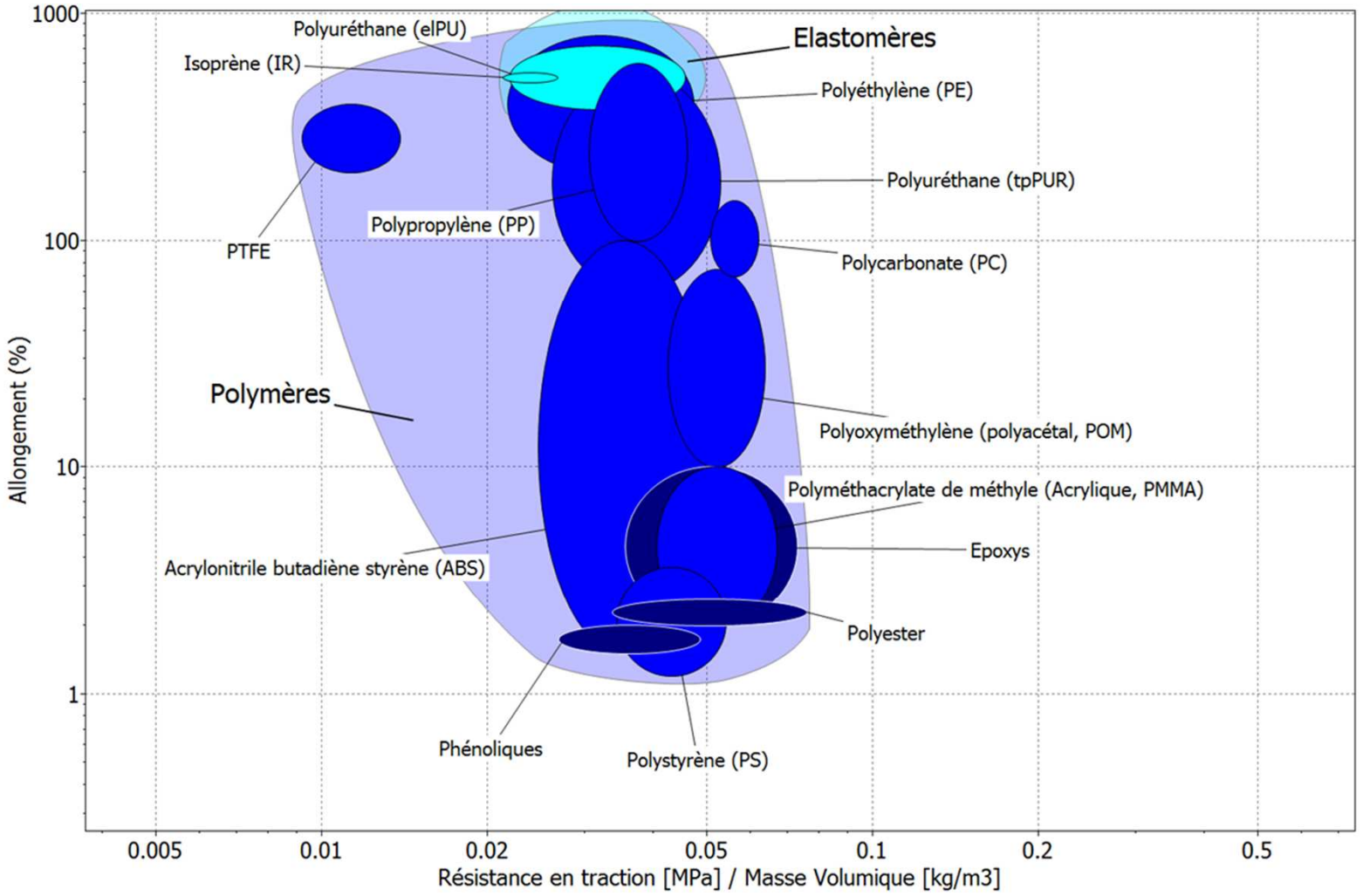
- A partir des années 1980, développement des composites à matrice polymères renforcés par des fibres de verre, des fibres de carbone puis des fibres polymères à haut module.



Historique et perspectives

Grande diversité de matériaux polymères

⇒ Propriétés et utilisations très variées

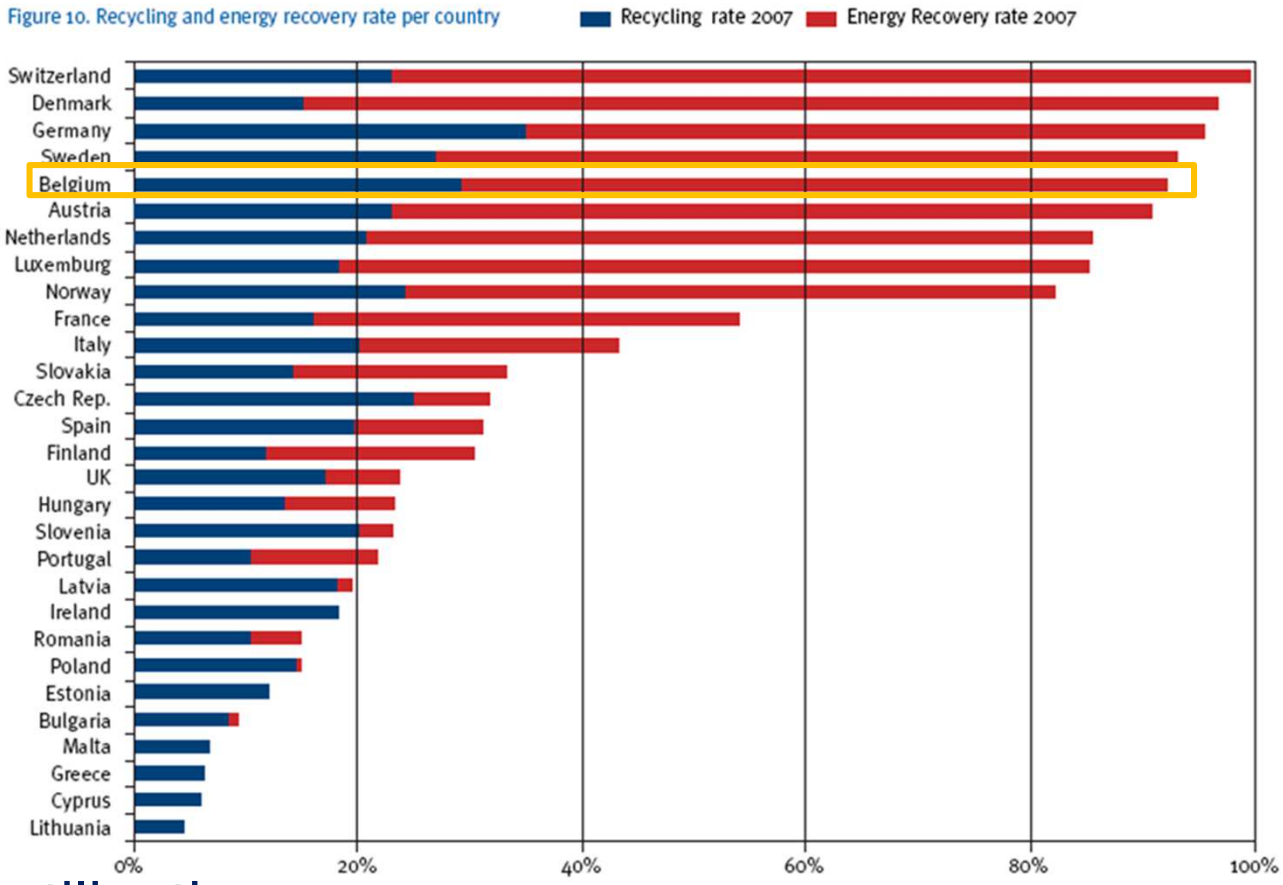


Historique et perspectives

- Le **pétrole** se raréfie depuis les années 2000.
- Nouvelles matières premières naturelles: **polymères bio-sourcés**
- Exemple : sacs en plastique ou couverts jetables à base d'amidon de maïs (contiennent jusqu'à 50 % d'amidon naturel combiné à

Historique et perspectives

- Autre enjeu majeur: **recyclage**, surtout pour:
  - les résines thermodurcissables
  - les composites



Incinération = récupération d'énergie

Réutilisation

Secteurs d'application

Grande diversité de matériaux polymères

$\Rightarrow$ Propriétés et utilisations très variées...

Application	**Parties en polymère (ou en élastomère)**
Automobile	Mousse de pare-choc, finition intérieure, sièges, cache du moteur, garde boue, pneu, poignée de porte, volant, cadrans, réservoir,…
Avion	Sièges, bacs de rangements, roue d'atterrissage, poignées, aménagement du sol, tuyaux de ventilation, gilet de sauvetage, …
Eolienne	Pâles en composite, isolants, gaine des câbles
Chaîne de montage	Tapis roulant, guides, tuyaux, pièces isolantes, écrans, manettes, …

... mais aussi dans le génie civil, l'électronique, l'électricité (matériau isolant), la chimie appliquée...

Secteurs d'application

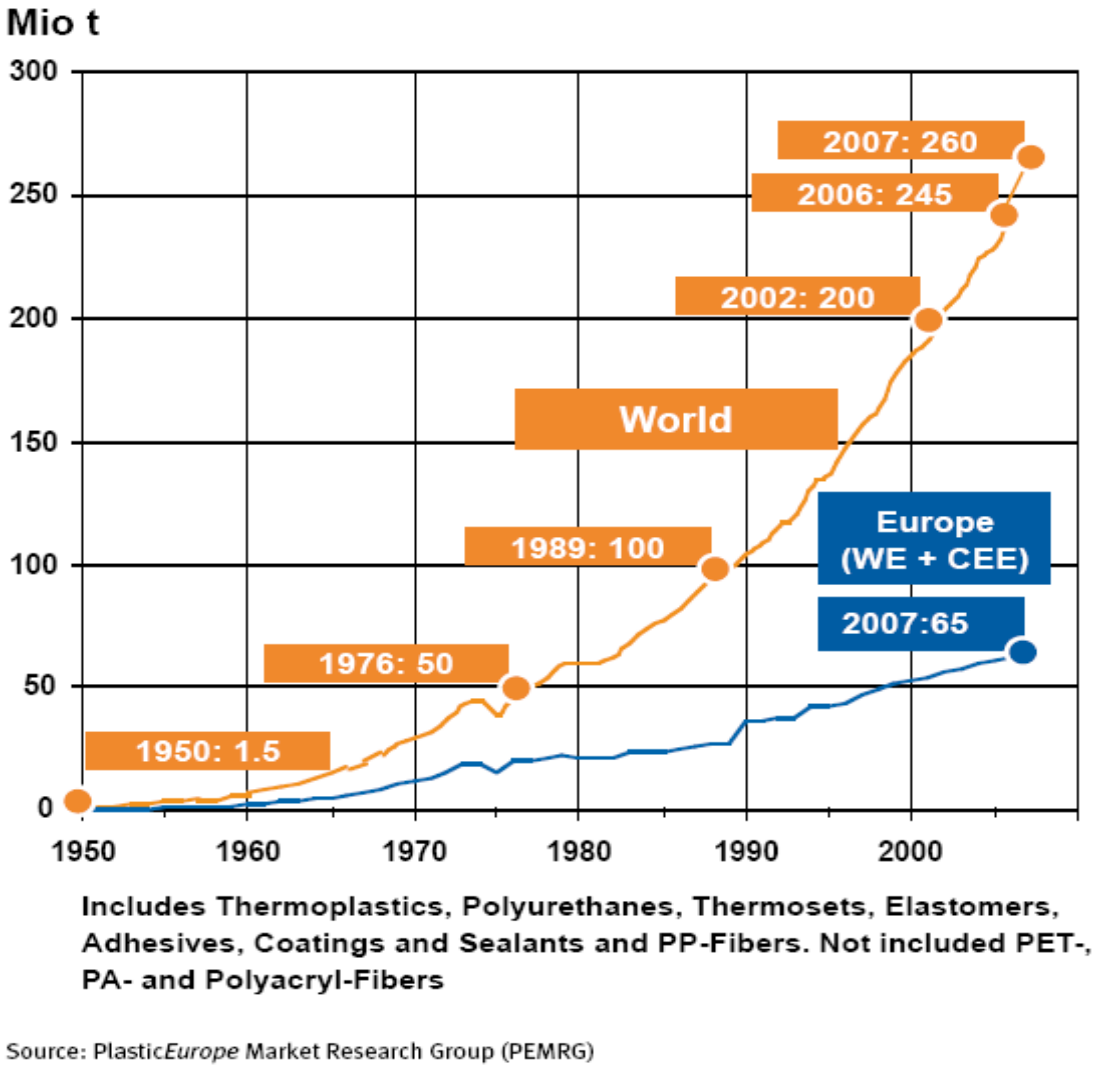
Exemple: matériau isolant électrique, léger et bon marché

	Matière
Ame centrale	*Cuivre*
Diélectrique	*Polyéthylène expansé (PE)*
Tresse	*Aluminium*
Feuillard	*Polyester (PET)*
Gaine	*PVC (blanc), PE (noir)*

Matériau	Coût massique (€/kg)
PET	1.11-1.22
PE	1.26-1.39
PVC	1.04-1.14
PS	1.23-1.36
PMMA	1.67-1.84
Caoutchouc	2.68-2.95
Alliage d'aluminium	1.77-1.94
Acier allié	0.704-0.774

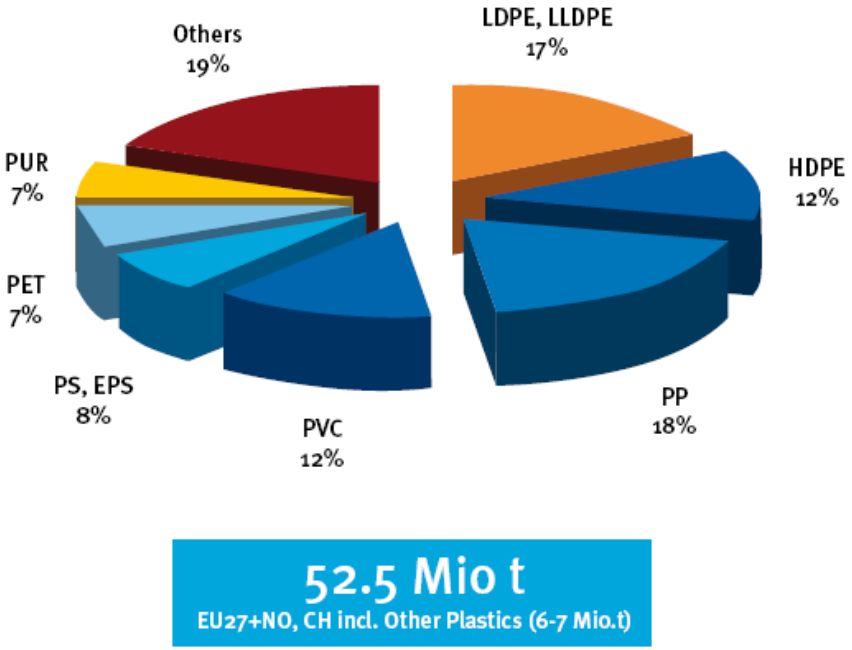
Gaine isolante en PVC, diélectrique en PE et feuillard isolant en PET

Quelques chiffres - Production



- Croissance exponentielle depuis 1950
- Croissance plus lente en Europe
- En 2007, 25% de la production s'est faite en Europe (65 Mt sur 260 Mt)
- Comparaison:
  Production acier: 1100 Mt
  Production alu: 30 Mt

Quelques chiffres - Production

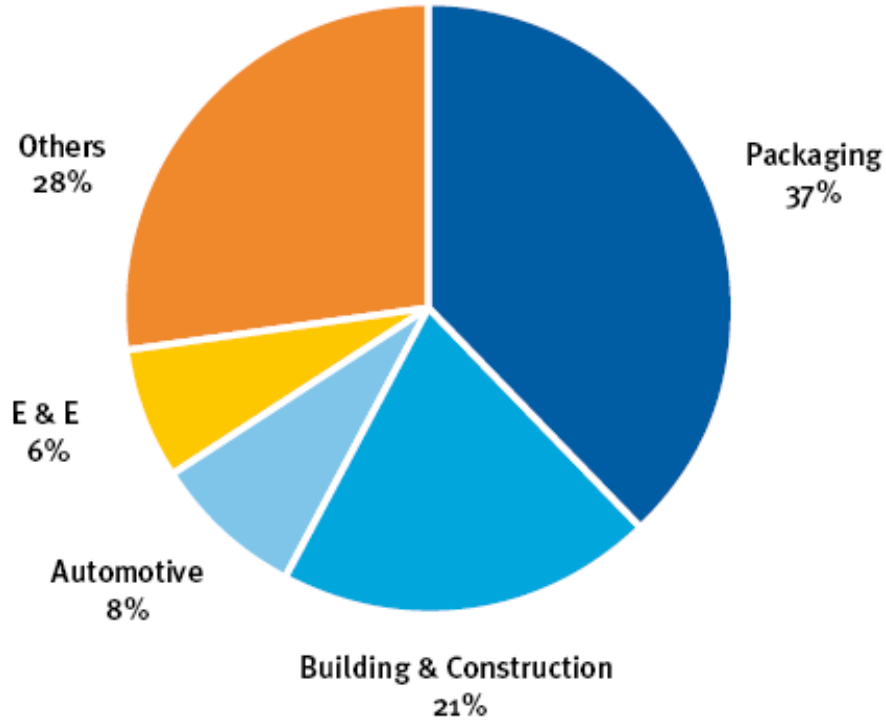


Source: Plastic*Europe* Market Research Group (PEMRG)

L'essentiel de la fabrication (67%) est constitué par :

- Le polyéthylène (LDPE, LLDPE, HDPE) : 29 %
- Le polypropylène (PP) : 18 %
- Le chlorure de polyvinyle (PVC) : 12%
- Le polystyrène (PS) : 8%

Quelques chiffres - La demande



- Emballage et construction représentent plus de la moitié de la demande (58 %)
- Automobile : 8 %
- Electricité – électronique : 6 %

Quelques chiffres - Propriétés mécaniques

Qualitativement

- E (Métaux) $\approx$ 100 x E (polymères)
  où E: module de Young
- Mais ductilité plus élevée pour les polymères

- Ténacité (polymères) ~ ténacité (céramiques)
- Résilience (polymères) > Résilience (céramiques)

Quelques chiffres - Propriétés mécaniques

Quantitativement

Les propriétés mécaniques des polymères varient fortement d'un polymère à l'autre, ou même au sein d'une même variété (par exemple en fonction de la densité (polyéthylène)).

- E est faible (1-5 GPa) et très faible pour les caoutchoucs (1-5 MPa)
- Résistance à la rupture (polymères) est médiocre par rapport aux métaux courants (+ de 100 MPa)
- Ductilité très élevée (polymères)
- Taux de déformation **élastique** très important pour les caoutchoucs (élastomères)

Quelques chiffres - Propriétés physiques

- La densité des polymères courants est comprise entre 0.5 et 2. Les mousses en polyuréthane (PU) sont peu denses et la densité peut descendre jusqu'à 0.05
- La plupart des polymères sont de bons **isolants** (résistivité électrique ≈ 10^{20} µohm cm)
  >< Les métaux sont de très bons conducteurs (résistivité électrique ≈ 10^{-1} µohm cm)
- Les propriétés magnétiques des polymères sont très proches de celles du vide.