

MÉTAUX NON FERREUX

Les principales familles, avec leurs alliages sont l'aluminium, le cuivre, le magnésium, le zinc, le titane et le nickel.

La plupart de ces matériaux sont commercialisés sous plusieurs formes ou dans des états métallurgiques différents (brut, recuit, écroui, durci), l'utilisateur choisissant l'état de livraison qui lui convient.

I - États métallurgiques

Les états métallurgiques, « ou de livraison », sont normalisés pour certains alliages.

Leur désignation est effectuée par une lettre (F, O, H, W ou T) suivi par un ou plusieurs chiffres.

Le premier chiffre indique un cycle de traitements thermiques ou mécaniques (écrouissage...), les chiffres suivants précisent les variantes possibles du cycle.

Les remarques sont les mêmes dans le cas des pièces moulées.

Normes : NF EN 515 ; NF EN 1173 ; NF A 57-702...

Exemple : EN AC [Al Si 7 Mg] Y33 (A-S7G moulé en coquille, trempé et revenu).

États métallurgiques de base		Subdivisions de l'état T			
F = État brut de fabrication O = État recuit H = État écroui T = Traitement thermique autre que F, O ou H W = Pour Al, mis en solution (trempé)		aluminium et alliages			
		T3 = mise en solution + écroui + mûri T4 = mise en solution + mûri T5 = refroidi (après transf. à chaud) + revenu T6 = mise en solution + revenu T8 = mise en solution + écroui + revenu T10 = refroidi (après transformation à chaud) + revenu + écroui			
États de livraison des produits non ferreux moulés		Cuivre et alliages NF EN 1173			
symbole	procédé d'obtention	A : allongement (fil, EN ... -Cu-Of-A007) B : limite de flexion (bande EN 1654-CuSn8-B410) D : brut d'étirage sans spécification (tube EN...-Cu-ETP-D) G : grosseur du grain (bande EN 1652-CuZn37-G020) H : dureté Brinell ou Vickers (tôle EN 1652-CuZn37-H150) M : brut sans spécification (barre creuse EN 12168-CuZn36Pb3-M) R : résistance à la traction (barre EN 12164-CuBe2R1200) Y : limite élastique à 0,2 % (bande EN 1654-CuZn30-Y460)			
Y0	Non défini				
Y2	Moulage au sable				
Y3	Moulage en coquille				
Y4	Moulage sous pression				
Y5	Par frittage				
Y7	En coulée continue				
Y8	Par centrifugation				
Y9	Suivant prescriptions				
symbole	traitement	Subdivisions de l'état H			
0	Aucun traitement	état niveau de dureté	écroui seul (H1)	écroui recuit (H2)	écroui stabilisé (H3)
1	Recuit				
2	Trempé				
3	Trempé + revenu				
4	Trempé + mûri	1/4 dur	H12	H22	H32
5	Stabilisé	1/2 dur	H14	H24	H34
6	Trempé et stabilisé	3/4 dur	H16	H26	H36
9	Suivant prescriptions	4/4 dur	H18	H28	H38

II - Aluminium et alliages

Fabriqués industriellement depuis 1886 à partir des bauxites et de la cryolithe, ces métaux sont les plus utilisés juste après les fontes et les aciers. Normes NF EN 485, 515, 573...

1. Principales caractéristiques

- Bas point de fusion (658 °C) ; ductilité élevée (A% 40%) assez léger (densité 2,7) bonne conductivité électrique ; bonne conductibilité thermique (5 fois celle des aciers) coefficient de dilatation thermique 1,5 fois celui des aciers, propriétés réfléchissantes.
- Bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports, comme l'aéronautique, par exemple.
- Résistance à la corrosion élevée. Le métal se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice, les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance.
- Résistance mécanique : elle peut être modifiée par écrouissage ou par recuit (adoucissement).
- Inconvénients : faibles résistances à l'usure et à la fatigue.

2. Mise en oeuvre

Elle est assez facile par un grand nombre de procédés laminage, moulage, forgeage, formage, étirage, extrusion, métallurgie des poudres... L'élasticité élevée peut gêner certains usinages.

Le coefficient de dilatation important et la grande conductivité thermique imposent, à cause des dilatations, certaines précautions en soudage et en usinage.

La soudabilité dépend de la trempe et du revenu pratiqués sur l'alliage. Revêtements décoratifs et protecteurs par anodisation, nombreux procédés (EN 12373).

3. Traitements thermiques

Ils sont tout à fait différents de ceux des aciers. Après trempe, le durcissement est obtenu par vieillissement naturel, ou maturation, à température ambiante ou par revenu à température élevée.

Les alliages avec le cuivre, le silicium, le zinc et ceux avec le magnésium plus le silicium sont trempants ; ils sont dits avec durcissement structural.

L'aluminium pur, les alliages avec le manganèse et le magnésium ne sont pas trempants ; ils sont dits sans durcissement structural.

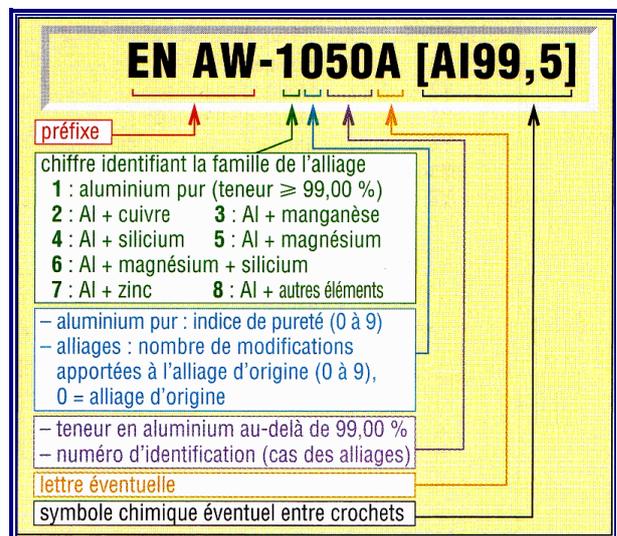
4. Aluminium et alliages corroyés

Cette famille, la plus utilisée, comprend tous les produits laminés d'usage courant (barres, profilés, tôles...).

Désignation (norme internationale) :

elle est effectuée par un nombre à quatre chiffres, avec EN AW – comme préfixe (A pour aluminium, W pour corroyé), éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets (fig. 1).

Exemple : EN AW–5086 [Al Mg 4] est un alliage d'aluminium avec 4% de magnésium
EN AW-1050A [Al 99,5] est un aluminium pur à 99,5 %.



1. Désignation des produits laminés - NE EN 573.

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	++	+++	+++	+++	-	+++ à +	① ③ ⑤ ⑨
		H14	10,5	8,5	6									
		H18	14	12	2									
	EN AW-1070A[Al 99,7] (1070A et 1080A)	O	6	1,5	35	6 700	++	+++	+++	+++	-	+++ à +	① ⑤ ⑨	
		H14	10	7	7									
	EN AW-1100[Al 99,0Cu] (1100 et 1200)	O	7,5	2,5	33	6 700	++	+++	+++	+++	-	+++ à +	① ⑫	
		H14	11,5	9,5	6									
	Al + Mn	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									
	Al + magnésium	EN AW-5005[AlMg1] (5005)	O	10	3,5	24	7 000	+++	+++	+++	+++	+	+++ +	① ⑤ ⑥ ⑫
			H14	14,5	12	5								
H18			18,5	16,5	2									
EN AW-5052[AlMg2,5] (5052)		O	17	6,5	19	7 000								
H34	23	15	5											
H38	27	21	3											
EN AW-5086[AlMg4] (5086)	O	24	10	17	7 000	+++	++	+++	+++	++	+++ +	② ⑦ ⑩		
	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	7 400	-	++	++	+	++	+++ ++	② ④ ⑦ ⑧	
		T4	39	25	15									
	EN AW-2024[AlCu4Mg1] (2024)	O	22	14	13	7 400	-	+	++	+	++	+++ ++	② ④ ⑧	
	T4	43	28	14										
	Al + Si + Mg	EN AW-6061[AlMg1SiCu] (6061)	O	15	8,5	19	7 000	++	+++	+++	+++	+	+++ à +	⑤ ⑦ ⑩ ⑪
		T4	21	11	18									
T6		29	24	10										
EN AW-6082[AlSi1MgMn] (6082)	O	15	8,5	19	7 000	++	+++	+++	+++	+	+++ à +	⑤ ⑦ ⑩ ⑪		
	T4	20,5	11	15										
	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										
	O	28	15	10										
EN AW-7075[AlZn5,5MgCu] (7075)	T6	54	46	8	7 200	+	++	+	+	++	+++ +	② ④ ⑧		

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

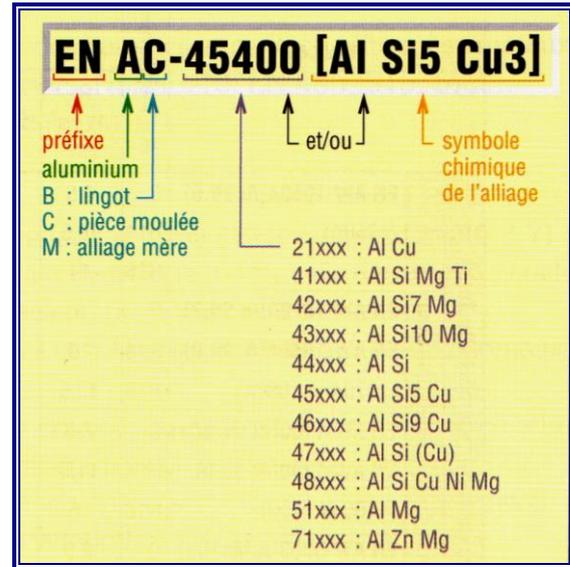
- +++ : excellente
 - ++ : bonne
 - + : moyenne
 - : faible
- ① : chaudronnerie, emboutissage
 - ② : pièces forgées
 - ③ : pièces filées : boîtes, aérosols ...
 - ④ : boulonnerie
 - ⑤ : chimie, alimentaire
 - ⑥ : bâtiment
- ⑦ : mécanique, transport
 - ⑧ : aéronautique
 - ⑨ : décoration
 - ⑩ : marine
 - ⑪ : emballage
 - ⑫ : ustensiles de cuisine ...

5. Aluminium et alliages pour la fonderie

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire.

Inconvénient grand retrait au moulage (3,5 à 8,5 % en volume) qui peut être minimisé par un bon tracé de la pièce.

Désignation : préfixe EN espace ; lettre A pour aluminium ; lettre B ou C (pièce moulée) ou M tiret ; 5 chiffres donnant la composition et/ou les symboles chimiques de l'alliage ordonnés par teneurs décroissantes.



2. Désignation des produits de fonderie NF EN 1780.

Exemple : EN AC – 45400 ou fig. 2 ou EN AC – AlSi5Cu3 pour un alliage avec 5 % de silicium et 3 % de cuivre.

Aluminium et alliages : produits de fonderie (extrait NF EN 1706)											
nuances	mode de coulée	caractéristiques mécaniques			aptitude au moulage	aptitude à l'étanchéité	résistance à la corrosion	usinabilité	soudabilité	aptitude à l'anodisation	exemples d'emploi
		R _r (daN/mm ²)	R _e (daN/mm ²)	A %							
EN AC-AISi12Cu NiMg (48000)	Y35	20	18	< 1	+++	+++	+	++	+++	+	travail à chaud, pistons
	Y36	28	24	< 1							
EN AC-AISi7Mg0,6 (42200)	Y26	25	21	1	+++	++	++	++	++	+	① haute résistance
	Y36	32	24	3							
EN AC -AlCu4MgTi (21000)	Y24	30	20	5	+	+	+	+++	+	++	① haute résistance
	Y34	32	20	8							
EN AC-AISi5Cu3Mn (45200)	Y26	23	20	< 1	+++	++	+	+++	++	+	①②
	Y36	28	23	< 1							
EN AC-AISi12 (44200)	Y20	15	7	5	+++	+++	++	+	+++	+	①③
	Y30	17	8	6							
EN AC-AISi7Mg (42000)	Y26	22	18	1	+++	++	++	++	++	+	①③
	Y36	26	22	1							
EN AC-AlZn5Mg (71000)	Y21	19	12	4	+	+	++	+++	+	++	①③⑤⑥
	Y31	21	13	4							
EN AC-AlMg5	Y20	16	9	4	+	+	++	+++	++	+++	①
EN AC-AISi8Cu3	Y40	24	14	1	++	++	+	++	++	+	② très utilisé
EN AC-AISi9	Y40	22	12	2	+++	+	++	+	+	+	④①*
EN AC-AISi12	Y40	24	13	1	+++	+	+	+	+	+	④①
EN AC-AISi12Cu1	Y40	24	14	1	+++	+	+	++		+	①①
EN AC-AlMg9	Y40	20	13	1	+	+	+++	+++	++	++	⑥

Y20 : moulage sable ; Y30 : moulage coquille ; Y40 : moulage sous pression (page 169). * Très utilisé.

+++ : excellente
++ : bonne
+ : moyenne

① : pièces mécaniques diverses
② : pièces mécaniques complexes
③ : alimentaire, chimie, robinetterie

④ : appareils ménagers
⑤ : bâtiment et travaux publics
⑥ : marine

III - Cuivre et alliages

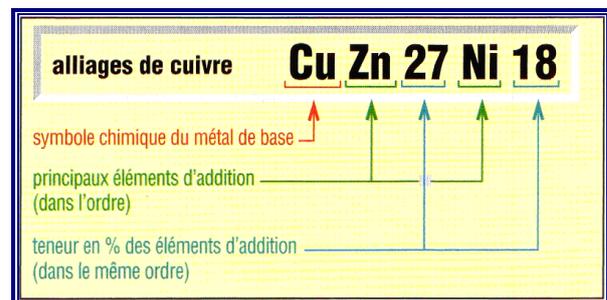
Il existe plus de 200 alliages de cuivre. Les principales familles sont : les laitons (Cu + Zn), les bronzes (Cu + Sn), les cupronickels (Cu + Ni), les cupro-aluminiums (Cu + Al) et les maillechorts (Cu + Ni + Zn).

cuivre + étain	=	bronze
cuivre + zinc	=	laiton
cuivre + aluminium	=	cupro-aluminium
cuivre + nickel	=	cupronickel
cuivre + nickel + zinc	=	maillechort

3. Principaux alliages du cuivre.

Désignation : symbole chimique du cuivre (Cu) suivi des symboles chimiques et teneurs des principaux éléments d'addition, par ordre décroissant.

Exemple : Cu Zn 27 Ni 18 (maillechort avec 27 % de zinc et 18 % de nickel).



4. Désignation des alliages du cuivre.

1. Principales caractéristiques du cuivre

Plus lourd que l'acier, de densité 8,9 fond à 1 083 °C ; grande résistance à la corrosion ; plasticité ou ductilité élevée (A % jusqu'à 50 %) ; grande conductivité électrique qui le rend indispensable dans les industries électriques et électroniques ; grande conductibilité thermique (atout pour la transmission de la chaleur) couleur rouge plus ou moins foncée devenant « jaune » avec addition de zinc.

Les cuivres et les alliages ne peuvent pas être traités thermiquement, sauf ceux au béryllium. Cependant, la résistance (R_r) peut être augmentée par écrouissage à froid et la ductilité restaurée par un revenu. La trempe augmente la plasticité (cas inverse des aciers).

2. Cuivres purs

Le cuivre utilisé pur (usages électriques, thermiques, chaudronnerie...) est soit un cuivre affiné (endurant, plus fragile, plus cassant), soit un cuivre désoxydé ou débarrassé de toute trace d'oxygène (moins fragile et très haute conductivité).

type	taux d'écrouissage (%)	R_r (daN/mm ²)	R_e (daN/mm ²)	A %	HB
recuit	0	23	7	45	50
1/4 dur	10	27	21	25	70
1/2 dur	25	30	25	14	87
4/4 dur	50	35	32	6	

6. Caractéristiques du cuivre pur.

Désignations des cuivres purs, non alliés Symbole Cu + tiret de séparation + lettres d'indication	
Cu – ETP	= affiné électrolytiquement, non désoxydé, à conductivité garantie
Cu – FRHC	= affiné thermiquement, non désoxydé, à conductivité garantie
Cu – FRTP	= affiné thermiquement, à conductivité non garantie
Cu – DHP	= affiné thermiquement ou électrolytiquement, à fort phosphore résiduel
Cu – DLP	= affiné thermiquement ou électrolytiquement, à faible phosphore résiduel
Cu – OF	= désoxydé
Cu – OFE	= désoxydé, à haute pureté

3. Laitons

C'est la famille la plus utilisée. L'addition de zinc (jusqu'à 42 %) diminue le prix de base, augmente R_r et $A\%$, ce qui favorise l'emboutissage ($A\% = 60\%$ avec 31 % de Zn), et diminue la température de fusion, ce qui facilite le moulage.

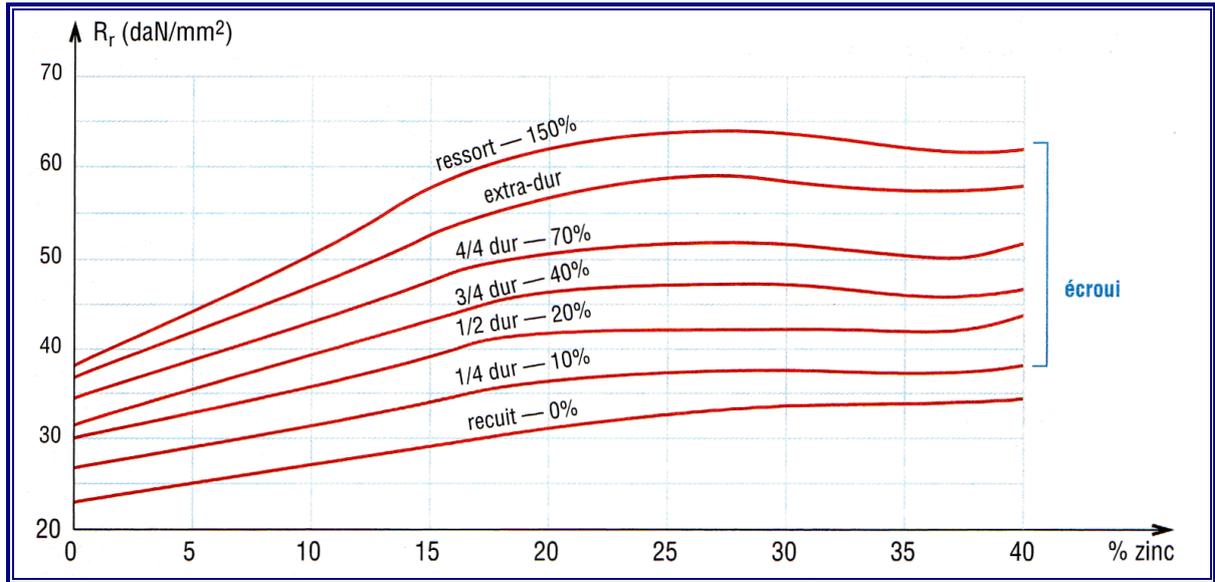
Une addition supplémentaire de plomb, de 2 à 3 %, augmente considérablement l'usinabilité. Les laitons ainsi obtenus (laitons de décolletage) servent de référence pour évaluer l'usinabilité des autres matériaux.

Alliages de cuivre : produits laminés						
	nuances	état métall.	R_r daN/mm ²	$A\%$	HV	emplois
laitons	Cu Zn 10 (CW 501 L)	H11 H14	27 - 34 39 - 45		67 - 95 118 - 135	①
	Cu Zn 33 (CW 506 L)	H11 H14	33 - 40 47 - 54	64 7	85 - 120 140 - 160	②
	Cu Zn 40 (CW 509 L)	H11 H14	36 - 43 51 - 59		105 - 135 150 - 175	③
	Cu Zn 39 Pb 2 (CW 612 N)	H12 H14	40 - 50 50 - 60	2 - 20	135 - 160 150 - 180	④ ⑦
	Cu Zn 40 Pb 3 (CW 617 N)	laitons de décolletage	37 - 50	4 - 22		⑤
	Cu Zn 36 Pb 3 (CW 603 N)		32 - 45	7 - 28		⑤
	bronzes	Cu Sn 6 P (CW 452 K)	O H14	33 - 42 62 - 70	50 5	90 - 120 190 - 220
Cu Sn 3 Zn 9 (CW 454 K)		O H14	31 - 40 61 - 66	40 4	75 - 105 190 - 210	⑦
Cu Sn 4 Zn 4 Pb 4 (CW 456 K)		H12 H14	40 - 46 50 - 60	25 3	125 - 155 160 - 195	⑥ ⑧
maillechorts	Cu Ni 10 Zn 27 (CW 401 J)	H11	42	27	105	③
	Cu Ni 18 Zn 20 (CW 409 J)	H14	58	5	180	
	Cu Be 2 (CW 101 C)	-	14 à 120	2 à 35	90 à 330	haute résist.

- | | |
|-------------------------------------|----------------------|
| ① bijouterie, quincaillerie | ⑤ pièces décolletées |
| ② douilles, lustrerie, musique | ⑥ ressorts |
| ③ serrurerie, orfèvrerie, lustrerie | ⑦ visserie |
| ④ engrenages, horlogerie | ⑧ joints, membranes |

Alliages de cuivre : produits de fonderie						
	nuances	état métall.	R_r daN/mm ²	R_e daN/mm ²	$A\%$	emplois
cupro-aluminums	Cu Al 10 Fe 2 (CC 331 G)	Y 20 Y 30	50 65	18 25	18 20	⑥ ⑤ ⑦
	Cu Al 10 Ni 5 Fe 5 (CC 333 G)	Y 20 Y 30	63 60	25 30	12 7	⑧ ⑥
	Cu Sn 12 (CC 483 K)	Y 20	24	13	5	① ③
		Y 30	27	15	3	
bronzes	Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5 (CC 491 K)	Y 20 Y70	20 25	9 10	12 12	① ② ⑤
	Cu Pb 20 Sn 5 (CC 497 K)	Y20	15	6	5	①
		Y30	18	8	7	④
laitons	Cu Zn 19 Al 6	Y20	75	50	8	⑥ ⑦
	Cu Zn 20	Y20	18		12	②
	Cu Zn 40	Y30	34		8	② ⑤

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| ① pièces frottantes | ⑤ chimie : robinets |
| ② pièces courantes, robinetterie | ⑥ hélices mer, turbines, engrenages |
| ③ robinetterie haute pression | ⑦ pièces méca. de résistance |
| ④ coussinets | ⑧ roue et vis sans fin |

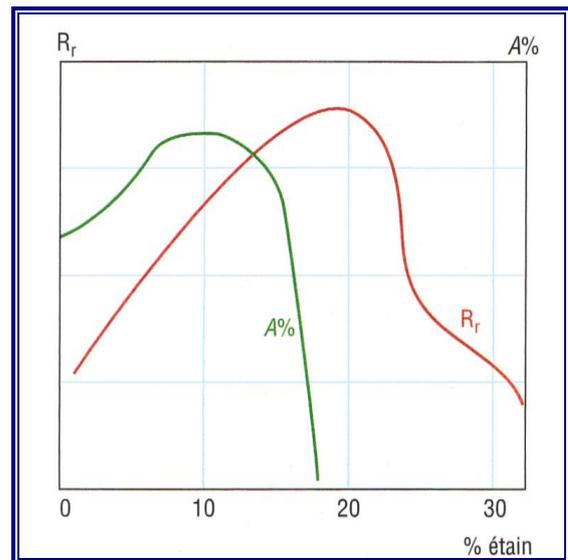


7. Caractéristiques mécaniques des laitons en fonction du pourcentage de zinc.

4. Bronzes

- L'étain (addition de 4 à 22 %) a un rôle comparable au zinc mais avec une action plus forte ; il est plus coûteux.
- Une addition de phosphore ($P < 1\%$) améliore les caractéristiques mécaniques, les propriétés antifriction, l'aptitude au moulage et a un rôle désoxydant. Les bronzes phosphoreux constituent le groupe le plus important.
- L'addition de plomb (Pb) améliore l'usinabilité et l'addition de zinc diminue le prix de revient (bronzes chrysocales).

Propriétés : résistance à la corrosion qualités frottantes aptitude au moulage. Les bronzes se travaillent moins bien que les laitons (usinage, emboutissage,..) mais donnent des moulages plus sains.



8. Caractéristiques mécaniques du bronze.

5. Cupro-aluminiums ou « bronzes d'aluminium »

Surtout utilisés en fonderie, l'addition d'aluminium (entre 10 et 11 %) donnent des alliages ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et une bonne résistance à la corrosion ; ils sont souvent utilisés avec une addition de fer.

6. Cupronickels

De couleur « argent » à partir de 20 % de nickel, très malléables, l'addition de nickel améliore les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et la résistivité électrique. Utilisations pièces de monnaie (≈ 25 % Ni), tubes de condenseurs (30 % Ni), résistances électriques (constantan 45 % Ni).

7. Maillechorts

Moins coûteux que les cupronickels, on peut les considérer comme des laitons avec addition de nickel. Meilleures résistances à la corrosion et mécanique que les laitons.

Utilisations : articles ménagers, pièces d'orfèvrerie et de décoration, appareillages électriques...

IV - Magnésium et alliages

Le magnésium est rarement utilisé à l'état pur. L'addition d'aluminium améliore la résistance (R_r) et la fluidité à chaud ; le zinc favorise la plasticité et l'aptitude au moulage ; le thorium (Th) augmente les propriétés à température élevée et le zirconium (Zr) la plasticité et la résistance à l'oxydation. Désignation (NF EN 1754) analogue aux aluminiums (M à la place de A).

Principales caractéristiques :

Assez « léger » (densité 1,8) ; rapport résistance/poids élevé et grande capacité d'amortissement (réduit les bruits et les vibrations).

Les alliages résistent à la corrosion atmosphérique (craignent l'humidité), peu aux acides, bien aux bases, alcalins et solvants et ne résistent pas en eau de mer. Ils sont facilement usinables (attention à l'inflammation des copeaux), moulables, forgeables, soudables (TIG, résistance) et rivetables. Veiller à la corrosion galvanique des assemblages multimétaux.

Utilisations : pièces diverses pour l'aviation, l'automobile, outillage électroportatif, équipement de bureau, audiovisuel, petit électroménager...

Alliages de magnésium (fonderie), de titane et de zinc						
base	nuances	mode de coulée	caractéristiques mécaniques			observations
			R _r (daN/mm ²)	R _e (daN/mm ²)	A %	
magnésium EN MC-	MgAl6Zn3 (G-A6Z3)	Y20	16-20	8-10	3-6	pièces courantes; bonne coulabilité à 450 °C
	MgAl9Zn (G-A9Z)	Y20	16	8	2	carters, roues, pièces aéronautiques
		Y24	23	11	7	fusion à 470 °C
		Y30	17-22	9-12	2-5	
	MgZn5Th2Zr	Y25	24-28	15-18	5-12	carters complexes, tous types de moulages ; $d = 1,87$; fusion 520 °C
MgZr	Y25	16	5	15	machines d'essais, bureautique ; $d = 1,75$	
titane	T-A5E ou TiAl5Sn	T5	90	80	20	malléabilité élevée ; pièces forgées
	T-A6V ou TiAl6V	T3	115	105	12	le plus utilisé ; pièces de structure d'avion, visserie
	T-A6V6E ou TiAl6V6Sn	T1	105	95	12	variante du T-A6V
		T3	125	111	10	traitements thermiques possibles
zinc	Z-A4 (zamak 3) ZnAl4 ou ZP3	Y4	28	20	10	carters, poignées, carburateurs, micromécanique
	Z-A4U1 (zamak 5) ZnAl4Cu1 ou ZP5	Y4	33	25	5	bagues, engrenages... fusion à 380 °C
	Z-A4U3 (zamak 2) ZnAl4Cu3 ou ZP2	Y4	36	27	5	variante plus dure

Entre parenthèses : ancienne désignation. Y4 : moulage sous pression (page 57).

V - Zinc et alliages

Principales nuances : zamaks (2, 3, 5) et kayems (1 et 2) pour l'industrie.

Désignations (NF EN 12844) : ZP3, ZP5, ZP2, ZP6, ZP8, ZP12, ZP27, ZP16 pour pièces moulées.

Principales caractéristiques : assez lourd (densité 7,13) ; basse température de fusion (420 °C) et bonne résistance à la corrosion.

La mise en oeuvre des alliages est facile en fonderie (basse température de fusion et retrait très faible). Il est possible de réaliser des pièces robustes à parois minces très complexes avec des tolérances serrées (0,01 à 0,1 mm), sans reprise d'usinage et sous des cadences très élevées (moulage en coquille sous pression des zamaks). Nombreux traitements de surface.

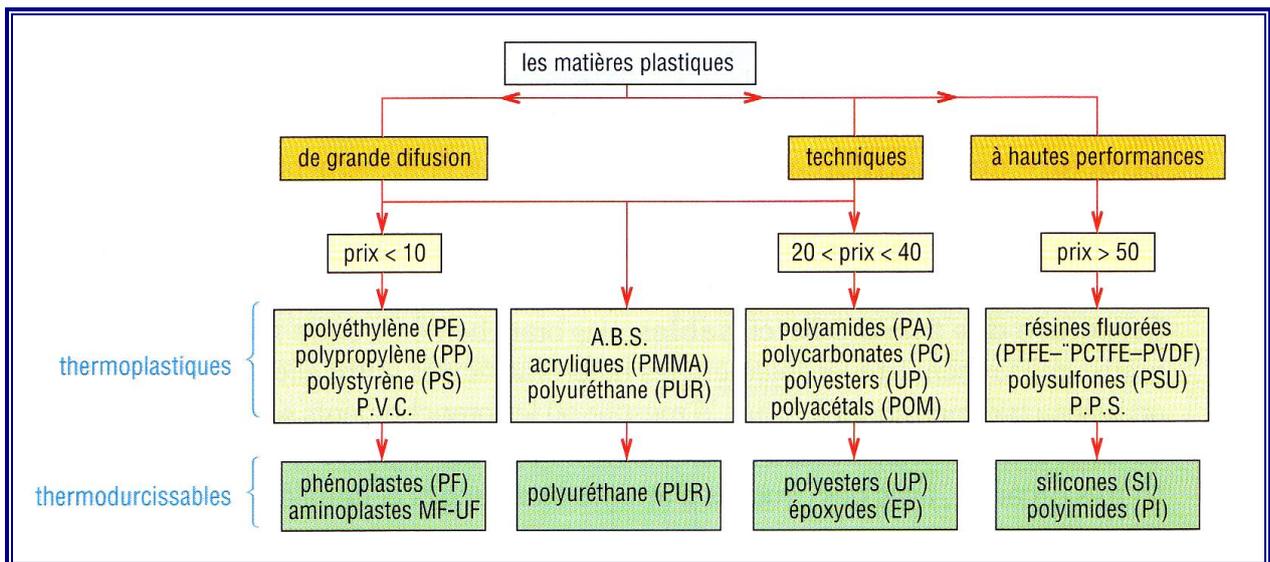
Utilisations : zamaks (ou nuances ZP) pour la fonderie (carburateurs, boîtiers...), zinc laminé pour le bâtiment (couverture...), poudres et revêtements de zinc contre la corrosion (métallisation, galvanisation, zingage, shérardisation, peintures...).

MATIÈRES PLASTIQUES ET ÉLASTOMÈRES

Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XX^e siècle et sont présentes partout : automobile, aéronautique, biens de consommation et d'équipement, bureautique, audiovisuel, emballages,...

La bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique.

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Il existe également des composés naturels utilisés dans la fabrication des matières plastiques : poix, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, corne...



1. Principales matières plastiques.

I - Propriétés générales et structures

1. Principales caractéristiques

Faible densité (0,9 à 2,2), bonnes qualités d'isolation électrique et thermique, bonne résistance à un grand nombre de produits chimiques, pas d'oxydation comme certains métaux et ont un rapport volume/prix intéressant.

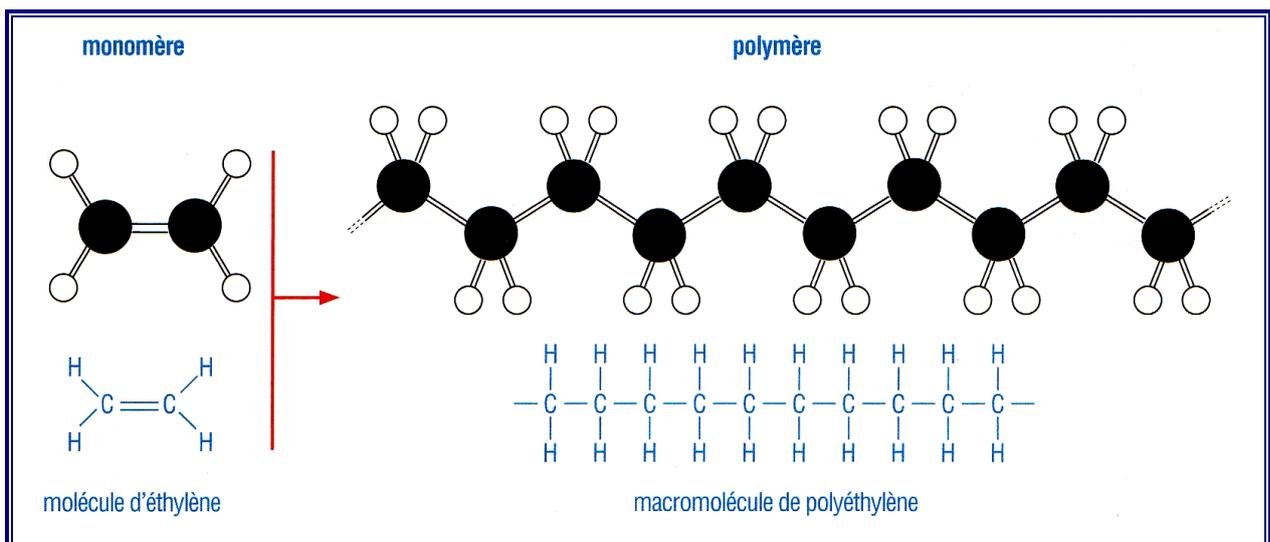
Inconvénients : parfois inflammables ; sensibles aux rayons ultra violets ; à l'humidité et non facilement recyclables.

2. Structures moléculaires

Les plastiques, ou « polymères », sont élaborés par synthèse chimique (construits chimiquement) à partir de molécules de base, appelées monomères.

Monomères : ce sont les unités chimiques de base, ou molécules, des matières plastiques. Ils sont construits autour des atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), chlore (Cl), soufre (S), fluor (F)...

Polymères : sous l'action de la pression, de la chaleur et d'un catalyseur, les molécules, ou monomères, se regroupent entre elles pour former de longues chaînes appelées polymères, ou macromolécules. Une macromolécule peut contenir de plusieurs centaines à plusieurs millions de monomères.



2. Structure moléculaire du polyéthylène.

Polymérisation : l'opération chimique liant les monomères entre eux, pour obtenir un polymère, est appelée polymérisation.

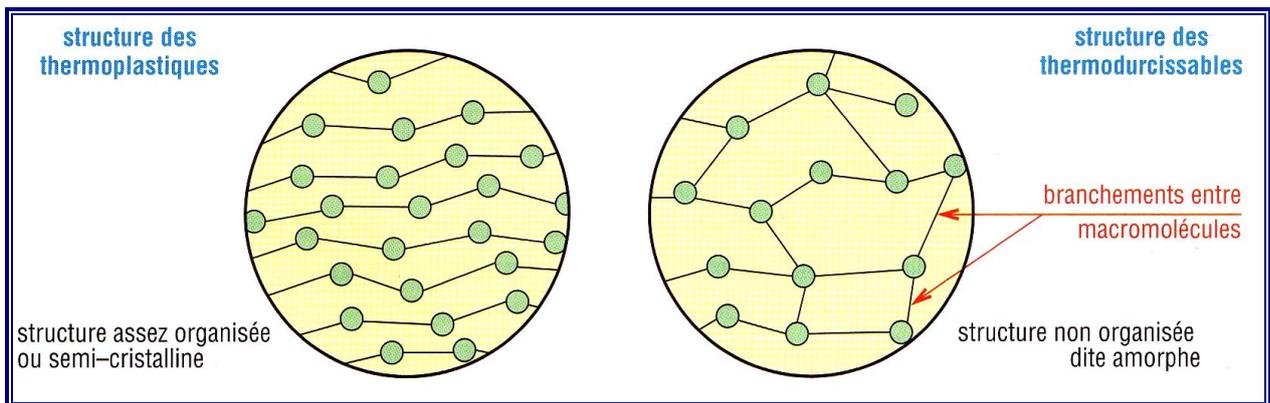
Copolymérisation : lorsque deux ou plusieurs polymères, de même nature ou non, sont liés entre eux chimiquement (branchements) l'opération est appelée copolymérisation.

Structure des thermoplastiques : le nombre des branchements entre macromolécules est faible ; celles-ci restent linéaires et séparées après moulage.

La structure obtenue, très serrée (forces élevées entre molécules et atomes) est semi-cristalline, bien organisée et proche de celle des métaux.

Structure des thermodurcissables : les branchements entre macromolécules, très nombreux, solidarisent irréversiblement les macromolécules entre elles (copolymérisation créant un réseau tridimensionnel). Dans la mesure où les branchements se font de manière aléatoire, au hasard, le matériau obtenu est dit amorphe ou « désorganisé », différent d'un réseau cristallin très organisé, avec des couches d'atomes bien rangés et empilées les unes sur les autres.

Remarques : certains plastiques, comme le polyester, existent dans les deux structures, thermodurcissable et thermoplastique.



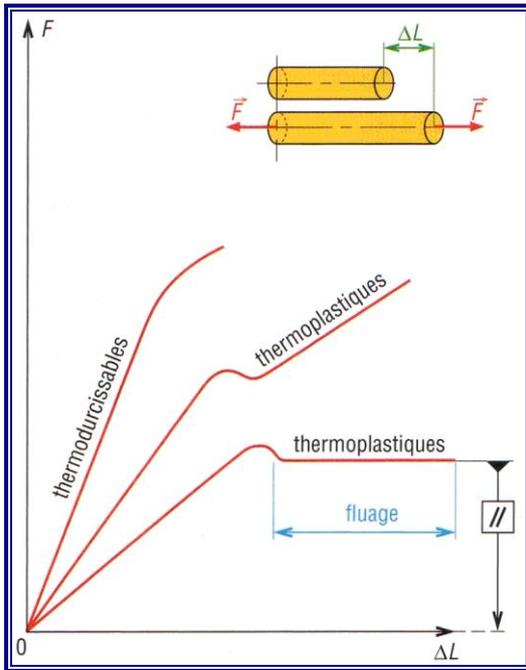
3. Structure des matières plastiques.

3. Propriétés mécaniques

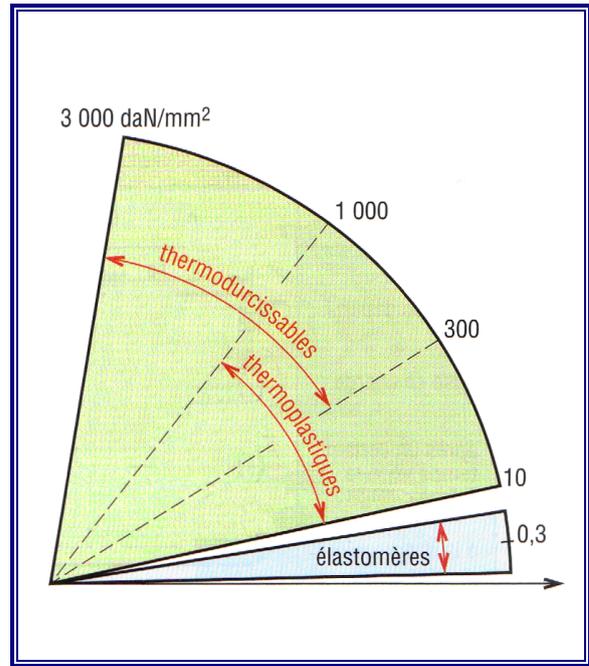
Le comportement mécanique des plastiques est différent de celui des métaux. Il dépend de la structure, de la composition, du mode de fabrication, de la forme de la pièce, de la température, du temps et de l'humidité.

Le pourcentage d'allongement (A %) est plus faible pour les thermodurcissables ($< 1\%$, se déforment peu avant rupture, sont plus fragiles et plus sensibles aux chocs) qui présentent aussi, en général, une dureté plus élevée.

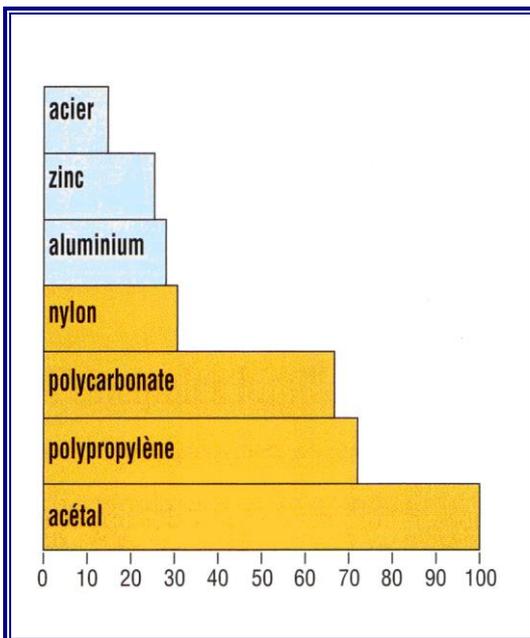
La résistance en compression est souvent plus élevée que la résistance en traction : 50 à 100 % pour les thermoplastiques, parfois plus de 100 % pour les thermodurcissables. Sous charge, les plastiques se déforment instantanément dans un premier temps, comme un ressort, puis, contrairement au ressort, continuent à se déformer progressivement au cours du temps (« déformation retardée »). C'est le fluage, sorte d'écoulement très visqueux qui dure autant que la charge.



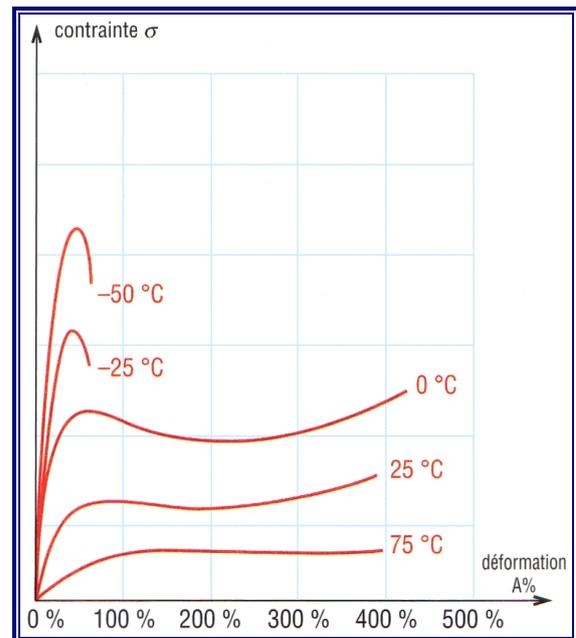
4. Phénomène de fluage au cours du temps.



5. Valeurs de E, module d'élasticité longitudinal.



6. Comparaison des dilatations thermiques entre métaux et plastiques.



7. Comparaison des courbes contraintes /déformation du polyéthylène.

4. Phénomène de fluage

Le fluage est l'une des caractéristiques essentielles des matières plastiques. Il peut être mis en évidence par un essai de traction.

A la mise en charge de l'éprouvette, un allongement dL_0 se produit instantanément. Si la charge (F) est maintenue, l'éprouvette continue progressivement de s'allonger au cours du temps (allongement retardé).

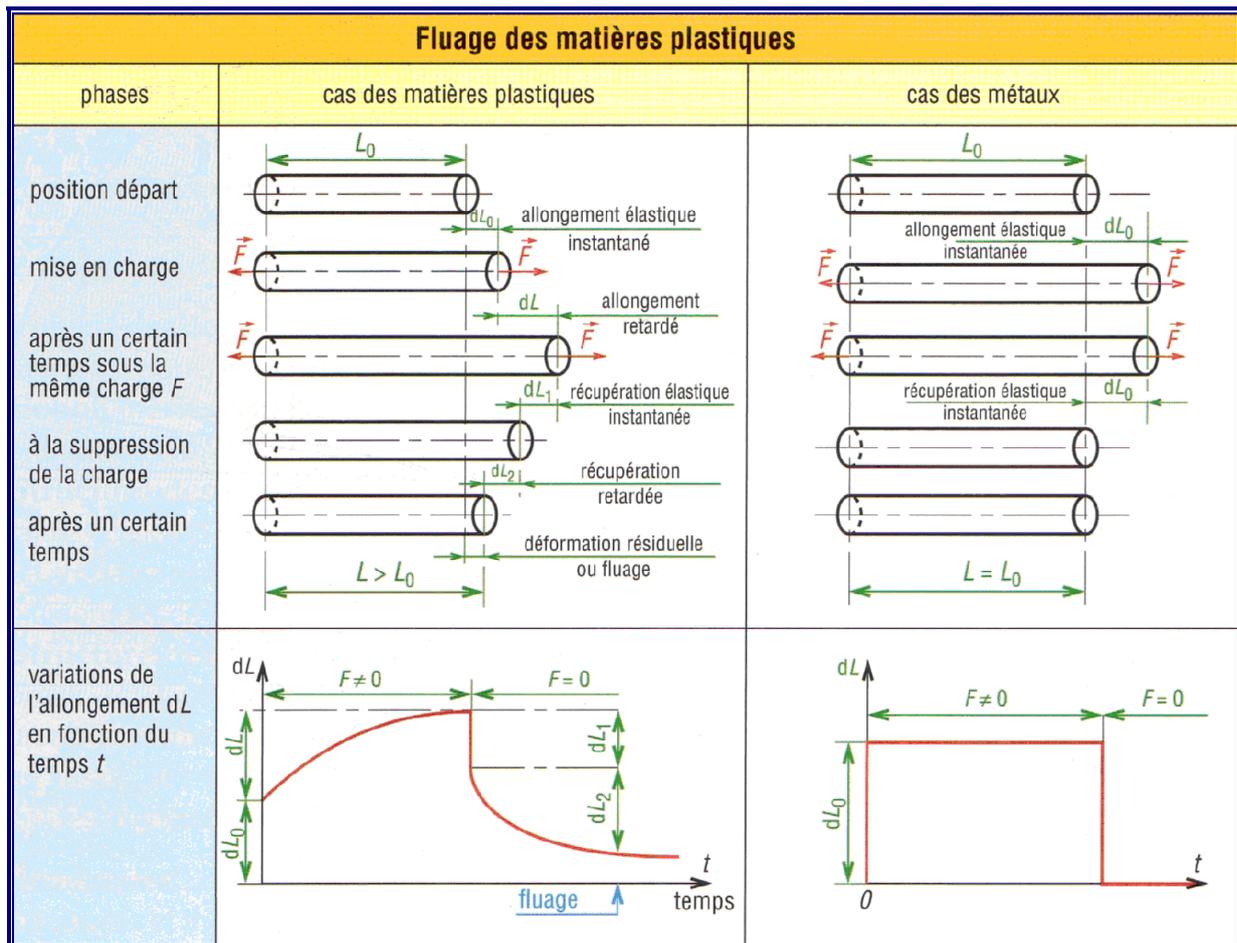
Plus la température est élevée, plus le phénomène est accentué.

Si la charge F est supprimée, le phénomène s'inverse, l'éprouvette récupère rapidement une partie de l'allongement réalisé (récupération instantanée), puis progressivement et plus lentement une autre partie (récupération retardée).

La déformation résiduelle qui subsiste mesure le fluage.

La destruction des liaisons, le glissement entre les macromolécules, le frottement interne retardant les déformations sont les principales causes du fluage. Le phénomène apparaît également pour des métaux travaillant sous charge à de hautes températures (fours, moteurs, réacteurs...).

Remarque : les fibres de renforcement (verre, kevlar, carbone...) permettent de corriger le phénomène de fluage (Voir chapitre 1, généralités matériaux, paragraphes composites).



8. Principe du fluage, comparaison avec les métaux se déformant élastiquement.

II - Thermoplastiques

C'est de loin la famille la plus utilisée ils représentent près de 90 % des applications des matières plastiques. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables. Ils existent sous forme rigide ou souple, compacte ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé...

1. Propriétés principales

Ils ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés ; ils sont comparables à la cire ou à la paraffine.

Insensibles à l'humidité, aux parasites, aux moisissures (sauf polyamides) ils peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue.

Inconvénients : fluage élevé ; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage ; combustible ; sensibles aux ultraviolets électrostatiques, qui « attirent les poussières » ; pas toujours agréables au toucher.

2. Principales familles

(Figure 1 : principales matières plastiques.)

a) Thermoplastiques de grande diffusion

À eux seuls, ils représentent de 70 à 80 % du total des plastiques mis en oeuvre. On y trouve les polyéfines (polyéthylène, polypropylène), le polystyrène et les PVC (polychlorure de vinyle). Remarque les ABS (acronitrile-butadiène-styrène) et les acryliques (polyméthacrylate de méthyle) sont, par leur prix et leur diffusion, à mi-chemin entre les précédents et les plastiques techniques.

b) Thermoplastiques techniques

Les polyamides, proche du nylon textile, sont les plus utilisés du groupe ils comportent de nombreuses variantes, de bonnes caractéristiques mécaniques, et une bonne tenue aux températures.

Les polycarbonates sont transparents et résistants aux chocs (verres correcteurs, vitrage anti-effraction...).

Les polyesters, voisins des fibres textiles polyesters, sont transparents et imperméables aux gaz (applications voisines des polyamides).

Les polyacétals résistent à la fatigue, à l'eau et aux solvants (lave-linge, lave-vaisselle...).

c) Thermoplastiques hautes performances

Plus coûteux, ils sont caractérisés par leur résistance à la chaleur et par des propriétés électriques élevées. Les résines fluorées (PTFE, PCTFE, PVDF) sont les plus classiques elles résistent à presque tous les agents chimiques, ne vieillissent pas, ne brûlent pas, ont de bonnes qualités frottantes. Les polysulfones et les polysulfones de phénylène (PPS), plus récents, transparents, allient résistance à la température, propriétés mécaniques et électriques élevées.

Principales matières plastiques																			
		symbole	(1) aspect	densité	températures limites (°C)	caractéristiques mécaniques				résistance chimique				solvants	huiles	usinage	(2) moulage	(3) exemples d'emploi	
						R _r (daN/mm ²)	E (daN/mm ²)	A%	chocs IZOD entaillés	acides		bases alcalis							
										(2) forts	(2) faibles	(2) forts	(2) faibles						
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	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	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	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	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	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	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

III - Thermodurcissables

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créés il n'est plus possible de les remodeler par chauffage.

Au moment de la mise en oeuvre, ils ramollissent dans un premier temps, puis durcissent de manière irréversible sous l'action prolongée de la chaleur (comparable à la cuisson du blanc d'oeuf).

1. Propriétés principales

Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées (> 200 °C), aux attaques chimiques, une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques (conservent une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps), une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage.

Inconvénients : mise en oeuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques ; pas de moulage par injection et cadences de fabrication assez faibles.

2. Principales familles

- Les phénoplastes (PF) noirs ou bruns (bakélite ») et les aminoplastes blancs ou crème (urée formaldéhyde UF, mélamine-formol MF) sont les plus courants et les moins coûteux.
- Les époxydes (EP), les polyesters (UP) et les polyuréthanes (PUR) peuvent être classés dans le groupe des plastiques techniques.
- Pour les hautes performances, plus coûteux, on a les polyamides PF, qui conservent leurs propriétés mécaniques et électriques au delà de 300 °C, et les silicones SI, qui résistent à la chaleur et ont des propriétés mécaniques élevées.

IV - Elastomères ou caoutchoucs

Ils sont obtenus par synthèse chimique, comme les plastiques, et possèdent des propriétés comparables à celles du caoutchouc naturel. Le néoprène (1930) fut le premier caoutchouc de synthèse.

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

1. Principales caractéristiques

La propriété la plus remarquable est l'élasticité ou la capacité à s'allonger sans se rompre (A% très élevé, jusqu'à 1 000 %). A l'opposé le module d'élasticité longitudinal E reste très petit (< 10 N/mm² : près de 200 000 pour les aciers) traduisant une faible rigidité.

2. Caoutchoucs vulcanisés (réticulés)

Ce sont les plus traditionnels. La vulcanisation consiste à incorporer du soufre au caoutchouc afin d'améliorer la résistance tout en maintenant l'élasticité. Ils peuvent être extrudés ou moulés. Principales nuances caoutchouc naturel, nitrile (NBR), butyl, chloroprène, EPDM (éthylène propylène), SBR (styrène-butadiène), Fluorés (FPM).

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	++	++	++	++	+	+++
	impermeabilité aux gaz	+	+	++	+++	+	0
	acides faibles	++	++	+	+++	++	+++
	acides forts	+	+	0	+++	+	+++

3. Caoutchoucs thermoplastiques

Plus récents, ils ont les qualités des élastomères vulcanisés haut de gamme avec en plus la simplicité de mise en oeuvre des plastiques thermoplastiques (moulage par injection, pas de vulcanisation).

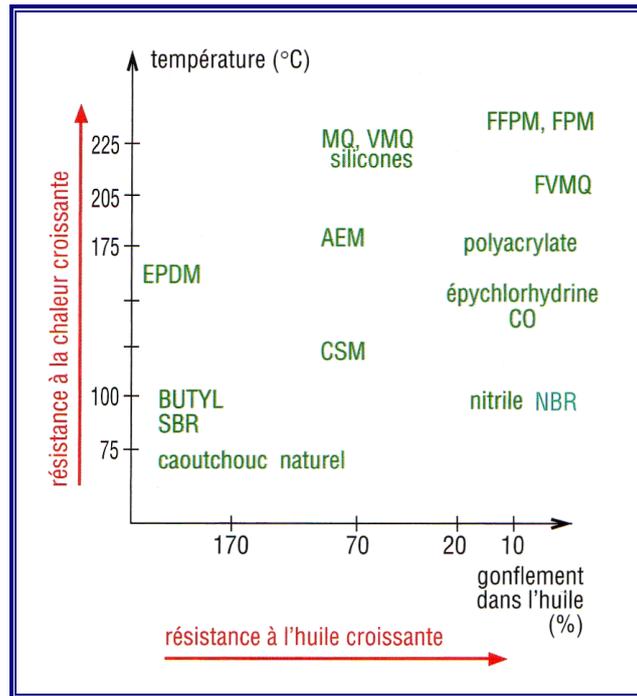
Principales nuances :

Polyuréthane (AU) : grande dureté, résistance à l'abrasion et au déchirement, faible tenue à la chaleur et à l'humidité.

Polyacrylates (ACM) : résistance aux températures, à l'huile et à l'ozone de l'air, faible tenue à l'eau, acides et bases.

Silicones (VMQ et PVMQ) : résistent aux hautes et basses températures tout en conservant une bonne résistance mécanique, mais tenue moyenne à l'huile.

Fluorosilicones (FMQ) : mêmes caractéristiques que les silicones avec une meilleure résistance à l'huile.



11. Résistance à l'huile et à la chaleur des principaux élastomères.

Remarques : les élastomères fluorés présentent une des meilleures résistances à la chaleur, aux hautes températures et aux fluides, particulièrement dans l'air et dans l'huile.

ESSAIS DES MATÉRIAUX

Les essais, en laboratoire ou sur le terrain, apportent des renseignements précis et fiables sur la qualité et les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre ; des normes internationales règlent la plupart.

Principaux essais : essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...), essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité...), essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...), essais sur les fluides (viscosité, écoulements...), essais non destructifs (radiographie, ultrasons, magnétoscopie, acoustique d'étanchéité, ressuage...).

I - Définitions préliminaires

Homogénéité : un matériau est homogène s'il possède, en tous points, les mêmes propriétés chimiques et physiques. La plupart des métaux et des alliages sont considérés comme homogènes. Le bois et les composites ne le sont pas, ils sont hétérogènes.

Contraintes (unités : N/mm^2 ou MPa) : elles caractérisent par des indications chiffrées les efforts de cohésion qui existent entre les grains de matière. On trouve des contraintes normales, ou de tension, ayant pour symbole (σ) et des contraintes de cisaillement, ayant pour symbole τ (tau).

Déformations : elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets. Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques.

Exemples : allongement, raccourcissement, fléchissement, torsion, glissement ...

Isotropie : un matériau est isotrope s'il présente les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions de la matière. Les métaux et les alliages sont généralement isotropes. Les matières plastiques, les matériaux composites et le bois ne sont pas isotropes. Le bois est plus résistant dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaire aux fibres.

Elasticité : elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. Un ressort, chargé normalement, a un comportement élastique. La propriété contraire est la plasticité.

Plasticité : un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique. La pâte à modeler a un comportement plastique. La plupart des métaux et des alliages ont un comportement *élastique* sous charges modérées et *plastique* sous charges excessives.

Ductilité : c'est l'aptitude qu'a un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. Elle est caractérisée par l'allongement pour cent A% (plus A% est grand, plus le matériau est ductile).

- Si $A\% \geq 5\%$ les matériaux sont considérés comme ductiles.
- Si $A\% < 5\%$ les matériaux sont considérés comme fragiles ou « cassants ».
- Z% (striction) et K (résilience) sont également des indicateurs.

La ductilité est une propriété déterminante pour les matériaux devant être déformés à froid (emboutissage, pliage...).

Malléabilité : cette propriété est identique à la ductilité mais appliquée à la compression.

L'aluminium, le cuivre, l'or, certains laitons et certains aciers inoxydables sont très malléables ($A\% > 35\%$) et acceptent des emboutissages profonds.

II - Essai de traction

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

Principe : L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant.



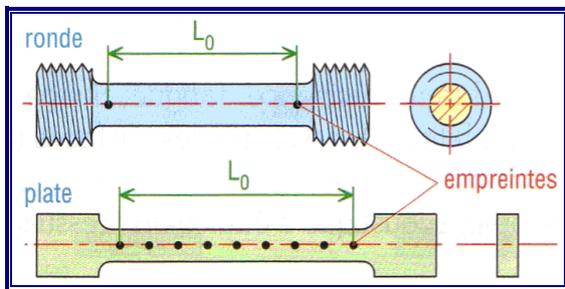
1. Machine de traction.



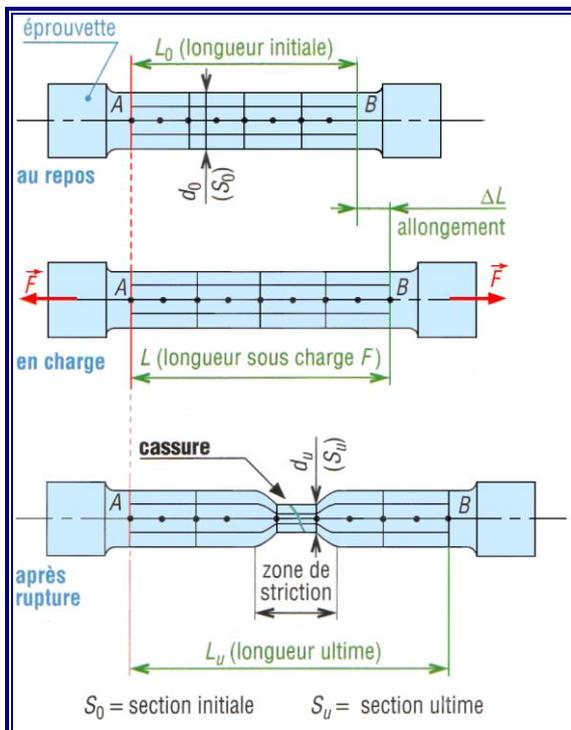
2. Epreuve.



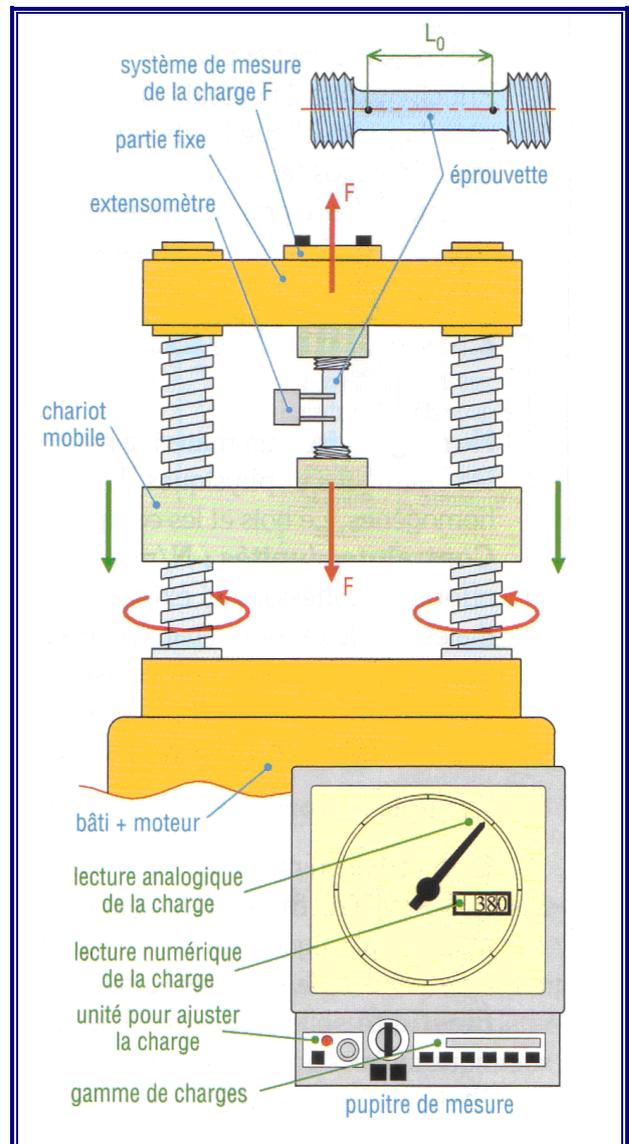
3. Epreuve installée entre les mors de machine de traction.



4. Exemples d'éprouvettes de traction usuelles.



5. Éprouvette en cours d'essai.



6. Principe des machines d'essai de traction.

Caractéristiques mesurées

Les deux points A et B sont situés sur l'éprouvette.

L_0 : Longueur initiale de l'éprouvette au repos (sans charge).

L : Longueur de l'éprouvette mesurée sous charge F .

F : Force exercée par la machine d'essai sur l'éprouvette.

Résultats de l'essai

$$\text{Résistance élastique } R_e = \frac{F_e}{S_0} \begin{cases} F_e \text{ en } N \\ S_0 \text{ en } mm^2 \\ R_e \text{ en } MPa \end{cases}$$

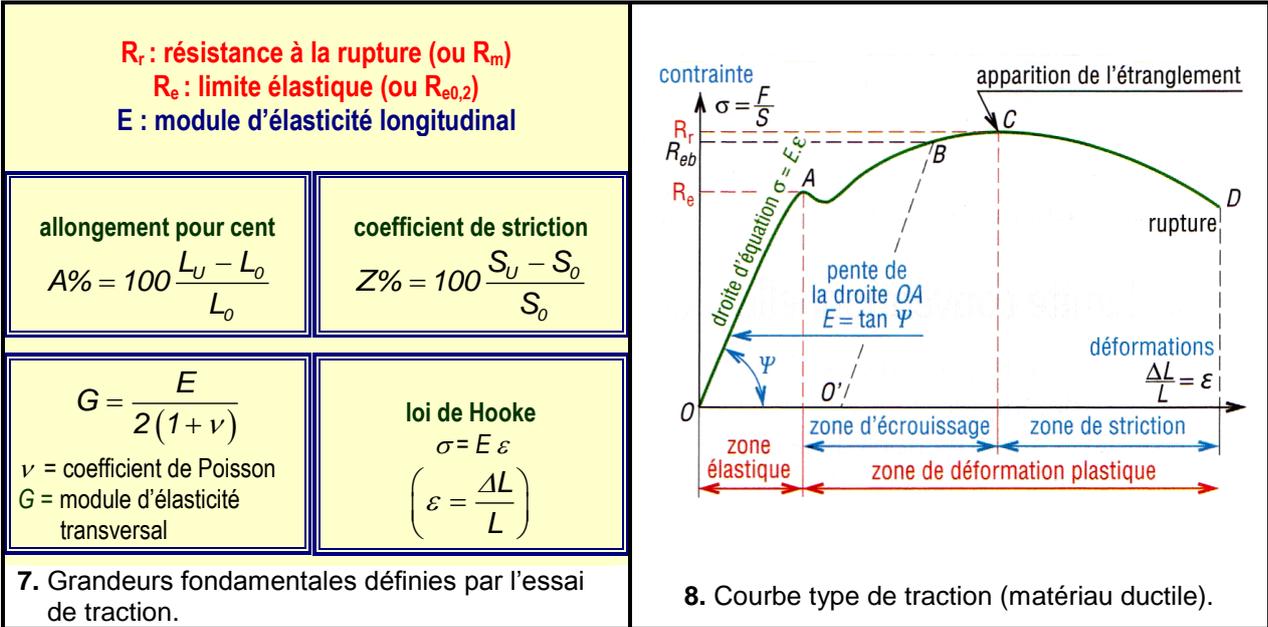
$$\text{Résistance à la rupture } R_r = \frac{F_r}{S_0}$$

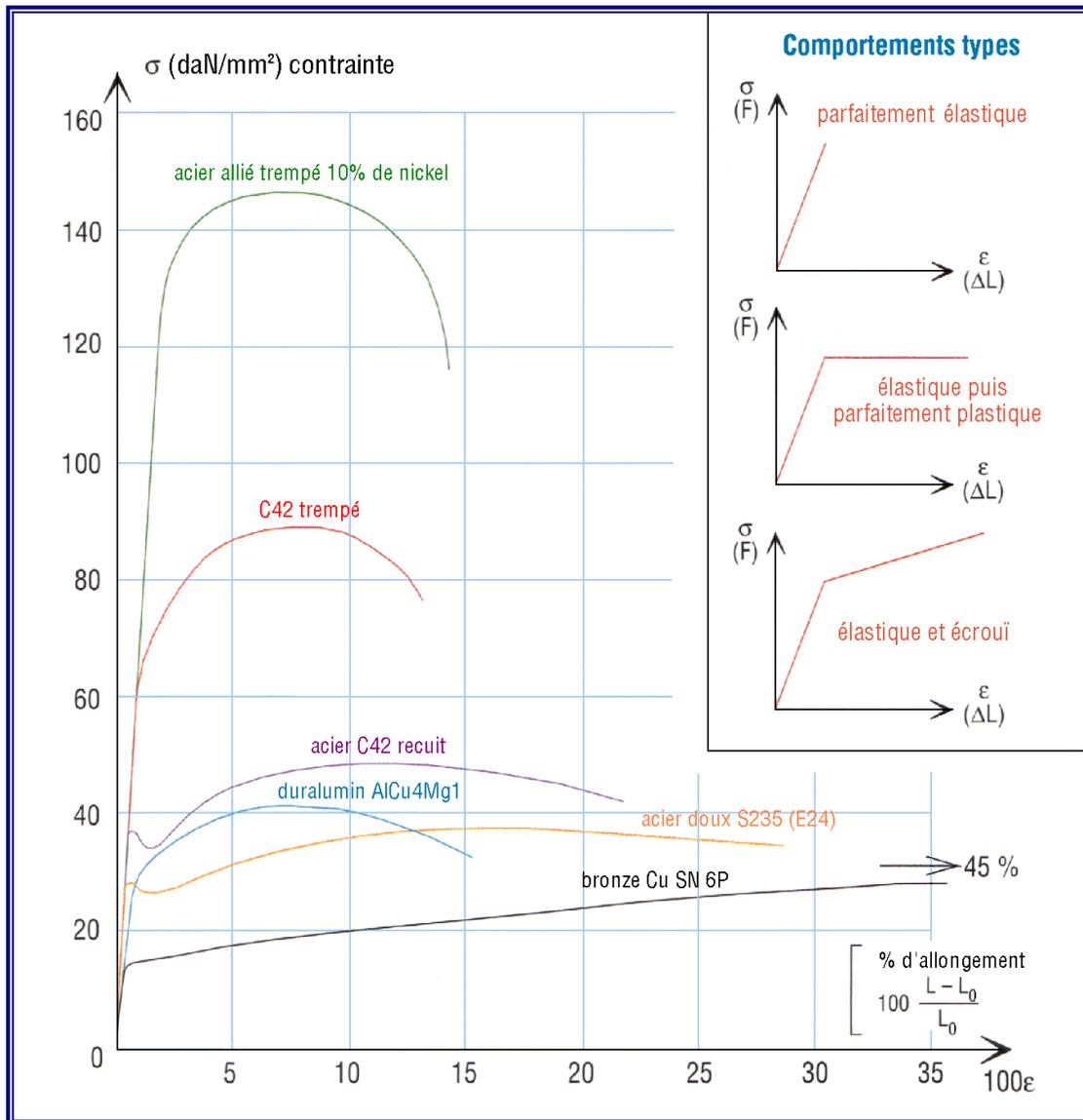
$$\text{Allongement pour cent } A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

L_u : Longueur ultime après rupture

1. Courbes contraintes déformations typiques

Pour un grand nombre de matériaux, comme les métaux et les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique, où le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation, ou l'allongement, est proportionnelle à la contrainte, ou à l'effort exercé, et le matériau (l'éprouvette) est parfaitement élastique (se comporte comme un ressort parfait).





9. Courbes de traction de quelques matériaux et modèles de comportement.

Module d'élasticité longitudinale E (N/mm^2) : il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente et l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

Exemples : $E_{\text{aciers}} = 200\,000\, N/mm^2$, $E_{\text{élastomères}} = 1\, N/mm^2$.

Loi de Hooke ($\sigma = E\varepsilon$) : cette loi, ou équation de la droite QA, traduit la proportionnalité précédente (σ en N/mm^2 , E en N/mm^2 et ε sans unité). Elle est à la résistance des matériaux ce qu'est la loi d'Ohm à l'électricité.

Limite élastique R_e (N/mm^2) : elle marque la fin du domaine élastique (« point A »). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après déchargement, il subsiste un allongement permanent).

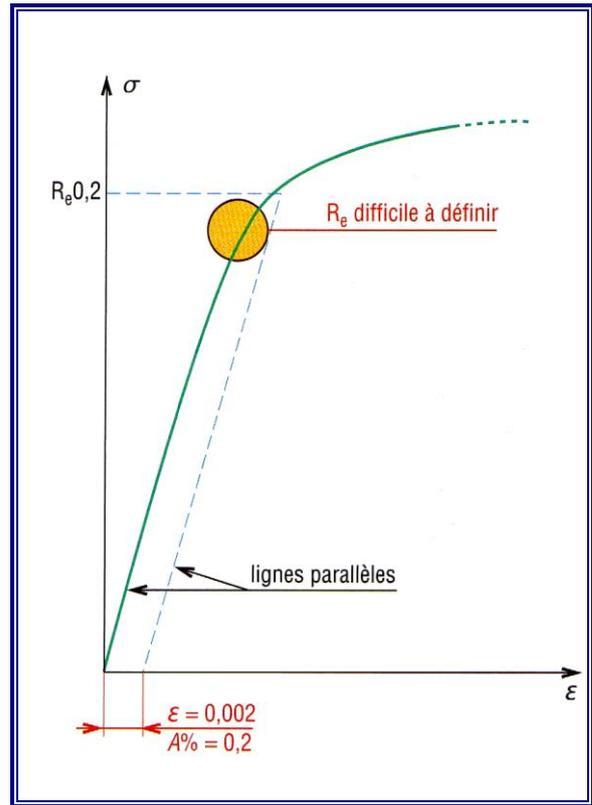
2. Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ ou $R_{p0,2}$ (N/mm²)

Variante de la précédente (R_e), elle tient compte des imprécisions de la mesure, c'est-à-dire des imperfections de la droite OA et des appareils de mesure. Pour la mesure de R_e on tolère une légère déformation permanente de 0,2 % ($A\% = 0,2$).

3. Phénomène d'écrouissage

Surtout employé en compression, il permet d'augmenter la limite élastique R_e sans modifier la résistance à la rupture R_r . Dans un premier temps le matériau est déformé plastiquement (avant point de striction C : chemin OAB). Au relâchement le déchargement se fait suivant la droite BO', parallèle à QA (voir fig. 8).

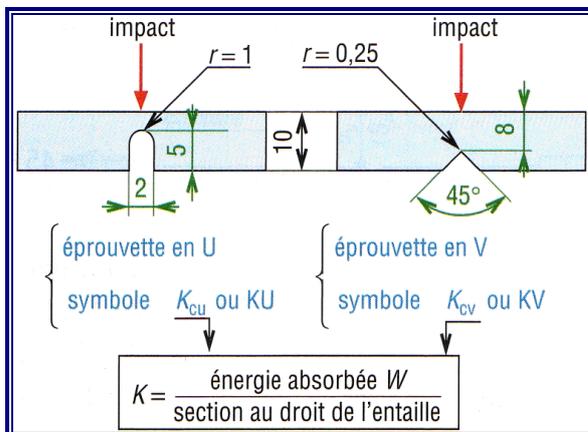
À la remise en charge la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenu O'BC avec R_{e_b} comme nouvelle limite élastique.



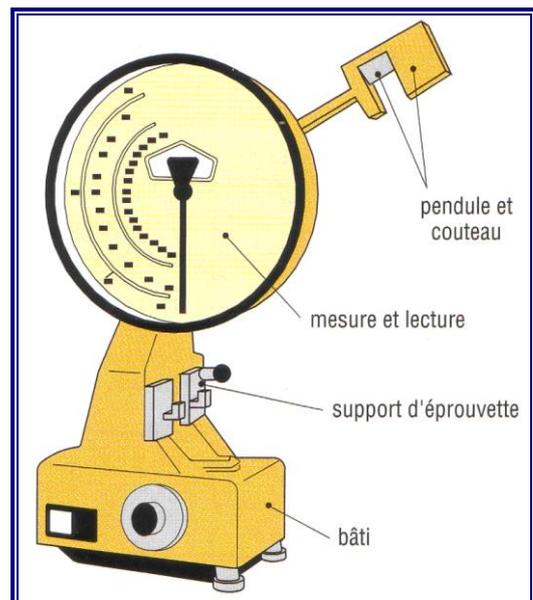
10. Définition de $R_{e0,2}$.

III - Essai de résilience

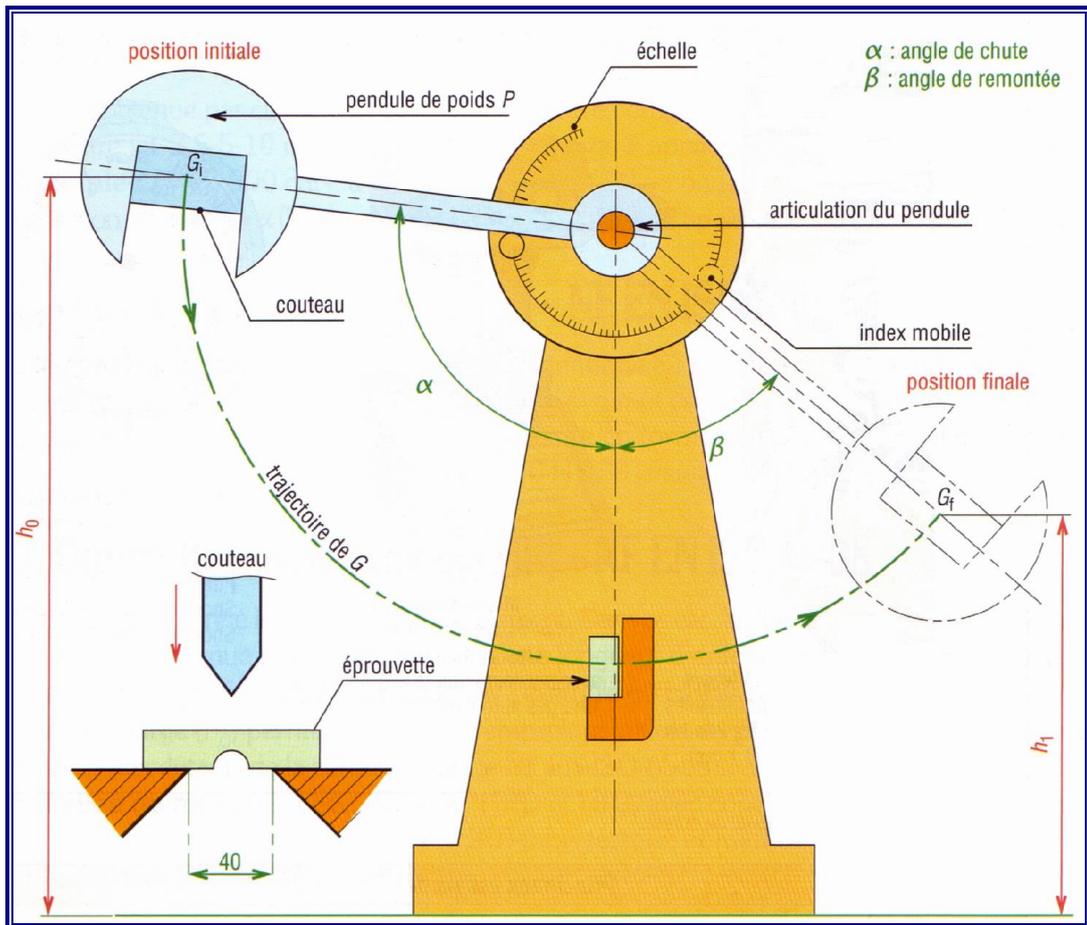
NF EN 10045 - 1



11. Essai Charpy : forme des éprouvettes (55x10x10).



12. Machine d'essai de résilience.



énergie potentielle du pendule

au départ : $W_0 = P \cdot h_0$
 à l'arrivée : $W_1 = P \cdot h_1$

énergie absorbée par l'éprouvette

$W = P(h_0 - h_1)$
 $= W_0 - W_1$

W_0 nominale = 300 J (Charpy)

13. Principe d'essai de résilience. Vitesse d'impact : $V = \sqrt{2gL(1 - \cos \alpha)}$

La **résilience**, de symbole général **K**, caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre ; ce risque est amplifié aux basses températures.

Elle est mesurée sur des machines du type **Charpy** (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée). Une jauge peut être collée sur le couteau (courbes : force-déplacement). L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ ($W_0 = P \cdot h_0$) et l'arrivée ($W_1 = P \cdot h_1$) :

$$W = P \cdot h_0 - P \cdot h_1 = P(h_0 - h_1).$$

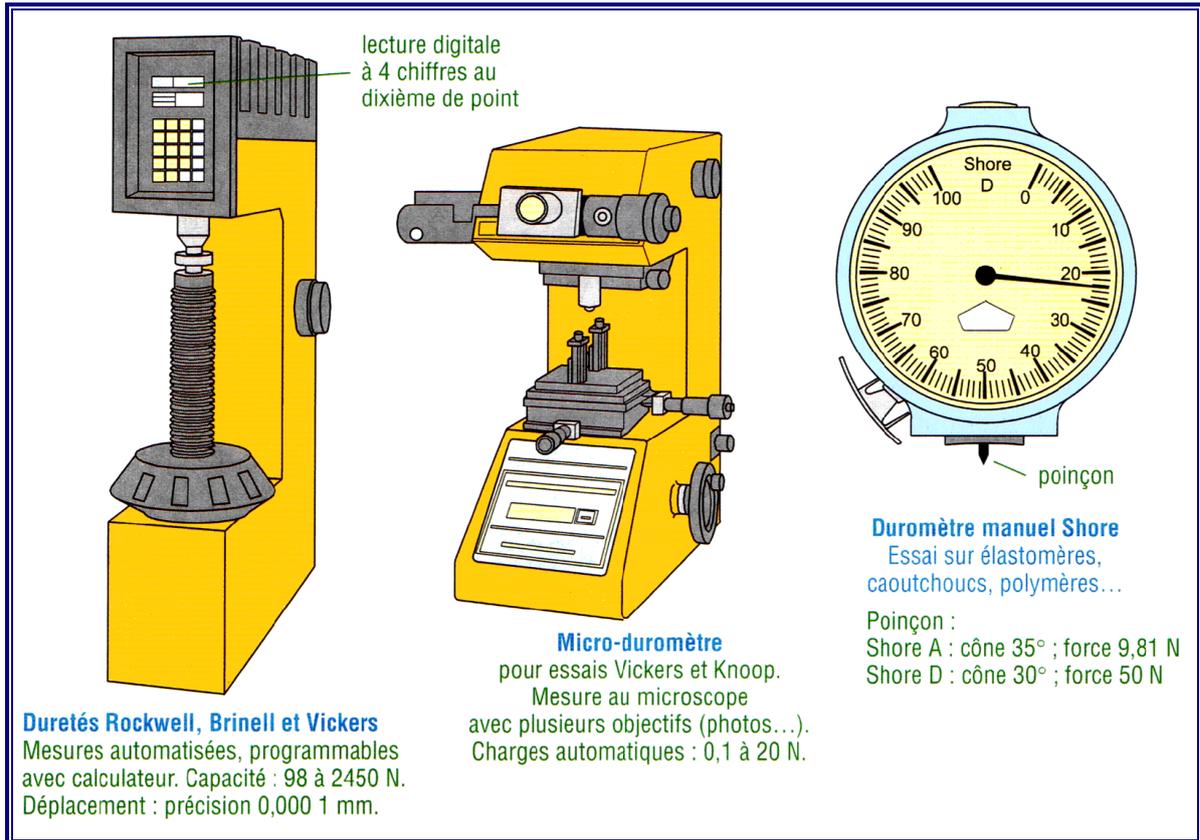
La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille (fig. 11).

Exemple : $KV = 121$ (pour énergie nominale 300 J ; entaille V ; énergie absorbée 121 J).

IV - Essai de dureté

La **dureté**, de symbole général **H**, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures...), à l'usure et à l'érosion.

Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques).



14. Exemples de machines d'essai de dureté.

Principaux essais de dureté		
essai	symboles	principe et conduite de l'essai
Brinell HB	HBW	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>bille $\varnothing d$ en carbure</p> <p>surface</p> </div> <div style="margin-right: 20px;"> <p>$\varnothing a$</p> </div> <div> $HBW = \frac{0,102 \times F}{S}$ <p>avec</p> $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm) 0,981 ≤ F ≤ 2 942 daN</p> </div> </div>

Vickers HV	HV 100 HV 50 HV 30 HV 20 HV 10 HV 5 ... HV 0,01	<p>pyramide à base carrée 136°</p> <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <tr> <td>HV</td> <td>HV 100</td> <td>HV 50</td> <td>etc.</td> </tr> <tr> <td>F (N)</td> <td>980,7</td> <td>490,3</td> <td>...</td> </tr> </table> <p>pour HV 100, F = 100 kg</p>	HV	HV 100	HV 50	etc.	F (N)	980,7	490,3	...	$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ <p>avec</p> $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, d₁ et d₂ en mm)</p> <p>Variante : essai Knoop d₁ = 7,1 d₂ HK = 14,2 F/d₁² angle 172,5°</p>
	HV	HV 100	HV 50	etc.							
F (N)	980,7	490,3	...								
Rockwell HR	HRA HRC HRD HRB HRE HRF HRG HRH HRK etc.	<p>cône ou bille 120°</p> <p>précharge (marquage) F₀ (100 N)</p> <p>mise en charge F + F₀</p> <p>relâchement F₀</p> <p>h = enfoncement rémanent</p> <p>dureté HR = 100 - $\frac{h}{0,002}$</p> <p>échelle de dureté (C, B, A...)</p> <p>billes : d = 1,5875 ou 3,175 mm</p>									

15. Principes des essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell.

1. Dureté Brinell (symbole HBW) - NF EN ISO 6506

Elle est obtenue par calcul.

Principe

Il consiste à imprimer dans le métal étudié, une bille d'acier très dur de diamètre *D* sous l'action d'une charge *F*. *D* et *F* dépendent du matériau à essayer. Les valeurs les plus courantes sont *D* = 10 mm et *F* = 29 420 N, elles sont utilisées surtout pour les essais des métaux ferreux et des bronzes. Après essai, on mesure l'empreinte laissée par une bille en carbure (diamètre : 1–2, 5–5–10 mm) et la valeur de la charge *F* appliquée pour obtenir cette empreinte.

Exemple : F 3 000 daN, d = 10 mm, pendant 20 secondes, symbole HBW 10/3000/20.

Utilisation : tous métaux (Norme NF EN ISO 6506). Temps d'application 2 à 8 s, maintien 10 à 15 s.

Application :

H 2,5 – 1 840 – 15

D = 2,5 mm ; *F* = 1 840 N ; durée 15 s.

Mesure : Diamètre (d) de l'empreinte.

Résultat : La dureté Brinell HB est un nombre proportionnel au rapport :

$$\frac{F \text{ (charge en N)}}{S \text{ (aire de l'empreinte en mm}^2\text{)}}$$

$$HB = \frac{2 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Remarques :

- L'empreinte laissée par la bille est importante : $d \approx 3 \text{ mm}$.
- La dureté du matériau doit être inférieure à celle de la bille (la solution est déconseillée si $HB \geq 250$).
- L'épaisseur $e \geq 10 h$ pour éviter les déformations.
- L'essai de traction est destructif, il faut prélever sur la pièce un échantillon. L'essai de dureté n'est pas destructif.
- Pour les aciers non alliés la dureté Brinell est liée à la résistance à la traction par la relation :

$$R_m = 3,5 HB$$

$$N / mm^2$$

- Domaine d'utilisation : Pièces brutes de laminage ou de moulage.

2. Dureté Vickers (symbole HV) - NF EN 150 6507

Elle est obtenue par calcul.

Principe

Il consiste à imprimer dans le métal étudié un pénétrateur de diamant en forme de pyramide à base carrée, d'angle au sommet de 136° , sous l'action d'une charge F . La dureté du matériau est fonction de la grandeur de l'empreinte laissée par le pénétrateur.

On mesure la diagonale de l'empreinte à l'aide d'un microscope spécial puis on calcule l'aire de la pyramide à base carrée :

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \frac{136^\circ}{2}}$$

Charge à utiliser

Elle peut varier de 49 N à 981 N ; la charge d'essai normale est de 294 N.

Durée du maintien de la charge : 10 à 15 s.

Résultat :

Dureté Vickers :

$$HV = \frac{F \text{ (charge en N)}}{S \text{ (aire en mm}^2\text{)}} = \frac{2 F \sin 136^\circ / 2}{d^2}$$

Utilisation : tous métaux.**Variante :** essai Knoop (microdureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et fines sections).**Exemple :** 640 HV 30 (charge 294,2 N; 10 à 15 s ; dureté 640).**3. Dureté Rockwell (symbole HR) - NF EN 150 6508**

C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement.

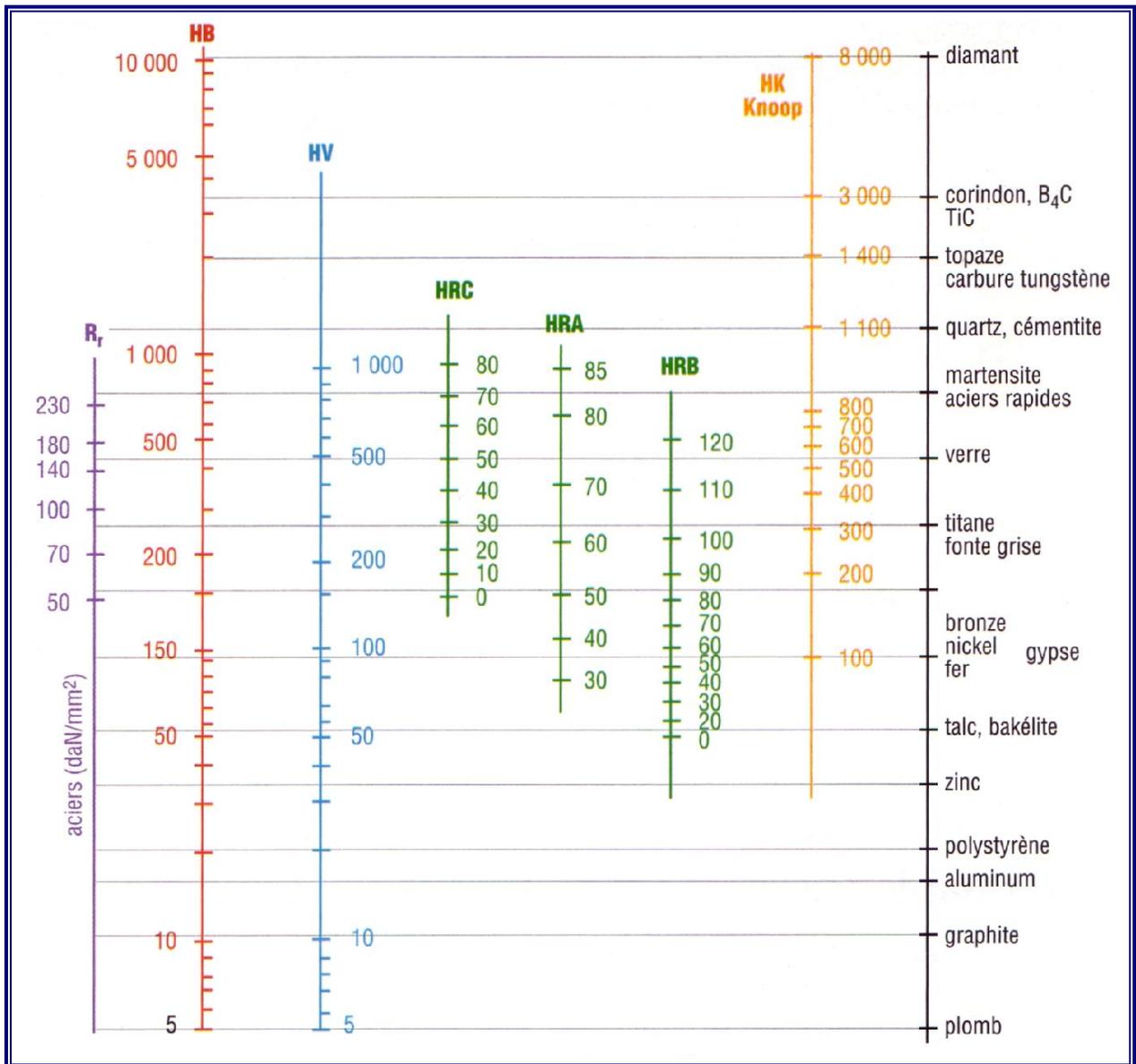
Il consiste à imprimer en deux étapes un pénétrateur, **bille d'acier** ou **cône de diamant**, dans le matériau à tester en exerçant deux charges d'intensité connue F_0 et F_1 .Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur, bille acier, (S : exemple 60 HRBS) ou carbure (W : exemple 60 HRBW) et cône diamant (A, C, D, et N). Une précharge (F_0) permet de faire une empreinte initiale et, par là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface (norme NF EN ISO 6508).

- **Essai au cône de diamant**

Angle au sommet 120° est utilisé pour le contrôle de la dureté des matériaux durs $HB > 250$ ($R_m > 900 \text{ N/mm}^2$). L'empreinte doit être réalisée sur une surface propre. **Résultat : HRC.**

- **Essai à la bille**

Différents diamètres de billes sont utilisés, le plus courant pour les alliages de Fe, Al, Cu, est celui de 1,58 mm. L'essai à la bille n'est pas recommandé si $HB \geq 250$. L'empreinte peut être réalisée sur une surface brute (mais exempte d'oxydation). **Résultat dureté HRB.****Echelles de mesure :** HRC (ferreux), HRD et HRA avec cônes (pour matériaux durs et très durs : carbures, aciers trempés...) ; HRB (non ferreux et métaux en feuilles) ; HRE, HRF, HRG (métaux doux) ; HR15N, HR30N, HR45N, HR15T, HR30T, HR45T (plastiques...).



16. Comparaisons indicatives des échelles de dureté usuelles (voir NF EN ISO 18205).

V - Essai de fluage

La déformation continue des objets, avec le temps, sous l'action d'efforts appliqués constants est appelée fluage.

L'essai de fluage est un essai de traction, à chaud ou non, souvent de très longue durée (milliers d'heures).

La rupture par fluage se produit, après un temps long, sous des charges constantes bien inférieures aux limites usuelles du matériau (R_r ou R_e).

Ce phénomène est observé dans les systèmes travaillant pendant de longues durées (10, 20 ans...) ou dans les machines travaillant à températures élevées, comme les chaudières, les moteurs d'avion ou les aubes de turbine.

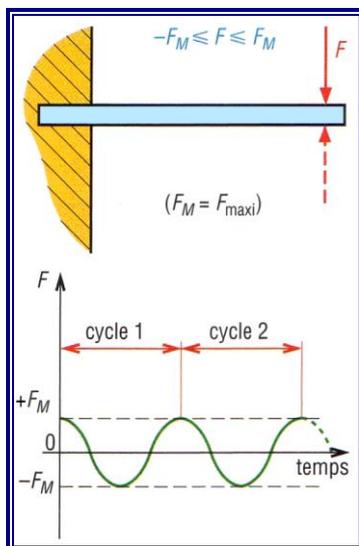
La chaleur accentue fortement le phénomène. Certains matériaux (matières plastiques...) sont sensibles au fluage à température ambiante.

VI - Essai de fatigue ou d'endurance

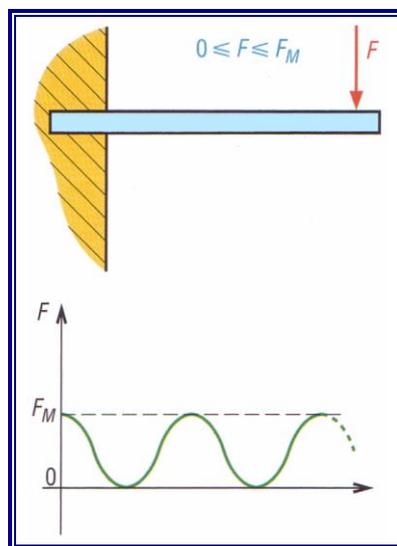
1. Phénomène de fatigue

Il est de première importance sur les structures d'avions et dans de nombreux autres domaines (roulements, engrenages, arbres de transmission...). Une roue de voiture mal équilibrée est un exemple de système soumis à un phénomène de fatigue ; un effet de résonance peut l'amplifier.

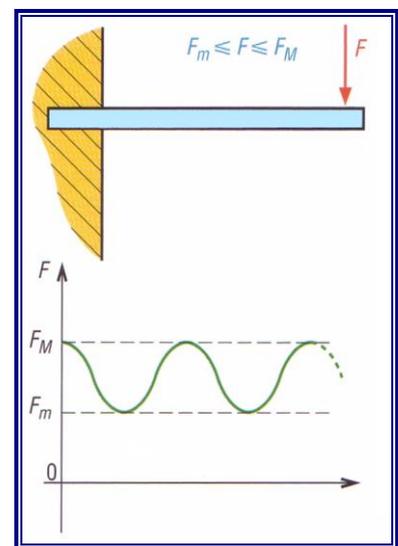
La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs aux limites usuelles du matériau (R_r et R_e).



17. Charge alternée.



18. Alternée dans une seule direction.

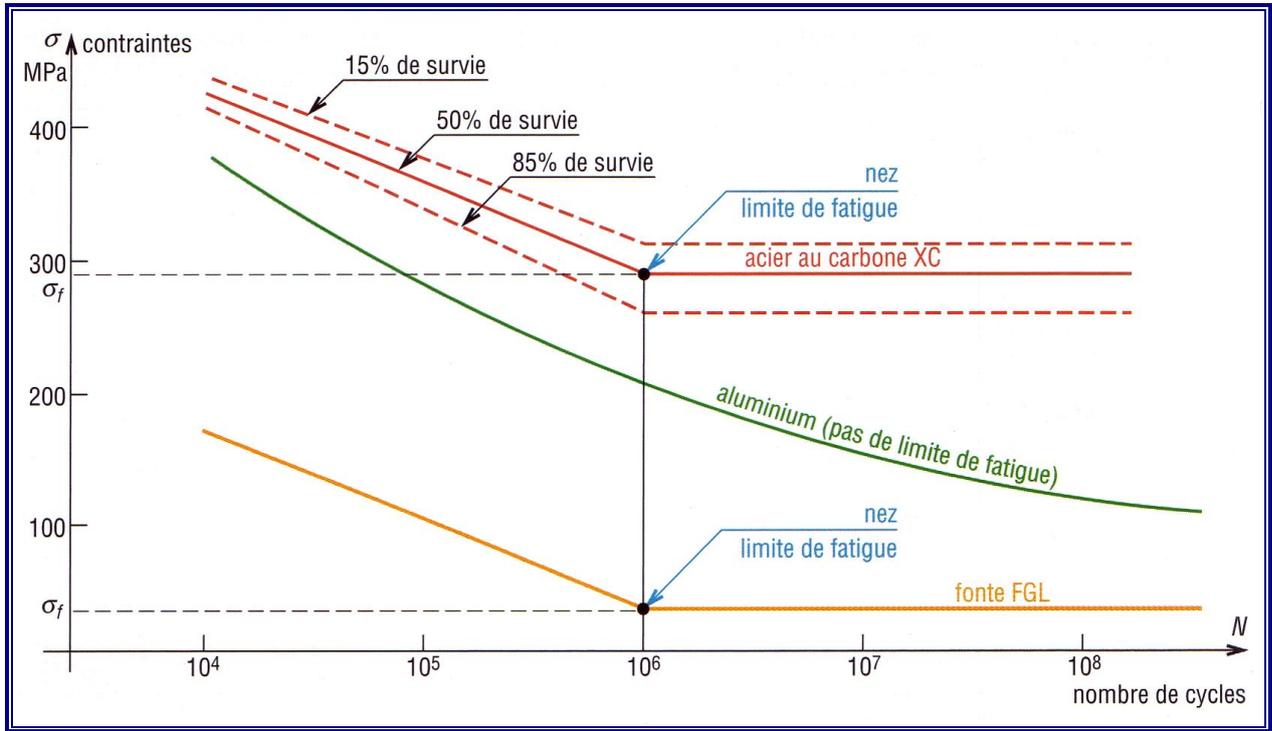


19. Charge ondulée.

2. Essai de fatigue

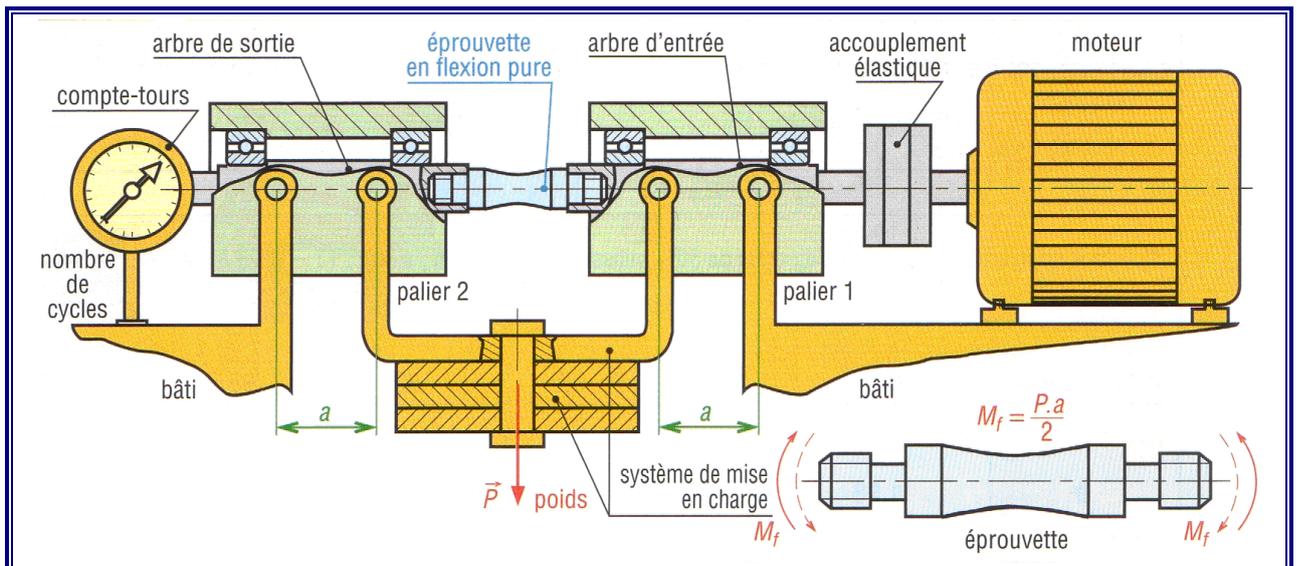
C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des résultats différents. Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane.

Cette valeur moyenne, une fois déterminée, est choisie comme représentative de la capacité du matériau (analogie avec la durée de vie des roulements).



20. Courbes d'endurance ou de Wolher.

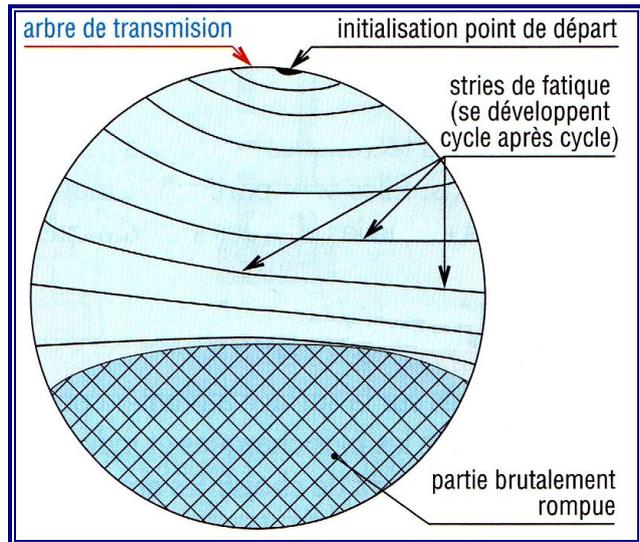
Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée « le plus classique », l'éprouvette est soumise à un couple de flexion pure alternée M_f .



21. Essai de fatigue en flexion rotative (machine de Moore) ou flexion alternée.

3. Mode de rupture

Les fissures de fatigue démarrent à partir des imperfections en surface rayures, empreintes, stries d'usinage, arête de filetage, hétérogénéité due au traitement thermique, défauts du réseau cristallin... Après amorce, la fissure s'agrandit sous l'action des efforts alternés qui écartent et rapprochent continuellement les parties fissurées ; il y a un phénomène de concentration de contraintes en ces points. La rupture définitive se produit brutalement lorsque les dimensions de la partie non encore fissurée ne sont plus suffisantes pour supporter les charges exercées.



22. Cassure typique de fatigue.

Valeurs indicatives de σ_{f50} (limite de fatigue pour 50% de survie)			
$\sigma_{f50} = k \cdot R_r$ (avec R_r : résistance à la rupture par traction du matériau)			
sollicitations	K	matériaux	nombre de cycles
flexion	0,5	aciers de construction $R_r < 1\,400 \text{ N/mm}^2$ HB < 400	10^7
	0,4	aciers moulés et fontes	10^7
	0,38	alliages de magnésium	10^6
	0,45	alliages de cuivre, alliages de nickel	10^7
	0,38	alliages d'aluminium laminés $R_r < 280 \text{ N/mm}^2$	$5 \cdot 10^8$
	0,16	alliages d'aluminium pour la fonderie $R_r < 280 \text{ N/mm}^2$	$5 \cdot 10^8$
torsion	0,29	aciers	10^7
	0,32	fontes grises FGL	10^7
	0,22	alliages de cuivre	10^7
traction alternée	0,43	aciers	10^7

Pour des pourcentages de survie différents de 50% utiliser la relation : $\sigma_{fn} = \sigma_{f50} (1 - 0,08 b)$ avec :						
n % de survie	90	95	98	99	99,9	99,99
b	1,28	1,64	2,05	2,33	3,08	3,62

VII - Extensométrie électrique, photoélasticité, vernis craquelants

Ces trois techniques classiques permettent l'étude expérimentale des contraintes et des déformations. Elles sont particulièrement intéressantes lorsque les formes des objets sont compliquées et que les charges sont difficiles à évaluer autrement (calculs...).

1. Vernis craquelants

Projetés sur la surface à étudier comme un aérosol, ils sont utilisés pour localiser visuellement les zones les plus chargées et indiquer les directions principales des déformations.

Ils permettent de choisir les emplacements de collage des jauges de contraintes et leur orientation ; l'orientation des craquelures est toujours perpendiculaire à la direction de la déformation en traction la plus importante.

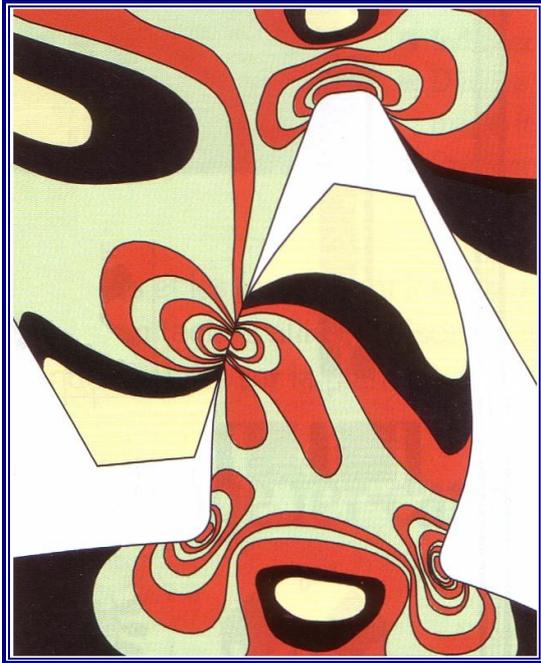
2. Méthodes photoélastiques

Plus précises que les vernis craquelants, ces méthodes permettent des études plus détaillées sur les zones les plus chargées, les directions principales des déformations par exemple. Les résultats sont particulièrement intéressants près des formes amenant des concentrations de contraintes (trous, encoches, épaulements...).

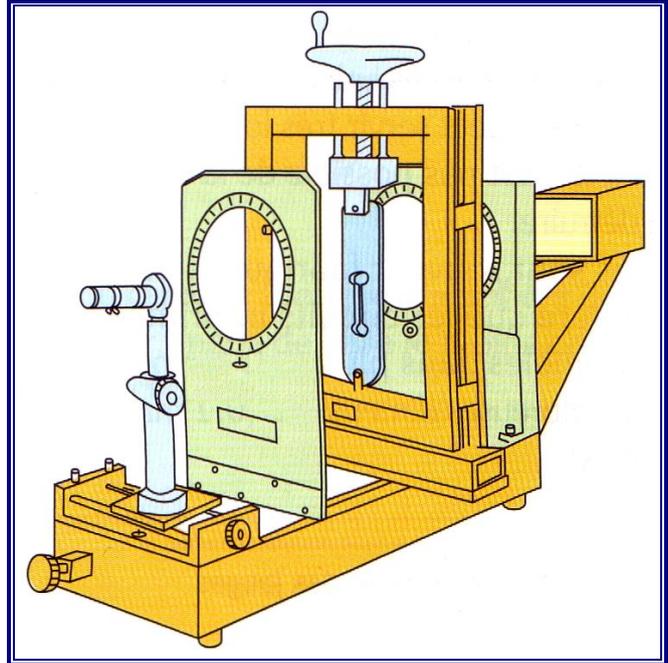
Une matière plastique transparente est utilisée pour modéliser l'objet réel. Un système optique spécial (polariscope), permet d'observer des motifs colorés, interpréter et visualiser les zones contraintes. Il est ainsi possible, par dessins et essais successifs, d'améliorer la définition des objets.

Les pièces soumises à des vibrations ou des charges dynamiques peuvent être étudiées avec un système stroboscopique.

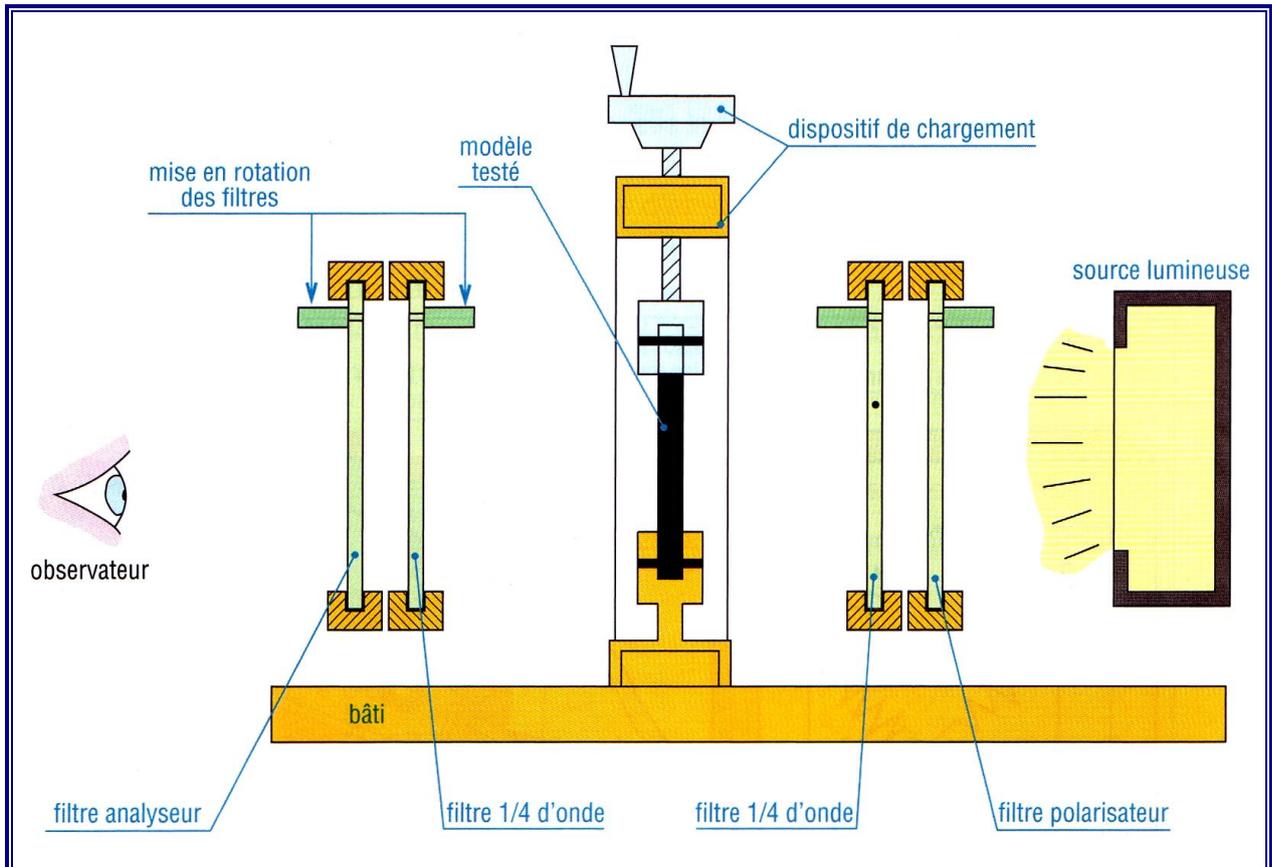
L'étude dans les trois dimensions est envisageable par tranches découpées dans des modèles 3D « figés ».



23. Motif obtenu par photoélasticité.



24. Exemple de polariscope par transmission.



25. Principe du polariscope par transmission (étude de modèles plans).

3. Extensométrie électrique

Elle est basée sur l’emploi des jauges de contraintes. C’est la méthode expérimentale la plus usuelle pour vérifier les résultats théoriques (calculs de contraintes, de déformations...).

Les jauges sont collées sur la surface à étudier et mesurent les déformations en un point donné. La déformation subie est transformée en variation de résistance électrique mesurée par un pont d’extensométrie : c’est le principe du pont de Wheatstone. Les contraintes sont ensuite obtenues par calcul à partir des lois de la résistance des matériaux ou élasticité.

Jauges de contraintes : sous l’effet d’un allongement la section du brin (fil) de la jauge diminue, il en résulte une variation de la résistance électrique du fil. En mesure, R_1 est une jauge active collée sur la structure et R_2 une jauge identique collée sur une pièce de même matière. R_2 ne subit aucune contrainte et est à la même température que R_1 .

Dans certains capteurs (forces, pressions, couples, déplacements...) on utilise généralement quatre jauges judicieusement disposées. Une jauge peut servir très longtemps, cependant il n’est pas possible de la décoller sans la détruire.

Elles sont souvent fabriquées de la même manière que les circuits imprimés et sont disponibles dans plusieurs formes et dans de nombreuses dimensions (0,1 mm à 10 cm et plus).

1, 2, 3 : jauges simples
 4 : rosette à 2 jauges
 5, 6, 7 : rosette à 3 jauges
 8 : pour torsion et cisaillement
 9 : capteurs de pression

propriétés des jauges

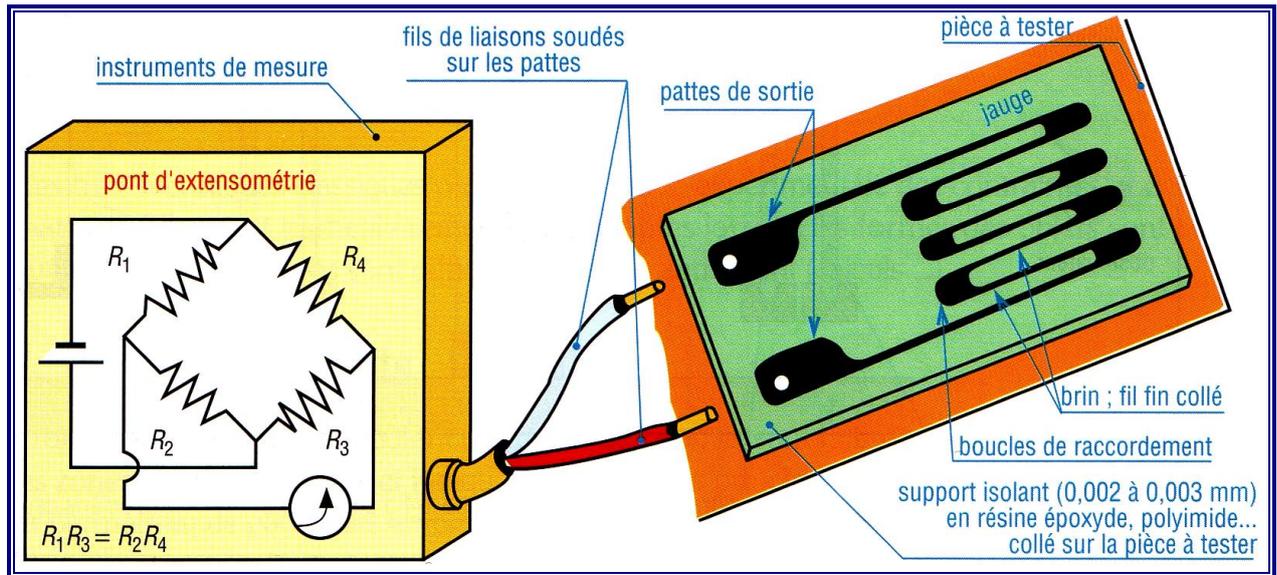
$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

avec ΔR : variation de résistance
 ΔL : allongement du brin
 K : facteur de jauge

K = 2	constantan
K = 3,2	élinvar
K = 0,5	manganin

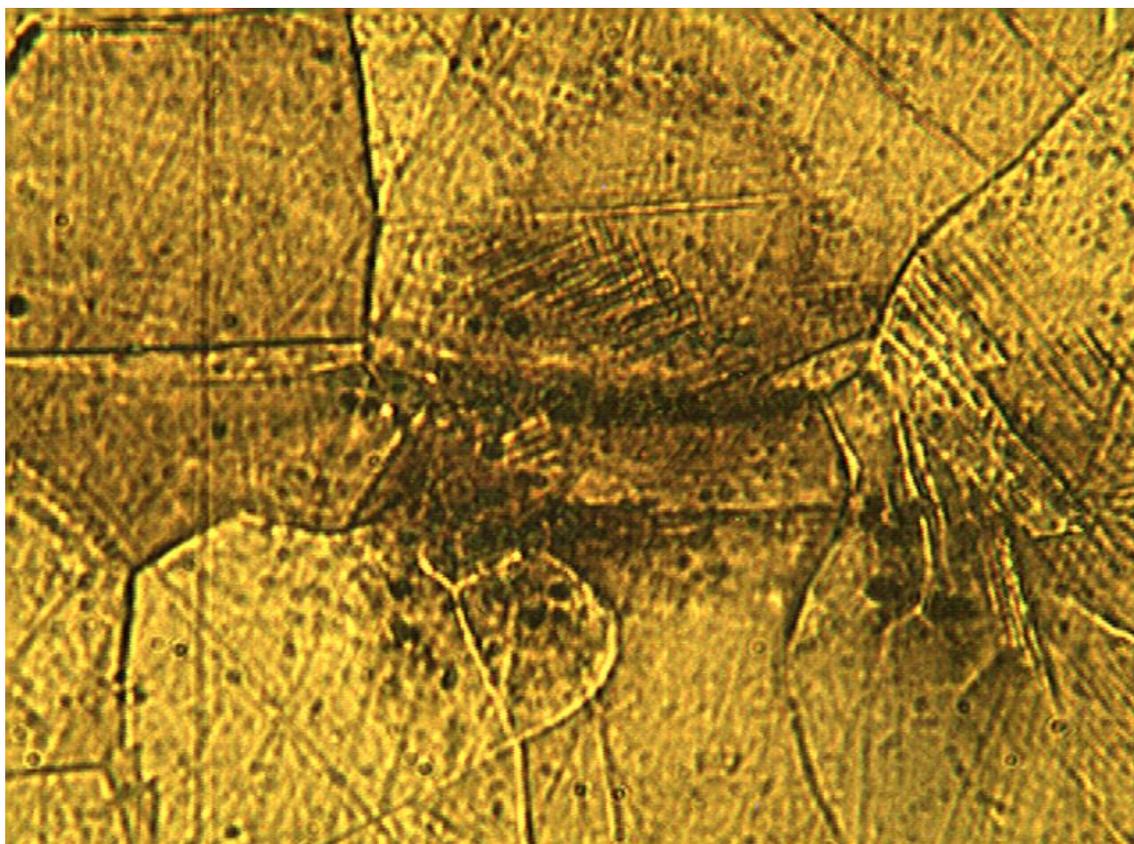
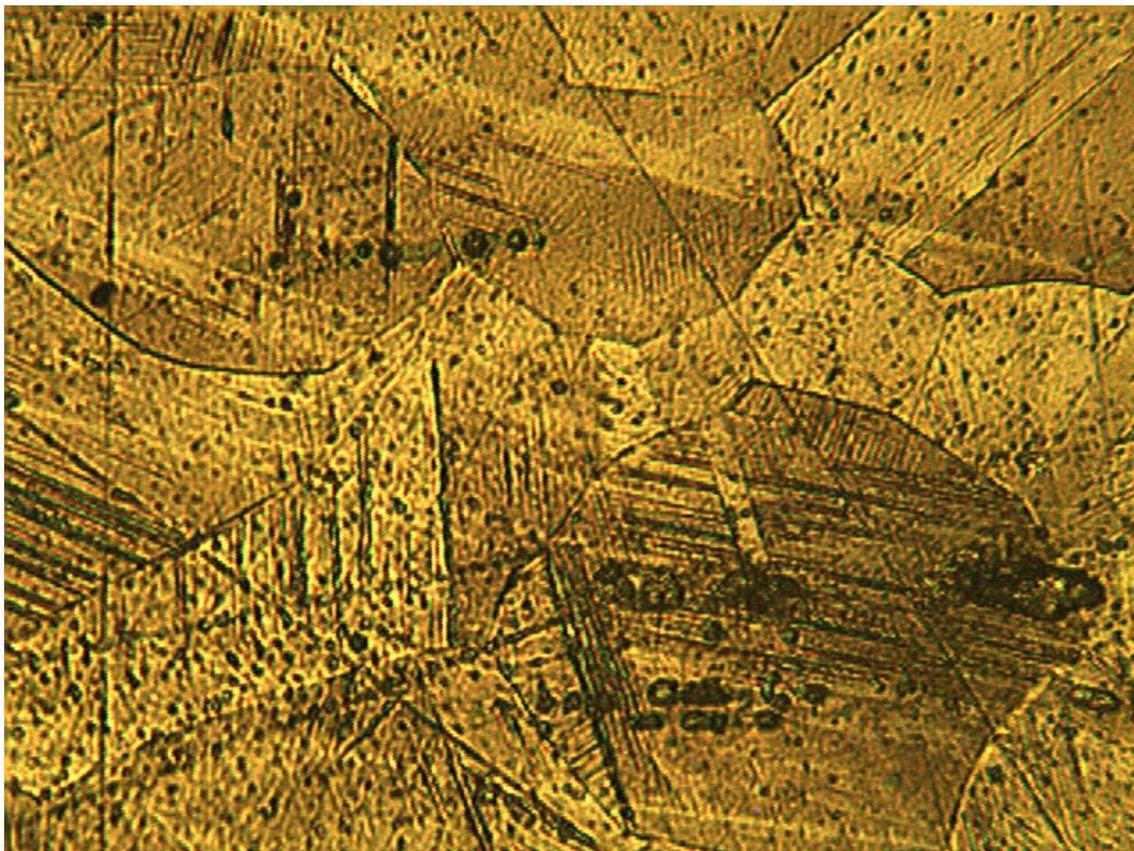
26. Propriétés des jauges.

27. Exemples de jauges.



28. Principes d'utilisation des jauges.

ANEXE : Structures micrographique d'un acier inoxydable attaqué chimique



BIBLIOGRAPHIE

- * FANCHON, Jean-Louis, GUIDE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES, Nathan, AFNOR, 2004.
- * BUTIN, R., PINOT, M., FABRICATIONS MECANIQUES – TECHNOLOGIE III, Foucher, Paris.