

Composants de la MicroTechnique / Mécanique

Cours de Construction Mécanique
Deuxième Semestre - Première Année
Sections MicroTechnique et Génie Mécanique

4. Matériaux & Procédés de Fabrication

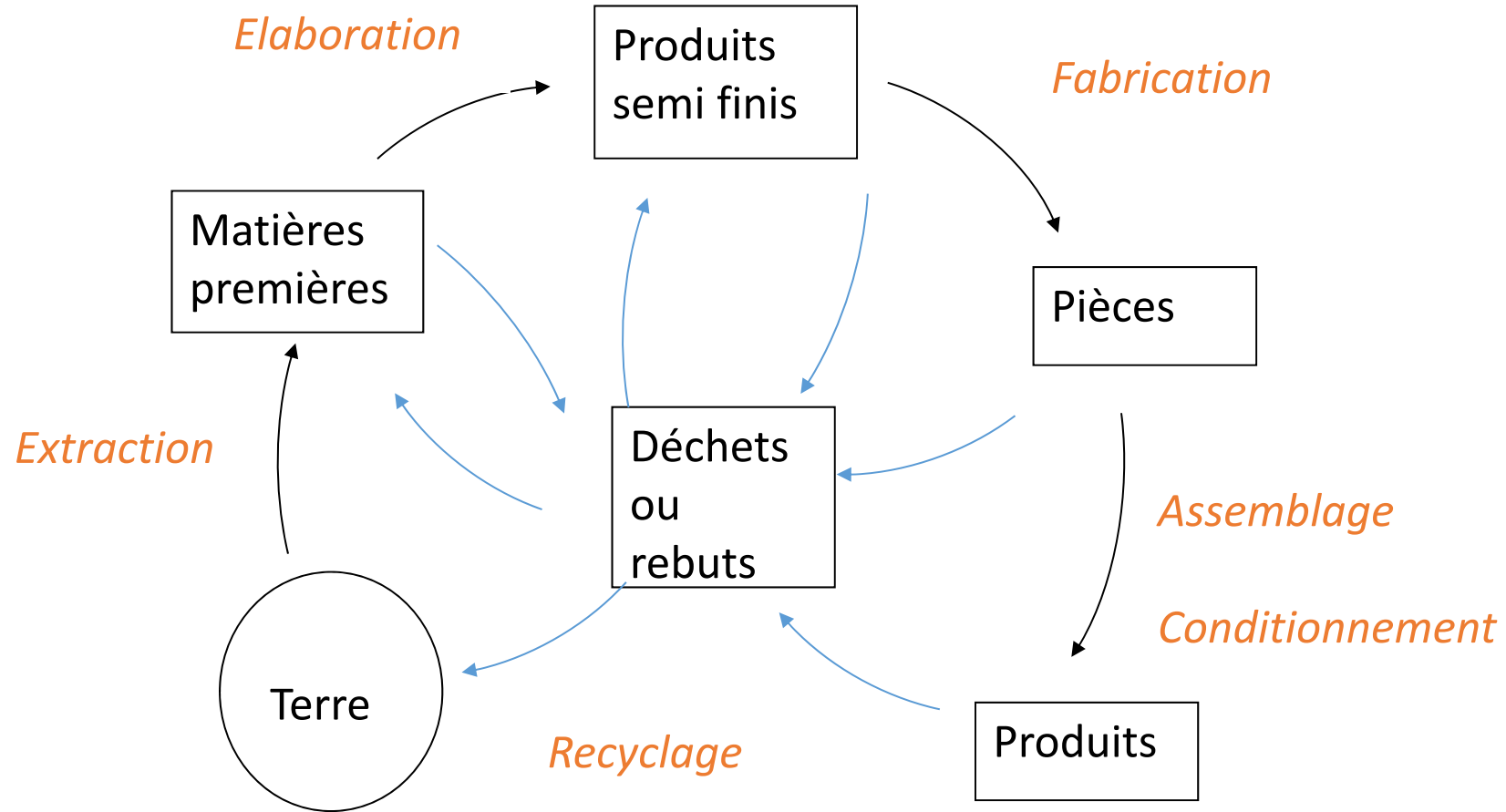
1. Généralités
2. Critères de Choix d'un Matériau
3. Rappel sur la Traction et le Cisaillement
4. Métaux Ferreux: Aciers et Fontes
5. Métaux Non Ferreux
6. Traitements de Surface des Métaux
7. Matières Plastiques
8. Céramiques

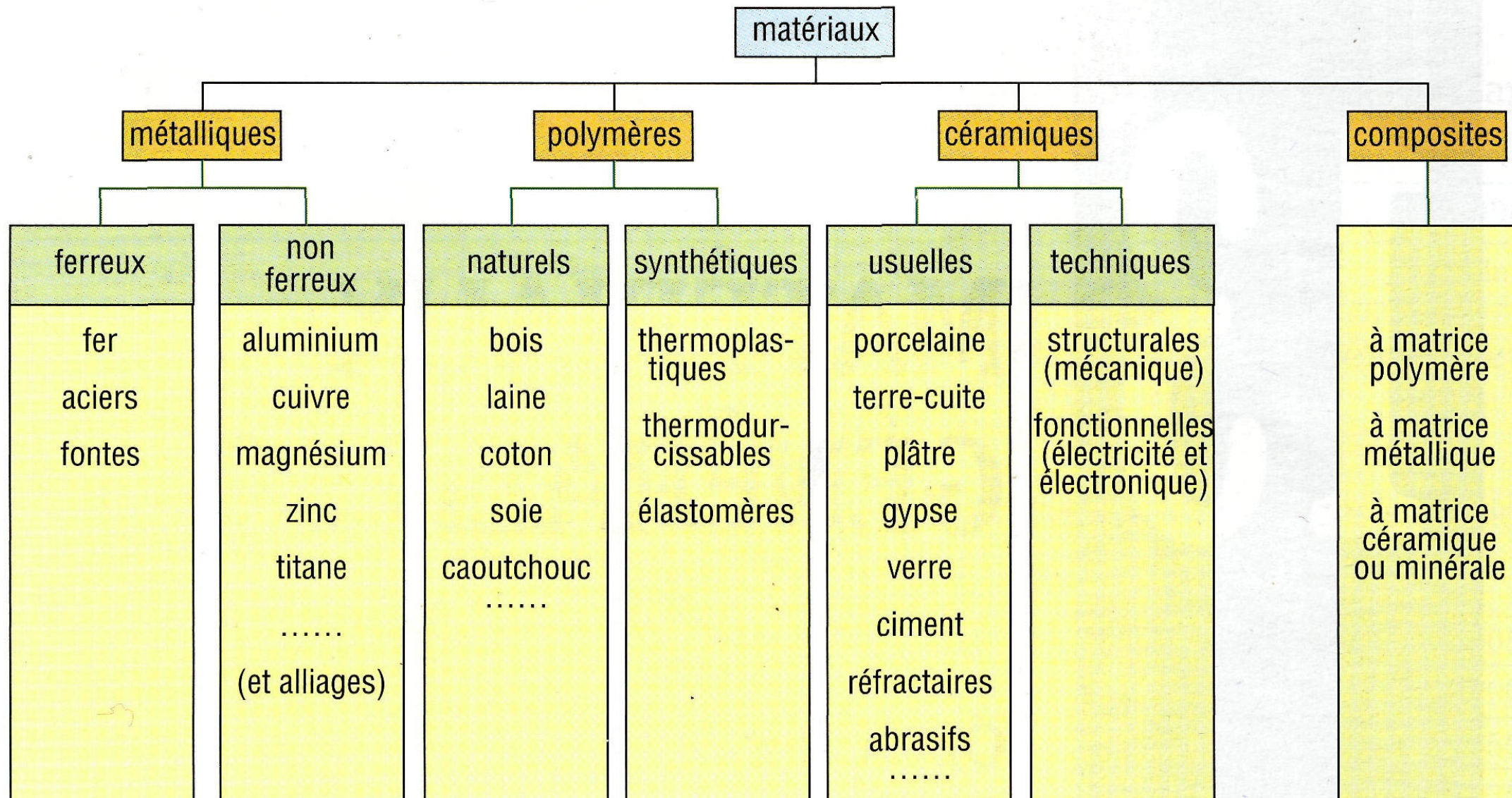


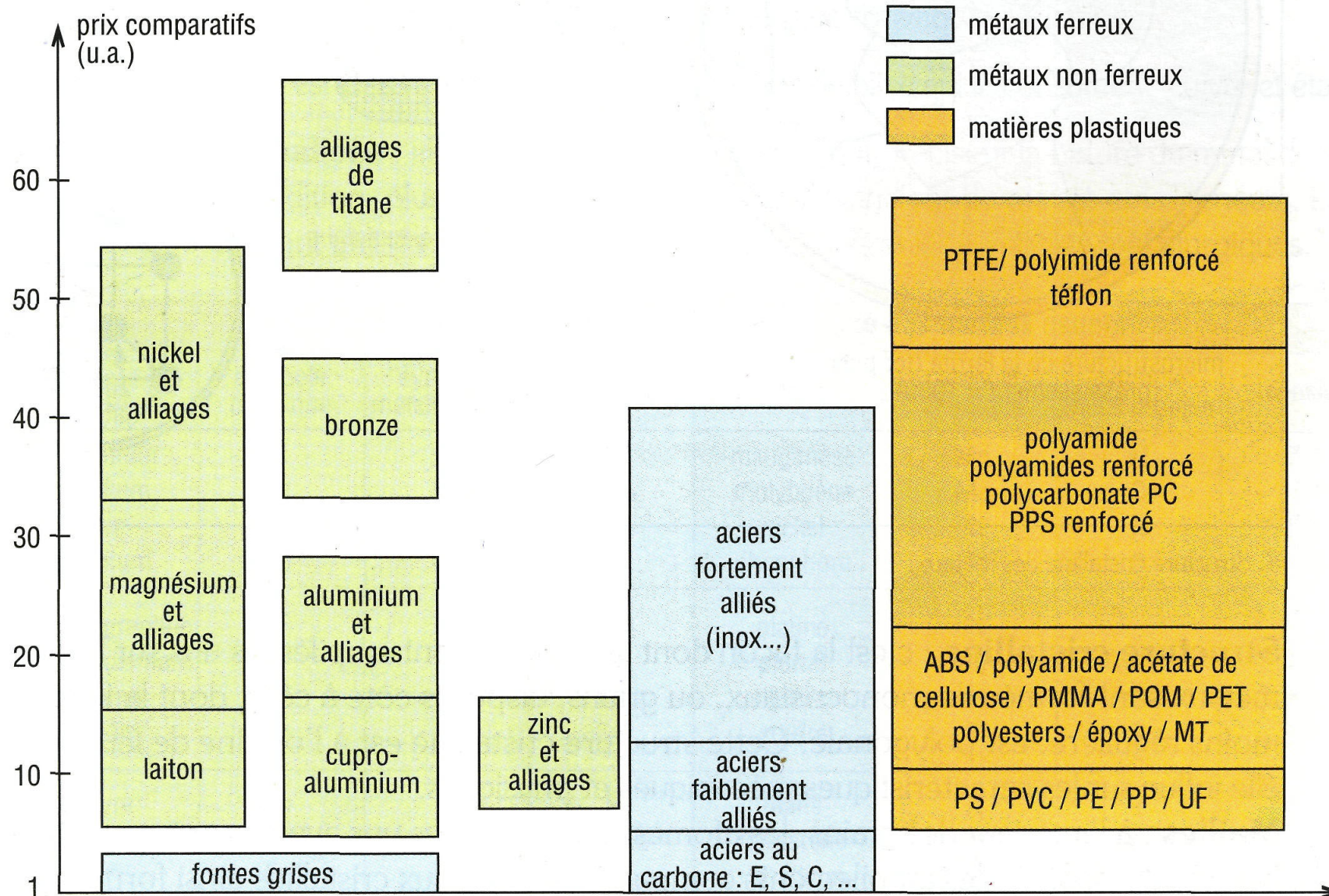
Masse $\sim 6.10^{24}$ kg:

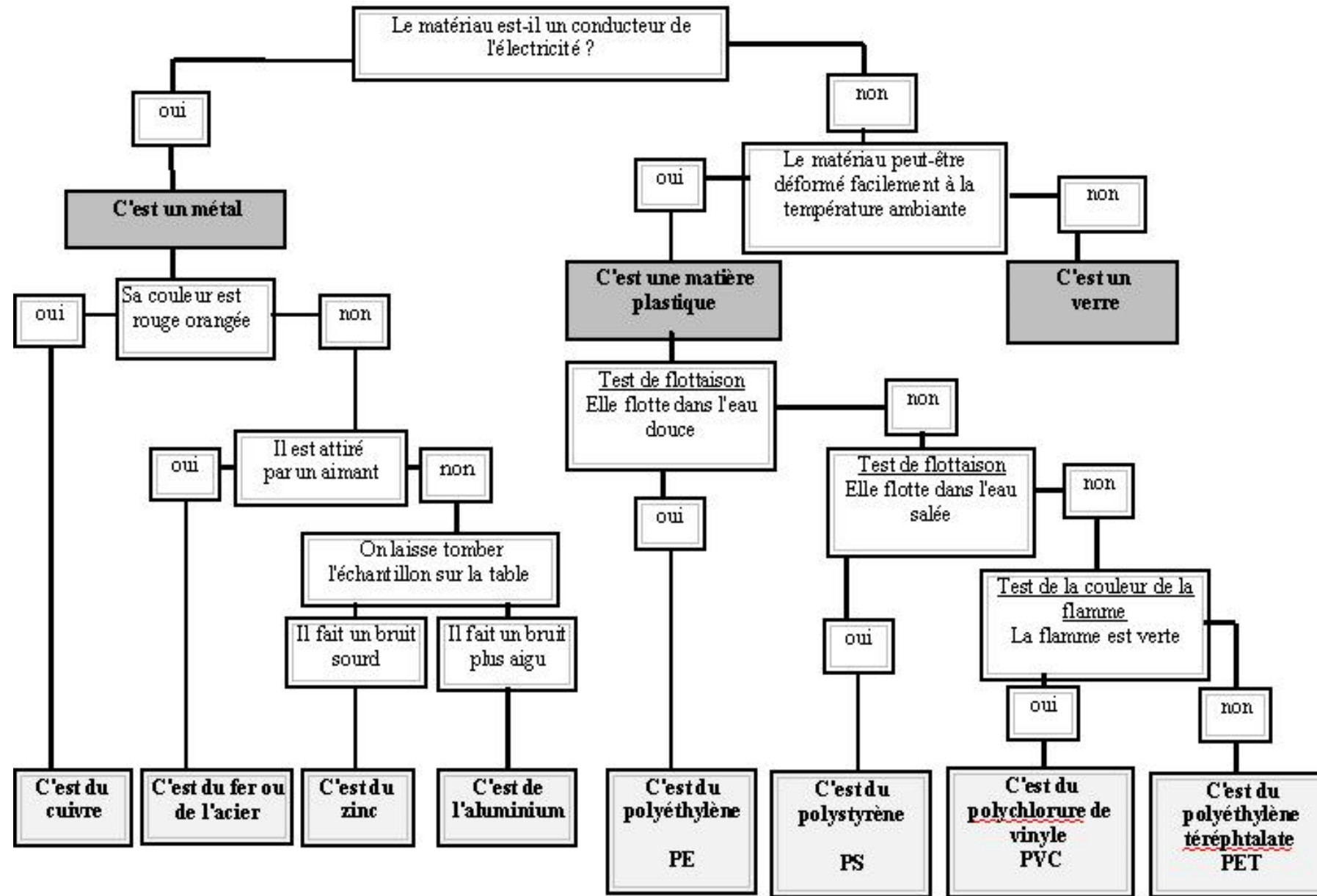
- 32.1% Fer (noyau: 88.8% Fe, 5.8% Ni, 4.5% S, 1% autres)
- 30.1% Oxygène
- 15.1% Silicium
- 13.9% Magnésium
- 2.9% Soufre
- 1.8% Nickel
- 1.5% Calcium
- 1.4% Aluminium
- 1.2% autres éléments

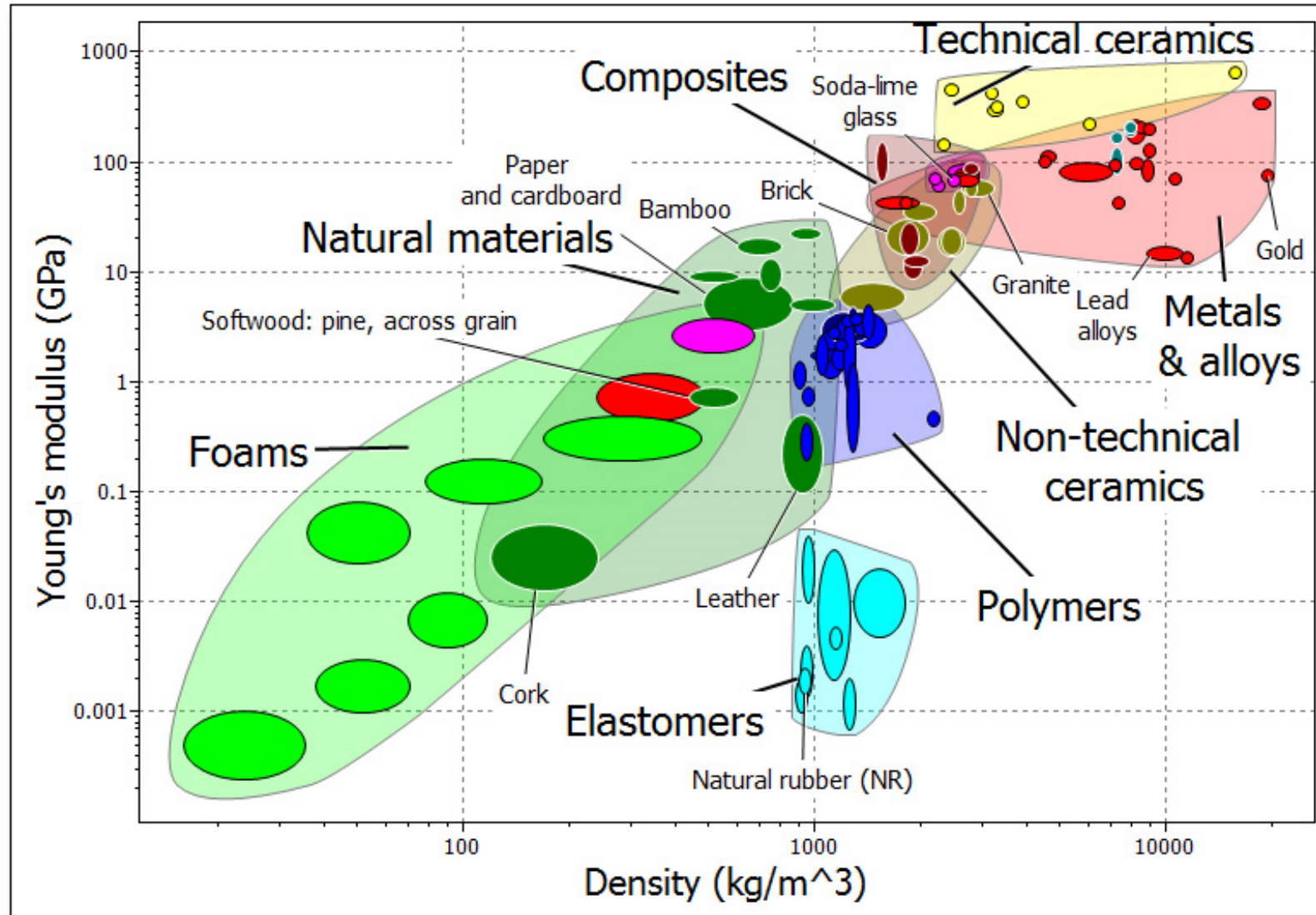
Ecorce continentale Masse : 10^{18} tonnes		Océans Masse : 10^{17} tonnes		Atmosphère Masse : 10^{16} tonnes	
O ₂	47	O ₂	85	N ₂	79
Si	27	H ₂	10	O ₂	19
Al	8	Cl	2	Ar	2
Fe	5	Na	1		
Ca	4				
Na	3				
K	3				
Mg	2				
Ti	0,4				

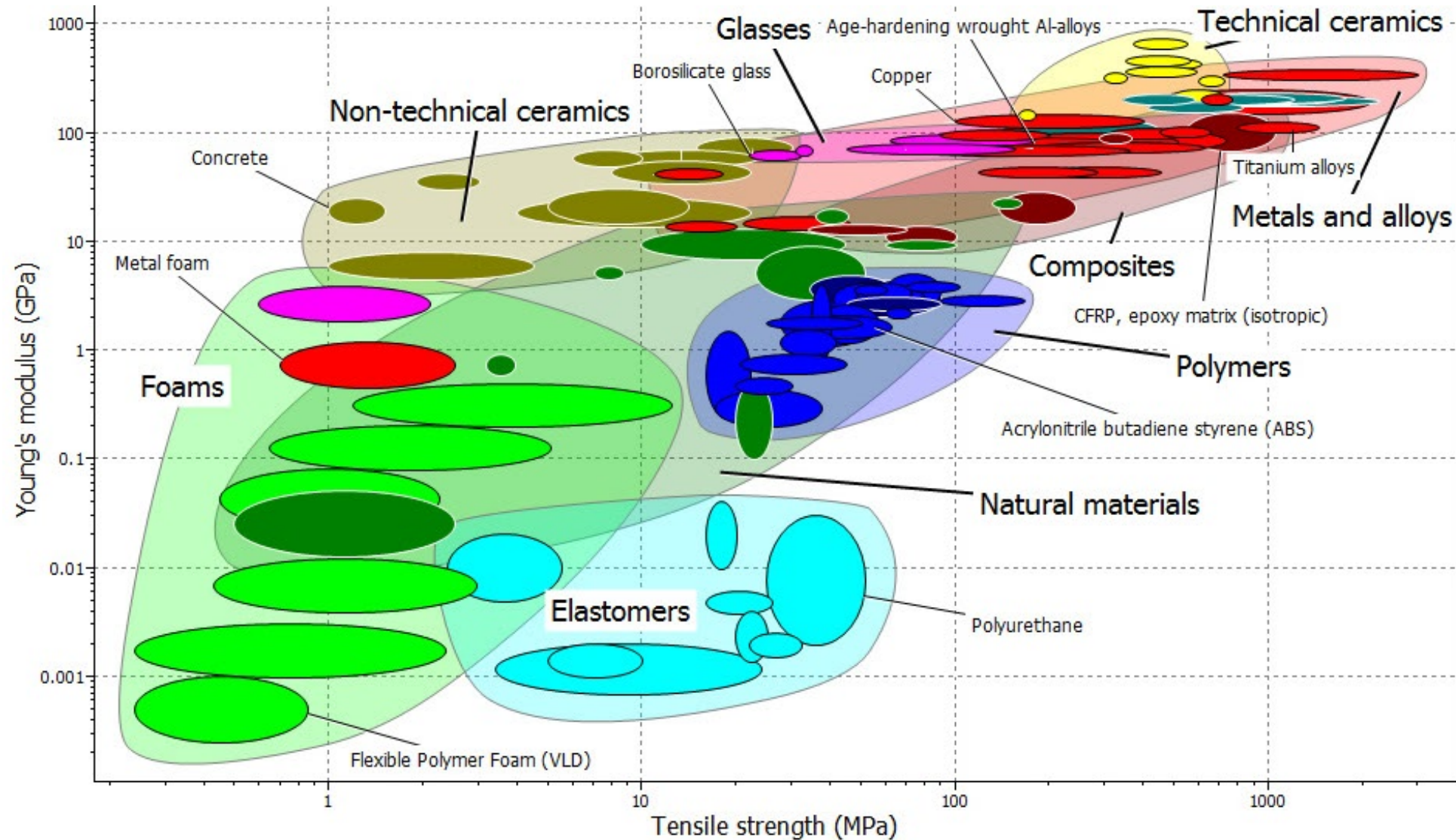


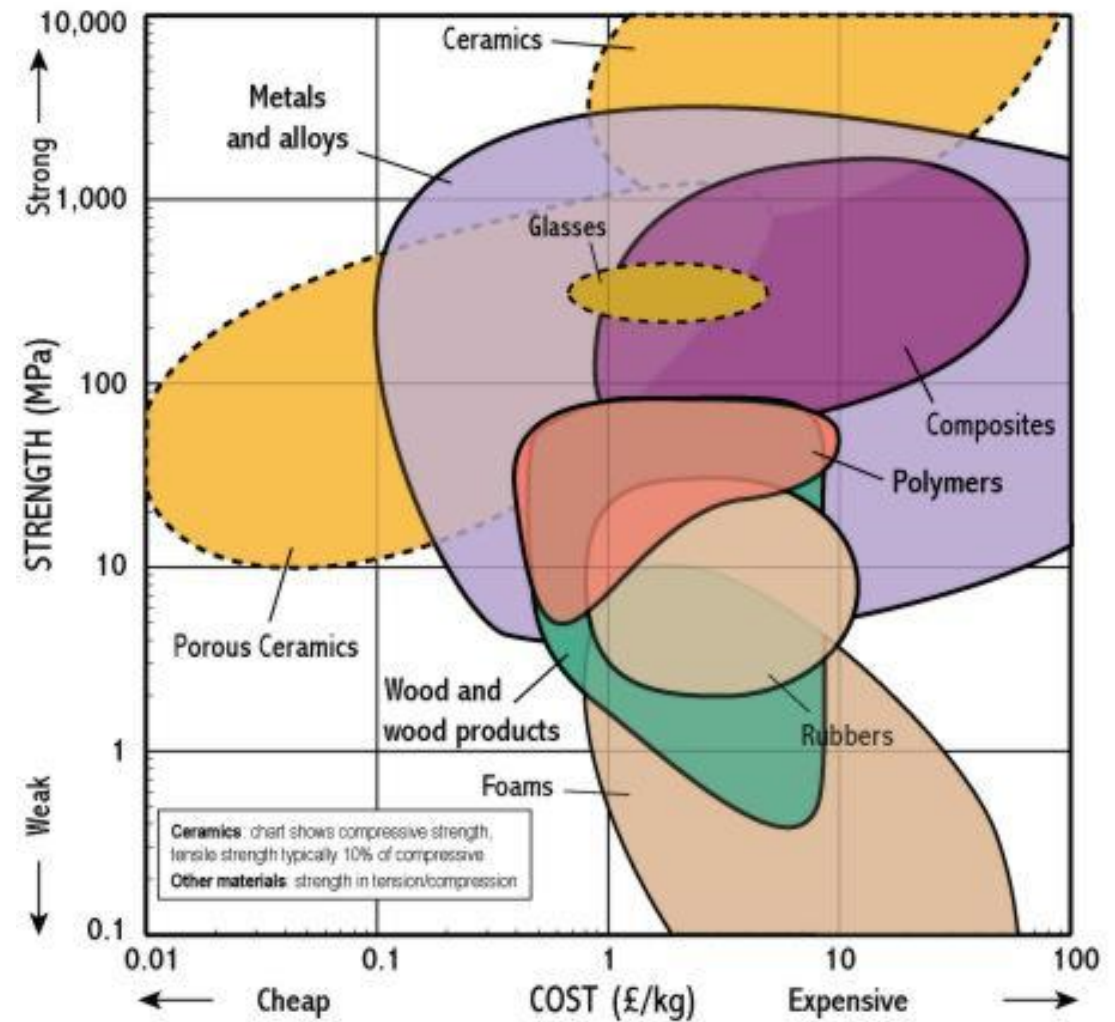
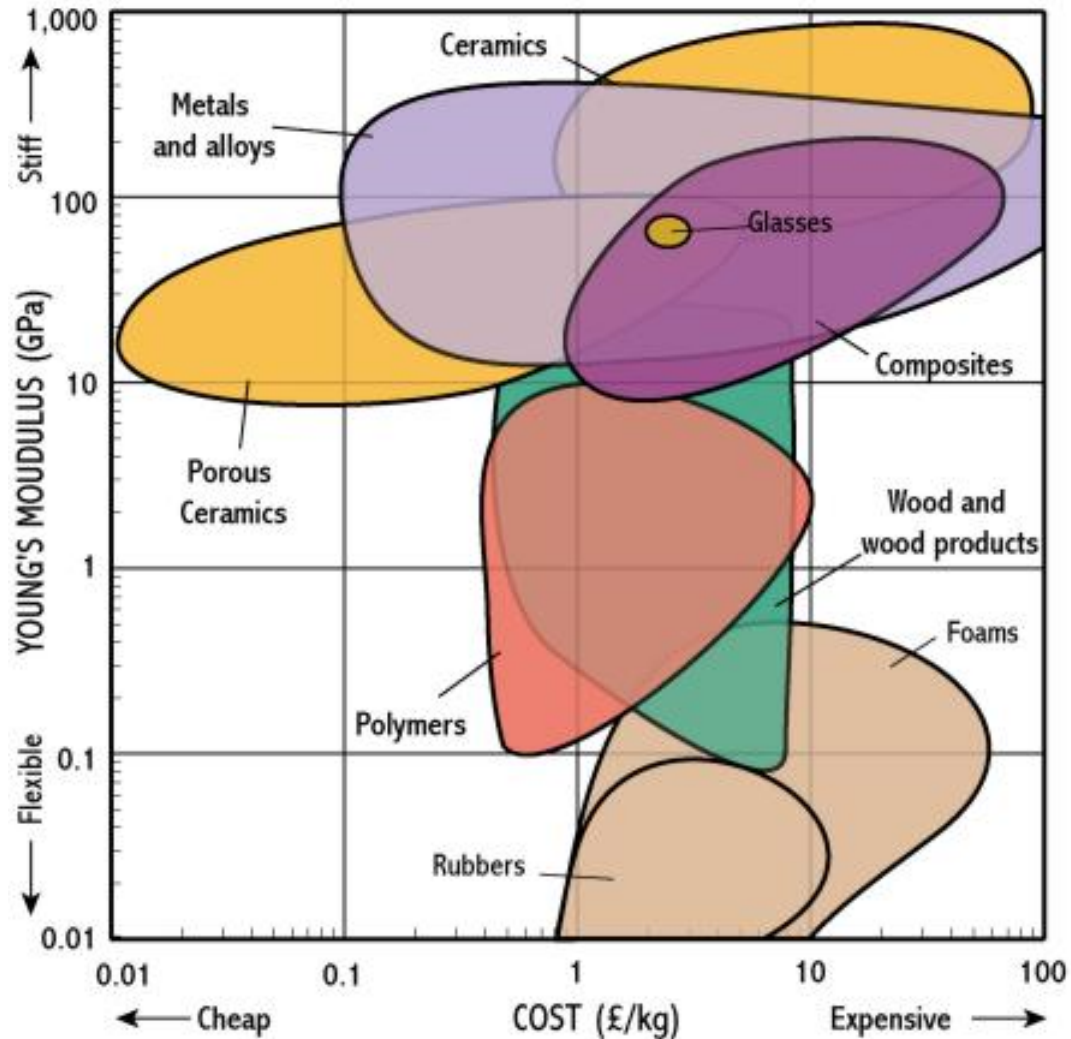


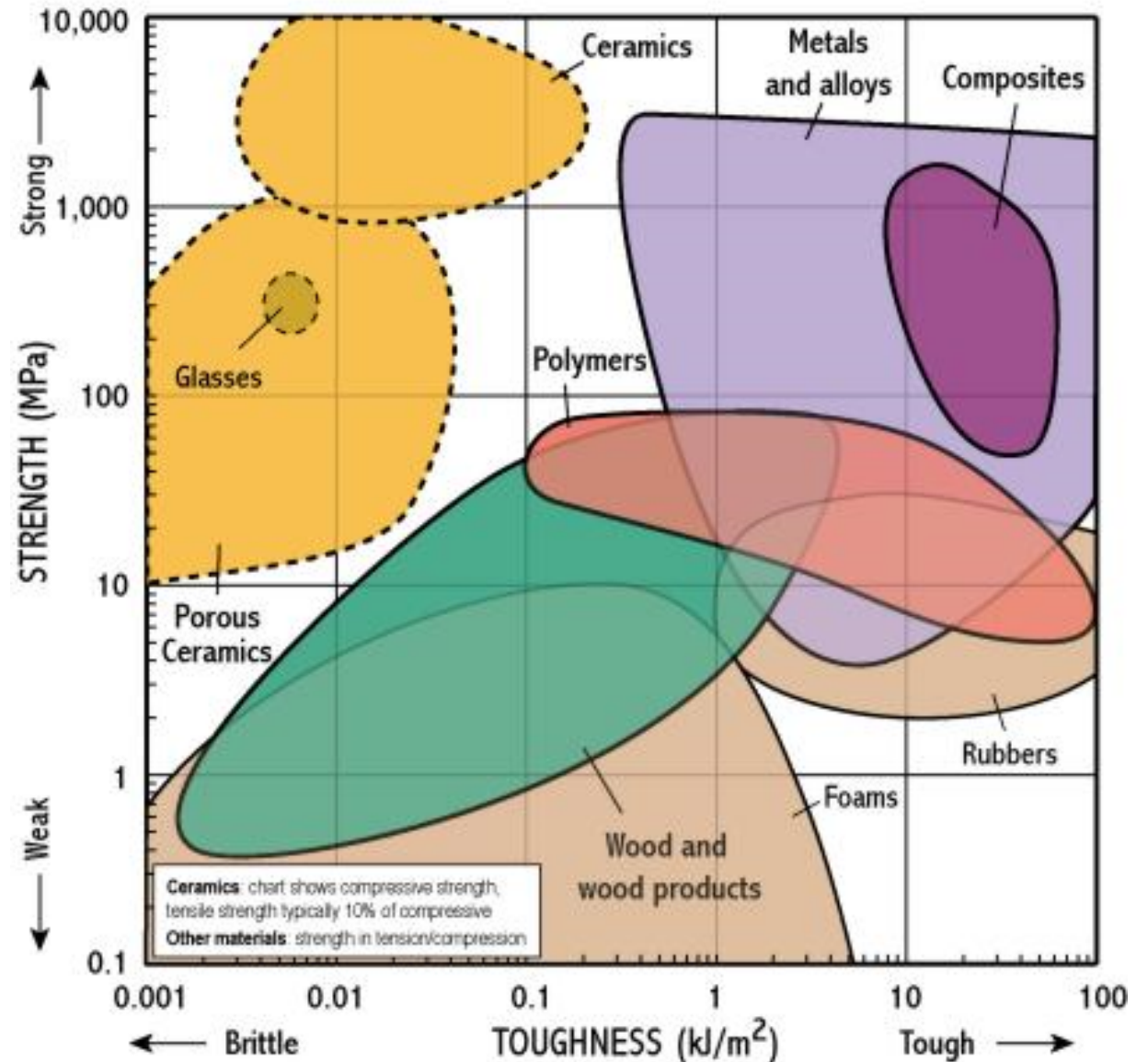
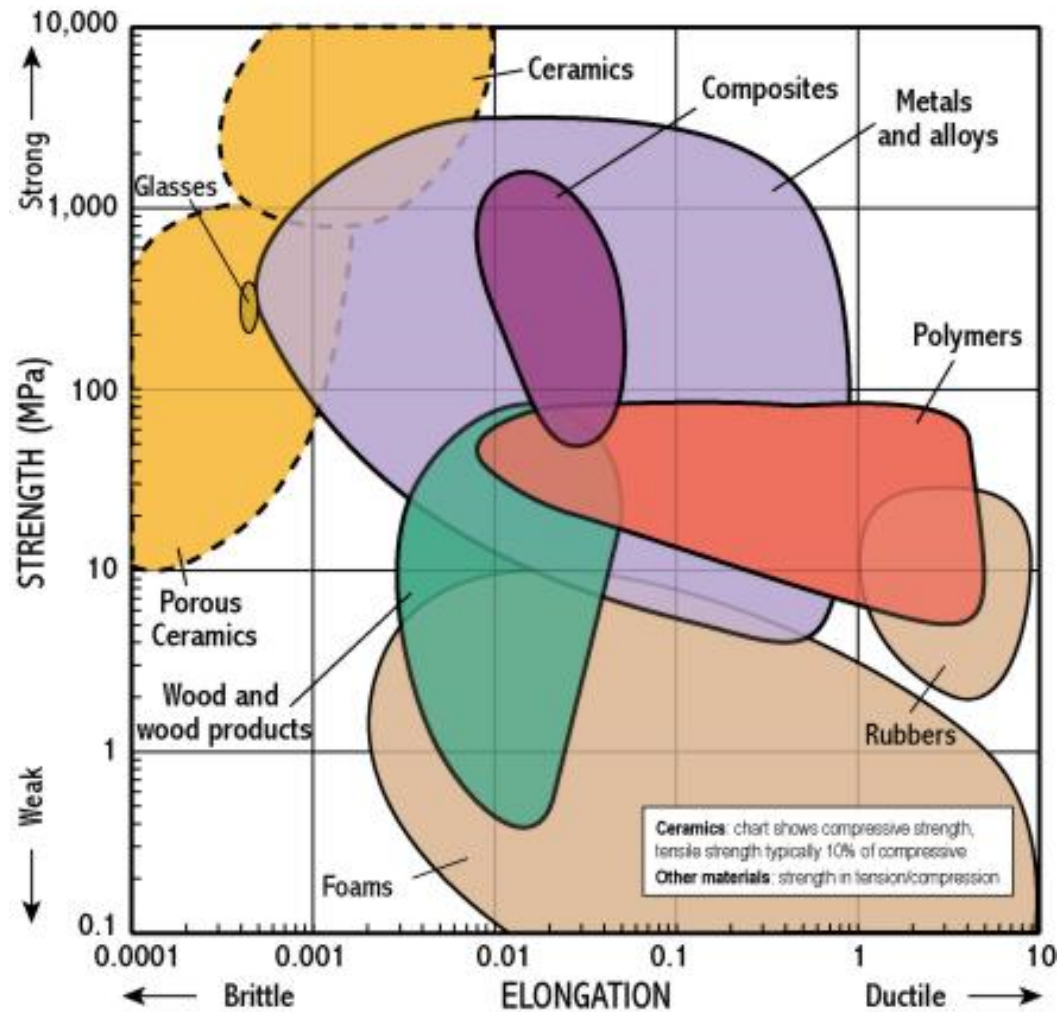












Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels							
corps	symbole chimique	symbole métallurgique	densité	corps	symbole chimique	symbole métallurgique	densité
aluminium	Al	A	2,7	manganèse	Mn	M	7,2
béryllium	Be	Be	1,85	molybdène	Mo	D	10,2
bore	B	B	2,35	nickel	Ni	N	8,9
cadmium	Cd	Cd	8	phosphore	P	P	1,88
carbone graphite	C	—	2,24	platine	Pt	—	21,5
carbone diamant	C	—	3,5	plomb	Pb	Pb	11,34
chrome	Cr	C	7,1	silicium	Si	S	2,4
cobalt	Co	K	8,9	soufre	S	F	2,1
cuivre	Cu	U	9	titane	Ti	T	4,5
étain	Sn	E	6 à 7,5	tungstène	W	W	19,3
fer	Fe	Fe	7,8	vanadium	V	V	5,9
lithium	Li	L	0,534	zinc	Zn	Z	7,15
magnésium	Mg	G	1,75	zirconium	Zr	Zr	6,5

4.1. Généralités - Métaux - Terminologie

- Métaux: 91 des 112 éléments chimiques connus
 - Conduction électrique
 - Ductilité
 - Conduction thermique
 - Réflexion de la lumière

groupe	1	2																	18																							
période	IA	IIA																	VIIA																							
1	<div>hydrogène 1 H 1,00794</div>	<div>nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa) numéro atomique symbole chimique masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]</div>																<div>hélium 2 He 4,002602</div>																								
2	<div>lithium 3 Li 6,941</div>	<div>béryllium 4 Be 9,012182</div>																	<div>bore 5 B 10,811</div>	<div>carbone 6 C 12,0107</div>	<div>azote 7 N 14,00674</div>	<div>oxygène 8 O 15,9994</div>	<div>fluor 9 F 18,9984032</div>	<div>néon 10 Ne 20,1797</div>																		
3	<div>sodium 11 Na 22,98976928</div>	<div>magnésium 12 Mg 24,3050</div>	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIB	8	9	10	11 IB	12 IIB	<div>aluminium 13 Al 26,9815386</div>	<div>silicium 14 Si 28,0855</div>	<div>phosphore 15 P 30,973762</div>	<div>soufre 16 S 32,066</div>	<div>chlore 17 Cl 35,4527</div>	<div>argon 18 Ar 39,948</div>																								
4	<div>potassium 19 K 39,0983</div>	<div>calcium 20 Ca 40,078</div>	<div>scandium 21 Sc 44,955912</div>	<div>titane 22 Ti 47,867</div>	<div>vanadium 23 V 50,9415</div>	<div>chrome 24 Cr 51,9961</div>	<div>manganèse 25 Mn 54,938045</div>	<div>fer 26 Fe 55,845</div>	<div>cobalt 27 Co 58,933195</div>	<div>nickel 28 Ni 58,6934</div>	<div>cuivre 29 Cu 63,546</div>	<div>zinc 30 Zn 65,39</div>	<div>galium 31 Ga 69,723</div>	<div>germanium 32 Ge 72,61</div>	<div>arsenic 33 As 74,92160</div>	<div>sélénium 34 Se 78,96</div>	<div>brome 35 Br 79,904</div>	<div>krypton 36 Kr 83,80</div>																								
5	<div>rubidium 37 Rb 85,4678</div>	<div>strontium 38 Sr 87,62</div>	<div>yttrium 39 Y 88,90585</div>	<div>zirconium 40 Zr 91,224</div>	<div>niobium 41 Nb 92,90638</div>	<div>molybdène 42 Mo 95,94</div>	<div>technétium 43 Tc 97,9072</div>	<div>ruthénium 44 Ru 101,07</div>	<div>rhodium 45 Rh 102,90550</div>	<div>palladium 46 Pd 106,42</div>	<div>argent 47 Ag 107,8682</div>	<div>cadmium 48 Cd 112,411</div>	<div>indium 49 In 114,818</div>	<div>étain 50 Sn 118,710</div>	<div>antimoine 51 Sb 121,760</div>	<div>tellure 52 Te 127,60</div>	<div>iode 53 I 126,90447</div>	<div>xénon 54 Xe 131,29</div>																								
6	<div>césium 55 Cs 132,9054519</div>	<div>barium 56 Ba 137,327</div>	lanthanides 57–71		<div>hafnium 72 Hf 178,49</div>	<div>tantale 73 Ta 180,94788</div>	<div>tungstène 74 W 183,84</div>	<div>rénium 75 Re 186,207</div>	<div>osmium 76 Os 190,23</div>	<div>iridium 77 Ir 192,217</div>	<div>or 79 Au 196,966569</div>	<div>mercure 80 Hg 200,59</div>	<div>thallium 81 Tl 204,3833</div>	<div>plomb 82 Pb 207,2</div>	<div>bismuth 83 Bi 208,98040</div>	<div>polonium 84 Po [208,9824]</div>	<div>astate 85 At [209,9871]</div>	<div>radon 86 Rn [222,0176]</div>																								
7	<div>francium 87 Fr [223,0197]</div>	<div>radium 88 Ra [226,0254]</div>	actinides 89–103		<div>rutherfordium 104 Rf [261,1125]</div>	<div>dubnium 105 Db [262,1144]</div>	<div>seaborgium 106 Sg [266,1219]</div>	<div>bohrium 107 Bh [264,1247]</div>	<div>hassium 108 Hs [269,1341]</div>	<div>meitnérium 109 Mt [268,1388]</div>	<div>darmstadtium 110 Ds [272,1463]</div>	<div>roentgenium 111 Rg [272,1535]</div>	<div>copernicium 112 Cn [277]</div>	<div>ununtrium 113 Uut [284]</div>	<div>flérovium 114 Fl [289]</div>	<div>ununpentium 115 Uup [288]</div>	<div>livermorium 116 Lv [292]</div>	<div>ununseptium 117 Uus [292]</div>	<div>ununoctium 118 Uuo [294]</div>																							
					<div>lanthane 57 La 138,90547</div>	<div>cérium 58 Ce 140,116</div>	<div>praseodyme 59 Pr 140,90765</div>	<div>néodyme 60 Nd 144,242</div>	<div>prométhium 61 Pm [144,9127]</div>	<div>samarium 62 Sm 150,36</div>	<div>europium 63 Eu 151,964</div>	<div>gadolinium 64 Gd 157,25</div>	<div>terbium 65 Tb 158,92535</div>	<div>dysprosium 66 Dy 162,500</div>	<div>holmium 67 Ho 164,93032</div>	<div>erbium 68 Er 167,259</div>	<div>thulium 69 Tm 168,93421</div>	<div>ytterbium 70 Yb 173,04</div>	<div>lutécium 71 Lu 174,967</div>																							
					<div>actinium 89 Ac [227,0277]</div>	<div>thorium 90 Th 232,03806</div>	<div>protactinium 91 Pa 231,03588</div>	<div>uranium 92 U 238,02891</div>	<div>neptunium 93 Np [237,0482]</div>	<div>plutonium 94 Pu [244,0642]</div>	<div>américium 95 Am [243,0614]</div>	<div>curium 96 Cm [247,0703]</div>	<div>berkélium 97 Bk [247,0703]</div>	<div>californium 98 Cf [251,0796]</div>	<div>einsteinium 99 Es [252,0830]</div>	<div>fermium 100 Fm [257,0951]</div>	<div>mendélévium 101 Md [258,0984]</div>	<div>nobelium 102 No [259,1011]</div>	<div>lawrencium 103 Lr [262,110]</div>																							
					<div>métaux alcalins</div>														<div>alcalino-terreux</div>		<div>lanthanides</div>		<div>actinides</div>		<div>métaux de transition</div>		<div>métaux pauvres</div>		<div>métalloïdes</div>		<div>non-métaux</div>		<div>halogènes</div>		<div>gaz nobles</div>		<div>primordial</div>		<div>déintégration d'autres éléments</div>		<div>synthétique</div>	

Matériau ductile: matériau se déformant plastiquement sans rompre

Matériau fragile: matériau cassant dans le domaine élastique sous faible énergie

Matériau tenace: matériau cassant dans le domaine élastique sous énergie importante

Alliage: combinaison d'un élément métallique avec d'autres éléments chimiques

Acier: Fer + Carbone (entre 0.02% et 2% en masse)

Fonte: Fer + Carbone (entre 2.1% et 6.67% en masse)

Acier Inoxydable: Acier + Chrome (10.5% minimum, moins de 1.2% de Carbone en masse)

Bronze: 60% Cuivre + Etain (Aluminium, Plomb, Béryllium, Manganèse, Tungstène,
Silicium, Phosphore) - Pas de Zinc

Laiton: Cuivre + Zinc (Plomb, Etain, Nickel, Chrome, Magnésium)

Critères liés à la Fonction du Composant:

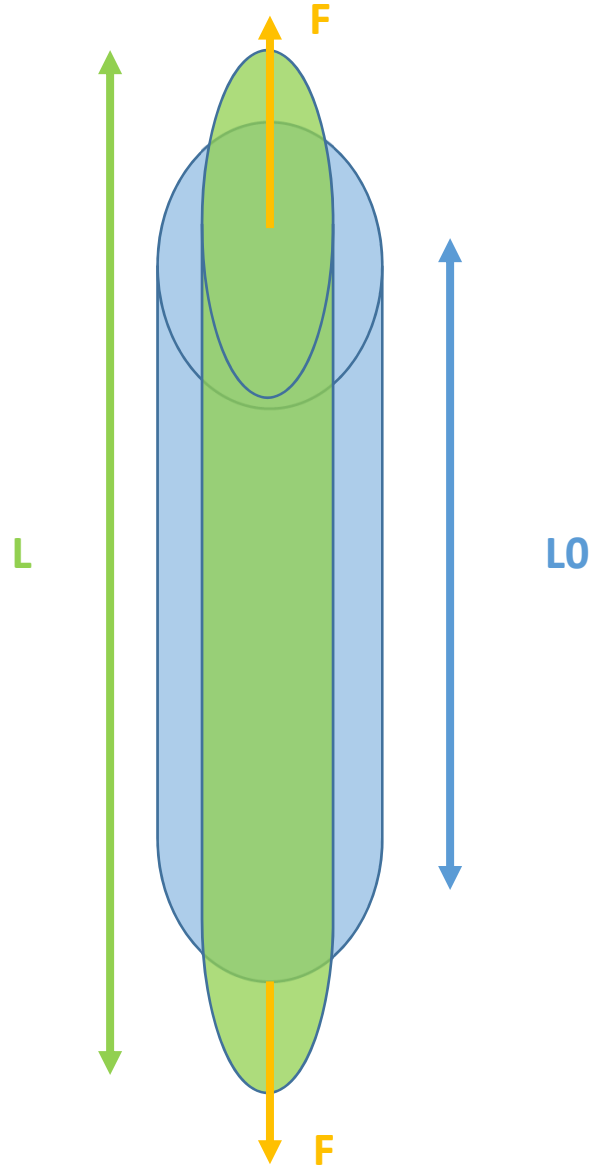
- Masse, inertie
- Volume disponible
- Raideur (lié au module d'élasticité E)
- Résistance mécanique (limite élastique, limite à la rupture)
- Dureté, résistance à la rayure
- Frottement, diffusion, résistance à l'usure
- Conduction thermique, électrique, magnétique
- Résistance à l'environnement (eau, acide, hydrocarbure, lubrifiant, rayonnement, gaz, ...)
- Considérations environnementales (pollution, interactions, ...)
- Aspect (état de surface, brillance, vieillissement)
- Durée de vie (d'une utilisation à plusieurs millions)
- Normes (alimentaires, médicales, résistance à la combustion, forme de la cassure, environnement, sécurité, ...)

Critères liés à la Production du Composant:

- Forme de la pièce
- Tolérances dimensionnelles (forme, position)
- Etat de surface
- Possibilité de liaison et d'assemblage (collage, soudage, ...)
- Série (nombre d'éléments produits, usure des machines, ...)
- Approvisionnement (sécurité, fournisseur, ...)
- Prix (1Fr/kg pour certains aciers à >10000Fr/kg pour métaux précieux)

Coût total: inclure outillage, fabrication, assemblage, réglage, maintenance, recyclage

Coût du Cycle de Vie du Produit



$$\sigma = \frac{F}{S}$$

σ = Contrainte (MPa=N/mm²)

F = Charge (N)

S = Surface de charge (mm²)

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

E = Module d'élasticité longitudinal
ou Module d'Young (MPa=N/mm²)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

ε = Déformation (adimensionnel)

L0 = Longueur sans charge (mm)

L = Longueur sous charge (mm)

$\Delta L = L - L_0$ = Allongement (mm)



Matériau ductile
(alliage d'aluminium)

Matériau fragile
(fonte)



Acier:

http://www.youtube.com/watch?v=JGI0Cle0T14&list=PLFz3BEEdNbtV8ZM2IYAE4pMUfqvNc_fRa

http://www.youtube.com/watch?v=P6ZoSGb0lcg&list=PLFz3BEEdNbtV8ZM2IYAE4pMUfqvNc_fRa

<http://www.youtube.com/watch?v=5Kke0w7NolU>

Plastique:

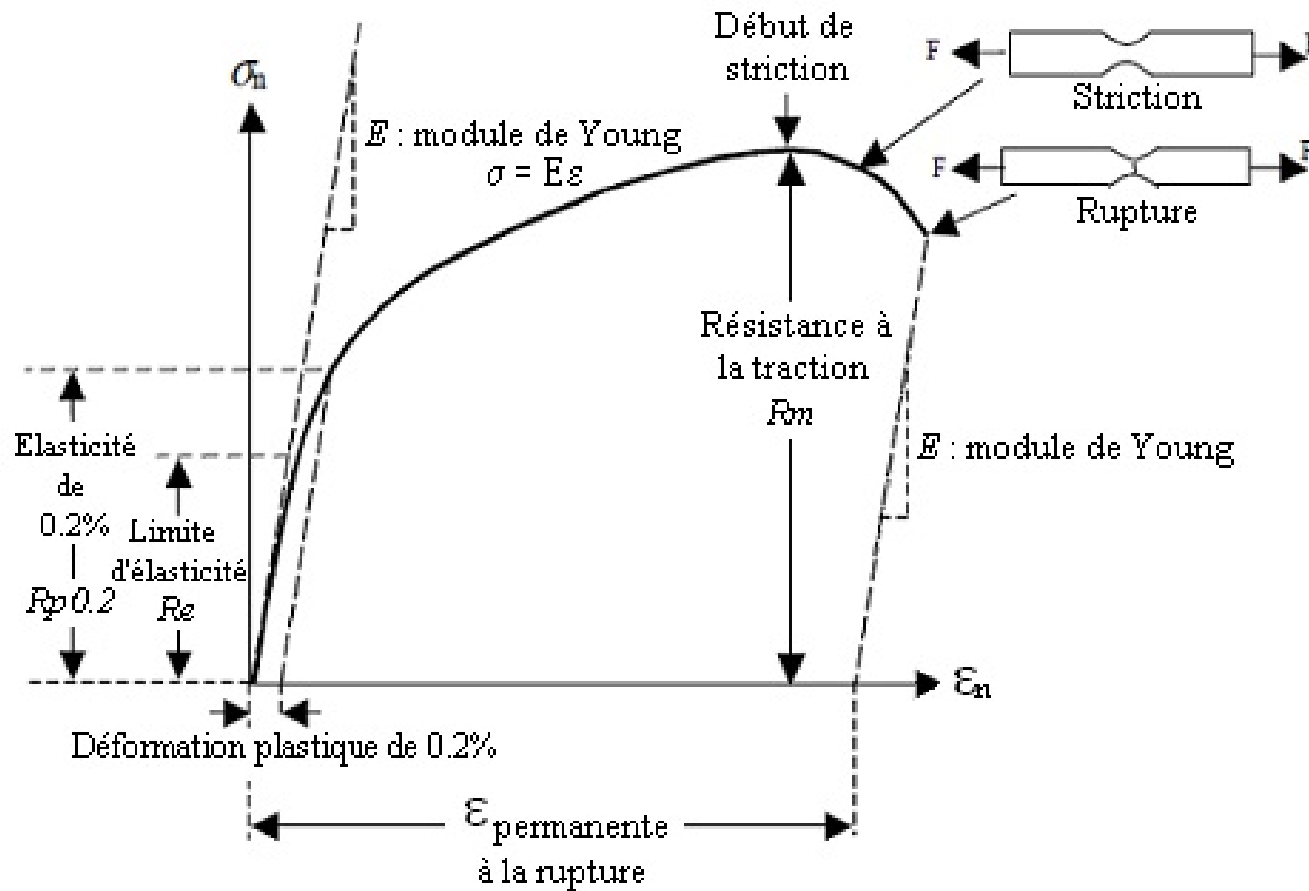
<http://www.youtube.com/watch?v=4juB5NepHHU&list=PL31FCD145417127EC>

<http://www.youtube.com/watch?v=CkSsRLUeRQI>

Composite:

<http://www.youtube.com/watch?v=j6sOz1OYYqA&list=PLD08515BBDDFE091E&index=13>

<http://www.youtube.com/watch?v=Ij3lg7jv6pg&list=PLD08515BBDDFE091E&index=12>



σ = Contrainte (MPa=N/mm²)

E = Module d'élasticité longitudinal
ou Module d'Young (MPa=N/mm²)

ϵ = Déformation (adimensionnel)

F = Charge (N)

S = Surface de charge (mm²)

$\Delta L = L - L_0$ = Allongement (mm)

R_m ou R_r = Résistance à la rupture (MPa)

R_e = Limite élastique (MPa)

$R_{p0.2}$ ou $R_{e0.2}$ = Limite élastique à
déformation plastique de 0.2% (MPa)

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \times \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

σ = Contrainte (MPa=N/mm²)

E = Module d'élasticité longitudinal
ou Module d'Young (MPa=N/mm²)

ε = Déformation (adimensionnel)

F = Charge (N)

S = Surface de charge (mm²)

$\Delta L = L - L_0$ = Allongement (mm)

$$\tau = \frac{F}{A} = G \times \theta$$

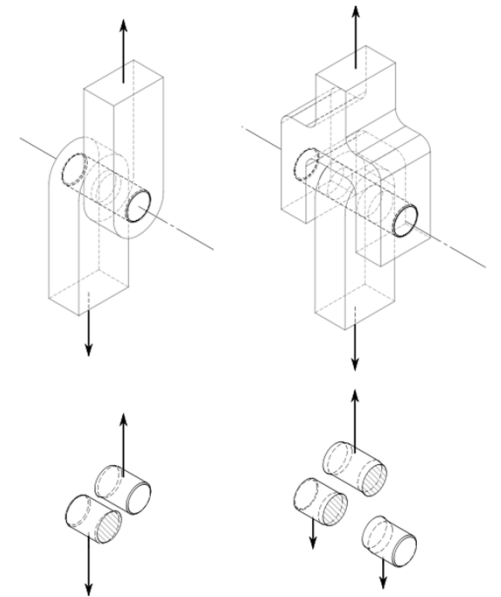
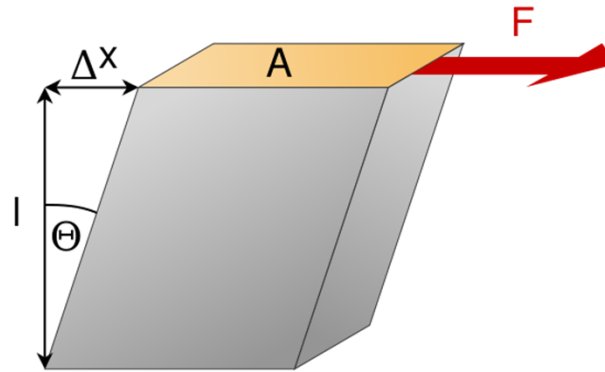
$$\theta = \frac{\Delta x}{l}$$

G = Module d'élasticité transversal ou de cisaillement (MPa=N/mm²)

θ = Variation de l'angle droit (rad)

F = Charge (N)

A = Surface de charge (mm²)



$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

E = Module d'élasticité longitudinal

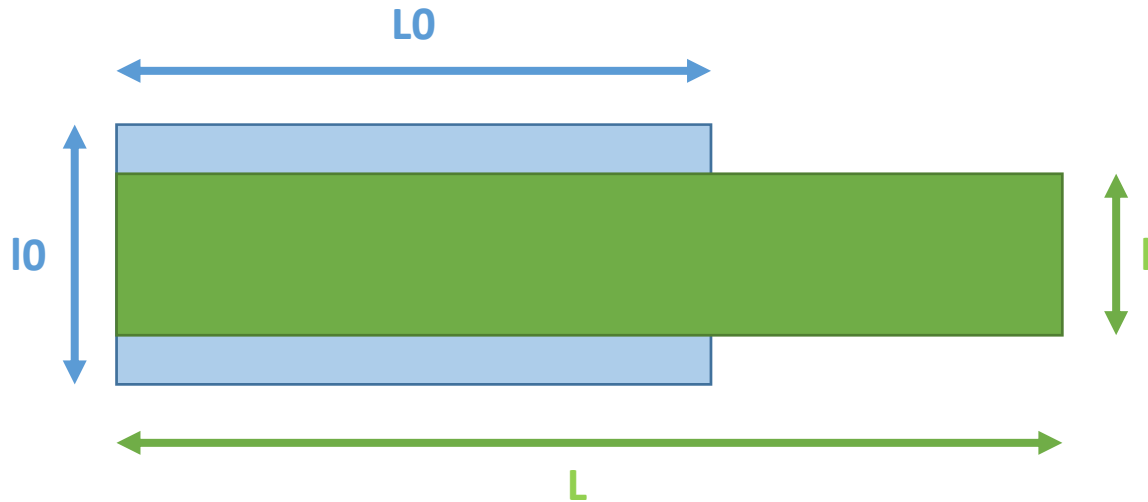
ou Module d'Young (MPa=N/mm²)

G = Module d'élasticité transversale

ou de cisaillement, de glissement (MPa=N/mm²)

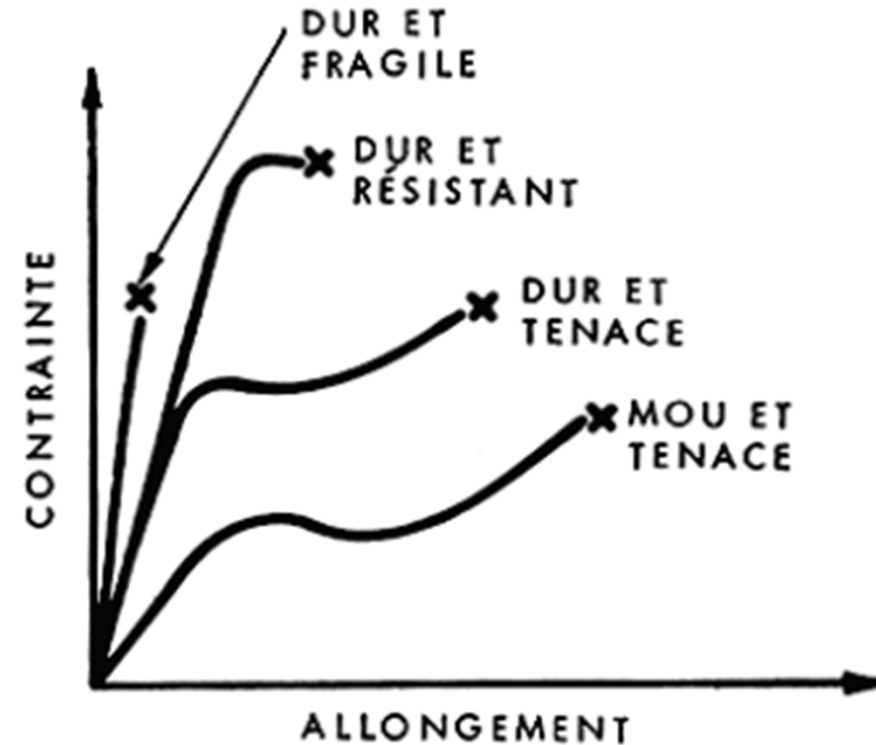
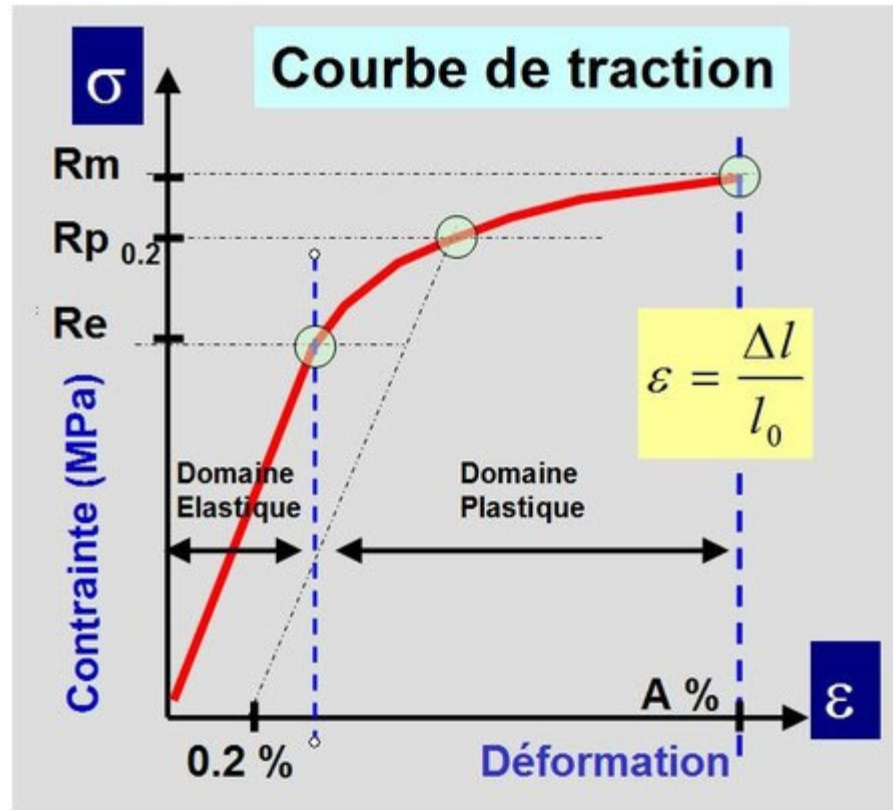
ν = Coefficient de Poisson (adimensionnel)

=0.3-0.31 pour acier inox



$$\nu = - \frac{(l - l_0)/l_0}{(L - L_0)/L_0}$$

$$= - \frac{\text{Contraction transversale}}{\text{Allongement axial}}$$



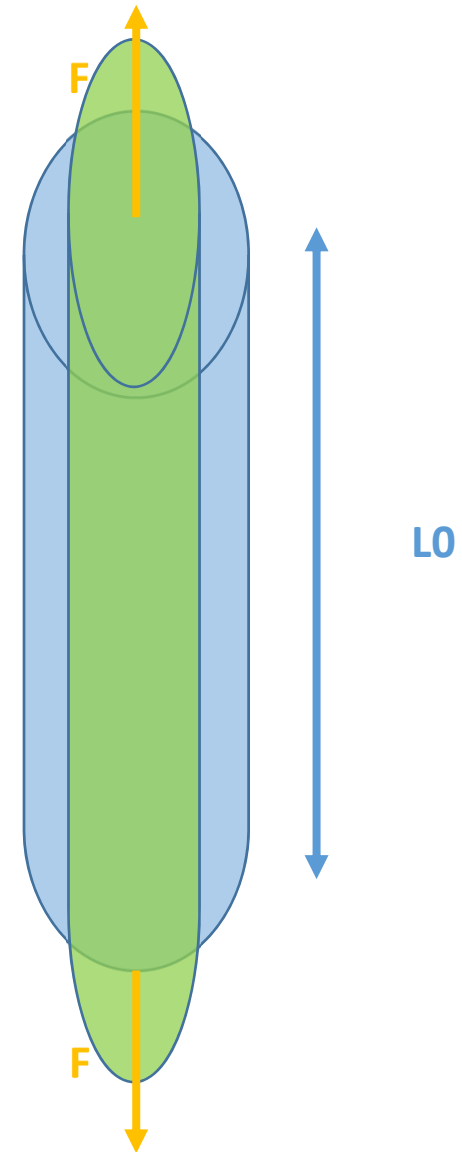
Similitude avec le ressort:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \times \varepsilon$$

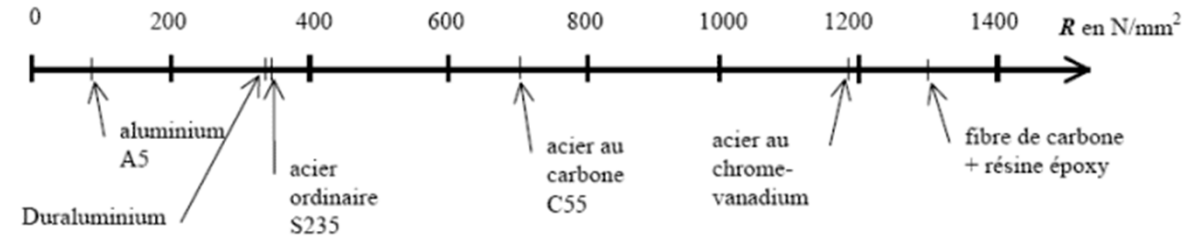
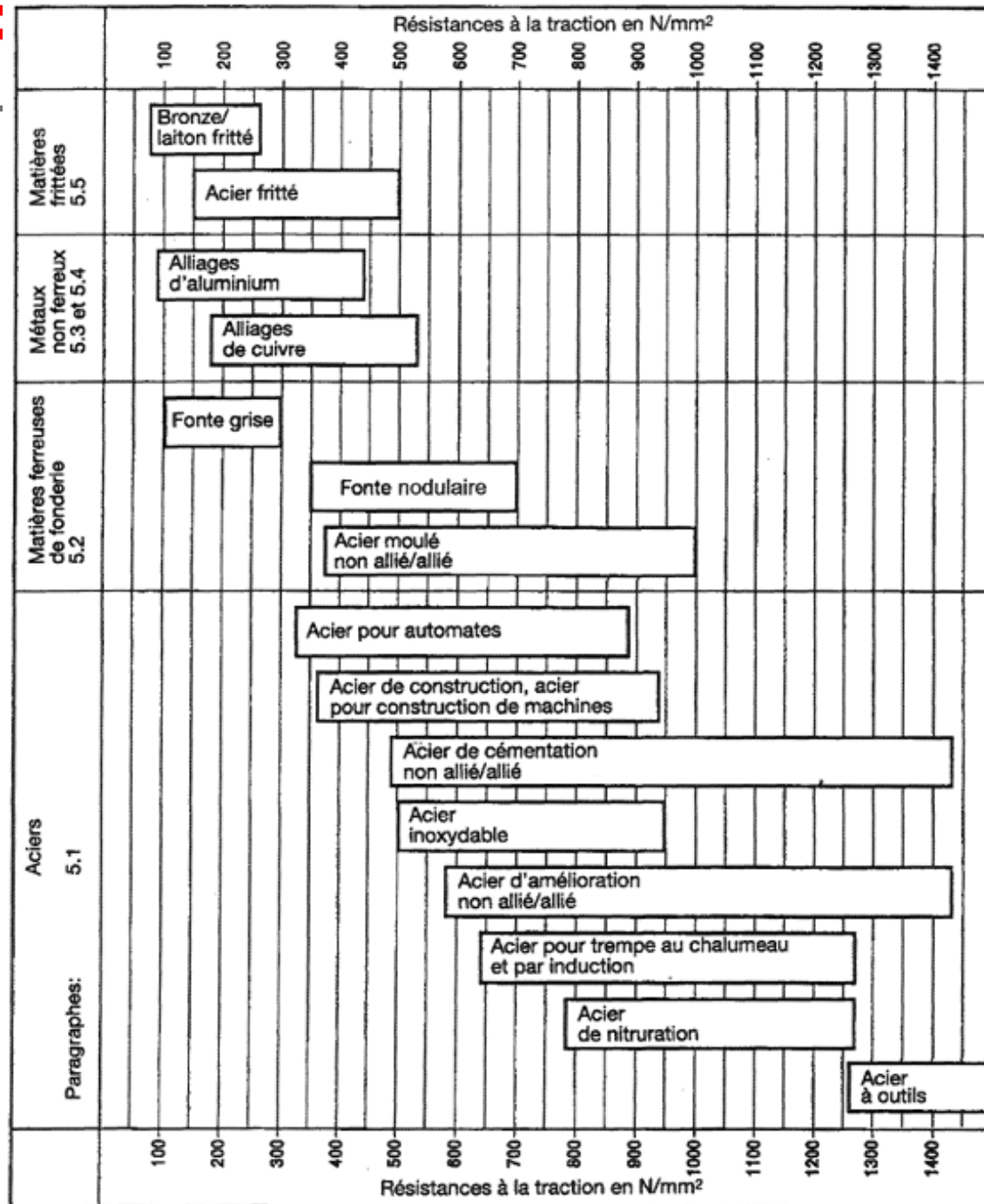
$$F = E \times \varepsilon \times S = E \frac{\Delta L}{L_0} S = K \Delta L$$

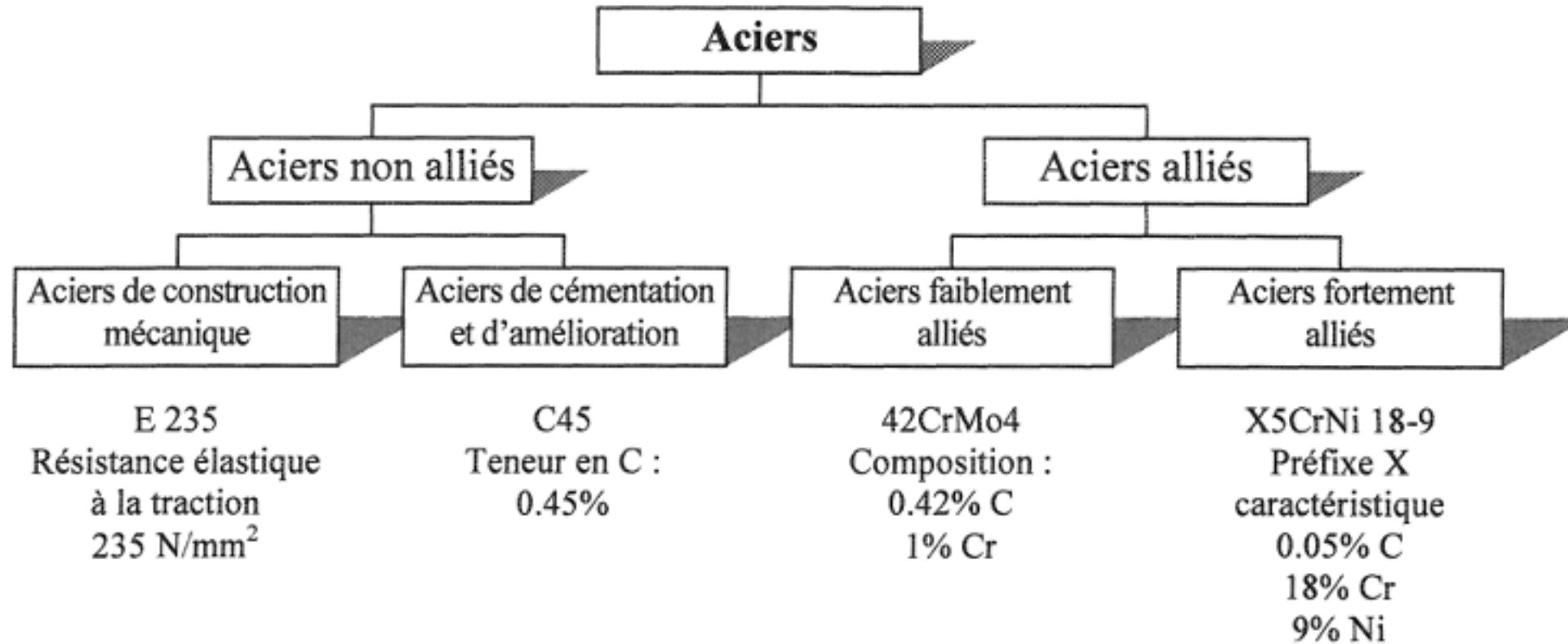
$$K = \frac{ES}{L_0}$$

Raideur d'un ressort idéal



4.3. Résistance à la Traction





E : Ac. de construction mécanique

S : Ac. de construction

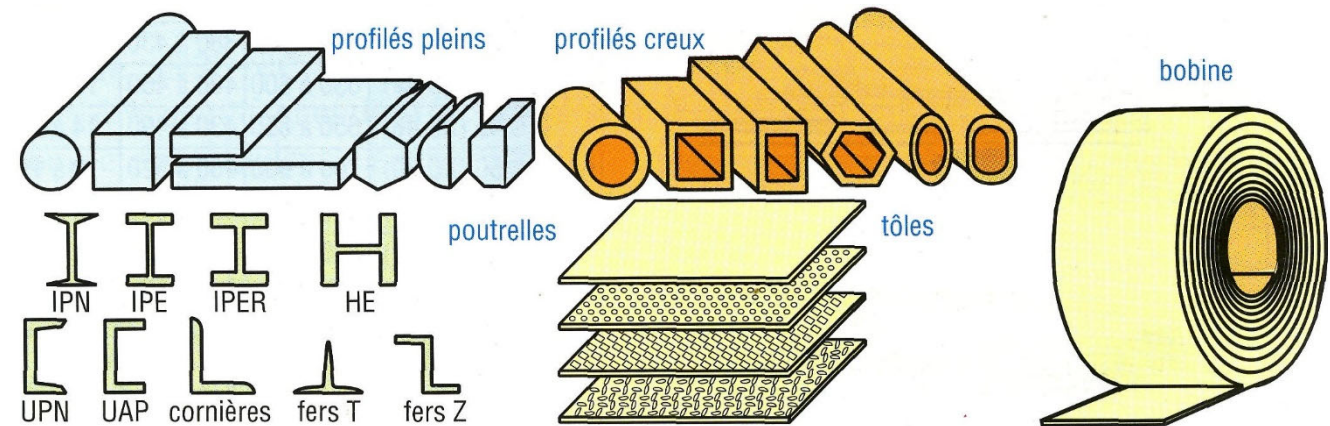
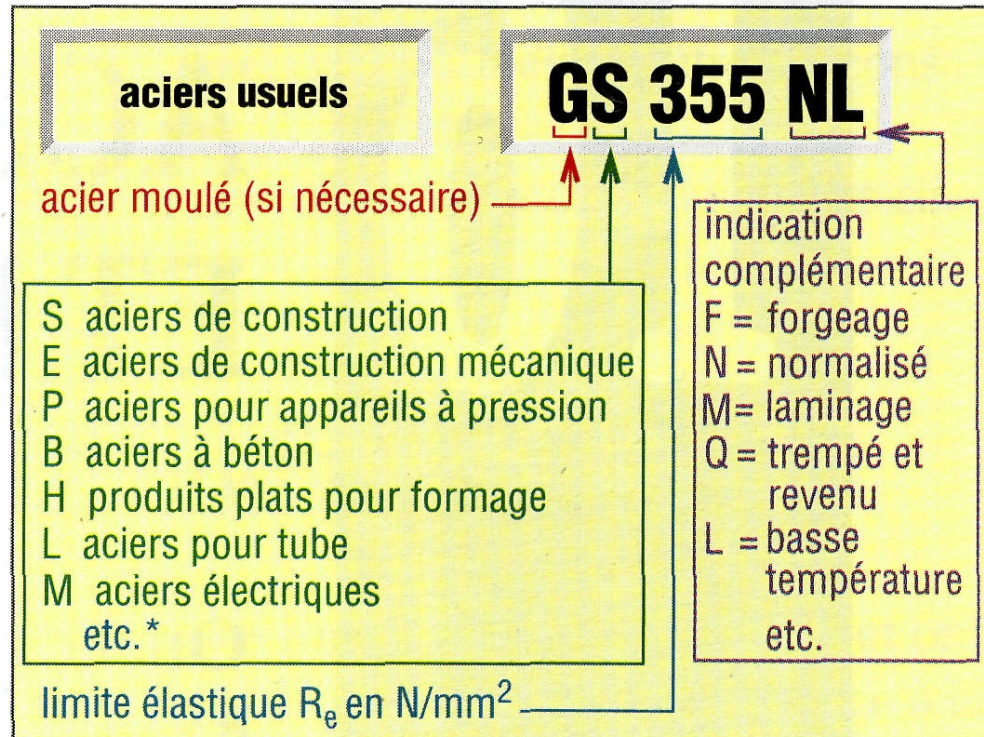
E 235 : $R_e \approx 235 \text{ N/mm}^2$

G : Pour l'acier coulé, la lettre G précède la désignation symbolique

X : Acier fortement allié, teneur moyenne d'un des éléments d'alliage d'au moins 5%

Aciers non alliés: aucun élément d'alliage > 0.6% sauf Mn

Aciers non alliés d'usage général:



Principaux aciers non alliés (1 Mpa = 1 N/mm ²)				
nuances normalisées	R _r MPa	R _e MPa	A %	KV (J) mini
aciers de construction				
S 185 (A 33)	290 à 540	175 à 185	8 à 18	
S 235 (E 24)	320 à 510	175 à 235	15 à 26	23 à 27
S 275 (E 28)	380 à 580	205 à 275	12 à 22	23 à 27
S 355 (E 36)	450 à 680	275 à 355	12 à 22	23 à 40
aciers de construction mécanique				
E 295 (A 50)	440 à 660	225 à 295	10 à 20	27 à 39
E 335 (A 60)	540 à 770	255 à 335	6 à 16	27 à 39
E 360 (A 70)	640 à 900	285 à 360	3 à 11	27 à 39
pour cémentation				
C 20C (XC 18)	470 à 650	290 à 340	20 à 22	50
pour trempé + revenu et pour forgeage				
C 25 (XC 25)	500 à 700	320 à 370	19 à 21	45
C 30 (XC 30)	550 à 750	350 à 400	18 à 20	40
C 35 (XC 38)	600 à 780	380 à 430	17 à 19	35
C 40 (XC 42)	630 à 800	400 à 460	16 à 18	30
C 45 (XC 48)	650 à 850	430 à 490	14 à 16	25
C 50 (XC 50)	700 à 900	460 à 520	13 à 15	–
C 55 (XC 55)	750 à 950	490 à 550	12 à 14	–
C 60 (XC 60)	800 à 990	520 à 580	11 à 13	–
pour trempé superficielle				
C 40 (XC 42 TS)	dureté de la couche trempée ≈ 55 HR _c			

Aciers non alliés spéciaux (Type C) :

Destinés aux traitements thermiques (trempe, revenu, cémentation)

Composition plus précise

Plus grande pureté

Éléments d'alliage en plus faible quantité

Faible teneur en carbone (<0.3%)

Teneur moyenne en carbone (0.3% à 0.5%)

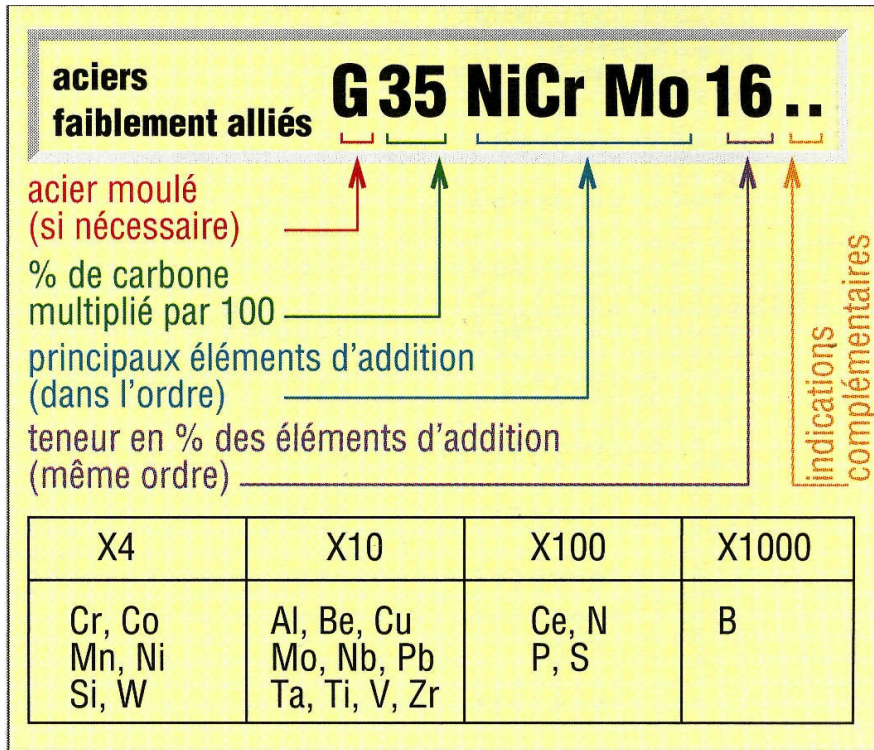
Haute teneur en carbone (>0.3%)

Applications: pièces forgées, ressorts, lames, forets, ...

Exemple: GC35 = G acier moulé, type C, 0.35% de carbone

Aciers faiblement alliés: aucun élément d'alliage $>5\%$ ($Mn \geq 1\%$)

Aciers haute résistance, en l'état, avec traitement



Aciers de cémentation $<0.2\%$ Carbone

Aciers pour trempe dans la masse

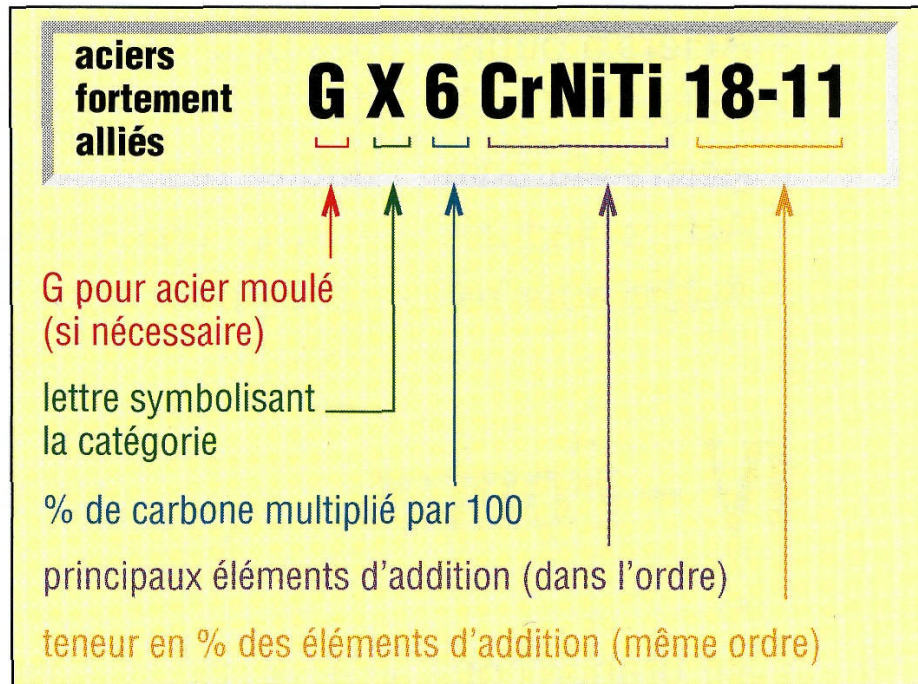
G35 NiCr Mo 16 : Moulé, 0.35% Carbone,
 $16/4 = 4\%$ Nickel, traces $< 1\%$ de Chrome et
Molybdène



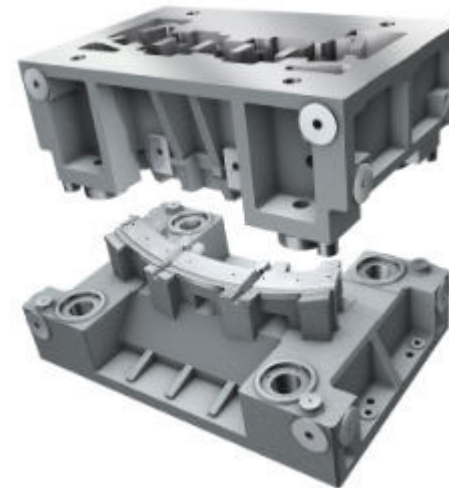
Aciers fortement alliés:

Aciers à usages particuliers (résistance à la corrosion, mécanique, ...)

Au moins un élément >5% en masse



GX6CrNiTi18-11 = G moulé, 6/100=0.06% Carbone, 18% Chrome, 11% Nickel, Titane < 1%



Aciers inoxydables austénitiques [Cr+Ni]:

les plus utilisés, les plus résistants à la corrosion ($\text{Ni} \geq 7 \%$).

Tenue aux températures élevées, à l'écaillage ; ductilité; résilience ; faciles à forger et à souder ; usinabilité médiocre. Durcis par corroyage (écrouissage), pas par trempe. Dilatation élevée. Conductibilité thermique assez basse. Nombreuses nuances.

Applications: (chimie, alimentaire, transports, nucléaire...): pièces embouties, chaudronnées, cuves, réservoirs, armatures, conduites, vannes, visserie,...

Aciers inoxydables ferritiques [au Cr]:

Ductiles, ne durcissent par trempe ($\text{C} < 0,08 \%$) ni écrouissage ; faciles à étirer, former, plier, forger, rouler ($\text{Ni} < 1 \%$) ; les moins résistants à la corrosion. Les plus économiques, usinabilité médiocre, soudabilité moyenne ; peu résilients et faible résistance à la rupture sous températures élevées.

Applications : équipements ménagers, décoration intérieure, automobiles, mobiliers...

Aciers inoxydables martensitiques ($0,08 \leq C \leq 1 \%$):

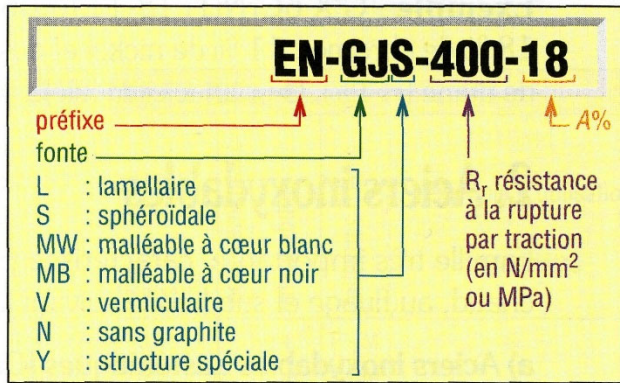
Résistance aux chocs, durcissent par trempe, soudables à chaud, faciles à forger, bonne usinabilité, bonnes caractéristiques mécaniques à température élevée ($Ni < 7 \%$), résistent moins à la corrosion

Aciers inoxydables à durcissement par précipitation:

comme les martensitiques, plus résistants à la corrosion et mécaniquement (après trempe)

Grande coulabilité pour mouler des formes complexes

2 à 4% de carbone : fragile, faible ductilité (déformation plastique possible mais faible)



Principales fontes					
désignation normalisée	R_e (daN/mm ²)	R_r (daN/mm ²)	E (GPa)	HBW dureté	A%
fontes à graphite lamellaire					
EN-GJL 150	10	15	80	160	0,8
EN-GJL 200	13	20	100	190	à
EN-GJL 250	17	25	110	210	0,3
EN-GJL 300	20	30	120	230	↓
EN-GJL 350	23	35	130	260	
EN-GJL 400	26	40	140	290	
fontes à graphite sphéroïdal					
EN-GJS 400-15	25	40	165	170	15
EN-GJS 500-7	32	50	↑	210	7
EN-GJS 600-3	37	60	168	230	3
EN-GJS 700-2	42	70	↓	260	2
EN-GJS 800-2	48	80	↓	300	2
EN-GJS 900-2	60	90	170	330	2
cœur blanc EN- fontes malléables					
GJMW 360-12	19	38	↑	200	12
GJMW 400-15	22	40	↑	220	5
GJMW 450-7	26	45	↑	220	7
cœur noir EN-					
GJMB 350-10	20	35	↑	150	10
GJMB 450-6	27	45	170	180	6
GJMB 550-4	34	55	↓	210	4
GJMB 650-2	43	65	↓	240	2
GJMB 800-1	60	80	↓	300	1

et soudabilité

Economiques, plus courantes, bonnes coulabilité, usinabilité ; résistance en compression et capacités d'amortissement des vibrations.

Bâtis machine, supports, carters, blocs moteur

Ductilité, résilience et usinabilité.

Vilebrequins, arbres transmission, pièces de voirie, tuyauterie

Propriétés mécaniques voisines de l'acier.
 Moulables en faibles épaisseurs, usinabilité.

Fonte blanche: dures, fragiles, résistances aux frottements et températures élevées

Pièces résistantes à l'usure par abrasion.

Fonte alliées: tous types + éléments d'addition

Fontes alliées					
	éléments d'addition	matrice	HB	A%	propriétés caractéristiques
GJL ou GJS	Ni - Mo (Cr)	bainite	250 350	1-2	résistance mécanique
	Ni - Cr (Mo)	martensite	350 500	< 1	résistance à l'usure capacité d'amortissement
	Ni-Si ou Ni-Si (Cr)	austénite	120 250	12-25	résilience résistance aux hautes et basses températures
	Si ou Si - Mo	ferrite	180 340	1-10	résistance à l'oxydation et déformations à T °C ↗
GJN («FB»)	Ni - Cr ou Cr (11 à 28 %)	carbures martensite austénite	450 800	-	résistance à l'abrasion et à l'oxydation
	Cr (28 à 34 %)	ferrite	200 500	-	résistance aux températures élevées et à la corrosion

Eléments d'alliages	Influence
Soufre [S]	Facilite l'usinage Augmente la fragilité à chaud Diminue la fluidité
Plomb [Ph]	Facilite l'usinage (Ac. pour automates)
Phosphore [P]	Augmente la résistance à la corrosion Augmente la résistance à chaud Augmente la fluidité Augmente la fragilité à froid Diminue la résistance aux chocs
Silicium [Si] Msp: $2.3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 1410°C	Augmente la résistance (R_e, R_m) Augmente la trempabilité Diminue la soudabilité
Manganèse [Mn] Msp: $7.2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 1241°C	Augmente la résistance aux chocs Augmente la résistance à l'usure Augmente la résistance R_m Augmente la trempabilité Diminue l'usinabilité
Nickel [Ni] Msp: $8.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 1453°C	Augmente la résistance à la fatigue Augmente la résilience Augmente la résistance à la corrosion Augmente la trempabilité
Chrome [Cr] Msp: $7.1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 1900°C	Augmente la résistance R_m Augmente la résistance à l'usure Augmente la résistance à la corrosion Augmente la capacité de coupe Augmente la pénétration de trempe Diminue la déformation à la trempe

Molybdène [Mo] Msp: $10.2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 2622°C	Augmente la résistance R_m Augmente la résistance à la fatigue Augmente la résistance au revenu Augmente l'insensibilité à la surchauffe Augmente la dureté Augmente la trempabilité Diminue la forgeabilité
Tungstène [W] Msp: $19.3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 3380°C	Augmente la résistance à l'usure Augmente la résistance au revenu Augmente la dureté Augmente la capacité de coupe Augmente l'insensibilité à la surchauffe Augmente les qualités magnétiques
Vanadium [V] Msp: $5.96 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 1730°C	Augmente la résistance à chaud Augmente la résistance à la fatigue Augmente la résistance à l'usure Augmente la résistance aux chocs Augmente la limite élastique R_e Augmente la trempabilité Augmente la capacité de coupe Diminue la forgeabilité
Cobalt [Co] Msp: $8.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ Pf: 1492°C	Augmente la perméabilité magnétique

Acier classique:	Fer + Carbone diphasique à température ambiante
But des traitements:	Dissoudre carbone dans matrice pour obtenir l'acier voulu
Revenu:	Chauffage de 150C à 600C, refroidissement + ou - lent Diminue fragilité, résistances à la rupture, élastique, dureté
Trempe:	Chauffage à 800-900C, refroidissement brusque Acier très dur, résistant à l'usure mais fragile
Amélioration:	Trempe et revenu
Recuit de Normalisation:	Chauffage à 760-920C, maintien 30min, refroidissement à l'air Structure d'un matériau forgé ou matricé

Recuit doux: Chauffage à 700°C, refroidissement lent au four (25-30°C/h)

Élimine tensions internes en déformation: évite fissures

Cémentation: Avant trempe et rectification, carburation de surface (0.05-1mm)

Grande ténacité (moins fragile), dureté superficielle 700HV

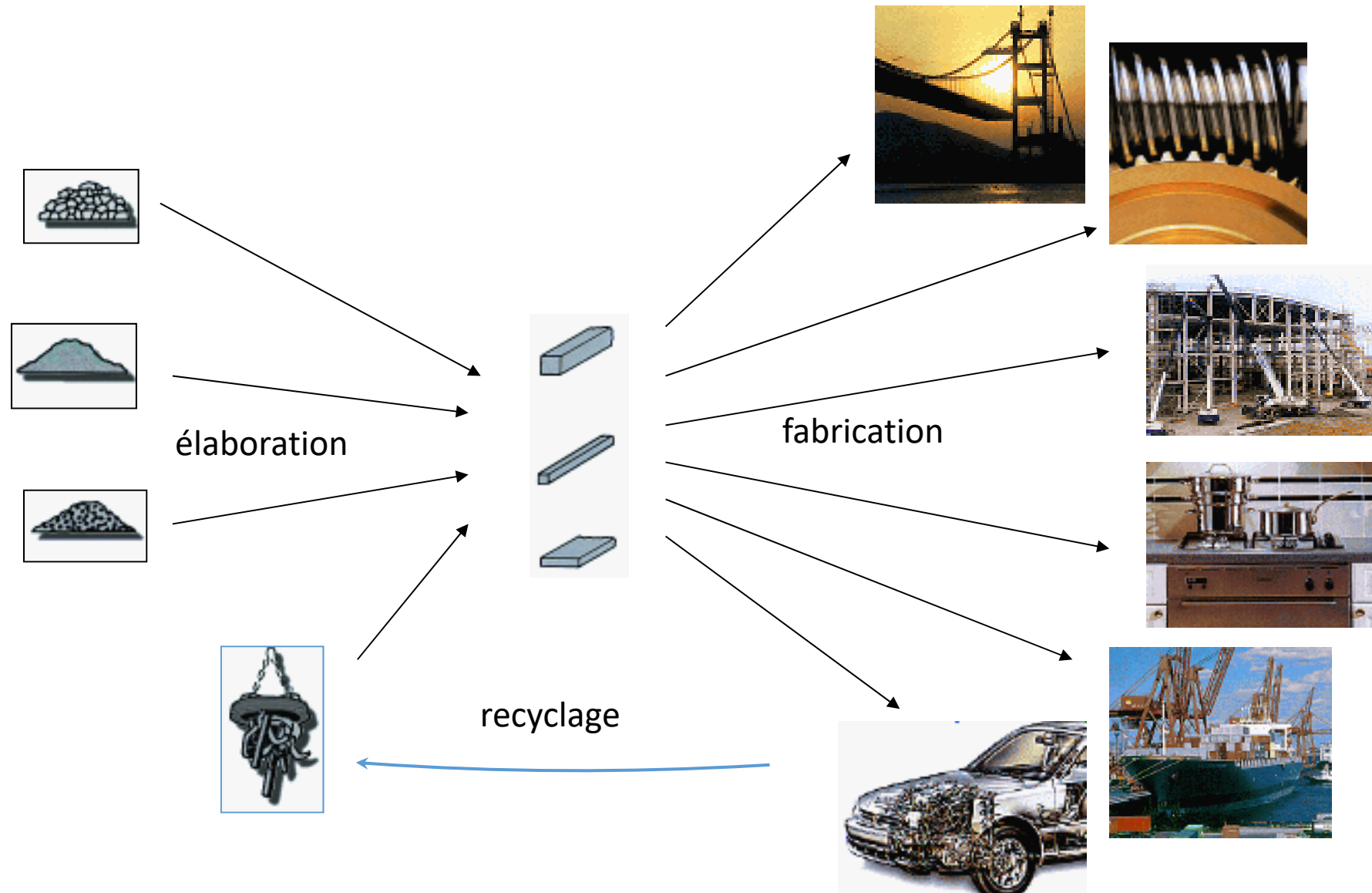
Nitruration: Après trempe, absorption d'azote à 550°C avant rectification

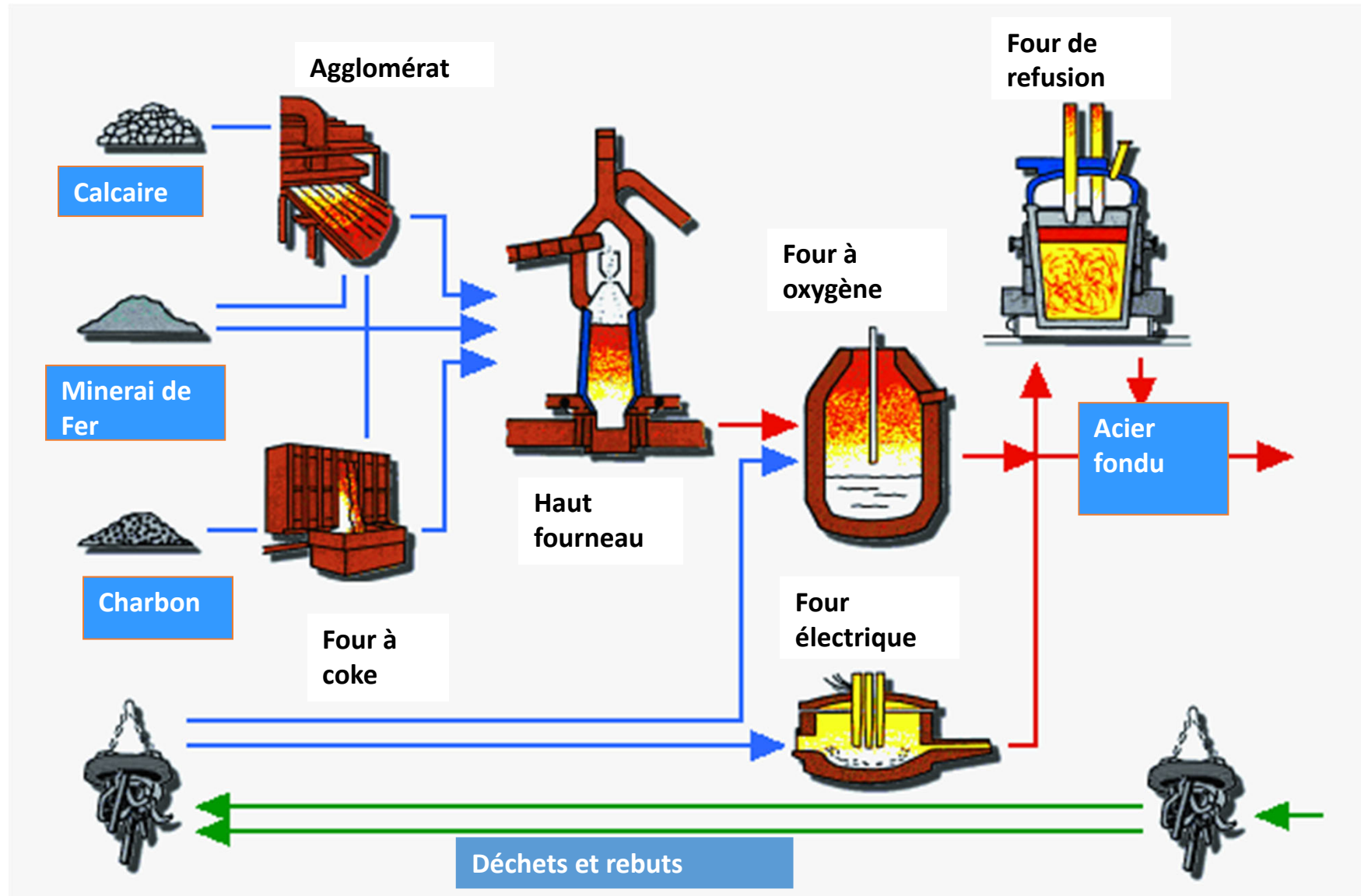
Nitruration de fer de surface (0.2-0.8mm)

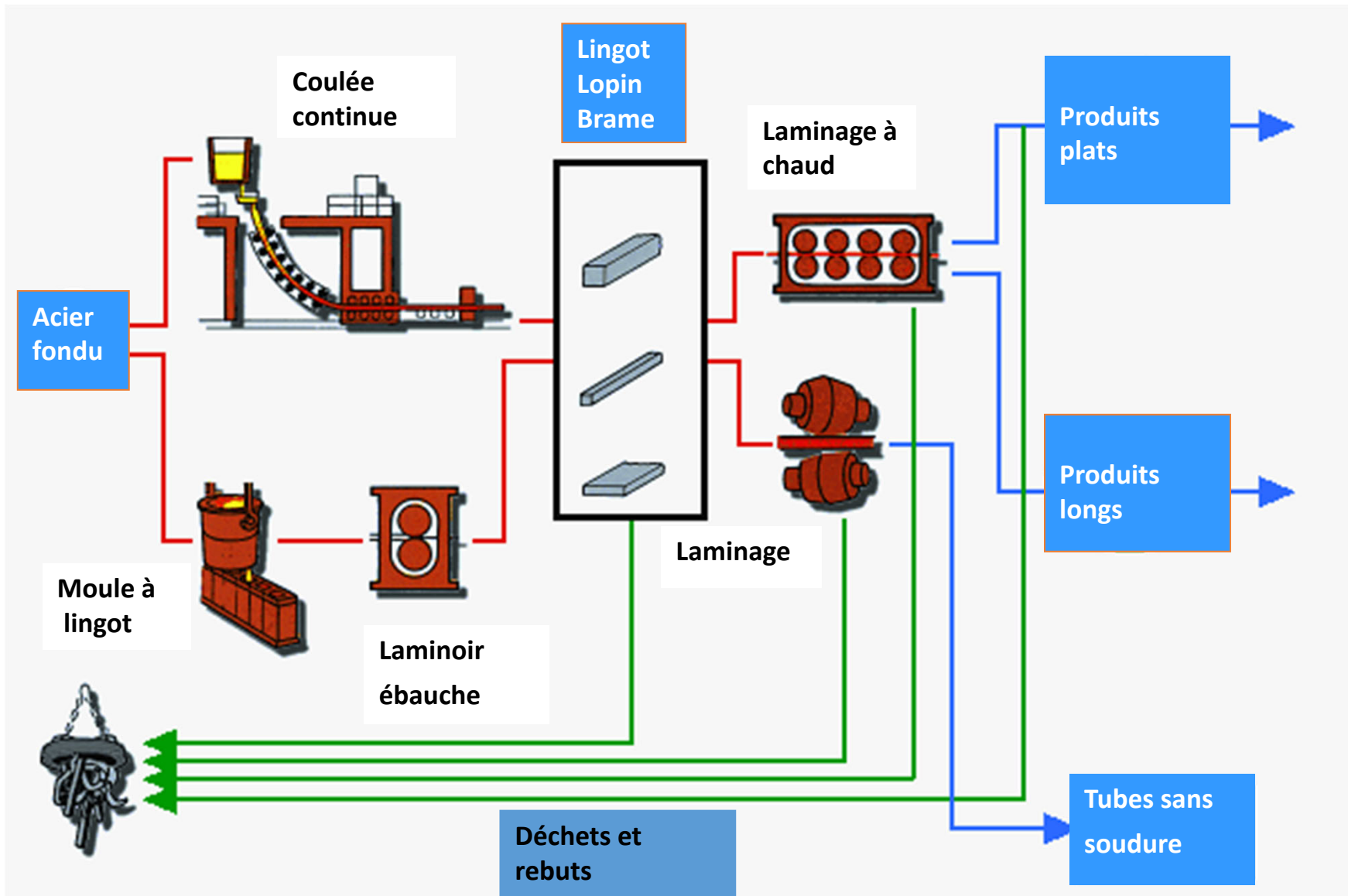
Dureté > 1200HV, résistance fatigue et corrosion inoxydables (Mo, Al)

Trempe superficielle: Augmentation dureté superficielle par trempe au chalumeau, immersion, induction

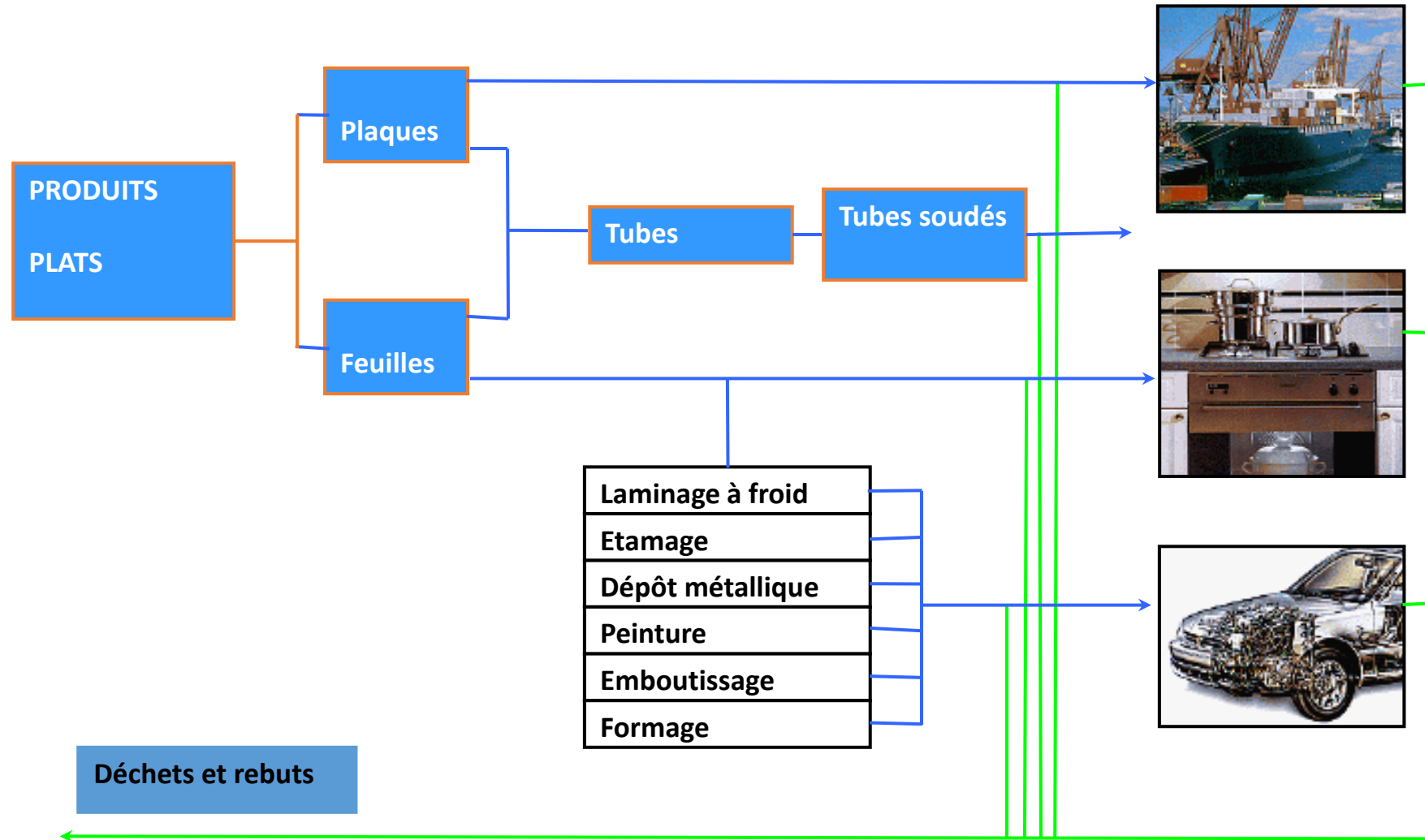
<http://www.bodycote.com/fr-FR/services/heat-treatment.aspx>



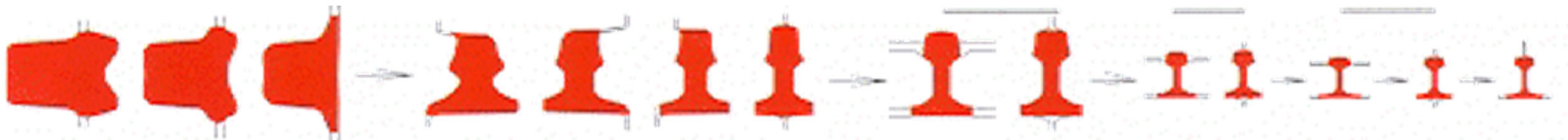
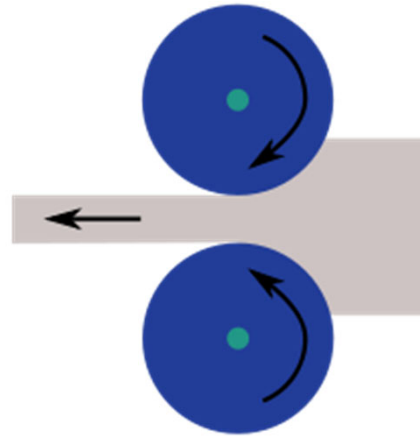
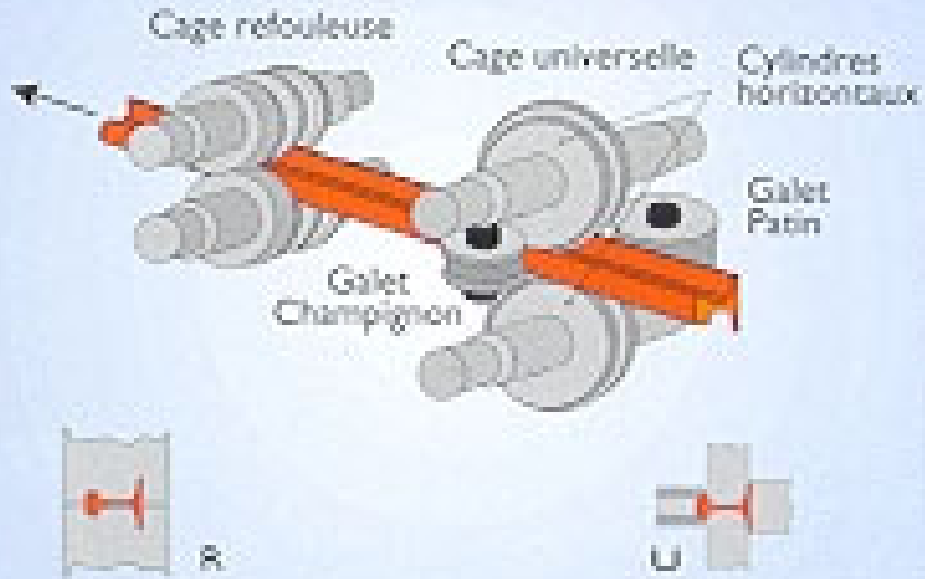






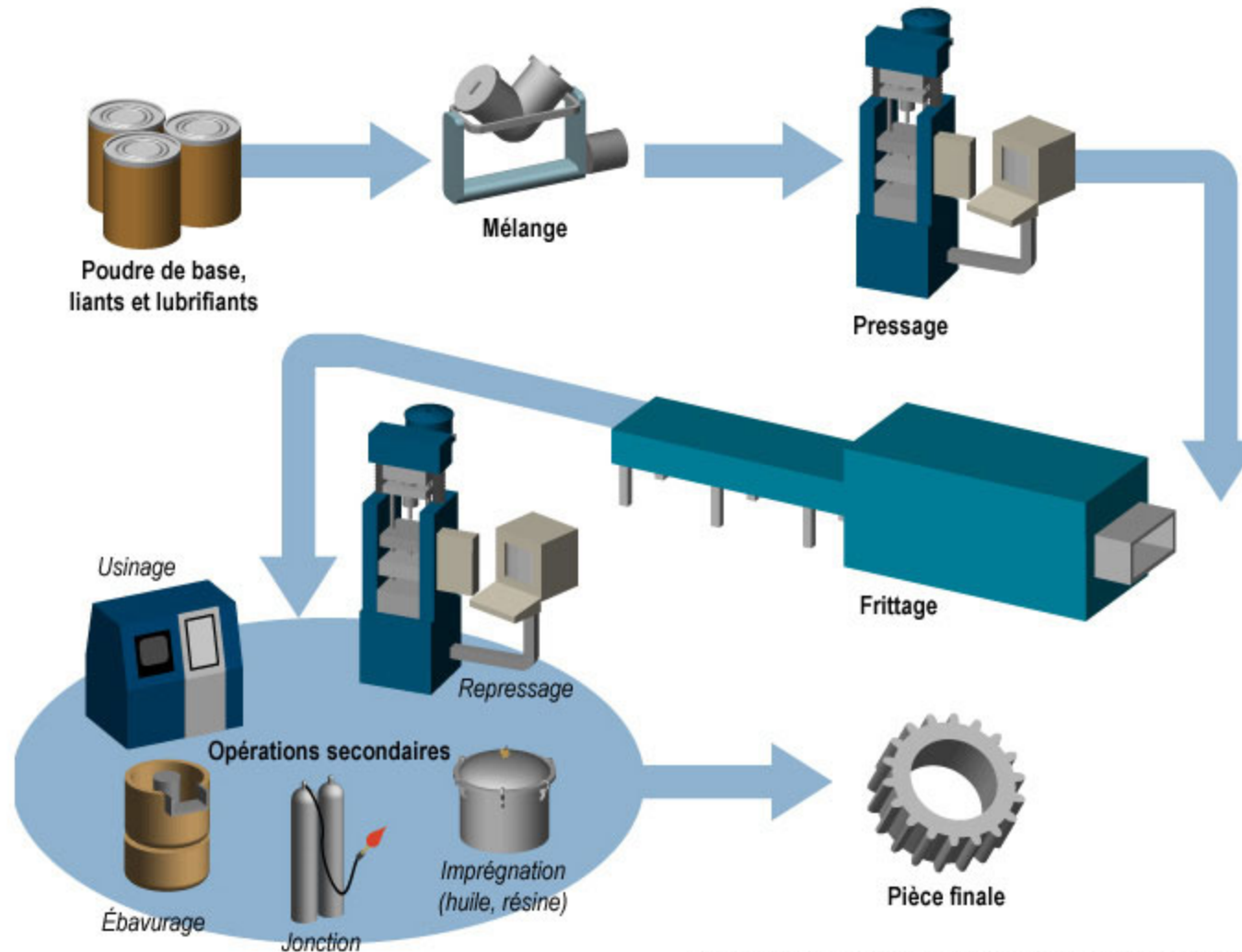


Principe du laminage universel



<https://www.youtube.com/watch?v=v6Y4Ce5aeXQ>

Frittage = procédé de fabrication de pièces par chauffage de poudre sans fusion.
Cohésion de la pièce par soudure de grains de poudre entre eux



<http://www.youtube.com/watch?v=SufKCjYRqh4>

6 grandes familles d'alliages:

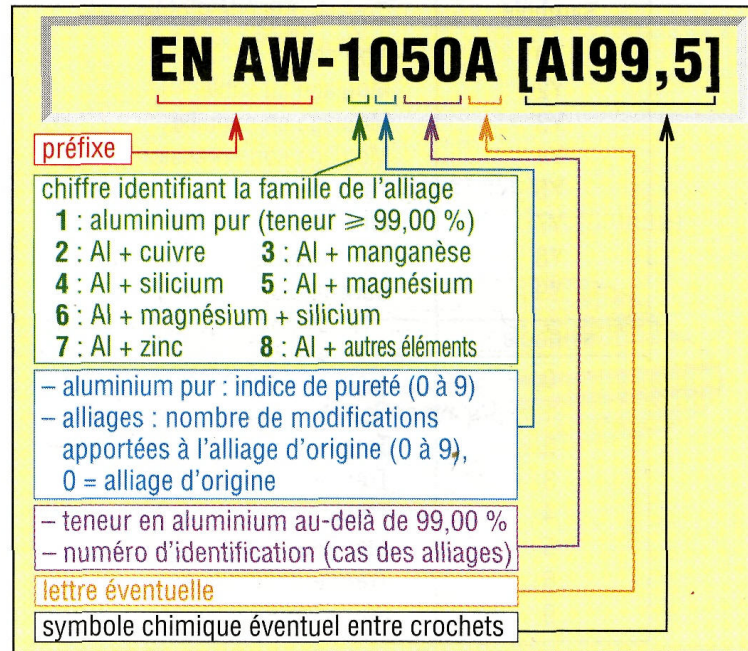
- **Aluminium**
- **Cuivre**
- Magnésium
- Zinc
- Titane
- Nickel

Caractéristiques:

- Bas point de fusion ($\sim 658^{\circ}\text{C}$)
- Ductilité élevée
- Léger : (2700kg/m^3)
- Bonnes conductibilités électrique, thermique
- Coefficient de dilatation thermique 1.5x aciers
- Réfléchissant
- Bon rapport résistance/poids (aéronautique, transports,...)
- Résistant à la corrosion (oxyde protectrice en surface)
- Inconvénients: faibles résistances à l'usure et fatigue

Alliages d'aluminium corroyés:

- Déformés a chaud (corroyage) par forgeage, laminage, filage
- Barres, profilés, tôles, ...



Exemple: EN AW-5086 [Al Mg 4] = alliage d'aluminium A, corroyé W, 4% magnésium

Aluminium et alliages : produits laminés (extrait NF EN 485-2)													
nuances		état métallurgique	caractéristiques mécaniques				résistance à la corrosion	aptitude à l'anodisation	soudabilité à l'arc	soudabilité aux gaz + brasage	usinabilité	aptitude au travail à froid	exemples d'emploi
			R _r (daN/mm ²) mini	R _e (daN/mm ²) mini	A % maxi	E (daN/mm ²)							
sans traitements thermiques (sans durcissement structural)	aluminium pur	EN AW-1050A[Al 99,5] (1050A)	O 6,5	2	35	6 700	++	+++	+++	+++	-	+++	① ③ ⑤ ⑨
			H14 10,5	8,5	6							à	
			H18 14	12	2							+	
		EN AW-1070A[Al 99,7] EN AW-1080A[Al 99,8] (1070A et 1080A)	O 6	1,5	35							+++	
			H14 10	7	7							à	
			H18 12,5	10,5	2							+	
	Al + Mn	EN AW-1100[Al 99,0Cu] EN AW-1200[Al 99,0] (1100 et 1200)	O 7,5	2,5	33	6 700	++	+++	+++	+++	-	+++	① ⑫
			H14 11,5	9,5	6							à	
			H18 15	13	2							+	
	Al + Mg	EN AW-3003[AlMn1Cu] (3003)	O 9,5	3,5	24	6 700	++	++	+++	+++	+	+++	① ③ ⑤ ⑥
			H14 14,5	12,5	5							++	
			H18 19	17	2							+	
		EN AW-5005[AlMg1] (5005)	O 10	3,5	24							+++	
			H14 14,5	12	5							+	
			H18 18,5	16,5	2							+	
	Al + magnésium	EN AW-5052[AlMg2,5] (5052)	O 17	6,5	19	7 000	+++	+++	+++	+++	+	+++	① ⑤ ⑥ ⑫
			H34 23	15	5							+	
			H38 27	21	3							+	
		EN AW-5086[AlMg4] (5086)	O 24	10	17							+++	
			H22 27,5	18,5	10							+	
			H24 30	22	8							+	

avec traitements thermiques (avec durcissement structural)	Al + cuivre	EN AW-2014[AlCu4SiMg] (2014)	O 22	14	16	7 400	-	+	++	+	++	++	② ⑦ ⑧
			T4 40	25	14								
			T6 44	39	7								
		EN AW-2017A[AlCu4MgSi] (2017)	O 22	14	13								
			T4 39	25	15								
			T6 43	28	14								
	Al + Si + Mg	EN AW-6061[AlMg1SiCu] (6061)	O 15	8,5	19	7 000	++	+++	+++	+++	+	++	⑤ ⑦ ⑩ ⑪
			T4 21	11	18							à	
			T6 29	24	10							+	
		EN AW-6082[AlSi1MgMn] (6082)	O 15	8,5	19							++	
			T4 20,5	11	15							à	
			T6 31	26	10							+	
	Al + zinc	EN AW-7020[AlZn4,5Mg1] (7020)	T4 32	21	14	7 200	++	++	++	++	++	++	② ⑥ ⑦
			T6 35	28	10							+	
		EN AW-7075[AlZn5,5MgCu] (7075)	O 28	15	10							++	
			T6 54	46	8							+	

(entre parenthèses : ancienne désignation) — R_r, R_e et A% varient avec la forme et l'épaisseur des profilés.

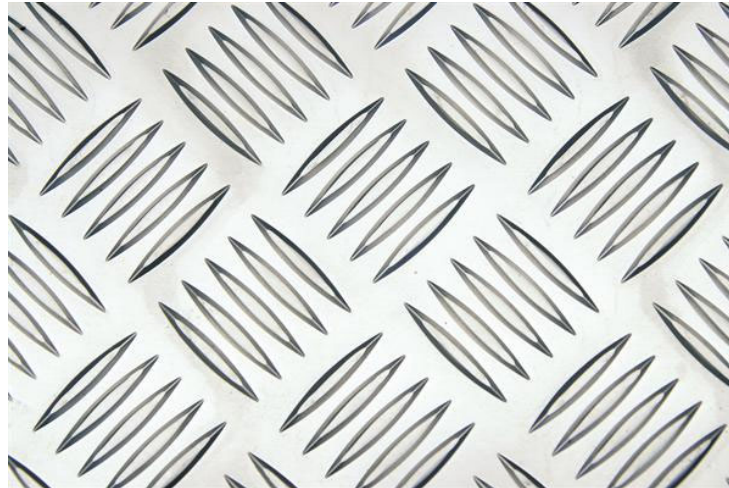
+++ : excellente
++ : bonne
+ : moyenne
- : faible

① : chaudronnerie, emboutissage
② : pièces forgées
③ : pièces filées : boîtes, aérosols ...
④ : boulonnerie
⑤ : chimie, alimentaire
⑥ : bâtiment

⑦ : mécanique, transport
⑧ : aéronautique
⑨ : décoration
⑩ : marine
⑪ : emballage
⑫ : ustensiles de cuisine ...

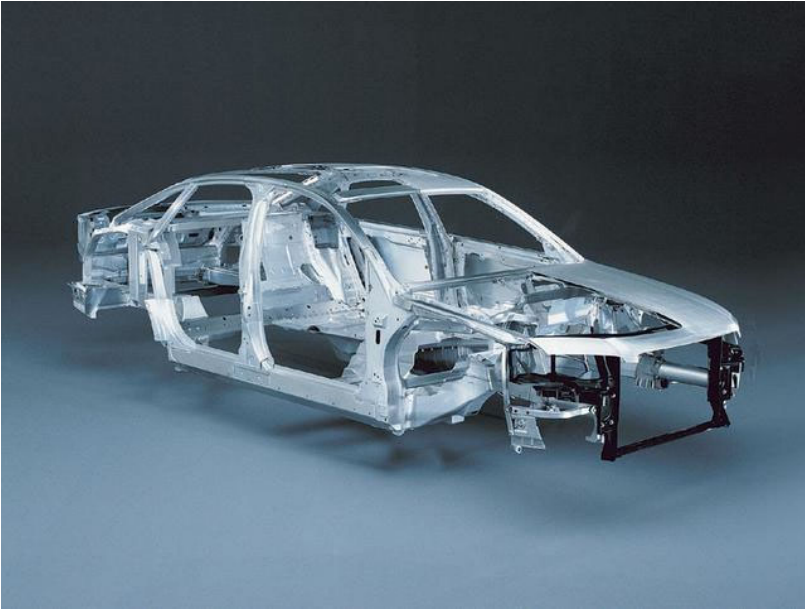


<http://www.meltech.co.uk/aluminium-material-future/>



3004 avec Mn





Aéronautique:

60-75% alliages d'aluminium

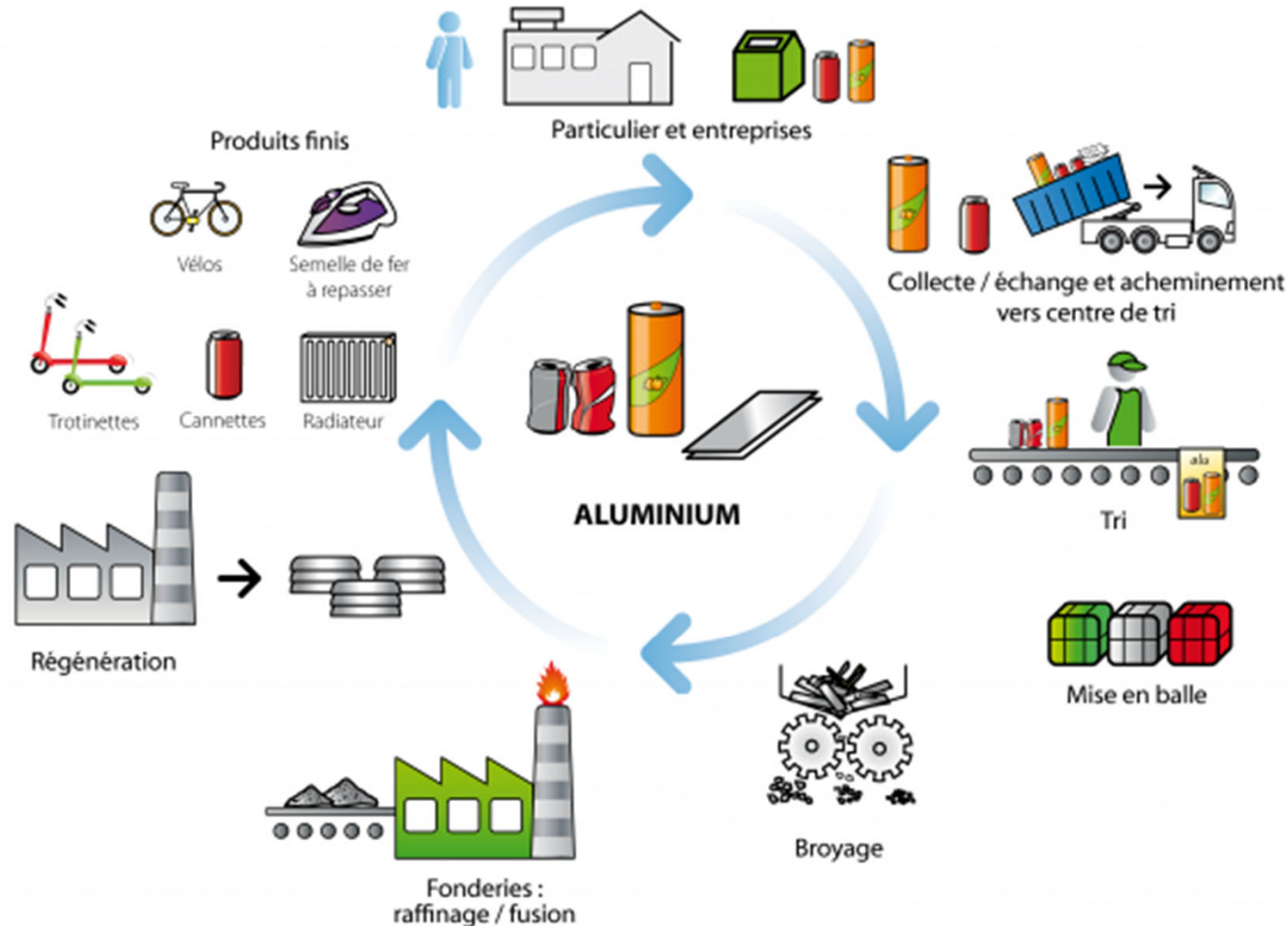
5-10% alliages de titane

10-20% composites

7-15% aciers

Autres

Ex: EN AW 2024 avec Cu bonne ténacité et résistance à la propagation de fissures



Familles principales:

- Laiton (Cu+Zn)
- Bronzes (Cu+Sn)
- Cupronickels (Cu+Ni)
- Cupro-aluminiums (Cu+Al)
- Maillechorts (Cu+Ni+Zn)



Maillechort

Caractéristiques:

Point de fusion ($\sim 1083^{\circ}\text{C}$)

Plus lourd que l'acier : (8900kg/m^3)

Grandes conductibilités électrique, thermique

Bonne usinabilité

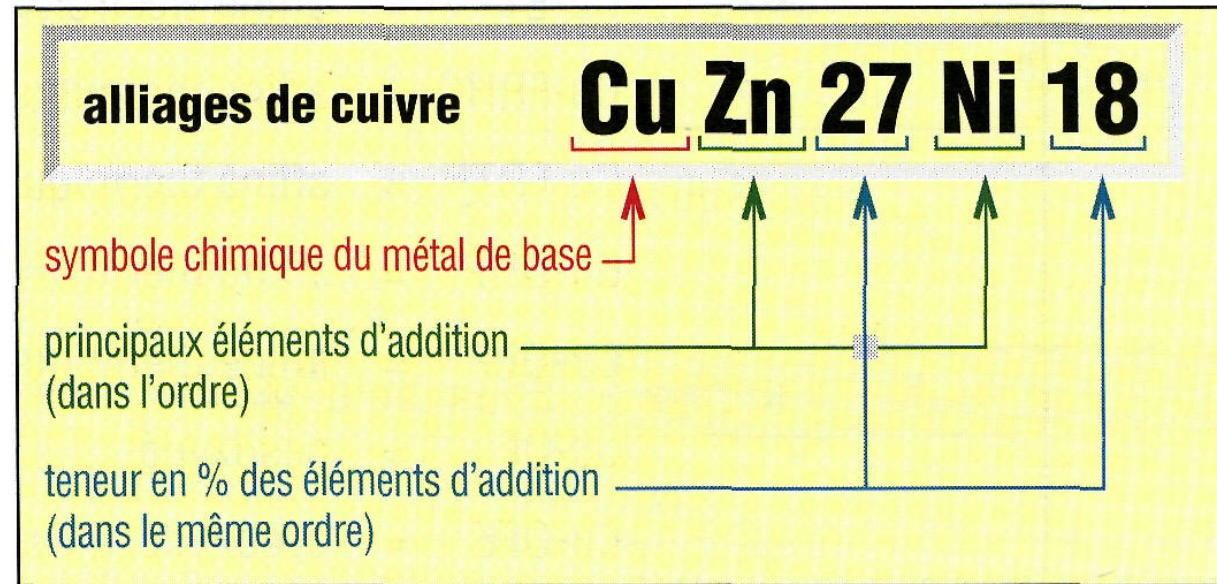
Ductilité élevée

Rouge ou jaune avec Zn

Grande résistance à la corrosion



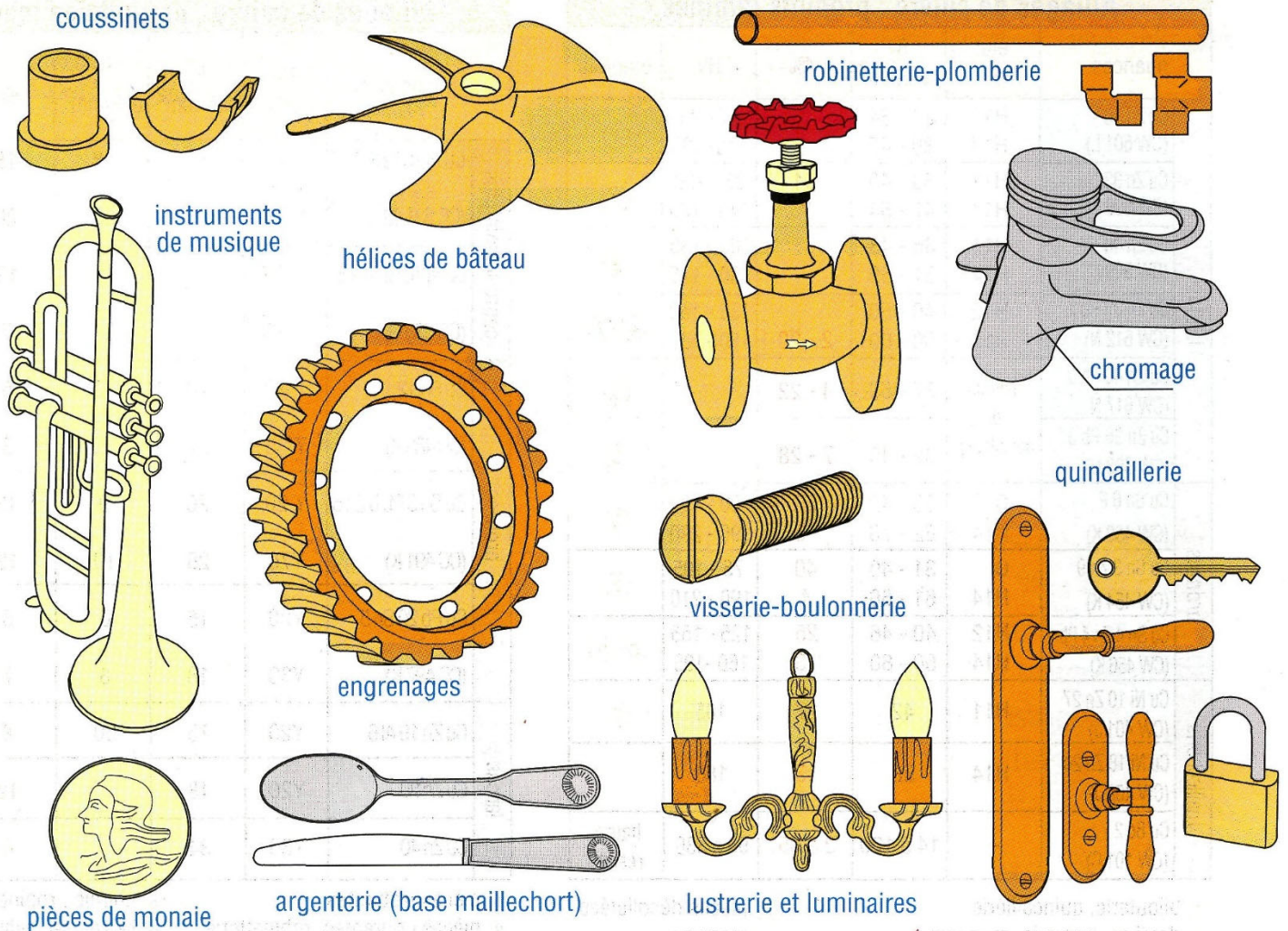
Cupronickel



Exemple: Cu Zn 27 Ni 18: Maillechorts (Cu+Ni+Zn), 27% zinc, 18% nickel

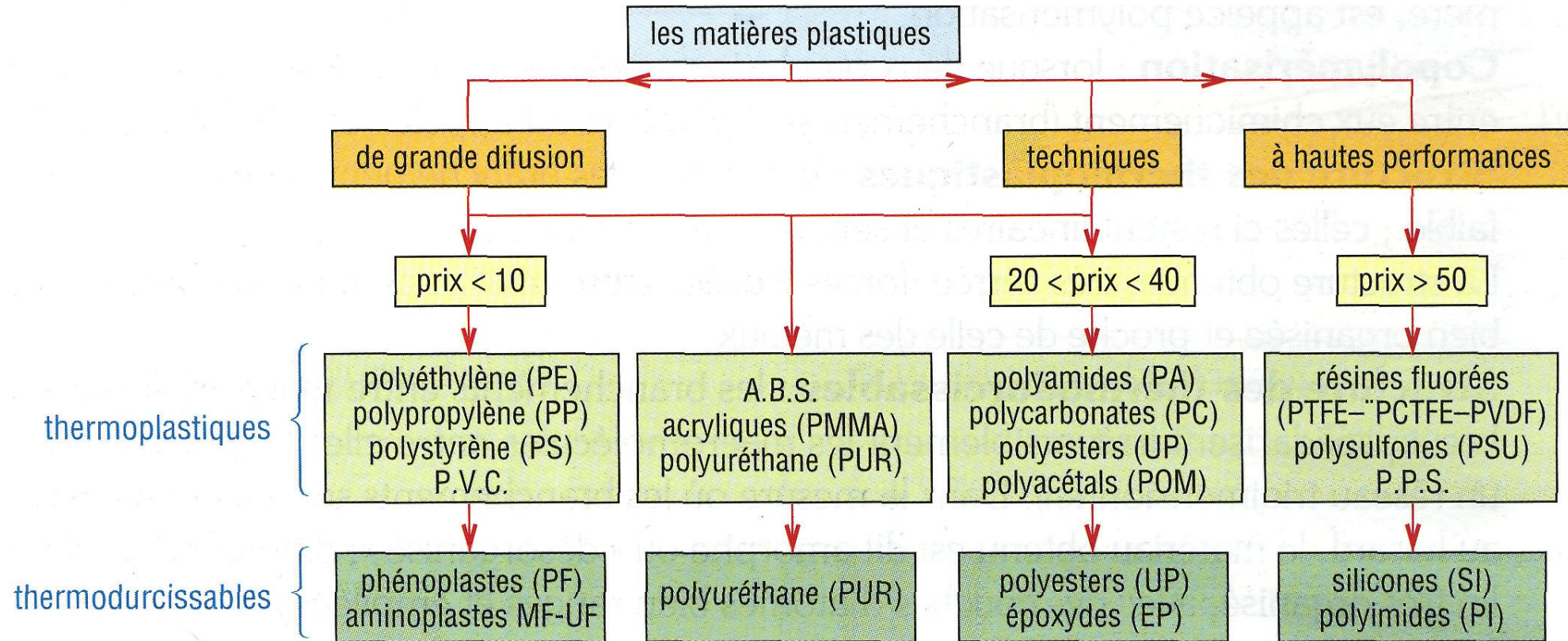
Cuivre pur: usages électriques, thermiques, chaudronnerie

Principales caractéristiques	
familles	propriétés
Bronzes (Cu + Sn)	<ul style="list-style-type: none"> – résistance à la corrosion – qualités frottantes – aptitude au moulage (meilleurs que les laiton) – se travaillent moins bien que les laiton : usinage, emboutissage...
Cuproaluminiums (Cu + Al)	<ul style="list-style-type: none"> – caractéristiques mécaniques – résistance à la corrosion
Cupronickels (Cu + Ni)	<ul style="list-style-type: none"> – très malléables – résistance à la corrosion
Maillechort (Cu + Ni + Zn)	plus résistants que les laiton à la corrosion et mécaniquement



Opération modifiant l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données:

- Traitements anti-usure (PTFE, carbures)
- Traitements anti-oxydation
- Oxydation anodique (anodisation ou eloxage)
- Peinture
- Emaillage



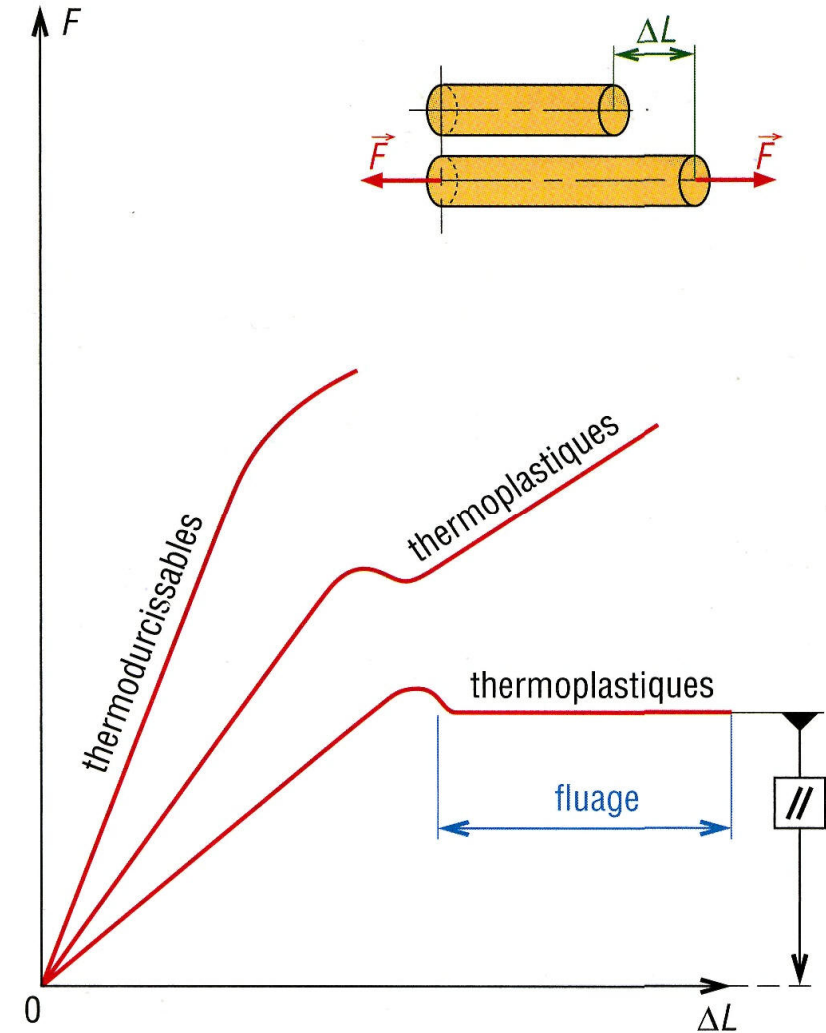
Thermoplastiques:

- 90% des plastiques
- Fondent à température
- Moins fragiles
- Plus faciles à fabriquer
- Rigide ou souple, compact ou en faible épaisseur
- Fluage élevé
- Coefficient de dilatation linéaire élevée
- Combustible, sensible aux UV, électrostatiques
- Ex: Nylon, acrylique, polyéthylène, , PET, polystyrène, Téflon
PVC (vinyl)

Thermodurcissables:

- Ramollissent puis durcissent à température, non recyclables
- Résistance aux températures $>200^{\circ}\text{C}$, aux attaques chimiques
- Moins de fluage, bonne rigidité
- Moins pratiques à former, pas de moulage par injection
- Ex: polyester, polyuréthane (PU), bakélite, mélamine, époxy

<http://www.boedeker.com/index.htm>



Principales matières plastiques																			
			symbole	(1) aspect	densité	températures limites (°C)	caractéristiques mécaniques				résistance chimique				(2)	(2)	(2)	(2)	(3) exemples d'emploi
							R _r (daN/mm ²)	E (daN/mm ²)	A%	chocs IZOD entaillés	acides		bases alcalis						
											(2)	(2)	(2)	(2)					
thermoplastiques	polyéthylène	basse densité	PE-LD	TRL-OQ	0,92	100	0,5-3	20-40	200-600	ne casse pas	F	B	B	B	B	B	B	① ②	
		haute densité	PE-HP	TRL-OQ	0,96	120	2-4	80-180	20-80		F	B	B	B	B	B	B	③ ④	
	polypropylène		PP	TRP-OQ	0,91	130	3-5	140-200	250-600	7-25	F	B	B	B	B	B	B	① ③ ⑥	
	polychlorure de vinyle	rigide	PVC	TRP-OQ	1,38	70	4-6	150-350	5-80	2-100	B	B	B	B	S	B	B	① ③	
		souple		TRP-OQ	1,20	70	1-3	1-4	150-450									①	
	polystyrène		PS	TRL-OQ	1,05	80	3-5	200-320	5-75	3-20	F	B	B	B	S	B	F	B	① ② ③ ⑤
	ABS*		ABS	TRL-OQ	1,10	110	1,7-6	200	10-50	10-50	F	B	B	B	S	B	B	F	① ② ③
	poly (méthacrylate de méthyle)		PMMA	TRP-OQ	1,20	85	5-8	220-320	4-10	2-3	F	B	S	F	F	B	B	S	② ③ ⑤ ⑥
	acétate de cellulose		CA	TRP-OQ	1,30	90	3-6	80-250	20-50	6-45	S	F	F	F		B	B	B	① ② ③ ⑤
	polyamide		PA	TRP-OQ	1,15	160	5-10	90-280	15-300	3-50	S	B	B	B	B	B	B	B	① ③ ④
	polycarbonate		PC	TRP-OQ	1,20	130	5-7	240	80-120	65-100	F	B	S	F	F	B	B	B	① ② ⑤
	polyoxyméthylène		POM	TRL-OQ	1,40	90	6-7	300	35-75	5-15	S	B	F	F	B	B	B	B	① ③ ④
	polytétrafluoroéthylène		PTFE	OQ	2,20	+260 -200	2-4	35-80	250-500	16	B	B	B	B	B	B	B	-	④ ⑥
thermodurcissables	phénoplastes**		PF	TRP-OQ	1,3	190	3-6	270-480	750		S	F	S	S	S		B	B	① ②
	polyesters		UP	TRP-OQ	1,2	190	5-15	280-400	250-1500	8-100	S	F	S	F	F		F	B	② ③
	polyépoxydes		EP	TRL-OQ	1,5	280	2-12		250	2-50	F	B	F	B	B	B	B	B	② ③ ⑥
	polyimides		PI		1,6	250	2-4		750		B	B	B	B	B	B	B	B	① ⑦
	silicones		SI	OQ	1-2	230	1				F	B	F	F	F	F	F	B	⑦

(1) TRL : translucide
TRP : transparent
OQ : opaque

(2) B : bon
F : faible à moyen
S : mauvais (soluble)

(3) ① : pièces mécaniques (engrenages, cames, rotors)

② : petits carters, boîtiers, jouets, petit outillage

③ : grands bâtis, cuves, containers, réservoirs, coques

④ : pièces de frottement (coussinets, paliers, glissières)

⑤ : pièces pour l'optique (vitres, luminaires, diffuseurs)

⑥ : applications chimiques, thermiques

⑦ : enrobage, étanchéité, isolant

* acrylonitrile styrène acrylate

** résine phénol formaldéhyde

Grande diffusion: 70 à 80 % du total des plastiques

Technique

Haute Performance

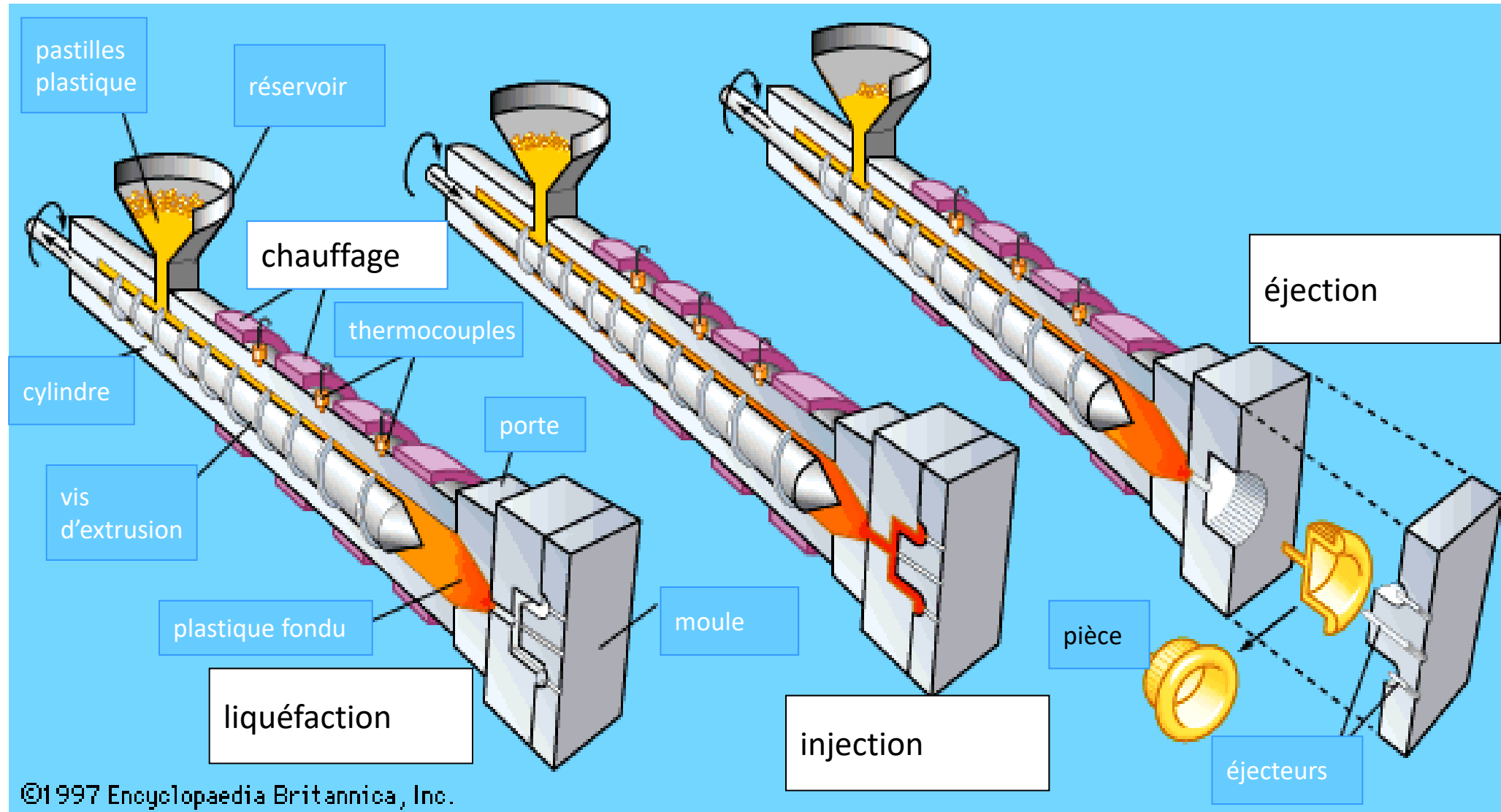
Grande diffusion

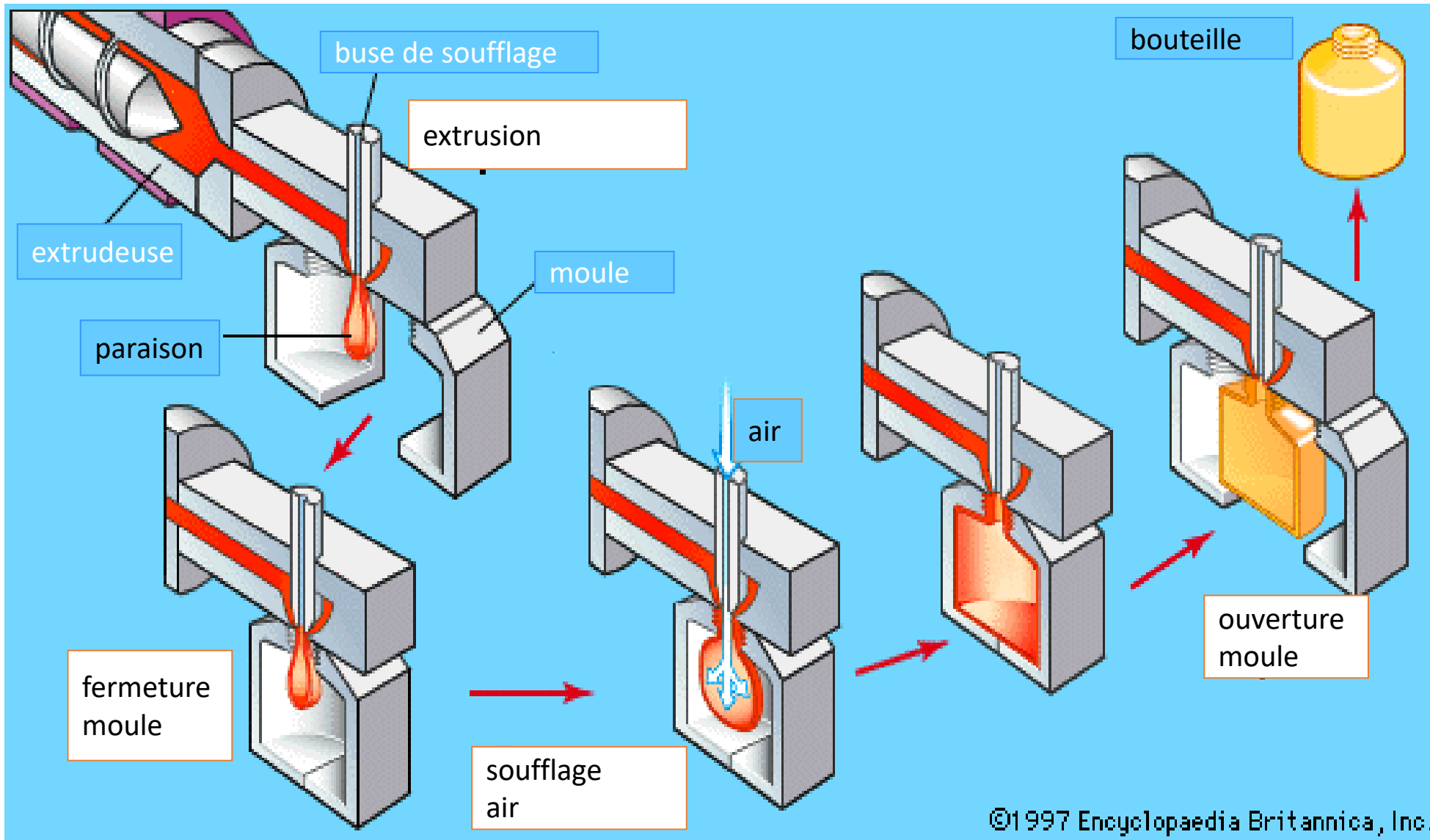
Technique

Haute Performance

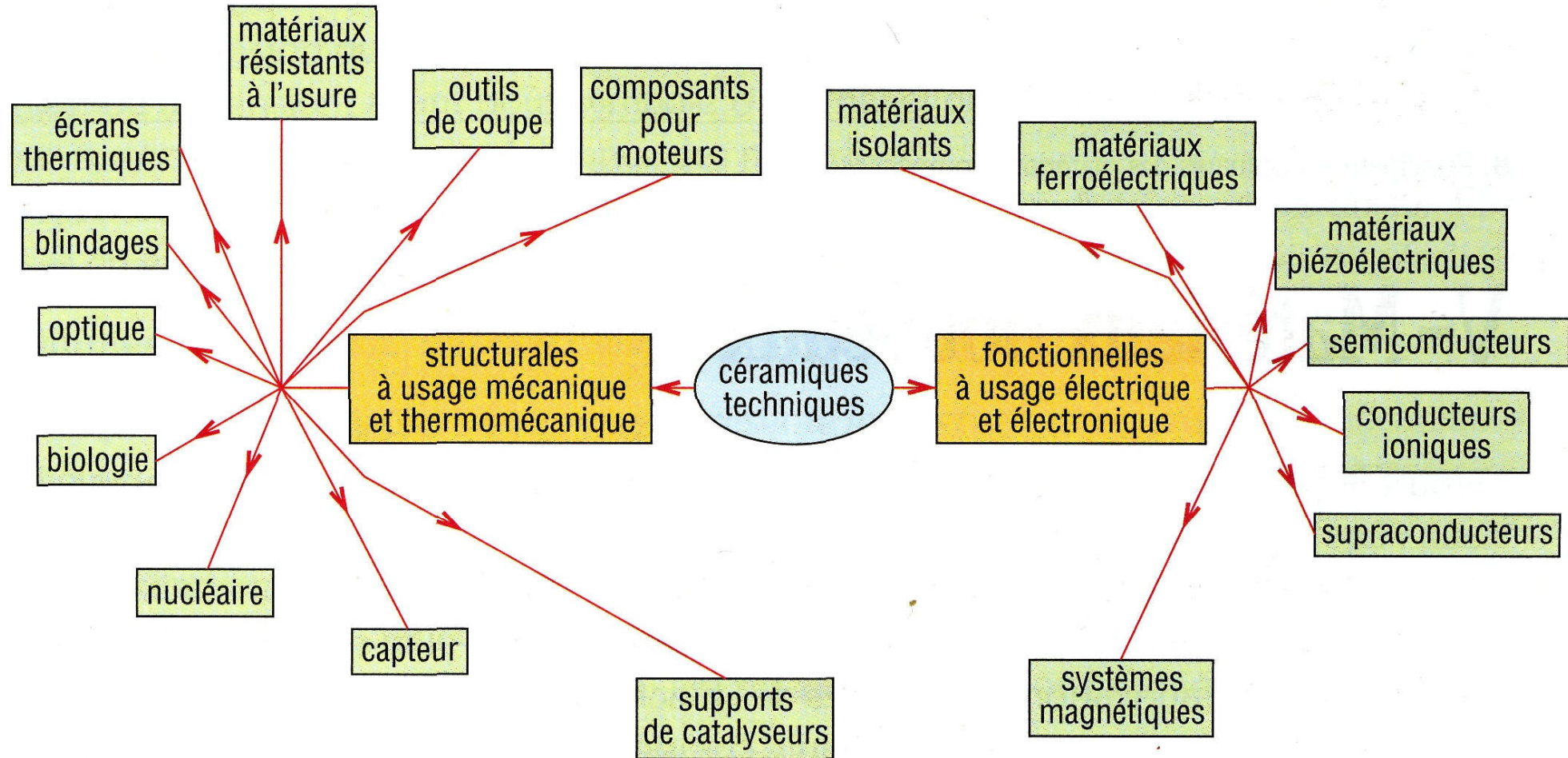
Principaux élastomères vulcanisés							
		caoutchouc naturel NR	butadiène styrène SBR	acrylonitrile butadiène NBR	butyl IIR	chloroprène (néoprène) CR	éthylène propylène EPM-EPDM
propriétés mécaniques	traction	+++	++	++	0	++	+
	déchirement	++	+	0	0	+	++
	abrasion	+++	++	++	+	+	++
	compression	++	++	+++	+	+	++
	résilience	+++	++	0	0	++	0
	flexion	++	++	++	++	++	0
résistance au vieillissement	ozone-intempéries	+	+	+	++	++	+++
	chaleur	+	+	+	++	+	+++
	froid	+++	++	0	+	0	+++
	flamme	0	0	0	0	++	0
résistance chimique	huiles	0	0	+++	0	++	0
	solvants	0	0	+++ / 0	0 / +	0	0
	eau	++	++	++	++	+	+++
	imperméabilité aux gaz	+	+	++	+++	+	0
	acides faibles	++	++	+	+++	++	+++
	acides forts	+	+	0	+++	+	+++

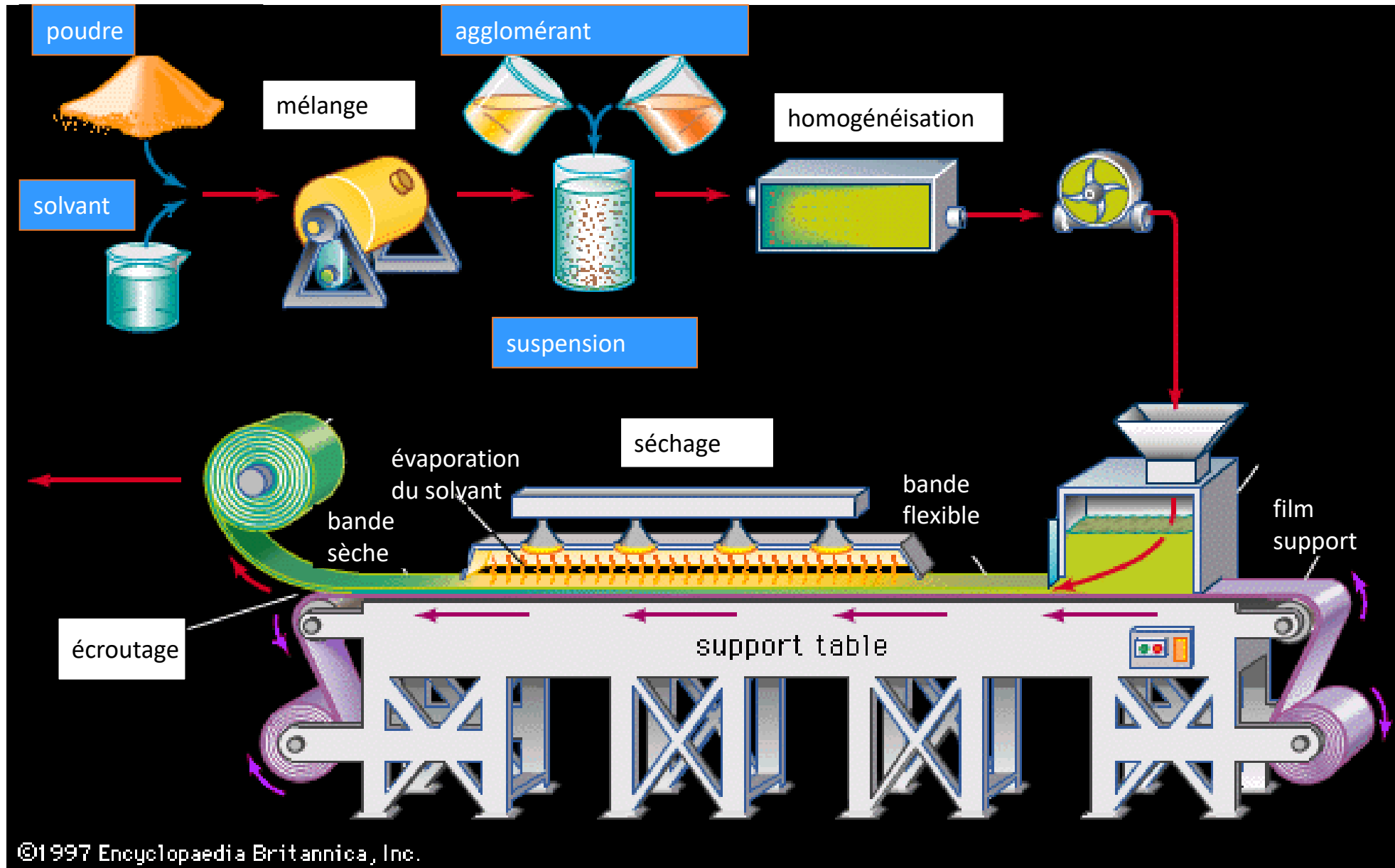
Exemples: pneumatiques, courroies, tapis, tuyaux, amortisseurs, joints d'étanchéité, revêtements divers, pièces mécaniques, chaussures...

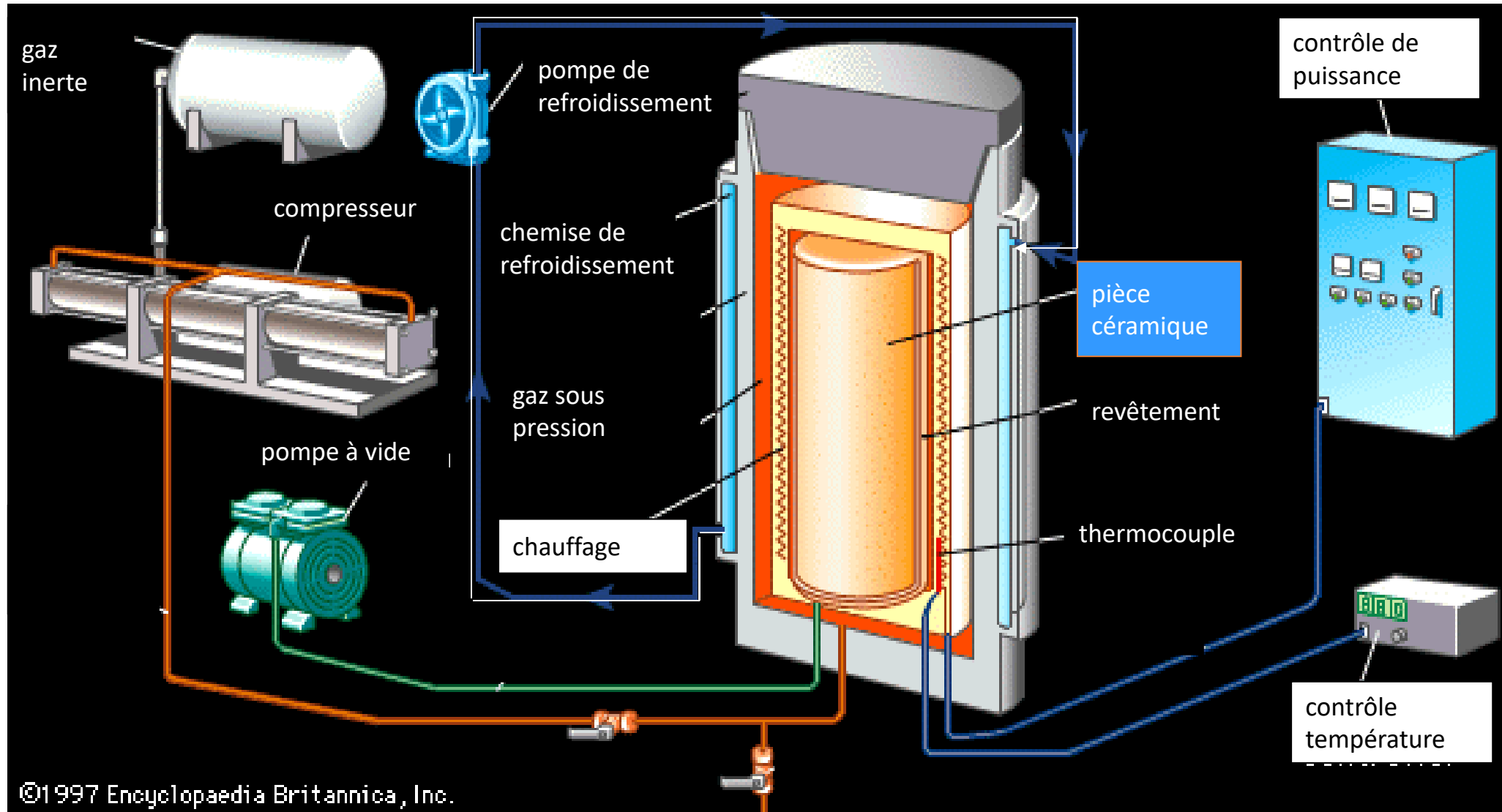


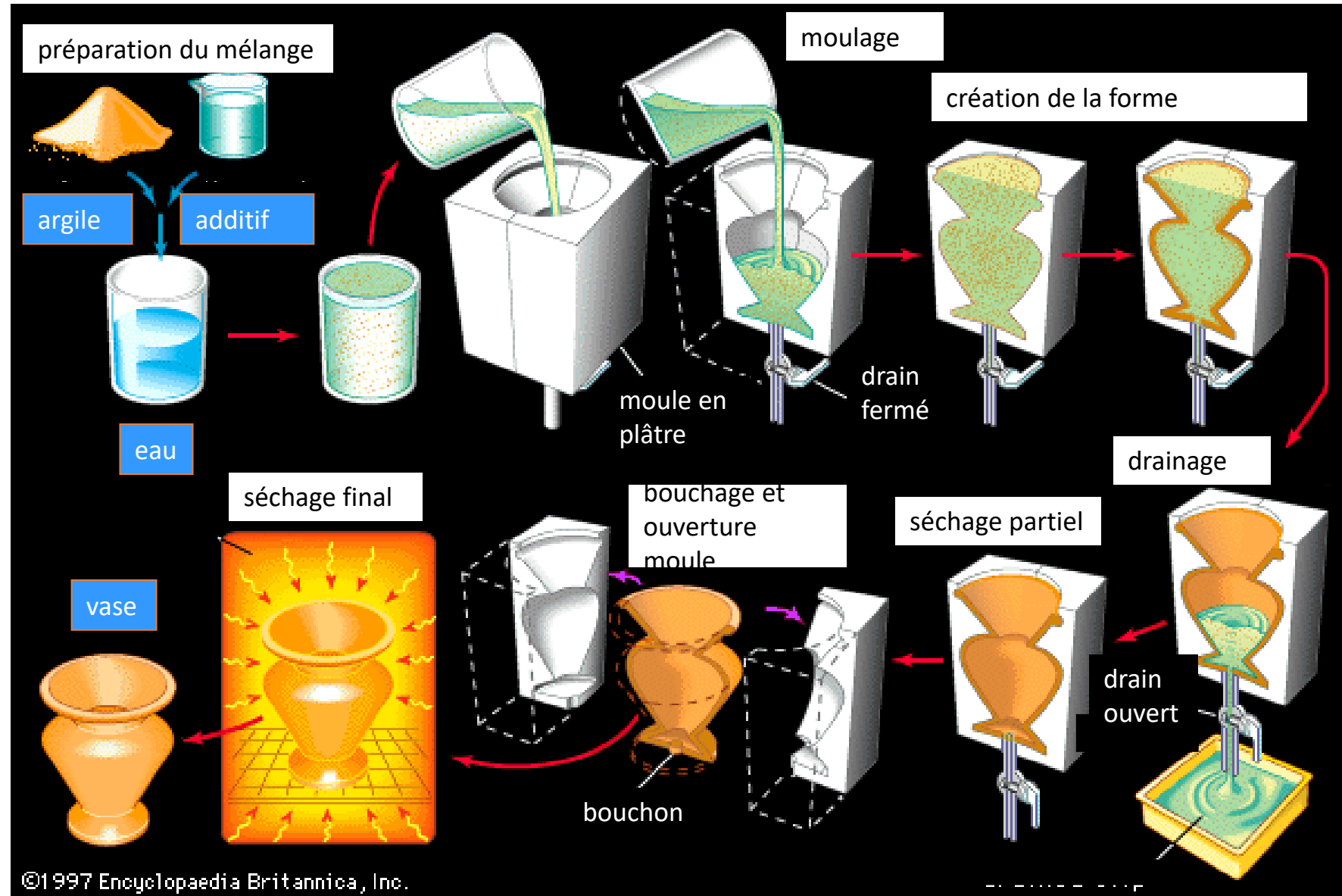


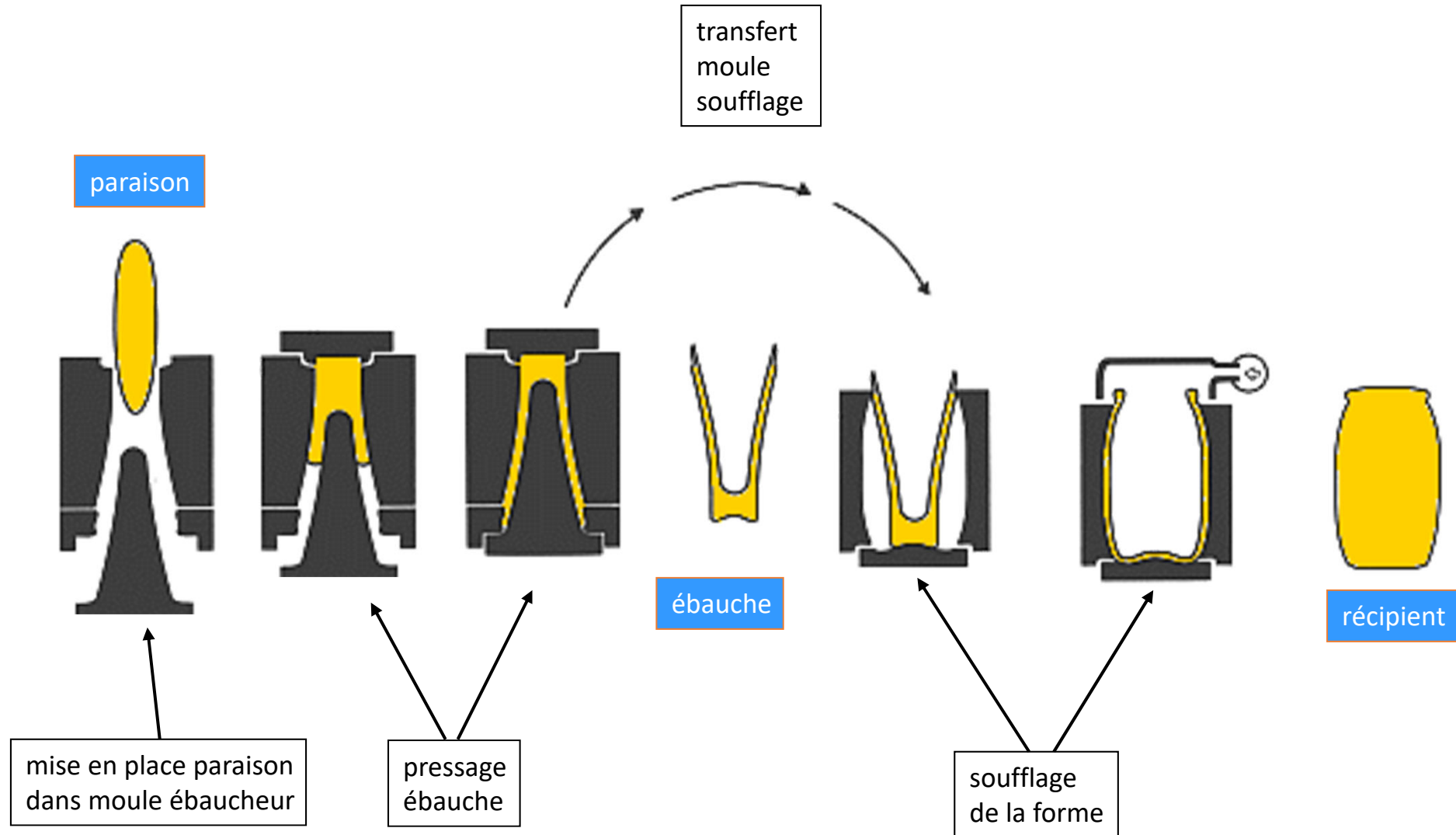
Céramiques traditionnelles				
nuances		matières premières		exemples d'emploi
produits poreux	terre-cuite	marnes, argiles		tuiles, briques, horticulture, art
	faïence	argile, silice, quartz		vaisselle, carrelage (mur), art
	produits grésés	argile, kaolin, feldspath		carrelage (sol)
	réfractaires	argile réfractaire, silice, chamotte, alumine, magnésie carbone-graphite...		ciment, béton brique pour four produits frittés
produits vitrifiés	grès cérame	argile, chamotte, silice		éviers, lavabos, baignoires
	vitréous	argile, kaolin, feldspath, silice		
	porcelaine	kaolin, argile, feldspath, quartz		vaisselle, art, génie électrique
verres		silice SiO ₂ alumine Al ₂ O ₃ oxydes chaux NA ₂ O... magnésie MgO	sodico-calcique	vitres, flacons, ampoules
			crystal (oxyde de plomb)	vaisselle, art, optique
			borosilicate	résistant aux chocs termiques
			aluminosilicate	résistance à la chaleur
			spéciaux	optique, laser, fibre optique
abrasifs		oxydes, carbures, diamant		meules, papiers abrasifs



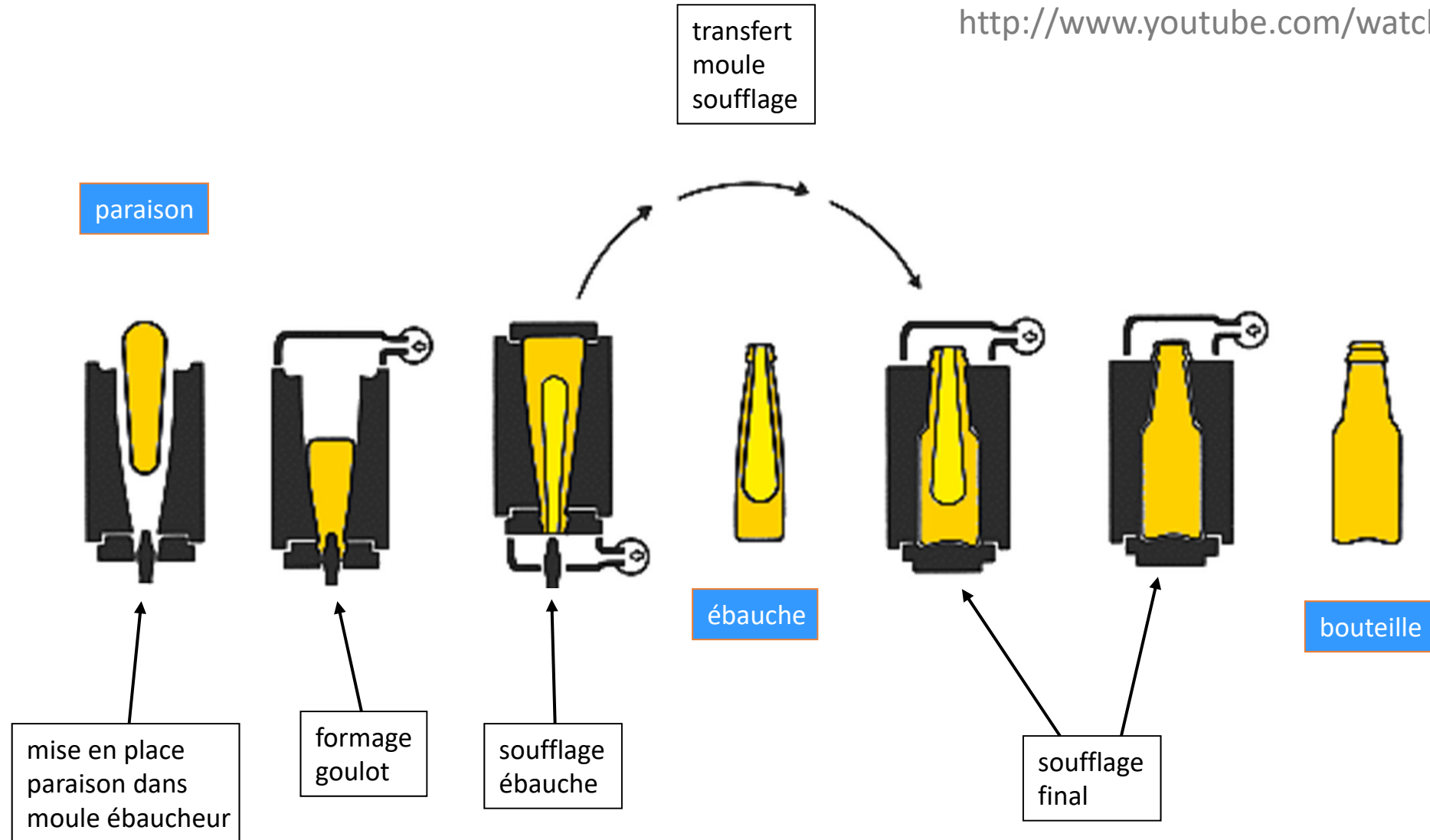


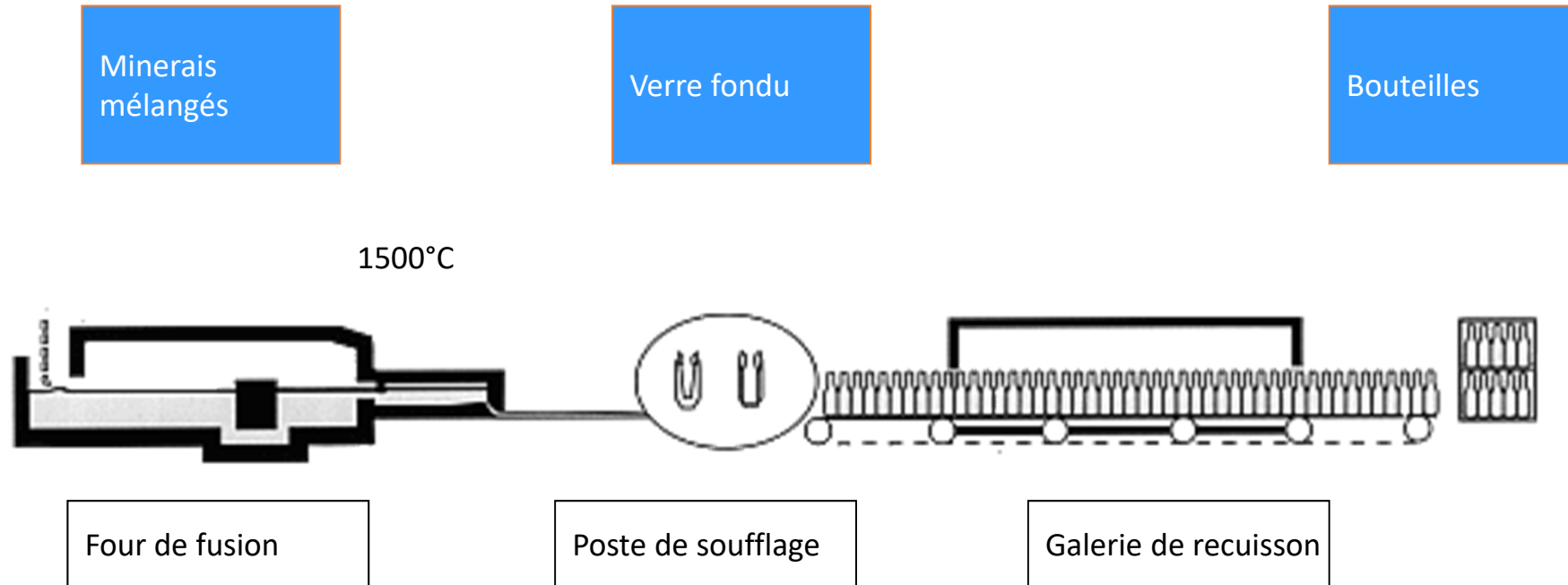


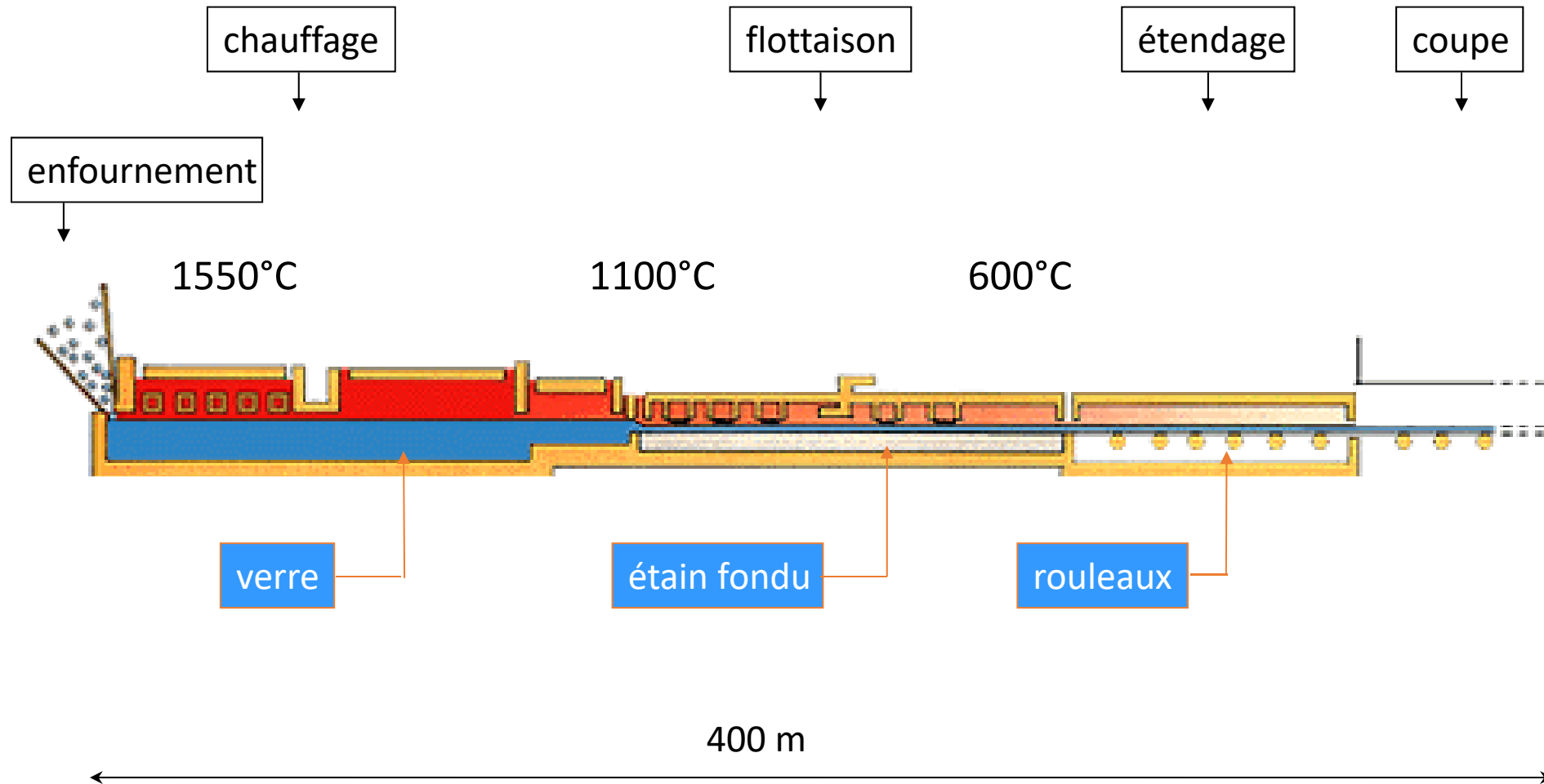


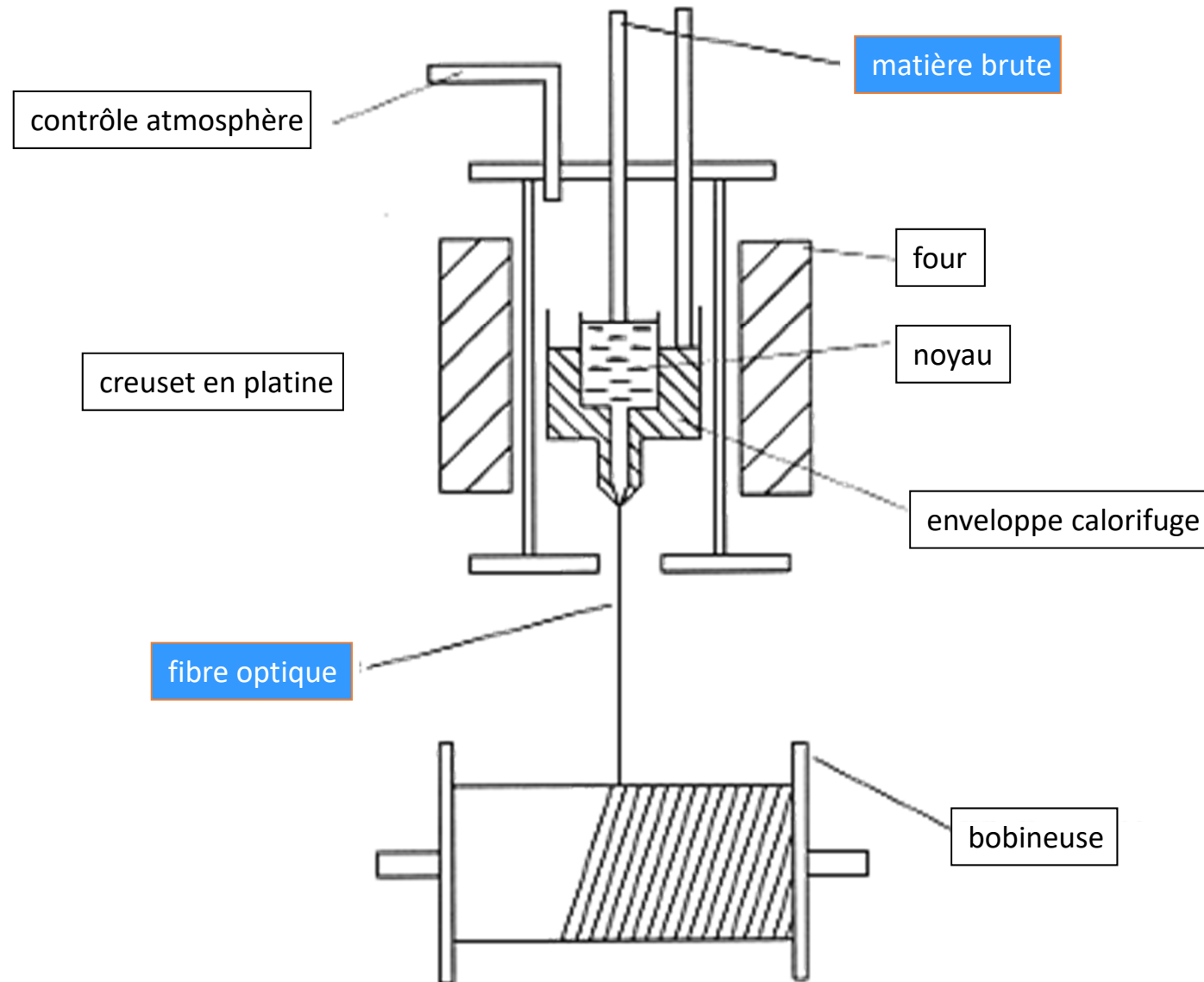


http://www.youtube.com/watch?v=LUF_5zrFG9c











<http://matweb.com/>