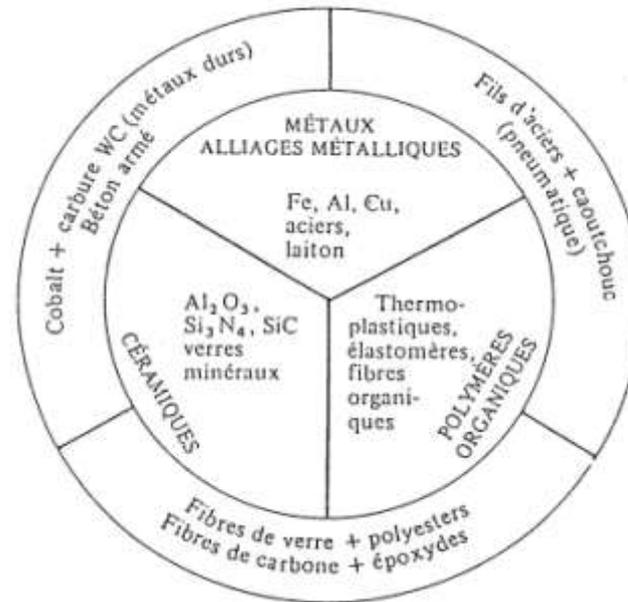


Matériaux

IUFM Master



IUT ALENÇON

Organisation

12 h de cours, TD et TP en 4 séances de 3h.

Notation :

Contrôle continu .

Examen: QCM.

Références

1. Précis de Métallurgie
2. Précis de Matières Plastiques
3. **Matériaux** (2 volumes), *Ashby*
4. Précis de Fonderie
5. Les Plastiques, *Maurice Reyne*
6. Matériaux Composites, *Daniel Gay*

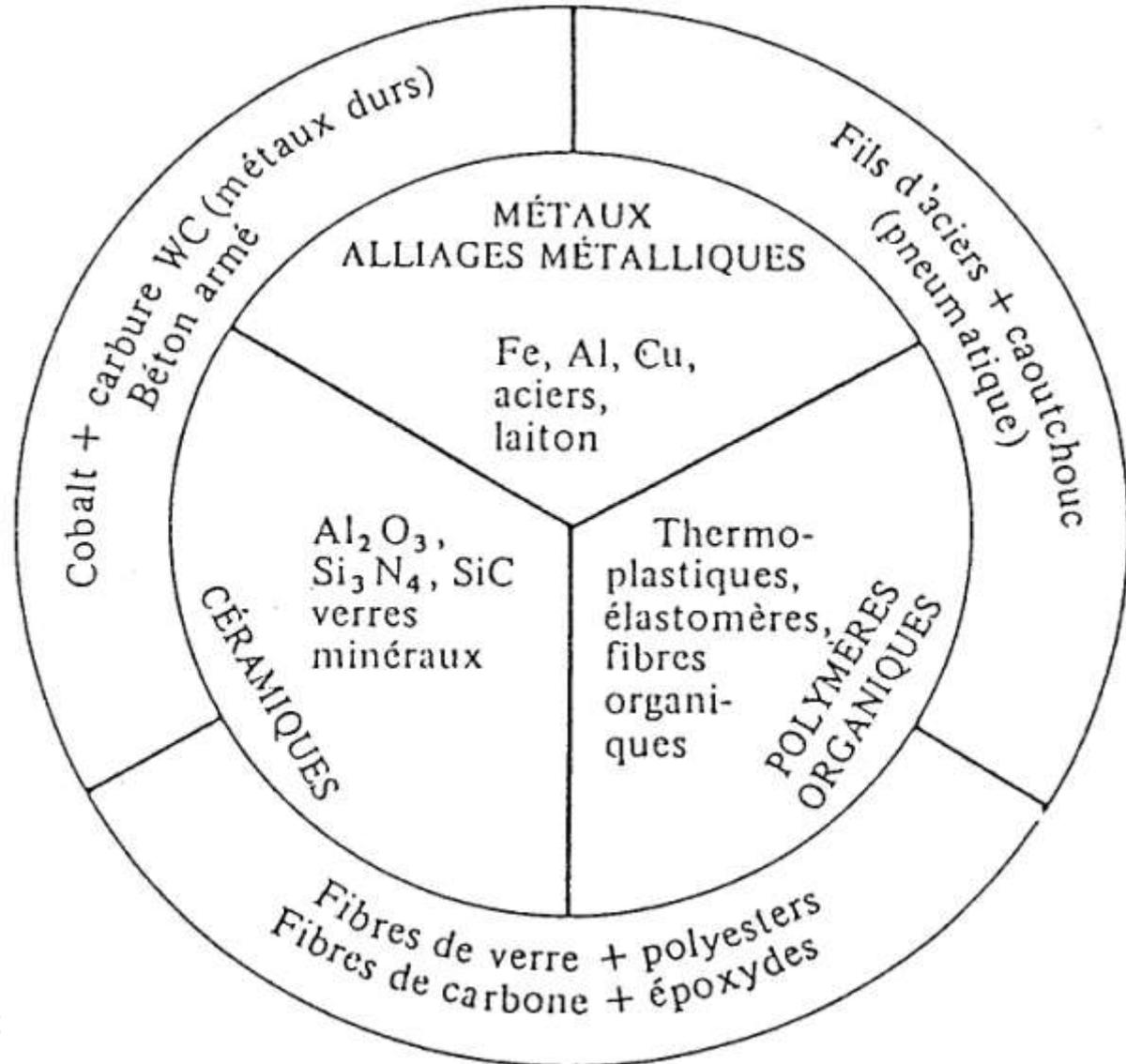
Sommaire

- Familles des matériaux
 - Métaux
 - Céramiques
 - Polymères
 - Composites
 - Nano-matériaux et nano-composites
- Constitution des matériaux
 - Liaisons chimiques
 - Structures cristallines
 - Structures amorphes
 - Défauts cristallins
- Propriétés des matériaux
 - Mécaniques
 - Electriques et électronique
 - Thermiques
 - ...
- Choix des matériaux

Trois Classes de Matériaux

- Métaux
- Polymères
- Céramiques

- Composites





Nanomatériaux?

Matériaux haute performances?

Matériaux naturels?

Constitution des matériaux

Liaisons Chimiques

4 possibilités

3 liaisons fortes

- liaison ionique
- liaison covalente
- liaison métallique

1 liaison faible

- liaisons secondaires

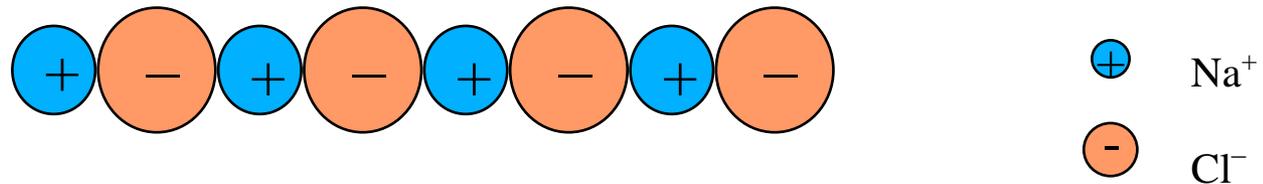
3.2.1 Liaison ionique

Association des ions positifs et des ions négatifs

Exemple: NaCl

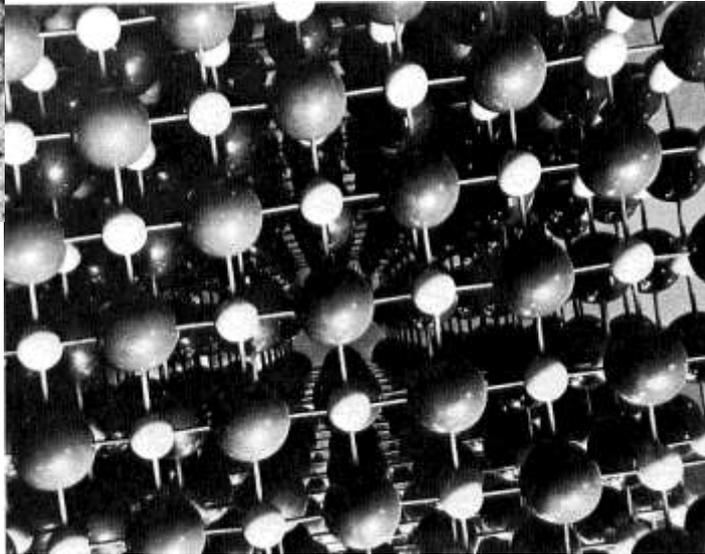
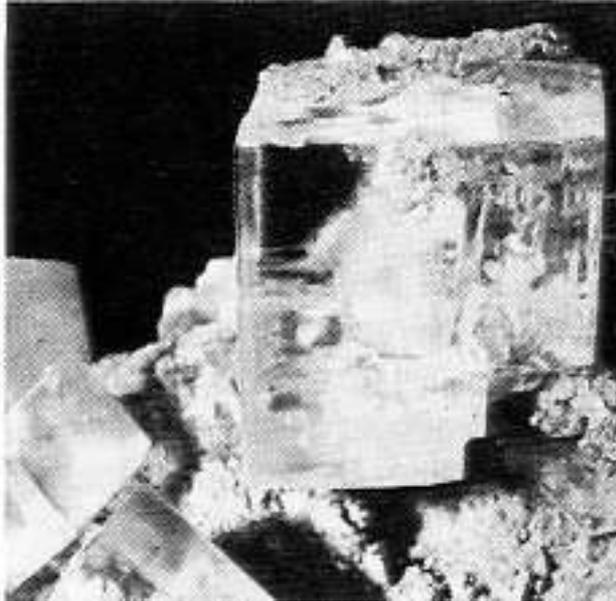
- Sodium a 11 électrons (1 e⁻ de valence)
- Chlorure: 17 électrons (7 e⁻ de valence)

Na⁺Cl⁻ :



Autre exemple : la fluorine CaF₂

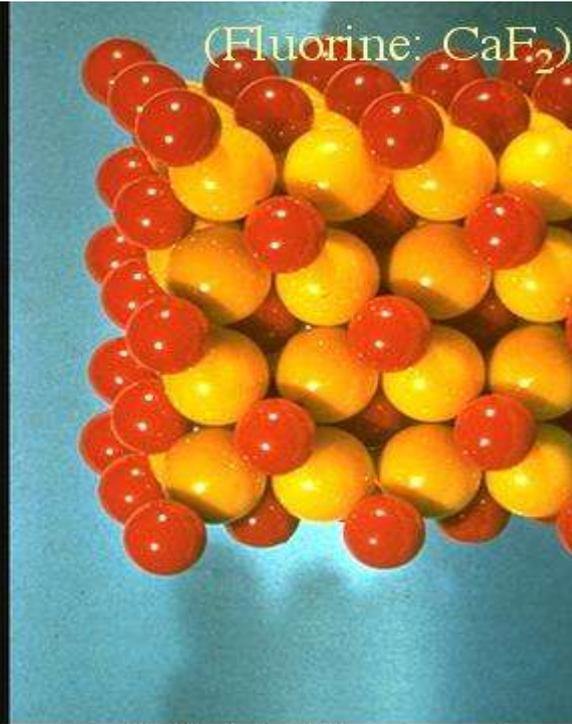
Origine de liaison : force électrostatique entre les ions.



Exemple d'un cristal ionique : CaF_2



Macroscopiquement: des cristaux aux formes définies.



A l'échelle atomique: des structures que l'on détermine par diffraction des rayons X.

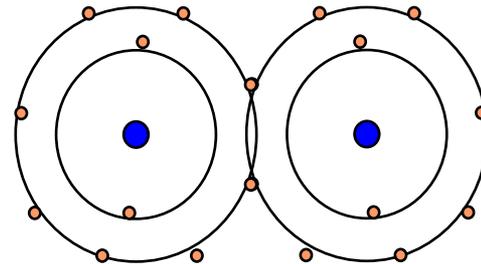
3.2.2 Liaison Covalente

Association de 2 atomes identiques

Exemple: molécule de Fluor F_2

Fluor a 9 électrons (7 e^- de valence)

F_2^- :



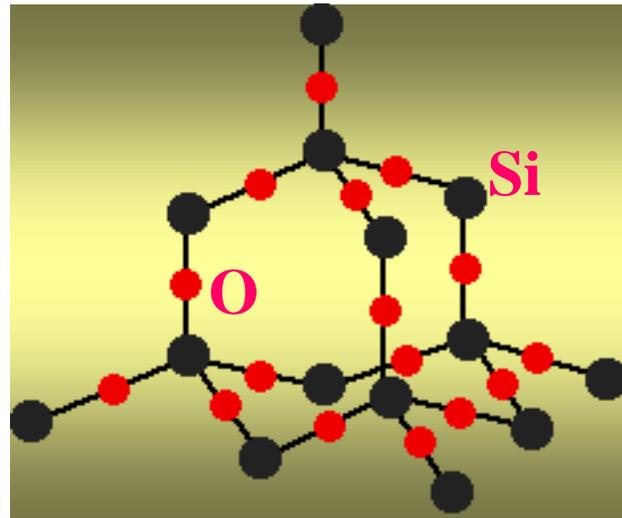
Exemple : diamant, Si, Ge, SiO₂...

Propriétés : très rigide et très fragile

Origine de liaison: force électrostatique entre les électrons et les noyaux.

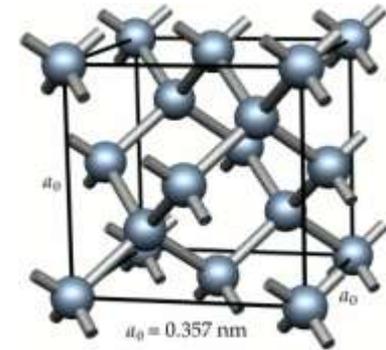
Exemples des solides covalentes

Quartz



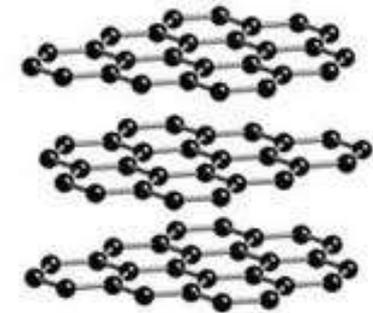
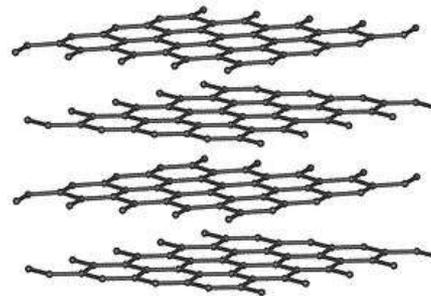
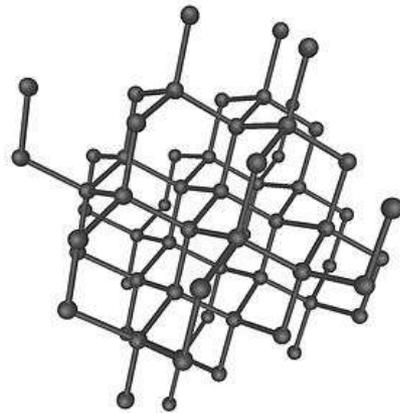
Structure de la cristobalite SiO_2
partiellement ionique

Carbone



Diamant

structure tétraédrique liée par covalence forte.

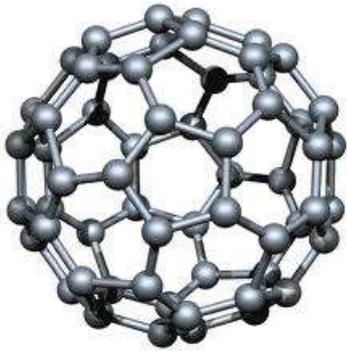


Graphite

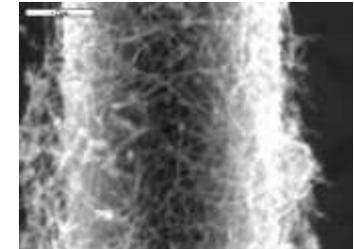
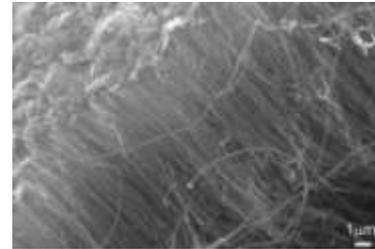
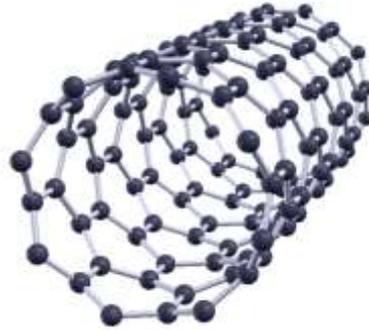
structure en plans liés par forces de Van der Waals.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Diamond_and_graphite.jpg

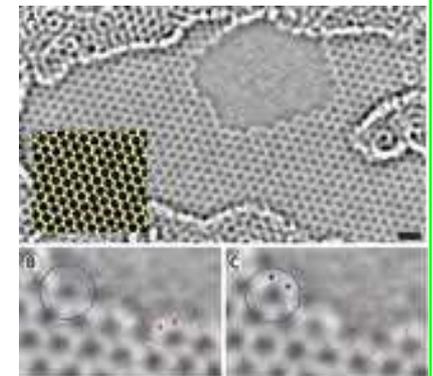
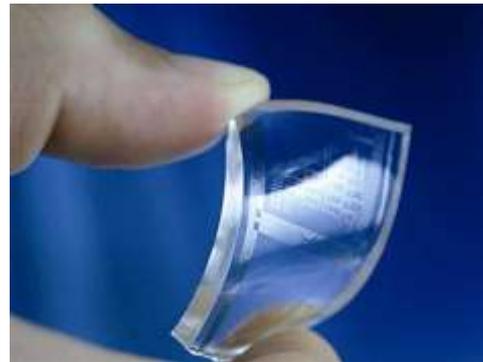
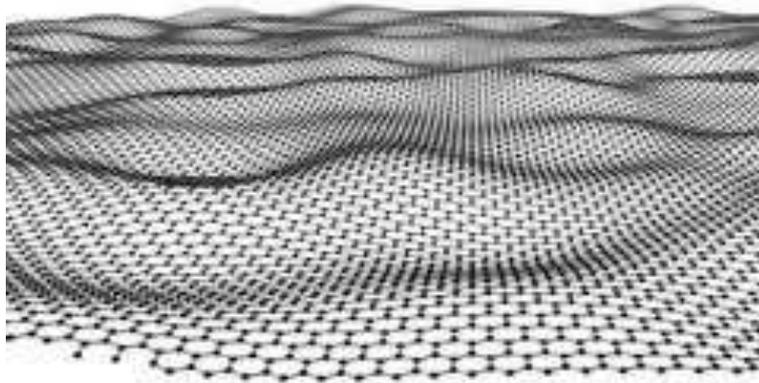
Carbone



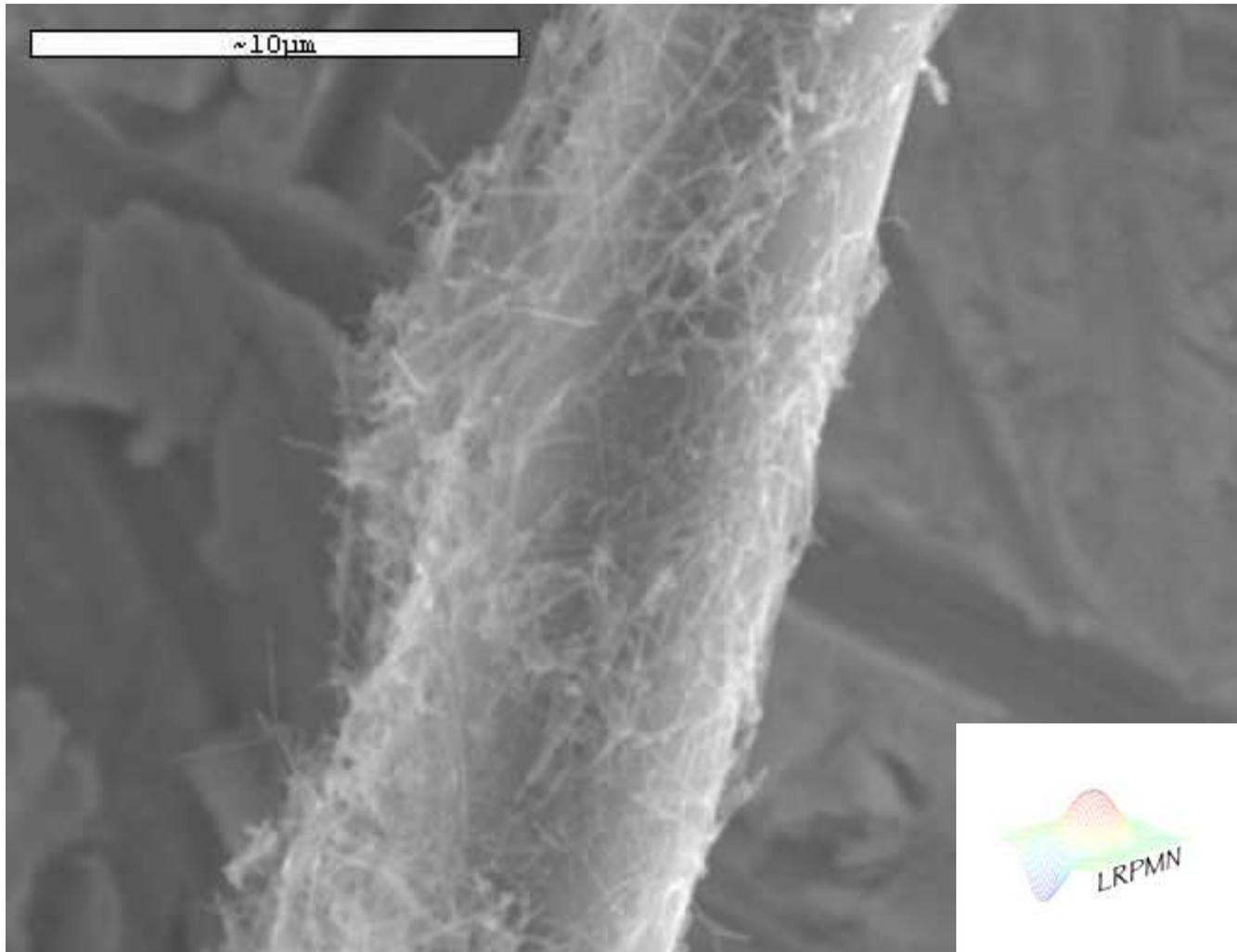
Fullerène C60



Nanotubes



Graphène

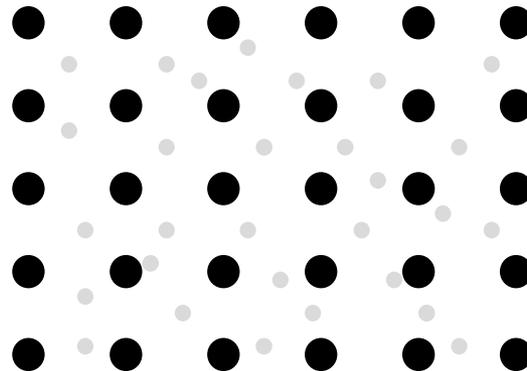


Greffage de nanotubes de carbone sur une fibre de carbone.

3.2.3 Liaison Métallique

Mis en commun de toutes les électrons de valence

Exemple: Na. Sodium a 11 électrons (1 e⁻ de valence)



Exemples : K, Ni, Fe, Cr, Mo, ...

Propriétés : solide et déformable

Origine de liaison: force électrostatique entre les électrons et les noyaux.

3.2.4 Liaisons secondaires

Les liaisons faibles sont créées par les interactions électrostatiques entre les **dipôles** électriques :

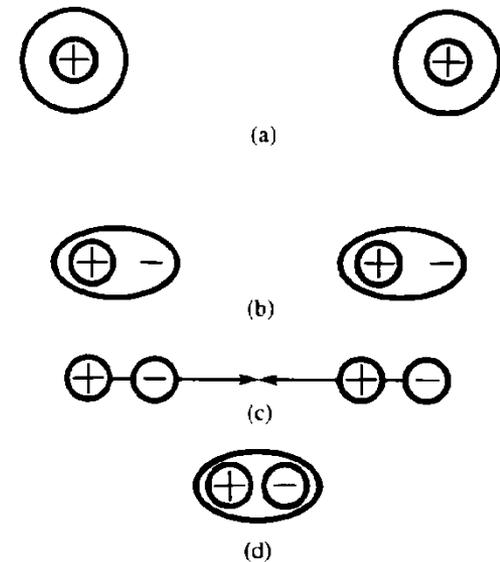
Liaison de Van der Waals

Dipôle électrique: le décalage des centres de charge + ou - dans une molécule,

Pont d'Hydrogène :

un cas particulier de la liaison de Van der Waals

Exemple: liaison entre les chaîne de polymères



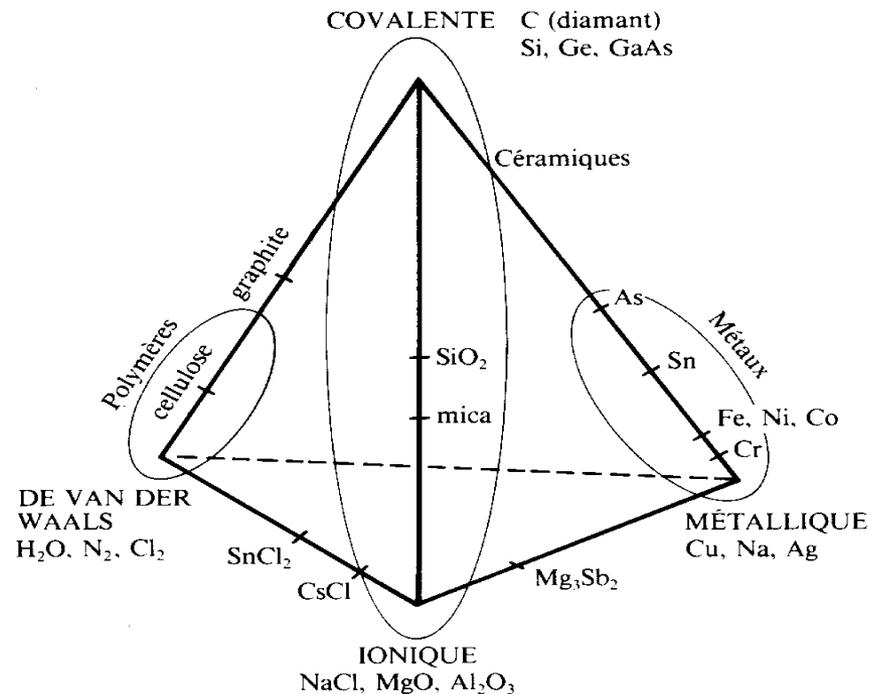
(1) création d'un dipôle induit (a, b et c)

(2) dipôle permanent (d)

Liaisons Chimiques (Résumé)

- 4 types de liaisons possibles

- les liaisons mixtes



Conséquences des différentes liaisons sur les propriétés des matériaux

Type de liaison	Propriétés				
	T_f	E	α	σ	Ductilité
Covalente	e	e	f	f	f
Ionique	e	e	f	f	f
Métallique	m-e	m-e	m-f	m-e	e
De van der Waals	f	f	e	f	m-f

Légende

T_f = température de fusion

e = élevé

E = module élastique

m = moyen

α = coefficient de dilatation

f = faible

σ = conductivité électrique

Propriétés physiques des Matériaux

- Général
- Electrique
- Thermique
- Mécanique
- Magnétique
- Optique

Propriétés de quelques matériaux

General properties	Propriétés générales	Unit	AIN	Cu	PE	Al/SiC	CFRP
Density	Masse Volumique	kg/m ³	3295	8935	950	2780	1550
Price	Prix	EUR/kg	99.1	5.335	1.32	5.315	30.9
Mechanical properties	Propriétés mécaniques						
Young's modulus	Module de Young	GPa	325	130	0.7585	90.5	109.5
Shear modulus	Module de cisaillement	GPa	132.5	48.5	0.266	34.45	44
Bulk modulus	Module de compressibilité	GPa	216	137.5	2.2	75.5	61.5
Poisson's ratio	Coefficient de Poisson		0.245	0.345	0.426	0.3	0.306
Yield strength (elastic limit)	Limite élastique	MPa	325	190	23.45	302	800
Tensile strength	Résistance en traction	MPa	325	250	32.75	327.5	800
Compressive strength	Résistance à la compression	MPa	2235.0	190.0	25.8	302.5	640.0
Elongation	Allongement	% strain	0	26.5	500	3	0.335
Hardness - Vickers	Mesure de dureté Vickers	HV	1125	112	7.05	105	16.15
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	Limite de fatigue	MPa	208	100	22	80	225
Fracture toughness	Ténacité	MPa.m ^{0.5}	2.95	60	1.58	19.5	13.06
Mechanical loss coefficient (tan delta)	Coefficient d'amortissement (tan delta)		2.00E-05	2.68E-03	5.45E-02	5.00E-03	2.35E-03
Thermal properties	Propriétés thermiques						
Melting point	Température de fusion	°C	2455.0	1031.0	128.5	576.0	140.0
Maximum service temperature	Température maximale d'utilisation	°C	1380.0	240.0	100.0	297.0	180.0
Minimum service temperature	Température minimale d'utilisation	°C	-136.5	-136.5	-98.1	-136.5	-98.1
Thermal conductor or insulator?	Conducteur ou isolant thermique?		Good/Bon	Bon conducteur	Bon isolant	Bon conducteur	Mauvais isolant
Thermal conductivity	Conductivité thermique	W/m.°C	170	275	0.419	130	1.94
Specific heat capacity	Chaleur spécifique	J/kg.°C	800	380	1845	850	971
Thermal expansion coefficient	Coefficient de dilatation	µstrain/°C	5.2	17.45	162	19	2.5
Glass temperature	Température de transition vitreuse	°C			-20.2		
Electrical properties	Propriétés électriques						
Electrical conductor or insulator?	Conducteur ou isolant électrique?		Good insulator	Bon conducteur	Bon isolant	Bon conducteur	Mauvais conducteur
Electrical resistivity	Résistivité électrique	µohm.cm	5.05E+20	3.38E+00	1.52E+24	8.50E+00	5.56E+05
Dielectric constant (relative permittivity)	Constante diélectrique (permittivité relative)		8.8		2.3		
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	Facteur de dissipation (tangente de perte diélectrique)		7.10E-04		4.50E-04		
Dielectric strength (dielectric breakdown)	Rigidité diélectrique (claquage diélectrique)	1000000 V/m	18.5		18.7		
Optical properties	Propriétés optiques						
Transparency	Transparent ou opaque?		Opaque	Opaque	Translucide	Opaque	Opaque
Refractive index	Indice de réfraction				1.51		
Processability	Possibilités de traitement						
Moldability	Aptitude à être moulé		2.5		4.5		4.5
Machinability	Usinabilité		1.5	4.5	3.5	2	2
Formability	Formabilité			4.5		2	
Castability	Coulabilité			4	1.5	3.5	
Weldability	Soudabilité			1.5	2.5	1	
Solder/brazability	Aptitude au soudage/brasage			2.5			
Eco properties	Propriétés environnementales						
Embodied energy, primary production	Energie intrinsèque, production primaire	MJ/kg	220	71	80.95	275	272.5
CO2 footprint, primary production	Empreinte CO2, production primaire	kg/kg	11.9	5.25	2.055	15	17.3
Recycle	Recyclable		False	True	True	True	False

4 Propriétés Fondamentales

(Mécaniques)

- **Rigidité: E**

la raideur des liaisons interatomiques

- **Ductilité: A_r**

la capacité de la déformation plastique

- **Résistance à la traction: R_m**

la résistance maximale nominale

- **Ténacité: K**

la propriété de la fissuration

Propriétés Mécaniques des Matériaux

Contraintes et déformation

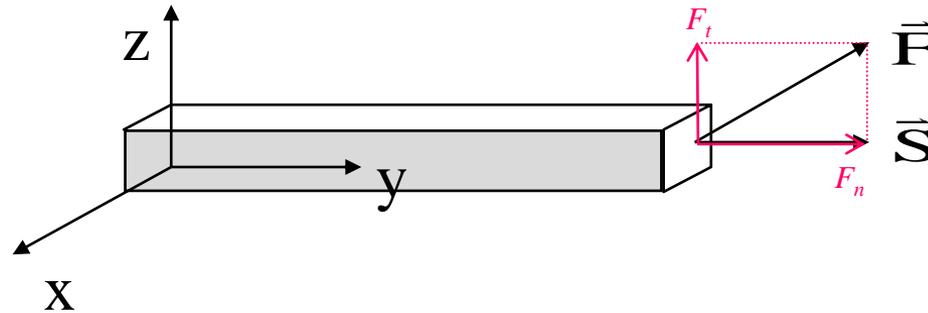
- Contraintes
- Déformations

Constantes élastiques

Plasticité et essai de traction

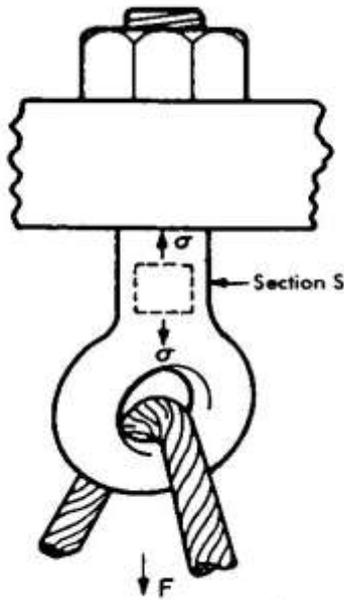
Contraintes

$$\vec{\sigma} = \frac{d\vec{F}}{dS}$$

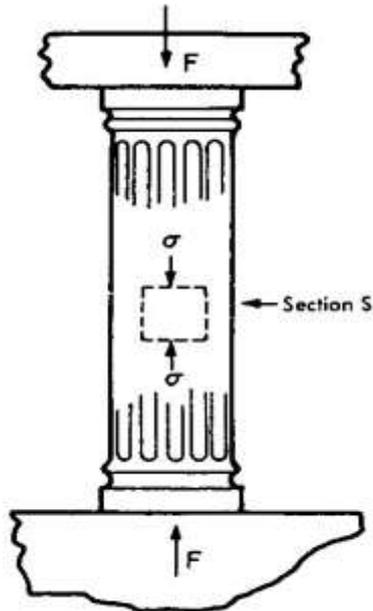


Contrainte de traction : $\sigma_n = \frac{F_n}{S}$
(Direction normale)

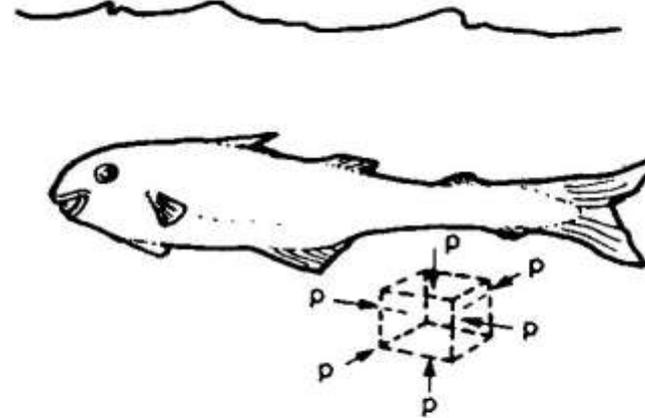
Contrainte de cisaillement : $\sigma_t = \frac{F_t}{S}$
(Direction tangentielle)



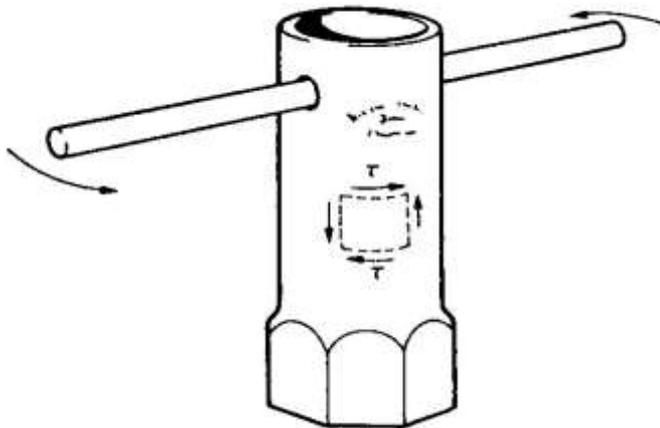
Traction simple, $\sigma = \frac{F}{S}$



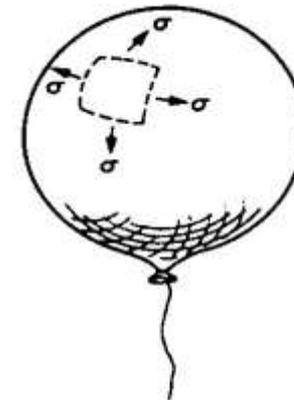
Compression simple, $\sigma = \frac{F}{S}$



Pression hydrostatique, $p = -\frac{F}{S}$



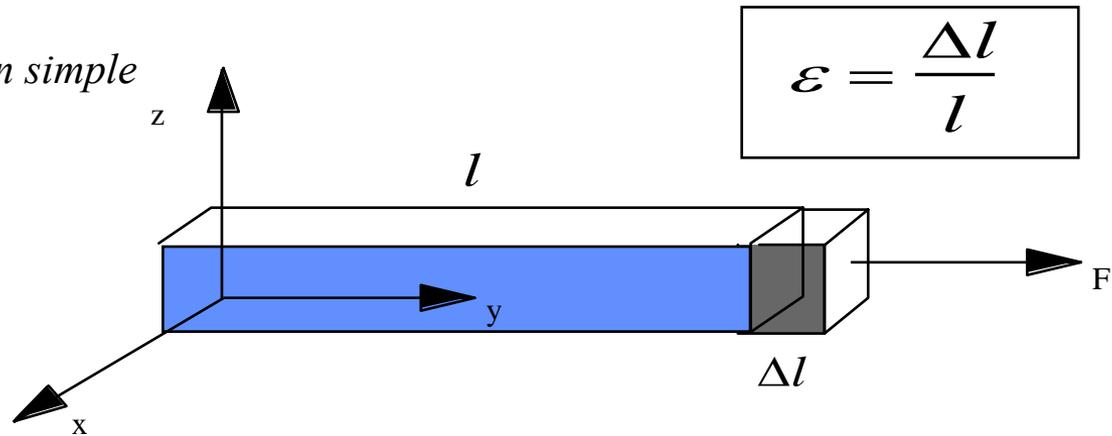
Cission pure, $\tau = \frac{F_t}{S}$



Traction biaxiale, $\sigma = \frac{F}{S}$

Déformations

- *Déformation simple*



- *Distorsion*

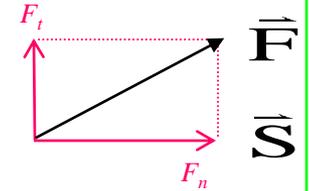
$$\gamma = \frac{u}{l_y} = \operatorname{tg} \theta \approx \theta$$

- *Dilatation*

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V}$$

Constantes Élastiques

Modules d'Élasticité



$$\sigma_n = E \varepsilon \quad E : \text{le module de Young}$$

$$\sigma_t = G \theta \quad G : \text{le module de Coulomb}$$

$$p = -\kappa \Delta \quad \kappa : \text{le module de compressibilité}$$

Coefficient de Poisson

$$\nu = -\frac{\text{déformation latérale}}{\text{déformation longitudinale}} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

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

$$\kappa = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Les quatre constantes élastiques E , G , κ , ν ne sont pas indépendantes.

Module de Young E

Diamant E=1000 GPa

Fer et aciers E~200 GPa

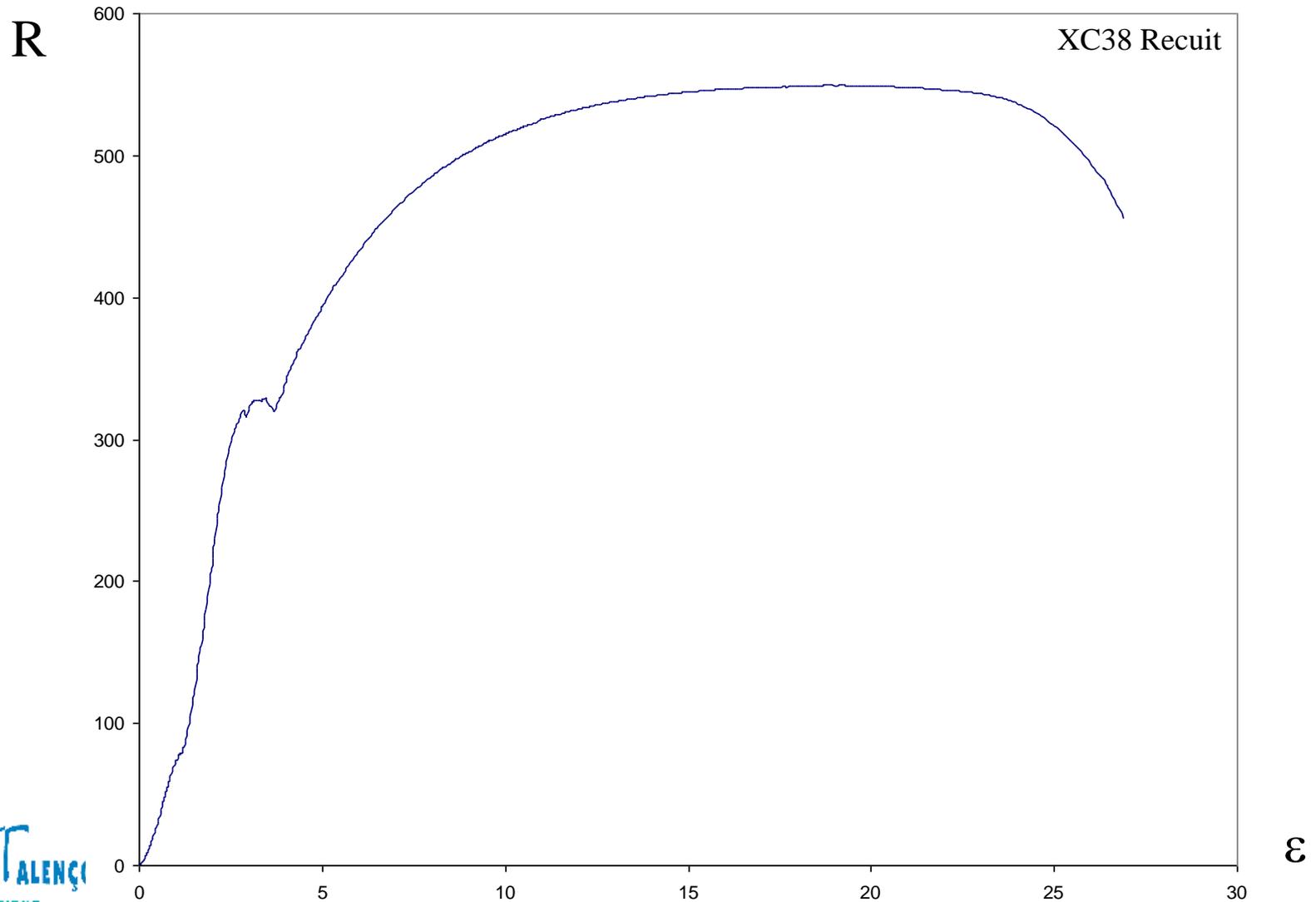
Aluminium E~70 GPa

Polymères E < 5 GPa

Polyimides	3-5
Polyesters	1-5
Résines acryliques	1,6-3,4
Nylon	2-4
PMMA	3,4
Polystyrène	3-3,4
Polycarbonate	2,6
Résines époxydes	3
Bois courants (\perp aux fibres)	0,6-1,0
Polypropylène	0,9
Polyéthylène très dense	0,7
Mousse de polyuréthane	0,01-0,06
Polyéthylène peu dense	0,2
Caoutchoucs	0,01-0,1
PVC	0,003-0,01
Polymères expansés	0,0001-0,01

Zircon ZrO ₂	145	Polyéthylène très dense	0,7
Vanadium	130	Mousse de polyuréthane	0,01-0,06
Titane	116	Polyéthylène peu dense	0,2
Alliages de titane	80-130	Caoutchoucs	0,01-0,1
Palladium	124	PVC	0,003-0,01
Laitons et bronzes	103-124	Polymères expansés	0,0001-0,01

Plasticité et essai de traction



Matériau	R_e en MPa	R_m en MPa	A_R en %
Magnésie, MgO	3000	-	0
Cobalt et ses alliages	180-2000	500-2500	0,01-6
Aciers faiblement alliés (trempés à l'eau et recuits)	500-1980	680-2400	0,02-0,3
Aciers pour réservoirs pressurisés	1500-1900	1500-2000	0,3-0,6
Aciers inoxydables, austénitiques	286-500	760-1280	0,45-0,65
Composites bore/époxyde (traction-compression)	-	725-1730	-
Alliages de nickel	200-1600	200-2000	0,01-0,3

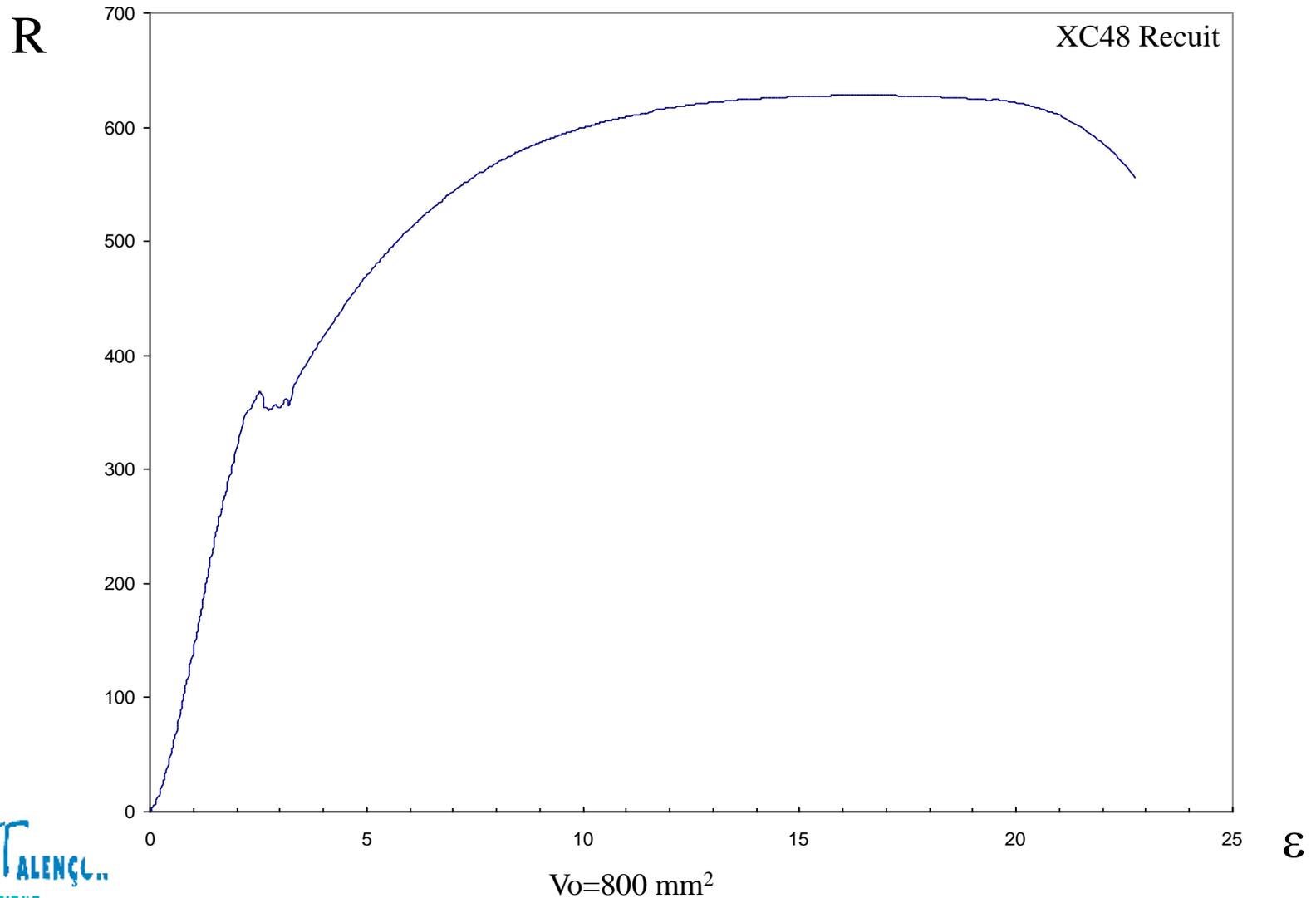
Matériau	R_e en MPa	R_m en MPa	A_R en %
Diamant	50 000	-	0
Carbure de silicium, SiC	10 000	-	0
Nitride de silicium, Si ₃ N ₄	8000	-	0
Silice vitreuse, SiO ₂	7200	-	0
Carbure de tungstène, WC	6000	-	0
Carbure de niobium, NbC	6000	-	0
Alumine, Al ₂ O ₃	5000	-	0
Béryll, BeO	4000	-	0
Mullite	4000	-	0
Carbure de titane, TiC	4000	-	0
Carbure de zirconium, ZrC	4000	-	0
Carbure de tantale, TaC	4000	-	0
Zircone, ZrO ₂	4000	-	0
Verre sodique (standard)	3600	-	0

Polymères	52-90	-	-
Nylons	49-87	100	-
Glace	85	-	0
Métaux ductiles, purs	20-80	200-400	0,5-1,5
Polystyrène	34-70	40-70	-
Argent	55	300	0,6
ABS/polycarbonate	55	60	-
Bois ordinaires (compression, aux fibres)	-	35-55	-
Plomb et ses alliages	11-55	14-70	0,2-0,8
Acrylique/PVC	45-48	-	-
Etain et ses alliages	7-45	14-60	0,3-0,7
Polypropylène	19-36	33-36	-
Polyuréthane	26-31	58	-
Polyéthylène, de forte densité	20-30	37	-
Béton non armé, en compression	20-30	-	0
Caoutchouc naturel	-	30	5,0
Polyéthylène, de faible densité	6-20	20	-
Bois ordinaires (compression, aux fibres)	-	4-10	-
Métaux CFC ultrapurs	1-10	200-400	1-2
Polymères expansés, rigides	0,2-10	0,2-10	0,1-1
Mousse de polyuréthane	1	1	0,1-1

Tableau 8.1 : La limite d'élasticité R_e , la résistance à la traction R_m , et la ductilité en traction A_R .

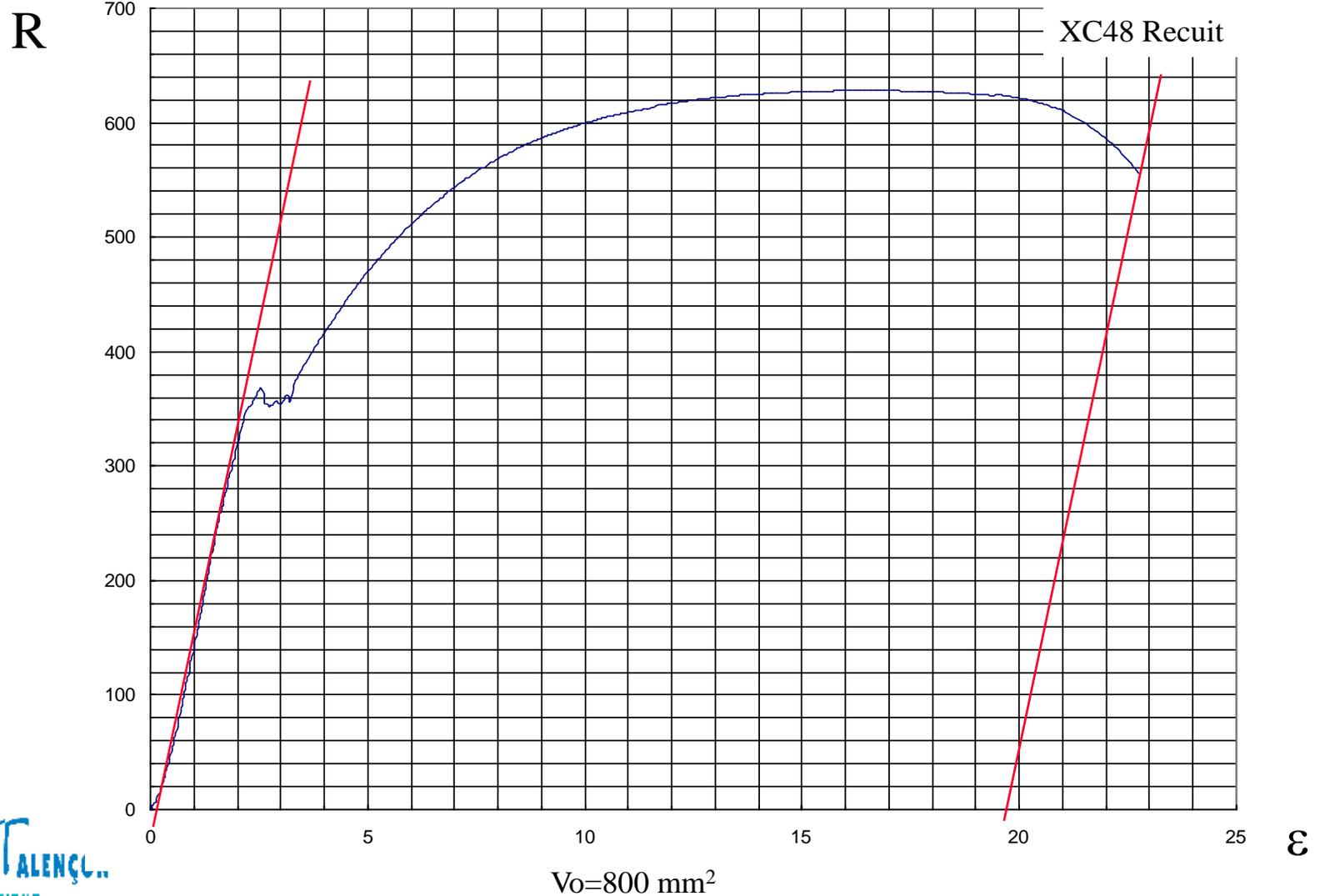
Exercice

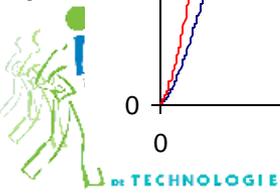
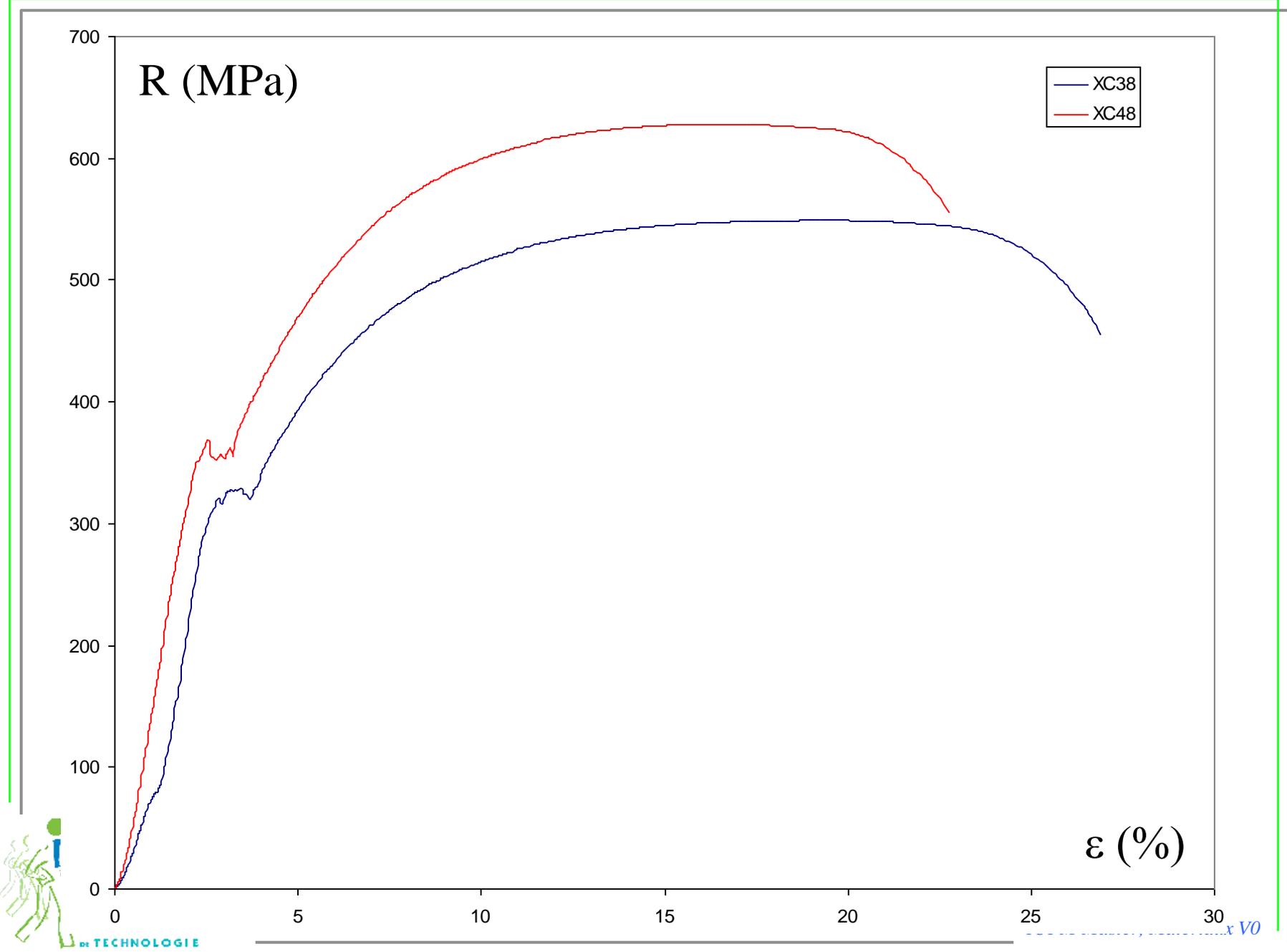
Un essai de traction uniaxiale a été effectué sur un acier XC48 recuit. La figure de cette page montre la courbe de traction conventionnelle. Etudiez les propriétés mécaniques de cet échantillon et comparez avec celles de XC38 recuit.

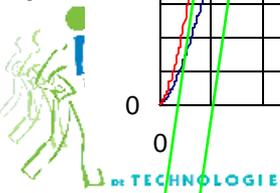
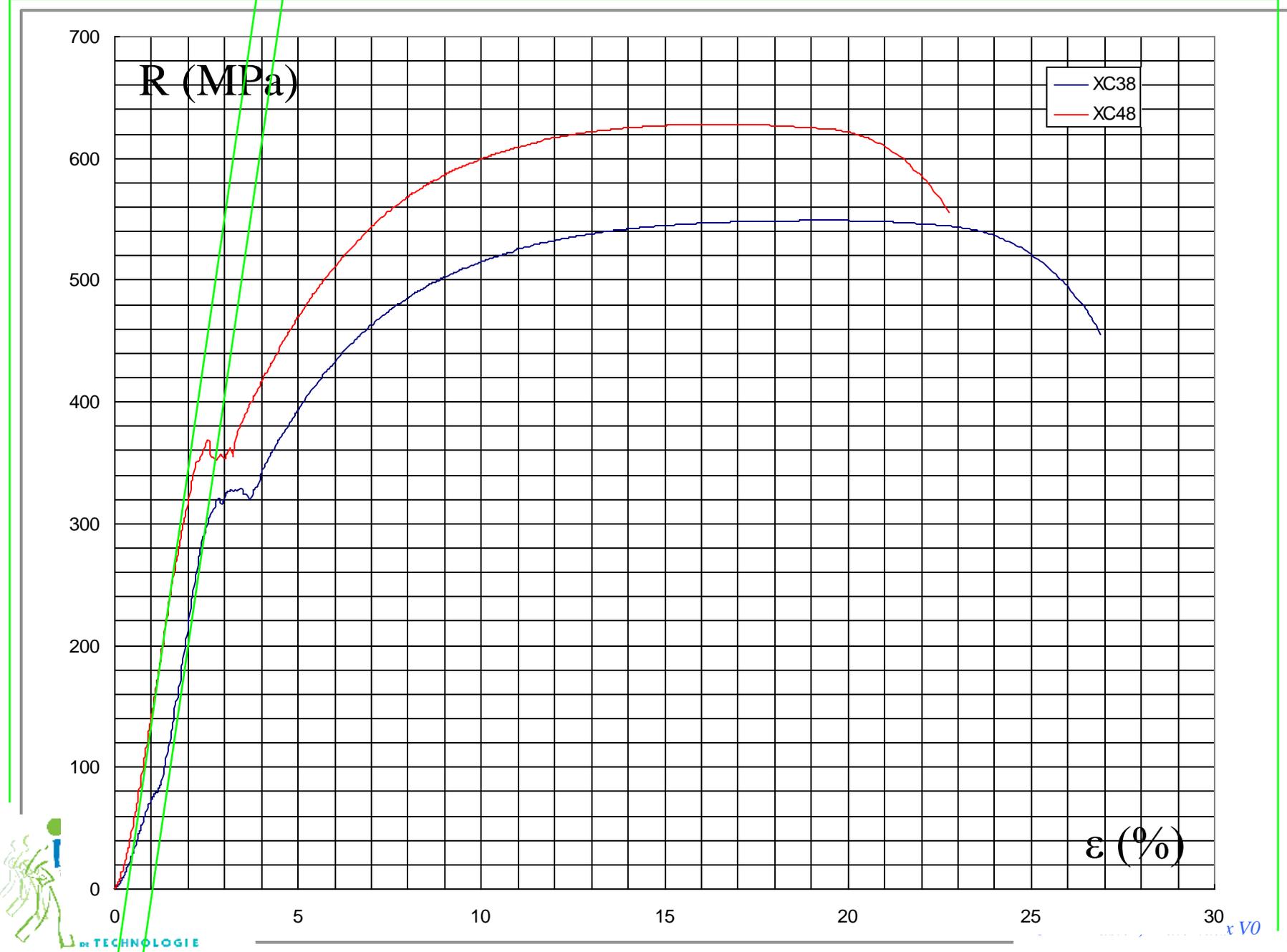


Exercice

Un essai de traction uniaxiale a été effectué sur un acier XC48 recuit. La figure de cette page montre la courbe de traction conventionnelle. Etudiez les propriétés mécaniques de cet échantillon et comparez avec celles de XC38 recuit.







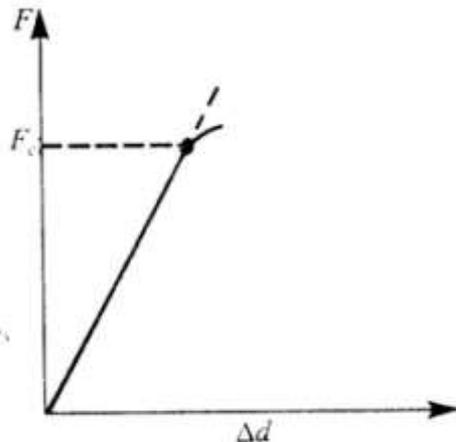
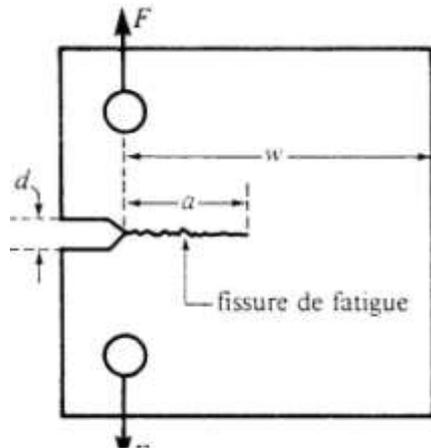
Propriétés ruptures

Fissuration et rupture brutale

Ténacité

Fatigue et fluage

Essai de ténacité



Matériau	G _c /kJ m ⁻²	K _{IC} /MN m ^{-3/2}
Métaux purs ductiles (ex : Cu, Ni, Ag, Al)	100-1000	100-350
Acier à rotors (A533; Discalloy)	220-240	204-214
Acier pour réservoir sous pression (HY 130)	150	170
Acier à haute résistance (HSS)	15-118	50-154
Acier doux	100	140
Alliages de titane (Ti-Al6V4)	26-114	55-115
PRFVs	10-100	20-60
Bois usuels, fissure ⊥ au grain	8-20	11-13
Fibre de bore/époxyde	17	46
Acier à moyenne teneur en carbone	13	51
Polypropylène	8	3
Polyéthylène (faible densité)	6-7	1
Polyéthylène (haute densité)	6-7	2
ABS/polystyrène	5	4
Nylon	2-4	3
Béton armé	0,2-4	10-15
Fonte	0,2-3	6-20
Polystyrène	2	2
Bois usuels, fissure // au grain	0,5-2	0,5-1
Polycarbonate	0,4-1	1,0-2,6
Cermets carbure de tungstène/cobalt	0,3-0,5	14-16
PMMA	0,3-0,4	0,9-1,4
Epoxydes	0,1-0,3	0,3-0,5
Granit	0,1	3
Polyester	0,1	0,5
Nitride de silicium, Si ₃ N ₄	0,1	4-5
Beryllium	0,08	4
Carbure de silicium, SiC	0,05	3
Magnésie, MgO	0,04	3
Béton (non armé)	0,03	0,2
Calcite (marbre, calcaire)	0,02	0,9
Alumine Al ₂ O ₃	0,02	3-5
Schiste	0,02	0,6
Verre sodique	0,01	0,7-0,8
Porcelaine électrique	0,01	1
Glace	0,003	0,2*

* Valeurs à température ambiante s'il n'y a pas d'asterisque.

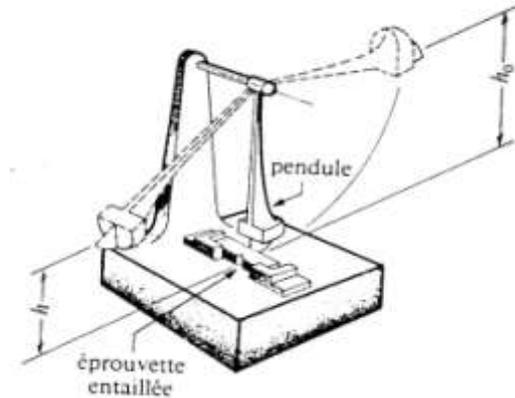
$$K_{IC} = \alpha \sigma_c \sqrt{\pi a_c}$$

**INSTITUT
UNIVERSITAIRE
DE TECHNOLOGIE**

Exercice

On réalise un essai de résilience Charpy sur deux aciers A et B dont certaines propriétés mécaniques sont données ci-dessous avec les valeurs de l'énergie de rupture W enregistrée à la température ambiante :

Acier	$R_{e0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	W (J)
A	540	780	60
B	520	750	70



1. Quelle est la définition de $R_{e0,2}$?
2. Comment mesurer W ?
3. Quel acier a la ténacité la plus élevée? Pourquoi?
4. Si on suppose que la courbe de traction des deux aciers est linéaire dans les domaines élastique et plastique, quel acier possède l'allongement à la rupture (A_r) le plus élevé? Pourquoi?

Des pièces fabriquées avec ces deux aciers peuvent contenir des fissures dont le facteur géométrique α est égal à 1,2. Lorsque ces pièces sont soumises à une contrainte de traction égale à la moitié de la limite d'élasticité de l'acier utilisé, on observe que la longueur critique des fissures est de 8,7 mm pour des pièces fabriquées dans l'acier A et de 15,2 mm dans celles fabriquées à partir de l'acier B.

1. Quelle est la valeur de la ténacité K_{IC} de chacun de ces aciers A et B ?
2. Calculez la longueur maximale des fissures qui ne provoqueront jamais la rupture brutale des pièces faites en acier soit A, soit B

Essais Mécaniques : traction

Essai de traction

Machines de traction

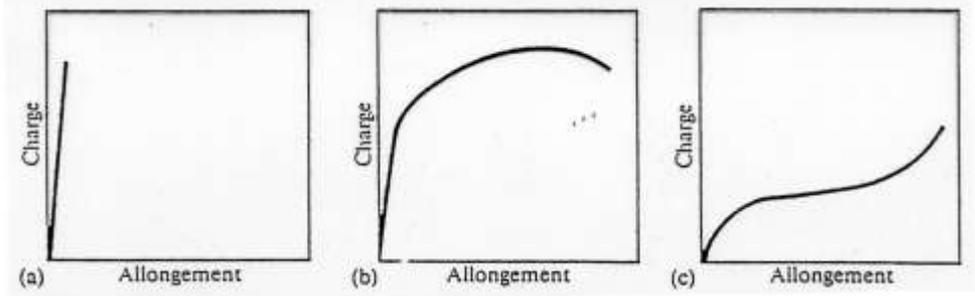
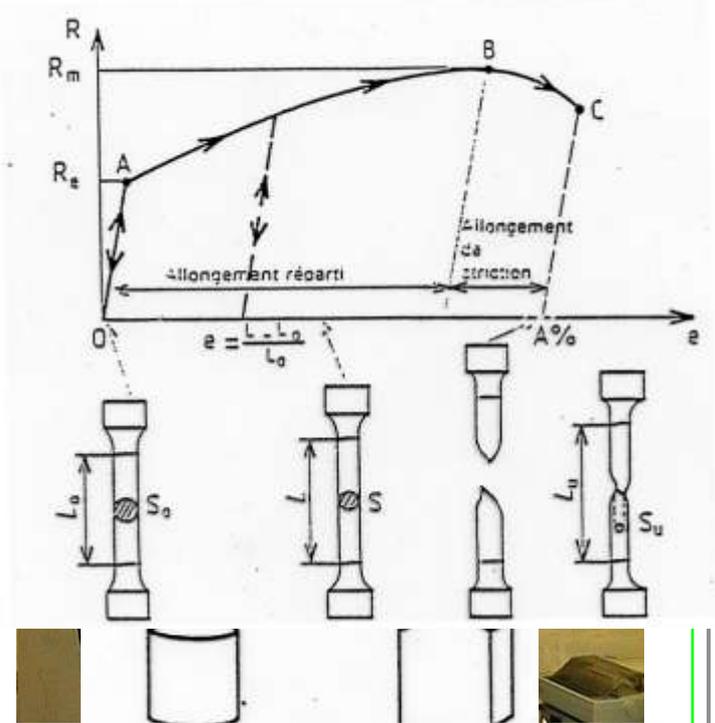
Eprouvettes normalisées

Courbe conventionnelle (3 domaines)

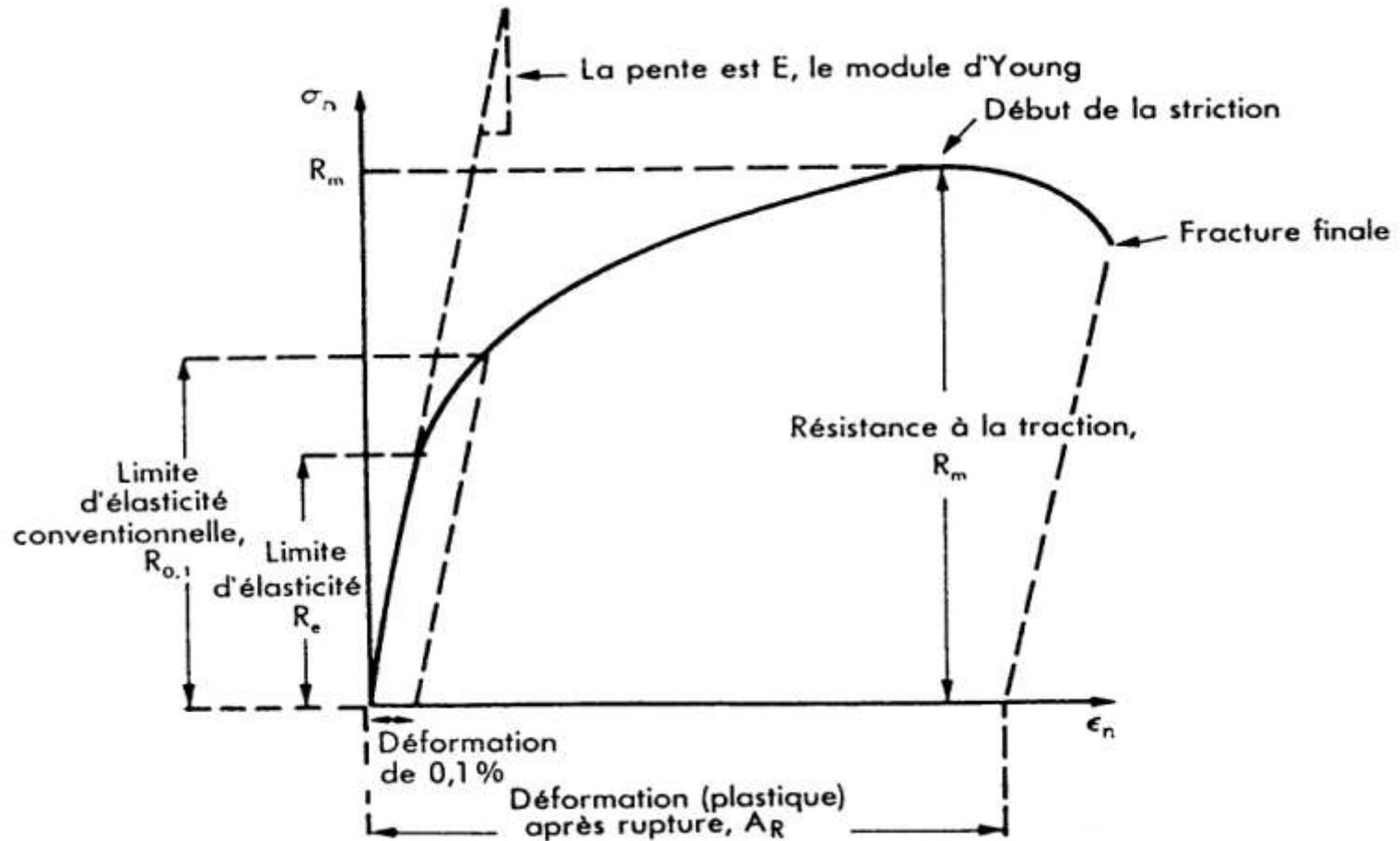
3 types de comportement

Propriétés mécaniques mesurées

(R_e , R_m , A_r , E , R_r , Z , W)



Essais Mécaniques : traction



Matériau	R_e en MPa	R_m en MPa	A_R en %
Diamant	50 000	-	0
Carbure de silicium, SiC	10 000	-	0
Nitride de silicium, Si ₃ N ₄	8000	-	0
Silice vitreuse, SiO ₂	7200	-	0
Carbure de tungstène, WC	6000	-	0
Carbure de niobium, NbC	6000	-	0
Alumine, Al ₂ O ₃	5000	-	0
Béryll, BeO	4000	-	0
Mullite	4000	-	0
Carbure de titane, TiC	4000	-	0
Carbure de zirconium, ZrC	4000	-	0
Carbure de tantale, TaC	4000	-	0
Zircone, ZrO ₂	4000	-	0
Verre sodique (standard)	3600	-	0

Matériau	R_e en MPa	R_m en MPa	A_R en %
Magnésie, MgO	3000	-	0
Cobalt et ses alliages	180-2000	500-2500	0,01-6
Aciers faiblement alliés (trempés à l'eau et recuits)	500-1980	680-2400	0,02-0,3
Aciers pour réservoirs pressurisés	1500-1900	1500-2000	0,3-0,6
Aciers inoxydables, austénitiques	286-500	760-1280	0,45-0,65
Composites bore/époxyde (traction-compression)	-	725-1730	-
Alliages de nickel	200-1600	400-2000	0,01-0,6
Nickel	70	400	0,65
Tungstène	1000	1510	0,01-0,6
Molybdène et ses alliages	560-1450	665-1650	0,01-0,36
Titane et ses alliages	180-1320	300-1400	0,06-0,3
Aciers au carbone (trempés à l'eau et recuits)	260-1300	500-1880	0,2-0,3
Tantale, et ses alliages	330-1090	400-1100	0,01-0,4
Fontes	220-1030	400-1200	0-0,18
Alliages de cuivre	60-960	250-1000	0,01-0,55
Cuivre	60	400	0,55
"Cermets" WC/Co	400-900	900	0,02
PRFC (traction-compression)	-	670-640	-
Laitons et bronzes	70-640	230-890	0,01-0,7
Alliages d'aluminium	100-627	300-700	0,05-0,3
Aluminium	40	200	0,5
Aciers inoxydables, ferritiques	240-400	500-800	0,15-0,25
Alliages de zinc	160-421	200-500	0,1-1,0
Béton armé (renforcés à l'acier ; traction ou compression)	-	410	0,02
Halogénures d'alcalin	200-350	-	0
Zirconium et ses alliages	100-365	240-440	0,24-0,37
Acier doux	220	430	0,18-0,25
Fer	50	200	0,3
Alliages de magnésium	80-300	125-380	0,06-0,20
PRFV	-	100-300	-
Béryllium et ses alliages	34-276	380-620	0,02-0,10
O ₂	40	220	0,5
PMMA	60-110	110	-
Epoxydés	30-100	30-120	-
Polyimides	52-90	-	-
Nylons	49-87	100	-
Glace	85	-	0
Métaux ductiles, purs	20-80	200-400	0,5-1,5
Polystyrène	34-70	40-70	-
Argent	55	300	0,6
ABS/polycarbonate	55	60	-
Bois ordinaires (compression, //aux fibres)	11-55	35-55	-
Plomb et ses alliages	45-48	14-70	0,2-0,8
Acrylique/PVC	7-45	-	-
Etain et ses alliages	19-36	14-60	0,3-0,7
Polypropylène	26-31	33-36	-
Polyuréthane	20-30	58	-
Polyéthylène, de forte densité	20-30	37	-
Béton non armé, en compression	20-30	-	0
Caoutchouc naturel	-	30	5,0
Polyéthylène, de faible densité	6-20	20	-
Bois ordinaires (compression, ⊥ aux fibres)	-	4-10	-
Métaux CFC ultrapur	1-10	200-400	1-2
Polymères expansés, rigides	0,2-10	0,2-10	0,1-1
Mousse de polyuréthane	1	1	0,1-1

Tableau 8.1 : La limite d'élasticité R_e , la résistance à la traction R_m , et la ductilité en traction A_R .

Essais Mécaniques : dureté

Essai de dureté

Principe général

$$H = F/S$$

Unité?

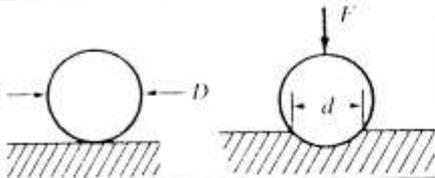
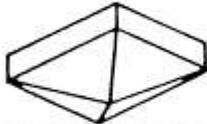
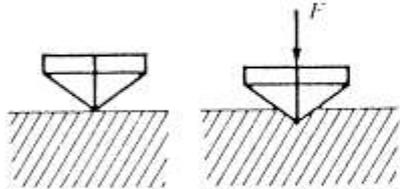
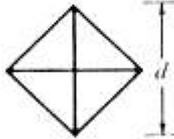
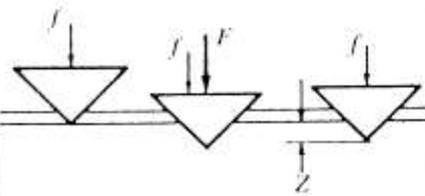
3 types d'essai

Brinell: HB

Vickers: HV

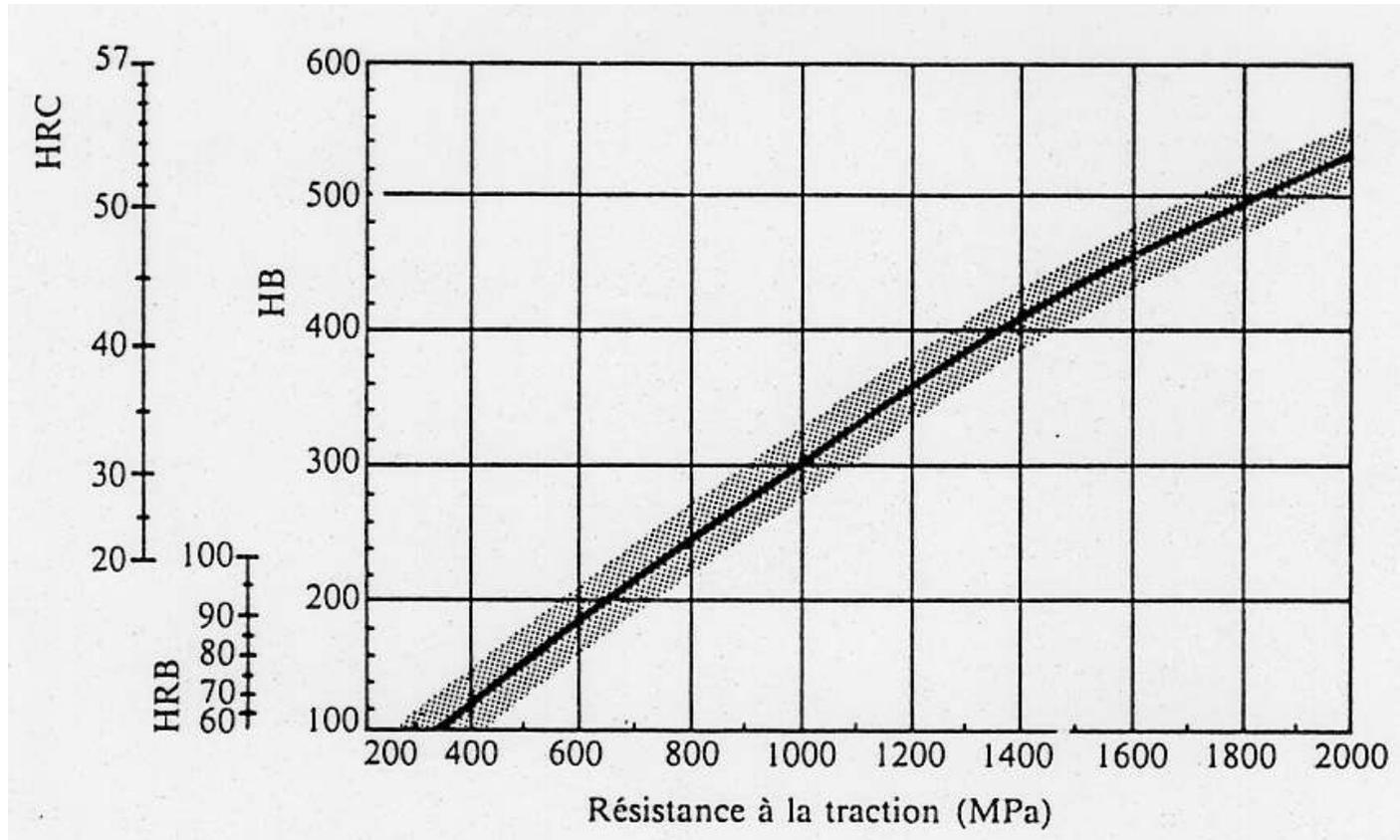
Rockwell: HRC, HRB, HRA,

Tableau de correspondance

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

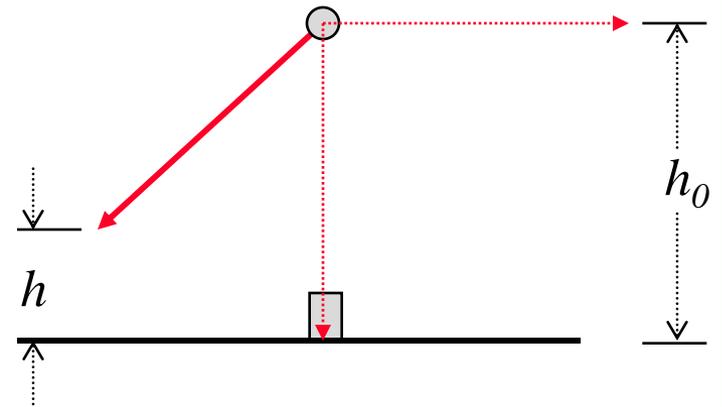
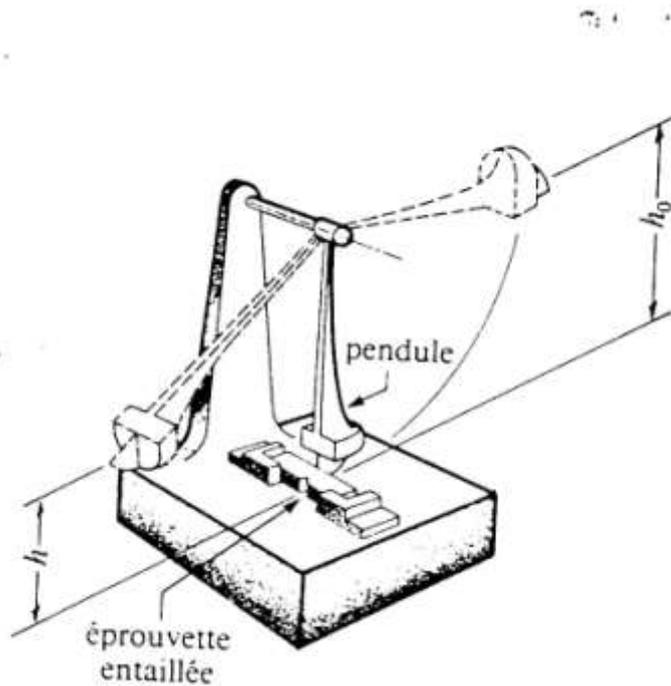
VALEURS MÉDIANES DES BANDES DE CONVERSION SELON NF A 03-172 ET NF A 03-173

DURETÉ HV F ≥ 98,1 N	DURETÉ HBS HBW	DURETÉ HRA	DURETÉ HRB	DURETÉ HRC	DURETÉ HRD	RÉSISTANCE A LA TRACTION R _m (MPa)	DURETÉ HV F ≥ 98,1 N	DURETÉ HBS HBW	DURETÉ HRA	DURETÉ HRC	DURETÉ HRD	RÉSISTANCE A LA TRACTION R _m (MPa)
80	76,0					280	350	332,5	68,1	35,5	51,9	1120
85	80,7					310	360	342,0	68,7	36,6	52,8	1160
90	85,5					320	370	351,5	69,2	37,7	53,8	1190
95	90,2					340	380	361,0	69,8	38,8	54,4	1220
100	95,0					350	390	370,5	70,3	39,8	55,2	1260
105	99,8					370	400	380,0	70,8	40,8	56,0	1290
110	104,5		62,0			380	410	389,5	71,4	41,8	56,8	1330
115	109,3		64,6			390	420	399,0	71,8	42,7	57,5	1360
120	114,0		67,0			410	430	408,5	72,0	43,6	58,2	1400
125	118,8		69,0			420	440	418,0	72,3	44,5	58,8	1430
130	123,5		71,0			440	450	423,0	73,3	45,3	59,4	1470
135	128,3		73,1			450	460	432	73,6	46,1	60,1	1500
140	133,0		75,1			470	470	442	74,1	46,9	60,7	1540
145	137,8		77,0			480	480	450	74,5	47,7	61,3	1570
150	142,5		78,8			500	490	456	74,9	48,4	61,6	1610
155	147,3		80,5			510	500	466	75,3	49,1	62,2	1650
160	152,0		82,1			530	510	475	75,7	49,8	62,9	1680
165	156,8		83,5			540	520	483	76,1	50,5	63,5	1720
170	161,5		85,0			550	530	492	76,4	51,1	63,9	1760
175	166,3		86,1			570	540	500	76,7	51,7	64,4	1790
180	171,0		87,3			580	550	509	77	52,3	64,8	1830
185	175,8		88,5			600	560	517	77,4	53,0	65,4	1870
190	180,5		89,6			610	570	526	77,8	53,6	65,8	1910
195	185,3		90,7			630	580	535	78,0	54,1	66,2	1940
200	190,0		91,8			650	590	543	78,4	54,7	66,7	1980
205	194,8		92,8			660	600	552	78,6	55,2	67,0	2020
210	199,5		93,7			680	610	560	78,9	55,7	67,5	2060
215	204,3		94,6			690	620	569	79,2	56,3	67,9	2100
220	209,0		95,5			710	630	577	79,5	56,8	68,3	2140
225	213,8		96,3			720	640	586	79,8	57,3	68,7	2180
230	218,5					740	650		80,0	57,8	69,0	2220
235	223,3					750	660		80,3	58,3	69,4	
240	228	60,7		20,3	40,3	770	670		80,6	58,8	69,8	
245	232,8	61,2		21,3	41,1	780	680		80,8	59,2	70,1	
250	237,5	61,6		22,2	41,7	800	690		81,1	59,7	70,5	
255	242,2	62,0		23,1	42,2	820	700		81,3	60,1	70,8	
260	247,0	62,4		24,0	43,1	830	720		81,8	61,0	71,5	
265	251,7	62,7		24,8	43,7	850	740		82,2	61,8	72,1	
270	256,5	63,1		25,6	44,3	860	760		82,6	62,5	72,6	
275	261,2	63,5		26,4	44,9	880	780		83,0	63,3	73,3	
280	266,0	63,8		27,1	45,3	890	800		83,4	64,0	73,8	
285	270,7	64,2		27,8	46,0	910	820		83,8	64,7	74,3	
290	275,5	64,5		28,5	46,5	930	840		84,1	65,3	74,8	
295	280,2	64,8		29,2	47,1	940	860		84,4	65,9	75,3	
300	285,0	65,2		29,8	47,5	960	880		84,7	66,4	75,7	
310	294,5	65,8		31,0	48,4	990	900		85,0	67,0	76,1	
320	304	66,4		32,2	49,4	1020	920		85,3	67,5	76,5	
330	313,5	67,0		33,3	50,2	1060	940		85,6	68,0	76,9	
340	323,0	67,6		34,4	51,1	1090						



Essais Mécaniques : ténacité

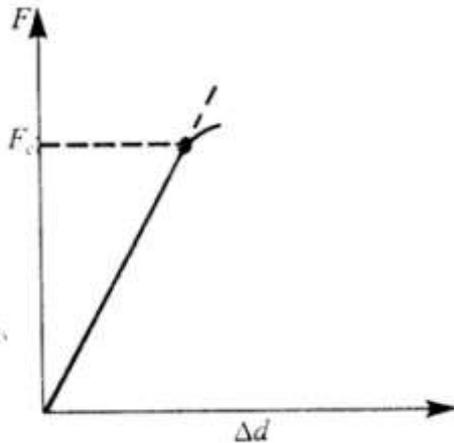
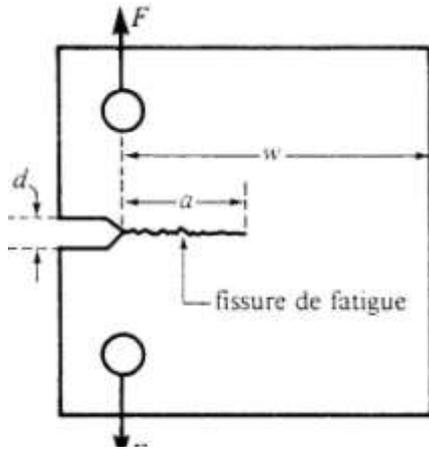
Essai Charpy (Pendule de Charpy)



$$w = mg(h_0 - h)$$

L'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette entaillée.

Essai de ténacité



Matériau	$G_c/kJ m^{-2}$	$K_{Ic}/MN m^{-3/2}$
Métaux purs ductiles (ex : Cu, Ni, Ag, Al)	100-1000	100-350
Acier à rotors (A533; Discalloy)	220-240	204-214
Acier pour réservoir sous pression (HY 130)	150	170
Acier à haute résistance (HSS)	15-118	50-154
Acier doux	100	140
Alliages de titane (Ti-Al6V4)	26-114	55-115
PRFVs	10-100	20-60
Bois usuels, fissure \perp au grain	8-20	11-13
Fibre de bore/époxyde	17	46
Acier à moyenne teneur en carbone	13	51
Polypropylène	8	3
Polyéthylène (faible densité)	6-7	1
Polyéthylène (haute densité)	6-7	2
ABS/polystyrène	5	4
Nylon	2-4	3
Béton armé	0,2-4	10-15
Fonte	0,2-3	6-20
Polystyrène	2	2
Bois usuels, fissure // au grain	0,5-2	0,5-1
Polycarbonate	0,4-1	1,0-2,6
Cermets carbure de tungstène/cobalt	0,3-0,5	14-16
PMMA	0,3-0,4	0,9-1,4
Epoxydes	0,1-0,3	0,3-0,5
Granit	0,1	3
Polyester	0,1	0,5
Nitride de silicium, Si_3N_4	0,1	4-5
Beryllium	0,08	4
Carbure de silicium, SiC	0,05	3
Magnésie, MgO	0,04	3
Béton (non armé)	0,03	0,2
Calcite (marbre, calcaire)	0,02	0,9
Alumine Al_2O_3	0,02	3-5
Schiste	0,02	0,6
Verre sodique	0,01	0,7-0,8
Porcelaine électrique	0,01	1
Glace	0,003	0,2*

* Valeurs à température ambiante s'il n'y a pas d'asterisque.

$$k_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c}$$

Alliages métalliques

Aciers

Fe+C

Diagramme *d'équilibre* (de phase)

-Aciers : %c \leq 2.11%

-2 phases en état équilibre à 20K

α : la ferrite

Fe_3C : la cémentite (avec 6.67%C)

-Une phase à haute température

γ : l'austénite

-Une « phase » mélangée :

perlite = ferrite + cémentite

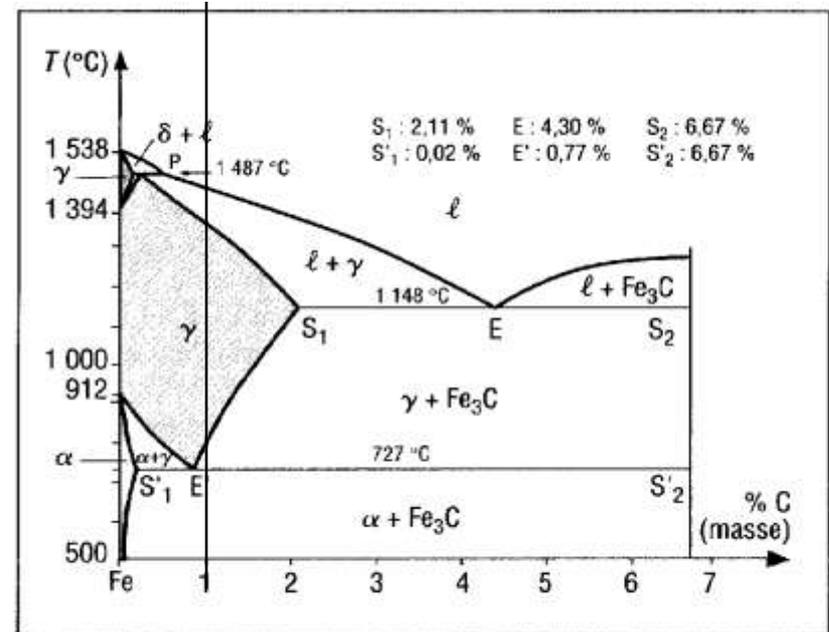


Fig. 3. Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite

Caractéristiques mécaniques des constituants des aciers

Austénite : HB= 250 ~ 300

Ferrite α : HB= 80 ~100

Cémentite : HB= 700

Perlite : HB= 200 ~250

Martensite : HB= 600 ~650

Règle de mélange :

$$H = v_1 \times H_1 + v_2 \times H_2$$

$$v_1 + v_2 = 1$$

Exemple : un mélange de ferrite et de perlite

$$HB = 90[f] + 225[p]$$

[f] et [p] : pourcentage en ferrite et en perlite

Désignation des Aciers (1)

Aciers non alliés d'usage général

- Pour la construction mécanique

E335

335 : Re min=335MPa

Nuances:

E295, E335, E360

Ancienne norme

Série A : Rm en MPaX10

exemple **A60**

Nuances :

A33, A34, A50, A60, A70

- Pour la construction métallique

S235

235 : Re min=235MPa

Nuances:

S185, S235, S355

Ancienne désignation

Série E : Re en MPaX10

exemple **E24**

Nuances :

E24, E26, E30, E36

Désignation des Aciers (2)

Aciers non alliés pour traitement thermique

Nuances:	Ancienne Norme
C10	XC10
C22	XC18
C30	XC32
C35	XC38
C40	XC42
C45	XC48
C50	
C55	XC55
C60	XC60
C65	XC65
C70	XC70
C80	XC80

Désignation des Aciers (3)

Aciers faiblement alliés

Ancienne norme

35CrMo4

35CD4

35 : environ 0.35% carbone Cr :

Chrome

Mo : Molybdène

4 : 1% de Cr

25CrMo4

16CrNi6

35NiCrMo16

100Cr6

Aciers forte 0.05%C

X 10 Cr 18 Ni 8

X 5 CrNi 18-10

Z50C15

Z6CN18-09

Élément	Symbole chimique		Symbole normalisé
	Z	M	
Aluminium	13	Al 27	A
Chrome	24	Cr 52	C
Cobalt	27	Co 59	K
Cuivre	29	Cu 63,5	U
Manganèse	25	Mn 55	M
Molybdène	42	Mo 96	D
Nickel	28	Ni 59	N
Niobium	41	Nb 93	Nb
Phosphore	15	P 31	P
Plomb	82	Pb 207	Pb
Silicium	14	Si 28	S
Soufre	16	S 32	F
Titane	22	Ti 48	T
Tungstène	74	W 184	W
Vanadium	23	V 51	V

Aciers à hautes caractéristiques actuellement disponibles

Dual-phase (DP)

À plasticité induite par la transformation de phase (TRIP : Transformation Induced Plasticity)

À mâclage induit par la plasticité (TWIP : TWinning Induced Plasticity)

À phase complexe (CP)

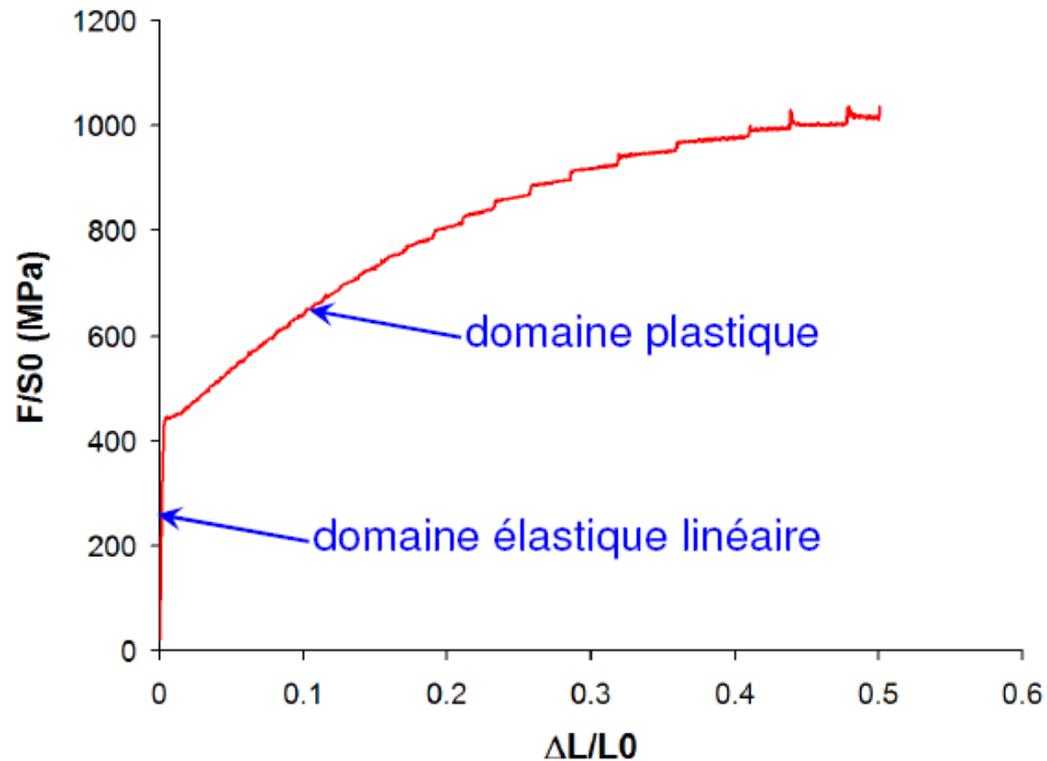
Martensitique (MS)

Ferrito-bainitique (FB)

Pour formage à chaud (HF : Hot Forming)

Pour traitement thermique après mise en forme (PFHT : Post Formed Heat Treated)

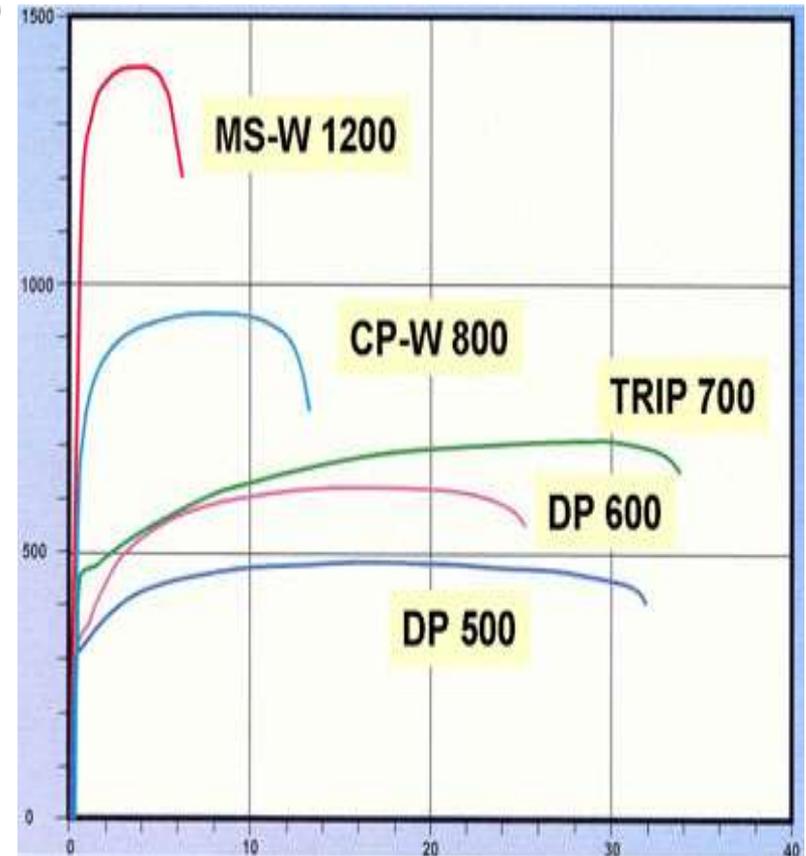
TWIP : Fe-22Mn-0.6C



à température ambiante :
Limite d'élasticité : $R_e = 450$ MPa,
Résistance à la traction : $R_m = 1000$ MPa
Allongement à rupture : $A_r = 50$ %

Acier à ultra haute résistance

- DP : aciers dual phase (aciers multiphasés)
 - » DP 500, DP 600, DP 800, (DP 1000)
- CP : aciers à structure complexe
 - » CP-W-800, (CP-W-1000)
- TRIP : (à austénite résiduelle), aciers à plasticité induite par transformation
 - » TRIP 700, (TRIP 800)
- MS : aciers martensitiques
 - » MS-W 1000, MS-W-1200



Aluminium Variétés commerciales

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal suivant le code suivant :

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	/	Non utilisé	-

- Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage.

Exemple : la teneur en fer (Fe) des alliages 7075 (maximum 0.50 %) et 7175 (maximum 0.20%)

- Les troisième et quatrième chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage. La seule exception est la série 1000 ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Alliages_d'aluminium_pour_corroyage

Exemples 1050 A

le bâtiment

la chimie

la cryogénie

les mécaniques

les biens de consommation

- emballage

- électroménager

Nuance	Si (%)	Fe (%)	État	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
1100 [Al 99,45]	Si + Fe \leq 1,0		O H14	80-110 110-150	- 90	30 5
1050 A [Al 99,5]	0,25	0,40	O	70-100	-	35
			H12	90-120	65	9
			H22	90-120	65	13
			H14	100-140	75	6
			H24	100-140	65	10
			H16	120-160	100	5
1080 A [Al 99,8]	0,15	0,15	O	60-90	-	38
			H14	100-140	70	7

2 : quart-dur (12% écrouissage)

4 : mi-dur (30% écrouissage)

6 : trois-quart dur (50% écrouissage)

8 : dur (75% écrouissage)

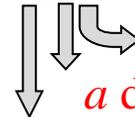
9 : extra-dur

1 : Ecrouissage seul

2 : Ecrouissage suivi un

recuit

Hab



b désigne la propriété

a désigne le traitement

H : état écroui

Alliages Aluminium - Magnésium

Variétés commerciales des alliages Al-Mg

Symbole <i>AFNOR</i>	Nom Commercial	Etat	R _m (MPa)	Re (MPa)	Ar (%)	HV
A-G 1	Alumag 15	Recuit <i>Ecroui</i>	120~160 200~240	60~80 180~220	20~26 4~5	25~35 50~60
A-G 3	Carbinox	Recuit <i>Ecroui</i>	200~230 240~300	80~120 160~240	20~24 6~8	45~50 65~75
A-G 5	Duralinox	Recuit <i>Ecroui</i>	300~340 350~400	130~150 180~200	20~22 5~10	65~75 90~100

Nuance	Mg	Autre addition	État	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A (%)
5005 [AlMg0,6]	0,5-1,1	-	O	100-140	-	20
			H14	140-180	120	4
			H24	140-180	110	8
			H18	180	160	3
5150 [AlMg1Ti]	1,3-1,7		O	130-170	-	25
			H14	170-210	150	6
5052 [AlMg3]	2,2-2,8	Cr 0,15-0,35	O(H111)	170-220	60	20
			H24	230-280	180	9
			H28	270	220	4
5754 [AlMg3Mn]	2,6-3,6	Mn 0,5-1,0 Cr 0,05-0,2	O(H111)	190-240	80	20
			H22	220-270	130	11
			H25	240-290	160	8
			H26	260-310	190	7
5086 [AlMg4MnCr]	3,5-4,5	Mn 0,2-0,7 Cr 0,05-0,25	O(H111)	240-290	100	18
			H22	280-330	190	8
			H24	310-360	230	7

Alliages Aluminium : Silicium

Propriétés générales des alliages Al-Si

Amélioration de la coulabilité de l'Al

Augmentation de la résistance mécanique (*sans trop de diminution de la plasticité*)

Sans traitement thermique, les alliages Al-Si sont fragiles

Alliages Aluminium - Cuivre

Diagramme Al-Cu

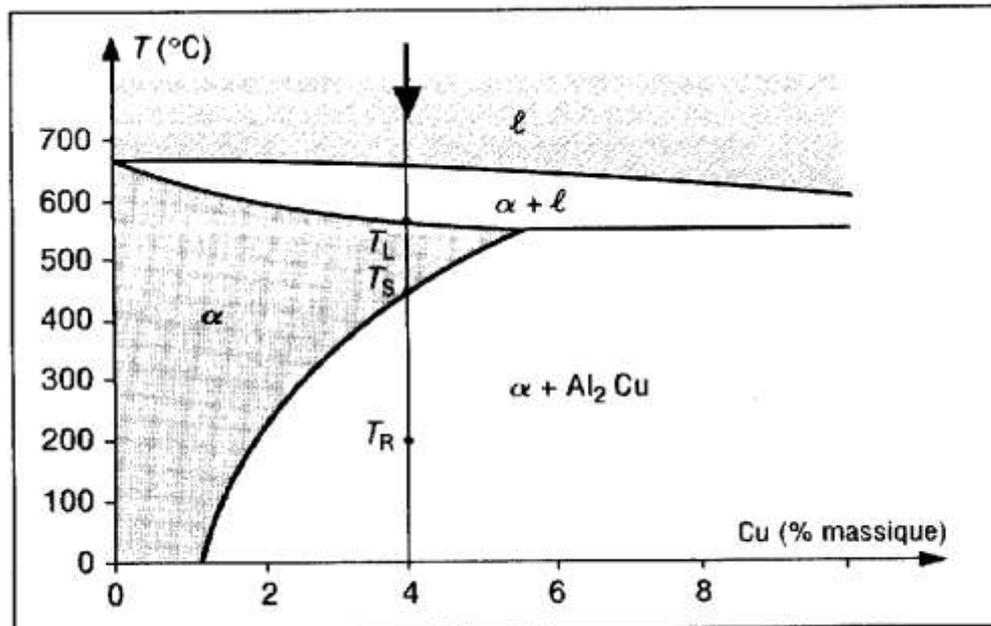


Fig. 5. Diagramme d'équilibre Al-Cu

Cu

Z=29

M=63.54

CFC

T_f=1083°C

R_m~230

MPa

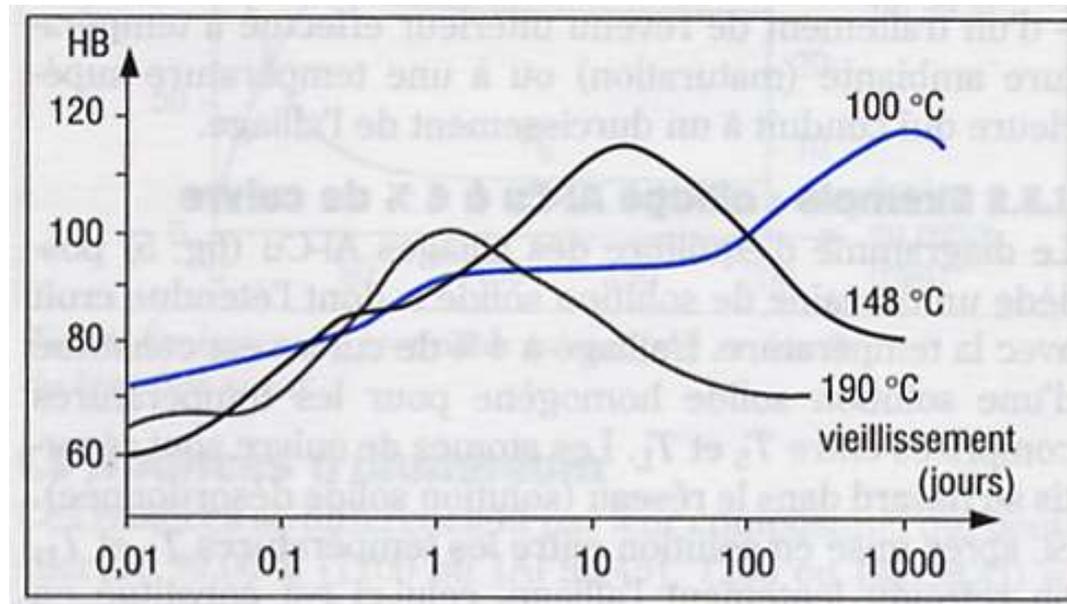
Ar ~ 45 %

Re ~ 70 MPa

Traitement thermique de AU4G : trempe? recuit?

Alliages Aluminium - Cuivre

Durcissement par revenu (vieillessement)



Alliages Titane

Ti non-alliés

Désignation	O ₂ (% masse)	Fe (% masse)	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)	Applications
T35	0,080	0,080	260	350	40	Domaine chimique : industrie du chlore, de la chimie de synthèse (acétaldéhyde anhydride phtalique), eau de mer, acide nitrique pur concentré et chaud.
T40	0,100	0,100	340	450	30	
T60	0,250	0,200	530	640	25	

Ti alliés

Désignation	Composition	Traitement thermique	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)	Applications
TA5E	Ti-Al5-Sn2,5 (alliage α)	Recuit	800	900	20	Domaine aérospatial : disques, ailettes de turbines, brides de compresseurs, éléments de transmission, réservoirs.
TA8DV	Ti-Al8-Mo-1V1 (alliage α)	Trempé + revenu	900	1000	18	
Ti.10.2.3	Ti-V10-Fe2-Al3 (alliage β)	Trempé + revenu	1100-1200	1175-1275	10	
TA6V (nuance la plus utilisée)	Ti-Al6-V4 (alliage α + β)	Recuit	900	1000	15	Domaine chimique (voir titane)
		Trempé + revenu	1050	1150	12	
TA6V6E	Ti-Al6-V6-Sn2 (alliage α + β)	Recuit	950	1050	12	
		Trempé + revenu	1150	1250	10	

Alliage Cu-Zn : laiton

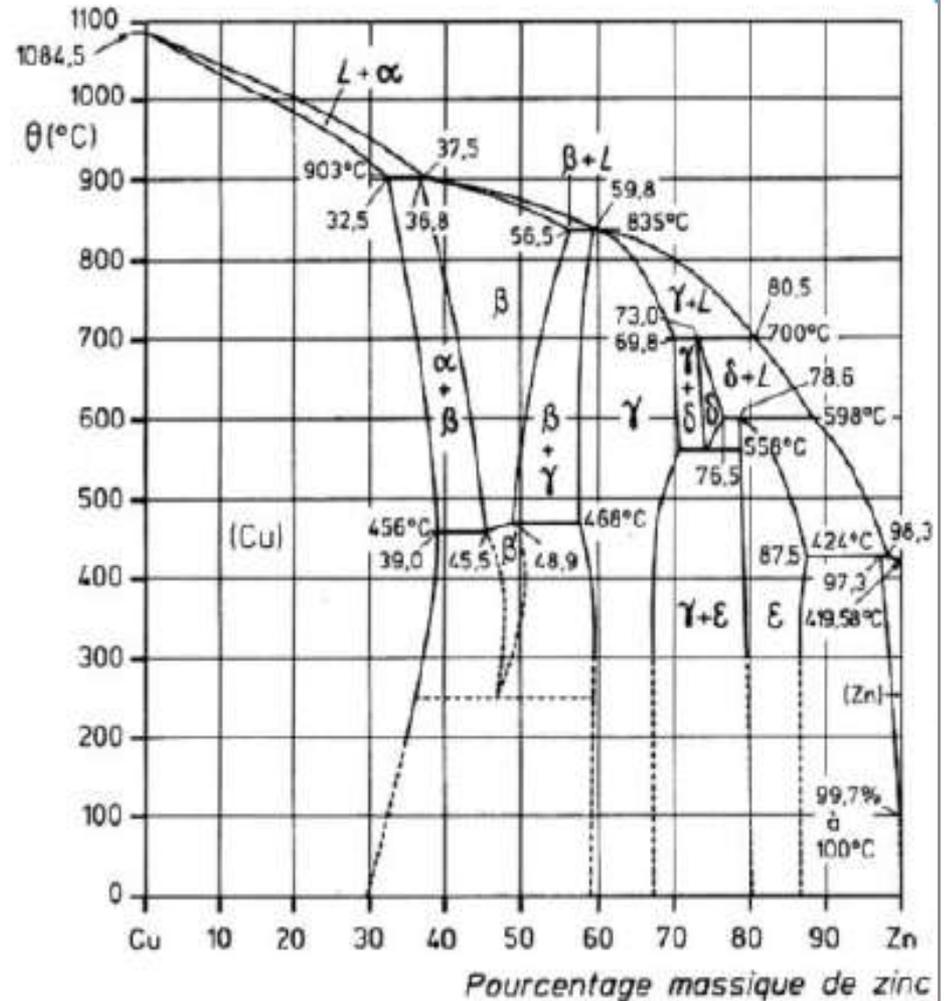
5-45% Zn

laiton monophasé α

- **CuZn5 – CuZn37**
- **déformabilité à chaud : bien**
- **déformabilité à froid : très élevée**

laiton biphasé

- **structure CC (β ; β')**
- **32% - 45% Zn**
- **α , β : déformable à chaud et à froid**
- **β' : dure et fragile**
- **usinabilité : bonne et dépendance de la proportion de α , β et β'**
- **addition de Pb améliore l'usinabilité**
 - » **globule de Pb**
 - » **lubrifiant (Pb fondu)**



Matériaux Plastiques

Monomères et Polymères

Structures des Polymères

Trois Types de Polymères

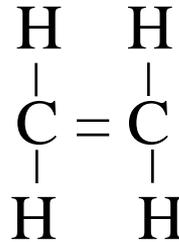
Comportement Mécaniques des Polymères

Monomères et Polymères

Monomères:

Une molécule organique simple constituée essentiellement des atomes de Carbone.

Monomère le plus simple : molécule d'éthylène C₂H₄ avec une masse moléculaire 32.



Les monomères sont utilisés pour constituer les polymères.

Monomères et Polymères

Liste des monomères:

Formule du motif constitutif	Appellation courante et abréviation		
$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Polyéthylène (PE)	$-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$	Poly(éthylène téréphtalate) (PETP)
$-\text{CH}_2-\text{CH}-$ CH_3	Polypropylène (PP)	$-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$	Poly(butylène téréphtalate) (PBTP)
$-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-$ CH_3	Polybutadiène (PB)	$-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-$	Poly(carbonate de bisphénol-A) (PC)
$-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}-\text{CH}_2-$	Poly-isoprène (PiP)	$-\text{O}-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}-$	Poly(diméthyl siloxane) (PdMS)
$-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$	Poly(chlorure de vinyle) (PVC)	$-\text{O}-\text{Si}(\text{C}_6\text{H}_5)_2-\text{O}-$	Poly(diphényl siloxane) (PdPS)
$-\text{CH}_2-\text{CCl}_2-$	Poly(chlorure de vinylidène) (PVDC)	$-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{S}(=\text{O})_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-$	Polysulfone (PPSU)
$-\text{CH}_2-\text{CH}-$ OH	Poly(alcool vinylique) (PVAL)	$-\text{S}-\text{C}_6\text{H}_4-$	Poly(sulfure de phénylène) (PPS)
$\text{CH}_3-\text{CO}-\text{O}-$ O	Poly(acétate de vinyle) (PVAC)	$-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-$	Poly(éther-éther-cétone de phénylène) (PEEK)
$-\text{CH}_2-\text{CH}-$ C_6H_5	Polystyrène (PS)		
$-\text{CH}_2-\text{C}-$ COOCH_3 CH_3 CIN	Poly(méthacrylate de méthyle) (PMMA)		
$-\text{CH}_2-\text{CH}-$	Polyacrylonitrile (PAN)		
$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$	Polytetrafluoroéthylène (PTFE)		
$-\text{CH}_2-\text{CHF}-$	Poly(fluorure de vinyle) (PVF)		
$-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$	Poly(fluorure de vinylidène) (PVDF)		
$-\text{CH}_2-\text{O}-$	Poly(oxyméthylène) (POM)		
$-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-$	Polyoxyphénylène (PPO)		
$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})-\text{NH}-$ O	Polyamide 6 (PA6)		
$-\text{ICH}_2\text{)}_6-\text{NH}-\text{CO}-\text{ICH}_2\text{)}_6-\text{CO}-\text{NH}-$	Polyamide 6-6 (PA 6-6)		
$-\text{ICH}_2\text{)}_{11}-\text{CO}-\text{NH}-$	Polyamide 11 (PA 11)		
		Principaux copolymères	Éthylène-acétate de vinyle (EVA) Styrène-butadiène (SBR) Acrylonitrile-butadiène (NBR) Styrène-acrylonitrile (SAN) Acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS)
		Réseaux tridimensionnels denses (thermodurcis)	Résines formo-phénoliques (PF) Résines urée-formaldéhyde (UF) et mélamine-formaldéhyde (MF) Résines époxydes (EP) Polyuréthannes* (PUR) Polyesters insaturés (UP)

*Ils existent des polyméthannes thermoplastiques (linéaires) et thermodurcis (réticulés).

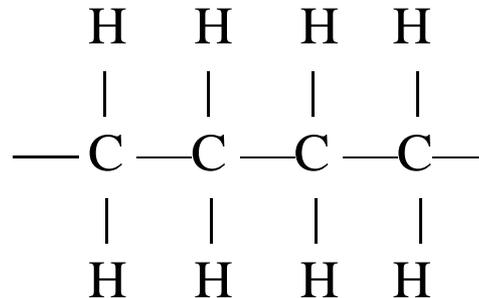
Monomères et Polymères

Polymères

Polymère = Σ monomères.

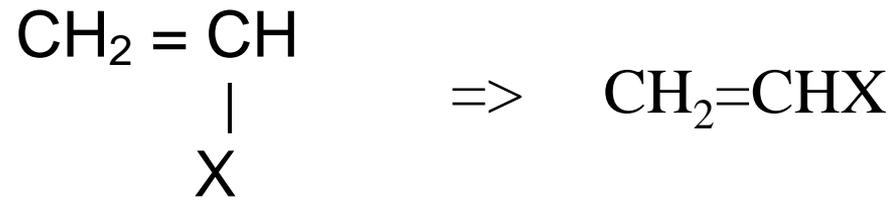
C'est une *macromolécule* associée d'un ou plusieurs types de monomères.

ex: *macromolécule polyéthylène* $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ avec une masse moléculaire ~ 10000



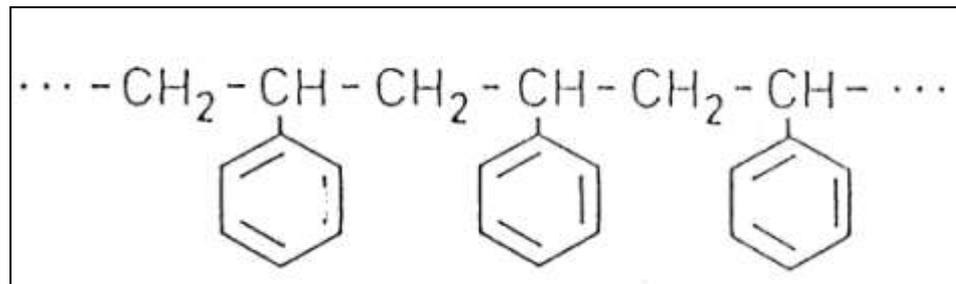
Exemple de Polystyrène (PS):

Structure générale des monomères vinyliques:



Polystyrène (PS):

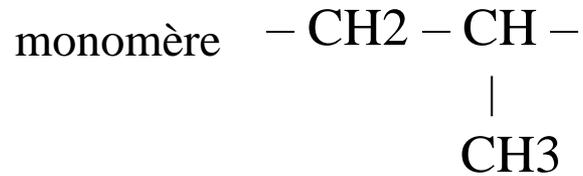
On remplace X par un groupement C₆H₅-



Polymères

Isomères Configurationnels:

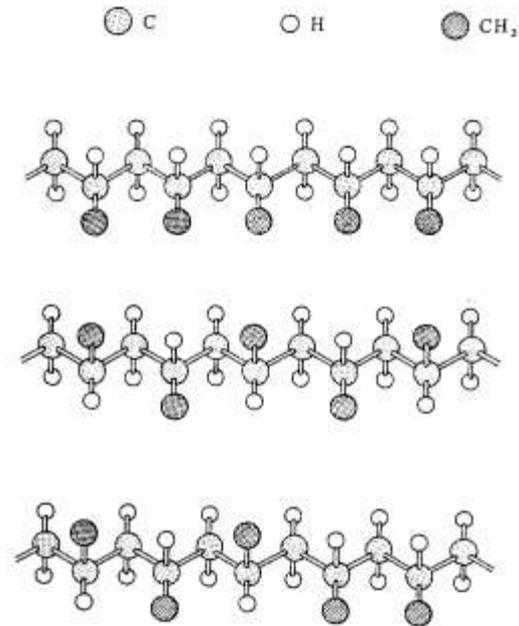
Exemples de Trois isomères configurationnels du polypropylène (PP)



Isotactique: tous les substituants identiques sont situés d'un même côté de la chaîne.

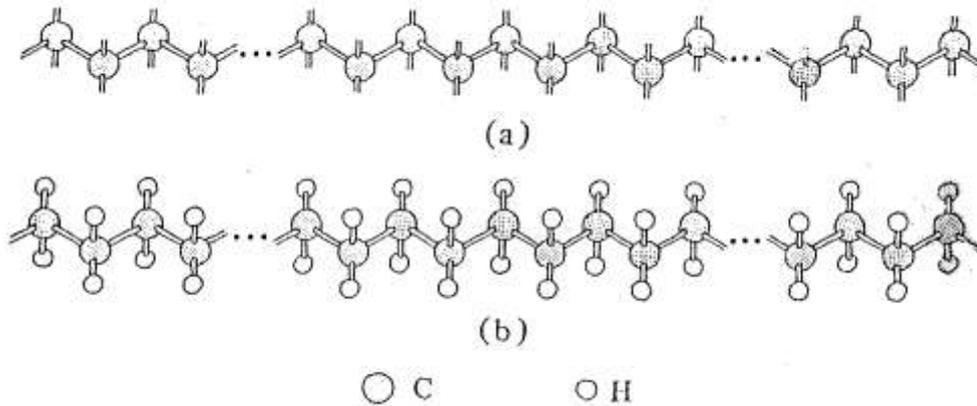
Syndiotactique: les substituants identiques alternent de part et d'autre de la chaîne.

Atactique: les groupement identiques sont répartis de manière aléatoires



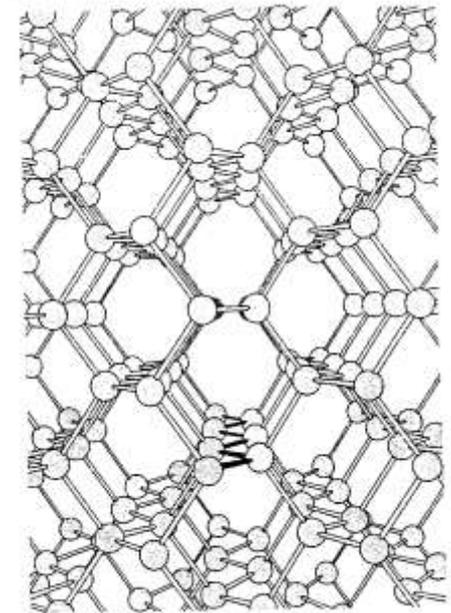
Structures des Polymères

Structures d'une chaîne moléculaire



(a) squelette carboné

(b) molécule de polyéthylène $(-\text{CH}_2-)_n$

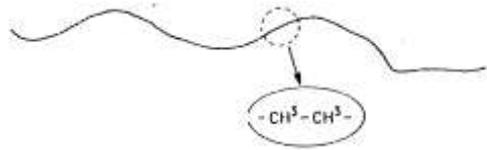


chaîne carbonée dans un réseau cristallin du diamant.

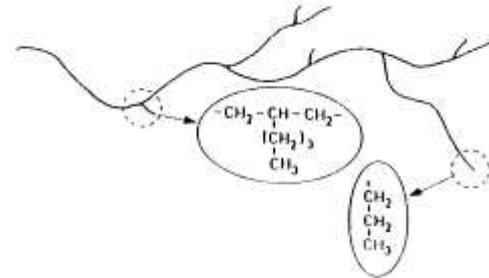
Structures des Polymères

Exemple des polyéthylènes

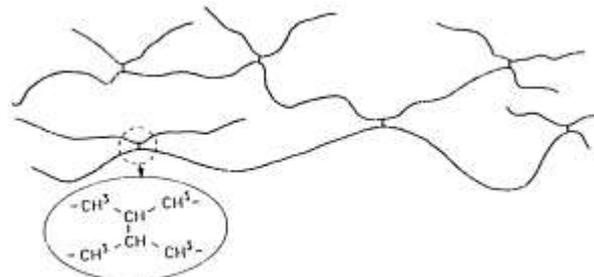
(a) structures linéaires d'une chaîne: *liaison de van der Waales intermoléculaire (liaison 100 fois plus faible que celle de covalente)*



(b) structures ramifiées



(c) structures réticulées: *liaison covalente intramoléculaire*



Polymères Thermoplastiques

- Macromolécules linéaires ou ramifiées de taille limitée
- Fusibles à haute température (transition vitreuse)
- Polymérisation par addition: *chaînes du même type de monomères*
 - pas de réaction chimique
 - pas de produit secondaire
- Réseaux linéaires avec le pontage du type de Van der Waales

Exemples:

Polyéthylènes (PE)
 Polystyrènes (PS)
 Polychlorure de vinyle (PVC)

.....

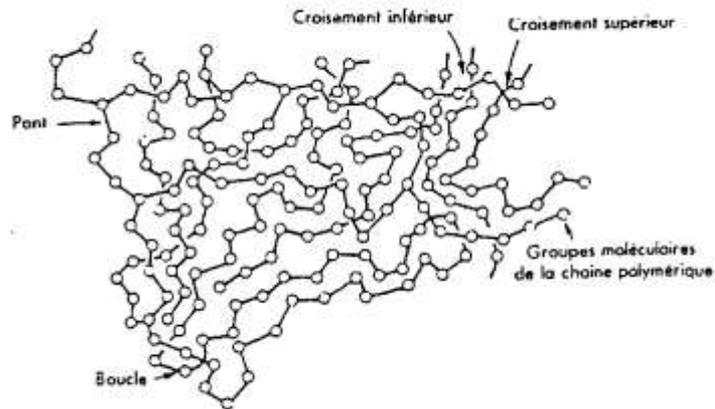
Les thermoplastiques-types:

Thermoplastique	Composition	Usage
Polyéthylène (PE)	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array} \right)_n$	Tubes, films minces, bouteilles, jasses, isolation électrique, emballage.
Polypropylène (PP)	Partiellement cristallin $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$	Les mêmes applications que le PE, mais plus léger, plus rigide, plus résistant à la lumière.
Polytetrafluoréthylène (PTFE)	Partiellement cristallin $\left(\begin{array}{c} \text{F} \\ \\ -\text{C}- \\ \\ \text{F} \end{array} \right)_n$	Teflon. Bon polymère pour la tenue à haute température, avec un coefficient de frottement et une adhésion très faibles. Poêles qui n'accrochent pas, paquets, joints.
Polystyrène (PS)	Partiellement cristallin $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$	Objets moulés bon marché. Dureté au balais pour faire du polystyrène choc. Expandé au CO ₂ pour fabriquer les emballages courants.
Polychlorure de vinyle (PVC)	Amorphe $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array} \right)_n$	Emploi dans l'architecture (châssis de fenêtres...). Disques noirs. Résist souple pour la fabrication du similicuir, de tuyaux, de vêtements.
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	Amorphe $\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{COOCH}_3 \end{array} \right)_n$	Perspex, Lucite. Feuilles transparentes, molesques. Hublots d'avion, pare-brise feutillés.
Nylon 66	Amorphe $\left(-\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}- \right)_n$	Textiles, cordages, moulages.
	Partiellement cristallin à T _{fusion} élevé	

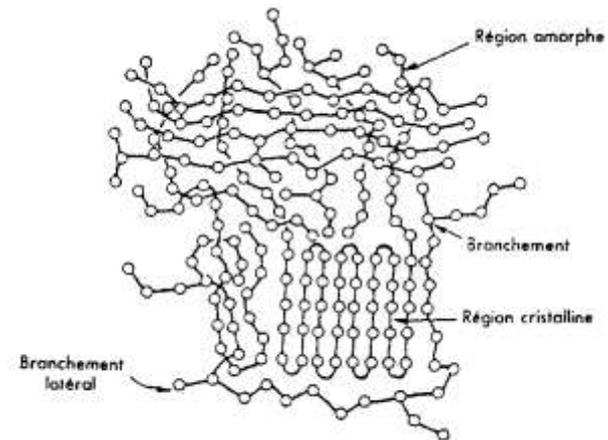
Polymères Thermoplastiques

Structures des thermoplastiques

- forme amorphe: (verre organique)



- forme semi-cristalline:



Polymères thermodurcissables

- Polymères réticulés à structure tridimensionnelle;
- Taille de macromolécule infiniment grande;
- Pas de fusion à haute température, mais se décompose;
- Polymérisation par condensation:
 - par deux types de monomères
 - par réaction chimique
 - avec produit secondaire comme H₂O
- Grande quantité de liaisons covalentes inter-chaînes;
- Structure amorphe;

Exemples

Polyépoxyde (EP)

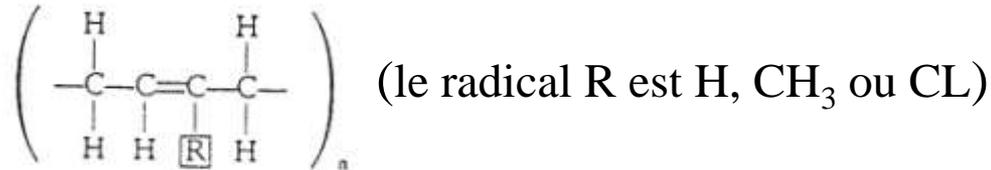
Polyester (UP)

.....

Résines	Composition	Usage
Polyépoxyde (EP)	$\left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{OH} \\ \qquad \qquad \qquad \\ -\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2- \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \qquad \end{array} \right)_n$	Composite à fibre de verre, adhésifs coûteux.
Polyester (UP)	<p style="text-align: center;">Amorphe</p> $\left(\begin{array}{c} \text{O} \qquad \qquad \text{O} \qquad \text{CH}_2\text{OH} \\ \qquad \qquad \\ -\text{C}-(\text{CH}_2)_m-\text{C}-\text{O}-\text{C}- \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array} \right)_n$ <p style="text-align: center;">Amorphe</p>	Composite à fibre de verre ; feuilletés. Meilleur marché que les époxydes.
Phénol-formaldéhyde	<p style="text-align: center;">Amorphe</p> $\left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ -\text{C}_6\text{H}_2-\text{CH}_2- \\ \\ \text{CH}_2 \end{array} \right)_n$ <p style="text-align: center;">Amorphe</p>	Bakélite, tufnol, formica. Plutôt cassant.

Elastomères:

- Cas particuliers de Thermoplastiques: polymères *linéaires*;
- Etat caoutchoutique: les liaisons secondaires déjà fondu à 20°C;
- Structures:



Exemples

Polyisoprène
(caoutchouc naturel)

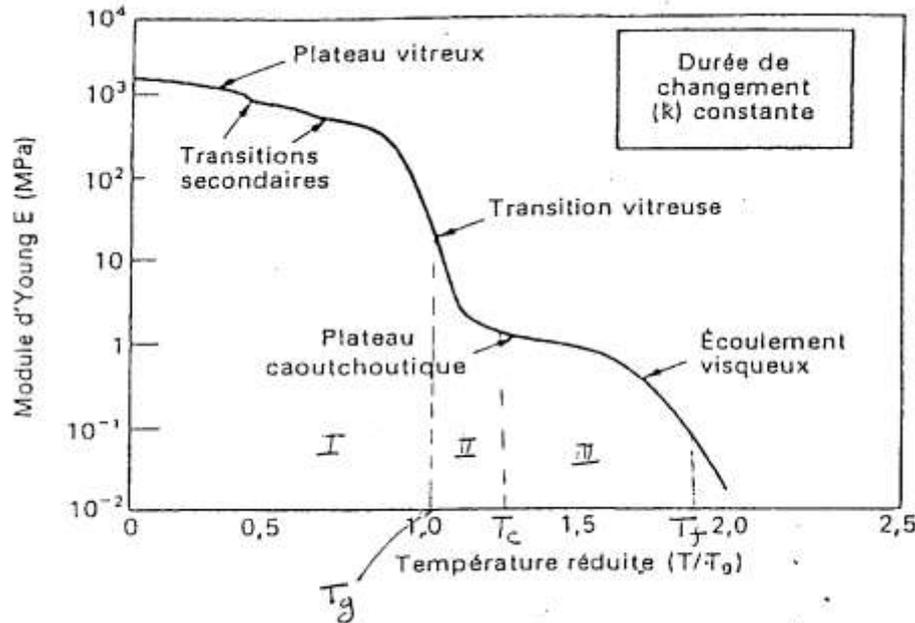
.....

Elastomère	Composition	Usage
Polyisoprène	$\left(\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & & \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{CH}_3 & \text{H} \end{array} \right)_n$ Amorphe, sauf aux grandes déformations	Caoutchouc naturel
Polybutadiène	$\left(\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & & \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$ Amorphe, sauf aux grandes déformations	Caoutchouc artificiel, pneumatiques
Polychloroprène	$\left(\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & & \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{Cl} & \text{H} \end{array} \right)_n$ Amorphe, sauf aux grandes déformations	Néoprène. Caoutchouc résistant au pétrole, utilisé pour des joints d'étanchéité.

Comportement Mécanique des Polymères

Transition Vitreuse

(Uniquement pour les thermoplastiques)



T_g: T° de transition vitreuse;

T_c: début du comportement caoutchoutique;

T_f: T° de fusion;

T < T_g: état vitreux, dur et fragile,
 $E = 1 \sim 10 \text{ GPa}$

T_g < T < T_c: état caoutchoutique,
 $E = 0,1 \sim 1 \text{ MPa}$

T_c < T < T_f: état liquide visqueux

T > T_f: état liquide

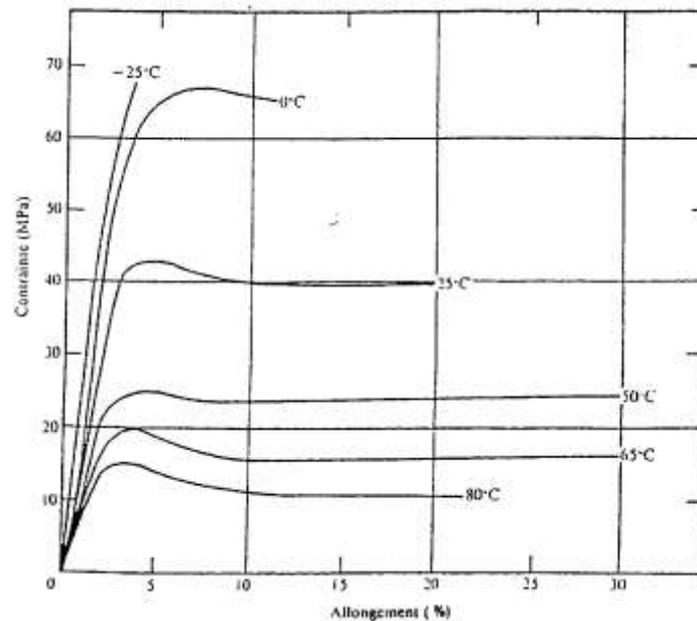
La mise en forme des thermoplastiques se fait en état caoutchoutique!

Attention: si $T > 1,5T_g$, le polymère risque d'être brûlé!

Comportement Mécanique des Polymères

Propriétés Mécaniques

- Les Thermodurcissables: fragiles, dures...
- Les Thermoplastiques: en fonction de température



Influence de la température sur les propriétés mécaniques en traction de l'acétate de cellulose.

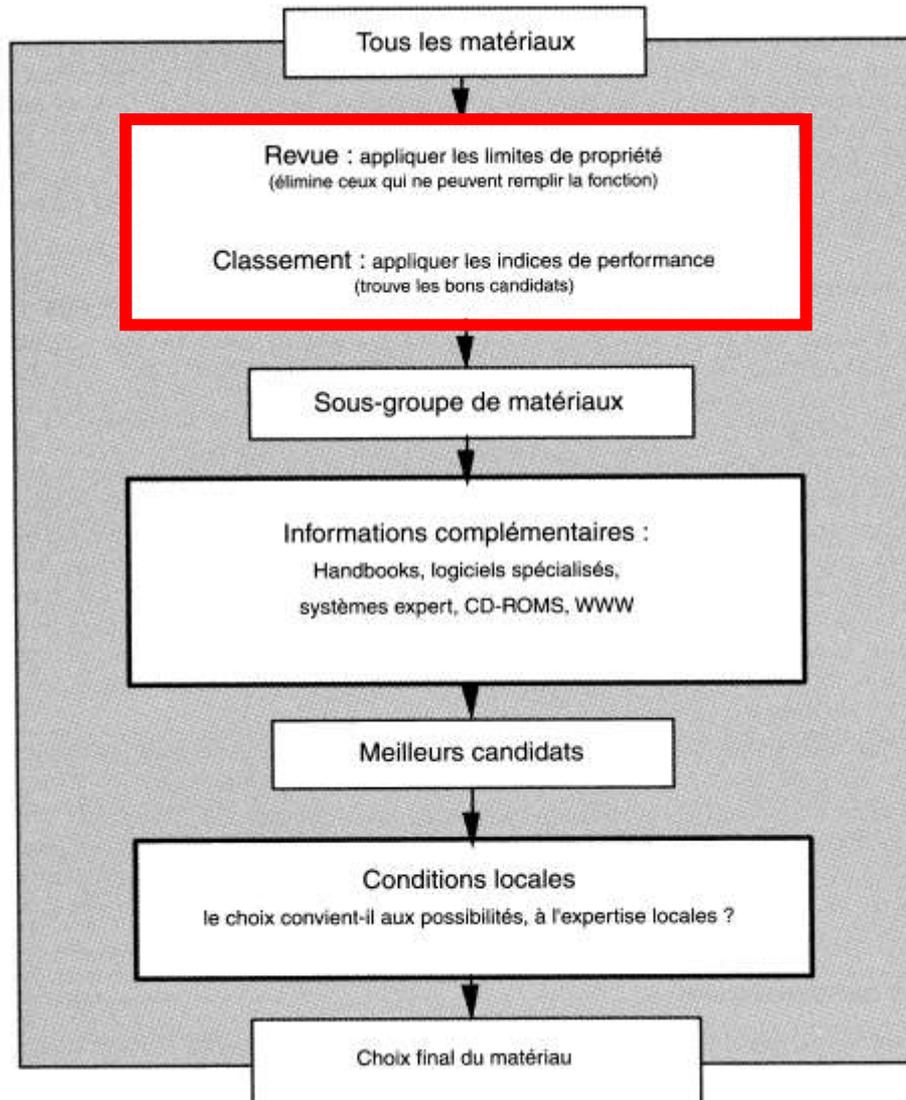
Comportement Mécanique des Polymères

Propriétés en Chiffres

Polymère	Prix (FF(\$US) tonne ⁻¹)	Masse volumique (Mg m ⁻³)	Module d'Young (20°C 100s) (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Ténacité (20°C) (MPa m ^{1/2})	Température de transition vitreuse T _g (K)	Température de ramollissement T _i (K)	Chaleur massique (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Coefficient de dilatation thermique (MK ⁻¹)
<i>Thermoplastiques</i>										
Polyéthylène, PE (faible densité)	5600 (780)	0,91-0,94	0,15-0,24	7-17	1-2	270	355	2250	0,35	160-190
Polyéthylène, PE (haute densité)	5100 (700)	0,95-0,98	0,55-1,0	20-37	2-5	300	390	2100	0,52	150-300
Polypropylène, PP	6750 (950)	0,91	1,2-1,7	50-70	3,5	253	310	1900	0,2	100-300
Polytétrafluoréthylène, PTFE	-	2,2	0,35	17-28	-	-	395	1050	0,25	70-100
Polystyrène, PS	6500 (910)	1,1	3,0-3,3	35-68	2	370	370	1350-1500	0,1-0,15	70-100
Polychlorure de vinyle, PVC (non plastifié)	4250 (595)	1,4	2,4-3,0	40-60	2,4	350	370	-	0,15	50-70
Polyméthacrylate de méthyle, PMMA	10700 (1550)	1,2	3,3	80-90	1,6-1,0	378	400	1500	0,2	54-72
Nylons	23500 (3300)	1,15	2-3,5	60-110	0,5	340	350-420	1900	0,2-0,25	80-95
<i>Résines ou thermodurcissables</i>										
Epoxydes	11500 (1600)	1,2-1,4	2,1-5,5	40-85	0,6-1,0	380	400-440	1700-2000	0,2-0,5	55-90
Polyesters	9300 (1300)	1,1-1,4	1,3-4,5	45-85	0,5	340	420-440	1200-2400	0,2-0,24	50-100
Phénolformaldéhyde	7500 (1050)	1,27	8	35-55	-	-	370-550	1500-1700	0,12-0,24	26-60
<i>Elastomères (caoutchoucs)</i>										
Polyisoprène	6100 (850)	0,91	0,002-0,1	= 10	-	220	= 350	= 2500	= 0,15	= 600
Polybutadiène	6100 (850)	1,5	0,004-0,1	-	-	171	= 350	= 2500	= 0,15	= 600
Polychloroprène	14600 (2050)	0,94	= 0,01	-	-	200	= 350	= 2500	= 0,15	= 600
<i>Polymères naturels</i>										
Fibres de cellulose	-	1,5	25-40	= 1000	-	-	-	-	-	-
Lignine	-	1,4	2,0	-	-	-	-	-	-	-
Protéine	-	1,2-1,4	-	-	-	-	-	-	-	-

CHOIX des Matériaux

Stratégie du choix des matériaux



Cahier de charge

Fonction	Que fait le composant ?
Objectif	Que faut-il maximiser ou minimiser ?
Contraintes	Quelles sont les conditions à considérer ? Quelles sont les paramètres libres ?

Directement

- Température de service
- Résistivités électrique et/ou thermique

Indirectement

Par trouver un compromis entre différentes possibilités

Indices de performance

Indices de performance de MATERIAU

Une combinaison de propriétés caractérisant la performance d'un matériau pour une application donnée.

Trois types de spécifications dans une conception

- exigences fonctionnelles : F
- géométrie : G
- propriétés du matériau : M

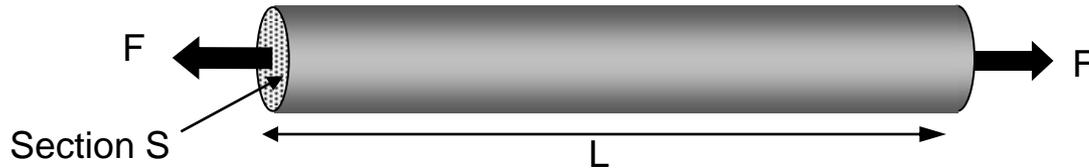
La performance cherchée

$$p = f(F, G, M) = f_1(F) f_2(G) f_3(M)$$

p : masse; coût; volume; durée de vie

Exemple 1

Minimisation de la masse d'un barreau léger



Fonction	Barre
Objectif	Minimiser le poids
Contraintes	Longueur l donnée Supporter une charge F sans endommagement

$$m = \rho V = \rho S l$$

densité
←
→
volume

$$\frac{F}{S} \leq R_e$$

avec le paramètre libre : S

Indice de performance

$$m \geq F \times l \times \left(\frac{\rho}{R_e} \right) = (F) \times (l) \times \left(\frac{\rho}{R_e} \right)$$

$$M = \frac{R_e}{\rho}$$

Exemples d'indices de performance

Fonction, objectif, contrainte	Indice
Barre, poids minimum, rigidité spécifiée	$\frac{E}{\rho}$
Poutre, poids minimum, rigidité spécifiée	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Poutre, poids minimum, résistance spécifiée	$\frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho}$
Poutre, coût minimum, rigidité spécifiée	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Poutre, poids minimum, résistance spécifiée	$\frac{\sigma_f^{2/3}}{C_m \rho}$
Colonne, coût minimum, charge de flambage spécifiée	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Ressort, poids minimum pour une énergie emmagasinée spécifiée	$\frac{\sigma_f^2}{E \rho}$
Isolation thermique, coût minimum, flux de chaleur spécifié	$\frac{1}{\lambda C_m \rho}$
Électroaimant, champ maximum, élévation de température spécifiée	$\kappa C_p \rho$

Contrainte du paramètre "libre"

$$S \leq S_{\max}$$

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

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

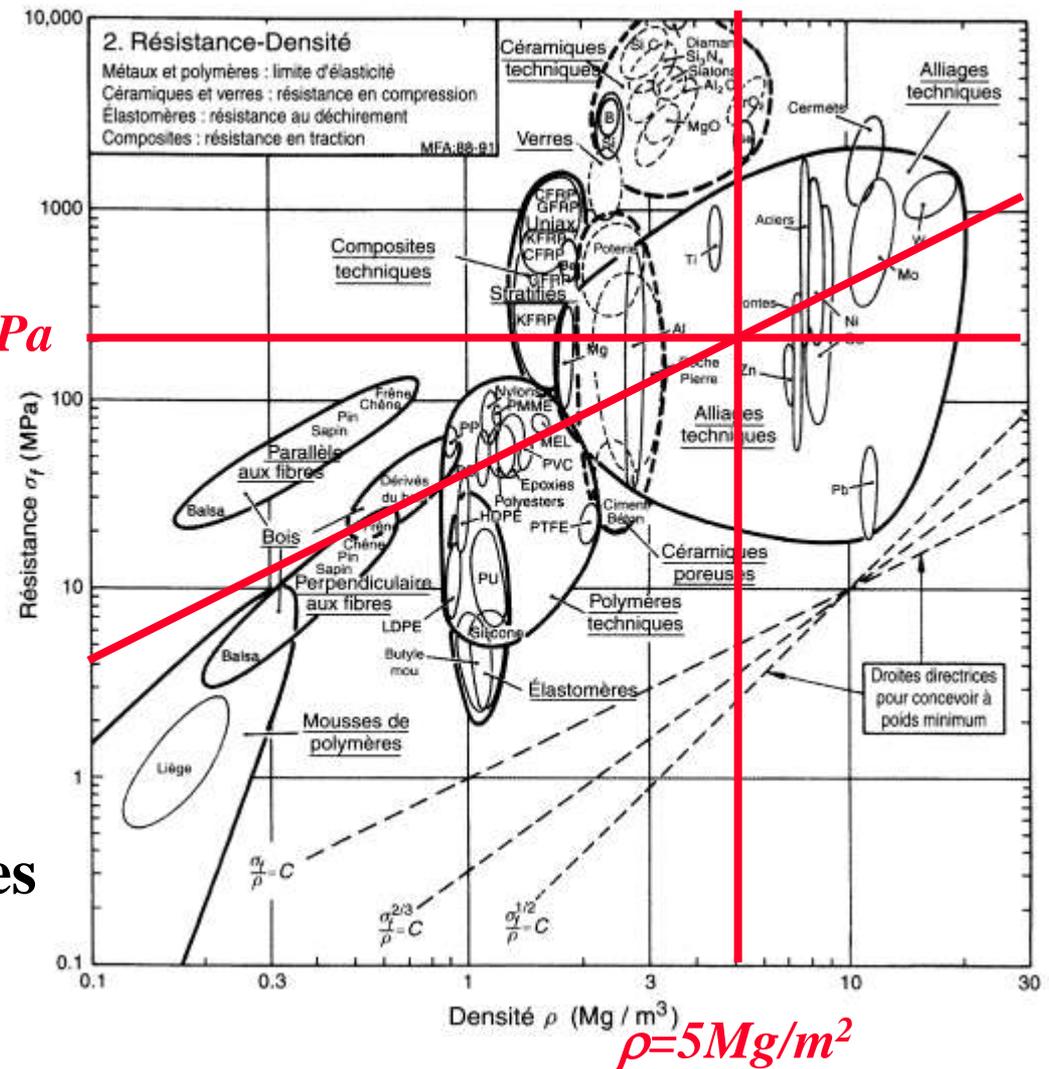
$$\frac{F}{R_e} \leq S_{\max}$$

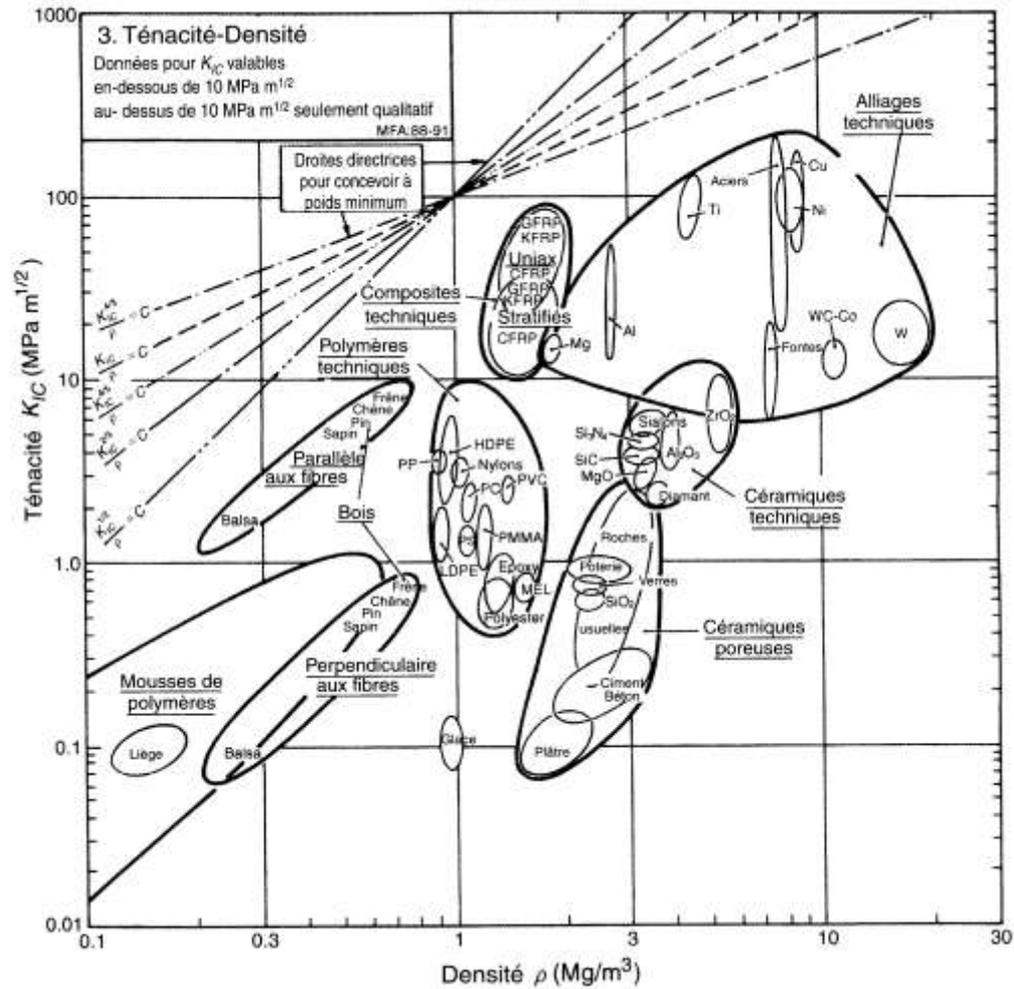
$$\frac{F}{S_{\max}} \leq R_e$$

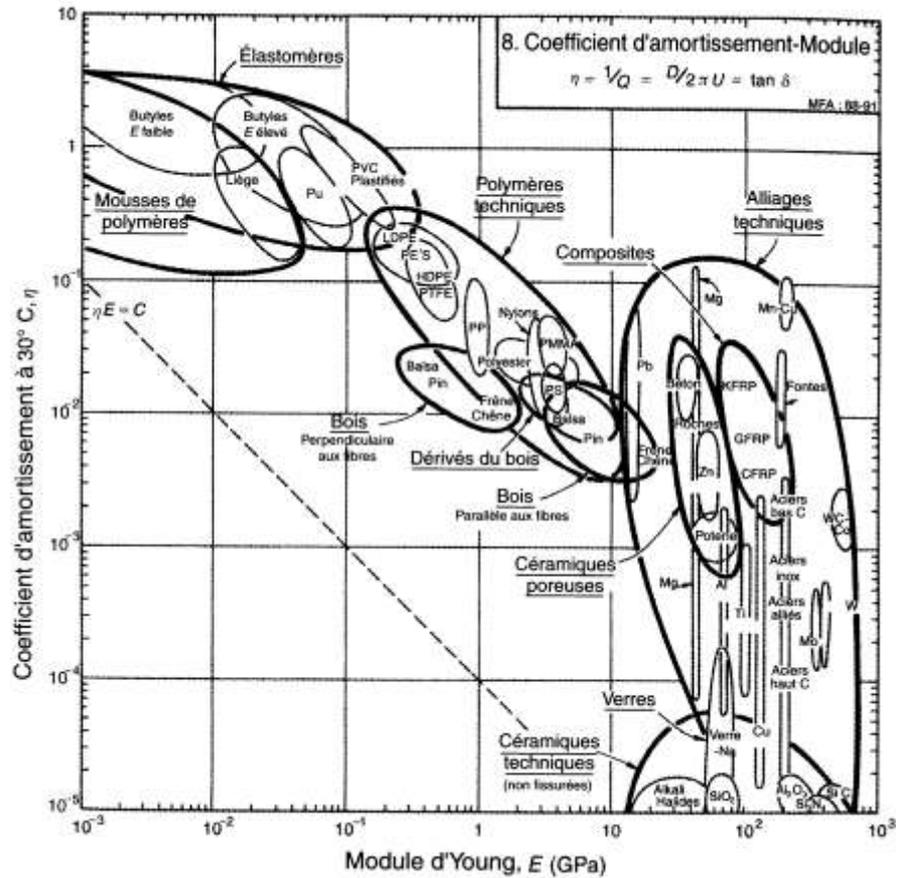
$$R_e = 200 \text{ MPa}$$

Autres limites possibles

$$\rho \leq 5 \text{ Mg/m}^3$$

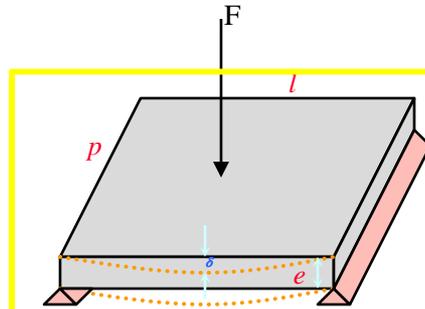






Exemple 2 Panneau de carrosserie

Optimisation de la masse en cas de la flexion élastique



$$\delta = \frac{Cl^3 F}{Epe^3}$$

Paramètre libre : e

- C : constante qui dépend de la façon dont le panneau est maintenu
 E : module de Young
 F : force appliquée
 p, l, e : dimensions du panneau, p et l sont fixés (imposés par le plan)

La masse $m = \rho \times V = \rho \times e \times l \times p$

$$e = \left[\frac{Cl^3 F}{Ep\delta} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$m = \rho \times \left[\frac{Cl^3 F}{Ep\delta} \right]^{\frac{1}{3}} \times l \times p = \left(\frac{F}{\delta} \right)^{\frac{1}{3}} \times (Cl^6 p^2) \times \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right)$$

Indice de performance

$$M = \frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho}$$

Panneau de carrosserie

Optimisation de la masse en cas de la flexion plastique

La flexion avec la déformation plastique

$$\text{Si } F \geq \frac{C_p e^2}{l} \times R_e,$$

Montrez que l'indice de performance est

$$M = \frac{R_e^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

La flexion avec la déformation plastique

$$\text{Si } F \geq \frac{Cpe^2}{l} \times R_e, \quad \Rightarrow F = \frac{Cpe^2}{l} \times R_e,$$

Dans le domaine
plastique!

$$e = \left[\frac{lF}{CpR_e} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$m = \rho \times \left[\frac{lF}{CpR_e} \right]^{\frac{1}{2}} \times l \times p = (F)^{1/2} \times \left(\frac{l^{\frac{2}{3}} p^{\frac{1}{2}}}{C} \right) \times \left(\frac{\rho}{R_e^{1/2}} \right)$$

Indice de performance

$$M = \frac{R_e^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$