

# TECHNOLOGIE DES MÉTAUX ET ALLIAGES PARTICULIÈREMENT en AÉRONAUTIQUE

## 1 Avertissement.

Les explications, normes, désignations, machines, procédés décrits dans ce document sont basés sur ce que j'ai appris au Centre d'Instruction de Vilgénis d'Air France dans les années 1960-63 (Livrets et notes de cours), au CNAM dans les années 1970 (Notes de cours) et sur les actualisations de ces connaissances jusque dans les années 1980 (Notes personnelles) ; certains sont obsolètes, d'autres ont évolué et les normes sont sans doute dépassées. En l'occurrence, ce document ne doit pas être considéré comme une référence mais comme une approche de vulgarisation des technique et technologie des métaux et des alliages, plus particulièrement pour l'aéronautique.

## 2 Propriétés des matériaux.

Corps simples et corps composés.

Les corps composés sont constitués d'un mélange de corps simples<sup>1</sup> subdivisés en :

Métaux : caractérisés par de bonnes propriétés physiques (conductibilité thermique et électrique, etc.) et par des qualités mécaniques (élasticité, ductilité, ténacité, etc.), ex : Fer, cuivre, zinc, molybdène, nickel, etc.

Métalloïdes : qui ne présentent pas ces propriétés mécaniques ex : soufre, phosphore, carbone, bore, silicium, etc.

Gaz rares : caractérisés par une grande inertie chimique ex : hélium, argon, néon, xénon, etc.

### 2.1 Les propriétés physiques.

Température de fusion.

Masse volumique : Quantité de matière par unité de volume exprimée normalement en  $\text{kg}/\text{m}^3$  mais souvent en  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .

Coefficient de dilatation linéaire : Allongement subi par le métal lors d'un échauffement.

Conductibilité thermique : Aptitude d'un corps à transmettre plus ou moins bien la chaleur. Les bons conducteurs sont : le cuivre, l'argent, l'aluminium etc.

Magnétisme : Classification des matériaux d'après la valeur de leur induction et le sens du champ : matières ferromagnétiques, diamagnétiques, paramagnétiques ou amagnétiques.

### 2.2 Les propriétés mécaniques (ou aptitudes technologiques).

L'élasticité : Aptitude d'un corps de subir des déformations temporaires sous charge.

La ténacité : Aptitude d'un corps de résister à la déformation ou à la rupture sous un effort continu.

La dureté : Aptitude d'un corps de résister à la pénétration d'un autre corps et de résister à l'usure.

La résilience : Aptitude à subir des efforts brusques ou des chocs sans rupture.

L'endurance : Aptitude d'un corps de subir des efforts variables en grandeur et en direction avec répétition de ces efforts.

La plasticité : Aptitude d'un corps à la déformation sans tension ni rupture (ex : pièces de chaudronnage).

La ductilité : Aptitude d'un corps de pouvoir être étiré sous forme de fils minces.

La fluidité : Aptitude d'un corps d'être porté à fusion et de remplir facilement le moule dans lequel il est coulé (pièces de fonderie).

### 2.3 Les propriétés chimiques.

Composition : métal pur ou alliage, nature et teneur des constituants, hétérogénéité.

Résistance à la corrosion : comportement du métal face aux acides ou aux agents corrosifs (humidité, vapeur, sels en dissolution, etc.)

Détermination des caractéristiques mécaniques.

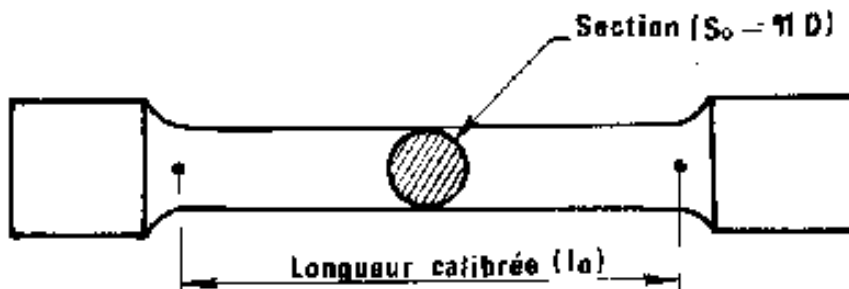
Pour déterminer le comportement d'un matériau face aux différentes sollicitations qu'il peut rencontrer en période d'utilisation, on reproduit ces sollicitations à l'aide d'essais statiques ou dynamiques, généralement effectués sur des éprouvettes normalisées afin de connaître les caractéristiques chiffrées du matériau.

---

<sup>1</sup> En chimie, les corps simples sont les matières qui ne peuvent pas être décomposées en un assemblage atomique d'autre corps. L'hydrogène et l'oxygène sont des corps simples ; l'eau est un corp composé d'hydrogène et d'oxygène.

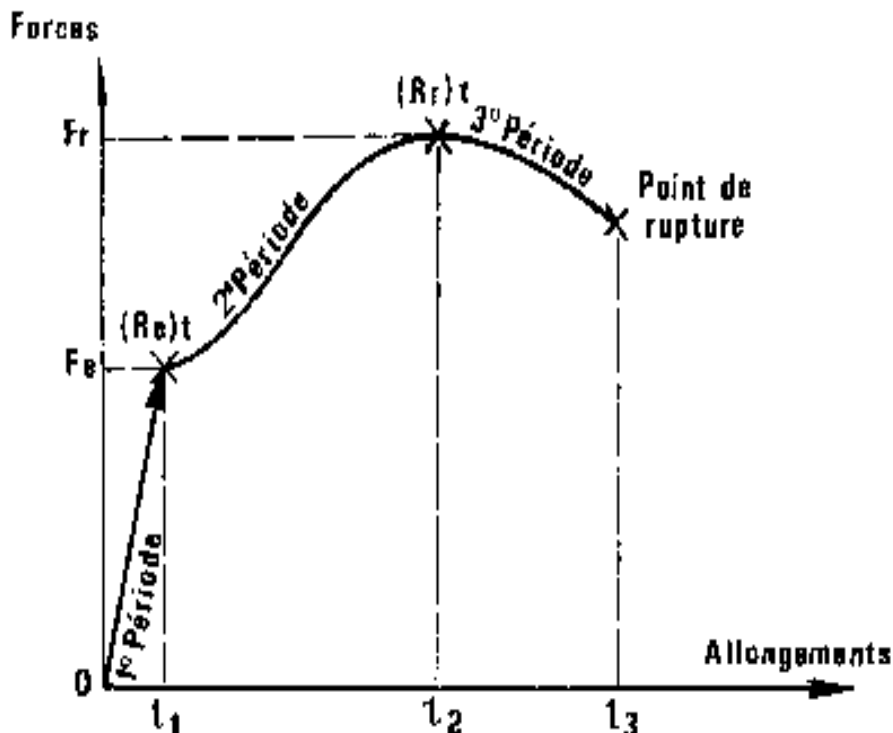
### 3 PRINCIPAUX ESSAIS MÉCANIQUES.

#### 3.1 Essai de traction.



Éprouvette normalisée dont les têtes sont fixées dans la machine de traction et la charge est appliquée progressivement.

a) Diagramme de traction obtenu : On distingue trois périodes.



1e période : c'est la période élastique ou de résistance à la déformation des matériaux. Si on relâche les forces appliquées avant d'atteindre la limite  $(R_e)t$ , le matériau reprend sa forme initiale : c'est la limite élastique.

2e période : c'est la période de déformation permanente ou période de mise en forme des matériaux. Le matériau se déforme, mais ne rompt pas et gardera la déformation même si on relâche les forces appliquées.

3e période : c'est la période de striction ou de décohésion structurale localisée entraînant la rupture de l'éprouvette.

Selon l'étendue de chaque période, on peut en déduire les renseignements suivants :

Sur l'axe des forces.

Une grande 1e période correspond à un matériau résistant à la déformation (période d'utilisation des pièces).  
Une grande 2e période correspond à un matériau tenace.

Sur l'axe des allongements.

Une faible 1e période correspond à un matériau possédant des dimensions stables sous charges (voir module d'élasticité).

Une grande 2e période correspond à un matériau de grande plasticité ex : pièces de chaudronnage.

Une grande 3e période correspond à une décohésion structurale (réduction de section).

b) Caractéristiques obtenues :

Limite élastique (Re)t : C'est la charge unitaire (charge par unité de section) exprimée en hb (hectobar) ou 10<sup>7</sup> pa (environ 102 kgf/cm<sup>2</sup> pour les anciens) correspondant à la fin de la 1e période.

$$(Re)t = \frac{\text{Force élastique}(Fe)}{\text{Section éprouvette}(So)}$$

Résistance de rupture (Rr)t : C'est la charge unitaire maxi que peut supporter l'éprouvette avant rupture exprimée en hb (hectobar) ou 10<sup>7</sup> pa (environ 1,02 kgf/mm<sup>2</sup> pour les anciens).

$$(Rr)t = \frac{\text{Force rupture}(Fr)}{\text{Section éprouvette}(So)}$$

Allongement (A %) : C'est le rapport de changement de longueur après rupture de la partie travaillante (l<sub>0</sub>) exprimé en %

$$A \% = \frac{l_3 - l_0}{l_0} * 100 = \frac{\Delta l}{l} * 100$$

Module d'élasticité longitudinal ou module de YOUNG. Il caractérise la stabilité dimensionnelle sous charge pendant la première période. C'est le rapport de la charge unitaire sur l'allongement unitaire correspondant dans la première période de proportionnalité.

$$E = \frac{(Re)t}{\frac{\Delta l}{l}}$$

Plus le module est important et plus la stabilité dimensionnelle de la pièce est grande.

### 3.2 Essais de dureté (H).

Principe : une charge est appliquée sur un pénétrateur (de forme variable suivant la méthode d'essai) qui détermine une empreinte dans la pièce.

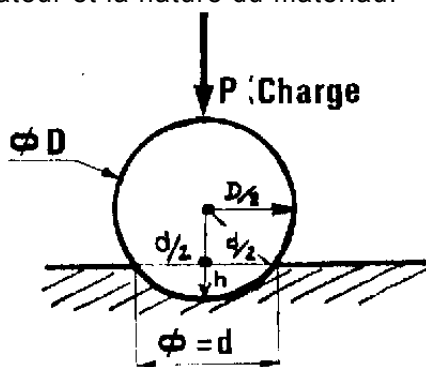
Suivant l'importance de cette empreinte, on en déduit le coefficient de dureté (Résistance face à l'usure).

#### PRINCIPALES MÉTHODES

**DURETÉ BRINELL (HB)** - Pour métaux courants

**Pénétrateur** : Billes d'acier extra dur trempées de diamètre 10 mm, 5 mm et 2,5 mm.

**Charge** : Variable avec le diamètre du pénétrateur et la nature du matériau.



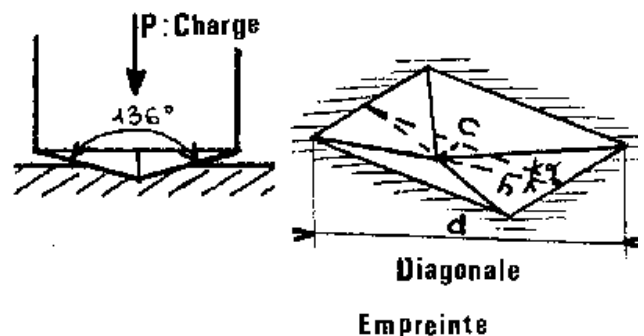
Détermination de la dureté

$$HB = \frac{P \text{ (en N)} \cdot 10^{-7}}{S \text{ (en m}^2\text{)}} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

**DURETÉ VICKERS (HV)** - Pour métaux durs

**Pénétrateur** : diamant pyramidal à base carrée avec angle au sommet de 136°.

**Charge** : Variable avec la nature du matériau.



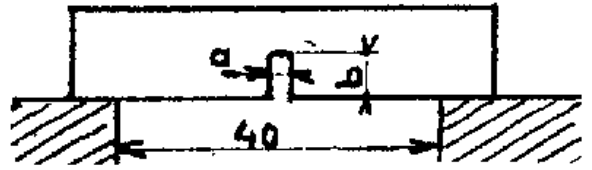
Détermination de la dureté

$$HV = \frac{P \text{ (en N)} \cdot 10^{-7}}{S \text{ (en m}^2\text{)}} = \frac{2P \cdot (\cos 22^\circ)}{d^2}$$

### 3.3 Essai de résilience (résistante aux chocs)

a) **Principe** : Énergie qu'il faut fournir pour rompre un matériau.

b) **Éprouvette** : Barreau prismatique entaillé pour localiser la rupture.

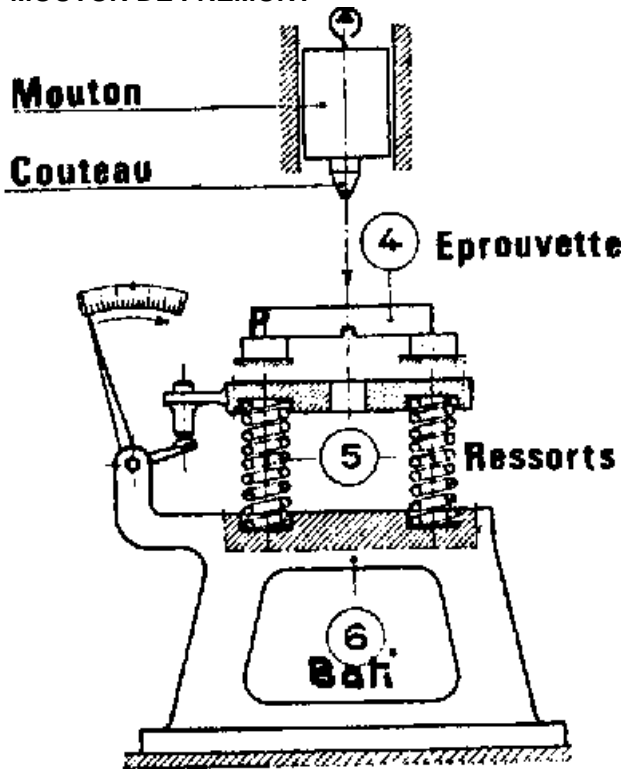


c) **Expression de la résilience** : C'est le rapport à l'énergie absorbée par la rupture sur la section rompue de l'éprouvette.

$$K = \frac{W \text{ (Energie de rupture en J (joule))}}{S \text{ (Section rompue en m}^2\text{)}}$$

#### PRINCIPALES MÉTHODES

##### MOUTON DE FRÉMONT



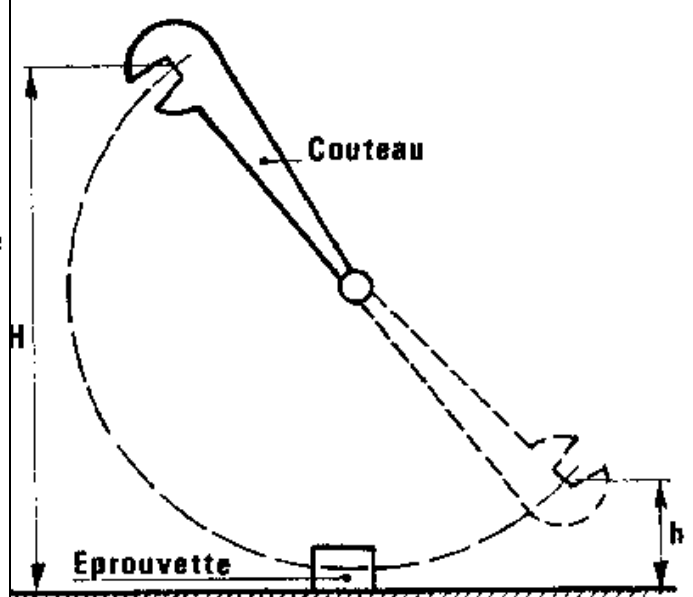
**Principe** : Masse de 15 kg tombant de 4 m de haut ( $W_i$  = Énergie initiale) et donnant, après rupture, une énergie résiduelle ( $W_r$ ) absorbée par les ressorts et indiquée sur le cadran

$$K = \frac{W_i - W_r}{S} = \frac{m \cdot g \cdot H - W_r}{S}$$

**Remarque** : Les métaux purs sont surtout utilisés pour leurs propriétés physiques (ex : conductibilité électrique, magnétisme, dilatation, etc.)

En construction mécanique on préfère utiliser les alliages (mélange de métaux différents) de par leurs caractéristiques mécaniques très supérieures. Ces caractéristiques mécaniques peuvent encore être augmentées par une succession de traitements mécaniques ou thermiques.

##### MOUTON DE CHARPY



**Principe** : Masse pendulaire tombant d'une hauteur (H) ( $W_i$  = Énergie initiale) et, après rupture, remontant d'une hauteur (h) sous l'effet de l'énergie résiduelle ( $W_r$ ).

$$K = \frac{W_i - W_r}{S} = \frac{P(H - h)}{S}$$

### 3.4 Facteurs de variations des caractéristiques mécaniques.

Avec la composition chimique : (métal pur ou alliages). Ex : un acier au carbone a une résistance d'autant plus grande que sa teneur en carbone est plus élevée. L'addition en proportion convenable d'autres métaux augmente encore les caractéristiques mécaniques.

Avec le mode d'élaboration : obtention d'une structure cristalline différente. Ex : une pièce forgée ou fibrée a des caractéristiques supérieures à une pièce de fonderie (FIBRAGE) L'érouissage dû à une opération de laminage ou de déformation à froid entraîne une augmentation de la résistance à la rupture et de la dureté.

Avec la température : la résistance de la plupart des matériaux diminue considérablement avec l'élévation de température.

Avec les traitements thermiques : (trempes ou recuits). Modification de la structure chimique des alliages, ce qui entraîne des modifications de leurs caractéristiques mécaniques.

Avec le degré de finition des surfaces : l'augmentation du fini d'une surface augmente la résistance à la fatigue, la résistance à l'usure et les qualités de frottement.

Les caractéristiques mécaniques varient également en fonction des sollicitations rencontrées en période de fonctionnement.

Sollicitations thermiques (variations de température) chocs thermiques.

Sollicitations mécaniques (charges constantes ou alternées) : à température ambiante = fatigue, à température élevée = fluage.

Sollicitations chimiques, oxydation – vieillissement.

Traitements augmentant la dureté superficielle :

Procédés chimico-thermiques : Cémentation - nitruration - cyanuration (ou carbonitruration)

Procédés mécaniques : Érouissage superficiel - Grenailage – sablage.

Procédés thermiques : Métallisation par fusion (projection, à chaud, au pistolet d'un métal dur : schoopage)

Procédés électrolytiques : Chromage dur (dépôt de chrome en couche épaisse)

Procédés chimiques : Chromisation (cémentation gazeuse par le chrome)

### 3.5 Désignation des principaux métaux et métalloïdes.

Les symboles technologiques des métaux utilisés pour les alliages sont différents des symboles chimiques de ces mêmes métaux.

Désignation	Symbole Chimique	Symbole Technologique	Masse Volumique en kg/dm <sup>3</sup>	Température de fusion en °C
ALUMINIUM	Al	A	2,73	658
ANTIMOINE	Sb	R	6,62	630
ARGENT	Ag	-	10,49	961
BERYLLIUM	Be	Be	1,83	1280
BORE	B	-	2,30	2500
CADMIUM	Cd	Cd	8,65	321
CARBONE	C	-	2,23	3600
CHROME	Cr	C	7,19	1890
COBALT	Co	K	8,85	1495
CUIVRE	Cu	U	8,96	1083
ÉTAIN	Sn	E	7,30	232
FER	Fe	Fe	7,86	1535
MAGNÉSIUM	Mg	G	1,73	651
MANGANÈSE	Mn	M	7,43	1245
MERCURE	Hg	-	13,55	38
MOLYBDÈNE	Mo	D	10,22	2625
NICKEL	Ni	N	8,90	1452
NOBIUM	Nb	Nb	8,60	2470
OR	Au	-	19,32	1063
PLATINE	Pt	-	21,45	1770
PLOMB	Pb	Pb	11,35	327
SILICIUM	Si	S	2,33	1410
TANTALE	Ta	Ta	16,60	3000

Désignation	Symbole Chimique	Symbole Technologique	Masse Volumique en kg/dm <sup>3</sup>	Température de fusion en °C
TITANE	Ti	T	4,52	1690
TUNGSTÈNE	W	W	19,30	3430
VANADIUM	Va	V	6,10	1900
URANIUM	U	-	19,07	1132
ZINC	Zn	Z	7,13	420
ZIRCONIUM	Zr	Zr	6,50	1850

## 4 Les ACIERS (Alliages FER + CARBONE)

### 4.1 Généralités

a) Classification des alliages FER + CARBONE. On distingue :

Le FER industriel, pourcentage de carbone < 0,05 %  
 Les ACIERS d'usage courant, pourcentage de carbone allant de 0,05 % à 1,5 %  
 Les FONTES, pourcentage de carbone allant de 2,5 % à 5 %

b) Influence du pourcentage de carbone dans les aciers-d'usage courant.

L'augmentation du pourcentage carbone dans les aciers,

Augmente :

- la DURETÉ (H)
- la résistance à la RUPTURE (Rr)
- la LIMITE ÉLASTIQUE (Re)
- la résistance CORROSION
- la résistance à l'USURE
- la TREMPABILITÉ (mise en solution du carbone, formation de CARBURES)

Mais diminue :

- la MALLÉABILITÉ (PLASTICITÉ - DUCTILITÉ)
- la résistance aux chocs (RÉSILIENCE)
- la soudabilité

D'où la nécessité de choisir un acier plus ou moins carburé selon que l'on désire réaliser :

Résistance à l'usure : acier DUR (fort % carbone)  
 Chaudronnerie ou emboutissage : acier DOUX (faible % carbone)

c) Influence des éléments d'addition (Autres métaux ou métalloïdes).

En dehors de la variation du pourcentage de carbone, on peut modifier les caractéristiques mécaniques et aptitudes technologiques des aciers par addition d'autres métaux dont les principaux sont, avec leurs principales influences :

MANGANÈSE,	augmente :	la limite élastique et la trempabilité
NICKEL,		la résistance aux chocs et à la corrosion (fort %)
CHROME,		la résistance à l'usure et à la corrosion
SILICIUM,		la limite élastique
TUNGSTÈNE,		la résistance à l'usure et à la chaleur
MOLYBDÉNE,		la résistance à l'usure et à la chaleur
VANADIUM,		la résistance à l'usure et aux déformations (TÉNACITÉ)

### 4.2 Caractéristiques des aciers courants non alliés.

Nuance	% C	(Rr)t hb	(Re)t hb	A %	HB	Soudabilité	Trempabilité
Extra-doux	< 0,15	35-40	20	30	120	Excellente	Nulle
Doux	0,15 à 0,30	40-45	20-25	25	120-140	Bonne	Nulle
Demi-doux	0,30 à 0,40	45-55	25-30	20	140-155	Délicate	Très faible
Demi-dur	0,40 à 0,60	55-65	30-35	17	156-180	Peu	Moyenne
Dur	0,60 à 0,70	65-75	40	14	180-200	Non	Bonne
Très dur	0,70 à 0,80	75-85	45	10	200-220	Non	Bonne
Extra-dur	> 0,80	> 85	50	7	> 220	Non	Très bonne

**4.2.1 Symbolisation des aciers non alliés.**

1°) ACIERS D'USAGE COURANT

Aciers de construction mécanique courante ne devant subir aucun traitement thermique (aucune garantie de composition chimique).

**CLASSE "A"** - Elle indique la valeur de la (Rr)t moyenne de l'acier considéré afin de préciser ses limites d'utilisation.

Ex : A 33 A 42 → (Rr)t de 42 à 50 hb A 60 → (Rr)t de 60 à 70 hb  
 Classe Valeur moyenne de la (Rr)t – 33 à 40 hb A 50 → (Rr)t de 50 à 60 hb Etc.

On peut éventuellement faire apparaître l'indice de soudabilité (S) et la moulabilité (M)

**CLASSE "E"** - Elle indique la valeur de la (Re)t moyenne indispensable pour les pièces subissant des contraintes d'allongement.

Ex : E 26 E 26 → (Re)t de 25 à 30 hb E 36 → (Re)t de 35 à 40 hb  
 Classe Valeur moyenne de la (Re)t – 25 à 30 hb E 32 → (Re)t de 30 à 35 hb Etc.

2°) ACIERS POUR TRAITEMENTS THERMIQUES

Aciers de construction et d'élaboration très soignée, spécialement étudiés pour subir les traitements thermiques.

**CLASSE "CC"** - De qualité courante mais de composition chimique bien définie (faible écart entre maxi et mini de la teneur en carbone)

Ex : CC 12 CC 20 → 0,20 % de carbone CC 45 → 0,45 % de carbone  
 Classe % Carbone \* 100 CC 35 → 0,35 % de carbone Etc.

Faible teneur en impuretés (soufre + phosphore)

**CLASSE "XC"** - Aciers fins de composition chimique très bien définie (très faible écart entre maxi et mini de la teneur en carbone).

Ex : XC 12 XC 18 → 0,18 % de carbone XC 48 → 0,48 % de carbone  
 Classe % Carbone \* 100 XC 38 → 0,38 % de carbone Etc.

Très faible teneur en impuretés (soufre + phosphore).

**Nota** - La connaissance du % de carbone permet de connaître les caractéristiques mécaniques (voir tableau suivant).

**4.2.2 Tableau des aciers courants non alliés.**

Catégorie	Symbole	Nuance et % de carbone	Caractéristiques (État recuit)			Utilisation
			(Rr)t	(Re)t	A %	
Aciers d'usage courant	A 33		33 à 40	-	-	Teneur en carbone non déterminée. Fonction de la (Rr)t et de la soudabilité. Profilés et poutrelles Tôles pour emboutissage Boulonnerie courante
	A37-A37S	Doux	37 à 44	-	-	
	A 48	Demi-doux	48 à 56	-	-	
	A 56	Demi-dur	56 à 65	-	-	
	A 65	Dur	65 à 75	-	-	
Aciers courant pour traitements thermiques	CC 10-S	Extra-doux 0,05 à 0,15	33 à 40	21	30	Pièces forgées ou chaudronnées. Tôles, tubes, rivets, etc.
	CC 20-S	Doux 0,15 à 0,25	45 à 53	27	24	Pièces forgées ou matricées. Visserie, clavettes, manivelles, etc.
	CC 35-S	Mi-doux 0,30 à 0,40	57 à 66	32	18	Pièces traitées : Arbres, bielles, vilebrequin, visseries, etc.
	CC 45	Mi-dur 0,40 à 0,50	65 à 75	35	15	Pièces trempées : arbres, cames, engrenages, etc.
	CC 55	Mi-dur 0,50 à 0,60	75 à 85	40	11	Pièces trempées résistant aux chocs : cames, engrenages, etc.
	CC 65	Dur 0,60 à 0,70	82 à 95	-	10	Pièces résistant à l'usure et aux chocs : ressorts, cames, embrayages, etc.
Aciers fins pour traitements thermiques	XC 10-S	Extra-doux 0,06 à 0,12	35 à 40	22	30	Pièces forgées et cémentées : axes, cames, poussoirs, etc.

Catégorie	Symbole	Nuance et % de carbone	Caractéristiques (État recuit)			Utilisation
			(Rr)t	(Re)t	A %	
Aciers fins pour traitements thermiques	XC 18-S	Doux 0,15 à 0,22	45 à 52	27	24	Pièces forgées – Début de la trempe : boulonnerie, clavettes.
	XC 38	Demi-doux 0,34 à 0,40	62 à 70	34	17	Pièces forgées trempées : arbres, vilebrequins, bielles, chapes.
	XC 42	Demi-dur 0,38 à 0,45	65 à 73	36	16	
	XC 48	Demi-dur 0,44 à 0,52	70 à 78	40	14	Pièces forgées et trempées. Bonne résistance aux chocs : cames, engrenages, etc.
	XC 55	Dur 0,48 à 0,58	74 à 86	43	12	Pièces d'embrayages et d'accouplement cames, pivots, ressorts.
	XC 65	Dur 0,60 à 0,68	82 à 92	45	HB=285	Pièces forgées, trempées à l'huile. Très bonne résistance aux chocs et à l'usure : ressorts, butées, cames, engrenages.
	XC 70	Très dur 0,67 à 0,75	88 à 98	48	HB=302	
	XC 80	Extra-dur 0,75 à 0,85	95 à 105	50	HB=321	

### 4.3 Les aciers alliés.

Comprennent des additifs autres que le carbone et se divisent en deux catégories :

Les ACIERS FAIBLEMENT ALLIÉS à très hautes caractéristiques mécaniques pour lesquels, aucun additif n'atteint le pourcentage de 5 %.

Les ACIERS FORTEMENT ALLIÉS : pour des utilisations particulières pour lesquels, au moins un additif atteint ou dépasse le pourcentage de 5 %.

#### 4.3.1 Symbolisation des aciers alliés.

Aciers faiblement alliés. Aciers possédant de très bonnes caractéristiques mécaniques.

Exemple : 45 CAV 6-6

45	CAV	6-6
Pourcentage de carbone multiplié par 100. (0,45 % de carbone)	Lettres symbolisant les principaux additifs par ordre de pourcentages décroissants.	Pourcentage des additifs par ordre décroissant. Multiplié par 4 pour C K M N S Multiplié par 10 pour les autres

30 CAD 6-12	30 → 0,30 % de carbone C → addition de chrome A → addition d'aluminium D → addition de molybdène	6 → pourcentage de chrome * 4 (réel = 1,5 %) 12 → pourcentage d'aluminium * 10 (réel = 1,2 %)
-------------	---	--

Aciers fortement alliés. Aciers à utilisation particulière : augmentation importante de l'inoxidabilité ou de la résistance à chaud ou de la résistance à l'usure, etc.

Exemple : Z 12 CNT 18-8

Z 12	CNT	18-8
Z symbolise les aciers fortement alliés suivi du pourcentage de carbone multiplié par 100. (0,12 % de carbone)	Lettres symbolisant les principaux additifs par ordre de pourcentages décroissants.	Pourcentage vrai des additifs par ordre décroissant.

Z 90 KCWD 28-6	Z → acier fortement allié 90 → 0,90 % de carbone K → addition de cobalt C → addition de chrome W → addition de tungstène D → addition de molybdène	28 → pourcentage réel de cobalt 6 → pourcentage réel de chrome
----------------	---	---

## 4.3.2 Tableau des aciers faiblement alliés.

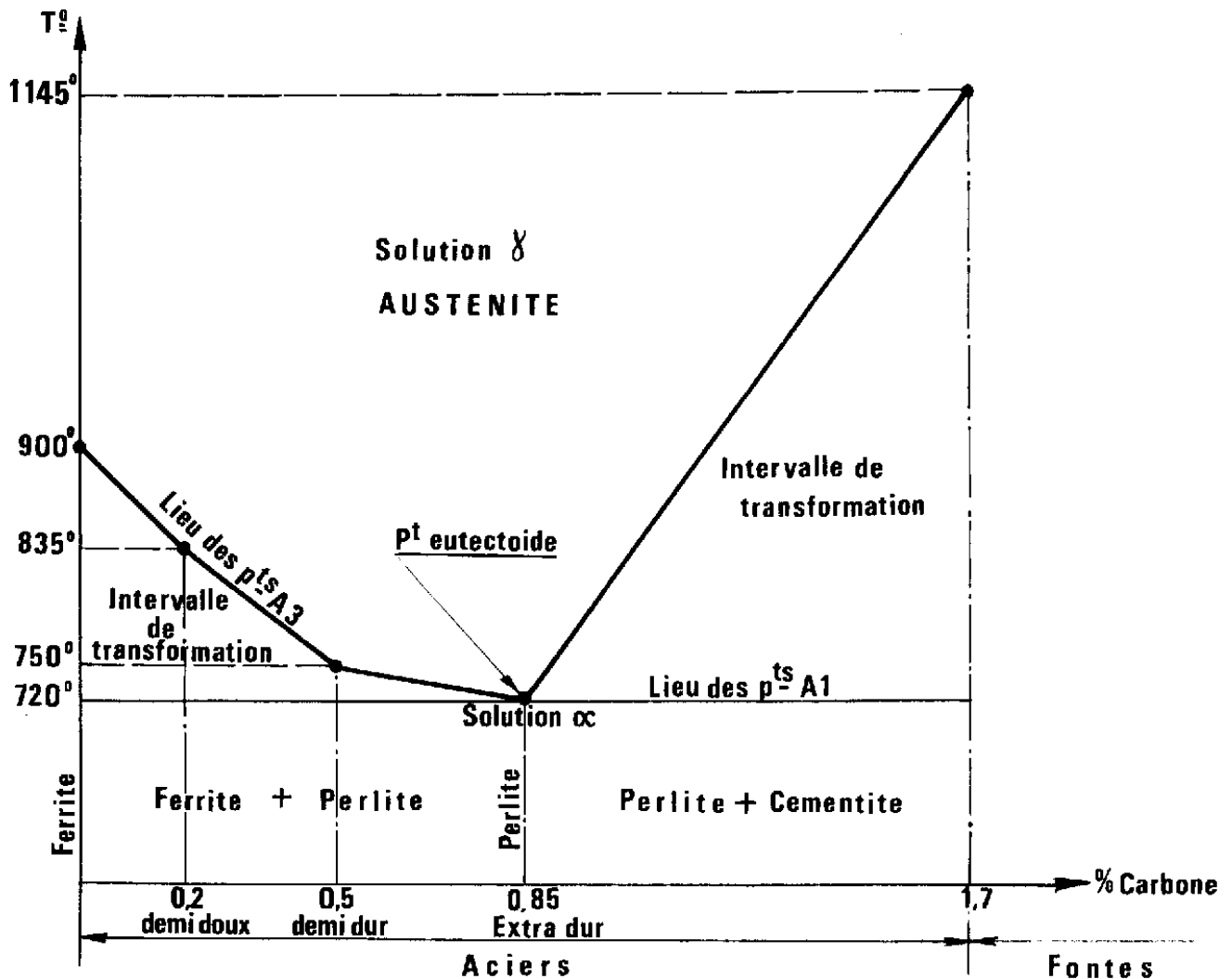
Catégorie	Symbole	État	Caractéristiques			Utilisation
			(Rr)t	(Re)t	A %	
Au NICKEL	28N8	Trempé Revenu 200°	60 à 80	45	17	Pièces résistant aux chocs et aux efforts vibratoires.
Au CHROME	18C3	Trempé Revenu 200°	100 à 125	85	7	Acier de cémentation Vilebrequin, arbres, etc.
	38C4	Trempé Revenu 200°	170 à 190	145	3	Aciers mi-durs et durs trempant. Bonne résistance à l'usure.
	45C6	Trempé Revenu 200°	200	155		Pignons, crémaillères, matrices, ressorts, barres de torsion, etc.
	100C6	Trempé Revenu 700°	100	90	7	Extra-dur trempant. Roulements à billes, rouleaux, aiguilles.
Au NICKEL CHROME	10NC6	Trempé Revenu 200°	100 à 125	85	8	Acier de cémentation. Vilebrequin, arbres, etc.
	20NC6	Trempé Revenu 200°	120 à 155	100	7	Bonne résistance aux chocs et aux efforts alternés.
	30NC11	Trempé Revenu 600°	90 à 110	75	12	Bonne résistance à l'usure. Pignons, galets, etc.
	35NC6	Trempé Revenu 200°	160 à 195	140	5	Dur, trempant, grande résistance. Arbres, vis de vérins.
Au NICKEL CHROME MOLYBDÈNE	10NCD12	Trempé Revenu 200°	100 à 120	80	9	Acier de cémentation pour des pièces soumises à des efforts élevés et répétés
	30NCD15	Trempé Revenu 200°	160 à 190	120	6	Résistance aux chocs et à la fatigue : bielles, arbres, vilebrequins.
	35NCD16	Trempé Revenu 200°	180	140	5	Résistance à la déformation et à l'usure : pièces d'atterrisseur.
	40NCD18	Trempé Revenu 200°	180 à 190	140	5	Caractéristiques mécaniques encore plus élevées.
Au CHROME MOLYBDÈNE	25CD4S	Trempé Revenu 525°	90 à 110	75	10	Caractéristiques mécaniques élevées, soudable : bâti, ferrures, etc.
	35CD4	Trempé Revenu 200°	160 à 195	135	5	Dur, trempant : résistance aux chocs et flexions : arbres, cardans, etc.
	30CD12	Trempé Revenu 600°	105 à 125	90	10	Acier de nitruration : Vilebrequin, engrenages.
Au CHROME ALUMINIUM MOLYBDÈNE	30CAD6-12	Trempé Revenu 600°	95 à 110	80	10	Surface extérieure très dure. Acier de nitruration : arbre, à came, axes de piston, cylindres, etc.
Au CHROME VANADIUM	50CV4	Trempé Revenu 550°	120 à 150	100	7	Pièces soumises à des contraintes élevées : ressorts de haute qualité.
Au MANGANÈSE	35M5	Trempé Revenu 550°	85 à 105	70	10	Pièces estampées de faible épaisseur.
	45M5	Trempé Revenu 550°	105 à 130	85	8	Pièces estampées de faible épaisseur.
Au SILICIUM CHROME MOLYBDÈNE	45S7	Trempé Revenu 475°	140 à 160	120	4	Efforts de flexion et de torsion : ressorts, rondelles frein, Grower, belleville.
	45SCD7	Trempé Revenu 450°	165	140	5	Efforts de flexion, torsion et chocs : ressorts, barres de torsion.

## 4.3.3 Tableau des aciers fortement alliés.

Catégorie	Symbole	État	Caractéristiques			Utilisation
			(Rr)t	(Re)t	A %	
Au NICKEL	Z12N5	Trempé Revenu 200°	95 à 125	78	9	Forgé et trempé : pièces de sécurité à grande fatigue et à bonne résilience à basse température
	Z14N5	Trempé Revenu 200°	105 à 140	88	8	
	Z18N5	Trempé Revenu 200°	110 à 150	90	6	Pièces de sécurité soumises à de gros efforts à basse température.
INOXYDABLE Au NICKEL CHROME	Z15CN18	Recuit Écrouit ½	56 110	22 77	35 15	Résistant aux atmosphères marines.
	Z30CN13	Recuit Trempé Revenu 600°	90 110	60 65	10 8	Bonnes caractéristiques mécaniques. Boulonnerie, axes ne travaillant pas aux chocs.
	Z10CNT18-S	Recuit Écroui ½ Écroui ¼	50 à 65 85 100	20 65 85	42 20 15	Pièces de chaudronnerie embouties soudables. Résistance aux températures élevées. Collecteur d'échappement, réchauffeur, etc.
	Z5CN18-S	Recuit Écrouit 1/8	52 à 77 70 à 90	21 42-73	40 25-20	Tubes de circuits hydrauliques soudés ou non soudés.
	Z3CN18-S	Recuit Écrouit ½ Écrouit ¼	45 à 65 75 85	17 60 75	47 25 16	Grande ductilité, soudable. Résistant aux températures élevées.
INOXYDABLE RÉFRACTAIRE	Z30CDN13	Trempé Revenu 600°	95 à 110	75	8	Résistant à l'usure, aux chocs, à la corrosion et aux températures élevées. Soupape d'admission.
INOXYDABLE RÉFRACTAIRE	Z40CSD10	Trempé Revenu 750°	90	70	13	Résistant à des températures encore plus élevées.
	Z35NCW	Recuit	70	33	22	Résistant aux très hautes températures et aux chocs répétés : soupape d'échappement.
Au MANGANÈSE	Z120M12	Trempé Pas de revenu	90	35	35	Résistance élevée aux chocs et à l'usure. Moulage possible. Pièces de broyeurs, concasseurs.
Au TUNGSTÈNE CHROME MOLYBDÈNE	Z85WCDV6	Trempé Revenu 600°				Acier trempant pour roulements exposés à la corrosion (Turboréacteurs)

## 4.4 Traitements thermiques des aciers.

### 4.4.1 Points de transformation des aciers selon le diagramme de ROOZEBOOM.



Explications du diagramme.

IMPORTANT - Ce diagramme ne représente que les transformations des aciers qui interviennent uniquement dans l'état solide (en dessous de 1145°). Le point d'eutexie des alliages FER-CARBONE correspondant à la fonte blanche est à 1145 C pour 4,3 % de carbone.

En dessous des points A1 (720°) : On obtient une solution stable à froid (solution  $\alpha$ ) "MALLÉABLE" dont la constitution dépend du % carbone FERRITE ou PERLITE ou (FERRITE + PERLITE) ou (PERLITE + CÉMENTITE)  
 Au-dessus des points A3 (720 °C à 1145 °C) : On obtient une solution stable où le carbone se trouve dissous dans le fer (solution  $\gamma$  ou carbure de fer). On obtient un nouveau constituant AUSTENITE.

Entre les points A1 et les points A3 : C'est l'intervalle de température (plus ou moins important en fonction du % carbone) nécessaire à la transformation de la mise en solution.

### 4.4.2 Intérêt du diagramme et renseignements obtenus.

La connaissance du Pt A3 d'un acier correspond à la température de mise en solution du carbone.

On peut conserver la mise en solution du carbone à température ambiante en refroidissant énergiquement de façon à parcourir l'intervalle de transformation le plus rapidement possible (conservation presque intégrale de l'austénite).

Les aciers trempants sont ceux qui possèdent une faible température de traitement et un faible intervalle de transformation (0,5 % à 1 % de carbone).

Le point eutectique (acier extra-dur à 0,85 % de C) correspond à la plus faible température de traitement (720°C) sans intervalle de transformation (transformation à température constante comme un corps pur) c'est l'acier

AUTO-TREMPANT. Un nouveau cycle thermique (chauffage - refroidissement) permet de modifier à volonté les constituants obtenus.

État MALLÉABLE (solution $\alpha$ ) traitement	→ RECUIT
État DUR (solution $\gamma$ ) traitement	→ TREMPE
Les vitesses de refroidissement influencent également le résultat.	
Refroidissement lent (pièces dans le four chauffage coupé)	→ RECUIT
Refroidissement à l'air ou huile chaude (vitesse moyenne)	→ TREMPE DOUCE
Refroidissement à l'eau ou huile	→ TREMPE NORMALE
Refroidissement très rapide à l'eau très froide	→ TREMPE VIVE

Conséquence : Une pièce massive peut être refroidie à vitesses inégales entre la périphérie et le cœur et comporter des tensions internes entre les différents résultats obtenus entraînant des risques de criques.

#### 4.4.3 Types de traitements.

Les aciers peuvent acquérir des caractéristiques élevées par un cycle ou une succession de cycles thermiques (chauffage - refroidissement).

Il existe deux types de traitements

LES TRAITEMENTS THERMIQUES

LES TRAITEMENTS CHIMICO-THERMIQUES

#### 4.4.4 Les traitements thermiques.

Ils entraînent une modification des caractéristiques mécaniques dans la structure cristalline existante.

On distingue :

LA TREMPE : Elle provoque un durcissement structural par chauffage à température de mise en solution du carbone suivi d'un refroidissement rapide pour la conserver à température ambiante.

LE REVENU : Effectué après trempe, il supprime les tensions internes dues au refroidissement rapide.

Chauffage à faible température pendant longtemps. Ex : 150 °C pendant 8 heures dans l'huile ou du sable chaud.

LES RECUITS : Retour à l'état malléable par suppression soit du durcissement structural (sur pièces trempées), soit de l'écrouissage (sur pièces déformées à froid).

#### 4.4.5 Les traitements chimico-thermiques.

Ils consistent à modifier superficiellement la structure cristalline d'une pièce par chauffage à température déterminée en présence d'éléments chimiques capables de phénomènes de mise en solution, on obtient ainsi :

- soit des pièces à âme douce et périphérie dure
- soit des pièces à âme dure et périphérie douce
- soit des pièces présentant des bonnes qualités de frottement.

LA CÉMENTATION : augmentation de la dureté superficielle des aciers doux et demi-doux par accroissement de la teneur en carbone de la couche périphérique pour la rendre trempable tout en conservant une bonne résilience à cœur. Applications : pièces de frottement, cames, engrenages, etc.

LA CYANURATION : Cémentation liquide dans un bain de cyanure. Elle présente l'avantage de ne pas oxyder ni déformer les pièces.

LA NITRURATION : Augmentation de la dureté superficielle par diffusion d'azote (formation d'une couche de nitrure de fer très dure). Applications : pièces de frottements intenses, soumises à des températures élevées, cages de roulements, chemises de cylindres, axes de pistons, etc.

CARBO-NITRURATION : Cémentation mixte par le carbone et l'azote.

LA SULFUNISATION Diminution du coefficient de frottement par diffusion de soufre dans la couche périphérique. On obtient ainsi une très grande résistance au grippage même sous de fortes pressions. Applications : Robinets, vannes, pompes hydrauliques, pistons hydrauliques, axes, etc.

LA MALLÉABILISATION : Décarburation périphérique des pièces en fonte blanche pour les rendre usinables. Exemple : fonte EUROPÉENNE ou AMÉRICAINE.

### 4.5 Les aciers aéronautiques.

Les ACIERS faiblement alliés à haute résistance (utilisés en structure et pour des pièces de trains d'atterrissage).

Les aciers MARAGING à haute teneur en nickel (18 %).  
 Les aciers INOXYDABLES à température ambiante.  
 Les aciers RÉFRACTAIRES résistant au fluage et à la corrosion à chaud.

**4.5.1 Aciers faiblement alliés à haute résistance.**

On les rencontre partout où il est question :  
 soit d'allier des caractéristiques maxi sous un encombrement réduit,  
 soit de réaliser des pièces de frottement (axes, arbres, roulements, etc.)  
 Dans la plupart des cas nécessité d'effectuer des traitements thermiques ou chimico-thermiques pour l'obtention des caractéristiques maxi.

Les principaux aciers faiblement alliés sont :

30 NC 11 35 NC 6	Acier au NICKEL CHROME - Grande résistance aux contraintes statiques ou dynamiques. (Rr)t ≈ 105 hb (Re)t ≈ 75 hb – Boulonnerie aéronautique.
25 CD 4 S	Acier au CHROME MOLYBDÈNE - Bonne soudabilité avec facilité de forgeage. (Rr)t ≈ 110 hb (Re)t ≈ 70 hb - Caissons, berceaux de moteurs, chapes.
40 CDV 16	Acier au CHROME MOLYBDÈNE VANADIUM - Très haute résistance. (Rr)t ≈ 190 hb - Pièces de trains d'atterrissage.
35 NCD 16	Acier au NICKEL CHROME MOLYBDÈNE - Auto-trempant à très haute résistance. (Rr)t 180 ≈ hb - Pièces de trains d'atterrissage.
30 CAD 6-12	Acier au CHROME-ALUMINIUM-MOLYBDÈNE - Acier de nitruration pour frottements intenses. (Rr)t ≈ 210 hb (Re)t ≈ 80 hb . Après traitement, dureté périphérique = 1100 HB. Arbres, axes, etc.

**4.5.2 Aciers maraging : (à 18 % de nickel + cobalt + molybdène)**

Avantages : Plus grande résistance à la propagation des fissures et à la rupture (Rr)t de 140 à 210 hb.  
 Possibilités de déformations et de soudabilité intéressantes, mais nécessité d'effectuer des traitements de surface (GRENAILLAGE) pour améliorer la résistance à la fatigue.

**4.5.3 Les aciers inoxydables au CHROME NICKEL.**

Ils sont de plus en plus utilisés dans les revêtements et tuyauteries par suite de leur grande résistance à la corrosion.

1°) Composition :

Une addition de NICKEL > à 20 % rend l'acier inoxydable mais trop mou.

Une addition de CHROME > 13 % rend l'acier inoxydable mais trop dur.

Une addition de CHROME et de NICKEL en proportions convenables permet d'allier de bonnes caractéristiques mécaniques à des conditions de travail et d'usinage correctes.

2°) Aptitudes technologiques.

a) Un chauffage entre 450 et 800 °C entraîne la précipitation de grains de carbure de chrome très durs (2000 HB). Conséquences :

Grande difficulté lors de l'usinage (la pièce est plus dure que l'outil). La dureté croit sans cesse avec la formation de carbure de chrome sous l'outil.

Perte de l'inoxidabilité.

b) L'écrouissage entraîne également la formation de grains de carbure de chrome en très grand nombre mais de petites dimensions. Conséquences :

Augmentation de la dureté superficielle.

Pas de diminution sensible de la résistance à la corrosion.

Première remarque : Si un acier inoxydable a subi une précipitation de grains de carbure de chrome, il doit être régénéré (ou adouci) par HYPERTREMPE : chauffage à une température d'environ 1100 °C suivi d'un refroidissement rapide (HB 250) afin de restituer le carbone dans le fer (fonction de la température de mise en solution).

Pour cette raison, on appelle les aciers au chrome-nickel "ACIERS AUSTÉNITIQUES" (obtention d'un maximum d'AUSTÉNITE par HYPERTREMPE).

Rappels : Le chrome augmente la vitesse de mise en solution à coeur, le nickel diminue la température de mise en solution ( diminution du point de transformation).

Seconde remarque : Afin d'éviter la formation de carbure de chrome, on ajoute en faible pourcentage des éléments d'addition avides de carbone et capables de retarder la formation de grains de carbure de chrome, titane ou molybdène par exemple. On peut aussi diminuer au maximum le pourcentage de carbone dans les aciers susceptibles de subir une mise en forme importante (grande déformation). Par exemple, le FIL À FREINER (Z3CN18-10) en acier à 0,03 % de carbone est à la limite du fer industriel.

#### 4.5.4 Principaux aciers inoxydables au Chrome-Nickel.

Symbolisation	(Rr)t mini	(Re)t mini	A % mini	Utilisation
Z3 CN 18-10	55	20	45	Étirage et emboutissage facile. Fil à freiner, goupilles fendues, etc.
Z6 CN 18-10	60	20	42	Profilés, tubes et fils, tuyauteries.
Z10 CNT 18-10	65	22	35	Emboutissage et constructions soudées. Tôles – revêtements.
Z12 CN 18-10	70	30	20	Pièces forgées. Boulonnerie.
Z15 CN 18-2	95	65	10	Pièces forgées. Rotules, vis, goujons.

#### 4.5.5 Mise en œuvre des aciers inoxydables.

Les conditions de mise en œuvre sont liées avec la formation de carbure de chrome par élévation de température et écrouissage. Il faut donc éviter de chauffer, ou de durcir superficiellement le métal.

En fin d'opération, il est nécessaire d'effectuer un recuit d'adoucissement et de normalisation suivi d'un décapage final à l'acide nitrique.

- Forgeage : à faible température < 400°, pour éviter la formation de carbure de chrome.
- Usinage : surveiller l'affûtage et la rigidité des outils de coupe, afin d'éviter l'écrouissage.
- Perçage : prendre des forets en acier rapide et de longueur réduite (rigidité - vibrations). La vitesse de coupe et l'avance doivent être deux fois plus faible que pour les aciers mi-durs et la lubrification doit être abondante, afin d'éviter l'échauffement et la détérioration de la coupe du foret.
- Taraudage et filetage : effectuer le travail en une seule passe afin d'éviter un écrouissage trop important.
- Alésage : veillez à ce que l'alésoir ne broute pas car il s'ébrêcherait par l'augmentation de la dureté superficielle.
- Rivetage : il doit être exécuté avec le minimum d'écrouissage pour le rivet et la tôle. Il peut s'exécuter à chaud (entre 1 050 et 1 200°C) avec une riveuse hydraulique. En maintenance aéronautique, on utilise principalement des rivets en MONEL montés à froid :
 

Composition	Résistance mécanique
67 % Nickel, 30 % Cuivre, 1 % Fer et 1% Manganèse.	(Rr)t=60, (Re)t=30, A%=40
- Perçage à main : utiliser des perceuses pneumatiques tournant à faible vitesse de rotation (500 t/mn), afin de diminuer l'échauffement et l'écrouissage au maximum.
- Soudage : le soudage oxyacétylénique est possible, mais nécessite d'utiliser une flamme réductrice ou légèrement neutre afin d'éviter les phénomènes de corrosion inter cristalline. Pour le soudage : on utilise de préférence des aciers inoxydables alliés au Vanadium (meilleure stabilité cristalline).

NOTA : Conditions de l'inoxidabilité :

- Ne chauffer le métal que parfaitement propre,
- Éliminer par décapage à l'acide nitrique, l'oxyde provenant d'un travail à chaud,
- Éviter les mauvais états de surface et les assemblages hétérogènes.

## 4.6 Les aciers et matériaux réfractaires.

Les matériaux réfractaires peuvent être classés en fonction de leur résistance maximum en température face aux contraintes chimiques, thermiques et mécaniques. On distingue :

Type	Utilisation en température
Les ALLIAGES de MAGNÉSIUM	150 à 200 °C
Les ALLIAGES D'ALUMINIUM	250 à 300 °C
Les ALLIAGES de TITANE	400 à 450 °C
Les ACIERS FAIBLEMENT ALLIÉS	500 °C
Les ACIERS INOXYDABLES	600 °C
Les ACIERS RÉFRACTAIRES sans durcissement structural	700 °C
Les ACIERS RÉFRACTAIRES avec durcissement structural	800 °C
Les ALLIAGES RÉFRACTAIRES à base de NICKEL	880 à 900 °C
Les ALLIAGES RÉFRACTAIRES à base de COBALT	950 à 1000 °C
Les CÉRAMIQUES	1300 °C

Les principaux éléments entrant dans la composition de ces alliages réfractaires sont le FER, le NICKEL, le COBALT et le CHROME comme éléments de base ou d'addition principale ; le TUNGSTÈNE, le MOLYBDÈNE, le TITANE, le NIOBIUM, le VANADIUM, le BORE, le TANTALE, le ZIRCONIUM, l'ALUMINIUM, etc. comme éléments d'addition secondaire.

### 4.6.1 Propriétés des alliages réfractaires.

Ces alliages étant sollicités mécaniquement à des températures très variables ils doivent posséder les propriétés suivantes :

- Coefficient de dilatation faible : stabilité dimensionnelle.
- Conductibilité thermique élevée : limitation des écarts de température entre les différentes parties de la pièce.
- Résistance aux variations de température et aux chocs thermiques.
- Limite élastique élevée à chaud : résistance à la déformation, résistance au FLUAGE.
- Résistance aux sollicitations chimiques.

#### 4.6.1.1 Les alliages de nickel.

Ils conviennent pour les trois types de sollicitations : MÉCANIQUES, THERMIQUES et CHIMIQUES (très grande résistance à la fatigue, au fluage et à la corrosion à chaud). Il existe plusieurs familles d'alliages de NICKEL :

- Les alliages NICKEL + CUIVRE : alliages "MONEL" qui présentent une bonne résistance à la corrosion chimique, utilisables jusqu'à 500 °C.
- Les alliages NICKEL + CHROME + FER : alliages "INCONEL" qui sont très tenaces et utilisables jusqu'à 700 à 800 °C.
- Les alliages NICKEL + CHROME + COBALT : alliages "NIMONIC" et alliages "RENE". Ils sont très tenaces et présentent une bonne résistance au FLUAGE, utilisables jusqu'à 950 °C.

NOTA : Dans les alliages de NICKEL à haute température, on rencontre :

- Des alliages plus spécialement réservés à la FONDERIE.
- Des alliages pour CORROYAGE<sup>1</sup>.
- Des alliages à durcissement structural par traitements thermiques.

#### 4.6.1.2 Les alliages de cobalt.

Ils permettent de supporter des températures allant jusqu'à 1 000 °C avec une endurance supérieure aux alliages de NICKEL.

Composition chimique COBALT + CHROME + NICKEL avec, par exemple, le HS188X40 utilisé comme tube à flamme et aubages turbine des turboréacteurs CF6-50.

#### 4.6.1.3 Quelques aciers réfractaires.

<sup>1</sup>) Les aciers austénitiques résistant au FLUAGE (au chrome-nickel)

Z8CNT18-10 utilisable jusqu'à 600 à 700 °C : tôles

Z10CNW17 utilisable jusqu'à 600 à 700 °C : ailettes de turbine

Z30CND19-10 utilisable jusqu'à 800 °C : disques ou anneaux de turbines avec durcissement structural : addition de molybdène, aluminium ou cuivre.

Ex : Z7CNA17-7 (ou 17-7 PH) : (Rr)t = 170 ; (Re)t = 150.

2°) Les aciers austénitiques résistant à CHAUD (au chrome - nickel - silicium)

Z15CNS20-10 utilisable à 900 °C

Z15CNS25-20 utilisable à 1100 °C

Z20CNS36-18 utilisable à 1150 °C

3°) Les aciers austénitiques alliant la résistance au fluage et la résistance à la chaleur (au chrome-nickel-cobalt) : Z12CNKDW20 ailettes de turbine utilisable jusqu'à 1000 °C.

NOTA : Les aciers réfractaires doivent, en plus, répondre aux conditions suivantes :

- Résistance aux chocs thermiques,
- Résistance mécanique à chaud.

Les conditions de mise en œuvre sont particulières de par :

- La stabilité structurale qui varie avec la température d'utilisation,
- Le soudage qui entraîne des altérations locales,
- L'usinage qui nécessite des méthodes de travail et des outils spéciaux.

#### **4.6.1.4 Les céramiques.**

On désigne ainsi tous les matériaux réfractaires à haut point de fusion ne présentant pas une structure métallique. Les plus utilisés dans la préparation des CERMETS sont :

- Les CARBURES de chrome, de titane, de zirconium, de tantale
- Les SILICIURES : carborundum, bisiliciure de molybdène
- Les BORURES de chrome, de titane, de zirconium
- Les NITRURES de bore, de silicium
- Les OXYDES : alumine

a) Principales propriétés

- Grande dureté avec une grande difficulté d'usinage.
- Grande résistance à l'oxydation
- Grande résistance au fluage au-dessus de 1 000° C - ductilité nulle
- Mauvaise conductibilité thermique
- Mauvaise résistance aux chocs thermiques - fragilité excessive à l'entaille

b) Préparations.

Elles sont réalisées suivant les techniques de la MÉTALLURGIE des POUDRES (FRITTAGE par COMPRESSION et CUISSON), mais de par les propriétés particulières des CERMETS utilisés : mauvaise résistance aux chocs thermiques et grande fragilité, il est nécessaire de les FRITTER avec un liant métallique qui améliorera leur résistance aux chocs thermiques et diminuera leur fragilité excessive. Les principaux liants utilisés sont : le CHROME, le NICKEL, le COBALT et leurs alliages.

Ces CERMETS peuvent supporter des charges supérieures à 10 hb aux températures voisines de 1 300 °C, mais de par leur grande fragilité, les utilisations dans le réacteur sont, pour le moment, encore assez limitées.

#### **4.6.1.5 Alliages réfractaires récents.**

Ce sont des alliages à base des métaux réfractaires tels que tantale, niobium, molybdène, tungstène.

Ce sont des métaux coûteux, difficiles à élaborer (sous vide) et possédant des propriétés chimiques et physiques très ennuyeuses :

- Grande sensibilité vis-à-vis de l'oxygène, du carbone et de l'azote,
- Mauvaise résistance à l'oxydation à chaud, d'où la nécessité de mettre au point des revêtements protecteurs efficaces.



## 5 L'ALUMINIUM et ses ALLIAGES.

### 5.1 Propriétés de l'aluminium :

- métal blanc de bel aspect décoratif,
- masse volumique faible 2,73 kg/dm<sup>3</sup> - température de fusion faible 658 °C,
- bonne résistance corrosion, vis à vis des agents atmosphériques : formation d'une couche d'oxyde protectrice, l'ALUMINE,
- conductibilité thermique élevée : échangeurs thermiques,
- conductibilité électrique élevée : conducteurs électriques,
- non toxique : industrie alimentaire,
- grande résistance au froid : sa résistance mécanique augmente jusqu'à -250 °C,
- amagnétique : l'aluminium et ses alliages ne prennent pas l'aimantation,
- grande affinité avec l'oxygène : désoxydant,
- pouvoir réflecteur élevé : éclairage,

De plus, il possède des aptitudes technologiques très intéressantes de bonnes malléabilité, fluidité et soudabilité et de grande facilité d'usinage.

### 5.2 Principaux alliages.

On distingue les alliages de fonderie avec et sans durcissement structural et les alliages de corroyage avec et sans durcissement structural.

**NOTA** : Tous ces alliages peuvent avoir leurs caractéristiques mécaniques également modifiées par **ÉCROUISSAGE** (déformations plastiques à froid).

#### 5.2.1 Les ALPAX (Famille aluminium + silicium)

Caractéristiques mécaniques moyennes mais ils possèdent une bonne coulabilité et sont utilisés comme pièces de fonderie. Exemple : A-S10, A-S13 : carters, pistons, culasses de moteur, appareils ménagers, appareillage alimentaire, etc.

**NOTA** : Une addition de cuivre et de magnésium permet d'augmenter leurs caractéristiques par durcissement structural.

#### 5.2.2 Les DURALUMINS (Famille aluminium + cuivre)

Ex : A-U2G, A-U3G, A-U4G, A-U4G1, A-U4Pb, A-U2GN (alliage Concorde). Alliages à durcissement structural alliant de bonnes caractéristiques mécaniques à de bonnes possibilités de déformations.

Les DURALUMINS sont difficilement soudables (brûlures internes, fragilité à chaud) et sont sensibles à la corrosion inter cristalline (couple électrochimique interne).

Utilisations : A-U2G, A-U4G : rivets, revêtements ; A-U4G1 : pièces de structures (longerons, couples, etc.) et revêtements travaillants (ailes, fuselages, empennages) ; A-U2GN : pièces de structure Concorde (meilleure résistance à chaud).

**NOTA** : Pour remédier à la corrosion inter cristalline des revêtements en duralumin, on les protège généralement par une mince pellicule d'aluminium. Ex : VEDAL = A-U4G1 plaqué A5)

#### 5.2.3 LES ZICRALS (Famille aluminium + zinc)

Ex : A-Z5GU, A-Z8GU. Alliages à durcissement structural et à hautes caractéristiques mécaniques, mais ils présentent une moins bonne plasticité que les DURALUMINS (faible allongement 10 à 8 %) et sont sensibles aux criques. Ils sont difficilement soudables et présentent également des phénomènes de corrosion inter cristalline.

Utilisations : pièces de haute limite élastique, mais non soumises à des sollicitations alternées (criques) : pièces de structure – boulons, etc.

#### 5.2.4 LES DURALINOX (famille Aluminium + Magnésium)

Ex : A-G3, A-G5, A-G7. Alliages sans durcissement structural (les caractéristiques optimum sont obtenues par **ÉCROUISSAGE**). Pièces de résistance moyenne, mais de travail facile et possédant une excellente soudabilité, une excellente résistance à la corrosion et une grande facilité de chaudronnage.

Utilisations : Tuyauteries et réservoirs hydrauliques basse pression, rivets, pièces de déformation.

**NOTA** : On utilise aussi quelques alliages de la famille ALMASILIUM (Aluminium + Magnésium + Silicium) qui présentent sur les DURALINOX la susceptibilité d'un durcissement structural par traitement thermique. A-SG

### 5.3 Symbolisation de l'aluminium et de ses alliages.

#### 5.3.1 Symbolisation chimique française :

**ALUMINIUM** Ex : A5 A 5 (Ancienne symbolisation NF A02-004)  
 métal de base Indice de pureté

- Ex. : A2 aluminium à bas titre  
 A5 aluminium à 99,5 % de pureté (utilisé en aéronautique)  
 A7 aluminium à 99,7 % de pureté  
 A8 aluminium à 99,8 % de pureté obtenus après  
 A9 aluminium à 99,9 % de pureté raffinage électrolytique  
 A99 aluminium à 99,99 % de pureté

**ALLIAGES LEGERS** Ex : A-U4G1

A	U4	G1
Métal de base (Aluminium)	Élément additif principal suivi du pourcentage réel.	Éléments additifs secondaires, suivi du pourcentage réel (1 % de magnésium), classés par ordre décroissant.

#### 5.3.2 Symbolisation chimique américaine (code ALCOA).

(Nouvelle symbolisation française NF A02-104)

2024		
2	0	24
Indique le groupe de l'alliage défini par le ou les constituants principaux : 1 – aluminium non allié 2 – cuivre 3 – manganèse 4 – silicium 5 – magnésium 6 – magnésium + silicium 7 – zinc 8 – autres éléments 9 – disponible	Indique une modification éventuelle de composition chimique par rapport à l'alliage d'origine :  Exemples A-U4G → 0 A-U2G → 1 A-U2GN → 6	Correspond à la désignation commerciale de l'alliage. (désignation ALCOA)

NOTA - la présence de la lettre "A" après cette symbolisation signifie qu'il s'agit d'un alliage national de composition chimique légèrement différente : Ex : 2017A. La présence de la lettre "X" à la suite de la désignation numérique désigne un alliage expérimental.

#### 5.3.3 Symbolisation des modes d'obtention et états de livraison.

(Valable pour tous les métaux et alliages non ferreux)

Ex : de symbolisation complète : A-U4G1-H14T3

A-U4G1 - H14T3  
 Composition chimique, Modes d'obtention + États de livraison

Symbolisation des états de base	
F : État tel que fabriqué. 0 : État recuit ou recristallisé. H : État écroui par une opération de travail à froid. - H1 : écrouissage seul par travail à froid - H2 : écrouissage suivi d'un recuit d'instauration - H3 : écrouissage suivi d'une stabilisation - 2e chiffre nuance de dureté .2 nuance 1/4 dur d'où H12- H22- H32 .4 nuance 1/2 dur H14- H24- H34 .6 nuance 3/4 dur H16- H26- H36 .8 nuance 4/4 dur H18- H28 .9 nuance ressort H19	T : Traité par traitements thermiques. - T3 : mise en solution (trempe), travail à froid, vieillissement naturel - T4 : mise en solution (trempe), vieillissement naturel - T5 : revenu seul - T6 : mise en solution (trempe) + revenu - T8 : mise en solution (trempe), écrouissage et revenu - T10: revenu + écrouissage

5.3.4 Correspondances de symbolisation des principaux alliages

Anciens Symboles	Nouveaux Symboles	Anciens Symboles	Nouveaux Symboles
A5	1050 A	A-G4	5086
A7	1070 A	A-G5	5056 A
A9	1099	A-GS	6061
A-U4GS	2014	A-SG	6181
A-U4G	2017 A	A-Z5G	7020
A-U4G1	2024	A-Z5GU	7075
A-U2G	2117	A-Z8GU	7049A
A-U2GN	2618 A	Nouvel Alliage	7050
A-M1	3003	A-Z3G2	7051
A-S12UN	4032	VEDAL A-U4G1/A5	ALCLAD 2024

5.4 Traitements thermiques des alliages légers.

5.4.1 Généralités

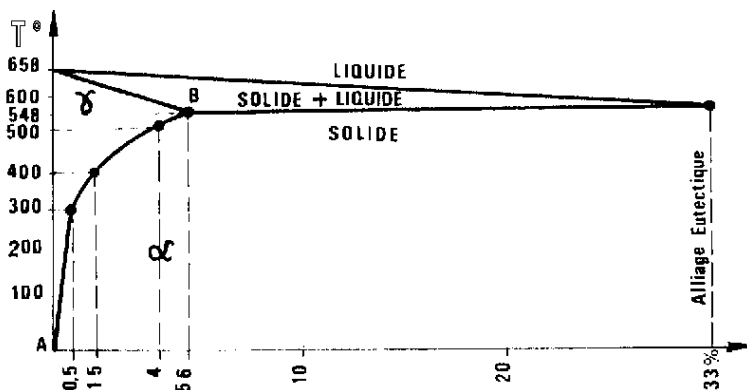
Les alliages d'aluminium susceptibles de subir un durcissement structural par mise en solution sont :

- les alliages (aluminium + cuivre) type DURALUMIN
- les alliages (aluminium + zinc ) type ZICRAL
- les alliages (aluminium + magnésium + silicium) type ALMASILIUM

En revanche, tous les alliages d'aluminium sont susceptibles de subir un durcissement par déformation à froid de type "ÉCROUISSAGE" ou un traitement de malléabilité ou d'adoucissement de type "RECUIT".

Nota : Le DURALINOX ne peut être durci que par ÉCROUISSAGE.

a) diagramme de transformation des alliages aluminium + cuivre.



Les températures de mise en solution sont déterminées par la courbe A B. Exemple :

- à 300° C mise en solution de 0,5 % de Cu
- à 400° C mise en solution de 1,5 % de Cu
- à 500° C mise en solution de 4 % de Cu
- à 548° C mise en solution de 5,6 % Cu (valeur maxi) point de saturation.

Au-dessus de 5,6 % de Cu seule une partie du cuivre rentrera en solution dont la quantité sera fonction de la température.

NOTA : Nécessité de ne pas dépasser des pourcentages de 4 à 5 % de cuivre car seule une partie entrerait alors en solution ; cette partie entrée en solution serait fonction de la température.

5.4.2 Principaux Paramètres influençant les traitements thermiques.

5.4.2.1 Température de mise en solution.

Son influence est très importante sur les caractéristiques mécaniques obtenues :

Si la température est insuffisante : la mise en solution sera incomplète ainsi que l'évolution des phases durcissantes. Les caractéristiques mécaniques obtenues seront plus faibles que celles qui sont recherchées.

Si la température est trop élevée : la mise en solution sera achevée mais il apparaîtra des phénomènes de brûlures, correspondant à la fusion partielle des constituants eutectiques aux joints des grains entraînant également des caractéristiques plus faibles que celles recherchées. De plus, un métal brûlé ne peut être régénéré par un nouveau traitement.

5.4.2.2 Durée de la mise en solution.

Elle est fonction :

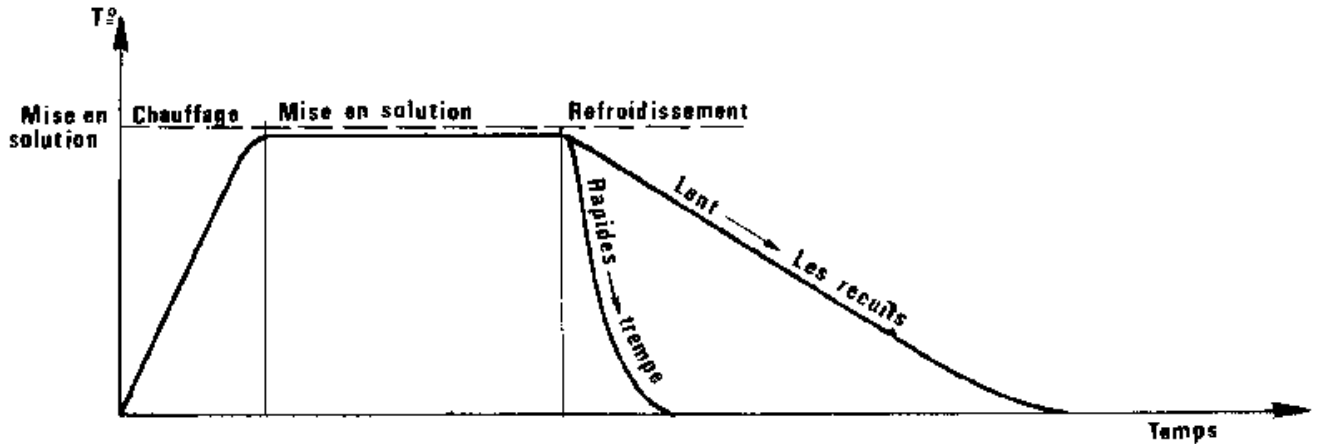
- de l'homogénéité de l'alliage
- de la masse de la pièce
- de sa forme (épaisseur ou diamètre de la pièce)
- du moyen de chauffage utilisé

**5.4.2.3 Influence de la vitesse de refroidissement**

Après avoir obtenu la mise en solution complète (d'un ou de deux constituants fonction de l'alliage). On peut :

- Soit essayer de conserver la structure de mise en solution à température ambiante par un refroidissement rapide (TREMPE),
- Soit revenir à l'état structural initial par un refroidissement lent (RECUIT)

On peut donc définir un traitement thermique en traçant la courbe des températures en fonction des temps.



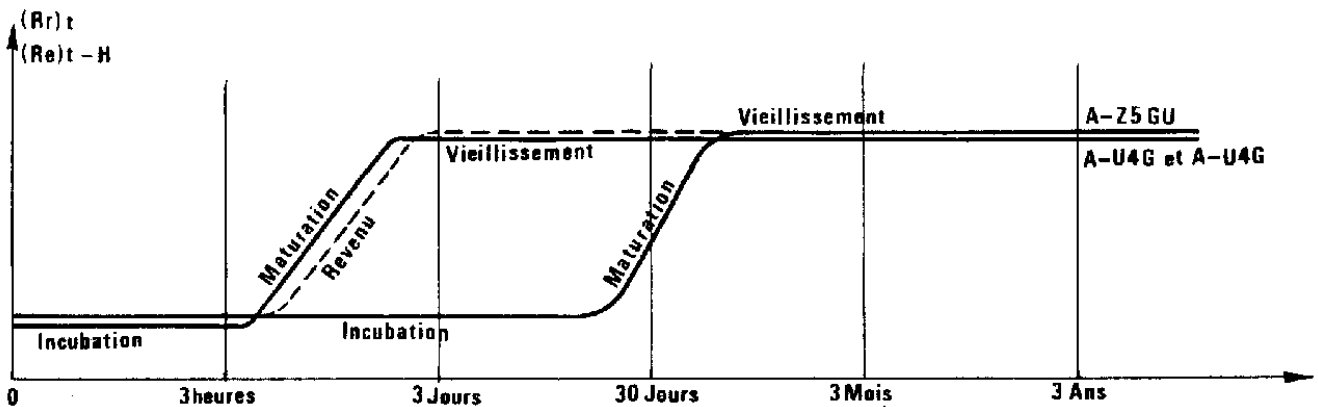
Pour la TREMPE la vitesse de refroidissement doit être la plus élevée possible de façon à conserver au maximum la structure de mise en solution (état gamma).

De plus ce refroidissement ne risque pas d'entraîner de tensions internes ou de tapures de par les faibles températures de traitement (équivalentes à 500 °C) et de l'excellente conductibilité thermique de ces alliages.

**5.4.2.4 Phénomène de maturation.**

C'est un retard à l'établissement des caractéristiques déterminées par la TREMPE. Cette évolution structurale dans le temps se fait au voisinage de la température ambiante et varie en fonction des alliages.

Exemple : évolution des caractéristiques de dureté à température ambiante.



L'évolution sera plus rapide pour une température supérieure à la température ambiante et sera plus lente pour une température inférieure à la température ambiante.

Cette évolution se fait suivant 3 phases successives :

- 1e phase : période de stabilisation appelée (incubation ou trempe fraîche).
- 2e phase : période d'évolution des phases durcissantes (maturation).
- 3e phase : période de vieillissement ou le métal devient plus sec.

NOTA : L'état de trempe fraîche permet la mise en forme d'une pièce avant l'évolution des phases durcissantes (ex : A-U4G et A-U4G1 → 3 h), mais la période de maturation évolue avec la température ambiante.

→ Le froid retarde l'évolution des phases durcissantes (conservation de l'état de trempe fraîche) ex : pose des rivets.

→ Le chaud accélère l'évolution des phases durcissantes (maturation artificielle) ou REVENU.

Le Chauffage :

Il est facilité par la bonne conductibilité thermique de ces alliages et la faible température des traitements, mais il nécessite un respect très rigoureux de la température de mise en solution afin d'éviter les brûlures internes des constituants eutectiques, qui entraîneraient la destruction de la cristallisation.

Moyens de chauffage utilisés : fours à ventilation et bains de sels en fusion.

Le refroidissement :

Sur alliages sans durcissement structural : à l'air ambiant.

Sur alliages à durcissement structural :

→ Traitement de durcissement (TREMPE) dans l'eau de 15 à 70 °C en fonction des risques de tensions internes : tôles minces ou pièces massives.

→ Traitement de malléabilité (RECUIT), pièces laissées dans le four dont on baisse progressivement la température de chauffage afin d'éviter tout phénomène de MATURATION dû à un échange thermique important.

- Ex : refroidissement en 3 étapes
- 20 °C par heure jusqu'à 250 °C environ,
  - 50°C par heure de 250 à 150 °C environ,
  - Refroidissement à l'air ambiant ensuite.

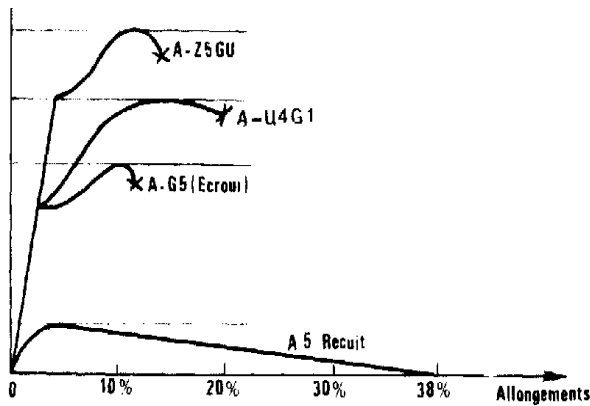
**5.4.2.5 Les différents traitements thermiques des alliages légers.**

DÉSIGNATION	PRINCIPE DE RÉALISATION									
<p>La TREMPE</p> <p>Durcissement structural : Augmente : H - (Rr)t - (Re)t.</p> <p>La trempe est suivie d'un phénomène de maturation : établissement des caractéristiques dans le temps.</p> <p>Températures de trempe :</p>	<p>Chauffage à température de mise en solution précise (A-U4G1 ~ 500 °C), maintien en température, refroidissement rapide dans de l'eau de 15 à 70 °C en fonction des risques de tensions internes.</p>									
	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="width: 20%;">A-U4G, A-U4G1, 2017, 2024</td> <td style="width: 20%;">495 °C ± 5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>A-Z5GU, 7075</td> <td>465 °C ± 5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>A-U2GN, RR58, 2618</td> <td>530 °C ± 5</td> </tr> </table>		A-U4G, A-U4G1, 2017, 2024	495 °C ± 5		A-Z5GU, 7075	465 °C ± 5		A-U2GN, RR58, 2618	530 °C ± 5
	A-U4G, A-U4G1, 2017, 2024	495 °C ± 5								
	A-Z5GU, 7075	465 °C ± 5								
	A-U2GN, RR58, 2618	530 °C ± 5								
<p>Le REVENU</p> <p>Maturation artificielle pour alliages à maturation lente (ex A-Z5GU et A-U2GN). On ne pratique pas de revenu sur les alliages du type A-U4G et A-U4G1 (Maturation naturelle en ~ quatre jours).</p>	<p>Chauffage à 150 à 200 °C, pendant 5 à 25 heures, en fonction de l'alliage. Refroidissement à l'air ambiant.</p>									
<p>Le RECUIT de RESTAURATION</p> <p>Applicable sur tous les alliages auxquels on veut redonner une certaine malléabilité sans changement de cristallisation.</p>	<p>Chauffage à 250 à 300 °C, pendant 2 à 8 heures, en fonction de l'alliage. Refroidissement à l'air ambiant.</p>									
<p>Le RECUIT de RECRISTALLISATION</p> <p>Applicable sur tous les alliages afin de supprimer l'érouissage ; nécessité d'intervenir sur un érouissage minimum pas trop élevé.</p>	<p>Chauffage à 350 à 400 °C, pendant 1 à 2 heures, en fonction de l'alliage. Refroidissement à l'air ambiant pour les alliages non trempant et en laissant les pièces dans le four pour les alliages trempants.</p>									
<p>Le RECUIT de COALESCENCE</p> <p>Sur alliages trempants afin d'annuler les effets de la trempe.</p>	<p>Chauffage à 400 à 430 °C, pendant 2 heures, en fonction de l'alliage. Refroidissement, pièces dans le four, en trois étapes afin d'éviter tout phénomène de maturation</p>									

**5.5 Caractéristiques des principaux alliages.**

Types d'alliages		(Rr)t	(Re)t	A %	HB
Métal pur A5 recuit à écroui 4/4		8 à 18	4 à 16	38 à 6	20 à 40
Alliages de FONDERIE					
Sans traitement thermique	A-S10	18	-	-	-
	A-S13	20	-	-	-
Avec traitement thermique	A-S12UN	38	30	8	120
Alliages de CORROYAGE					
Sans traitement thermique	A-G5 ½ écroui	36	28	8	78
	A-U4G	42	28	18	105
	A-U4G1	46	30	18	120
	A-U2GN	44	35	8	125
	A-Z5GU	54	46	10	150
	A-Z8GU	62	55	8	150

### 5.5.1 Comparaison des diagrammes de traction des principaux alliages.



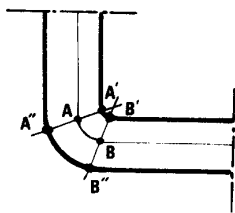
L'A5 recuit se transforme très facilement surtout dans la 3e période (diminution de section) et est surtout utilisé pour sa ductilité (transformation en fils).

L'AG5 est surtout utilisé pour son aptitude à la déformation dans la 2e période, renforcé par un durcissement par ÉCROUissage.

L'A-U4G1 est l'alliage qui présente le maximum de résistance, allié au maximum de possibilité de déformation.

L'A-Z5GU est l'alliage qui présente le maximum de résistance à la déformation, mais il est sensible aux criques.

### 5.5.2 Aptitude à la déformation des alliages légers.

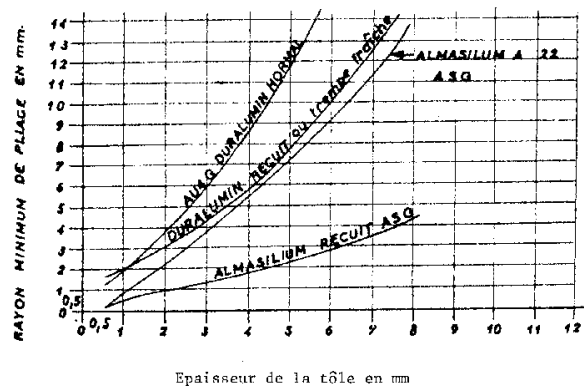
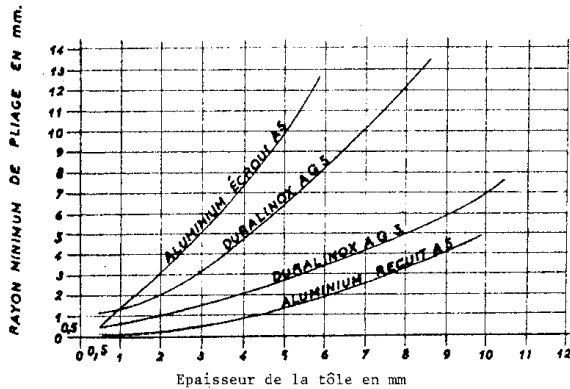


Le rayon de pliage est fonction de l'aptitude à l'allongement des molécules situées de part et d'autre de la fibre neutre, allongement (A %) qui dépend :

- de l'épaisseur : éloignement par rapport à la fibre neutre,
- de la nature du métal : métal pur ou alliage,
- de son état : recuit, écroui, trempé, etc.

### 5.5.3 Rayon de pliage des alliages légers.

Graphiques des rayons intérieurs minima de pliage à froid des tôles d'aluminium et de ses alliages en fonction de l'épaisseur.



## 5.6 Mise en œuvre des alliages légers.

### 5.6.1 Mise en forme.

Le matériel utilisé doit être parfaitement poli et ne pas présenter d'angle vif. Le traçage doit se faire au crayon et même mieux, au crayon sur papier collant ; Ne pas utiliser de pointe à tracer à cause des amorces de criques.

Les alliages à durcissement structural doivent être travaillés de préférence à froid, sur l'état de trempe fraîche. Si l'on travaille à chaud (environ 400°C) la plasticité est maximum, mais il sera alors nécessaire d'effectuer un nouveau traitement thermique pour l'obtention des caractéristiques maximum.

Des rayons de pliage, de cintrage, d'emboutissage doivent être respectés en fonction :

- de la plasticité de l'alliage considéré,
- de son état : recuit, écroui, trempé, mûri,
- de son épaisseur : espacement par rapport à la fibre neutre.

### 5.6.2 Forgeage – matriçage.

Ces opérations permettent d'obtenir des pièces à caractéristiques mécaniques élevées (FIBRAGE).

À température de forgeage (400 à 450 °C) les alliages d'aluminium étant moins malléables que les aciers, on utilise des machines plus puissantes et des outils parfaitement polis avec de grands congés et arrondis. Les alliages de forgeage sont des alliages à durcissement structural, la trempe leur conférant les caractéristiques maximales.

### 5.6.3 Usinage.

L'aluminium et ses alliages s'usinent très facilement de par :

- leur légèreté : vitesse de coupe élevée de par les effets d'inertie assez faibles,
- leur faible dureté et leur très grande ductilité

Bonne formation et bon écoulement des copeaux, une addition de plomb facilite leur fragmentation,

- Conductibilité thermique élevée qui favorise le refroidissement.

### 5.6.4 CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'USINAGE.

- Facteurs de travail importants : Vitesse de coupe 5 à 10 fois supérieure aux aciers.
- Particularités des outils :
  - Angle de coupe positif  $\pm 10$  à  $+ 30$  degrés,
  - Angle de dégagement important et état de surface très soigné pour favoriser l'évacuation des copeaux.
- La lubrification favorise l'évacuation des copeaux, élimine les calories et diminue les frottements
  - a) Ébauche : huile soluble ou pétrole,
  - b) Finition, taraudage et filetage, sciage : huile de coupe.
- a) SCIAGE À LA MAIN : Utiliser des lames n'ayant que 6 dents par cm
- b) PERÇAGE : Forets hélicoïdaux en acier rapide. Vitesse de coupe : 80 à 180 m/mn. Lubrifiant : huile soluble ou pétrole.
- c) ALÉSAGE À MAIN : Alésoirs hélicoïdaux fixes ou expansibles. Lubrifiant : huile de coupe.
- d) FILETAGE ET TARAUDAGE À MAIN : Filets non détalonnés pour éviter le coincement au retour en arrière. Rainures larges et polies pour faciliter l'évacuation des copeaux. Lubrifiant : huile de coupe.
- e) TRAVAIL À LA LIME : Limes spéciales à une seule taille et à grand pas de denture pour éviter l'encrassement (type ECOUENNE) On peut à la rigueur utiliser des limes ordinaires en les humectant de pétrole.

## 5.7 Traitements de surface des alliages d'aluminium.

Dégraissage : élimination des corps gras aux vapeurs de TRICHLORÉTHYLÈNE.

Décapage : élimination des traces d'oxydation dans un bain de soude caustique, suivi d'un rinçage à l'eau courante.

Sablage : préparation de la surface en vue d'un revêtement métallique ou d'une peinture.

Polissage : pour donner au métal un aspect brillant (BUFFLAGE ou BRUNISSAGE au TONNEAU).

Brillantage : confère aux pièces un éclat particulièrement vif et un grand pouvoir réfléchissant.

Voie électrolytique : par effet de pointe (disparition des aspérités),

Voie chimique : attaque de la pièce par un acide qui dissout les aspérités.

## 5.8 Revêtements protecteurs des alliages d'aluminium.

Ils ont pour but de protéger les alliages d'aluminium des agents de corrosion chimique et de la corrosion galvanique : isolement des métaux en contact pour éviter l'effet de pile.

- 1) Oxydation chimique : réalisation d'une couche de sels neutres à l'aide de différents produits tels que "ALODINE" - "PROTAL" - "BONDERITE" - "IRIDITE" et autres.
- 2) Oxydation anodique ou anodisation : voir chapitre , protection-corrosion
- 3) Recouvrements métalliques :
  - Par dépôts électrolytiques :(après polissage et dégraissage)
    - Dépôt d'accrochage : zinc,
    - Dépôts définitifs : zingage - cuivrage – nickelage - cadmiage – argentage – chromage.
  - Par projection (Schoopage).

- 4) Peintures et vernis (après dégraissage, décapage et oxydation chimique). Les peintures nitrocellulosiques et les peintures synthétiques sont couramment utilisées.
- 5) Recouvrements par matières plastiques : bonne adhérence et bonne protection contre les intempéries et les agents chimiques.
- 6) Recouvrements par fibres : isolation acoustique et thermique obtenue par application ou projection de fibres textiles ou minérales, additionnées d'adhésifs ou de résines en poudre.

## 6 Le MAGNÉSIUM ET les ALLIAGES ULTRA-LÉGERS.

### 6.1 Propriétés du magnésium.

- Métal blanc argent.
- Masse volumique très faible : 1,72 kg/dm<sup>3</sup>.
- Température de fusion : 651 °C.
- Point d'inflammation : 500 °C.
- Bonne résistance corrosion en atmosphère sèche et vis-à-vis des hydrocarbures, mais attaqué par l'eau chaude, les acides minéraux et organiques ainsi que par les agents atmosphériques.
- faibles caractéristiques mécaniques et possibilités de déformations réduites (R<sub>r</sub>)t 9 à 15 hb, (Re)t 6 hb, allongement 6 à 10 %.

### 6.2 Les alliages de magnésium.

Ils se caractérisent par une faible masse volumique alliée à une grande fluidité et une grande finesse de grains.

Principaux éléments d'addition : l'ALUMINIUM et le ZINC qui augmentent les caractéristiques mécaniques, la coulabilité et les possibilités de transformation ; le ZIRCONIUM qui permet de stabiliser la cristallisation, c'est-à-dire l'homogénéité.

Ex : G-A6Z1 ; G-A6Z3, G-Z5Zr.

Les alliages de magnésium ne sont pas susceptibles de durcissement structural par mise en solution, mais certains alliages de fonderie peuvent avoir leur résistance augmentée par un recuit d'homogénéisation.

### 6.3 Caractéristiques des principaux alliages.

Symboles et états	Caractéristiques				Utilisations
	(Rr)t	(Re)t	A%	HB	
Alliages de corroyage. G-A3Z1 matricé.	24	18	10	50	Forgeage facile : paliers, brides, etc.
G-A6Z1 matricé.	28	20	10	55	Pièces soumises à des efforts plus importants : guignols,
G-A7Z1 matricé.	32	23	8	60	Meilleures caractéristiques mécaniques ; pièces tournantes, rotors,
Alliages de fonderie. G-A6Z3 coulé en sable	16	9	3	55	Pièces de qualité courante.
G-A9 coulé en sable.	23	10	7	55	Bonnes caractéristiques mécaniques, pièces soumises à vibration.
G-A9Z1 coulé en coquille sous pression.	22	10	6	60	Moulage en coquille sous pression grâce à sa bonne coulabilité.
G-Z3Zr ou ZIRCONIUM	25	16	8	65	Alliage à haute limite élastique, exempt de micro porosités : roues d'avion,

Il existe, sous des appellations commerciales, des alliages spéciaux tels que :

- ZRE1 qui est très étanche et résiste au fluage jusqu'à 250 °C.
- TZ6 alliage au thorium à haute limite élastique.
- ZT1 alliage au thorium, très étanche et qui résiste au fluage jusqu'à 350 °C.

### 6.4 Aptitudes technologiques des alliages de magnésium.

- Ils possèdent une très grande aptitude à l'usinage : vitesse de coupe très élevée sans lubrification.
- Leur soudage se fait de préférence sous gaz neutre à cause des risques d'inflammation.
- Il faut assurer leur protection contre la corrosion (peintures, métallisations) car la couche d'oxyde protectrice est très friable.
- Il ne faut jamais réaliser un assemblage HÉTÉROGÈNE avec le magnésium car c'est le métal le plus électro-négatif et c'est toujours lui qui se détruit par effet de pile ou couple électrolytique.

## 6.5 Conditions de mise en œuvre.

- 1) Usinage : Très facile, sans lubrification et à des vitesses de coupe très élevées (perçage jusqu'à 200 m/mn), augmentation des angles de dépouille et de dégagement pour faciliter l'évacuation des copeaux.
- 2) Chaudronnage : Difficile à température ambiante (faible plasticité), préférence à chaud entre 270 et 330 °C.
- 3) Soudage : Précautions à prendre contre l'oxydation : chalumeau oxyacétylénique mais avec élimination complète du flux décapant utilisé pour éviter la corrosion. De préférence, souder à l'arc électrique sous gaz neutre (ARGON). Soudage électrique par point ou à la molette.
- 4) Rivetage : Les règles générales sont identiques à celles qui sont appliquées sur les alliages légers, mais il faut éviter la formation de couples électrolytiques dans les assemblages d'alliages différents avec, par exemple :
  - a) Interposition d'une couche isolante (ex : peinture) dans le cas d'un assemblage avec les aciers ou autres alliages.
  - b) Utiliser de préférence des rivets en A-G5 qui ne donne pas lieu à un couple galvanique important avec le magnésium.

## 6.6 Protection contre la corrosion des alliages ultra-légers.

- 1) Mordançage : oxydation chimique réalisant une excellente base d'accrochage pour les peintures et vernis (méthode la plus utilisée)
- 2) Dépôts électrolytiques : dépôt d'une couche de métal (chrome ou manganèse) par voie électrolytique réalisant ainsi une base d'accrochage pour les peintures. Supérieure au mordançage.
- 3) Oxydation anodique : base d'accrochage pour les peintures. Supérieure au mordançage, mais la couche d'oxydes obtenue possède une faible dureté et une grande porosité.
- 4) Graisses et vaselines : protection efficace pour le stockage et les intérieurs de pièces de fonderie.
- 5) Peintures et vernis : leur application doit être précédée d'une oxydation chimique, galvanique, ou électrolytique pour obtenir leur adhérence.
- 6) Revêtements métalliques :
  - par schoopage : dépôt d'une couche d'accrochage de zinc suivi d'une couche intermédiaire de cuivre puis dépôt ensuite des métaux protecteurs tels que nickel, chrome, etc.
  - par métallisation : projection de fines particules de métal fondu sur la surface à protéger.  
Ex. : dépôts d'aluminium ou de duralinox.
- 7) Protection des assemblages : éviter toute formation de couple galvanique, par :
  - les peintures,
  - les enduits spéciaux à base de brai, de goudron, d'asphalte,
  - les isolants solides tels que feutre, amiante, caoutchouc, fibre, etc.

NOTA : Les vis, rivets, rondelles doivent être en duralinox (A-G5) qui ne donne pas lieu à un couple galvanique important avec le magnésium.

## 6.7 Utilisations des alliages de magnésium.

Les caractéristiques mécaniques des alliages de magnésium étant relativement faibles, on les utilise principalement pour leur grande aptitude à la fonderie : grande coulabilité, exempt de microporosités. On obtient ainsi des pièces de fonderie de faible masse volumique alliées à une grande finesse de grains.

Ces avantages doivent rentrer en ligne de compte pour toutes les machines soumises à rotation ou à déplacement à grande vitesse, ou l'élément poids est le facteur dominant. Il en résulte une diminution de l'inertie et des efforts de démarrage ou de freinage.

Principales utilisations :

- a) fonderie :
  - paliers, guignols, jantes de roues, corps de pompe, de carburateur,
  - carcasses et carters de moteurs électriques, magnétos, etc.
- b) corroyage
  - revêtements de structure (hélicoptères) profilés, etc.
  - réservoirs essence,
  - capotages moteurs etc ...

## 7 LE TITANE ET SES ALLIAGES.

### 7.1 Propriétés du titane :

- métal gris acier,
  - masse volumique : 4,5 kg/dm<sup>3</sup>,
  - point de fusion : 1670 °C,
  - mauvais conducteur électrique,
  - mauvais conducteur thermique,
  - à 500 °C il s'oxyde, à 700 °C il se fragilise par les gaz : hydrogène et azote,
  - à 1200 °C il s'enflamme,
  - Il est inoxydable vis-à-vis des agents chimiques et atmosphériques,
  - Les caractéristiques du métal pur sont très intéressantes et équivalentes à celles des aciers mi-doux.
- Exemple de symbolisation T60 → titane à 60 hb de (Rr)t

### 7.2 Les alliages de titane.

Ils sont susceptibles de durcissement superficiel par le carbone et par l'azote, mais néfaste par suite de l'augmentation de la fragilité.

#### 7.2.1 Avantages des alliages de titane :

Ils possèdent un rapport  $\frac{\text{Caractéristiques mécaniques}}{\text{Masse volumique}}$  supérieur aux alliages légers, ultra-légers et même aux meilleurs aciers.

Exemple  $\frac{(Re)t}{\text{Masse Volumique}}$  : G-A6Z3 ≈ 6, A-U4G1 ≈ 11, 30NCD16 ≈ 18, T-A6V ≈ 22

Ils sont plus tenaces que les alliages légers et ultra-légers.

Module d'élasticité :	alliages ultra-légers	≈	4500
	alliages légers	≈	8000
	alliages de TITANE	≈	11000

Ils possèdent une résistance en température d'environ 450 °C à comparer avec celles des alliages légers de 200 à 250 °C et des alliages ultra-légers de 100 à 150 °C.

Ils possèdent une résistance à la corrosion excellente, comparable aux aciers inoxydables) qui peut s'améliorer par la protection des alliages par OXYDATION ANODIQUE.

Ils possèdent de bonnes possibilités de transformation à chaud (450 °C) et un grand allongement (pièces de forgeage, etc.)

#### 7.2.2 Inconvénients des alliages de titane :

Mise en œuvre délicate : affinité avec l'oxygène, l'azote, l'hydrogène à chaud.

Usinage et rectification difficile : mêmes précautions que pour les aciers inoxydables.

Soudage sous Argon ou mieux par bombardement électronique.

Formage à froid difficile : nécessité d'employer des presses très importantes.

Qualité de frottement mauvaise, de par le coefficient de frottement élevé du titane : écaillage – grippage.

#### 7.2.3 Symbolisation des alliages de TITANE.

Identique à celle des alliages légers. Exemple T-A6V6E2, métal de base Titane, suivi des éléments d'addition suivis de leur pourcentage réel et classés par ordre décroissant.

##### 7.2.3.1 Principales familles d'alliages de titane :

Le titane présente deux formes cristallines distinctes :

- une phase α, avant 882 °C, soudable et présentant une bonne résistance à chaud,
- une phase β, au-dessus de 882 °C, malléable et susceptible de mise en solution avec possibilité de durcissement structural.

Les principaux éléments d'addition sont :

- l'ALUMINIUM et l'ÉTAIN qui augmentent l'étendue de la phase  $\alpha$
- le MOLYBDÈNE, le VANADIUM, le CHROME, le FER et le MANGANÈSE qui augmentent l'étendue de la phase  $\beta$

NOTA : Le ZIRCONIUM est l'élément stabilisant du Titane.

### 7.3 Caractéristiques des alliages de Titane

Classe	Appellation	Additifs	État	(Re)t	(Rr)t	A %	Propriétés
Alpha $\alpha$	T-A5E	5 % Al 2,5 % Sn	Recuit	80	90	20	Soudable, bonne tenue à chaud jusqu'à 450 °C.
	T-A6Zr5	6 % Al 5 % Zr 0,5 % Mn		85	99	9	Bonne résistance à chaud jusqu'à 550 °C. Utilisé pour disque de compresseur.
Super $\alpha$ Stabilisant < 2 %	T-A8DV	8 % Al 1 % Mo 1 % V	Recuit	91	100	18	Bonnes caractéristiques à chaud jusqu'à 500 °C.
Alpha Béta $\alpha$ - $\beta$	T-A6V	6 % Al 4 % V	Recuit Traité	90 100	100 110	15 12	Nuance classique de forge et laminage, utilisable jusqu'à 350 °C.
	T-A6V4E2	6 % Al 4 % V 2 % Sn	Recuit Traité	100 115	110 125	12 10	Nuance dérivée du T-A6V à plus haute résistance et trempabilité améliorée.
	T-A7D	7 % Al 4 % Mo	Recuit Traité	90 105	100 115	12 10	Nuance plus résistante que T-A6V. Jusqu'à 450 °C.
Béta $\beta$ métastable	T-D12Zr	11,5 % Mo 6 % Zr 4,5 % Sn	Trempé Traité	75 120	85 130	25 8	Nuance à haute résistance et trempabilité élevée.

NOTA : Les alliages de la classe alpha-béta ( $\alpha$ - $\beta$ ), alliant les propriétés des deux classes - résistance à chaud et traitement thermique - sont les plus utilisés, tant en fonderie qu'en corroyage (ex : T-A6V).

### 7.4 Utilisations des alliages de titane.

Les excellentes caractéristiques mécaniques des alliages de titane, leur résistance à la corrosion et leur bonne tenue en température leur ouvrent un domaine d'application très important dans les industries de pointe, et plus particulièrement en AÉRONAUTIQUE.

Principales utilisations :

- 1) Domaine Aéronautique :  
Cellule : structure et revêtement des avions supersoniques, raidisseurs, ferrures, guignols, boulonnerie des avions subsoniques ; jusqu'à 25 % de la structure.  
Réacteur : Aubages et disques de compresseur, panneaux "nids d'abeille" acoustiques ou thermiques.  
Trains : Pièces forgées, ferrures, etc.
- 2) Domaine Aérospatial : Revêtements des capsules aérospatiales.
- 3) Industrie Militaire : Plaques de blindage, projectiles, etc.
- 4) Industrie Navale : Grande résistance à la corrosion en atmosphère marine. Tubes de chaudière ou de condensateurs, vannes, pales d'hélices, pièces de moteur, revêtements, etc.
- 5) Industrie Automobile : Pièces de voitures de compétition : bras de suspension, bielles, soupapes, etc. Ex : bielles en T-A6V sur MATRA.

### 7.5 Aptitudes technologiques des alliages de titane

Elles dépendent principalement :

- des risques d'oxydation ( $\geq 500$  °C) ou de fragilisation par les gaz ( $\geq 700$  °).
- des risques de grippage, de par les mauvaises propriétés de frottement du titane.

En conséquence, il est nécessaire de pratiquer des coulées sous vide pour la fonderie, de ne jamais provoquer d'élévation importante de température pour l'usinage, de réduire au maximum le frottement et d'utiliser des lubrifiants spéciaux pour éviter le grippage (Huiles sulfochlorées).

NOTA : On peut remédier au grippage par graphitage des alliages de titane.

Dans les réalisations hétérogènes se rappeler que le titane présente des phénomènes de corrosion électrolytique importants s'ils sont associés aux alliages légers.

## 7.6 Travail des alliages de titane.

- 1) Le perçage :

Le perçage du titane est une opération délicate qui demande des outils bien adaptés, une machine rigide et un bon refroidissement. On utilisera des forets en acier rapide au cobalt ou au molybdène. Ils seront le plus court possible, donc rigides.

L'angle de pointe pourra varier de 90 à 140 degrés en fonction du diamètre du trou. Pour le perçage des tôles, l'angle sera compris entre 110 et 130°.

La dépouille sera de 9 à 10 degrés pour perçage dans la masse. Pour le perçage des tôles, elle pourra être portée à 12 ou 15 degrés.

La vitesse de coupe sera de quelques mètres par minute pour les alliages les plus durs ; elle pourra atteindre jusqu'à 20 m/mn pour le titane non allié.

L'avance doit être constante pour ne pas entraîner une usure rapide des lèvres de coupe ; elle est de l'ordre de 0,05 à 0,1 mm par tour pour les petits diamètres et de 0,1 à 0,2 mm pour les grands diamètres.

Lubrifier avec des huiles sulfochlorées ou huiles de coupe usuelles.
- 2) L'alésage :

On utilise des alésoirs en acier rapide avec vitesse de coupe de l'ordre de 5 à 10 m/mn ou des alésoirs à lames de carbure, avec vitesse de coupe de l'ordre de 50 m/mn. Lubrifier avec des huiles sulfochlorées.

L'avance est de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm par tour.

Utiliser de préférence des alésoirs à lames hélicoïdales.
- 3) Le taraudage : C'est l'opération d'usinage la plus difficile.
  - Il est indispensable de tarauder des trous bien alésés et possédant un bon état de surface,
  - Le taraud doit assurer un bon dégagement des copeaux. On prendra des outils à deux lèvres pour des diamètres inférieurs à 6 mm et à 3 lèvres pour les diamètres supérieurs,
  - Il faut assurer une bonne lubrification pendant le travail : utiliser des huiles sulfochlorées ou même mieux des graisses pour le taraudage.
- 4) Le soudage :
  - 4.1 Soudage à l'arc sous argon :

Le titane et les alliages alpha sont soudables, mais il est nécessaire d'assurer la protection contre l'air, l'azote, l'hydrogène de toute zone du métal où la température est supérieure à 400-500 °C. Pour cela, on fait appel à un gaz neutre, comme l'argon par exemple.

Deux solutions sont possibles :

    - Soudage en caisson rigide ou souple,
    - Soudage avec traînard.

a) Soudage en caisson : Ce mode de soudage convient très bien à des travaux répétés. La soudure est effectuée sous légère surpression d'argon après 2 ou 3 cycles successifs de mise sous vide et sous argon.

b) Soudage avec traînard : Cette technique nécessite, pour assurer la protection : une buse d'arrivée d'argon qui entoure l'électrode ; un traînard en arrière de la torche ; à l'envers de la soudure, un second traînard. Ces traînards sont alimentés en argon et doivent assurer une arrivée non turbulente du gaz sur le cordon de soudure.

De bons résultats sont obtenus par les deux méthodes à condition que la propreté de l'ébauche et le cas échéant du fil d'apport, soit très bien assurée.

c) Contrôle et qualité des soudures : Le premier contrôle consiste en un examen soigné de la soudure : celle-ci doit avoir un aspect métallique brillant ; Un aspect jaune indique une légère oxydation en général non préjudiciable à la qualité de la soudure ; une oxydation de teinte bleue ou des traces blanchâtres indiquent une soudure défectueuse.
  - 4.2 Soudage par résistance (par points) :

Le soudage par résistance s'applique très bien au titane. Du fait des conductibilités électriques et thermiques faibles du titane qui entraînent un échauffement rapide et localisé et d'autre part de la pression exercée par l'électrode qui assure un bon rapprochement des tôles, le soudage par résistance peut s'effectuer en atmosphère normale.
  - 4.3 Soudage par bombardement électronique :

Ce procédé de soudage est très attractif pour le titane. Il présente deux avantages : forte pénétration d'où la possibilité de souder des pièces de forte épaisseur par un chauffage très localisé ; zone affectée réduite.

## 8 La corrosion et les moyens de protection.

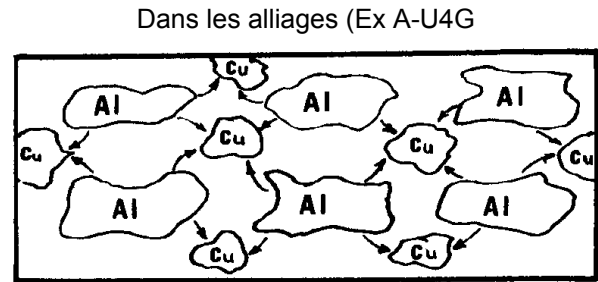
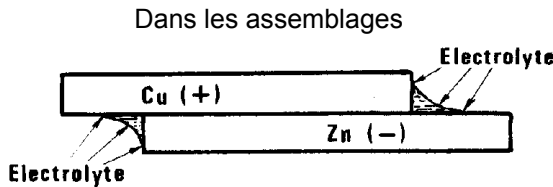
La corrosion est l'attaque lente et progressive du métal par des agents chimiques ou atmosphériques entraînant sa destruction dans le temps.

On distingue la corrosion chimique qui est la transformation uniforme ou localisée du métal en oxydes ou sels métalliques et la corrosion galvanique

### 8.1 La corrosion électrolytique ou galvanique.

Phénomène de pile en court-circuit, qui peut se former dans les assemblages de métaux à potentiel électrochimique différent et mis en présence d'un électrolyte : humidité, eau, sels en dissolution, etc. Cette corrosion entraîne la destruction progressive de l'élément le plus électro-négatif.

Exemples de corrosion électrolytique.

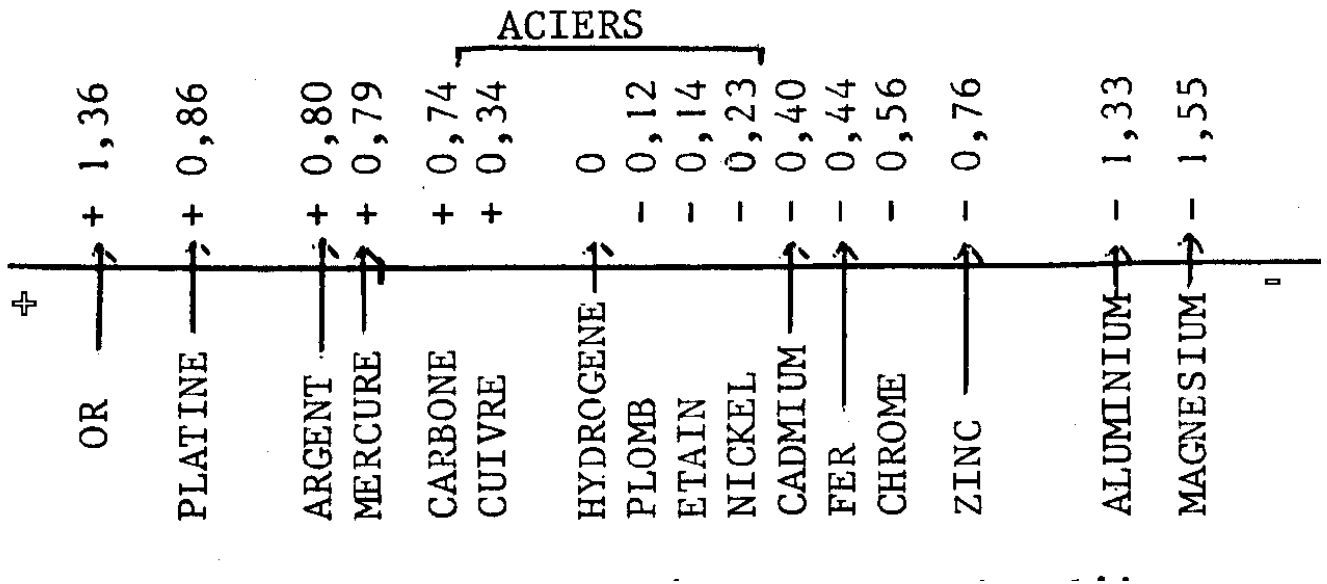


Destruction progressive de la pièce la plus électro-négative.

Destruction progressive de l'alliage par corrosion inter-cristalline ou intergranulaire.

### 8.2 Tableau des potentiels électrochimiques des métaux.

Le tableau ci-dessous permet de mieux comprendre l'importance de la corrosion électrolytique (galvanique) dans certaines réalisations hétérogènes – assemblages ou alliages.



### 8.3 Moyens de protection.

On distingue :

- 1) Les protections chimiques (couche primaire).

Création d'une couche de sels métalliques neutres parfaitement adhérente, réalisant ainsi une base d'accrochage pour une peinture ultérieure :

- ACIERS : phosphatation, bain anti-rouille, parkérisation, bondérisation,
- ALLIAGES LÉGERS : Pyrimpro, alodisation (bain d'alodine),
- ALLIAGES ULTRA-LÉGERS : mordantage (ou acide sélénieux).

- 2) Les peintures :

- a) À l'huile de lin : mélange d'huile de lin, d'essence de térébenthine et de colorant, le durcissement est obtenu par polymérisation de l'huile de lin au contact de l'oxygène.
- b) Glycérophtaliques : même composition que la peinture à l'huile de lin mais addition de résine qui augmente la tension et la dureté de la peau.
- c) Cellulosiques : résines à base de cellulose + acétone ; le durcissement est obtenu par évaporation du solvant (très facile à déposer au pistolet).
- d) Synthétiques : mélange de résines à base des matières plastiques le durcissement est obtenu à l'aide d'un produit complémentaire appelé DURCISSEUR. Les "POLYURÉTHANES" et les "EPOXY" (Epikote) ; souplesse et dureté exceptionnelles.

- 3) Les oxydations électrolytiques – oxydation anodique ou anodisation.

Création de couches d'oxydes poreuses, sur la pièce placée à l'anode. Ce procédé est très intéressant pour les alliages dont l'oxydation est auto protectrice.

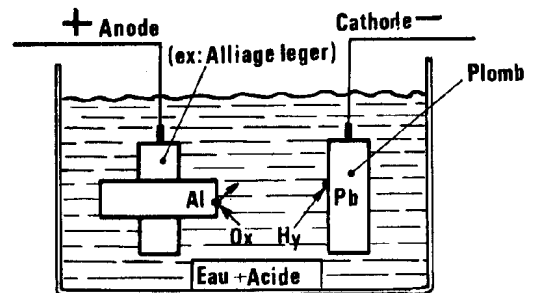
- ALLIAGES LÉGERS : après colmatage des couches poreuses à l'eau chaude, obtention d'une couche protectrice très dure et résistante,
- ALLIAGES ULTRA-LÉGERS : meilleure base d'accrochage que le mordantage,
- ALLIAGES DE TITANE : après graphitage des couches poreuses, amélioration des propriétés de frottement avec moins de risque de grippage.

Principe de réalisation :

Sous l'effet du passage du courant électrique, il y a :

- Formation de couches successives d'oxydes poreux : dissolution + oxydation + claquage,
- Coloration interne par immersion de la pièce dans un colorant très capillaire,
- Colmatage des couches poreuses par immersion de la pièce dans l'eau bouillante.

Le resserrage des pores sur le colorant entraîne une parfaite étanchéité et permet à la pièce de conserver son bel aspect.

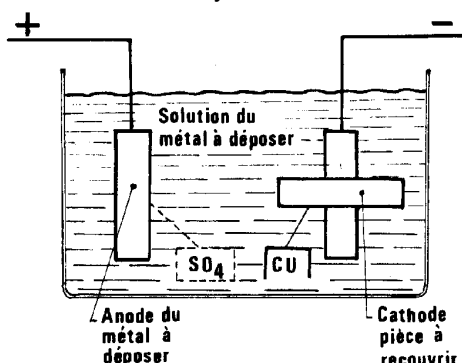


- 4) Les métallisations – Dépôt d'un métal protecteur.

a) par bains : ÉTAMAGE (dépôt d'étain) ; GALVANISATION (dépôt de zinc).

b) par fours : SHERARDISATION (cémentation par le zinc) ; ALUMINAGE (cémentation par l'aluminium) ; CHROMISATION (cémentation par le chrome).

c) Par projection : Après sablage préalable, Schoopage : possibilité de protéger n'importe quel métal même à bas point de fusion ; Plasma, possibilité de projeter des métaux réfractaires, leurs carbures et même leurs oxydes.



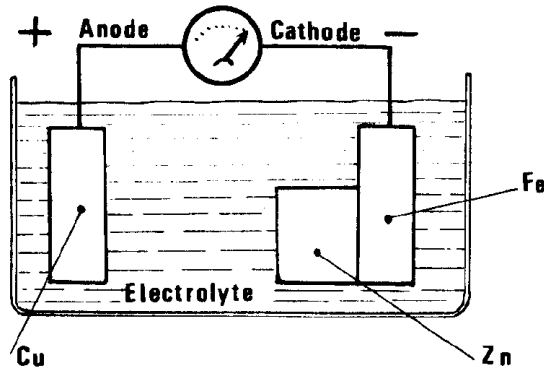
e) Par dépôts électrolytiques (anode soluble) : possibilité de déposer de nombreux métaux protecteurs (nickelage, cuivrage, chromage, etc.). Bel aspect et meilleur accrochage au niveau de la cristallisation.

Principe :

Sous l'effet du passage du courant, il y a déséquilibre de l'électrolyte qui se dépose à la cathode et se recharge à l'anode, de ce fait par l'intermédiaire de l'électrolyte, le métal placé à l'anode vient recouvrir la pièce à protéger placée à la cathode.

## 8.4 Protection des réalisations hétérogènes.

a) Protection cathodique :



Adjonction d'une électrode encore plus électronégative pour dériver l'effet de pile.

Très utilisé lorsque le contact est réalisé par l'électrolyte ;  
ex : protection des coques de poteaux ou des réalisations souterraines ou sous-marines.

b) Galvanoplastie : Isolation des métaux en contact par projection de matières plastiques : polyuréthanes, epoxy, PVC, etc. Ex : réservoirs, citernes.

c) Isolation locale telle que peinture, vernis, caoutchouc, etc.

NOTA : Pour les alliages avec risques de corrosion inter cristalline, on préfère utiliser des alliages à faible différence de potentiel tel que le DURALINOX ou alors, il faut isoler l'alliage du milieu ambiant (électrolyte) par peinture, placage, métallisation, oxydation anodique, etc.

## 9 Index

- Acier.....3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 24, 27, 29  
 Aciers6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 24, 26, 27, 31, 35  
 Aciers courant ..... 6, 7, 35  
 Aciers faiblement alliés ..... 8, 9, 13, 15, 35  
 Aciers fins ..... 7, 8  
 Aciers fortement alliés..... 8  
 Demi-doux..... 6, 7, 8, 12  
 Demi-dur ..... 6, 7, 8  
 Extra-doux..... 6, 7  
 Extra-dur ..... 6, 8, 9, 11  
 Inoxydable..... 10, 13, 27  
 Maraging ..... 13, 35  
 Réfractaires..... 13, 15, 16, 31, 35  
 Rene..... 15
- Alliage  
 Almasilium..... 18, 20  
 Alpax ..... 18, 35  
 Duralinox ..... 18, 20, 26, 32, 35  
 Duralumin..... 18, 20  
 Duralumins ..... 18, 35  
 Hafnium..... 17  
 Inconel..... 15  
 Monel ..... 14, 15  
 Nimonic ..... 15  
 Zicral ..... 20  
 Zicrals..... 18, 35
- Carbone  
 Carbone . 1, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 27, 35
- Céramique  
 Cermets ..... 16
- Chimie  
 Corps composés ..... 1  
 Corps simples ..... 1  
 Masse volumique ..... 1, 18, 25, 26, 27
- Corrosion  
 Électronégatif ..... 25, 30  
 Oxydation... 5, 16, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32
- Essai ..... 2, 3, 4, 35  
 Brinell ..... 3  
 Diagramme de Roozeboom ..... 11, 35  
 Dureté1, 3, 5, 6, 12, 13, 14, 16, 19, 21, 24, 26, 31, 35  
 Éprouvette..... 2, 3, 4  
 Essai de résilience ..... 4, 35  
 Essai de traction ..... 2, 35  
 Limite élastique ..... 2, 3, 6, 15, 18, 25  
 Module de Young ..... 3  
 Mouton ..... 4  
 Mouton de Charpy ..... 4  
 Résilience ..... 1, 4, 6, 10, 12  
 Rupture ..... 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13  
 Striction ..... 2  
 Vickers ..... 3  
 Vieillessement ..... 5, 19, 21
- État  
 Austénite ..... 11, 14  
 Austénitiques ..... 14, 15, 16  
 Cémentite ..... 11  
 Décohésion ..... 2  
 États de livraison..... 19, 35  
 Eutectique ..... 11  
 Eutexie ..... 11  
 Fibrage..... 5, 24  
 Fonderie..... 1, 5, 15, 18, 22, 25, 26, 28  
 Perlite..... 11  
 Poudres ..... 16  
 Recristallisation..... 22  
 Symbolisation ..... 7, 8, 14, 19, 20, 27, 35, 36
- Gaz  
 Argon ..... 1, 26, 27, 29
- Métal  
 Aluminium1, 5, 8, 9, 13, 15, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 28, 31, 35, 36  
 Antimoine ..... 5  
 Argent ..... 1, 5, 25  
 Beryllium ..... 5  
 Bore ..... 1, 5, 15, 16  
 Cadmium ..... 5  
 Chrome5, 6, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 26, 28, 31, 35  
 Cobalt ..... 5, 8, 13, 15, 16, 29, 35  
 Cuivre ..... 1, 5, 14, 15, 18, 19, 20, 26, 35  
 Étain..... 5, 28, 31  
 Fer ..... 1, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 28, 35  
 Fontes..... 6  
 Magnésium ..... 5, 15, 18, 19, 20, 25, 26, 35, 36  
 Manganèse ..... 5, 6, 9, 10, 14, 19, 26, 28  
 Mercure..... 5  
 Molybdène1, 5, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 28, 29, 35  
 Nickel ..... 1, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 26, 35  
 Niobium ..... 5  
 Or ..... 5  
 Platine..... 5  
 Plomb..... 5, 24  
 Silicium ..... 1, 5, 6, 9, 16, 18, 19, 20, 35  
 Tantale..... 5, 15, 16, 17  
 Ténacité ..... 1, 6  
 Titane..... 6, 14, 15, 16, 27, 28, 29, 31, 36  
 Tungstène..... 6, 8, 10, 15, 16, 17  
 Uranium ..... 6  
 Vanadium..... 6, 9, 13, 14, 15, 28  
 Zinc ..... 1, 6, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 31, 35  
 Zirconium ..... 6, 15, 16, 25, 28
- Oxyde  
 Alumine..... 16, 18  
 Borures ..... 16  
 Carbures ..... 6, 16, 31  
 Ferrite ..... 11  
 Nitrures ..... 16  
 Oxydes..... 16, 26, 30, 31
- Résistance  
 A % ..... 3, 6, 7, 9, 10, 14, 22, 23, 28  
 Allongement..... 1, 3, 7, 18, 23, 25, 27  
 Criques ..... 12, 18, 23  
 Déformation1, 2, 5, 9, 14, 15, 18, 20, 23, 35, 36  
 Ductilité ..... 1, 6, 10, 16, 23, 24  
 Élasticité ..... 1, 2, 3, 27  
 Endurance ..... 1, 15  
 Fluage ..... 5, 13, 15, 16, 25  
 Fluidité ..... 1, 18, 25  
 Grippage ..... 12, 27, 28, 31  
 Inoxydabilité..... 8, 13, 14

Magnétisme .....	1, 4	Maturation .....	21, 22, 35
Malléabilité .....	6, 18, 20, 22	Métallisation .....	5, 26, 32
Plasticité .....	1, 2, 6, 18, 23, 26	Mordançage .....	26, 31
Résistance1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 25, 27, 28, 29, 35		Nickelage .....	24, 31
Résistance à la corrosion... 1, 13, 15, 18, 27, 28		Nitruration .....	5, 9, 12, 13
Résistance de rupture .....	3	Oxydation anodique .....	24, 26, 27, 31, 32
Soudabilité .....	6, 7, 13, 18	Parkérisation .....	31
Trempabilité .....	6, 28	Phosphatation .....	31
Symbolisation		Protal .....	24
Alcoa .....	19, 35	Recuit... 7, 10, 12, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 28	
Traitement		Restauration .....	22
Alodine .....	24, 31	Revenu .....	9, 10, 12, 19, 21, 22
Alodisation .....	31	Schoopage .....	5, 24, 26, 31
Aluminage .....	31	Sherardisation .....	31
Anodisation .....	24, 31	Sulfunisation .....	12
Argentage .....	24	Traitements4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 19, 20, 22, 24, 35, 36	
Bondérisation .....	31	Traitements chimico-thermiques .....	12, 35
Bonderite .....	24	Traitements thermiques5, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 19, 20, 22, 35	
Brillantage .....	24	Trempe .....	5, 8, 12, 19, 21, 22, 23, 24
Cadmiage .....	24	Trempe douce .....	12
Carbonituration .....	5	Trempe fraîche .....	21, 23
Cémentation .....	5, 9, 12, 31	Trempe normale .....	12
Chaudronnage .....	1, 2, 18, 26	Trempe vive .....	12
Chromage .....	5, 24, 31	Zingage .....	24
Chromisation .....	5, 31	Usinage	
Coalescence .....	22	Alésage .....	14, 29
Cuivrage .....	24, 31	Corroyage .....	15, 18, 22, 25, 26, 28, 36
Décapage .....	14, 24, 25	Filetage .....	24
Dégraissage .....	24, 25	Forgeage .....	13, 14, 24, 25, 27, 36
Écrouissage .....	5, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 22, 23	Huiles sulfochlorées .....	28, 29
Électrolytiques .....	5, 24, 26, 31	Laminage .....	5, 28, 36
Frittage .....	16	Lime .....	24
Fritter .....	16	Perçage .....	14, 24, 26, 29
Galvanisation .....	31	Pliage .....	23, 36
Galvanoplastie .....	32	Polissage .....	24
Graphitage .....	28, 31	Rivetage .....	14, 26
Grenillage .....	5, 13	Sablage .....	5, 24, 31
Hypertrempe .....	13, 14	Sciage .....	24
Iridite .....	24	Soudage .....	14, 16, 25, 26, 27, 29
Malléabilisation .....	12	Taroudage .....	14, 24, 29
Matriçage .....	24, 36		

TABLE DES MATIÈRES

1	Avertissement.....	1
2	Propriétés des matériaux.....	1
2.1	Les propriétés physiques.....	1
2.2	Les propriétés mécaniques (ou aptitudes technologiques).....	1
2.3	Les propriétés chimiques.....	1
3	PRINCIPAUX ESSAIS MÉCANIQUES.....	2
3.1	Essai de traction.....	2
3.2	Essais de dureté (H).....	3
3.3	Essai de résilience (résistante aux chocs).....	4
3.4	Facteurs de variations des caractéristiques mécaniques.....	5
3.5	Désignation des principaux métaux et métalloïdes.....	5
4	Les ACIERS (Alliages FER + CARBONE).....	6
4.1	Généralités.....	6
4.2	Caractéristiques des aciers courants non alliés.....	6
4.2.1	Symbolisation des aciers non alliés.....	7
4.2.2	Tableau des aciers courants non alliés.....	7
4.3	Les aciers alliés.....	8
4.3.1	Symbolisation des aciers alliés.....	8
4.3.2	Tableau des aciers faiblement alliés.....	9
4.3.3	Tableau des aciers fortement alliés.....	10
4.4	Traitements thermiques des aciers.....	11
4.4.1	Points de transformation des aciers selon le diagramme de ROOZEBOOM.....	11
4.4.2	Intérêt du diagramme et renseignements obtenus.....	11
4.4.3	Types de traitements.....	12
4.4.4	Les traitements thermiques.....	12
4.4.5	Les traitements chimico-thermiques.....	12
4.5	Les aciers aéronautiques.....	12
4.5.1	Aciers faiblement alliés à haute résistance.....	13
4.5.2	Aciers maraging : (à 18 % de nickel + cobalt + molybdène).....	13
4.5.3	Les aciers inoxydables au CHROME NICKEL.....	13
4.5.4	Principaux aciers inoxydables au Chrome-Nickel.....	14
4.5.5	Mise en œuvre des aciers inoxydables.....	14
4.6	Les aciers et matériaux réfractaires.....	15
4.6.1	Propriétés des alliages réfractaires.....	15
4.6.1.1	Les alliages de nickel.....	15
4.6.1.2	Les alliages de cobalt.....	15
4.6.1.3	Quelques aciers réfractaires.....	15
4.6.1.4	Les céramiques.....	16
4.6.1.5	Alliages réfractaires récents.....	16
4.6.1.6	Résistance mécanique des principaux alliages face à la température.....	17
5	L'ALUMINIUM et ses ALLIAGES.....	18
5.1	Propriétés de l'aluminium :.....	18
5.2	Principaux alliages.....	18
5.2.1	Les ALPAX (Famille aluminium + silicium).....	18
5.2.2	Les DURALUMINS (Famille aluminium + cuivre).....	18
5.2.3	LES ZICRALS (Famille aluminium + zinc).....	18
5.2.4	LES DURALINOX (famille Aluminium + Magnésium).....	18
5.3	Symbolisation de l'aluminium et de ses alliages.....	19
5.3.1	Symbolisation chimique française :.....	19
5.3.2	Symbolisation chimique américaine (code ALCOA).....	19
5.3.3	Symbolisation des modes d'obtention et états de livraison.....	19
5.3.4	Correspondances de symbolisation des principaux alliages.....	20
5.4	Traitements thermiques des alliages légers.....	20
5.4.1	Généralités.....	20
5.4.2	5.4.2. Principaux Paramètres influençant les traitements thermiques.....	20
5.4.2.1	Température de mise en solution.....	20
5.4.2.2	Durée de la mise en solution.....	20
5.4.2.3	Influence de la vitesse de refroidissement.....	21
5.4.2.4	Phénomène de maturation.....	21
5.4.2.5	Les différents traitements thermiques des alliages légers.....	22
5.5	Caractéristiques des principaux alliages.....	22
5.5.1	Comparaison des diagrammes de traction des principaux alliages.....	23
5.5.2	Aptitude à la déformation des alliages légers.....	23

5.5.3	Rayon de pliage des alliages légers.....	23
5.6	Mise en œuvre des alliages légers.....	23
5.6.1	Mise en forme.....	23
5.6.2	Forgeage – matriçage.....	24
5.6.3	Usinage.....	24
5.6.4	CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'USINAGE.....	24
5.7	Traitements de surface des alliages d'aluminium.....	24
5.8	Revêtements protecteurs des alliages d'aluminium.....	24
6	Le MAGNÉSIUM ET les ALLIAGES ULTRA-LÉGERS.....	25
6.1	Propriétés du magnésium.....	25
6.2	Les alliages de magnésium.....	25
6.3	Caractéristiques des principaux alliages.....	25
6.4	Aptitudes technologiques des alliages de magnésium.....	25
6.5	Conditions de mise en œuvre.....	26
6.6	Protection contre la corrosion des alliages ultra-légers.....	26
6.7	Utilisations des alliages de magnésium.....	26
7	LE TITANE ET SES ALLIAGES.....	27
7.1	Propriétés du titane :.....	27
7.2	Les alliages de titane.....	27
7.2.1	Avantages des alliages de titane :.....	27
7.2.2	Inconvénients des alliages de titane :.....	27
7.2.3	Symbolisation des alliages de TITANE.....	27
7.2.3.1	Principales familles d'alliages de titane :.....	27
7.3	Caractéristiques des alliages de Titane.....	28
7.4	Utilisations des alliages de titane.....	28
7.5	Aptitudes technologiques des alliages de titane.....	28
7.6	Travail des alliages de titane.....	29
8	La corrosion et les moyens de protection.....	30
8.1	La corrosion électrolytique ou galvanique.....	30
8.2	Tableau des potentiels électrochimiques des métaux.....	30
8.3	Moyens de protection.....	31
8.4	Protection des réalisations hétérogènes.....	32
9	Index.....	33

---

<sup>i</sup> Corroyage : Ensemble d'opérations consistant à écraser à chaud des barres métalliques ou des tôles par laminage, martelage ou forgeage ; le métal est ainsi homogénéisé. Pendant la déformation, si une dimension géométrique diminue, les deux autres augmentent, à cause de l'invariabilité du volume. Par définition, on appelle *taux de corroyage* le rapport de la section initiale sur la section finale du produit obtenu. L'accroissement du taux de corroyage améliore certaines propriétés mécaniques des matériaux, mais en amoindrit d'autres. Ces évolutions varient aussi avec la direction du corroyage.