

Aide-Mémoire de Matériaux

—

Matériaux Métalliques

Frédéric Menan

<https://lesdocsduprof.com/>

fmenan@cesi.fr

2023

Table des matières

1	INTRODUCTION	4
2	LES FAMILLES DE MATERIAUX METALLIQUES	5
2.1	LES ACIERS	5
2.2	LES ACIERS INOXYDABLES	5
2.3	LES FONTES	6
2.4	LES ALLIAGES D'ALUMINIUM	7
2.5	LES ALLIAGES DE TITANE [6].....	9
2.6	LES ALLIAGES DE ZINC	9
2.7	LES ALLIAGES DE CUIVRE	10
2.8	LES ALLIAGES DE MAGNESIUM.....	10
2.9	LES ALLIAGES DE NICKEL	10
2.10	LES SUPERALLIAGES.....	10
2.11	INTERMETALLIQUES [7]	10
2.12	COÛTS COMPARATIFS [8].....	12
3	PROPRIETES DES MATERIAUX METALLIQUES.....	13
3.1	GENERALITES.....	13
4	RELATIONS MICROSTRUCTURE – PROPRIETES MECANQUES.....	14
4.1	LIMITE D'ELASTICITE ET DEFORMATION PLASTIQUE	14
2	AUGMENTATION DE LA LIMITE D'ELASTICITE : DURCISSEMENT.....	16
4.2	RUPTURE	19
5	LES ACIERS : LE SYSTEME FE-C.....	21
1	POURQUOI DU CARBONE ?	21
2	NOTION DE DIAGRAMME STABLE ET METASTABLE	21
3	DESCRIPTION DU DIAGRAMME METASTABLE Fe-Fe ₃ C	21
6	CINETIQUE DES TRANSFORMATIONS DE PHASES.....	25
6.1	THERMODYNAMIQUE DES TRANSFORMATIONS DE PHASES	25
6.2	TRANSFORMATIONS DE PHASES DIFFUSIVES ET DISPLACIVES.....	25
4	ANALYSE QUANTITATIVE DES EVOLUTIONS	26
7	TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS.....	31
7.1	TREMPE REVENU	31
7.2	RECUITS	33
8	ALLIAGES D'ALUMINIUM	36
8.1	INTRODUCTION	36
8.2	PROPRIETES DE L'ALUMINIUM.....	36
8.3	ALLIAGES D'ALUMINIUM POUR CORROYAGE.....	36
5	DURCISSEMENT DES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE CORROYAGE.....	37
8.4	LIENS UTILES.....	41
9	MATERIAUX METALLIQUES POUR L'EMBALLAGE.....	42
9.1	GENERALITES.....	42
9.2	ACIERS POUR L'EMBALLAGE	43
9.3	ALLIAGES D'ALUMINIUM POUR L'EMBALLAGE	44
9.4	DU MINERAL AUX BANDES D'ACIER ET D'ALUMINIUM	45
10	MATERIAUX METALLIQUES POUR L'EMBALLAGE PARTIE 2	48
10.1	MISE EN ŒUVRE DES BANDES : FABRICATION DES EMBALLAGES.....	48
10.2	REVETEMENT ET PROTECTION [27]	54
10.3	POUR ALLER PLUS LOIN.....	55

11	CORROSION DES MATERIAUX METALLIQUES	56
11.1	DEFINITIONS.....	56
11.2	CORROSION DES MATERIAUX METALLIQUES	56
11.3	CORROSION AQUEUSE (PAR VOIE HUMIDE)	56
11.4	CORROSION SOUS CONTRAINTE (CSC).....	64
11.5	FATIGUE CORROSION.....	66
11.6	PROTECTION ET LUTTE CONTRE LA CORROSION AQUEUSE.....	66
11.7	CORROSION PAR VOIE SECHE (OXYDATION A CHAUD)	68
11.8	FRAGILISATION PAR L'HYDROGENE	68
11.9	LIENS UTILES.....	69
12	SOUDAGE DES MATERIAUX METALLIQUES	70
12.1	DEFINITIONS.....	70
12.2	PHENOMENES PHYSIQUES, MECANQUES, THERMIQUES EN SOUDAGE	71
12.3	L'OPERATION DE SOUDAGE.....	71
12.4	PROCEDES DE SOUDAGE PAR FUSION LOCALE DES PIECES A ASSEMBLER.....	72
12.5	PROCEDES DE SOUDAGE EN PHASE SOLIDE	78
12.6	PROCEDES DE BRASAGE	80
12.7	CRITERES DE CHOIX D'UN PROCEDE	81
12.8	SOUDABILITE DES ACIERS NON ET FAIBLEMENT ALLIES.....	81
12.9	LIENS UTILES.....	84
12.10	LEXIQUE ANGLAIS/FRANÇAIS.....	84
13	REFERENCES.....	85

1 Introduction

Ce tome II aborde les matériaux métalliques. Une extension est proposée sur les matériaux métalliques pour l'emballage.

Je présente par avance mes excuses à tous les auteurs dont j'ai pu utiliser des figures et que j'aurais oublié de citer. Certains chapitres de ce texte ont été rédigés il y a longtemps et démarrés sur des Powerpoint dont les crédits photos se sont parfois perdus en route. J'essaie en tout cas de citer l'ensemble de mes sources dans les références en fin de document. Si j'ai oublié de vous citer vous pouvez m'envoyer un mail fmenan@cesi.fr et je corrigerai le document.

Pour toute info ou remarque : fmenan@cesi.fr



2 Les familles de matériaux métalliques

2.1 Les aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone (moins de 2.1% de carbone).

2.1.1 Désignation symbolique (NF EN 10027-1)

[1]

Exemple : E360 → La lettre désigne l'emploi (construction mécanique, appareil à pression...). 360 désigne la propriété mécanique garantie (Re en général)

2.1.2 Désignation par composition chimique (NF EN 10020)

[2]

Aciers non alliés : Exemple : C60 → C : carbone. 60 : % carbone x100

Aciers faiblement alliés : Exemple : 42CrMo4 → 42 : % carbone x100 ; CrMo4 : Symboles chimiques éléments d'alliage puis teneurs en % coefficientées

Élément chimique	Coefficient multiplicatif
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Ti, V, Pb, Ta	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Aciers fortement alliés

Exemple : X6CrMo17-1 → 6 : % carbone x100 ; CrMo17-1 : Symboles chimiques éléments d'alliage puis teneurs en % NON coefficientées

Aciers à outils (= aciers rapides)

Exemple : HSXX-XX-XX-XX → 4 nombres séparés par « - » égaux aux % de W, Mo, V, Co

1.1 Désignation numérique (NF EN 10027-2)

[3]

Exemple : 1.4510 → 1 : acier ; 45 : groupe d'acier ; 10 : nuance

2.2 Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au moins 10-12% de chrome.

La formation spontanée à l'air d'une couche protectrice d'oxyde de chrome (qqes nm d'épaisseur) permet une très bonne résistance à la corrosion uniforme.

Aciers inoxydables : composition, propriétés mécaniques et exemples d'utilisation

Nomenclature SAE/AISI	Composition moyenne				État	Propriétés mécaniques			Propriétés générales et exemples d'utilisation
	C	Cr	Ni	Divers		$R_{0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	
<i>Martensitiques</i>									
410	< 0,15	2,5	-	-	trempé et revenu à 400 °C	700	1000	20	Utilisation générale ; arbres de pompes, quincaillerie, visserie Bonne trempabilité ; ressorts, calibres, ciseaux Dureté élevée ; coutellerie, instruments chirurgicaux, soupapes
410	> 0,15	13	-	-		1375	1760	10	
440-B	0,75 à 0,95	17	-	-		1900	1950	3	
<i>Ferritiques</i>									
405	< 0,08	13	-	0,2 Al	recuit	275	450	25	Réfractaire ; industries pétrochimiques Bonne résistance à l'acide nitrique ; utilisation générale ; industrie alimentaire et architecture Bonne résistance à la corrosion et à l'écaillage à haute température ; réfractaire
430	< 0,12	17	-	-		345	650	25	
446	< 0,20	25	-	< 0,25 N		350	560	20	
<i>Austénitiques</i>									
301	< 0,15	17	7	-	recuit	275	750	50	Forte consolidation ; industrie automobile, wagons Industries chimiques et alimentaires ; construction Résistance améliorée en milieux chlorés grâce au molybdène Nuance L à bas carbone (soudabilité) Bonne tenue jusqu'à 850 °C ; industries chimiques, aéronautique
304	< 0,08	19	9	-		250	580	55	
316	< 0,08	17	12	2,5 Mo		290	580	50	
316-L	< 0,03	17	12	2,5 Mo		260	550	50	
347	< 0,08	18	11	Nb ou Ta $\geq 10 \times (\% \text{ C})$		275	655	45	
<i>À durcissement par précipitation</i>									
361 (17-7PH)	0,09	17	7	1,2 Al	vieilli	1550	1650	6	Excellentes propriétés mécaniques ; structures d'avions

Tableau 1. Aciers inoxydables

2.3 Les fontes

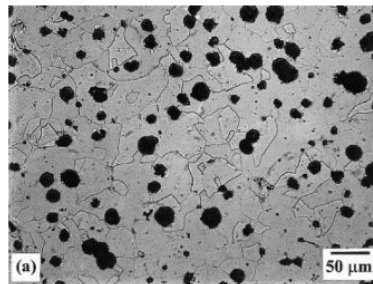


Figure 1. Fontes GS52 [4]

Définition : Fe avec plus de 2% de Carbone

Types de fontes

- Fontes blanches (phase $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) : pièces d'usure
- Fontes grises : carbone précipité sous forme de graphite. Fontes grises à graphite lamellaire (fragiles) ; Fontes grises à graphite sphéroïdal : pièces de structure
- Fontes alliées : Cu et Ni augmentent R_m et Hv, Cr : augmente tenue à chaud, Mo : augmente trempabilité. Coût élevé

Propriétés

- Bonnes aptitudes au moulage, usinage, amortissement vibrations
- basse T°C fusion (finissent leur solidification au palier eutectique 1150°C)

- Bon coefficient de frottement
- Bonne résistance à l'usure
- Difficiles à souder
- Faible résistance aux chocs (fragiles)

2.4 Les alliages d'aluminium

2.4.1 Alliages d'aluminium pour corroyage

Les alliages d'aluminium pour corroyage regroupent tous les alliages d'aluminium destinés à être mis en œuvre par déformation plastique (laminage, forgeage, emboutissage). Ces alliages sont regroupés par familles, ou séries, différenciées par leur principal élément d'alliage.

Désignation : EN AW 2024 – T351

AW : aluminum wrought ; 2000 : famille ; 24 : nuance (pour les 2XXX à 8XXX) ou % d'alu après 99% pour les 1XXX ; T : Etat métallurgique ; 351 : Traitement thermomécanique subi

Série	Principal élément d'alliage	Utilisation
1000	Aucun. Au moins 99% d'aluminium	Emballage, électricité
2000	Cuivre Cu	Aéronautique
3000	Manganèse Mn	Emballage
4000	Silicium Si	
5000	Magnésium Mg	Emballage, transport routier et ferroviaire
6000	Magnésium et Silicium	transport routier et ferroviaire, Aéronautique
7000	Zinc	Aéronautique
8000	Autres	Emballage, Aéronautique

États métallurgiques des alliages d'aluminium de corroyage : cinq états fondamentaux

F : état brut de livraison : ce symbole s'applique aux produits fabriqués par déformation plastique sans que soient particulièrement maîtrisés les taux de durcissement ou d'adoucissement par déformation ou traitement thermique éventuel.

O : état recuit : c'est l'état le plus ductile. Il est généralement obtenu par le traitement dit de recuit, ce traitement n'étant suivi d'aucun écrouissage même par planage ou dressage.

H : état écroui et éventuellement partiellement adouci : ce symbole s'applique aux produits durcis par déformation avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel du métal.

W : état trempé non stabilisé : c'est un état métallurgique instable : il s'applique aux alliages qui ont subi une mise en solution suivie de trempe et qui continuent d'évoluer à la température ambiante.

T : état durci par traitement thermique : les traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou partie des traitements de mise en solution, trempe, maturation, revenu avec application éventuelle de déformations plastiques.

2.4.2 Alliages d'aluminium de fonderie

Ces alliages d'aluminium sont obtenus..... par fonderie.

On distingue deux types d'alliages de fonderie 1/ Alliages de première fusion (alu venant de l'électrolyse du minerai (bauxite) puis ajout d'éléments d'alliage) 2/ Alliages d'affinage (déchets recyclés).

On distingue trois types de désignations 1/ Désignation européenne chimique 2/ Désignation européenne numérique 3/ Ancienne désignation française.

Désignation européenne chimique

Exemple : EN AC-Al Si7Mg. %silicium : 7%

Désignation européenne numérique

Exemple : EN AB-42000

- B : forme du produit ; 4 : Série (principal élément d'alliage) ; 2 : Groupe d'alliage

Série	Principal élément d'alliage	Lettre	Forme du produit
20000	Cuivre Cu	B	lingots pour refusion
40000	Silicium Si		
50000	Magnésium Mg	C	pièces moulées
70000	Zinc Zn	M	alliages mères (alliage réutilisé pour l'élaboration d'autres alliages)

Tableau 2. Désignation européenne numérique

La symbolisation du traitement thermique est commune aux 2 désignations européennes.

Exemple : EN AC-Al Si7Mg KT6 ou EN AC-42000 KT6 : Alliage d'aluminium 42000 pour pièce moulée coulée en coquille avec traitement thermique de mise en solution et vieillissement artificiel (revenu maximal). K : Procédé de moulage ; T6 : Traitement thermique

Lettre	Procédé de moulage	Symbole	Traitement thermique
S	moulage en sable	F	brut de fonderie
K	moulage en coquille	O	recuit
D	moulage sous pression	T1	maturation
L	moulage à la cire perdue	T6	mise en solution, revenu maximal

Tableau 3. Désignation européenne numérique

Ancienne désignation française

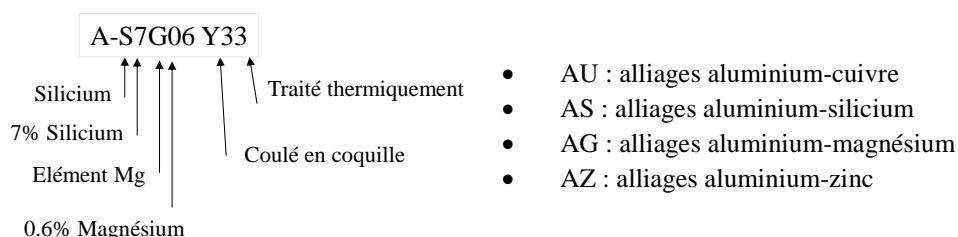


Tableau 3 – Désignation des modes d'obtention et des états de livraison des produits moulés		
Mode d'obtention		Traitement thermique
Non défini.....	Y0	Aucun traitement
Lingot.....	Y1	ou non spécifié..... 0
Pièces moulées	Sable.....	Y2 Recuit..... 1
	Coquille.....	Y3 Trempé..... 2
	Sous pression.....	Y4 Trempé et revenu..... 3
	Par frittage.....	Y5 Trempé et mûri..... 4
	Coulée continue.....	Y7 Stabilisé..... 5
	Centrifugation.....	Y8 Trempé et stabilisé..... 6
Suivant prescription.....	Y9	Suivant prescription..... 9
Exemple : • Y23 : pièce moulée en sable, trempée et revenue ; • Y40 : pièce moulée sous pression, sans traitement.		

Tableau 4. Techniques de l'ingénieur M1290 [5]

Elément	Alu	Bore	Chrome	Etain	Magnésium	Cobalt	Manganèse	Nickel	Silicium	Cuivre	Zinc
symbole chimique	Al	B	Cr	Sn	Mg	Co	Mn	Ni	Si	Cu	Zn
symbole dans la désignation	A	B	C	E	G	K	M	N	S	U	Z

Tableau 5. Ancienne désignation française des alliages d'Al de fonderie : symboles des éléments

2.4.3 Propriétés de l'aluminium

- métal blanc de bel aspect décoratif,
- faible masse volumique : densité 2,73
- faible température de fusion : environ 658 °C
- très bonne résistance à la corrosion uniforme (couche protectrice d'alumine Al_2O_3 en surface), mais alliages sensibles à la corrosion localisée (piqûres....) en présence d'ions chlorure
- conductibilité thermique élevée : échangeurs thermiques
- conductibilité électrique élevée : conducteurs électriques
- grande résistance au froid : sa résistance mécanique augmente jusqu'à -250 °C
- amagnétique
- grande affinité avec l'oxygène : désoxydant
- pouvoir réflecteur élevé : éclairage
- très bonne malléabilité (limite d'élasticité 10 à 500 MPa) et grande ductilité : matériau idéal pour des procédés de mise en forme par déformation plastique
- précautions à prendre en soudage (courant alternatif pour détruire l'alumine en surface)

2.5 Les alliages de titane [6]

Le titane montre une transformation allotropique à 882°C. Il passe de la phase Hexagonale α à la phase cubique centrée β lorsqu'on le chauffe. La phase β peut cependant être stabilisée à température ambiante. On distingue donc les Alliages de titane α , les Alliages de titane β , les Alliages de titane α - β .

Désignation	Composition	Traitement thermique	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	A %	Applications
TA 5 E	Ti-Al 5-Sn 2,5 (Alliage α)	recuit	800	900	20	Domaine aéronautique disques, ailettes de turbines, brides de compresseurs éléments de transmission, réservoirs.
TA 8 DV	Ti-Al 8-Mo 1-V 1 (Alliage α)	trempe + revenu	900	1 000	18	
Ti 10.2.3	Ti-V 10-Fe 2-Al 3 (Alliage β)	trempe + revenu	1 100 - 1 200	1 175 - 1 275	10	
TA 6 V nuance la plus utilisée	Ti-Al 6-V 4 (Alliage $\alpha + \beta$)	recuit	900	1 000	15	Domaine chimique (voir titane)
		trempe + revenu	1 050	1 150	12	
TA 6 V 6 E	Ti-Al 6-V 6-Sn 2 (Alliage $\alpha + \beta$)	recuit	950	1 050	12	
		trempe + revenu	1 150	1 250	10	

Tableau 6. Applications des alliages de titane.

2.5.1 Propriétés des alliages de titane

Légers (densité 4,5), Résistance élevée (Ta6V R_m 1100MPa), Module d'Young élevé (110 000MPa), Bonne résistance en fatigue, Résilience élevée, Résistance à la corrosion meilleure que les aciers inox.

2.5.2 Utilisations des alliages de titane

Au-delà de l'aéronautique, du biomédical, des sports, la première utilisation de l'élément titane est sous forme de pigments TiO_2 dans les peintures, matière plastique, papier...

2.6 Les alliages de zinc

Z-A4U1G : Z : alliage de zinc ; A4 : 4% d'aluminium ; U1 : 1% de cuivre ; G : Magnésium.

2.7 Les alliages de cuivre

CuSn5Zn4 : Cu : alliage de cuivre ; Sn5 : 5% d'étain ; Zn4 : 4% de zinc

Avantages : Conductibilité thermique et électrique élevée, bonne résistance à la corrosion, bonnes aptitude au moulage, matriçage, soudage, usinage

Applications : fils électriques, Cupro-plomb : anti-friction

2.8 Les alliages de magnésium

G-A9Z1 : Alliage de Magnésium (G) avec 9% d'aluminium et 1% de zinc

Très légers (densité 1,7 à 1,9), Excellentes capacités d'amortissement (réduction des bruits), Rm 140-300MPa, Résistance à la corrosion meilleure que les aciers

2.9 Les alliages de Nickel

NiCu35 : Alliage de Nickel à 35% de cuivre

Résistance à la corrosion même aux hautes températures (1050°C), Résistance au fluage

2.10 Les superalliages

Alliages base Ni – Cr + Fe, Ti, Al, Cu, Mn, Mo, Co

Excellente résistance mécanique à haute température (plus de 1000°C), Bonne résistance corrosion et oxydation, Excellente ductilité car en général CFC

Applications : pièces de moteurs d'avions, centrales nucléaires où ils remplacent les aciers inox, outils à chaud, lignes d'échappement voitures de course....

2.11 Intermétalliques [7]

Extrait de la thèse de David COLAS « Renforcement d'alliages fer-aluminium ordonnés B2. Influence d'additions (Ni et B) et de la microstructure », 2005, Mines de Saint-Etienne

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00009539>

« Lorsque deux éléments A et B sont miscibles en toutes proportions et forment une solution solide continue pour certains domaines de concentration, il peut se former des surstructures. Les composés A_3B , AB, AB_3 sont des exemples de ces nouvelles phases. [...] Pour préciser les termes, nous parlerons de « composé intermétallique » quand la composition stoechiométrique est atteinte, et de « phase ou alliage intermétallique » s'il agit d'une solution solide sur la base du composé. [...]

Possédant des caractéristiques réfractaires intéressantes, ces composés ont souvent une très grande dureté, alliée à une fragilité très marquée. En outre, leur déformation s'accompagne souvent d'un très fort taux d'écrouissage. Les composés intermétalliques ont donc d'abord été principalement utilisés sous forme de particules dispersées dans une matrice métallique (phénomène de précipitation) afin de modifier de façon notable les propriétés de cette matrice. De nombreux alliages sont durcis par précipitation : précipitation des carbures (aciers spéciaux), des composés intermétalliques (alliages légers, aciers à hautes performances) Les deux cas d'intermétalliques durcissant les plus connus sont Al_2Cu (phases θ'' - θ') dans les alliages AlCu et Ni_3Al dans les superalliages à base nickel. Les eutectiques contrôlés possèdent de remarquables propriétés mécaniques : ce sont des composés intermétalliques sous forme de longues baguettes ou de grandes lamelles, régulièrement disposées parallèlement à une même direction, dans une matrice plus ductile (principe du renforcement par fibres) Depuis les années 60 et sous l'impulsion de l'US Air Force qui étudia notamment Ti_3Al , ces composés furent et sont encore abondamment étudiés, non plus seulement comme durcisseurs structuraux mais comme matériaux de structure à part entière. »

Ces matériaux sont étudiés en remplacement des superalliages car leurs propriétés mécaniques restent très bonnes à haute température. Ils sont freinés par leur manque de ductilité à l'ambiante.

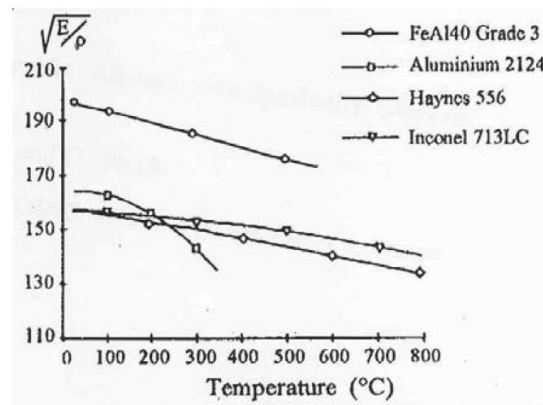


Figure I.3 : D'après [25]. Rigidité spécifique de l'alliage FeAl40 Grade 3 comparée à celles d'autres matériaux.

Figure 2. Baccino R., Filippo D.S., Moret F., Lefort A. et Webb G. Properties and applications of a high specific stiffness mechanically alloyed iron aluminide grade in "PM94, Powder Metallurgy World Congress", Paris. Editions de Physique, Les Ulis. Vol. II. p. 1239-1242. (1994) repris dans [7]

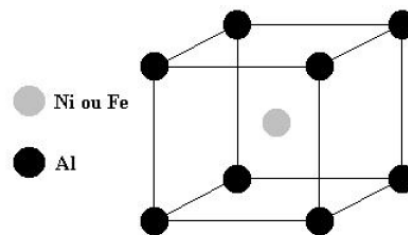


Figure I.4 : Structure cristallographique B2 de NiAl et FeAl.

Figure 3. [7]

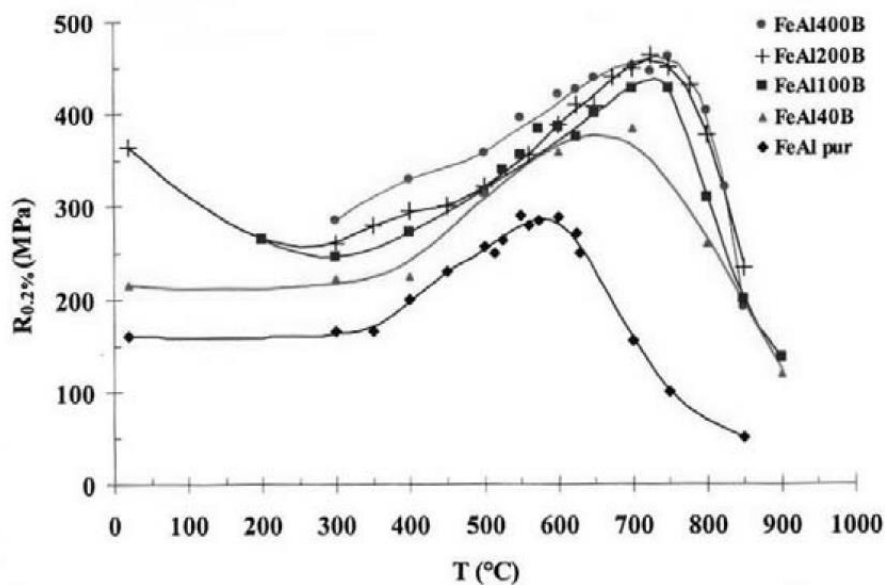


Figure 4. Effet du bore sur l'évolution de la limite d'élasticité en fonction de la température. Calonne O. Anomalie plastique de l'alliage Fe-40Al ordonné B2, Thèse de doctorat, St Etienne. (2002)

2.11.1 Avantages

Bon marché, excellente résistance à la corrosion, bonne résistance mécanique, faible densité comparé aux alliages ferreux (densité 5.4 à 6.7), haut point de fusion.

Applications : Aéronautique, automobile, nucléaire.

2.12 Coûts comparatifs [8]

Ces coûts n'ont qu'un objectif de comparatif entre les matériaux et sont relativement datés : 2004.

81.4 Prix relatifs approximatifs à masses égales							
Fontes JL (GJL)	0,6	Aciers Cr-Ni-Mo	10	Laiton	6 à 9	PF	4
Aciers S 235	1	Aciers rapides	12 à 26	Bronze	18	PUR	10
Aciers C	1,7 à 2	Aluminium	5	Maillechort	12	Plastiques	EP 18
Aciers alliés	2 à 4	Alliages d'aluminium	10	Cupro-aluminium	6		PS 2
Aciers inoxydables	4 à 5	Alliages de zinc	2	Magnésium	12 à 18		ABS 4
Aciers Cr-Ni	7	Cuivre	9	Titane	150 à 300	PTFE	30

3 Propriétés des matériaux métalliques

3.1 Généralités

- Liaison métallique = liaison forte : E élevé (E qqes 10 000 à qqes 100 000 MPa) et T_f élevé
- Structures atomiques cristallines (à part le cas des verres métalliques) : empilements « compacts » ou « pseudo-compacts » et atomes lourds : masse volumique élevée
- Structure électronique des atomes : électrons de plus grande énergie ont leur énergie dans la bande de conduction : très bons conducteurs (électrique, thermique)
- Sensibles à la corrosion électrochimique car très bons conducteurs électriques (effet de pile)
- Pas de sensibilité à la lumière
- Fluage possible à partir de $0.30.T_f$
- Propriétés ajustables par modification de la constitution et/ou de la microstructure (modification de la composition chimique et/ou traitements thermomécaniques)
- Dilatation thermique : moyenne
- Recyclables « à l'infini » : pas de perte de leurs propriétés lors du recyclage

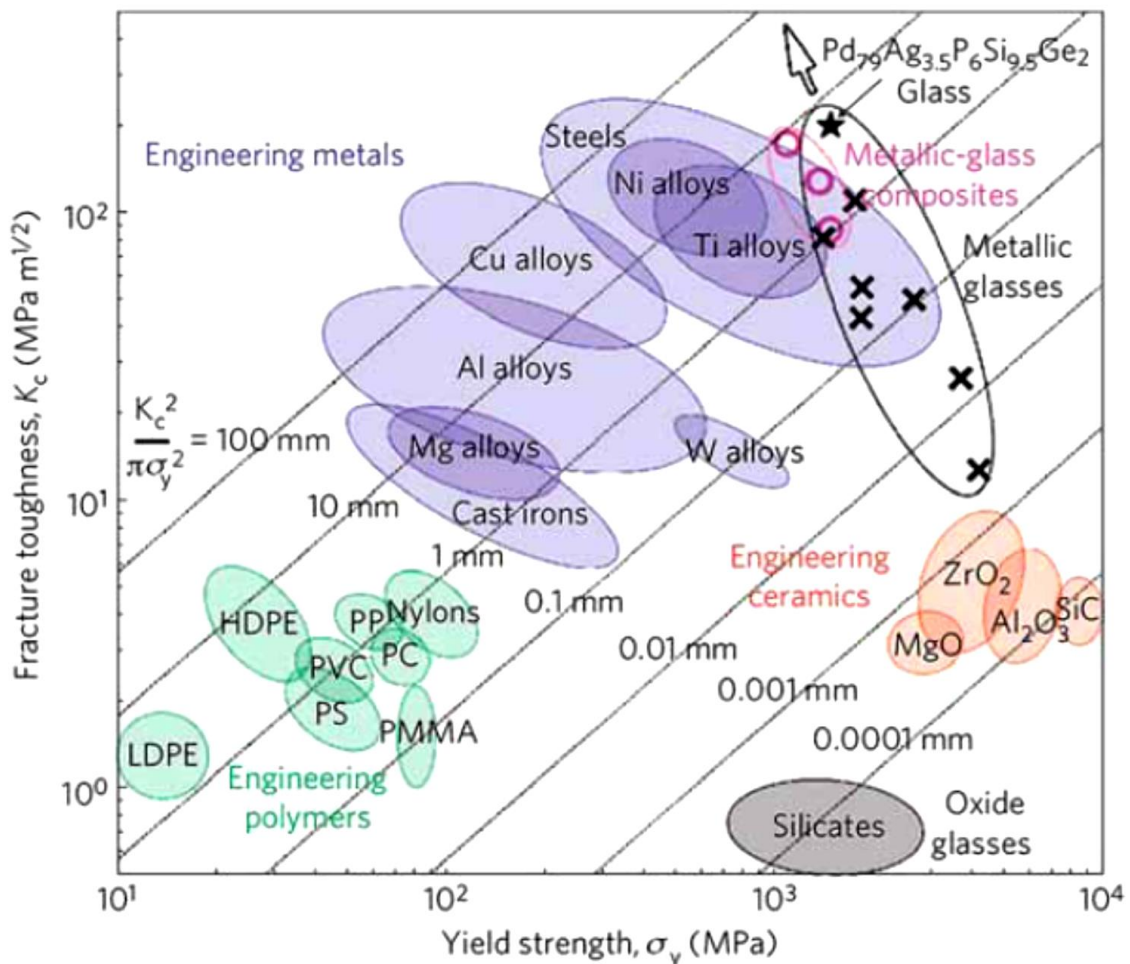


Figure 5. [9]

4 Relations microstructure – propriétés mécaniques

4.1 Limite d'élasticité et déformation plastique

4.1.1 Notion de glissement cristallographique

Dans les matériaux métalliques, la limite d'élasticité est due à l'apparition d'un nouveau mode de déformation : le glissement.

Si l'on sollicite par exemple un polycristal de cuivre à 10% de déformation plastique, l'examen de la surface polie de l'échantillon révèle des lignes en surface. Ces lignes correspondent à l'émergence à la surface de glissement irréversible de plans cristallographiques les uns par rapport aux autres (Figure 6).

Des essais réalisés sur des monocristaux permettent de mettre en évidence la nature cristallographique de ces glissements.

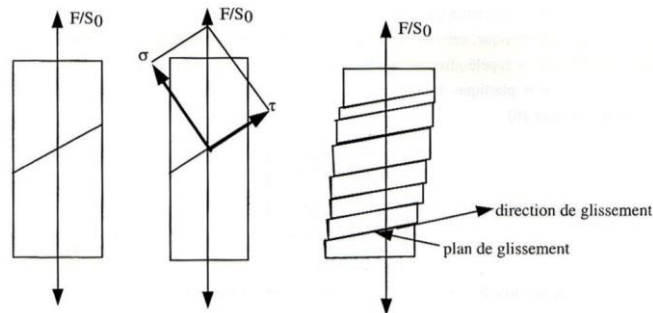
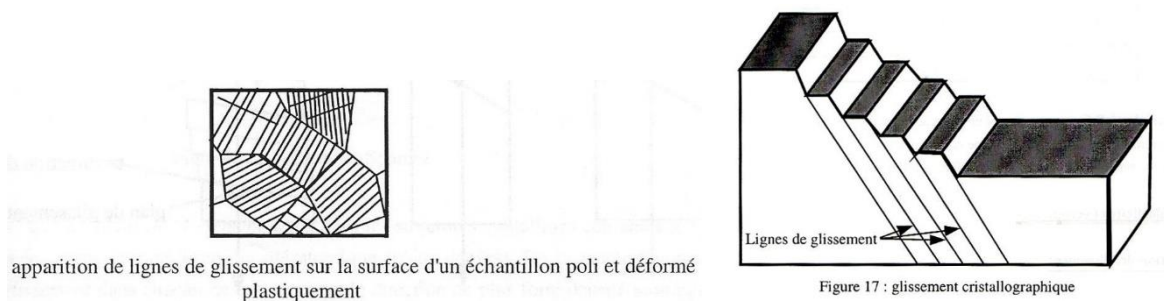


Figure 6. Glissement cristallographique [10]

Les plans de glissement sont les plans de plus forte densité atomique (Figure 7).

En effet pour ces plans on ne peut pas séparer « facilement » les atomes entre eux car ils sont très rapprochés. La déformation plastique apparaît donc lorsque ces plans commencent à « glisser », guidés par les directions de plus forte densité atomique appelées directions de glissement (l'association d'un plan de glissement et d'une direction de glissement contenue dans ce plan est appelée système de glissement).

La déformabilité d'un matériau dépend de la facilité qu'ont les plans cristallins de « glisser » les uns sur les autres, et donc du nombre de systèmes de glissement possibles au sein du matériau.

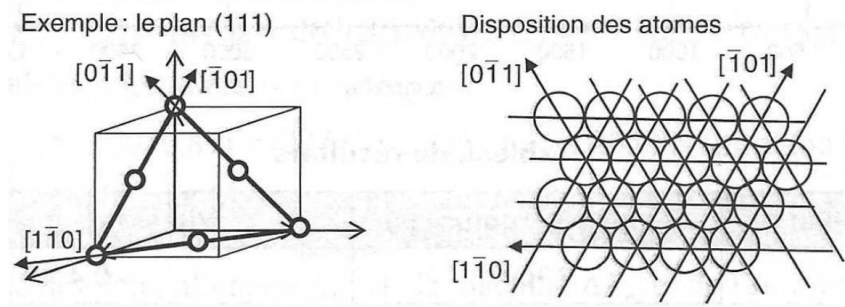


Figure 7. Cristal Cubique Faces Centrées [11]

1.2 Influence des dislocations

Par des considérations théoriques sur le glissement cristallographique, on peut déterminer la cission critique théorique (contrainte de cisaillement à l'apparition de la plasticité). Or la cission critique observée expérimentalement est bien plus faible (Figure 8).

Cet écart provient des dislocations présentes au sein du matériau. Ces dernières facilitent le mouvement des atomes, par un déplacement « de proche en proche » de rangées d'atomes. Il est en effet plus facile de déformer un matériau en déplaçant progressivement les atomes, rangée atomique par rangée atomique, que l'ensemble des atomes d'un plan donné (Figure 9).

Dislocations

Exemple du fer pur - τ_c théorique : 13 550 MPa
 τ_c mesurée : 28 MPa

Analogie du tapis :

Déplacement par glissement de dislocations :

Figure 8. Cission théorique et mesurée du fer pur : influence des dislocations, analogie du tapis [10]

Ainsi les dislocations sont un outil indispensable pour comprendre la plasticité des matériaux métalliques, mais aussi des propriétés comme la tenue en fatigue, la tenue au fluage, la perte de ductilité par écrouissage....

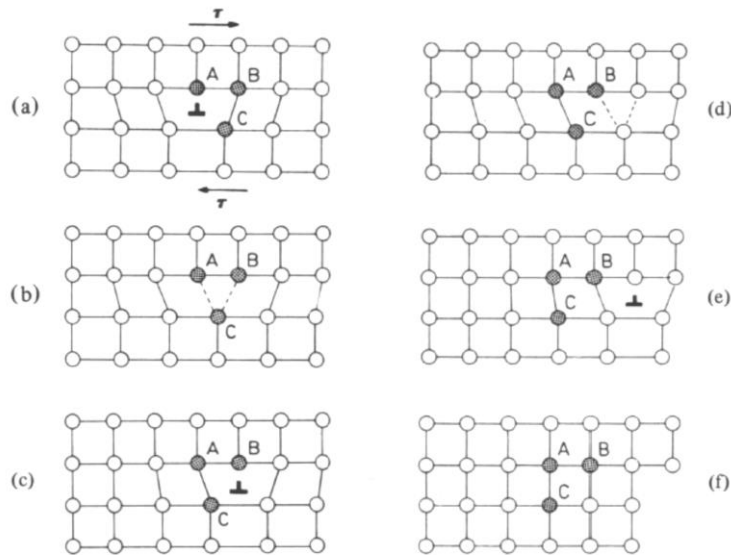


FIG. 7.16 Mouvement des atomes impliqués dans le déplacement d'une dislocation-coin sous l'action de la contrainte de cisaillement τ . La ligne de dislocation est perpendiculaire au plan de la figure. Quand la dislocation émerge du cristal, il y a formation d'une marche (f) dont la largeur correspond à la valeur absolue du vecteur de Burgers.

Figure 9. Mouvement d'une dislocation

2 Augmentation de la limite d'élasticité : durcissement

4.1.1.1 Introduction

On a vu que la plasticité correspondait à un déplacement des dislocations le long des plans de glissement cristallographiques. Par conséquent, pour éviter l'apparition de la plasticité (donc pour augmenter Re), il faut empêcher le mouvement de ces dislocations.

On peut :

- Utiliser une phase durcissante (par exemple cémentite dans l'acier)
- Durcir par ajout d'éléments en solution solide
- Durcir par écrouissage
- Durcir par précipitation
- Durcir par affinement de la taille des grains

2.1 Durcissement de solution solide

Le durcissement de solution solide consiste à augmenter la limite d'élasticité par dissolution d'éléments d'alliage dans le métal.

Quand la concentration en atomes du métal à durcir (dans notre cas, les atomes d'aluminium) est très supérieure à la concentration en éléments d'alliage, on parle de soluté pour les éléments d'alliage et de solvant pour le métal à durcir.

Si les atomes de soluté diffèrent des atomes du solvant en taille et en propriétés élastiques, les atomes de soluté interagissent avec les dislocations et rendent leur déplacement difficile.

Pour ce type de durcissement, une première approximation donne : $Re = \varepsilon_s^{3/2} \cdot C^n$

C : concentration en soluté ; ε_s : « désaccord paramétrique » entre les atomes de soluté et de solvant (différence entre les paramètres de maille d'un cristal de chaque atome).

Cette formule exprime bien le fait que le durcissement augmente avec le désaccord et avec la concentration en soluté.

2.2 Durcissement par écrouissage

L'écrouissage est un terme très général. On peut le résumer par une évolution des propriétés (limite d'élasticité, dureté...) et de la microstructure d'un matériau (quantité de dislocations), consécutif à une déformation plastique.

L'écrouissage d'un métal augmente sa dureté et sa résistance mécanique (R_e et R_m) mais diminue sa ductilité ($A\%$) et donc son aptitude à la déformation.

Lors de la déformation plastique, les dislocations se déplacent le long des plans de glissement, de nouvelles dislocations apparaissent également. Lorsque la quantité de dislocations est trop importante, elles finissent par se bloquer entre elles, leur mouvement est alors plus difficile : le métal est écroui.

La limite d'élasticité augmente avec le taux d'écrouissage donc avec la déformation. On peut décrire ce durcissement par la loi suivante :

$$R_e = A \cdot \varepsilon^n$$

A et n constantes matériau ; n compris entre 1/6 et 1/3

2.3 Durcissement par précipitation (durcissement structural)

Les précipités, phase de dureté généralement supérieure à la matrice initiale, bloquent les dislocations. Ces dernières doivent alors contourner les précipités, ou les cisailier.

Chaque mécanisme (contournement ou cisaillement) n'apporte pas le même durcissement.

4.1.1.2 Contournement

Le mécanisme de contournement le plus simple (contournement d'Orowan) est illustré ci-dessous.

La dislocation contourne le précipité tout en restant dans son propre plan de glissement. Les deux brins de la ligne de dislocation, incurvés de part et d'autre de l'obstacle, se recombinent, permettant l'échappement de la dislocation et laissant autour du précipité une boucle de dislocation.

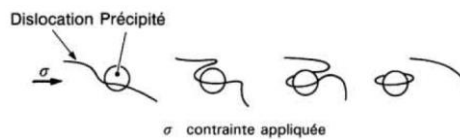


Figure 10. Contournement d'Orowan (TI m240)

Selon le mécanisme de contournement d'Orowan, l'augmentation de limite d'élasticité est :

$$\Delta R_e = \frac{G \cdot b}{D}$$

G : module de cisaillement du matériau (MPa) ; D : distance moyenne entre précipités (m) ; b : vecteur de Burgers des dislocations (m) (Figure 11).

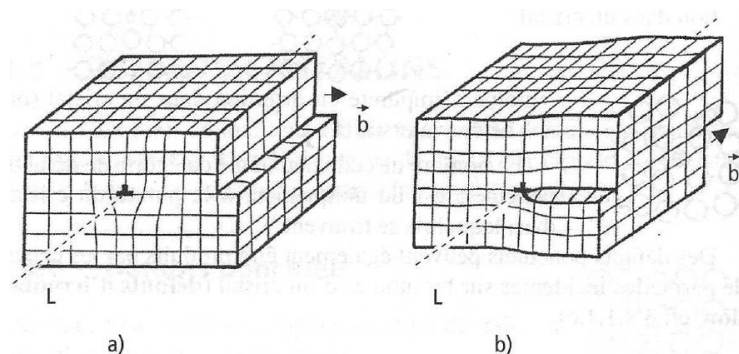


Figure 3.14

a) Ligne de dislocation coin, L est perpendiculaire à \vec{b} . b) Ligne de dislocation vis, L est parallèle à \vec{b} .

Figure 11. Vecteur de Burgers des dislocations vis et coin [11]

4.1.1.3 Cisaillement

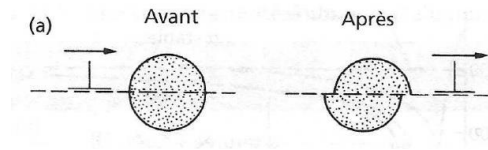


Figure 12. Cisaillement d'un précipité [12], [13]

Pour de faibles déformations plastiques, le cisaillement de précipités n'apparaît que lorsque ceux-ci sont cohérents ou semicohérents et que la dislocation peut glisser de manière continue de la matrice dans les précipités.

4.1.1.4 Influence du type de précipités

La notion de précipité cohérent et incohérent est illustrée en Figure 13.

Aux interfaces avec les précipités incohérents, la rupture par décohésion s'amorce facilement : ceci entraîne une perte de ductilité quantifiée par une baisse de $A\%$ (les interfaces incohérentes sont peu résistantes).

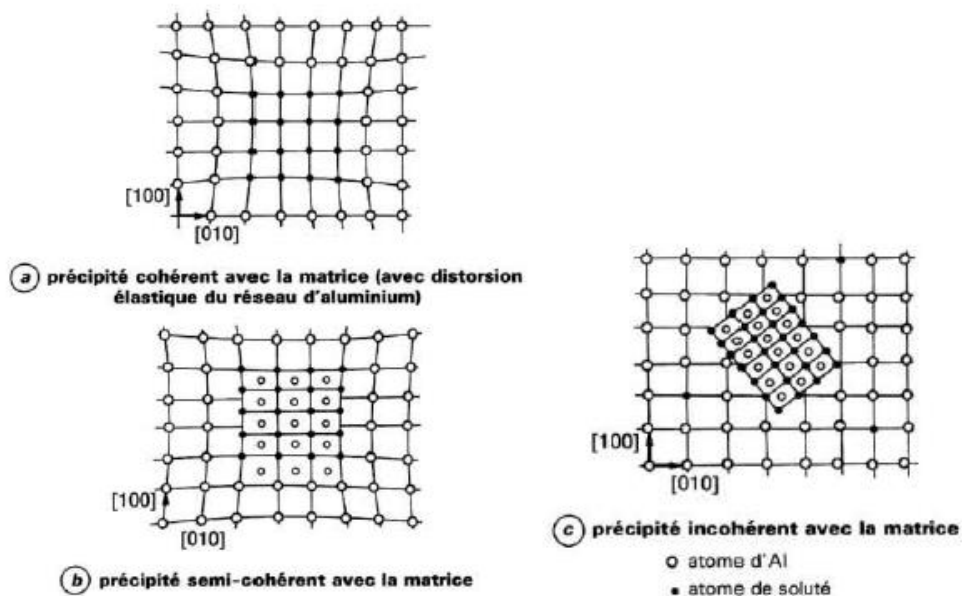


Figure 13. Notion de précipité cohérent et incohérent (Techniques de l'Ingénieur)

2.4 Durcissement par affinement de la taille des grains

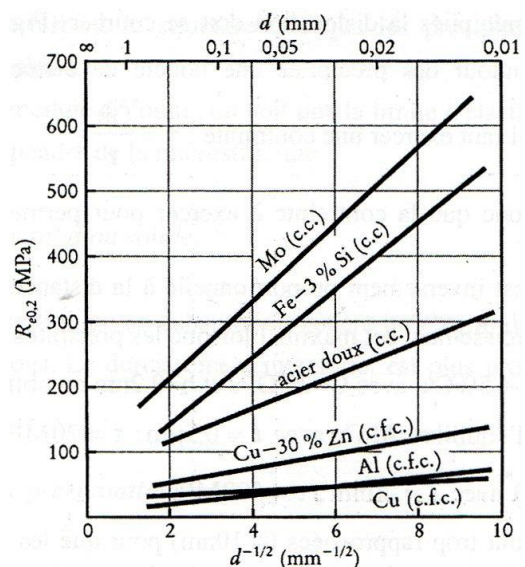
Dans un polycristal, les joints de grains arrêtent les dislocations et jouent un rôle de barrière à la transmission des glissements d'un grain à l'autre. Ceci a pour conséquence le blocage des dislocations au sein d'un grain, blocage d'autant plus efficace que le libre parcours des dislocations émises est court, et donc que la taille de grains est petite (Figure 14).

La loi de Hall et Petch postule :

$$\sigma_e = \sigma_0 + k \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}$$

k : paramètre matériau. d : diamètre moyen des grains. σ_0 : limite d'élasticité du monocristal

Figure 14. Influence de la taille de grains sur la limite d'élasticité conventionnelle. [10]



4.1.1.5 Synthèse : exemple pour un acier ferritique

$$\sigma_e = \sigma_i + \sigma_s + \sigma_c + \sigma_p + \sigma_d$$

(Voir Figure 15)

- σ_c : Durcissement par la perlite ou la cémentite
- σ_s : Durcissement de solution solide
- σ_p : Durcissement par précipitation
- σ_d : Durcissement par écrouissage

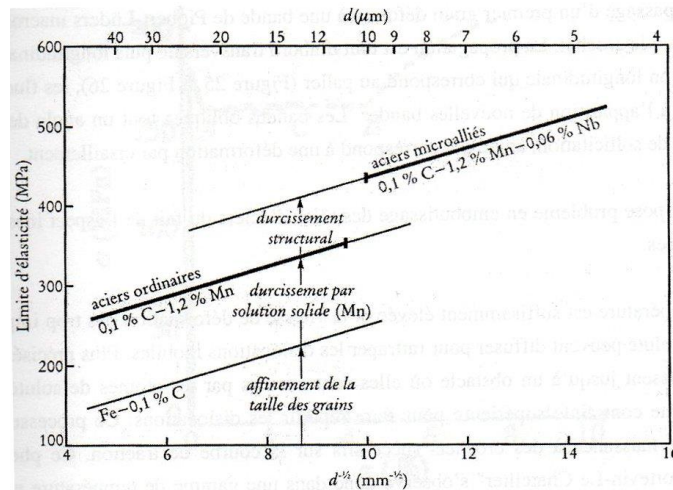


Figure 15. Durcissement d'un acier ferritique [10]

4.2 Rupture

Les matériaux métalliques ont un comportement ductile (aciers, alliages d'aluminium, cuivre, alliages de titane...) ou fragile (fontes, aciers martensitiques...) (Figure 16).

Dans certains cas, les matériaux métalliques au comportement normalement ductile peuvent montrer un comportement fragile (corrosion intergranulaire, fragilisation par l'hydrogène, faibles températures dans le cas des phases CC,).

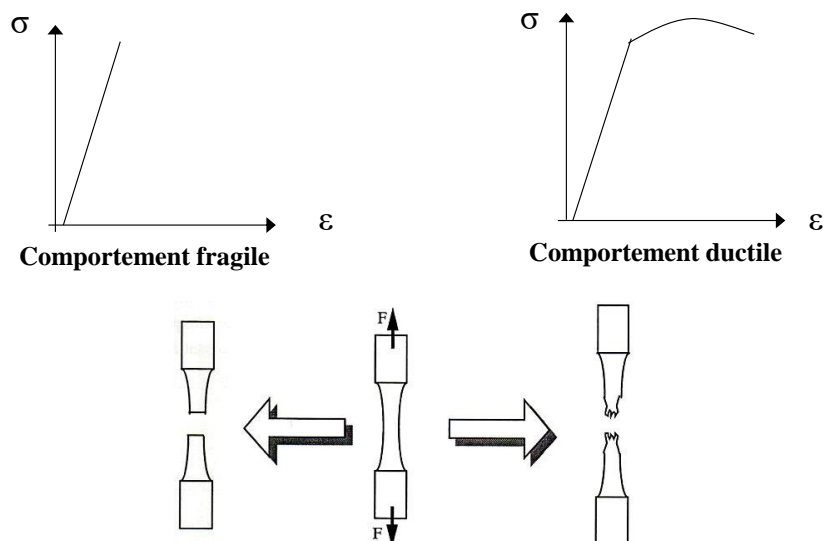


Figure 16. Courbe de traction, rupture fragile et ductile

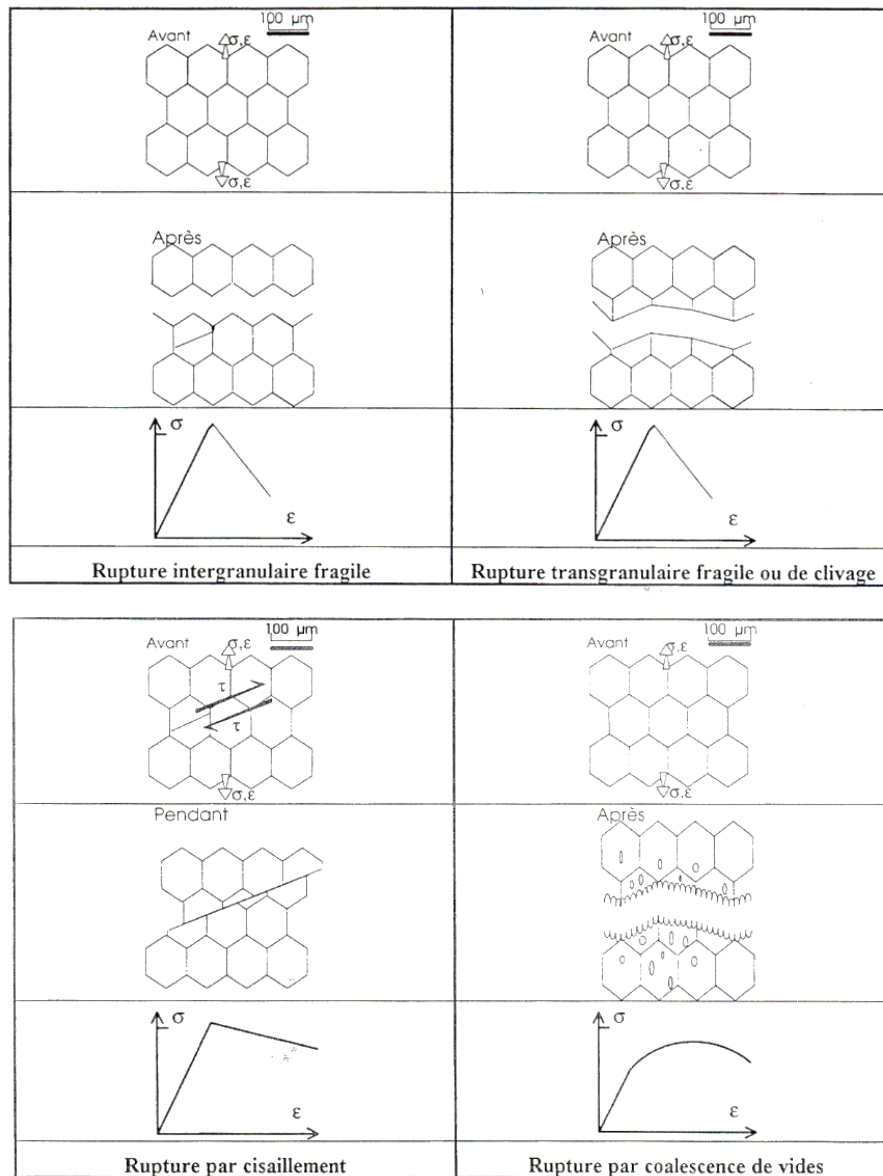


Figure 17. Exemples de mécanismes de rupture fragile et ductile dans les polycristaux [10]

5 Les aciers : le système Fe-C

1 Pourquoi du carbone ?

On utilise le carbone car c'est un élément bon marché et très efficace pour durcir le fer.

2 Notion de diagramme stable et métastable

On distingue en fait deux diagrammes du système Fe-C. En effet, la cémentite Fe_3C se forme spontanément lors du refroidissement du mélange Fe+C. Mais cette phase est seulement métastable et se décompose facilement en fer et graphite ($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$), en particulier si une énergie est apportée, par exemple par chauffage. Ainsi, pour des refroidissements très lents, on utilisera le diagramme Fe-C. Pour des refroidissements « standards », on utilisera le diagramme Fe- Fe_3C . C'est pour cela que deux diagrammes sont donnés. Ceci explique les décalages de température et de concentrations entre deux diagrammes issus de deux sources différentes. Pour les aciers, on raisonnera sur le diagramme Fe- Fe_3C .

3 Description du diagramme métastable Fe- Fe_3C

Les aciers sont définis jusqu'à 2% de carbone (au-delà de 2% C, on parle de fonte). Les aciers passent donc TOUS par le domaine austénitique γ et ont donc tous un peu de mélange eutectoïde lamellaire appelé perlite (sauf les aciers à moins de 0.022% de carbone).

On distingue :

- La phase liquide
- La Ferrite δ : solution solide interstitielle de C dans le fer CC
- L'Austénite γ : SS interstitielle de C dans le fer CFC
- La Ferrite α : SS interstitielle de C dans le fer CC
- La cémentite Fe_3C : composé défini dur et fragile (6,67% de C en masse)

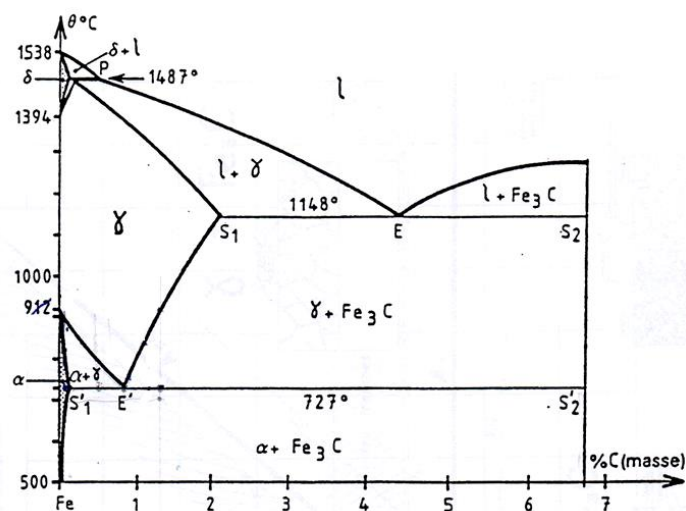


Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite

Abscisses des points principaux :

S_1 : 2,11 %	E : 4,30 %	S_2 : 6,67 %
S'_1 : 0,022 %	E' : 0,77 %	S'_2 : 6,67 %

Figure 18. Diagramme d'équilibre métastable Fe- Fe_3C

3.1 Exploitation du diagramme : refroidissement du fer pur

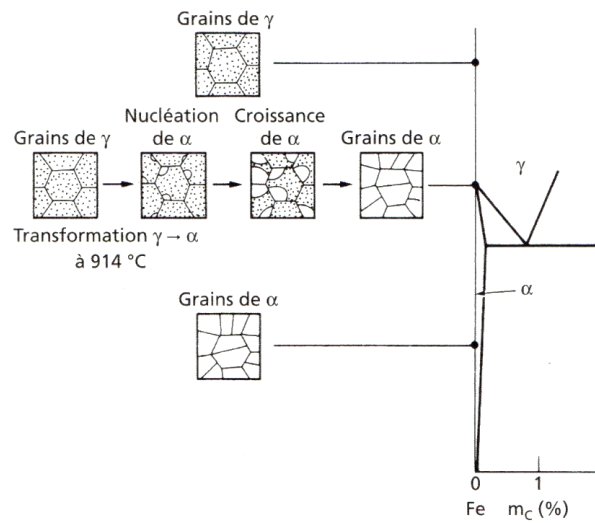


Figure 19. Refroidissement du fer pur [13]

3.2 La structure eutectoïde E'

Au point E', il y a une réaction de type eutectoïde : le solide γ devient 2 phases solides (ferrite et cémentite). La structure obtenue est appelée perlite, mélange eutectoïde constitué d'environ 88% de ferrite α et de 12% de cémentite Fe_3C . Elle se présente sous forme de fines lamelles parallèles de lamelles de ferrite α et de lamelles Fe_3C . La petite taille de ces lamelles confère à la perlite de très bonnes propriétés mécaniques.

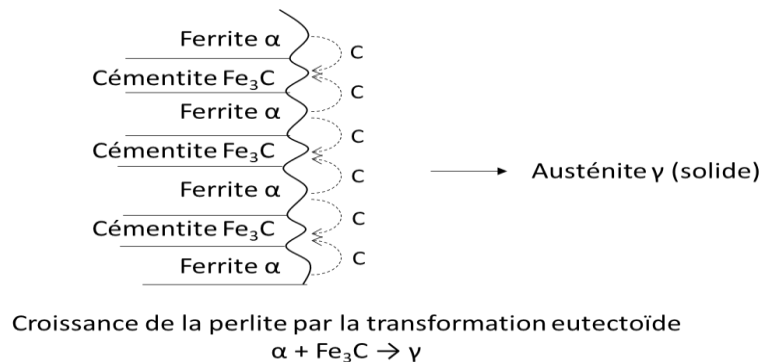


Figure 20. Croissance de la Perlite

3.3 Refroidissement d'un acier eutectoïde (0,77%C)

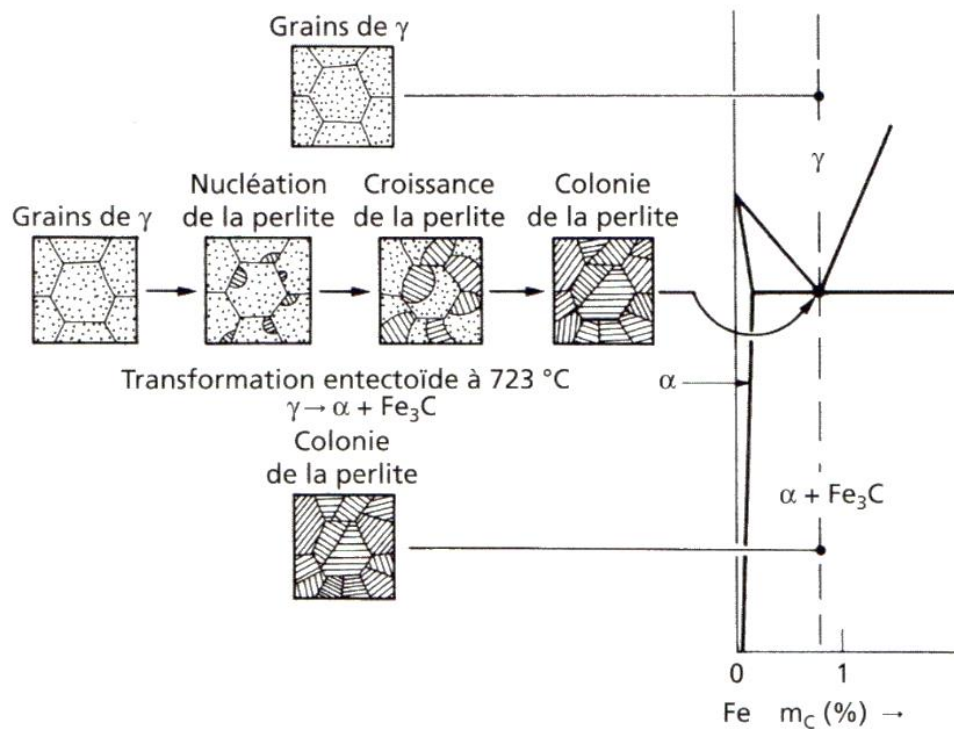


Figure 21. Refroidissement d'un acier eutectoïde (0,77%C) [13]

3.4 Refroidissement d'un acier hypoeutectoïde (%C<0,77%)

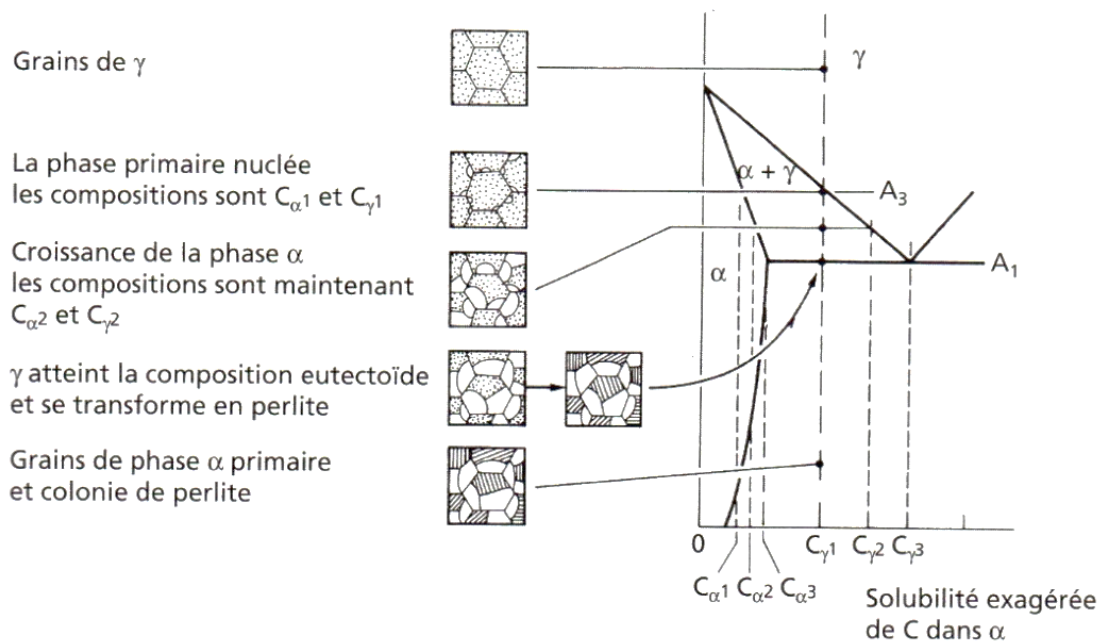


Figure 22. Refroidissement d'un acier hypoeutectoïde (%C<0,77%) [13]

3.5 Refroidissement d'un acier hypereutectoïde (%C>0,77%)

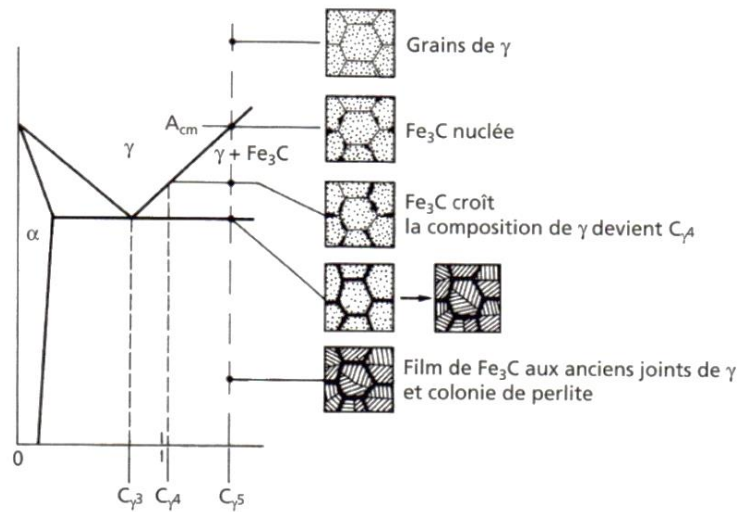


Figure 23. Refroidissement d'un acier hypereutectoïde (%C>0,77%) (M. F. Ashby D.R.H Jones. DUNOD 2014)

3.6 Diagramme des structures (et pas diagramme des phases...)

Si on cartographie les structures, on obtient un diagramme « de structures ». La perlite apparaît.

En raisonnant avec la perlite, on dira par exemple qu'un acier à 0.77%C contient 100% de perlite (perlite = structure biphasée composée de 88% de ferrite α + 12% de cémentite).

En raisonnant sur les phases, on dira que ce même acier contient 88% de ferrite α + 12% de cémentite.

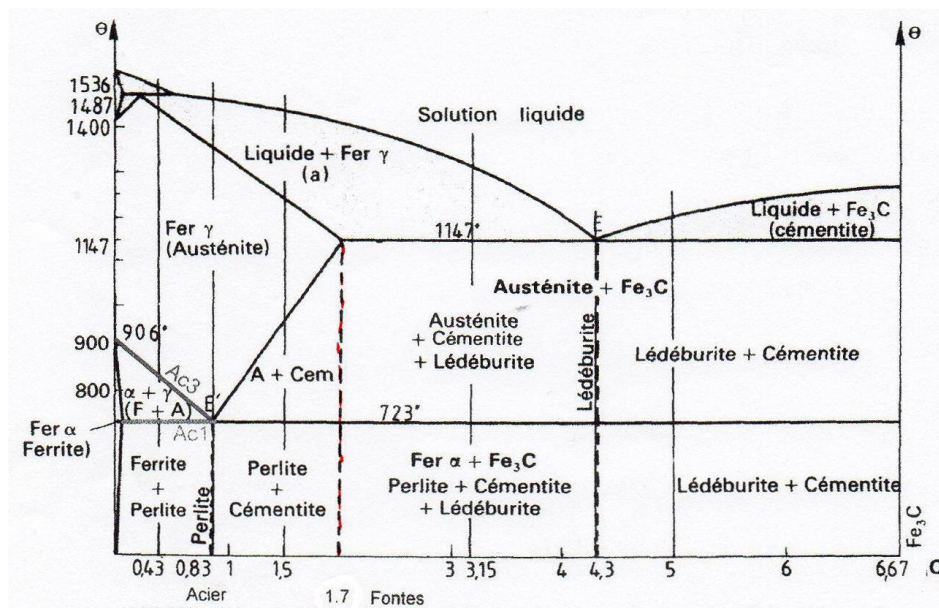


Figure 24. Diagramme des structures

6 Cinétique des transformations de phases

Les diagrammes d'équilibre de phases fournissent la constitution d'un matériau obtenue lors de variations de températures suffisamment lentes pour considérer qu'à tout moment le système est à l'équilibre.

Or quelle vitesse représente une « évolution suffisamment lente » ? Que se passe-t-il pour une évolution plus rapide ? Comment connaître les constitutions et microstructures obtenues en fonction de la vitesse de refroidissement ?

6.1 Thermodynamique des transformations de phases

Un matériau peut être considéré comme un système thermodynamique décrit par des variables d'état dépendant de la température, la constitution, la nature et densité de défauts du cristal.....

Un tel système est stable lorsque ses variables d'état ont évolué de sorte que son énergie interne a atteint une valeur minimale. Sans sollicitation extérieure (mécanique, chimique, thermique...), un système stable n'évolue plus.

Un système métastable est un système qui a atteint un minimum local : un faible apport d'énergie ne changera pas l'état du système mais un apport suffisant le fera évoluer vers un autre état, stable ou métastable, d'énergie inférieure.

Un système qui n'est ni stable ni métastable est instable : il évolue spontanément vers un niveau d'énergie plus faible.

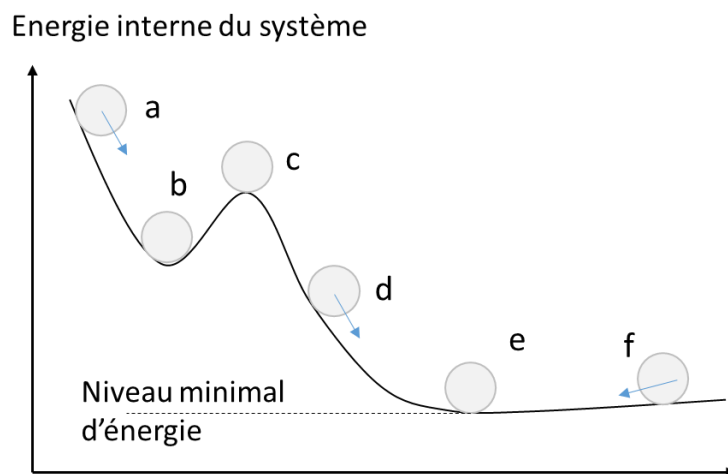


Figure 25. (a) grand écart à l'équilibre, évolution rapide (b) système métastable (c) équilibre instable (d) évolution vers un état de stabilité (e) énergie minimale, système stable (f) faible écart à l'équilibre, évolution lente

6.2 Transformations de phases diffusives et displacives

Les évolutions de constitution (nombre et nature des phases, composition chimique et fraction massique des phases) s'opèrent par deux types de transformation : transformations de phases diffusives et transformations de phases displacives.

Transformations diffusives	Transformations displacives
<p><u>Mécanisme</u></p> <p>germination et croissance de la nouvelle phase par diffusion atomique (migration des atomes sur des distances de 1 à 10^6 distances interatomiques)</p>	<p><u>Mécanisme</u></p> <p>Cisaillement ou transformation martensitique, sans diffusion</p> <p>Les atomes se déplacent en bloc sur des distances de l'ordre d'une ou plusieurs distances interatomiques par rupture de liaison et réarrangements locaux simultanés et coordonnés</p>
<p><u>Déclenchement</u></p> <p>La transformation demande l'apparition de germes de la nouvelle phase</p>	<p><u>Déclenchement</u></p> <p>La transformation demande un fort écart à l'équilibre</p>
<p><u>Cinétique</u></p> <p>La vitesse de transformation dépend de la vitesse de diffusion atomique, fortement influencée par la température (transformation impossible en dessous de $0.3-0.4 T_{\text{fusion}}$)</p> <p>La fraction transformée dépend donc du temps et de la température</p>	<p><u>Cinétique</u></p> <p>Vitesse de transformation : vitesse de propagation des ondes dans le cristal, peu influencée par la température</p> <p>La fraction transformée ne dépend que de la température finale imposée (entre Ms pour Martensite Start et Mf pour Martensite Finish)</p>
<p><u>Composition des phases</u></p> <p>Les phases obtenues n'ont pas nécessairement la composition chimique des phases initiales car les atomes peuvent migrer sur de longues distances.</p> <p>Ainsi, même si les phases initiales (càd avant transformation) n'ont pas la même composition que les phases de l'état d'équilibre, le système pourra atteindre son état d'équilibre grâce à la diffusion atomique.</p>	<p><u>Composition des phases</u></p> <p>En un point, la composition chimique de la phase obtenue est celle de la phase qui lui a donné naissance.</p> <p>Une phase obtenue par transformation displacive est appelée martensite.</p>
<p><u>Microstructure</u></p> <p>La taille des cristaux obtenus dépend du nombre de germes qui ont pu se développer. Si la vitesse de transformation est élevée (mais inférieure à la vitesse critique de trempe), alors le nombre de germes est élevé et la taille des cristaux sera faible.</p>	<p><u>Microstructure</u></p> <p>La taille des cristaux obtenus dépend des cristaux initiaux.</p>
<p><u>Exemple</u></p> <p>Croissance d'une phase solide à partir d'une phase liquide (après germination de la phase solide)</p> <p>Transformation allotropique : passage d'une phase solide α à une autre phase solide β lors d'une baisse ou augmentation de température</p>	<p><u>Exemple</u></p> <p>Transformation de la martensite dans le fer pur et les aciers</p>

Tableau VII. Transformations de phases diffusives et displacives

4 Analyse quantitative des évolutions

Les diagrammes d'équilibres de phases ne décrivent que la constitution de matériaux à l'état d'équilibre, donc pour des évolutions suffisamment lentes. Le temps ne figure pas dans ces diagrammes. Pour étudier l'influence de la vitesse de refroidissement, de nouveaux outils sont nécessaires : les diagrammes TTT et TRC.

4.1 Diagramme TTT : Temps-Température-Transformation

Les diagrammes TTT décrivent l'évolution de la constitution d'un matériau lors de refroidissements rapides suivis d'un maintien isotherme. Dans le diagramme TTT, on obtient en fonction du temps la microstructure du matériau pour un palier isotherme. Les diagrammes TTT sont donc adaptés à l'étude du taux de transformation d'une phase métastable maintenue à une température pendant un temps défini et sont donc adaptés pour la prévision des transformations pendant un traitement thermique (revenu).

6.2.1.1 Mise en évidence du diagramme

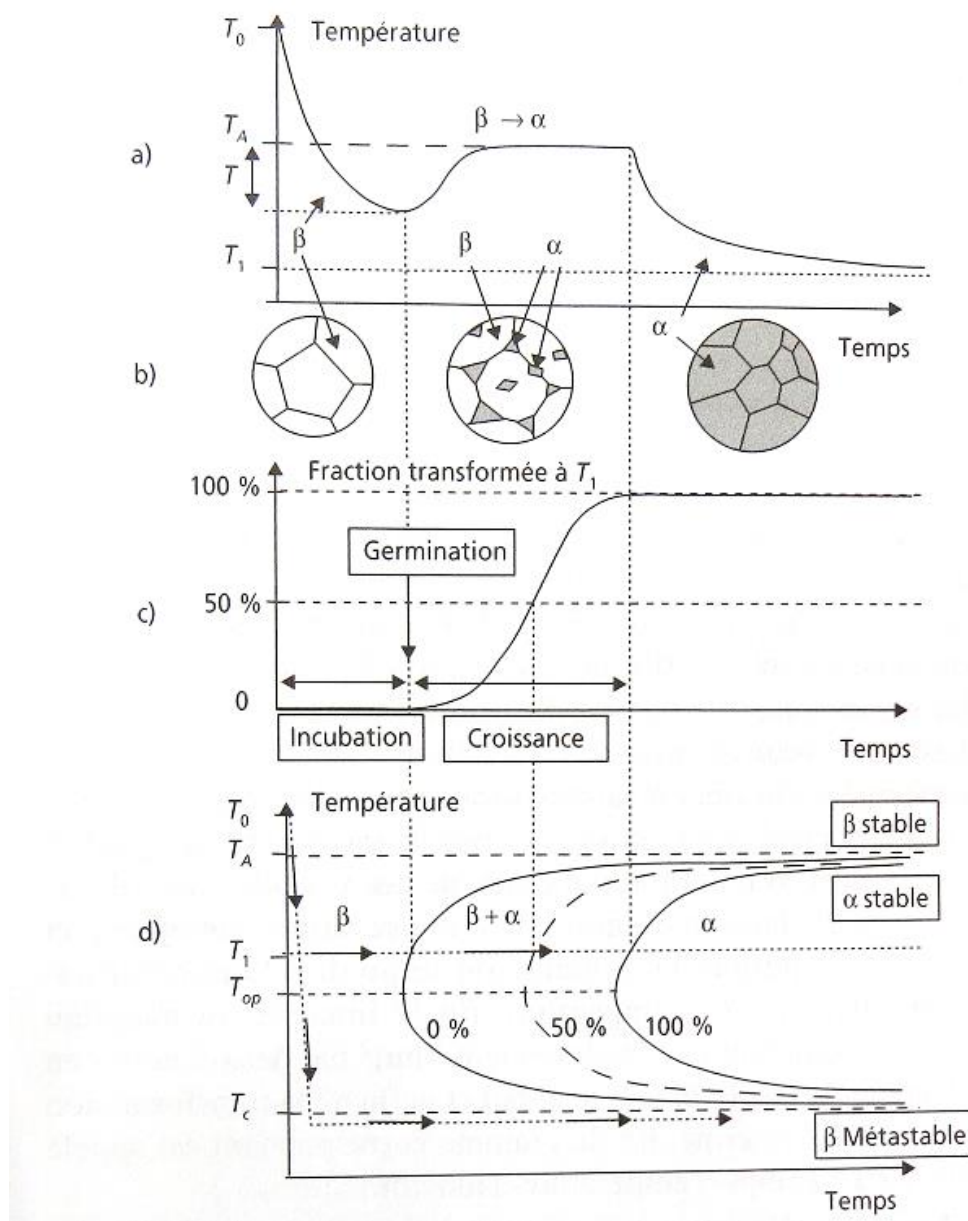


Figure 26. Matériau montrant une transition de phase $\beta \rightarrow \alpha$ à la température T_A [11]

6.2.1.2 Cas du fer

Le fer montre différentes transformations allotropiques, c'est-à-dire un changement de réseau cristallin avec la température. Sur le diagramme TTT du fer pur (Figure 27), partons de $914+\epsilon^\circ\text{C}$. Le fer est sous sa forme cristalline CFC stable.

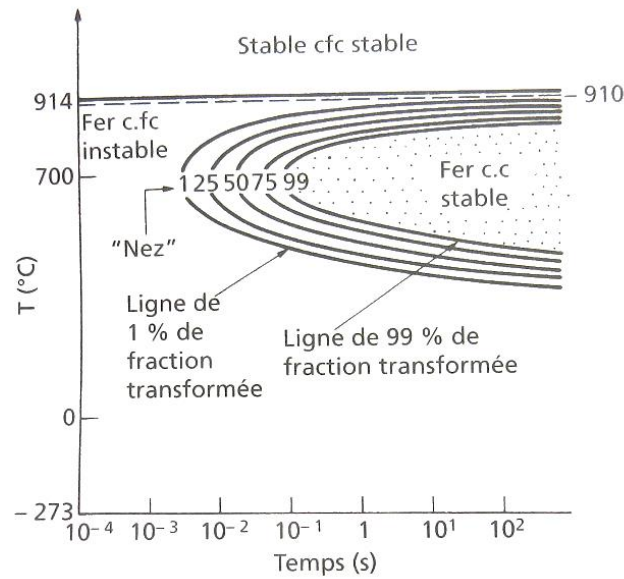


Figure 27. Aperçu du diagramme TTT du fer pur montrant les courbes à 1%, 25%.....99% de transformation du fer CC stable depuis le fer CFC [13]

Refroidissons rapidement à $914-\varepsilon^{\circ}\text{C}$ et maintenons cette température. La vitesse de transformation est presque nulle (Figure 28) car l'écart avec 914°C est faible, donc on obtiendra un faible pourcentage de phase CC après un temps infini. Idem à une très basse température car la mobilité des atomes est alors quasi nulle. Par conséquent la courbe donnant l'apparition de 1% de phase CC montre deux asymptotes pour $T=914^{\circ}\text{C}$ et $T=-273^{\circ}\text{C}$. La vitesse de transformation CFC \rightarrow CC est maximale pour environ 700°C . Ceci donne la courbe en C de la Figure 27.

Même raisonnement pour la courbe à 99% de transformation.

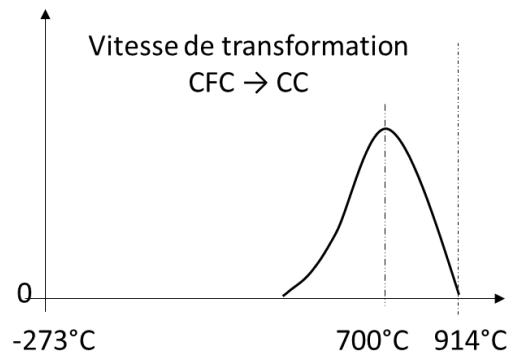


Figure 28. Transformation diffusive CFC \rightarrow CC dans le fer : influence de la température sur la vitesse de la transformation

En réalité le diagramme TTT de la Figure 27 est incomplet. En effet une transformation displacive est possible dans le fer, si l'on refroidit plus vite que 10^5°C/s . La martensite CC commence à apparaître aux joints de grains de la phase CFC (Figure 29). C'est la transformation martensitique du fer.

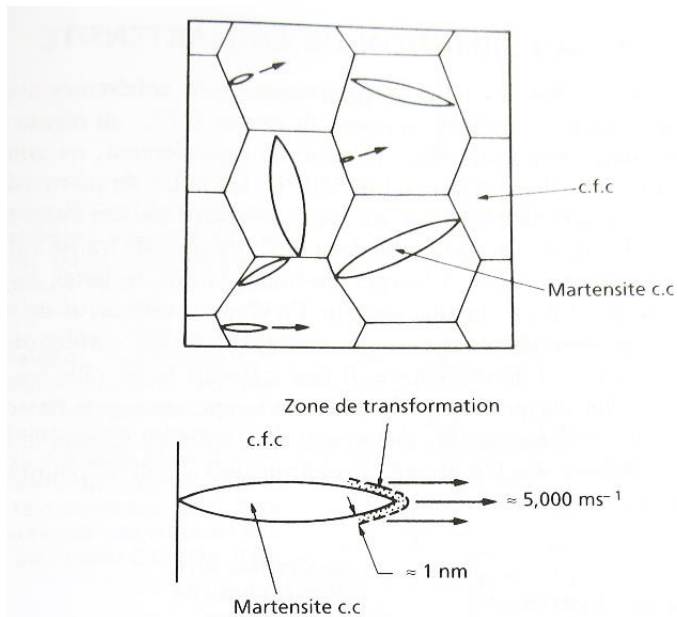


Figure 9.7 - La transformation displacive C.F.C. \rightarrow C.C. dans le fer. Les lattes C.C. germent aux joints de la phase C.F.C. et croissent presque instantanément. Les lattes cessent de croître quand elles atteignent l'autre joint de grains. Remarquez que dans n'importe quel matériau, une nouvelle phase obtenue par transformation displacive est appelée « martensite ». Les transformations displacives sont souvent appelées « transformations martensitiques ».

Figure 29. [13]

Ainsi le diagramme TTT global du fer pur est donné Figure 30.

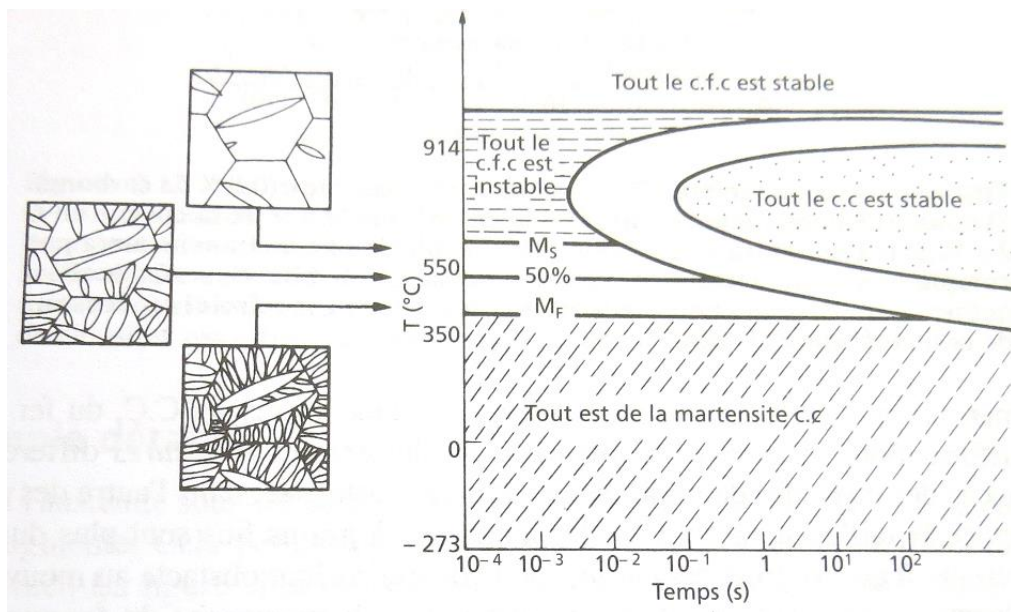


Figure 30. Diagramme TTT global du fer pur avec présence de la transformation displacive (martensitique) CFC \rightarrow CC aux fortes vitesses de refroidissement. La température d'initiation de la transformation martensitique est désignée par le point M_s pour martensite start et la température de fin par le point M_f pour martensite finish [13]

4.2 Diagramme TRC : Transformation en Refroidissement Continu

Les refroidissements rapides suivis d'un maintien isotherme, décrits par les diagrammes TTT, ne sont pas représentatifs des refroidissements réalisés en conditions industrielles.

On préfère alors les diagrammes TRC. Dans ces diagrammes, chaque courbe décrit un refroidissement à vitesse constante.

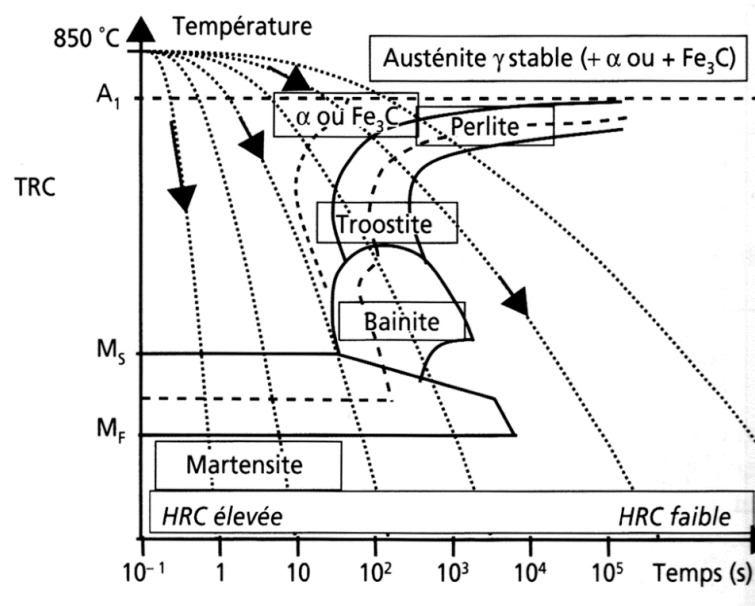


Figure 31. Exemple de diagramme TRC d'un acier [11]

7 Traitements thermiques des aciers

On parle de traitement thermique pour toute opération faite à chaud, dans le but de modifier la microstructure et donc les propriétés d'un matériau.

On distingue 2 types de traitements thermiques pour les aciers :

- Trempe : obtention d'une structure hors-équilibre à partir d'un état à l'équilibre
- Recuit : obtention d'une structure à l'équilibre à partir d'un état hors-équilibre

7.1 Trempe revenu

7.1.1 Introduction

A partir de l'état austénitique, un refroidissement lent mène à la production de ferrite et de cémentite, que l'on peut retrouver sur le diagramme de phases du système Fe-Fe₃C.

A partir de ce même état austénitique, un refroidissement rapide donne une nouvelle phase : la martensite (qui n'apparaît pas dans le diagramme de phases, puisque c'est une structure *hors équilibre*).

7.1.2 La transformation martensitique

C'est une transformation sans diffusion des atomes. La teneur en carbone de la martensite est donc identique à celle de l'austénite où elle a pris naissance.

Dans le cas du fer pur, le refroidissement lent donne la ferrite de réseau cubique centré, formé de grains équiaxes de grande taille. La martensite obtenue à partir du fer pur est également cubique centrée, mais se présente sous forme de lattes de très petite taille. Or on sait que les matériaux à grains fins sont plus durs car les joints de grains bloquent les dislocations. La martensite du fer pur a donc une dureté d'environ deux fois celle du fer cubique centré refroidi lentement.

Dans le cas des aciers (Fer + carbone), le refroidissement lent donne en partie de la perlite, une structure très fine car faite de lamelles de α et de lamelles de Fe₃C. La structure fine de la martensite n'explique donc plus l'augmentation de dureté par-rapport à cette perlite. En réalité, l'austénite contient beaucoup de C (jusqu'à 2%) et lors du refroidissement rapide, ces atomes de carbone n'ont pas le temps de diffuser vers les joints de grain pour former la cémentite Fe₃C. Ils restent bloqués dans la ferrite, créée à partir de l'austénite lors du refroidissement. Les sites interstitiels de la ferrite sont plus petits que les sites de l'austénite donc les atomes de carbone déforment la structure cubique centrée de la ferrite pour donner une structure quadratique centrée. Dans cette solution solide sursaturée en atomes de carbone, la mobilité des dislocations est réduite en entraînant un fort durcissement (augmentation de Re et de la dureté, diminution de l'allongement à rupture).

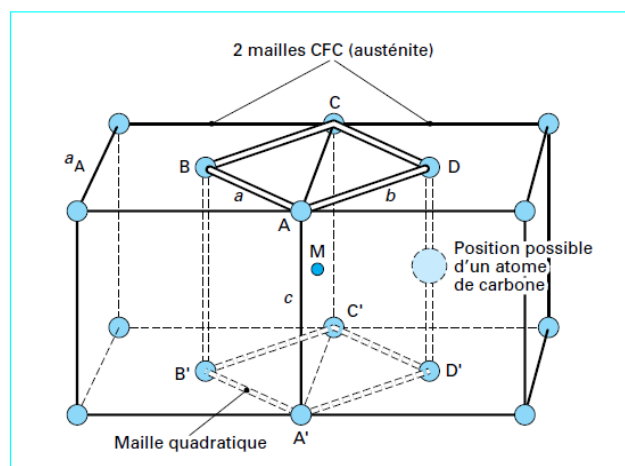


Figure 17 – Origine de la maille quadratique de la martensite selon Bain

Figure 32. La martensite (Réf Techniques de l'ingénieur M1115 [14])

7.1.3 Prédiction des évolutions microstructurales lors de la trempe d'un acier

On prédit la constitution obtenue à l'aide des diagrammes TTT et TRC propres à chaque acier.

7.1.4 Revenu

Après la trempe, la martensite est dure mais parfois trop fragile pour l'utilisation souhaitée. Par ailleurs, des contraintes résiduelles dues au choc thermique lors de la trempe et à la transformation martensitique sont souvent présentes. Un revenu permet d'avoir un acier moins fragile et une diminution des contraintes résiduelles.

Un revenu est une opération de traitement thermique par chauffage modéré, généralement en dessous de 727°C , soit A_{c1} , température inférieure d'existence de l'austénite.

Le revenu permet de revenir partiellement à un état d'équilibre (revenu ultime : recuit).

Remarque : un acier utilisé à l'état brut de trempe, donc sans revenu, peut subir une évolution de sa microstructure s'il est soumis à des températures modérées (température de service, ou lors d'un procédé de type traitement de surface par exemple) ou à des déformations plastiques lors d'une opération de mise en forme. On ne parle alors pas de revenu, mais de vieillissement. Cependant l'évolution de la microstructure est la même que lors d'un revenu.

On distingue plusieurs types de revenu :

- Revenu de relaxation ($180 < T < 250^{\circ}\text{C}$) : la dureté diminue et la résilience augmentent.
- Revenu de structure ($500 < T < 600^{\circ}\text{C}$ et toujours $< A_{c1}$) : le principe est de transformer la martensite en sorbite, phase montrant un meilleur compromis ténacité/dureté que la martensite. R_m , R_e , H_v diminue. $A\%$, résilience augmentent
- Revenu de durcissement secondaire ($450 < T < 600$) : ce revenu permet la précipitation de carbures dans l'austénite résiduelle puis la transformation de cette austénite en martensite. Cela concerne les aciers comportant certains éléments d'alliage type Cr Mo.....

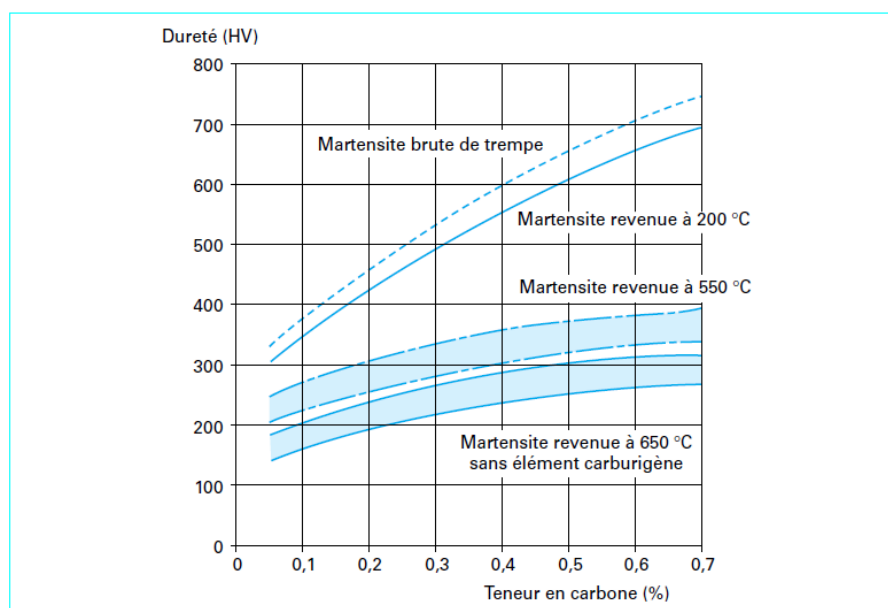


Figure A – Gamme de variation de la dureté des aciers pour trempe et revenu en fonction de leur état structural et de la teneur en carbone

Figure 33. Influence d'un revenu sur la dureté (Techniques de l'Ingénieur M1125 [15])

7.1.4.1 Cycle thermique typique d'un traitement de trempe revenu

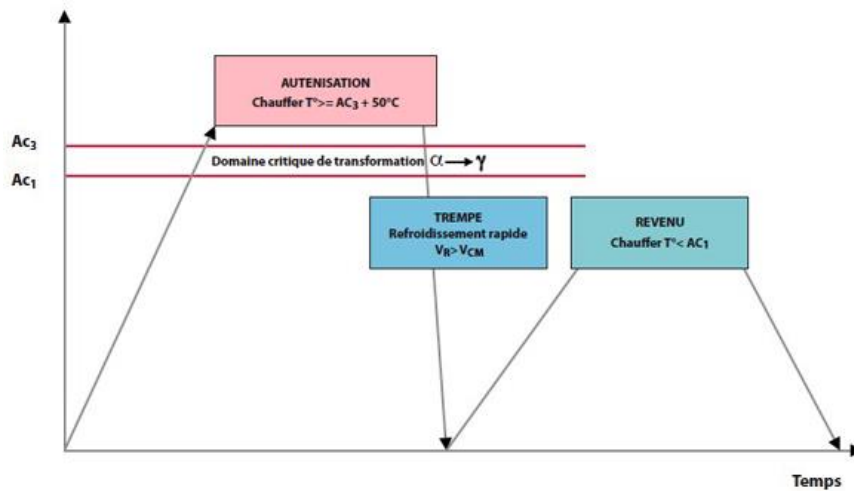


Figure 34. Cycle thermique typique d'un traitement de trempe revenu (www.a3ts.org)

7.2 Recuits

Un recuit est un traitement thermique consistant en un chauffage (450 à 1100°C pour les aciers), suivi d'un refroidissement lent.

Deux mécanismes interviennent, suivant la température de recuit.

- Pour $T < 0.5.T_{\text{fusion}}$ (exprimée en Kelvin), le recuit induit une restauration (diminution partielle de la densité de dislocations).
- A plus haute température, le recuit induit une recristallisation (création de nouveaux grains donc diminution importante de la densité de dislocations). La recristallisation se produit pour une température supérieure à environ $0.5.T_{\text{fusion}}$ (exprimée en Kelvin).

Les objectifs d'un recuit sont de

- faciliter un procédé (usinage, tréfilage...) par une diminution de la dureté,
- proposer un état normalisé (état de livraison de nombreux aciers),
- réduire les effets indésirables d'un procédé (écrouissage important, contraintes résiduelles d'usinage, de mise en forme, de soudage ou de moulage, ségrégation lors d'une solidification, présence d'hydrogène, grossissement de grain). Ce afin d'obtenir une meilleure tenue en fatigue, une meilleure tenue en corrosion et corrosion sous contrainte.

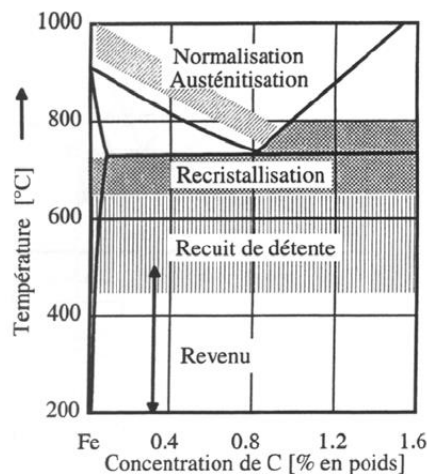


Figure 35. Domaine de températures de quelques recuits

Nom	Objectif	Mode opératoire
Affinage structural	Diminuer la taille de grain	Quelques min, 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique
Détensionnement	Diminuer les contraintes résiduelles <u>générées par des cycles thermiques</u> ayant créé des gradients thermiques et donc des déformations hétérogènes	Température très dépendante du type d'acier
Recristallisation	Diminuer <u>totalement</u> les contraintes résiduelles <u>générées par écrouissage</u> Générer une taille de grain "maîtrisée"	$T > 600^{\circ}\text{C}$ <i>Diminution des contraintes résiduelles par germination et croissance de nouveaux grains</i> La recristallisation se produit pour une température supérieure à environ $0.5.T_f$ (en Kelvin).
Restauration	Diminuer <u>partiellement</u> les contraintes résiduelles <u>générées par écrouissage</u> .	$T = 400-450^{\circ}\text{C}$ <i>Diminution des contraintes résiduelles par réarrangement des dislocations</i>
Déshydrogénation	Éliminer hydrogène présent dans l'acier	150 à 200 °C pendant 5 à 15 h
Normalisation	Homogénéiser la structure d'un acier non allié ou faiblement allié et affiner le grain	Austénitisation puis refroidissement à l'air libre

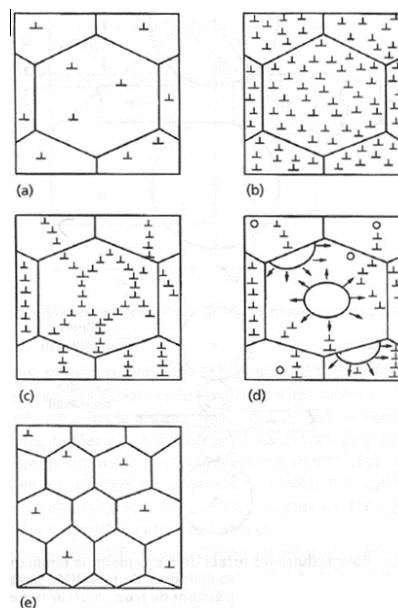
Tableau 8. Les différents types de recuits

7.2.1 Recuits avant / après opération de mise en forme

Les opérations de mise en forme par déformation plastique écrouissent la matière (passage de a à b sur la Figure 36). On effectue souvent un recuit pour diminuer cet écrouissage afin de faciliter l'opération de mise en forme suivante ou pour avoir une pièce finale plus ductile.

Dans un premier temps, lorsque la température augmente, le recuit induit une restauration : les dislocations se déplacent afin d'adopter une énergie minimale (étape c).

Si on augmente encore $T^{\circ}\text{C}$, le recuit induit une recristallisation : de nouveaux grains se forment à la place des anciens (étape d). La densité de dislocations diminue fortement. Dureté et ductilité retrouvent leur état initial, avant laminage (étape e).



[13]

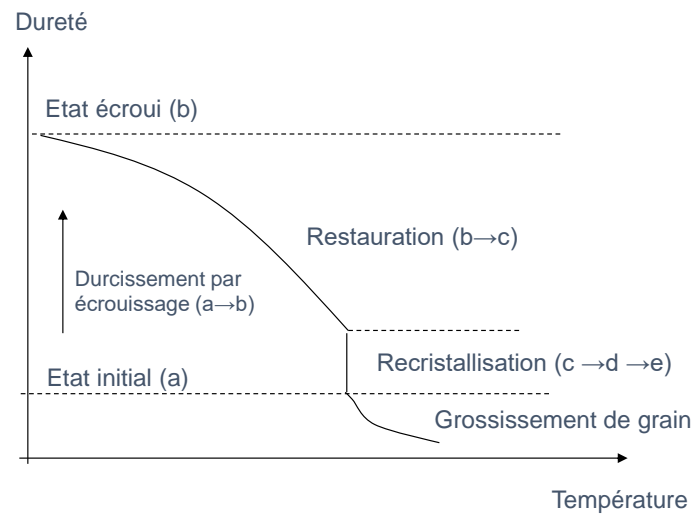


Figure 36. Recuits de restauration et recristallisation

8 Alliages d'aluminium

8.1 Introduction

On distingue les alliages d'aluminium de fonderie (obtenus par fonderie) et les alliages d'aluminium de corroyage. Ce cours traitera principalement des alliages d'aluminium de corroyage, c'est-à-dire obtenus par des procédés de déformation plastique (laminage.....).

8.2 Propriétés de l'aluminium

- métal blanc de bel aspect décoratif,
- faible masse volumique : densité 2,73
- faible température de fusion : environ 660 °C
- très bonne résistance à la corrosion uniforme (couche protectrice d'alumine Al_2O_3 en surface), mais alliages sensibles à la corrosion localisée (piqûres....) notamment en présence d'ions chlorure
- conductibilité thermique élevée : échangeurs thermiques
- conductibilité électrique élevée : conducteurs électriques
- grande résistance au froid : sa résistance mécanique augmente jusqu'à -250 °C
- amagnétique
- grande affinité avec l'oxygène : désoxydant
- pouvoir réflecteur élevé : éclairage
- très bonne malléabilité (limite d'élasticité 10 à 500 MPa) et grande ductilité : matériau idéal pour des procédés de mise en forme par déformation plastique
- précautions à prendre en soudage (courant alternatif pour détruire l'alumine en surface)

8.3 Alliages d'aluminium pour corroyage

Les alliages d'aluminium pour corroyage regroupent tous les alliages d'aluminium destinés à être mis en œuvre par déformation plastique (laminage, forgeage, emboutissage). Ces alliages sont regroupés par familles, ou séries, différenciées par leur principal élément d'alliage.

Exemple : EN AW 2024 – T351 : AW : aluminium wrought ; 2000 : famille ; 24 : nuance (pour les 2XXX à 8XXX) ou % d'aluminium après 99% pour les 1XXX ; T : Etat métallurgique ; 351 : Traitement thermomécanique subi

Série	Principal élément d'alliage	Utilisation
1000	Aucun. Au moins 99% d'aluminium	Emballage, électricité
2000	Cuivre Cu	Aéronautique
3000	Manganèse Mn	Emballage
4000	Silicium Si	
5000	Magnésium Mg	Emballage, transport routier et ferroviaire
6000	Magnésium et Silicium	transport routier et ferroviaire, Aéronautique
7000	Zinc	Aéronautique
8000	Autres	Emballage, Aéronautique

États métallurgiques des alliages d'aluminium de corroyage : cinq états fondamentaux

F : état brut de livraison : ce symbole s'applique aux produits fabriqués par déformation plastique sans que soient particulièrement maîtrisés les taux de durcissement ou d'adoucissement par déformation ou traitement thermique éventuel.

O : état recuit : c'est l'état le plus ductile. Il est généralement obtenu par le traitement dit de recuit, ce traitement n'étant suivi d'aucun écrouissage même par planage ou dressage.

H : état écroui et éventuellement partiellement adouci : ce symbole s'applique aux produits durcis par déformation avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel du métal.

W : état trempé non stabilisé : c'est un état métallurgique instable : il s'applique aux alliages qui ont subi une mise en solution suivie de trempe et qui continuent d'évoluer à la température ambiante.

T : état durci par traitement thermique : les traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou partie des traitements de mise en solution, trempe, maturation, revenu avec application éventuelle de déformations plastiques.

5 Durcissement des alliages d'aluminium de corroyage

Les alliages d'aluminium sont appelés des alliages légers (comme le titane ou encore le magnésium). Les alliages légers tirent leur résistance du durcissement de solution solide, et/ou du durcissement par précipitation et/ou du durcissement par écrouissage.

On distingue les alliages d'aluminium de fonderie et les alliages d'aluminium de corroyage. Le corroyage désigne l'ensemble des opérations de mise en forme par déformation plastique.

On peut regrouper les alliages d'aluminium pour corroyage dans deux groupes selon le type de durcissement possible.

	Alliages à durcissement structural (à traitement thermique, alliages trempants)	Alliages à durcissement par écrouissage (sans traitement thermique, non trempants)
Série	2000 6000 7000	1000 3000 4000 5000

Tableau 9. Les alliages d'aluminium. Classement par comportement au durcissement

5.1 Durcissement de solution solide

Tous les alliages d'aluminium pour corroyage sont durcis au moins en partie par un mécanisme de solution solide mais ce mécanisme est prépondérant chez les 5000.

Alliage	Concentration massique en Mg	Re (MPa)
5005	0.8	40
5050	1.5	55
5052	2.5	90 (sursaturé)
5454	2.7	120 (sursaturé)
5083	4.5	145 (sursaturé)
5456	5.1	160 (sursaturé)

Tableau X. Durcissement de solution solide des alliages 5000 [13]

5.2 Durcissement par précipitation (durcissement structural)

5.2.1 Préliminaire : notion de précipité cohérent et incohérent

La figure ci-dessous illustre la notion de précipité cohérent et incohérent. Le caractère cohérent ou incohérent d'un précipité a une influence sur le mécanisme (cisaillement ou contournement) qui permet aux dislocations de se déplacer lors de la rencontre d'un précipité.

De plus, la rupture des interfaces incohérentes, par décohésion, s'amorce facilement : ceci entraîne une perte de ductilité (A%).

5.2.2 Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium

Un alliage d'aluminium dont la solubilité des éléments d'addition décroît fortement avec la température, tel que ci-dessous, est susceptible de montrer un durcissement par précipitation. On traitera ce durcissement par l'intermédiaire d'un exemple : le durcissement par précipitation des alliages de la série 2000 (Al-Cu).

Ci-dessous est présenté le diagramme de phases du système Al-Cu.

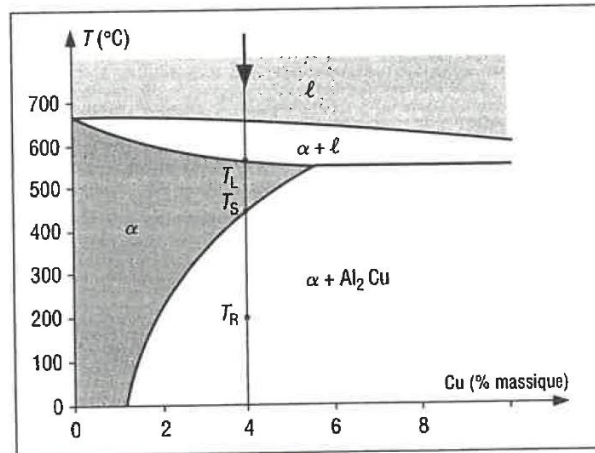


Fig. 5. Diagramme d'équilibre Al-Cu

Figure 37. Diagramme de phases Al-Cu [16]

Entre 500 et 580°C, l'alliage est monophasé : le cuivre forme dans l'aluminium une solution solide désordonnée de substitution d'atomes de Cu dans la matrice aluminium.

En dessous de 500°C, l'alliage devient biphasé $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$. Quand la température du mélange diminue, la proportion de Al_2Cu augmente et à température ambiante, on a 93% de phase α pour 7% de Al_2Cu . La Figure 38 montre ce que l'on obtiendrait en refroidissant lentement de 500°C à l'ambiante. Ce refroidissement lent donnerait de gros précipités Al_2Cu distants les uns des autres. Les dislocations contournent facilement ces précipités : le durcissement obtenu est faible. Par contre, dans le cas d'un refroidissement rapide, la structure obtenue est plus fine. En effet le cuivre a peu de temps pour diffuser et former des précipités. Les précipités sont petits, nombreux et rapprochés. Les dislocations sont entravées dans leur mouvement par ces précipités : l'alliage est durci.

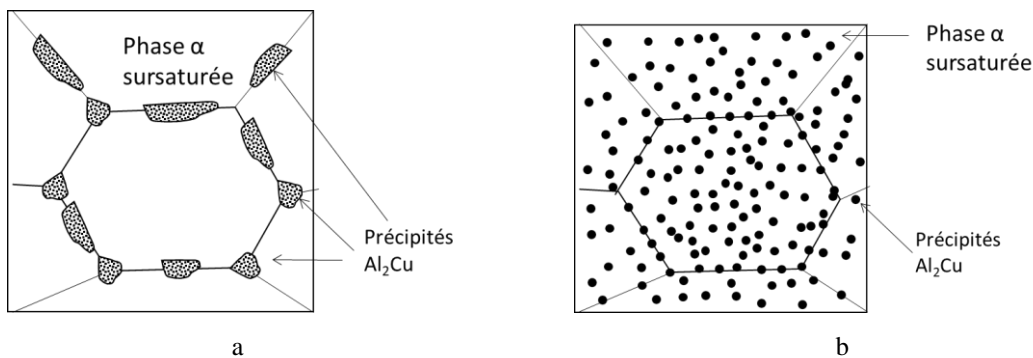


Figure 38. a/ Précipités de Al_2Cu après refroidissement lent b/ Structure d'un Al-Cu après trempe. Fine précipitation de Al_2Cu

Cependant, il y a une limite à ce durcissement. Si l'on refroidit trop vite, le cuivre n'a pas le temps de diffuser et reste entièrement figé au sein de la matrice (pas de précipitation, on obtient une solution solide sursaturée). Afin de bien maîtriser le durcissement obtenu, ce type d'alliage est donc trempé (on fige totalement le cuivre dans la matrice aluminium), puis on réalise un revenu : on chauffe le matériau afin de créer lentement ces précipités. Le chauffage se fait à une durée et une température adaptées à la taille des précipités souhaitée, et donc au niveau de durcissement souhaité.

Dans la pratique, on réalise le traitement de la Figure 39 :

- Mise en solution à 550°C, le cuivre est entièrement dissout dans la matrice d'aluminium
- Refroidissement rapide par trempe à l'eau ou huile. On obtient une solution solide sursaturée.

- Revenu : maintien à haute température (100-200°C) pendant quelques heures. Les précipités Al_2Cu se reforment, petits et rapprochés. On arrête le traitement quand on a exactement le durcissement souhaité.

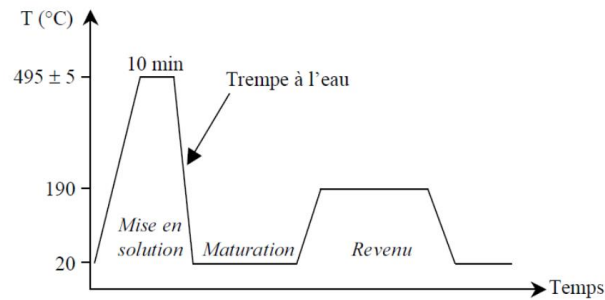


Figure 39. Traitement thermique de durcissement appliqué aux alliages AlCu

Au niveau de la microstructure, le diagramme TTT (Figure 40) et la description du traitement de trempe – revenu sont trop simplistes. En réalité on ne crée pas directement les précipités Al_2Cu à partir de la solution solide sursaturée : la précipitation de Al_2Cu lors du revenu se produit en plusieurs étapes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

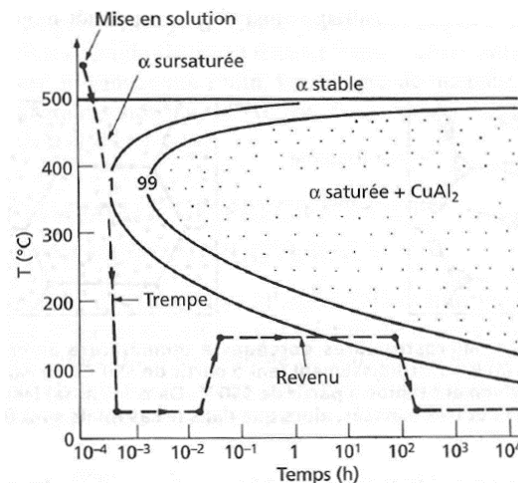


Figure 40. Diagramme TTT. Evolutions métallurgiques lors du traitement thermique de durcissement appliqué aux alliages AlCu [13]

Etape a. Les atomes de Cu sont figés dans la solution solide d'aluminium au moment de la trempe.

Etape b. Des zones de Guinier Preston, sous forme de disques, germent à partir de la solution solide.

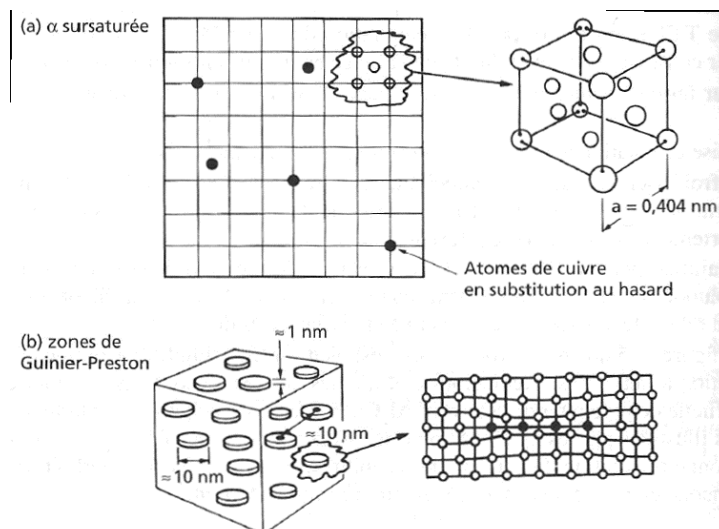


Figure 41. Zones GP dans le système Al-Cu [13]

Etape c. Certaines zones GP grandissent et forment les précipités θ'' , certaines se dissolvent pour libérer du cuivre et permettre la formation de θ'' . Ils sont cohérents avec la matrice, mais les côtés des disques génèrent des contraintes de cohérence du fait de l'écart paramétrique entre les paramètres de maille.

Etape d. Les précipités θ' germent sur les dislocations de la matrice. Les θ'' se dissolvent. Les faces sont cohérentes, mais pas les côtés.

Etape e. La phase d'équilibre θ Al_2Cu germe aux joints de grains et aux interfaces $\theta'/\text{matrice}$. Les θ' se dissolvent et libèrent du cuivre pour alimenter Al_2Cu . Al_2Cu est incohérent avec la matrice donc il ne forme pas de disque, mais des globules.

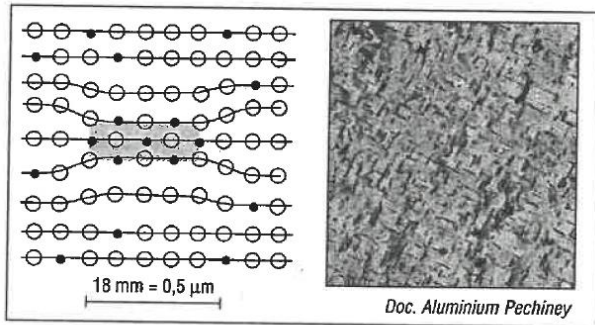


Fig. 8. Phase θ'' dans un alliage $[\text{AlCu4}]$ revenu 24 h à 180°C

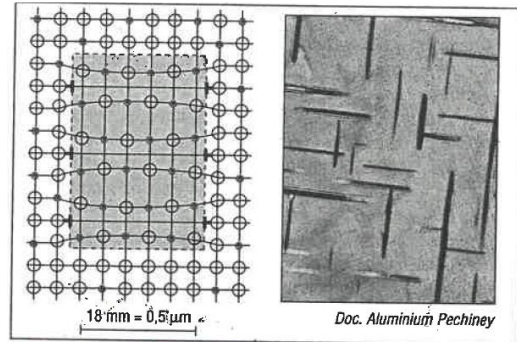


Fig. 9. Phase θ'' dans un alliage $[\text{AlCu4}]$ revenu 24 h à 250°C

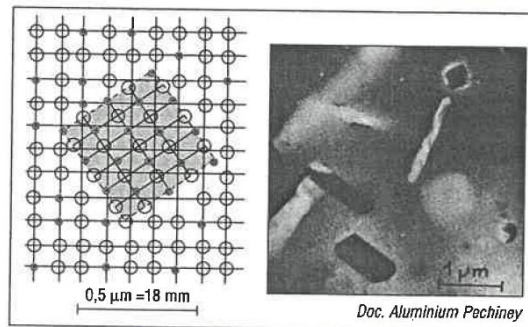


Fig. 10. Phase θ dans un alliage $[\text{AlCu4}]$ sur-revenu

Figure 42. Evolution des précipités lors de la trempe - revenu des alliages AlCu [16]

Lors du revenu, 4 mécanismes du durcissement interviennent (Figure 43) :

1. Durcissement de solution solide. En début de revenu, l'alliage est durci par le cuivre en solution solide sursaturée. Quand les zones GP se forment, le cuivre disparaît de la solution solide et le durcissement de solution solide disparaît.
2. Durcissement par contraintes de cohérence. Les zones GP et les précipités θ'' sont cohérents avec la matrice. Cela génère de fortes déformations dans le réseau cristallin et empêche le mouvement des dislocations, mais ces précipités restent de petite taille, donc aisément cisailables par les dislocations.
- 3 et 4. Durcissement par précipitation. Les précipités s'opposent au passage des dislocations mais cela a une efficacité limitée car ils sont incohérents avec la matrice. En effet les dislocations les cisailent (contrainte de cisaillement) ou les contournent (contrainte de contournement).

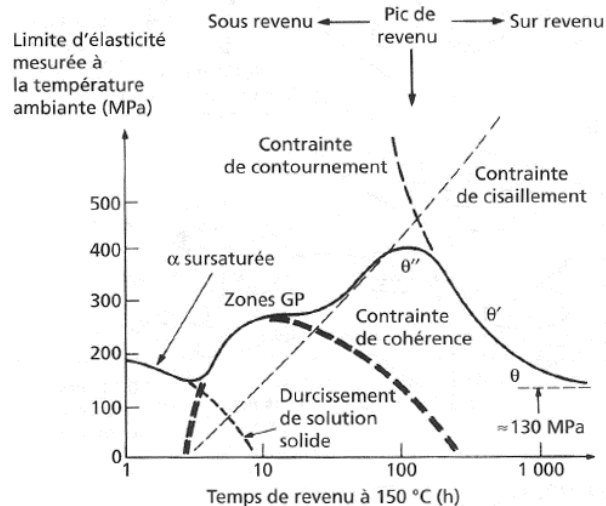


Figure 43. Mécanismes de durcissement des alliages AlCu [13]

Le Tableau 11 résume les possibilités de durcissement par précipitation des alliages dits trempants.

Série	Composition approximative	Refroidi lentement	Trempé revenu
2000	Al, 4Cu, Mg, Si, Sn	130	465
6000	Al, 0,5Mg, 0,5Si	85	210
7000	Al, 6Zn, Mg, Cu, Mn	300	570

Tableau 11. Possibilités de durcissement des alliages trempants : limites d'élasticité en MPa

5.3 Durcissement par écrouissage

Le tableau ci-dessous illustre les possibilités de durcissement par écrouissage des alliages d'Alu dits non trempants.

Alliage	Re (MPa)		
	Recuit	Demi dur	Dur
1100	35	115	145
3005	65	140	185
5456	140	300	370

Tableau 12. Possibilités de durcissement par écrouissage des alliages d'aluminium non trempants

8.4 Liens utiles

- www.world-aluminium.org
- <http://aluminium.matter.org.uk>

9 Matériaux Métalliques pour l’emballage



9.1 Généralités

9.1.1 Les emballages métalliques par secteur

- Emballages pour agroalimentaire (boissons comprises) : 70 %
- Emballages pour produits industriels (chimie, peinture, vernis, lubrifiants, etc.) : 12 %
- Boîtiers aérosols : 9 %
- Bouchage : 9 %

9.1.2 Types d’emballages, avantages, inconvénients

Types d’emballage	Exemples de produits
Boîtes pour conserves appertisées	Légumes, Plats cuisinés, Viandes et pâtés, Poissons, Fruits, Aliments pour animaux
Boîtes pour produits alimentaires non conserves	Lait en poudre, Biscuiterie, Sirops
Boîtes boissons	Boissons gazeuses, Bière
Emballages pour produits chimiques et industriels	Peintures et vernis, Produits chimiques, Produits pharmaceutiques, Colles, Produits pétroliers, Encres
Bouchages	Bocaux en verre,....
Récipients pour aérosols	Cosmétiques, Produits d'entretien, Produits alimentaires, Insecticides, Produits pharmaceutiques

Avantages des emballages métalliques	Inconvénients des emballages métalliques
Résistance mécanique (contraintes, chocs, pression interne) Étanchéité aux gaz, à la lumière, aux micro-organismes Bonne compatibilité avec la plupart des produits Recyclables Conductivité thermique Durée de conservation importante sans besoin de réfrigération Image auprès des consommateurs Manutention plus aisée que pour le verre	Poids Image auprès des consommateurs : produit moins « high-tech »

9.2 Aciers pour l'emballage

9.2.1 Historique

Le fer blanc est apparu au moyen âge mais il fut longtemps réservé aux ustensiles ménagers.

En 1810, Nicolas Appert [17] publie son ouvrage sur le procédé d'appertisation des aliments. Les emballages utilisés par Appert étaient en verre et montraient des problèmes d'étanchéité. Les Anglais puis les Français ont vite identifié le fer blanc comme matériau idéal d'un point de vue étanchéité. Vers 1820, les premières boîtes de conserve en fer blanc apparaissent. Au cours du XIXe siècle, l'industrie de la conserve apparaît principalement aux USA pendant la guerre de sécession.

Au milieu du XXe siècle (avant la seconde guerre mondiale), l'étamage électrolytique et l'amélioration du laminage à froid (bandes continues) permettent la fabrication en grande série et augmentent la fiabilité des conserves.

La seconde guerre mondiale, avec le besoin d'alimenter les armées sur les champs de bataille, augmente encore le développement de l'industrie de la conserve.

Les fers chromés sont apparus il y a plusieurs décennies. Le coût de l'étain, variable, incite le Japon à développer le fer chromé (couvercles, fonds de boîtes), aussi appelé « tin free steel » : acier sans étain.

On distingue les aciers pour fûts (tôle en acier doux, laminée à froid et recuite) et les aciers pour emballages légers (Fer noir, Fer blanc, Fer chromé, Acier inoxydable)

9.2.2 Fer noir

Le fer noir est la bande d'acier avant étamage.

Blackplate : Low-carbon mild steel which has been subjected to cold reduction, is used mainly in the manufacture of tinplate and electrolytic chromium/chromium oxide coated steel and has a minimum iron content greater than 95% by mass (EN10334)

9.2.3 Fer blanc

Le fer blanc est une feuille d'acier doux d'épaisseur inférieure à 0,49mm, recouverte électrolytiquement d'étain sur ses deux faces [18]. La présence d'un alliage Fe-Sn à l'interface entre le fer et l'étain permet une bonne adhérence du revêtement d'étain.

Le fer-blanc représente plus de 80 % des aciers appelés aciers pour emballages.

Tinplate: Cold-rolled blackplate coated on at least one side with a layer of tin. The mass of the coating can reach up to 15.1 g/m² (EN10333)

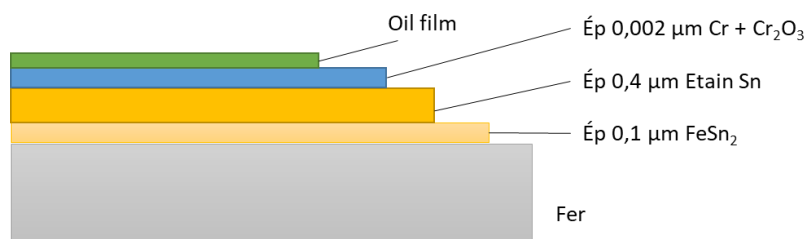


Figure 44. Fer blanc [19]

9.2.4 Fer chromé : acier revêtu de chrome et d'oxyde de chrome

Le fer chromé est une feuille d'acier revêtue d'un film de chrome et oxydes de chrome. Le fer chromé est utilisé pour les couvercles, fonds pour boîtes 3 pièces et boîtes embouties pour produits peu acides.

ECCS: Electrolytic chromium/chromium oxide coated steel: Cold-rolled blackplate that is coated on both sides with a layer of chromium. The mass of the coating (total chromium) can reach 140 mg/m² per side (EN10335).

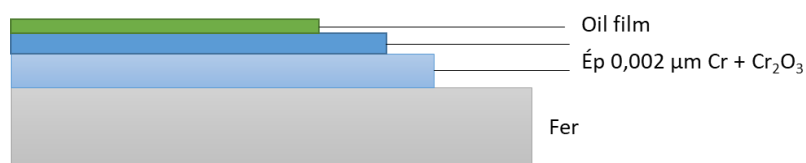


Figure 45. Fer chromé [19]

9.2.5 Aciers inoxydables

La présence de chrome (au moins 10 à 12%) permet la création en surface d'une couche d'oxyde de chrome Cr₂O₃ qui protège les aciers inoxydables de la corrosion uniforme. On parle aussi de couche de passivation. L'acier inoxydable s'est en réalité naturellement oxydé.

Cependant si la couche de passivation est mal formée (présence d'impuretés lors de la formation de cette couche), ou si elle est rayée une très forte corrosion localisée peut avoir lieu.

Par ailleurs les aciers inoxydables sont très sensibles aux milieux chlorurés.

Les nuances principalement utilisées sont :

- X2CrNi18-10 (304L) : C : 0,02 %, Cr : 17 à 19 %, Ni : 9 à 11 %
- X2CrNiMo17-12 (316L) : C : 0,02 %, Cr : 16-18 %, Ni : 11-13 %, Mo : 2 %, utilisés dans les industries chimiques, pétrolières, agro-alimentaires, pour les cuves de vins, etc...

9.3 Alliages d'aluminium pour l'emballage

Les alliages d'aluminium sont utilisés pour les emballages rigides, les emballages semi-rigides et les emballages souples.

- Boîtes conserves : Al-Mg 5000 (5052, 5006), Al-Mn 3000 (3004), Al-Mn-Mg
- Corps de boîtes boissons : Al-Mn 3000 (3004-3005-3104)
- Capsules et Emballages souples : 1000, 3000 et 8000
- Boîtiers aérosols : 1050
- Couvercles de boîtes boissons : Al-Mg 5000 (5182)

9.4 Du minerai aux bandes d'acier et d'aluminium

9.4.1 Notions préliminaires théoriques : le laminage

Le laminage est un procédé de mise en forme par déformation plastique, permettant de réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils axisymétriques tournant autour de leur axe. On distingue deux groupes de produits obtenus par laminage : Les produits longs et les produits plats. Le laminage peut s'effectuer à chaud ($T > 0,3T_f$), ou à froid ($T < 0,3T_f$) [20].

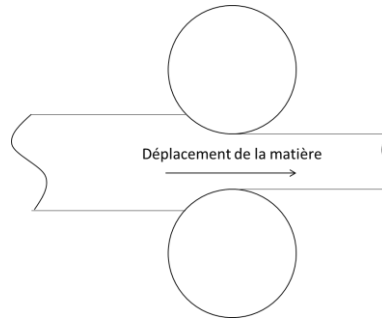


Figure 46. Principe du laminage

9.4.2 Elaboration des bandes d'acier et d'aluminium

9.4.2.1 Introduction

Dans cette partie nous décrivons l'élaboration des aciers pour l'emballage, soit la réalisation de bobines et feuilles. Ces bobines et feuilles seront ensuite travaillées pour former les emballages métalliques (voir § Fabrication des emballages métalliques).

Hormis l'étamage et le chromage, spécifiques au fer blanc et au fer chromé, le processus décrit ici est commun à l'ensemble des produits plats en aciers obtenus par laminage continu. L'étape d'étamage, la résistance à la corrosion demandée et les besoins de formabilité importante du fer blanc imposent tout de même quelques spécificités dans le cycle d'élaboration. Les aciers pour l'emballage font donc partie de la grande famille des produits métallurgiques obtenus par laminage.

9.4.2.2 Elaboration des bobines et feuilles d'acier pour l'emballage

Voir Techniques de l'Ingénieur [21]

Etape 1. Haut fourneau

Etape 2. Métallurgie en poche

Etape 3. Coulée continue

[22]Le principe de ce procédé est de former, dans une lingotière ouverte à ses deux extrémités et refroidie, une couche de métal solide suffisamment résistante pour enfermer le métal liquide, et ce de façon continue. Cette couche solide avance, se détache de la lingotière, et on termine la solidification en aspergeant l'acier d'eau. A l'issue de la coulée, l'acier se présente sous forme de billette, de bloom ou de brame.

Etape 4. Laminage à chaud (Techniques de l'Ingénieur [23])

Etape 5. Décapage

Etape 6. Laminage à froid

Etape 7. Recuit (Techniques de l'Ingénieur [24])

Etape 8. Skin pass (écrouisseur)

Etape 9. Etamage ou chromage

9.4.2.3 Elaboration des bandes d'aluminium pour l'emballage

Les étapes d'obtention de bobines d'aluminium à partir du minerai sont les suivantes :

- L'alumine Al_2O_3 est tout d'abord extraite du minerai de bauxite par procédé Bayer (dissolution de l'alumine de la bauxite par la soude).
- L'aluminium est ensuite obtenu par électrolyse à partir de l'alumine : $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Al} + 3/2 \text{O}_2$
- La composition chimique de l'alliage est générée dans un four en ajoutant les éléments nécessaires
- La coulée est ensuite réalisée (coulée semi-continue ou coulée continue).
 - Coulée semi-continue : on réalise des plaques d'aluminium qui seront transformées en bandes par laminage
 - Coulée continue : on réalise directement des bandes de plusieurs mm d'épaisseur.

La solidification se produit lors de la coulée.

- Laminage à chaud : on peut descendre jusqu'à 0,7mm (première épaisseur prise par le laminage à froid). Après laminage à chaud et avant laminage à froid, un recuit est nécessaire.
- Laminage à froid : le laminage à froid apporte une épaisseur finale très précise, une bonne planéité, un écrouissage contrôlé, un état de surface correct. Les tôles ont un aspect plus brillant
- Recuit final : ce recuit élimine l'huile de laminage en surface, élimine les déformations de laminage et l'écrouissage du matériau dû au laminage. Le matériau retrouve une ductilité adéquate pour les opérations ultérieures de formage des emballages.

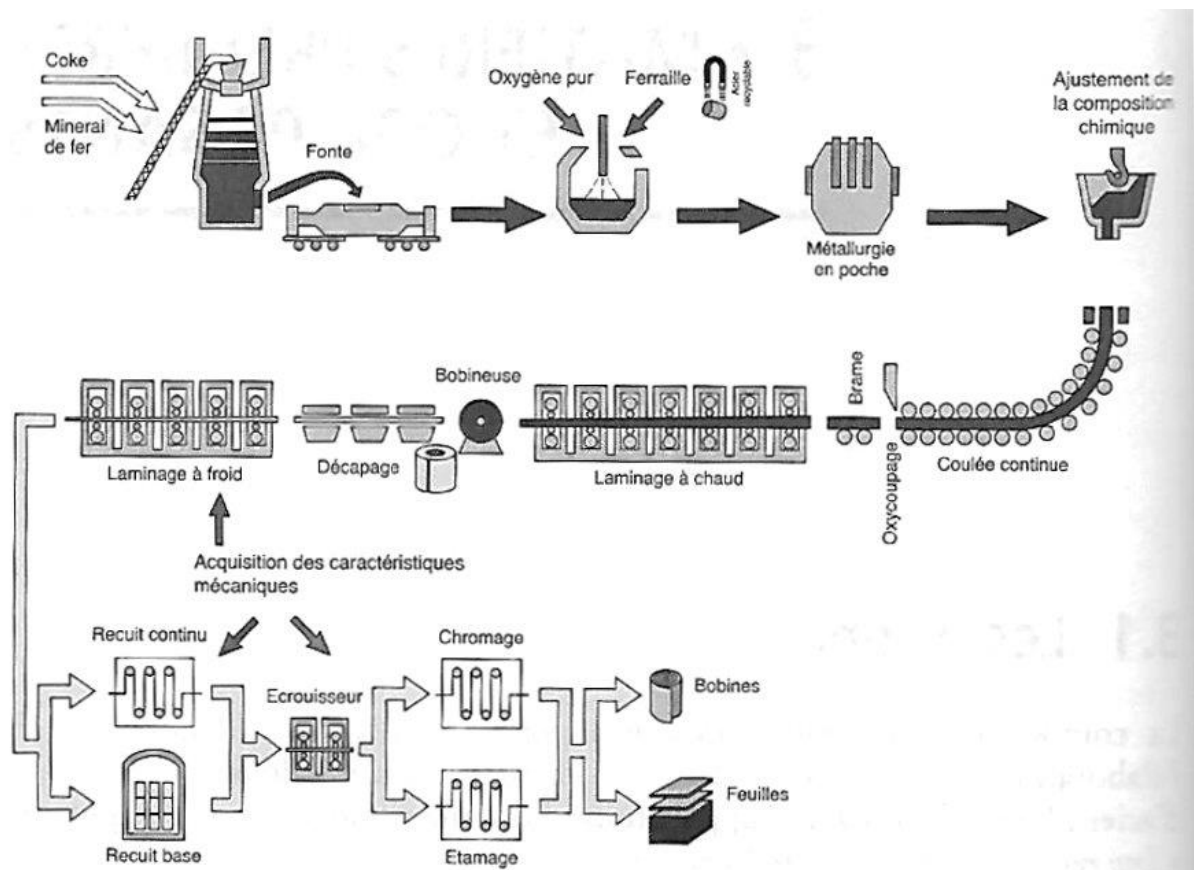


Figure 47. Elaboration des bobines et feuilles d'acier pour l'emballage [25]

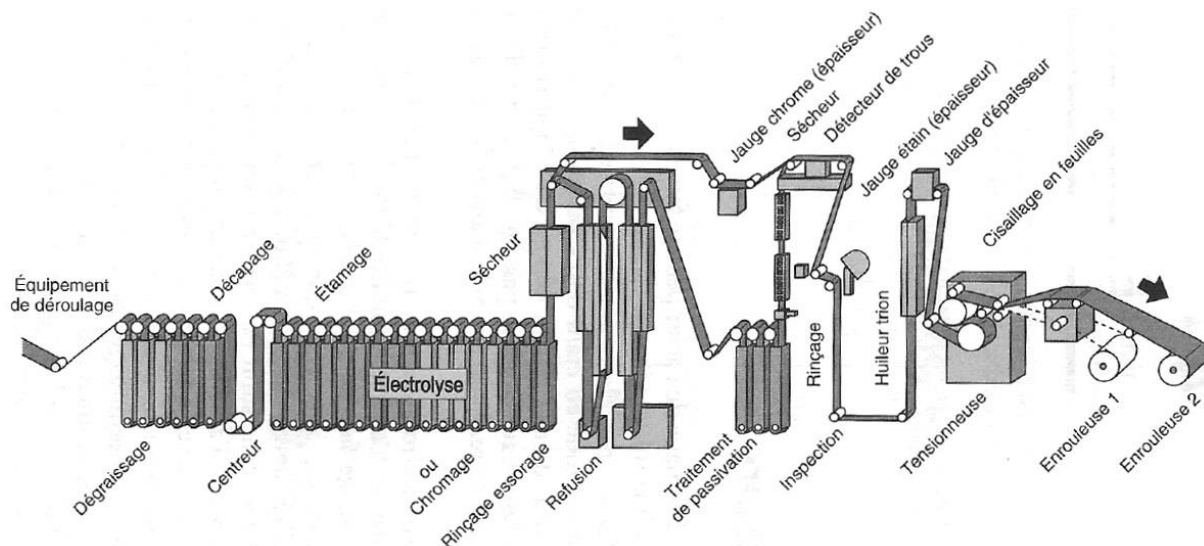


Figure C.10 – Ligne de revêtement électrolytique de l'acier (étamage et chromage)

Figure 48. Etape d'étamage ou chromage [25]

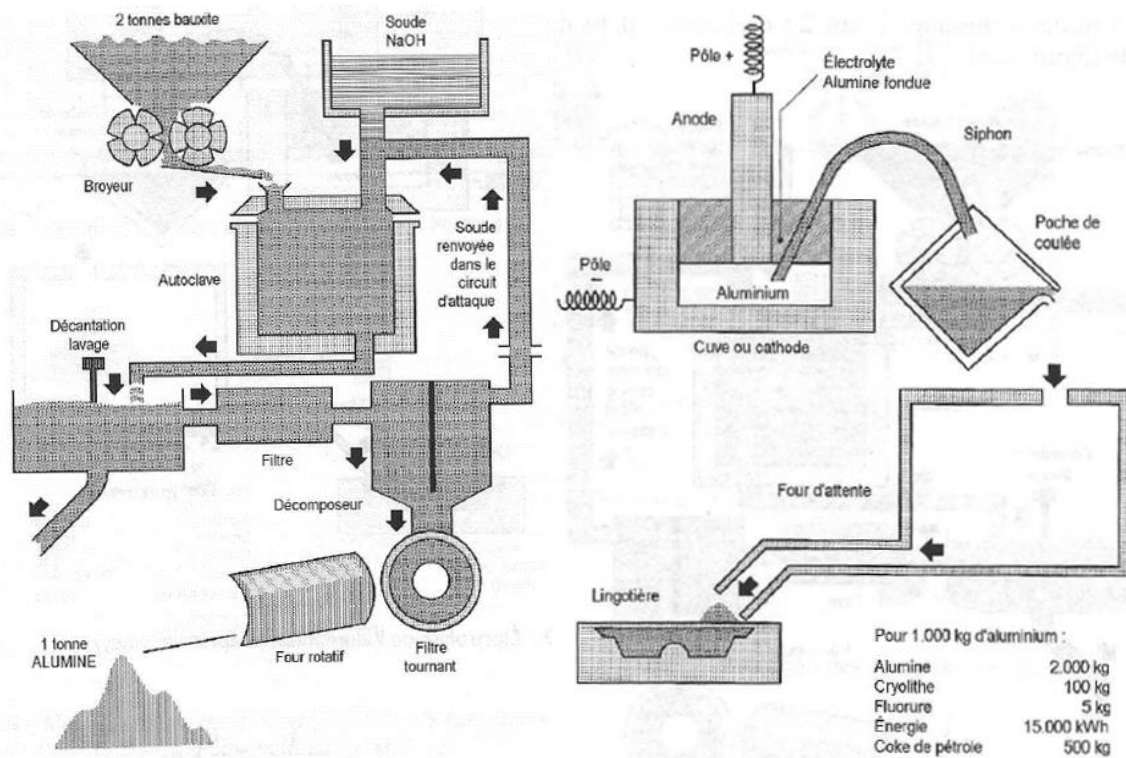


Figure 49. [25]

10 Matériaux Métalliques pour l'emballage

Partie 2

10.1 Mise en œuvre des bandes : fabrication des emballages

10.1.1 Notions préliminaires théoriques

10.1.1.1 Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de mise en forme qui consiste à fabriquer une pièce à partir d'un flan de faible épaisseur ($< \text{à quelques mm}$). Le flan est découpé dans une tôle laminée.

Un outil appelé poinçon emboutit le flan pour lui faire prendre la forme d'une matrice. Un autre outil appelé serre flan permet de retenir la tôle et d'ajuster ainsi la proportion entre allongement et écoulement de la matière le long du poinçon. L'emboutissage peut aussi être réalisé sans serre-flan.

Une gamme d'emboutissage définit l'ensemble des opérations d'emboutissage nécessaires à l'obtention d'une pièce.

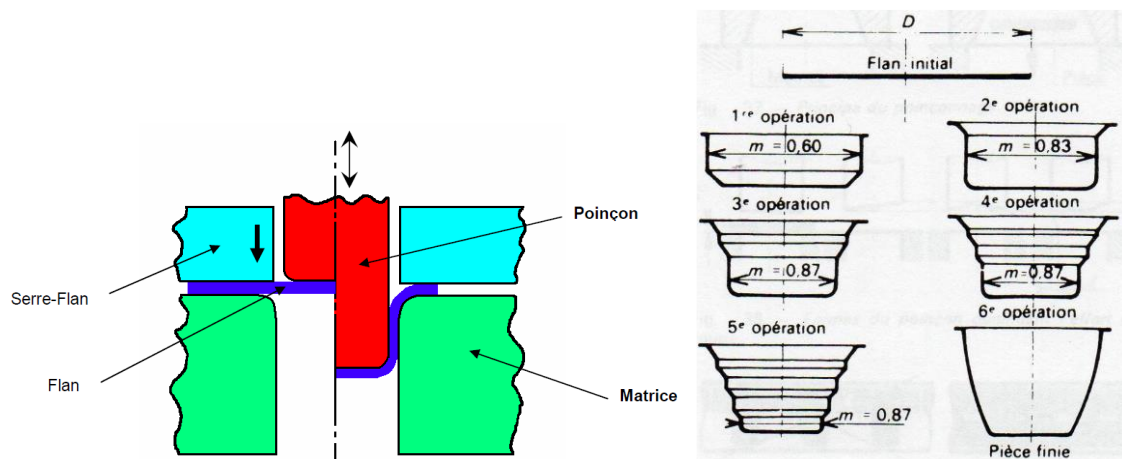


Figure 50. Emboutissage d'une tôle laminée (flan) et Exemple de gamme d'emboutissage typique

Les paramètres intervenant dans l'opération d'emboutissage sont nombreux : géométrie de la pièce à réaliser, effort serre flan, vitesse d'emboutissage, matériau, température, lubrification, rugosité des surfaces, revêtement,

On distingue plusieurs modes de déformation du flan :

Déformation par rétreint : le serre flan n'applique pas d'effort sur le flan. Ce dernier glisse le long de la matrice pour créer la forme voulue. Il n'y a donc pas d'étirement de la matière, seulement un écoulement.

Déformation par expansion : le serre flan applique une force de serrage sur le flan. Ce dernier est alors étiré pour créer la forme voulue : c'est l'expansion. Dans ce mode il y a diminution d'épaisseur.

Déformation par traction large (aussi appelée traction plane) : la section a une largeur constante du à la présence proche du poinçon. Toute la déformation se fait dans la longueur et l'épaisseur.

Déformation par traction simple (aussi appelée traction uniaxiale) : on a seulement une déformation imposée, les deux autres déformations sont libres. Ce mode est celui rencontré dans un essai de traction.

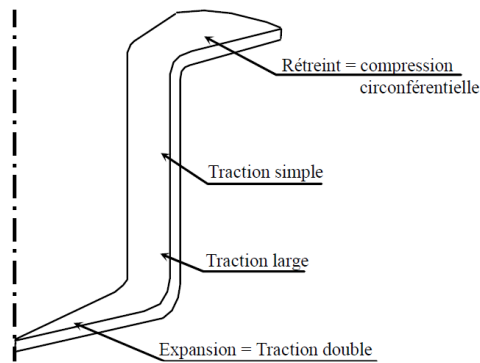


Figure 51. Modes de déformation en emboutissage [26]

Sur le diagramme précédent, on peut placer les points correspondant à la rupture sur un diagramme ϵ_1 - ϵ_2 (déformations dans le plan du flan), déterminés sur pièces embouties typiques de laboratoire, ou sur pièces réelles. L'ensemble de ces points est la courbe limite de formage du matériau.

Au lieu de tracer les points à rupture, il est plus pertinent de tracer les points à l'apparition de la striction. La plupart des courbes limites de formage sont donc définies pour la striction au lieu de la rupture.

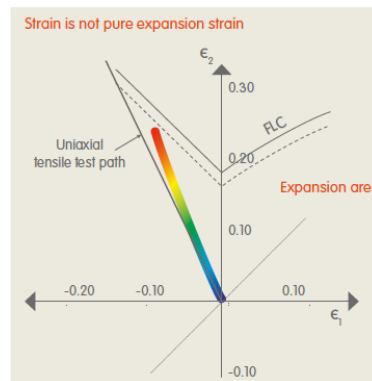


Figure 52. Exemple de courbe limite de formage (doc ARCELOR)

Soit un flan et un poinçon de diamètres donnés. Le rapport d'emboutissage est défini par :

$$\beta = \frac{\text{diamètre du flan}}{\text{diamètre du poinçon}}$$

Quand β augmente, la difficulté de réaliser l'opération augmente car il y a plus de métal à rétreindre. L'effort de rétreint augmente et donc le risque de casse. La compression circonférentielle augmente et donc les risques de plis.

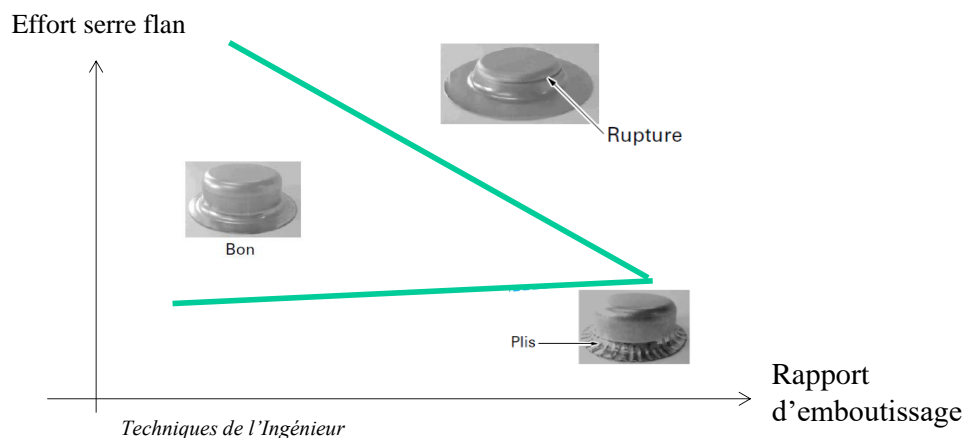


Figure 53. Mise en évidence du rapport limite d'emboutissage

Remarque : le rapport limite d'emboutissage permet avant tout de chiffrer et comparer entre elles l'aptitude de plusieurs matériaux à l'emboutissage en rétreint.

Les paramètres matériau importants en emboutissage sont : coefficient d'écrouissage n , coefficients de Lankford r , R_e , R_m , Allongement à rupture A_r , Allongement de striction A_s .

Ces paramètres conditionnent la faisabilité d'une opération et les paramètres du procédé (efforts,).

- Limite d'élasticité

Une limite d'élasticité demande de plus grands efforts et de plus grandes déformations pour atteindre la zone de plastification.

Par conséquent :

Expansion et traction plane : baisse de la formabilité

Rétreint : effets antagonistes qui tendent à annuler l'influence de la limite d'élasticité

- Limite à rupture R_m

Dans un premier temps, les efforts d'emboutissage augmentent avec R_m .

Dans un second temps, il est plus pertinent de considérer le rapport R_e/R_m que la valeur seule de R_m . L'important est en effet que R_e soit aussi faible que possible par-rapport à R_m .

- Coefficients d'anisotropie r (ou de Lankford)

L'aptitude d'un métal à présenter, sous l'effet d'un effort de traction, une déformation dans le sens de la largeur plutôt que dans celui de l'épaisseur s'apprécie à l'aide du coefficient d'anisotropie r .

Une tôle pour emboutissage est anisotrope car elle a été laminée. On introduit donc 3 coefficients : r_0 , r_{45} et r_{90} .

Par définition :

$$r_\alpha = \frac{\varepsilon_l(\alpha)}{\varepsilon_e(\alpha)}$$

α est l'angle fait par le direction de l'échantillon avec la direction de laminage.

ε_l et ε_e sont respectivement les déformations dans la largeur et dans l'épaisseur, mesurées lors d'un essai de traction.

Pour une pièce cylindrique, on peut définir un coefficient d'anisotropie moyen, qui caractérise alors l'aptitude de la tôle à s'opposer à l'amincissement :

$$r_{\text{moy}} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4}$$

Le coefficient d'anisotropie moyen caractérise l'aptitude du métal à travailler en rétreint.

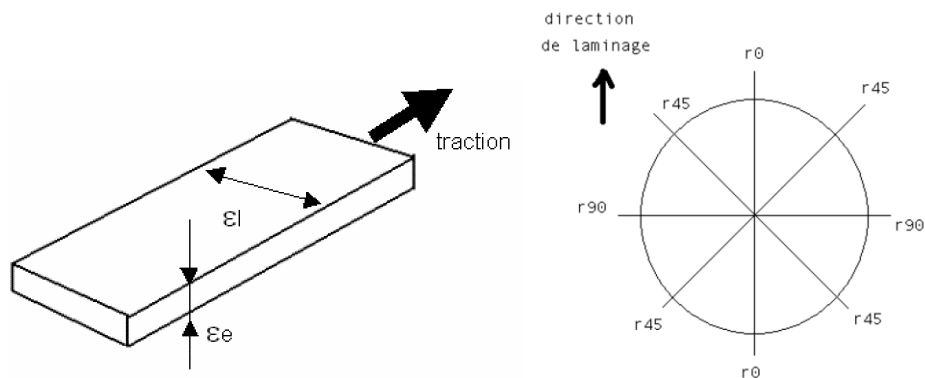


Figure 54. Coefficient d'anisotropie

- Coefficient d'écrouissage n

L'écrouissage du matériau peut être modélisé par la loi d'Hollomon :

$$\sigma_v = k \cdot \varepsilon_v^n$$

Avec n coefficient d'écrouissage.

Le coefficient n a deux influences : il « relève » les courbes limite de formage et répartit de façon plus homogène les déformations au sein de la pièce. Ces deux influences permettent un emboutissage plus sévère pour de forts coefficients n.

- Allongement à rupture A_r et allongement à la striction A_s

En expansion : a priori, quand A_r augmente, la ductilité et donc la capacité d'expansion augmente. Cependant, si l'allongement de striction A_s est faible, un endommagement de striction apparaîtra tôt et dégradera la capacité d'expansion.

En rétreint : Peu d'influence.

10.1.1.2 Sertissage

Le sertissage est le fait de replier l'un dans l'autre le bord à sertir de la boîte et l'ourlet du fond, puis à les presser fermement ensemble. Dans le cas des aliments appertisés, le serti doit être hermétique : il doit empêcher infiltrations ou fuites.

La première opération appelée « roulage » consiste à replier les épaisseurs de tôle l'une dans l'autre, alors que la deuxième opération appelée « serrage » écrase les épaisseurs ensemble.

Vocabulaire du serti

- Crochet de corps - Repli du bord à sertir à l'intérieur du serti.
- Cuvette - Distance mesurée entre le sommet du serti et le rayon de la paroi de la cuvette.
- Montage - Partie du serti à la jonction de celui-ci et de l'agrafe latérale des boîtes trois pièces.
- Crochet de fond - Repli de l'ourlet à l'intérieur du serti.
- Espace libre - Différence entre l'épaisseur de serti mesurée et la somme des cinq épaisseurs de tôle qui forment le serti.
- Croisure - Distance de pénétration du crochet de fond à l'intérieur du crochet de corps. Appelé aussi: « chevauchement ».
- Empreinte de serrage - Empreinte continue laissée sur la face intérieure du corps, en regard de la base du serti. Elle résulte de la pression exercée par les molettes de sertissage.
- Épaisseur d'étanchéité - Espace vide entre le crochet de corps et le sommet intérieur du serti.
- Hauteur du serti - Dimension extérieure du serti mesurée parallèlement à l'axe vertical de la boîte. Appelé aussi longueur du serti.
- Épaisseur du serti - Dimension extérieure du serti mesurée à un angle presque perpendiculaire à l'axe vertical de la boîte. La mesure réelle se fait en fonction du même angle que la paroi de la cuvette.
- Vides - Interstices à l'intérieur du crochet de fond et du crochet de corps. Aux fins d'étanchéité, les vides à l'extrémité du crochet de corps doivent être remplis par le joint élastique afin de former la principale zone d'étanchéité du serti.

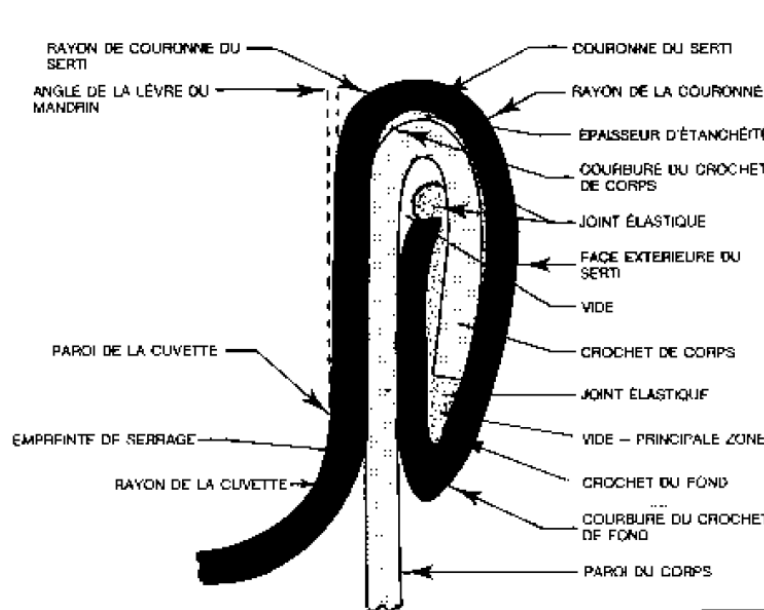


Figure 55. Le serti

10.1.2 Boîte conserve et boîte boisson

On distingue deux types de boîtes : la boîte trois pièces (corps, fond, couvercle) et la boîte deux pièces (corps et fond, couvercle).

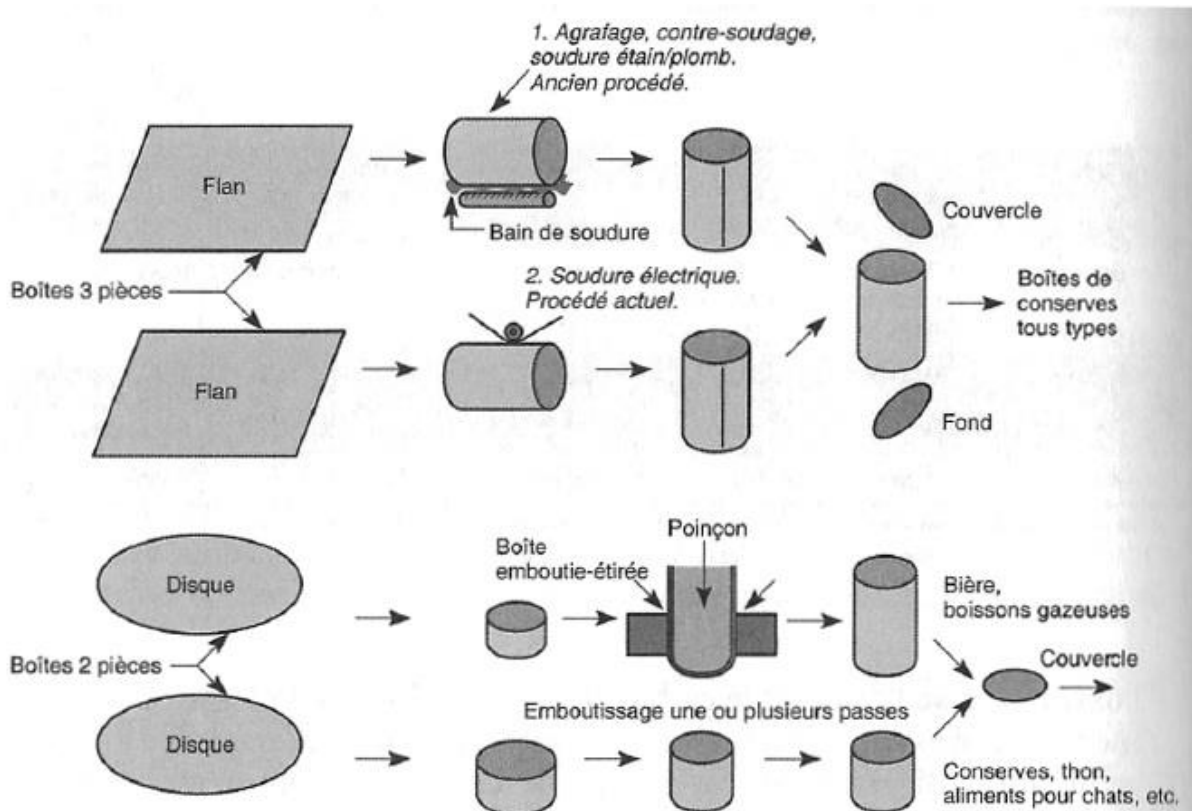


Figure C.12 – Comparatif des procédés de fabrication (soudage et emboutissage)

Figure 56. [25]

10.1.3 Boîte conserve trois pièces

10.1.3.1 Obtention du corps

Le corps est aujourd'hui formé en soudage par résistance à la mollette. Les avantages de la soudure électrique sont : un procédé propre, zone soudée étroite donc discrète et laissant une grande place pour la décoration.

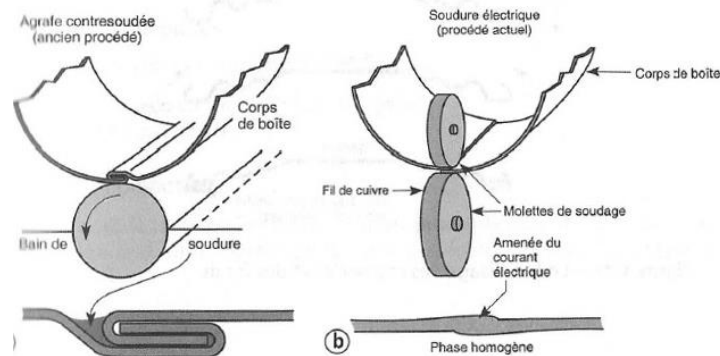


Figure C.13 – a) Rappel du procédé ancien ; b) présentation du procédé actuel

Figure 57. Aide Mémoire « matériaux pour l'emballage », DUNOD

A noter que le fer chromé n'est pas compatible avec le procédé de soudage par résistance.

10.1.3.2 Obtention des couvercles et des fonds

Les couvercles et les fonds sont obtenus par emboutissage.

10.1.3.3 Assemblage du fond et du couvercle au corps

Le fond et le couvercle sont finalement reliés au corps par sertissage.

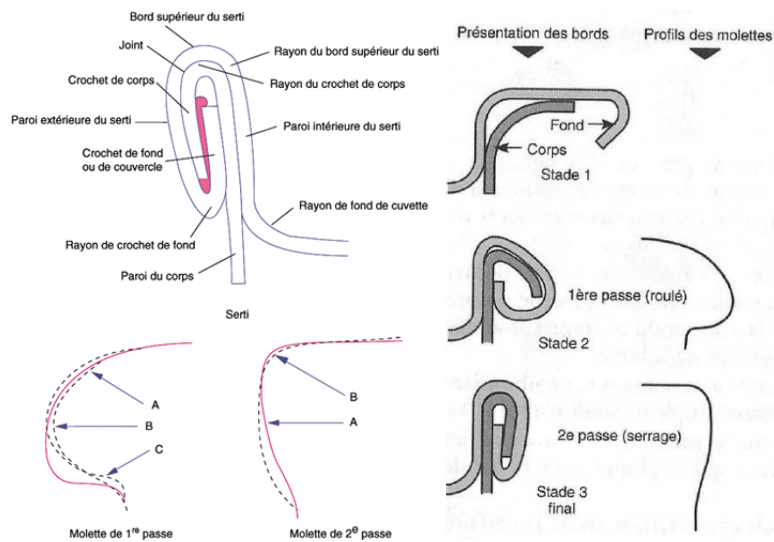


Figure 58. Sertissage

10.1.4 Boîte conserve deux pièces

On distingue deux types de boîte deux pièces : la boîte emboutie en une ou plusieurs passes et la boîte emboutie étirée.

10.1.4.1 Boîte emboutie en une ou plusieurs passes (ou DRD pour « draw and redraw »)

Plusieurs opérations d'emboutissage sont réalisées jusqu'à obtention de la pièce finale.

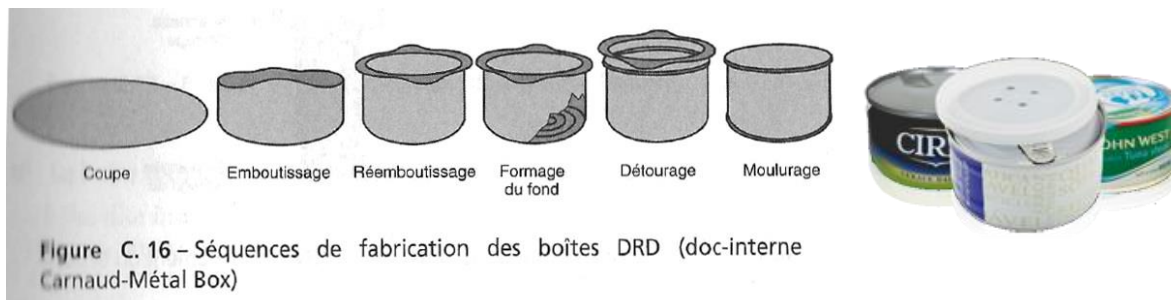


Figure 59. Aide Mémoire « matériaux pour l'emballage », DUNOD

5.3.1 Boîte emboutie étirée (ou DWI pour « draw and wall ironing »)

Ce type de boîte est adapté aux boissons gazeuses. En effet la pression de gaz carbonique, de plusieurs bars, demande une forte résistance des fonds. Mais le corps cylindrique peut rester mince.

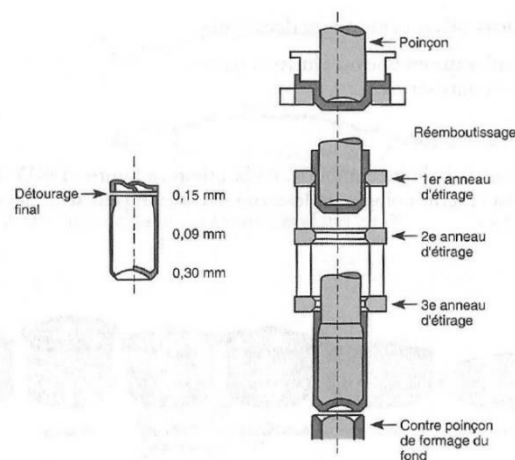


Figure 60. [25]

10.2 Revêtement et protection [27]

10.2.1 Introduction

A l'intérieur de l'emballage, l'étain est supposé protéger l'acier en faisant office d'anode sacrificielle. Mais sous certaines conditions (aliments, acidité...), la réaction de corrosion peut s'inverser et mener à la corrosion de l'acier au sein de la boîte.

C'est pour cela qu'aujourd'hui la plupart des boîtes en fer blanc sont vernies [28].

10.2.2 Vernissage intérieur

Un vernis est un matériau polymère déposé sur la surface en film mince (quelques μm). Un vernis se compose d'une résine, de pigments, de solvants et d'additifs.

Le vernis a plusieurs fonctions 1/ Protéger le métal et le contenu 2/ Faciliter la mise en forme du métal 3/ Esthétique. Un vernis doit donc être adhérent et inerte.

Les boîtes vernies intérieurement représentent maintenant la grande majorité des emballages en fer blanc, le fer blanc nu n'étant plus utilisé que pour des produits secs ou des fruits.

10.3 Pour aller plus loin....

- <http://www.laconserven.com/la-boite-a-remonter-le-temps-6-gp.htm>
- <http://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Acier-pour-emballages->
- <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/fre/default.asp?catid=175&pageid=2144416785#>
- <http://www.laconserven.com/la-boite-a-remonter-le-temps-6-gp.htm>
- <http://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Acier-pour-emballages->
- http://medamef.utt.fr/modules/P1/M1-1/EXPORTS_S114.publi/web/co/module_S114_2.html
- http://medamef.utt.fr/modules/P1/M1-2/EXPORTS_S123.publi/web/co/module_S123_1.html
- Making Steel (youtube) 46'44 : <https://www.youtube.com/watch?v=9AMbKpeJRoU>

11 Corrosion des Matériaux Métalliques

11.1 Définitions

Etymologie : du latin corrosio « action de ronger; morsure »

[11]

- **Vieillessement** : évolution des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction **en volume** avec un **facteur physique** environnant.
- **Corrosion** : dégradation et/ou une perte de matière par **réaction chimique** du matériau avec son environnement, **en surface** de la pièce.

Définition de la corrosion selon la Norme ISO 8044 – 1989 Corrosion et protection des métaux

Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même.

Quelques données sur la corrosion

- Des centaines de milliers de tonnes d'acier chaque année disparaissent par corrosion.
- Cout de la corrosion : plusieurs points de PIB
- Rapport US Air Force : en 1990, le coût moyen de maintenance due à la corrosion était de 185 000 \$ par avion et par an [29].
- En 2007, le coût total de la corrosion pour le Département de la Défense des Etats-Unis était estimé entre 10 et 20 Milliards de dollars par an.
- Aspect esthétique, problématique marketing, image de marque, aspect sanitaire et environnemental...

11.2 Corrosion des matériaux métalliques

En raison de leur structure électronique, les métaux ont une forte affinité pour les éléments preneurs d'électrons, dont l'oxygène, avec lesquels ils forment des composés souvent plus stables que le métal pur (c'est pourquoi dans la nature on les trouve le plus sous forme d'oxydes (minerais métalliques)).

Par conséquent, en présence de l'oxygène de l'air (corrosion sèche) ou de celui libéré par la dissociation de l'eau (corrosion humide), les métaux tendent spontanément à reprendre leur état initial d'oxyde. La corrosion électrochimique est ainsi un processus spontané de dégradation des pièces métalliques.

11.3 Corrosion aqueuse (par voie humide)

11.3.1 Nature électrochimique de la corrosion aqueuse

La corrosion aqueuse est de nature électrochimique. Elle est caractérisée par l'apparition de courant électrique en dehors de toute source extérieure, c'est à dire par déplacement d'électrons au sein de la masse métallique.

Dans un premier temps, notons que quand un métal est immergé en solution, des cations M^{z+} peuvent passer en solution selon la réaction :



Le couple M / M^{z+} sera appelé « système ».

Un équilibre se produit et une différence de potentiel se stabilise entre la solution et le métal : on parle de tension d'électrode. Cette tension est donnée par la loi de Nernst :

$$E = E^0 + \frac{R.T}{z.F} \ln(a_{M^{z+}})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{M|M^{z+}}^0 + \frac{RT}{zF} \ln a_{M^{z+}}.$$

$R = 8,314 \text{ J/mol/K}$; $F = 96500 \text{ C}$ constante de Faraday ; a : activité des ions M^{z+} ; T : température (K)

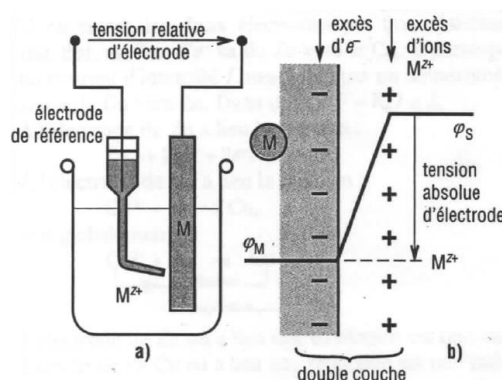


Figure 61. [16]

Pour $a=1$, on a $E = E_0$ potentiel standard d'électrode du système M/M^{z+} .

Pour chaque système (Fe/Fe^{2+} , Cu/Cu^{2+}), un potentiel standard d'électrode est alors défini, voir exemples ci-dessous.

Système	E_0 potentiel standard d'électrode (V / ENH)
Au/Au^{3+}	1.5
Cu/Cu^{2+}	0.34
Fe/Fe^{2+}	-0.44
Al/Al^{3+}	-1.66

Tableau 13. Potentiels standards d'électrode

La connaissance des potentiels standards d'électrode permet de prédire les réactions se produisant lorsque deux « systèmes » sont reliés.

Exemple : Cu/Cu^{2+} et Zn/Zn^{2+}

Anode : oxydation : $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^-$

Cathode : réduction : $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$

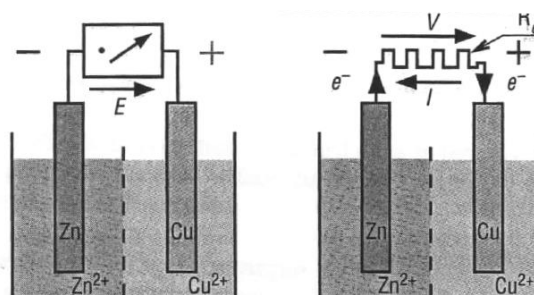


Figure 62. [16]

Le zinc passe en solution, on parle de dissolution anodique. « Dissolution » car le métal part du solide pour former un ion en solution. « Anodique » car par analogie avec une pile d'oxydoréduction, cette demi-équation est typique de ce qu'il se passe à l'anode.

Mais quel est le rapport avec la corrosion du fer dans l'eau ?

Les couples $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_3\text{O}^+$ et $\text{OH}^-/\text{H}_2\text{O}$ constituent eux aussi des « systèmes ».

Le fer plongé dans l'eau est alors un système deux couples redox.

Prenons une plaque de fer dans l'eau à $\text{pH}=1$, activité 10^{-6} mol/L [16].

Pour Fe/Fe^{2+}

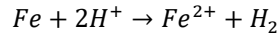
$$E = E^0 + 0.03 \log(10^{-6}) = -0.62 \text{ V/ENH}$$

Soit alors le système H_2/H^+

$$E = 0 - 0.06\text{pH} - 0.03 \log(\text{pression en } \text{H}_2) = -\frac{0.06V}{\text{ENH}}$$

(en prenant $\text{pression en } \text{H}_2 = 1 \text{ atm}$)

Dans ce cas on aura



Le fer subit une dissolution anodique et des ions Fe^{2+} entrent en solution.

Le fer dans l'eau est donc un ensemble de deux systèmes reliés entre eux : Fe/Fe^{2+} et un système dû à l'eau (ce système prend des notations différentes selon les ouvrages mais aussi à cause du caractère amphotère de l'eau).

Peut alors commencer la formation de la rouille.

La rouille du fer

En solution aqueuse, on aura : $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

Conclusion : $2\text{Fe} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$

En présence d'oxygène, les réactions d'oxydation se poursuivent pour former des nouveaux produits dont certains sont très expansifs. La rouille est formée d'un mélange de ces produits ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Fe_3O_4).

On parle parfois de corrosion « atmosphérique ». Que signifie ce terme ?

En cas de forte humidité ou de baisse de température, la surface d'un métal est un site privilégié de condensation de la vapeur d'eau. Il se crée alors un mince film d'eau sur la surface du métal, et une corrosion aqueuse peut se produire.

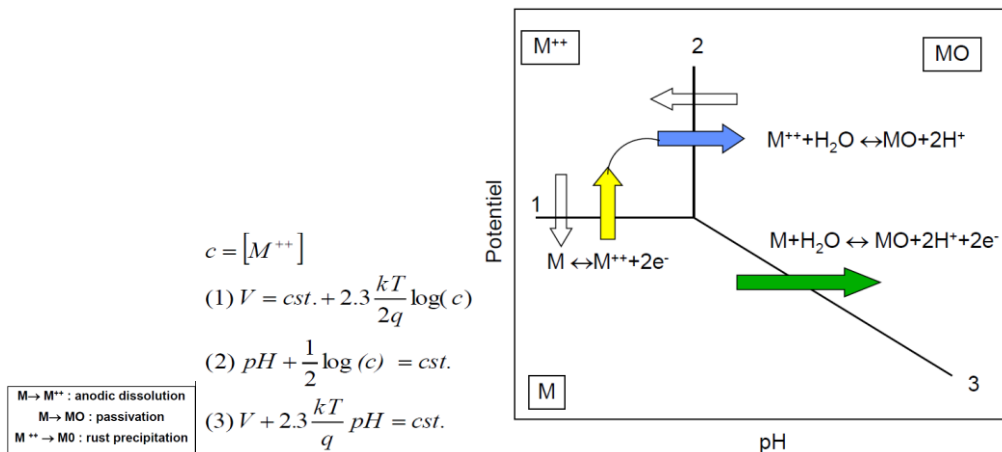
Influence du pH : diagramme de Pourbaix

La dissolution crée une différence de potentiel V entre le métal et la solution.

Ce potentiel V dépend de la concentration c en ions M^{2+} .

La précipitation/dissolution de l'oxyde modifie le pH et la concentration c .

La passivation du métal est également une réaction dépendant du pH et de V .



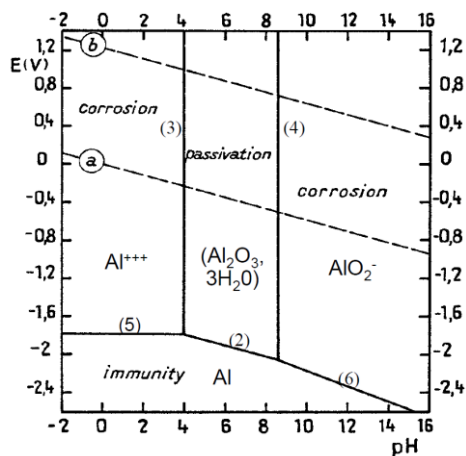


Figure 63. Diagramme de Pourbaix de l'aluminium (Bernard Baroux. INP Grenoble)

Influence de la température sur les vitesses de corrosion

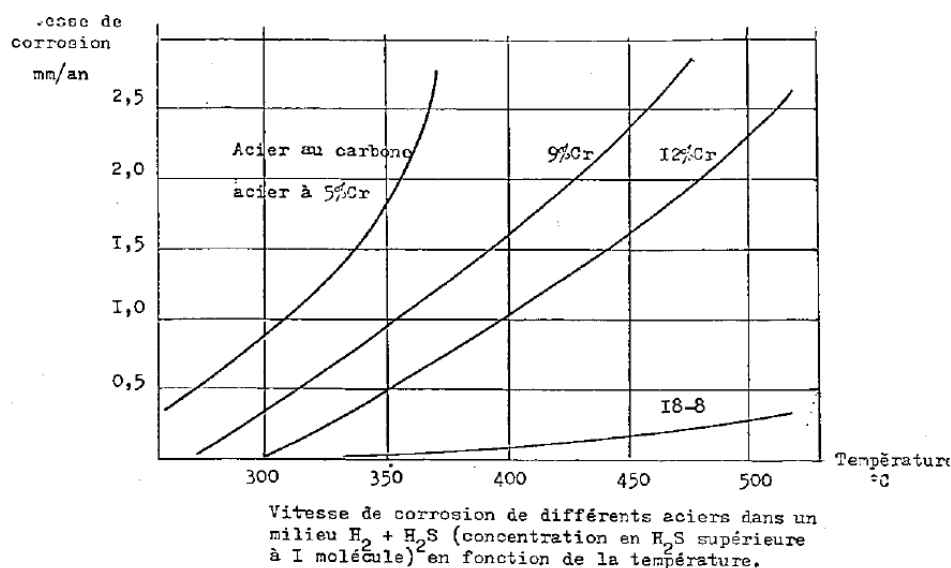


Figure 64. Exemple d'influence de la température sur les vitesses de corrosion (réf : ENSPM)

11.3.2 Les principales formes de corrosion aqueuse des matériaux métalliques

On peut citer : Corrosion uniforme, Corrosion par couplage galvanique, Corrosion par aération différentielle, Corrosion par piqûres, Corrosion caverneuse / aux recoins, Corrosion sous contrainte, Fatigue corrosion, Corrosions intergranulaire / transgranulaire, Corrosion feuilletante, Corrosion érosion, Corrosion cavitation

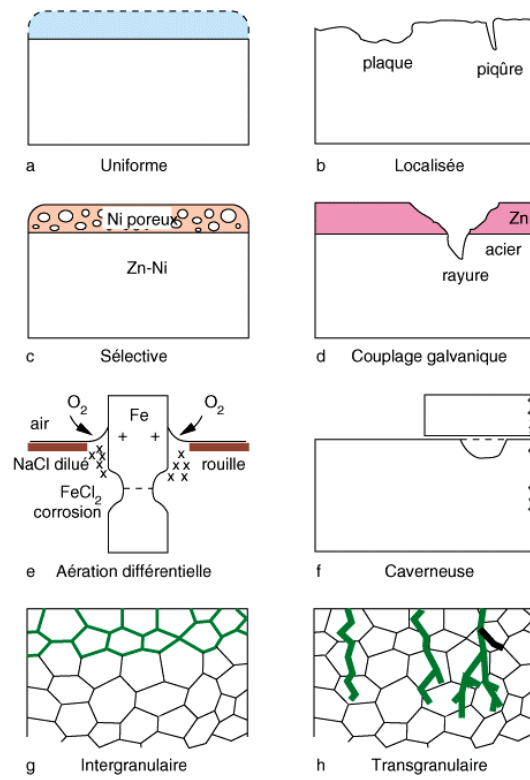


Figure 65. Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier (image CEFRA COR)

11.3.2.1 Corrosion uniforme

Dissolution généralisée et uniforme de toute la surface d'une pièce. Elle est évaluée en mm/an. Environ un tiers des pertes par corrosion sont dues à cette corrosion uniforme.

- Peu dangereuse car attaque pas en profondeur
- Prévisible donc il suffit de rajouter Xmm si on sait que Xmm vont être perdus sur tout le service de la pièce.
- Par contre la perte de côte peut mener à une perte d'étanchéité
- Elle conduit aussi à relarguer des produits de corrosion parfois nocifs.

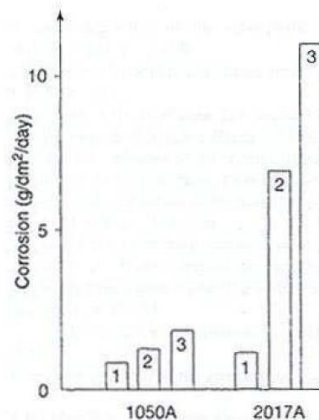


Figure I-25. Vitesse de corrosion pour une immersion périodique dans 3%NaCl pendant 30 jours pour des alliages 1050 et 2017. (1) immersion permanente (2) immersion 1 fois par jour (3) immersion 6 fois par jour (de Rozenfeld repris par Vargel, Jacques et Schmidt [62]).

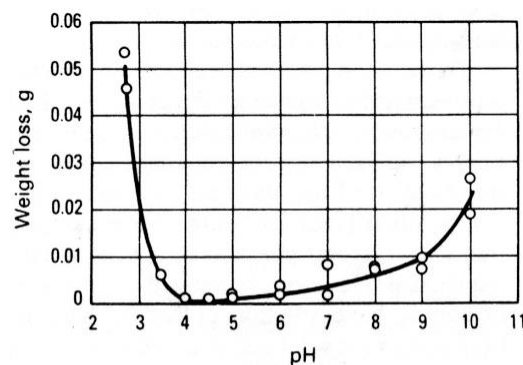


Fig. 2 Weight loss of alloy 3004-H14 exposed 1 week in distilled water and in solutions of various pH values. Specimens were 1.6 × 13 × 75 mm (0.06 × 0.5 × 3 in.). The pH values of solutions were adjusted with HCl and NaOH. Test temperature was 60 °C (140 °F).

Figure 66. [30]

Certains matériaux (aluminium, aciers inox) forment spontanément et très rapidement une couche d'oxyde en surface qui les protège de la corrosion uniforme.

Par contre, pour ces matériaux, la stabilité de cette couche d'oxyde protectrice est un paramètre primordial (attaque par des ions chlorure, impuretés qui dégradent la qualité de cette couche, rayures, rupture mécanique). Si la couche d'oxyde est altérée, une corrosion localisée peut avoir lieu (piqûres, corrosion sous contrainte....).

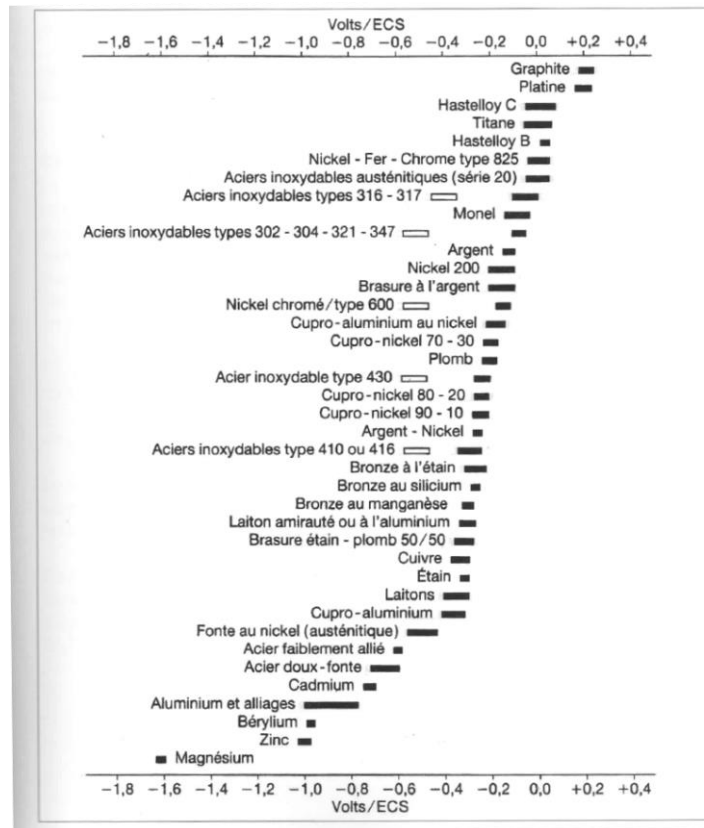
11.3.2.2 Corrosion par couplage galvanique

Entre deux métaux dissemblables plongés dans un électrolyte, existe une différence de potentiel. Si deux matériaux conducteurs différents (donc ayant des potentiels de corrosion différents) sont mis en contact (càd connectés électriquement) et plongés dans un électrolyte, un courant électrique s'établit.

Le métal le moins noble (qui a un potentiel de dissolution moins élevé dans la série galvanique) joue le rôle d'anode et se corrode.

Comment prédire le risque de couplage galvanique dans un assemblage ?

Le diagramme ci-dessous donne les potentiels dans l'eau de mer à 20°C de nombreux métaux. On peut donc connaître, pour un couple donné, quel matériau est le moins noble (càd quel matériau a le plus faible potentiel). Ce matériau sera corrodé. Le matériau le plus noble sera « protégé », il constituera la cathode, lieu d'une réduction.



11.3.2.3 Corrosion par piqûres

Apparition de cavités très profondes et très localisées, pouvant progresser très rapidement en profondeur alors que le reste de la surface reste sain. Une pièce peut être perforée en quelques heures. C'est une des formes de corrosion les plus dangereuses. Le mécanisme est assez semblable à celui de la corrosion caverneuse.

La corrosion par piqûres procède en deux temps. Pendant la période d'incubation, une zone anodique est créée autour d'une hétérogénéité locale (défaut de la microstructure comme une inclusion, zone confinée...). Du fait du confinement et de l'absence de turbulences, le milieu tend à s'acidifier localement et le matériau reste dans la zone active alors que le reste de sa surface est dans le domaine passif. Les différentes piqûres constituent la zone anodique, le reste du matériau est la zone cathodique. Un couplage peut se produire entre ces deux zones, la densité de courant étant alors très élevée en zone anodique pour assurer la neutralité électrique. Une fois le milieu suffisamment agressif, la propagation de la corrosion est rapide et catastrophique car le milieu est de plus en plus agressif. La lutte contre la corrosion par piqûres passe par une amélioration de la microstructure du matériau, en particulier par un contrôle rigoureux des populations d'inclusions. Il convient également d'éliminer les recoins confinés pour éviter de donner naissance à des cavernes. La présence d'ions halogénures (en particulier de chlorures) dans un milieu oxydant est un poison pour les aciers inoxydables pour ce type de corrosion.

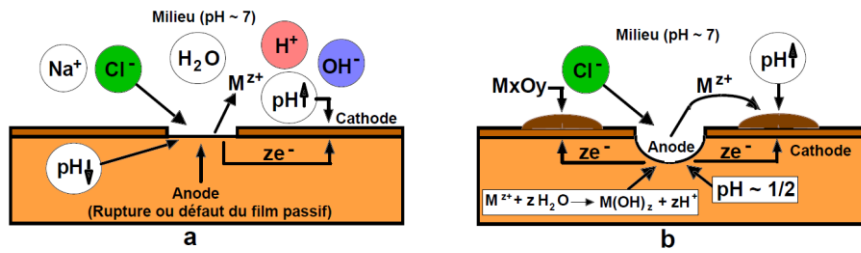
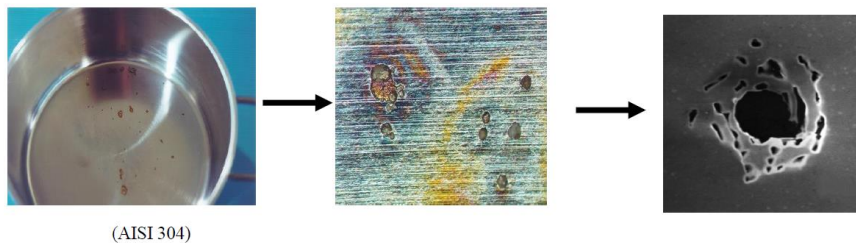


Figure IV - 10 : Amorçage (a) et propagation (b) d'une piqûre

Figure 67. doc CEFRACOR



Figure 68. Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable (doc CEFRACOR)



(AISI 304)

Baroux. INP Grenoble

11.3.2.4 Corrosion intergranulaire

Corrosion localisée aux joints de grains des matériaux.

S'il existe une différence de composition chimique entre les joints de grains et l'intérieur des grains (due à des précipités par exemple), les joints de grains et l'intérieur des grains n'ont pas le même potentiel électrochimique.

Tout se passe comme si l'on avait deux matériaux différents en contact. Un phénomène galvanique se produit et peut aboutir à la dissolution anodique des joints de grains. On parlera de corrosion intergranulaire.

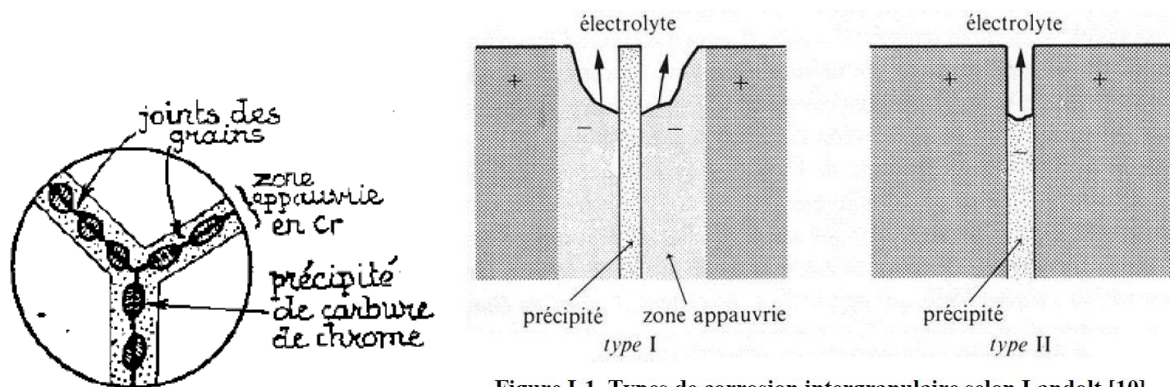


Figure I-1. Types de corrosion intergranulaire selon Landolt [10].

11.3.2.5 Corrosion feuilletante

La corrosion intergranulaire peut détacher entre elles des couches du matériau selon l'axe principal de la texture, par simple décohesion ou action mécanique des produits de corrosion. On parle alors de corrosion feuilletante. La Figure ci-dessous présente un exemple de composant attaqué par la corrosion feuilletante. Ce type de corrosion est particulièrement observé si une orientation préférentielle des grains dans le matériau (texture) est présente.

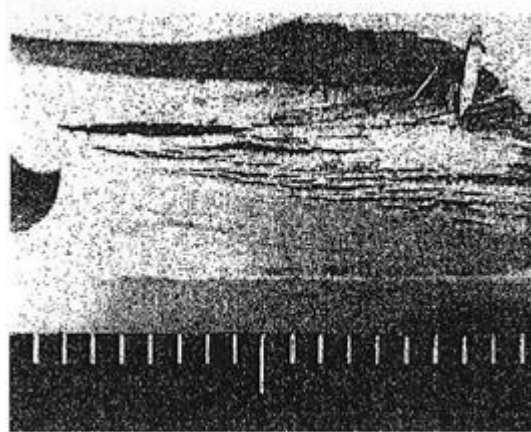


Figure 69. Corrosion feuilletante sur alliage d'aluminium 7075-T6 [31]

11.4 Corrosion sous contrainte (CSC)

La CSC est la dégradation du matériau sous l'action combinée de l'environnement et d'une contrainte / déformation extérieure. Chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure.

La corrosion sous contrainte se manifeste par l'amorçage d'une ou plusieurs fissures puis par sa propagation jusqu'à éventuellement la rupture finale.

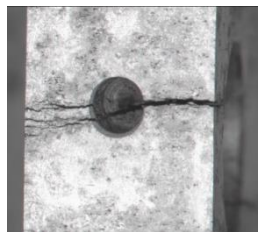


Figure 70. Fissure de corrosion sous contrainte apparue autour d'un trou de vis après quelques semaines. Alliage d'aluminium 2024-T351, Eau + 3,5%NaCl, 20°C [32]

Remarque : la CSC n'est pas une propriété intrinsèque du matériau : c'est une propriété d'un couple matériau / milieu. C'est-à-dire : pour un certain matériau, en présence d'un certain milieu, l'application d'une contrainte ou déformation constante peut donner ou pas de la corrosion sous contrainte.

D'où viennent ces contraintes ?

Distribution des sources des contraintes à l'origine de la propagation en CSC dans le cas des alliages d'aluminium aéronautiques [33] :

- Contraintes résiduelles (traitements thermiques et fabrication) 40%
- Contraintes dues à l'installation sur la structure 25%
- Contraintes dues à la vie en service 25%
- Non connu 10%

On distingue 2 mécanismes de fissuration en CSC : fissuration intergranulaire ou transgranulaire.

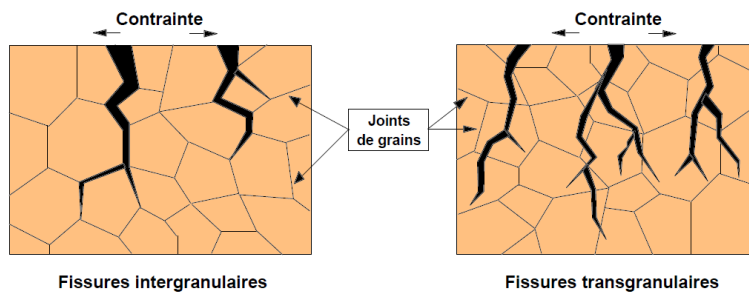


Figure 71. doc CEFRACOR

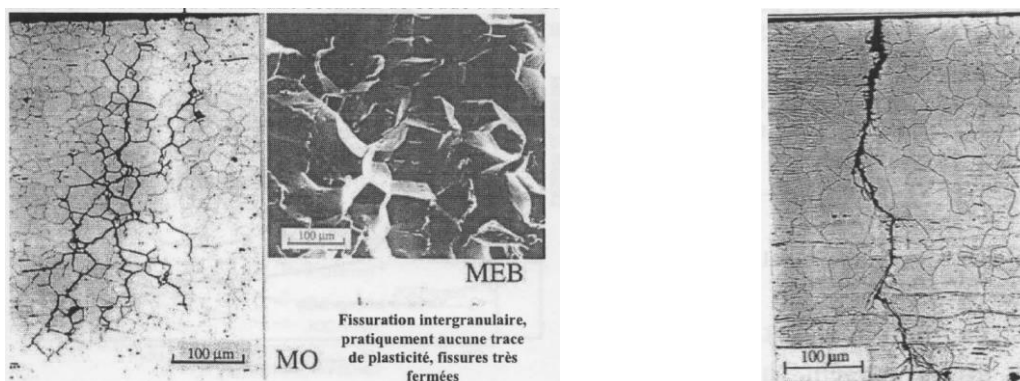


Figure 72. Corrosion sous contrainte. Exemples. Gauche. Acier Inox austénitique dans une solution de soude à 200°C. Droite. Acier Inox 18-10 en milieu chloruré, aéré, à 200°C

La propagation de fissures de corrosion sous contrainte pour les matériaux métalliques peut généralement être schématisée par la courbe de la figure ci-dessous. Quatre domaines apparaissent. Si la valeur du facteur d'intensité de contrainte K en pointe de fissure est inférieure à une valeur seuil appelée K_{ISCC} , la propagation de la fissure ne se produit pas, ou est tellement lente qu'on considère arbitrairement qu'il n'y a pas de propagation. Au-delà de cette valeur seuil, la vitesse de propagation augmente très rapidement avec K (phase I). Apparaît ensuite un plateau (phase II), où la vitesse de fissuration est constante et indépendante de la valeur de K . Au-delà d'une certaine valeur de K , la propagation devient instable et accélère fortement lorsque le facteur d'intensité de contrainte augmente (phase III). Lorsque la valeur de K atteint la valeur critique à rupture de la structure ou de l'éprouvette, il y a rupture catastrophique.

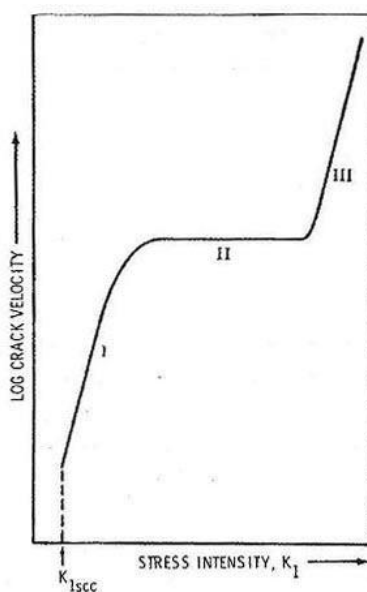


Figure 73. Schématisation de la propagation en corrosion sous contrainte

11.5 Fatigue corrosion

Action combinée de l'environnement et d'une contrainte / déformation cyclique.

2 scénarii possibles

1. Sous l'action d'une contrainte ou déformation cyclique, la fatigue des matériaux se traduit en général par l'amorçage d'une fissure puis sa propagation jusqu'à rupture finale. Un milieu corrosif peut accélérer l'amorçage d'une fissure, mais aussi augmenter sa vitesse de propagation.
2. Un défaut de corrosion (ex : piqure) peut servir de site d'amorçage préférentiel pour une fissure de fatigue (effet d'entaille : concentration de contrainte).

11.6 Protection et lutte contre la corrosion aqueuse

11.6.1 Choix des matériaux

Il paraît évident que le premier moyen d'éviter la corrosion d'un composant ou d'une structure est de choisir un matériau résistant à l'environnement de service.

Le choix du matériau dépendra donc du milieu de service (température, espèces chimiques en présence, pH,), des actions mécaniques extérieures (pour éviter la fatigue corrosion et la corrosion sous contrainte), des autres matériaux susceptibles d'entrer en contact avec le composant (corrosion galvanique).

11.6.2 Conception des composants et structures

Des règles évidentes mais très efficaces peuvent être mises en œuvre dès la phase de conception : éviter les possibilités d'eaux stagnantes, isoler les matériaux conducteurs des autres conducteurs par des joints polymères, assurer une bonne aération pour éviter les phénomènes de condensation

11.6.3 Inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action. On distinguera ainsi les inhibiteurs anodiques, les inhibiteurs cathodiques, les inhibiteurs induisant une précipitation, les inhibiteurs organiques.

11.6.4 Traitements de surface

Les traitements de surface sont généralement réalisés dans deux buts 1/Améliorer les propriétés physiques et chimiques (résistance à l'usure, fatigue, corrosion, température, frottement, enfoncement....), 2/ Esthétique. On distingue 4 grandes familles de traitements de surfaces.

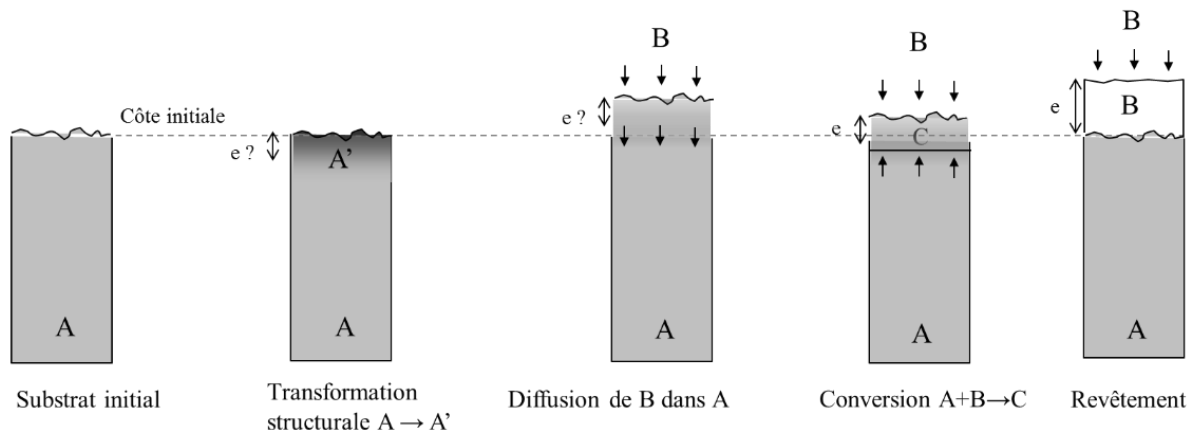


Figure 74. Traitements de surface

Transformation structurale

On modifie la microstructure du matériau constituant la pièce mais on ne modifie pas sa composition chimique (Trempe superficielle, Traitements mécaniques)

Diffusion de B dans A

Un élément chimique extérieur est introduit dans le substrat par diffusion à partir de la surface. On distingue 3 groupes pour ce type de traitement de surface : Diffusion de métaux (Chromisation, Calorisation, Shérardisation), Diffusion de non-métaux (Cémentation, Nitruration, Carbonitruration, Boruration, Siliciuration), Implantation ionique

Conversion A+B donne C

On peut citer comme exemples : oxydation anodique (anodisation) : croissance électrolytique d'une couche d'oxyde ou d'hydroxyde protectrice, sulfuration, phosphatation

Revêtement

Revêtements électrochimiques, Dépôts chimiques, Revêtements de métal fondu, Peintures, Électrophorèse, Placages, Projection thermique, Émaillage, Rechargement superficiel, Dépôts physiques en phase vapeur (PVD), Dépôts chimiques en phase vapeur (CVD)

Les 2 grands principes de revêtements métalliques

Les revêtements anodiques

Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas de la galvanisation (revêtement de zinc). En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. L'épaisseur est donc un élément important de ce type de revêtement (en général elle est comprise entre 0,1 - 0,2 mm).

Les revêtements cathodiques

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique » sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial.

Les types de revêtements métalliques

✓ Les dépôts électrolytiques

Ce sont des dépôts métalliques réalisés à partir d'une solution contenant les ions du métal à déposer ainsi que des agents complexants, des agents tampons ou des additifs organiques visant à améliorer les qualités (brillance, dureté, adhérence...) du revêtement. On crée en fait une pile dont la pièce à revêtir constitue la cathode, l'anode pouvant être un barreau du métal à déposer (anode soluble), ou un matériau inerte.

✓ Les dépôts chimiques (ou autocatalytiques)

La réalisation d'un dépôt chimique consiste à réduire les ions en solution du métal à déposer soit par réaction avec la surface du matériau à recouvrir, soit par réaction avec un autre corps présent dans la solution.

✓ Les dépôts en phase vapeur

Le dépôt en phase gazeuse d'un métal ou d'un composé réfractaire du type carbure, nitrure, ou borure, peut se faire soit par voie physique (dépôt PVD pour Physical Vapour Deposit), soit par voie chimique (dépôt CVD pour Chemical Vapour Deposit). Parmi les dépôts PVD, la pulvérisation cathodique est le plus important : les atomes du matériau à déposer sont expulsés d'une cible par un bombardement de particules (par exemple des ions argon).

✓ Les dépôts par projection à chaud (shoopage)

La matière, sous forme de poudre, fil, ou cordon, est fondue au chalumeau ou à l'arc et projetée sur le substrat au moyen d'un pistolet. Les épaisseurs déposées vont de quelques dizaines de micromètres à quelque millimètres avec une porosité résiduelle de 1 à 10%.

✓ Les dépôts par immersion

On plonge le métal à traiter dans un bain fondu du métal de revêtement. Le principal exemple est la galvanisation de l'acier par le zinc. D'autres métaux à bas point de fusion peuvent aussi être déposés par ce procédé (étain, aluminium...). L'épaisseur du dépôt obtenu dépend de la durée d'immersion et la température favorise la création d'une zone d'interdiffusion à l'interface revêtement-substrat assurant ainsi une bonne adhérence.

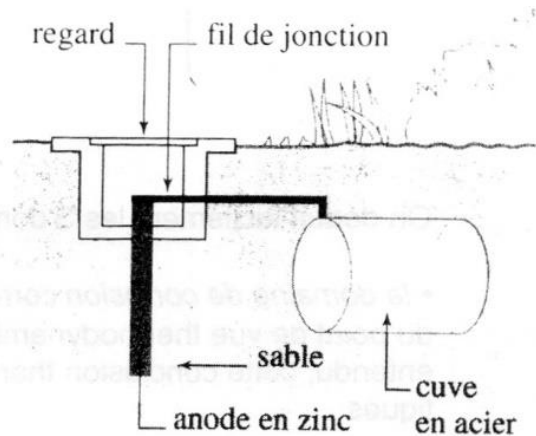
Protection électrochimique

➤ Protection anodique

On crée une pile électrochimique qui impose un sens de parcours aux électrons pour empêcher la réaction de corrosion. Concrètement, on place un matériau moins noble que le matériau à protéger en contact avec le matériau à protéger. C'est lui qui devient l'anode et qui se corrodera.

➤ Protection cathodique par courant imposé

A la place de l'anode sacrificielle, on peut imposer le sens de parcours des électrons en établissant une différence de potentiel entre la pièce et le milieu avec un générateur de tension.



Doc. 35. Protection d'une cuve souterraine au moyen d'une anode sacrificielle.

L'anode en zinc doit être placée sur un lit de sable, poreux, ce qui permet l'élimination des ions Zn^{2+} .

11.7 Corrosion par voie sèche (oxydation à chaud)

Il s'agit le plus souvent de l'attaque d'un métal M par un gaz G selon une réaction du type : $M + G \rightarrow X$

Où X est un produit de corrosion le plus souvent solide.

Le gaz considéré est souvent l'oxygène (mais aussi d'autres gaz tels que SO_2 , Cl_2 , Br_2 , H_2S).

En présence d'un environnement sec contenant de l'oxygène et essentiellement à haute température, le métal, instable, tend donc à revenir sous sa forme oxydée stable. Il se recouvre alors d'un film d'oxyde qui croît progressivement.

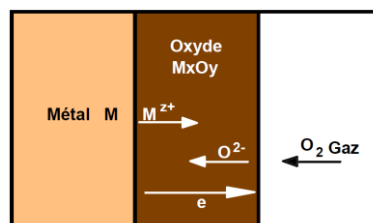
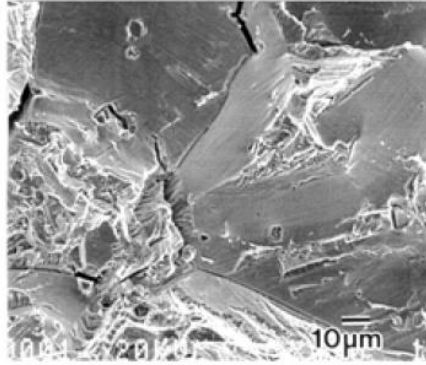


Figure 75. Mécanisme de corrosion par voie sèche (cefracor)

11.8 Fragilisation par l'hydrogène

L'hydrogène est un atome de très petite taille, et très abondant (eau, vapeur d'eau.....). Sa petite taille lui permet de pénétrer dans les matériaux cristallins et de bloquer le déplacement des dislocations. Les dislocations étant gênées par l'hydrogène, la capacité de déformation plastique du matériau (sa ductilité) diminue : il devient plus fragile.



Gangloff

11.9 Liens utiles

- Centre Français de l'Anticorrosion : www.cefracor.org
- www.institut-corrosion.fr

12 Soudage des Matériaux Métalliques

12.1 Définitions

Soudage : opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties à assembler, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler. On peut opérer par chauffage, par pression, ou par chauffage + pression, et avec ou sans produit d'apport.

- Soudage homogène : le produit d'apport est de nature semblable à celle du matériau de base. On utilise aussi cet adjectif quand les deux parties à assembler sont de même nature.
- Soudage hétérogène : le produit d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle des matériaux à assembler.

On parlera de soudage proche en proche lorsque l'on déplace la source de chaleur le long des matériaux à assembler. Dans ce cas, il est rare de pouvoir réaliser tout le cordon de soudure en un seul passage. Chaque passage de la source de chaleur sera appelé une « passe ». On dit ainsi que le cordon final est réalisé en plusieurs passes.

Techniques connexes : ensemble des techniques réalisées autour d'une opération de soudage (traitement thermique, parachèvement.....)

On définit les classes de procédés suivantes :

1. Les procédés de soudage par fusion : soudage comportant une fusion du métal de base.
2. Les procédés de soudage en phase solide : deux surfaces sont jointes sans fondre le métal de base ni ajouter un métal d'apport fondu.
3. Les procédés de brasage : pas de fusion du métal de base, fusion du métal d'apport

On peut aussi classer les procédés de soudage de la façon suivante : les procédés manuels : qui restent le seul moyen possible pour réaliser des soudures dont l'accès est difficile ou de petite longueur, les procédés de soudage semi-automatiques : avancement automatique de l'électrode avec une torche tenue à la main. appliqués de manière générale, les procédés de soudage automatiques : la tête de soudage est montée sur un chariot ou sur un robot de soudage.

12.1.1 Vocabulaire de la soudure

La soudure est le résultat d'une opération de soudage (Figure 77 et Figure 78).

Métal de base : le métal de base est le matériau constitutif des éléments à souder

Métal d'apport : c'est la matière apportée lors de l'opération afin d'assembler le métal de base

Cordon de soudure : zone où le métal de base et le métal d'apport (si utilisé) ont fondu et solidifié.

Zone affectée thermiquement (ZAT) : zone du métal de base qui n'est pas entrée en fusion mais qui a subi des températures susceptibles d'avoir fait évoluer la composition chimique et/ou la microstructure du métal de base, et donc ses propriétés physiques et chimiques.

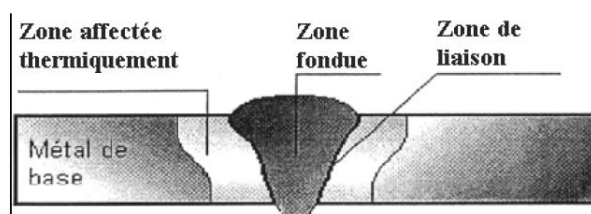


Figure 76. Coupe d'une soudure (Hamide 2008)

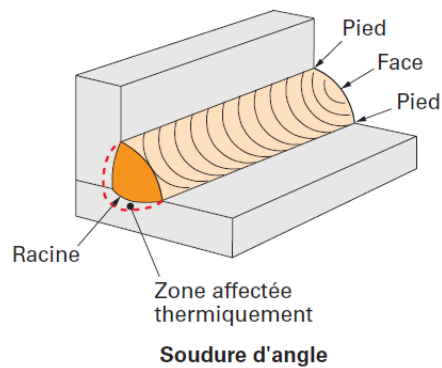


Figure 77. Le cordon de soudure (Techniques de l'Ingénieur)

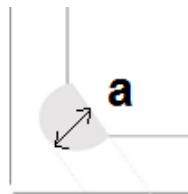


Figure 78. Gorge a du cordon de soudure

12.2 Phénomènes physiques, mécaniques, thermiques en soudage

12.3 L'opération de soudage

12.3.1 Aspect énergétique

Le soudage consiste à apporter de l'énergie aux parties à assembler. Cette source d'énergie sera d'origine thermique, électrique ou mécanique. L'apport d'énergie appliqué au niveau des zones à assembler doit être supérieur aux pertes induites dans les pièces par rayonnement et conduction thermique.

12.3.2 Aspect métallurgique

En soudage par fusion, la température dans les pièces doit suffisamment augmenter pour obtenir la fusion des zones à assembler.

Les propriétés du matériau sont fortement modifiées par la soudure (métallurgie, contraintes résiduelles).

Pour certains procédés de soudage par fusion, un laitier se forme sur le bain de soudure. Ce laitier protège le bain de l'oxygène de l'air, et l'isole thermiquement. Dans le soudage à l'électrode enrobée, c'est l'enrobage qui va, en fondant, créer le laitier.

12.3.3 Retrait

Pendant le refroidissement, le métal du bain de fusion se contracte.

Si la contraction est gênée par le métal froid qui entoure le joint (pièces de grande taille, bridage des pièces), les contraintes qui se développent, supérieures à la limite d'élasticité, créent des déformations et contraintes résiduelles.

Si le métal du bain de fusion peut se contracter (pièces de petite taille, pièces non bridées), peu de contraintes résiduelles se créent mais un retrait est observé : la pièce post-soudage est déformée. On distingue trois types de retrait : longitudinal, transversal et dans l'épaisseur (Figure 79).

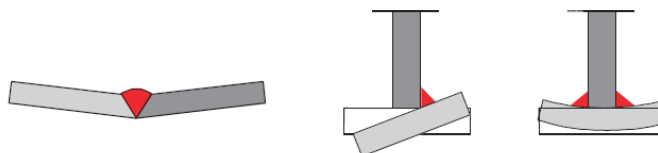


Figure 79. Exemples de retrait transversal

12.3.4 Risque de trempe

Un acier porté dans le domaine austénitique ($T > 800-850^{\circ}\text{C}$) et refroidi rapidement montre un risque de trempe. Une phase appelée martensite, dure et fragile, peut alors apparaître et abaisser les propriétés mécaniques de la soudure. Dans le cas d'une opération de soudage, la température du cordon en fusion peut atteindre 1300°C alors que le métal de base reste à température ambiante. L'acier ayant un fort coefficient de conduction thermique, il possède une grande capacité à diffuser la chaleur et à permettre ainsi un refroidissement rapide du métal fondu. Le cordon et la ZAT peuvent donc subir une trempe.

Pour supprimer le risque de trempe, trois techniques existent :

- le préchauffage : il consiste à chauffer le métal de base avant soudage de manière à ce refroidisse moins rapidement le joint soudé
- le post-chauffage : la quantité de chaleur perdue par le cordon est partiellement restituée par un chauffage immédiat après soudage afin de limiter la vitesse de refroidissement
- une énergie linéaire de soudage élevée (cas du soudage de proche en proche) : une énergie linéaire de soudage élevée conduit à obtenir une grande quantité de chaleur dans le cordon et dans le métal de base, laquelle mettra plus de temps à être évacuée. Pour le soudage à l'arc, dont l'apport d'énergie vient d'une énergie électrique, on utilise la formule suivante :

$$E = \frac{U \cdot I}{V}$$

Avec U tension de soudage en V , I intensité de soudage en A , V vitesse de soudage en m/s

12.4 Procédés de soudage par fusion locale des pièces à assembler

On peut classer ces procédés en fonction du mode de chauffage utilisé. On distingue alors le soudage au chalumeau, le soudage à l'arc, le soudage par faisceau d'électrons, le soudage par faisceau laser, le soudage plasma, le soudage par résistance, le soudage aluminothermique, le soudage par induction.

12.4.1 Soudage au chalumeau

La fusion des pièces et du métal d'apport est obtenue par chauffage au chalumeau (dans la flamme la température peut atteindre 3200°C). Il y a combustion d'un gaz (acétylène le plus souvent, hydrogène, propane...) avec un comburant (généralement de l'oxygène). On obtient une flamme sur une surface d'impact d'un diamètre de quelques centimètres.

Le chalumeau, par son atmosphère créée lors de la combustion, assure la protection du métal liquide contre toute réaction chimique avec les gaz de l'air.

Principales applications : aciers courants, aciers alliés, fontes, métaux non ferreux. Tous les domaines de l'industrie, en particulier la tuyauterie.

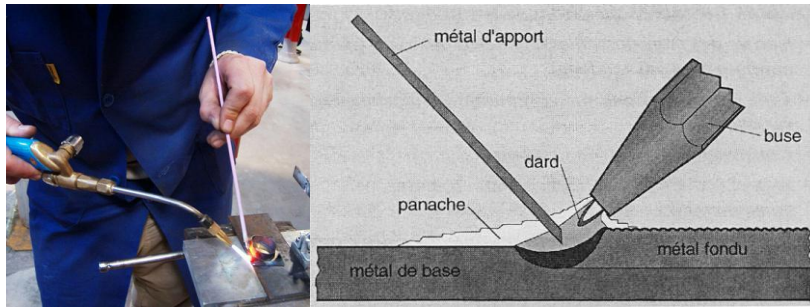


Figure 80. Soudage au chalumeau (Gauche afpi-centre-valdeloire.com / Droite Institut de Soudure)

12.4.2 Procédés de soudage à l'arc

Le soudage à l'arc regroupe à lui seul une grande famille de procédés qui ont tous en commun l'utilisation d'un arc électrique pour mener les parties à assembler à la fusion.

Notion de thermoémissivité

Plus la température d'un corps est élevée, plus il pourra facilement libérer des électrons : c'est la thermoémissivité.

Effet de champ

Entre deux plans parallèles électriquement chargés, il existe un champ électrique uniforme. Tout corps, électriquement chargé, placé dans ce champ, subit une force appelée force électrostatique $F=q.E$, avec F : force électrostatique en N, q : charge en coulomb, E : champ électrique (V/m)

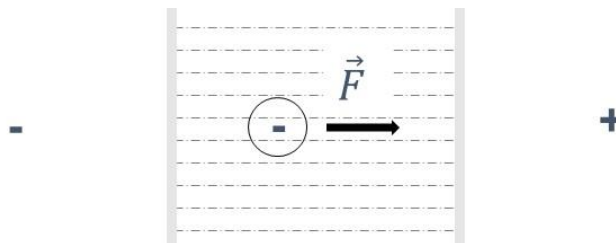


Figure 81. Effet de champ

Ionisation

L'ionisation d'une molécule peut être produite par des phénomènes apportant de l'énergie : choc entre particules, champ électrique, température, lumière...etc.

Phénomène d'arc

Dans un milieu gazeux, une différence de potentiel suffisamment élevée entre deux électrodes (anode reliée au pôle positif d'une source de courant et cathode reliée au pôle négatif) peut arracher des électrons de la cathode vers l'anode. Ces électrons ionisent les atomes du gaz environnant, le rendant ainsi conducteur. Un écartement suffisamment important entre les deux électrodes alimente ce processus : on obtient un arc électrique continu.

L'arc se compose de 3 parties, une tâche cathodique brillante, une tâche anodique très brillante, une colonne de plasma.

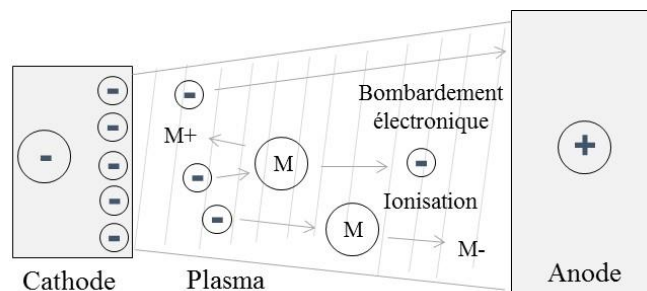


Figure 82. Structure de l'arc

Caractéristiques de l'arc

En première approche, on peut traiter l'arc comme une résistance. La loi d'ohm et la relation résistance-résistivité s'appliquent. Ainsi :

- pour une intensité donnée, la tension d'arc est globalement proportionnelle à la longueur d'arc.
- pour une longueur d'arc donnée, la tension augmente proportionnellement avec l'intensité

Le point de fonctionnement lors du soudage est donné en comparant la puissance fournie par l'appareil de soudage avec le graphique Tension d'arc – Intensité d'arc.

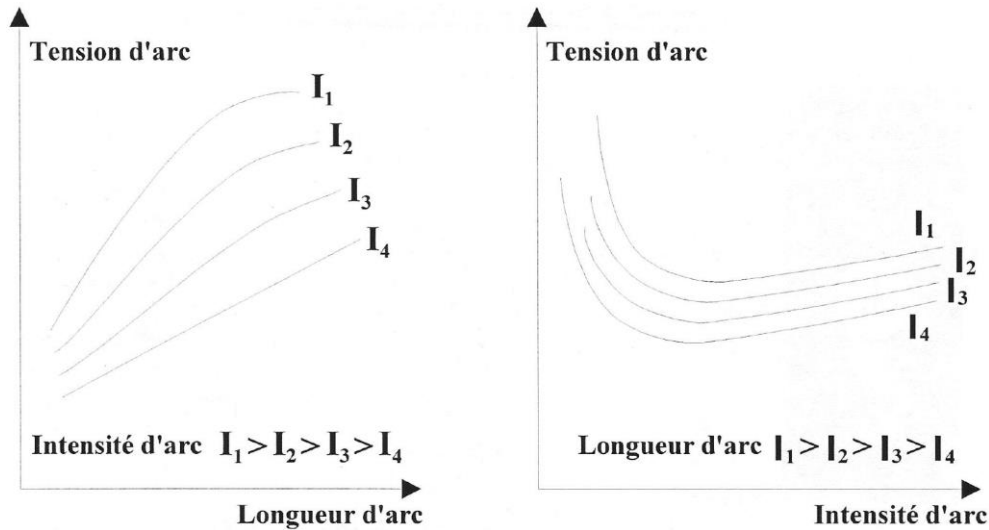


Figure 83. Caractéristiques de l'arc

Températures au sein de l'arc

L'augmentation de température au sein de l'arc a 3 sources : effet Joule, bombardement électronique transforme l'énergie cinétique des électrons en chaleur, dissociation et la recombinaison des molécules induit un rayonnement qui apporte de la chaleur supplémentaire

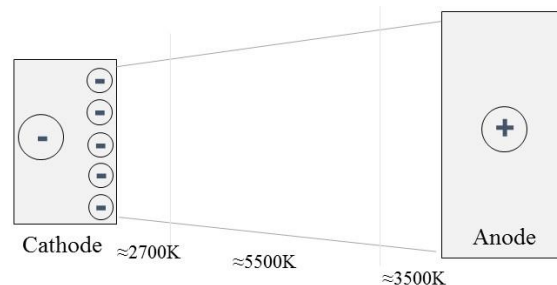


Figure 84. Température au sein de l'arc électrique

12.4.3 Opération de soudage à l'arc

On peut opérer en courant redressé ou pulsé, l'électrode étant l'anode ou la cathode, ou en courant alternatif.

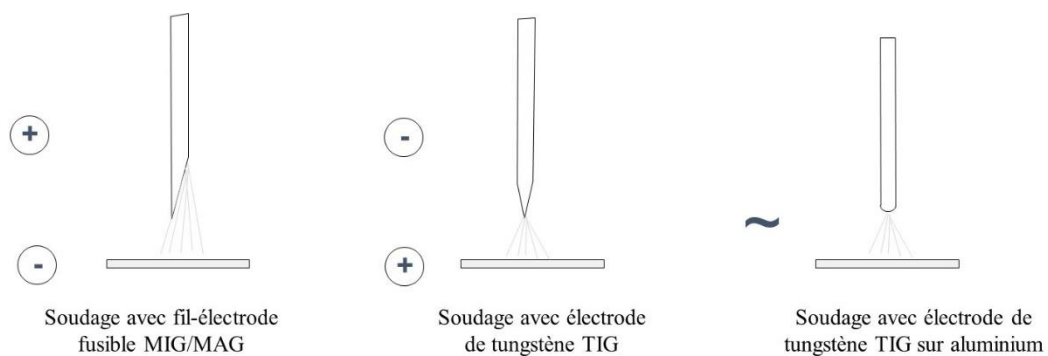


Figure 85. Courant électrique en soudage à l'arc

Une électrode positive favorise la fusion de l'électrode. Une électrode négative favorise la pénétration.

En TIG, l'électrode sera négative. Un courant alternatif permettra le décapage de la couche d'alumine sur les alliages d'aluminium et les inox par exemple.

Soudage à l'arc avec électrode enrobée

L'électrode est dite enrobée : elle contient une âme métallique (qui fournira le métal d'apport) et un enrobage (mélange de nombreux éléments tels que sodium, potassium, cellulose, métaux, hydrogène, silicates. En fondant l'enrobage crée un laitier qui protège l'arc.

On distingue 5 types d'enrobages : électrodes à enrobage oxydant, acide, rutile, basique, cellulosique.

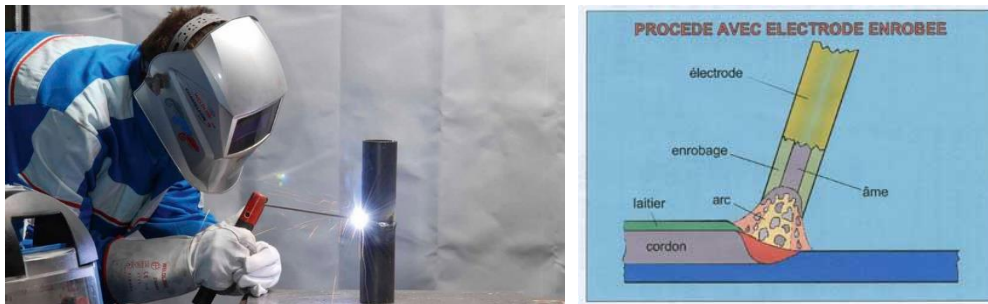


Figure 86. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (gauche : airliquide.com, droite prosoud.com)

Soudage TIG (soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire)

L'arc éclate au sein d'une atmosphère neutre (argon ou hélium), entre la pièce à souder et une électrode non fusible en tungstène.

Le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) permet notamment le soudage des aciers inox, de l'aluminium, du cuivre, du titane, pour des épaisseurs entre 0,5 et 8mm. On le retrouve donc dans l'aéronautique, l'alimentaire, les industries chimique et pétrochimique.

Soudage MIG/MAG (soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode fusible)

Dans ce procédé on utilise un fil-électrode fusible au lieu d'une électrode réfractaire. L'arc s'établit entre le fil-électrode et le métal de base. Un gaz ou un mélange de gaz protège le bain de fusion de la contamination atmosphérique. Le procédé MAG utilise un gaz dit actif (CO_2 , Ar- CO_2 , Ar- O_2). Le procédé MIG utilise un gaz dit inerte (Ar, He, Ar-He)

L'emploi d'un fil électrode fusible à la place d'une électrode réfractaire augmente la productivité.

MIG : atmosphère de protection inerte / metal inert gas ; MAG : atmosphère de protection active / metal active gas

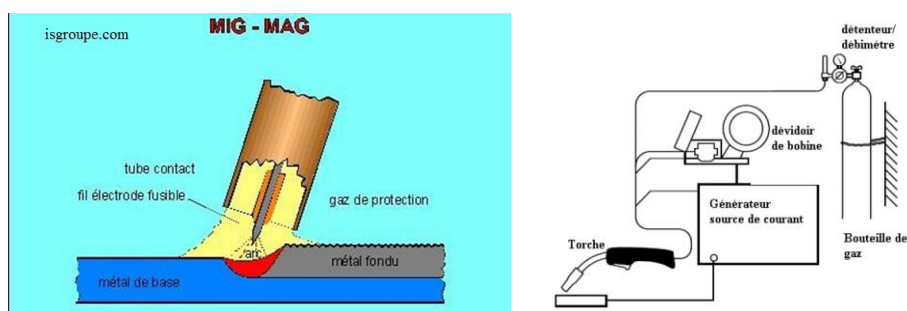


Figure 87. Soudage MIG MAG (droite Hamide 2008)

Soudage à l'arc sous flux en poudre

La source de chaleur vient de l'arc électrique qui jaillit entre un fil électrode nu et la pièce à souder, le tout sous un flux en poudre. L'alimentation en flux est assurée séparément par une goulotte placée en avant du fil. Lors de l'amorçage, l'arc éclate au sein de la poudre : il se crée une cavité remplie de CO et CO_2 , entourée de flux fondu. Le flux est conducteur donc par effet Joule il transmet de la chaleur au bain de fusion. Un laitier, produit lors de la fusion, protège le bain de fusion et la soudure.

Le soudage sous flux est un procédé de forte énergie donc il permet de souder de fortes épaisseurs (15mm d'acier en une passe, 50mm en deux passes). La protection du flux et l'absence de rayonnement le rendent intéressant pour la soudure sur chantier.

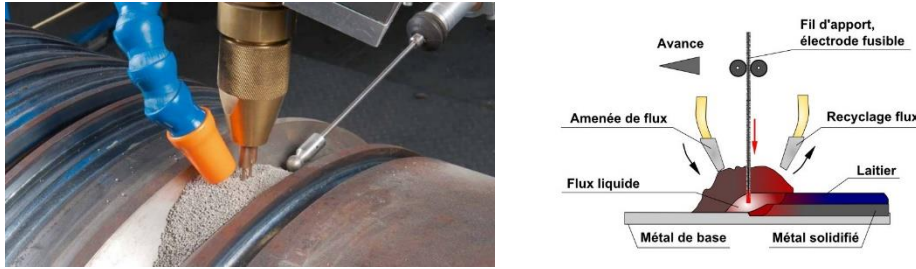


Figure 88. Soudage sous flux (Gauche : airliquide.com. Droite : ep-c.fr)

12.4.4 Soudage plasma

L'état plasma est un milieu gazeux fortement ionisé, conducteur de l'électricité. On obtient cet état en injectant un gaz au droit d'un arc jaillissant entre une électrode de tungstène et une anode (buse d'une torche ou pièce à assembler)

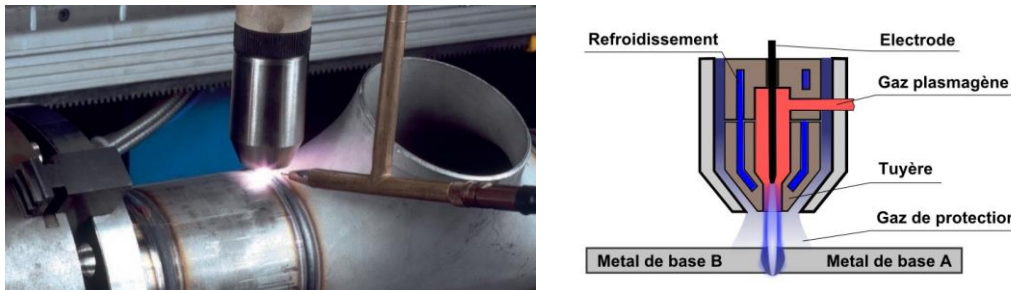


Figure 89. Soudage plasma (gauche airliquide.com, droite ep-c.fr)

12.4.5 Soudage en bout par étincelage

Les deux pièces sont mises en contact et de petits contacts locaux se forment entre les pièces du fait de leur rugosité. Des ponts électriques se créent, sièges de courants de forte intensité provoquant de petits arcs. Ces ponts fondent et il y a éjection et vaporisation du métal fondu (étincelage). Ces éjections créent de nouvelles aspérités qui à leur tour deviennent des contacts locaux.

La protection du métal à haute température est assurée par les vapeurs métalliques produites pendant l'étincelage.

Exemples d'applications : rails de chemin de fer

Ce procédé permet le soudage de tôles et tubes minces, de pièces de résistivité et sections différentes.



Figure 90. Soudage en bout par étincelage (schlatter.ch, atec-automation.com)

12.4.6 Soudage par faisceau d'électrons (EBW Electron Beam Welding)

Sous vide, un faisceau d'électrons est créé en chauffant un filament et en appliquant une tension électrique. Ce faisceau est focalisé sur le joint à souder. L'énergie cinétique des électrons est transformée en chaleur au moment de l'impact. On obtient, au niveau des pièces, un faisceau d'environ 1mm de diamètre.

Ce procédé s'exécute en une seule passe et s'applique de préférence aux assemblages bord à bord, sans chanfrein, de pièces mécaniques ou de chaudronnerie de précision préparées par usinage. Il n'y a pas, dans la majorité des cas, d'apport de métal.

Secteurs d'activité concernés : automobile, aéronautique, spatial

12.4.7 Soudage par faisceau laser

LASER : light amplification by stimulated emission of radiation. Le LASER est la transformation d'une énergie électrique en énergie lumineuse. En soudage, les lasers à gaz sont utilisés. L'excitation d'un gaz par une décharge électrique provoque une émission de lumière (photons). Les photons produits stimulent l'émission d'autres photons par des chocs avec des molécules de gaz.

12.4.8 Soudage aluminothermique

Le principe est de faire réagir un mélange d'oxyde métallique et de poudre d'aluminium contenus dans un creuset (par exemple oxyde ferrique pour l'acier). La réaction donne une grande quantité de chaleur qui fait fondre les produits de la réaction et donne du fer liquide que l'on verse dans un moule contenant les extrémités des pièces à assembler.

La première application de ce procédé est le raboutage des rails. Ce procédé est aussi utilisé en construction navale.

12.4.9 Soudage par résistance

Ce procédé met en œuvre l'effet Joule d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre et serrées entre deux électrodes de cuivre refroidies. La chaleur Q produite est donnée par :

$$Q = \int_0^T R \cdot I^2 \cdot dt$$

avec R résistance électrique rencontrée par le courant ; I intensité du courant ; T durée du phénomène ; t temps

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques, la chaleur produite conduit à la fusion des pièces à assembler.

Parmi les procédés de soudage par résistance, on distingue le soudage par points (soudure discontinue), le soudage à la molette (soudure continue), le soudage par bossages, le soudage en bout.

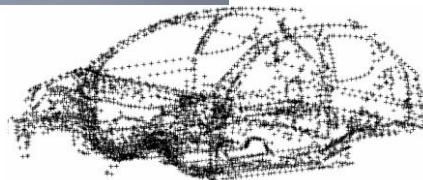
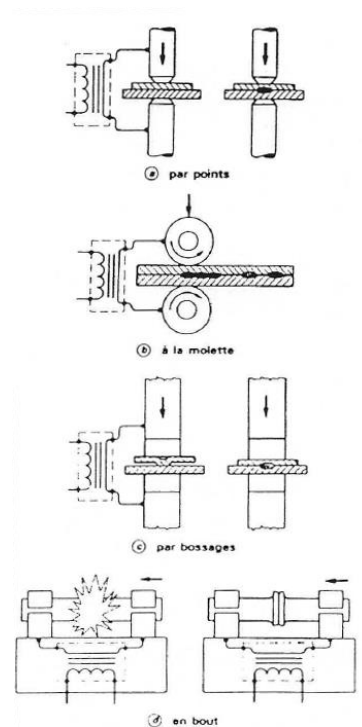


Figure 91. Soudage par résistance. Gauche : types de soudage par résistance. Milieu : pince de soudage (Doc. Fronius). Droite : structure automobile soudée par soudage par points (F. ROSSILLON. Thèse de doctorat 2007)

12.4.10 Soudage par induction

Dans ce procédé, le chauffage est obtenu par des courants induits qui circulent dans la pièce. Pour des courants de basse et moyenne fréquence, le chauffage est obtenu par effet Joule. Pour les courants haute fréquence, les courants induits sont localisés en surface sur quelques dixièmes de mm. Il y a formation d'un film de métal liquide sur les bords à assembler.

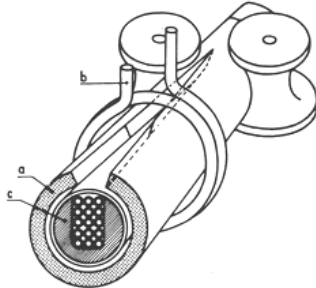


Figure 92. Soudage par induction (*construiracier.com*)

12.5 Procédés de soudage en phase solide

12.5.1 Introduction

En soudage en phase solide les joints sont établis par au moins un des trois mécanismes suivants:

- Un mouvement relatif des deux pièces à joindre donne lieu au cisaillement des points de contact, produisant des régions qui sous pression forment des joints métalliques entre les pièces. Ce mécanisme intervient dans les procédés de soudage par friction et soudage par ultrason.
- Une déformation coordonnée des deux pièces à joindre produit des régions qui sous pression forment des joints métalliques entre les pièces. C'est le cas du soudage par explosion.
- La diffusion suscitée par une force qui met l'interface sous pression permet de réduire le volume de pores entre les surfaces à joindre. Ceci est utilisé dans le soudage par diffusion.

Les procédés de soudage en phase solide—sauf le soudage par diffusion—nécessitent donc toujours une déformation très importante, ce qui limite ces procédés aux métaux ductiles et aux géométries simples.

En revanche, aucune phase liquide n'est présente et la température reste souvent largement en dessous du point de fusion donc les pièces à souder peuvent garder au moins partiellement leurs microstructures et leurs propriétés mécaniques sont peu ou pas détériorées.

Ces procédés permettent de joindre des matériaux dissemblables, notamment avec des larges différences de point de fusion. Ceci est un avantage considérable par rapport au soudage en phase liquide.

12.5.2 Soudage par ultrasons

Les atomes de l'interface à assembler se combinent entre eux grâce aux forces d'attraction interatomiques. L'assemblage se fait par recouvrement : les pièces sont serrées l'une contre l'autre entre une enclume et une sonotrode qui produit des vibrations transversales et des frictions localisées qui décapent les surfaces et augmentent la température jusqu'à formation de la soudure.

Les avantages sont une bonne qualité de soudure, pas de matériaux d'apport, procédé propre et non polluant, temps de soudage très court, très faible consommation d'énergie, pas de préparation préalable.

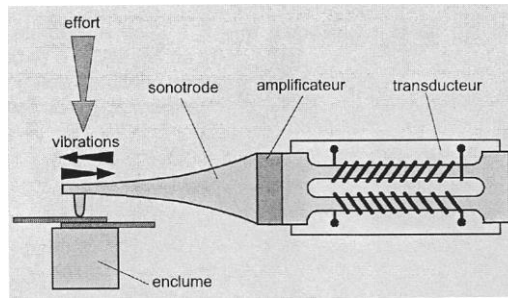


Figure 93. Soudage par ultrasons (réf : institut de soudure)

12.5.3 Soudage par friction malaxage [34]

Ce procédé consiste dans le malaxage de la matière située en dessous et autour d'un outil appelé tête de friction. La chaleur générée par la friction outil/matière amène la matière à un état pâteux, sans fusion. L'outil, non consommable, est constitué d'un épaulement auquel est fixé un pion. Sur une des plaques, sens de soudage et sens de rotation sont les mêmes (on parle de zone d'attaque). Sur l'autre plaque, ces sens sont inversés (zone retraitée).

L'opération se compose de 3 étapes :

- Plongée de l'outil à l'interface entre les plaques
- Translation de l'outil pour créer le joint
- Elévation de l'outil à la fin du joint

Ce procédé a en premier lieu été appliqué aux alliages d'aluminium de la série 2000 et 7000. En effet ces alliages, dits à durcissement structural, ne sont pas soudables par les procédés classiques (arc, laser). De plus, dès 200-300°C, ils deviennent facilement malléables.

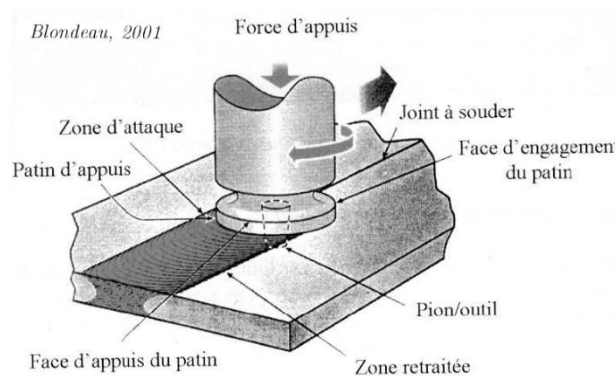


Figure 94. Soudage par friction malaxage (ou FSW pour Friction Stir Welding)

Avantages et possibilités : pas besoin de traitement des plaques à assembler, pas d'outil consommable, pas de métal d'apport ni de gaz, propre, grande qualité de joint (porosité, résistance à la corrosion), pas besoin de décapage-passivation après soudage, faibles contraintes résiduelles

12.5.4 Soudage par friction

Le soudage par friction est un assemblage en bout de deux pièces par deux étapes effectuées successivement sur une même machine : la friction puis le forgeage.

Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre. Lors de l'opération, il y a fluage du matériau mais la température de fusion n'est jamais atteinte.

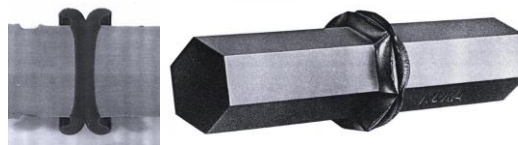


Figure 95. Soudage par friction

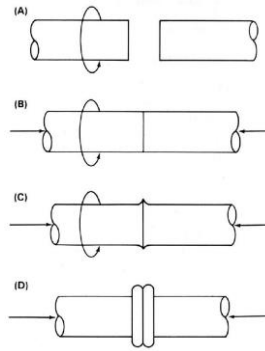


Figure 96. Soudage en bout par friction (2015 institut belge de la soudure)

12.5.5 Soudage par explosion

Ce procédé utilise l'énergie libérée par une charge explosive pour provoquer entre deux surfaces à assembler une collision dirigée de telle sorte que la ligne de contact se déplace régulièrement pendant l'explosion. L'explosion projette le revêtement sur le support. Un mince jet de métal plastifié précède le front de contact, ce qui permet de nettoyer la surface de métal à plaquer en arrachant les oxydes.

Applications : ferroviaire, naval (alu – acier), échangeurs thermiques, chimie pétrochimie, automobile.

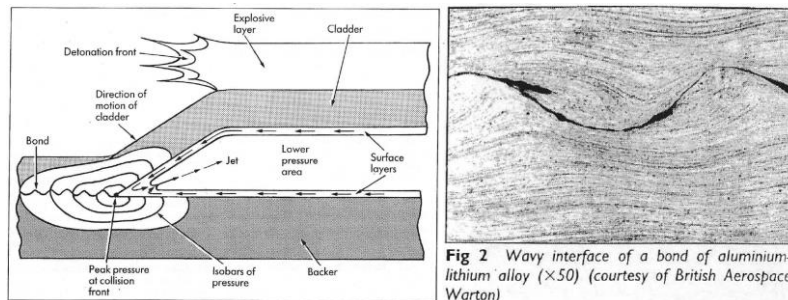


Figure 97. Soudage par explosion (Réf : R. Hardwick)

12.6 Procédés de brasage

12.6.1 Introduction

En brasage, la liaison est assurée par la solidification d'un métal ayant une température de fusion inférieure à celle du ou des métaux à assembler et qui, après fusion, mouille les surfaces de ces derniers.

On parle de :

- brasage tendre pour des températures mises en oeuvre inférieures à 450 °C (soldering)
- brasage dur (brazing) pour des températures mises en oeuvre supérieures à 450 °C. Par exemple, les brasures eutectiques argent-cuivre peuvent avoir des températures de fusion comprises entre 600 °C et 900 °C, les brasures de cuivre les moins coûteuses ont une température de fusion comprise entre 700°C et 1180°C.

Le brasage permet d'assembler des matériaux différents et des matériaux non métalliques (ex : verre).

12.6.2 Soudobrasage

Brasage fort « de proche en proche », comme lors d'une soudure à l'arc. Le terme soudobrasage n'a pas de sens mais est très utilisé. Il faudrait parler de brasage proche en proche.

12.6.3 Brasage diffusion

Les pièces sont maintenues en contact, soumises à un effort de compression et chauffées, sous vide. Le contact est amplifié par la déformation plastique locale des surfaces, qui provoque également une diffusion des atomes entre les éléments à assembler.

12.7 Critères de choix d'un procédé

- Nature des matériaux à assembler (composition chimique...)
- Géométrie de l'assemblage (géométrie, épaisseur, configuration de soudage)
- Type de fabrication (atelier, chantier)
- Construction neuve ou réparation
- Aspect économique (cadences souhaitées, main d'oeuvre, couts consommables)
- Propriétés souhaitées (fatigue, statique, corrosion, étanchéité.....)
- Configuration de soudage, géométrie : La précision de l'accostage et les possibilités de mauvais alignement. L'accès au joint : il faut s'assurer qu'à la fois l'équipement de soudage et la torche ou la tête de soudage peuvent être positionnés correctement. La position de soudage : les procédés sous flux en poudre et MAG avec « transfert par pulvérisation » ne conviennent pas pour du soudage vertical ou en position plafond.

12.8 Soudabilité des aciers non et faiblement alliés

12.8.1 Introduction

La capacité d'un métal à être soudé par un procédé particulier pour un assemblage donné est appelée sa soudabilité. On distingue :

- La soudabilité métallurgique : définit la possibilité de souder sans former de défauts (fissures...)
- La soudabilité opératoire : définit la possibilité d'exécution de l'assemblage
- La soudabilité constructive : définit l'aptitude de l'assemblage soudé à satisfaire les critères de tenue mécanique, de résistance à la corrosion.....

Le Mode Opératoire de Soudage décrit la façon de réaliser la soudure. Il doit satisfaire à ces trois critères.

Le soudage des aciers non et faiblement alliés comporte les risques de fragilisation et de fissuration suivants :

- fragilisation par transformation martensitique
- fragilisation par grossissement des grains (surchauffe)
- fragilisation par vieillissement
- fissuration à froid
- fissuration par arrachement lamellaire
- fissuration au réchauffage

Le principal risque de fissuration est la fissuration à froid. Les autres risques de fissuration sont plus rares car ils proviennent essentiellement de mauvais aciers.

12.8.2 Fissuration à froid

12.8.3 Description

La fissuration à froid apparaît dans la zone soudée, en fin de refroidissement. La qualité d'un acier n'a pas d'influence sur la fissuration à froid donc le choix d'un acier de qualité supérieure ne protège pas contre ce type de fissuration.

Le paramètre clé est la composition chimique de l'acier.

12.8.4 Défauts typiques de fissuration à froid

Les fissures dues à la fissuration à froid se retrouvent dans la ZAT ou en zone fondue (Figure 98). C'est en effet dans ces zones que le soudage modifie la microstructure du matériau soudé.

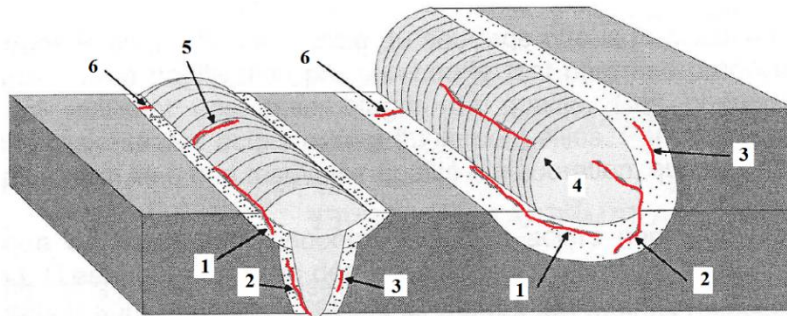


Figure 98. Défauts typiques de fissuration à froid 1 fissure au raccordement 2 fissure à la racine 3 fissure sous cordon 4 fissure longitudinale du métal fondu 5 fissure transversale du métal fondu 6 transversale ZAT

12.8.5 Facteurs d'apparition de la fissuration à froid

Trois facteurs peuvent être à l'origine de la fissuration à froid :

- la présence d'hydrogène
- des contraintes résiduelles trop élevées
- une microstructure fragile (de type martensitique)

La fissuration à froid ne nécessite pas que chaque facteur montre un niveau minimum. Mais si la somme atteint un seuil, il y a fissuration.

12.8.6 Origine de l'hydrogène

Au contact de la source de chaleur, l'humidité éventuellement présente (vapeur d'eau H_2O) se décompose et crée de l'hydrogène. L'humidité peut provenir de :

- l'humidité dans les enrobages d'électrodes ou les flux
- la pénétration d'air au sein de l'arc de soudage (si l'arc est trop long, s'il y a défaut de protection)
- l'humidité contenue dans les pièces à souder elles-mêmes

Remarque : les procédés TIG, résistance et FE limitent suffisamment la quantité de H pour garantir l'absence de risque de fissuration à froid

Remarque : les EE basiques sont sensibles à l'humidification dans l'air. Elles doivent être séchées $350^{\circ}C$ et stockées au chaud $150^{\circ}C$

Remarque : classement des procédés par quantité décroissante d'hydrogène qu'ils introduisent dans le métal: arc avec EE cellulosique (très fort taux d'H), arc avec EE rutile (fort taux), arc avec EE basique (assez faible taux), arc sous flux en poudre (comme les EE basiques), MAG (faible), TIG (très faible), résistance (presque aucun H), FE (sous vide donc pas de H)

12.8.7 Origine des contraintes résiduelles

Lors du refroidissement du bain de fusion, la zone fondue se contracte alors que le métal de base loin de la ZAT ne change pas de volume. Si la contraction du bain de fusion n'est pas accompagnée par un déplacement des pièces à assembler (s'il y a bridage), des contraintes résiduelles apparaissent dans la soudure. Un bridage trop important crée des contraintes résiduelles notables qui peuvent aider à générer de la fissuration à froid. Le bridage augmente avec l'épaisseur de l'assemblage, les structures composées de raidisseurs, un matériau au module d'Young élevé.

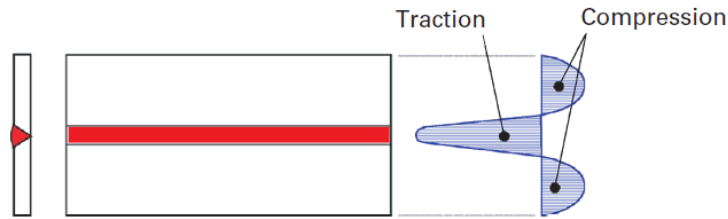


Figure 99. Contraintes résiduelles dans un cordon de soudure

12.8.8 Origine de la microstructure fragile

La microstructure fragile provient de la formation de martensite lors du refroidissement (voir §12.3.4).

La formation de martensite dépend du cycle thermique de soudage et de la composition de l'acier.

➤ Influence du cycle thermique

Lors du passage de la source de chaleur, la température augmente progressivement puis diminue lorsque la source de chaleur s'éloigne. En un point des matériaux à assembler, le cycle thermique du soudage en ce point est un graphe donnant l'évolution de la température en fonction du temps (Figure 100).

Figure 100. Cycle thermique de soudage

Un cycle thermique montrant une grande vitesse de refroidissement sera favorable à la trempe de l'acier et donc à la formation de martensite. Une grande vitesse de refroidissement peut venir d'une énergie linéaire de soudage faible, d'une forme des pièces qui favorise l'évacuation de la chaleur, d'une épaisseur importante des pièces, d'une forte densité d'énergie, de pièces à assembler initialement à température faible.

➤ Influence de la composition chimique de l'acier

La composition chimique de l'acier est propice à la transformation de martensite :

- si la teneur en carbone est suffisamment élevée (supérieure à 0,10 ou 0,15%)
- si l'acier contient des éléments d'addition (manganèse, chrome, molybdène, nickel...)

On estime ainsi la capacité d'un acier à créer de la martensite en calculant son carbone équivalent :

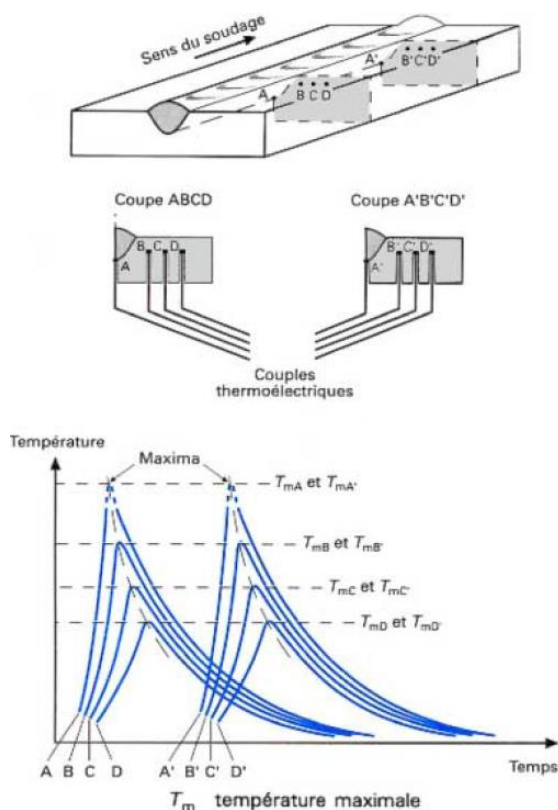
$$\text{Aciers non alliés : } Ceq = C + \frac{Mn}{6}$$

$$\text{Aciers faiblement alliés : } Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

Avec C : % carbone ; Mn : % manganèse ; Cr : % chrome ; Mo : % molybdène ; V : % vanadium ; Ni : % nickel ; Cu : % cuivre

Plus le carbone équivalent, Ceq, est élevé, plus le risque de trempe est important lors du refroidissement.

- $Ceq < 0,35$: pas de risque
- Ceq entre 0,35 et 0,45 : risque (arc EE, arc MAG) : augmenter énergie de soudage, préchauffage



- Ce supérieur à 0,45 : trempe quasi certaine, donc si présence d'hydrogène et de contraintes résiduelles : fissuration à froid. Le mode opératoire doit être très spécial (pré/post chauffage, soudure hétérogène.....)

12.9 Liens utiles

- Soudage par friction : www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction
- The Welding Institute www.theweldinginstitute.com/
- Institut de Soudure www.isgroupe.com/fr/

12.10 Lexique anglais/français

- SMAW : soudage à l'arc avec électrode enrobée
- GTAW : soudage à l'arc avec électrode de tungstène (TIG)
- GMAW : soudage à l'arc sous gaz avec fil plein (MIG/MAG)
- FCAW : soudage à l'arc avec fil fourré

13 Références

- [1] NF EN 10027-1 AFNOR, « NF EN 10027-1 Systèmes de désignation des aciers - Partie 1 : désignation symbolique ». AFNOR, novembre 2005.
- [2] NF EN 10020 AFNOR, « NF EN 10020 Définition et classification des nuances d'acier ». AFNOR, septembre 2000.
- [3] NF EN 10027-2 AFNOR, « NF EN 10027-2 Systèmes de désignation des aciers - Partie 2 : système numérique ». AFNOR, juin 2015.
- [4] Y. Nadot, « Influence of casting defects on the fatigue limit of nodular cast iron », *International Journal of Fatigue*, vol. 26, n° 3, p. 311-319, mars 2004, doi: 10.1016/S0142-1123(03)00141-5.
- [5] R. Develay, « Traitements thermiques des alliages d'aluminium », *Traitements des métaux*, doi: 10.51257/a-v2-m1290.
- [6] Y. Chabanne, « Interactions fatigue - fluage - corrosion sur la résistance à la fissuration des alliages de titane », 2000.
- [7] D. Colas, « Renforcement d'alliages fer-aluminium ordonnés B2 : influence d'additions (Ni, B) et de la microstructure », 2004. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2004EMSE0016/document>
- [8] A. Chevalier, *Guide du dessinateur industriel: pour maîtriser la communication technique à l'usage de l'enseignement des sciences de l'ingénieur et des technologies industrielles*, Éd. 2003-2004. in Collection Guides industriels. Paris: Hachette technique, 2003.
- [9] C. Suryanarayana, « Mechanical behavior of emerging materials », *Materials Today*, vol. 15, n° 11, p. 486-498, nov. 2012, doi: 10.1016/S1369-7021(12)70218-3.
- [10] G. Hénaff, « Cours de propriétés mécaniques des matériaux ». ISAE-ENSMA, 2003.
- [11] M. Dupeux, *Aide-mémoire de science des matériaux*, 3^e éd. DUNOD, 2013.
- [12] M. Ashby et D. Jones, *Matériaux. 1. Propriétés, applications et conception*. DUNOD, 2013.
- [13] M. Ashby et D. Jones, *Matériaux. 2. Microstructure et procédés de mise en oeuvre*, 4^e éd. DUNOD, 2014.
- [14] G. Murry, « Transformations dans les aciers », *Traitements des métaux*, sept. 1998, doi: 10.51257/a-v2-m1115.
- [15] G. Murry, « Traitements thermiques dans la masse des aciers. Introduction », *Traitements des métaux*, juin 2000, doi: 10.51257/a-v2-m1125.
- [16] J. Barralis et G. Maeder, *Métallurgie: élaboration, structures-propriétés, normalisation*, Nouv. éd. in Précis. [Paris-La Défense] Paris: AFNOR Nathan, 1997.
- [17] N. Appert, « L'art de conserver, pendant plusieurs années, toutes les substances animales et végétales ». 1810. [En ligne]. Disponible sur: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k202755q>
- [18] P. Aubrun, « Aciers pour emballage », *Élaboration et recyclage des métaux*, oct. 1990, doi: 10.51257/a-v1-m7960.
- [19] Arcelor, « Steel for packaging - Product catalogue ». 2013. [En ligne]. Disponible sur: www.arcelormittal.com/packaging
- [20] J.-C. Calmon et J. Cenac, « Laminage à froid des produits plats », *Élaboration et recyclage des métaux*, oct. 1994, doi: 10.51257/a-v1-m7950.
- [21] H. Biaisser, P. Choquet, et P. Delaneau, « Métallurgie des tôles laminées sur trains continus », *Mise en forme des métaux et fonderie*, mars 2000, doi: 10.51257/a-v1-m3060.
- [22] A. Kleniewski, « Emballages métalliques », *Emballages*, févr. 1995, doi: 10.51257/a-v1-a9760.
- [23] R. Albernay, « Laminage à chaud des produits plats sur train à bandes. Partie 1 », *Élaboration et recyclage des métaux*, mars 2007, doi: 10.51257/a-v2-m7940.
- [24] C. Brun, « Recuit continu », *Élaboration et recyclage des métaux*, déc. 1996, doi: 10.51257/a-v1-m7955.
- [25] J.-P. Pothet, *Les matériaux d'emballage*. in Aide-mémoire de l'ingénieur. Paris: « L'Usine nouvelle » Dunod, 2008.
- [26] Y. Ledoux, « Optimisation des procédés d'emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques », 2005.
- [27] « guide de bonnes pratiques d'hygiène et de fabrication des boîtes, emballages et bouchages métalliques pour denrées alimentaires ». [En ligne]. Disponible sur: www.snfbm.fr
- [28] Y. Pelletier, « Revêtements intérieurs pour emballages métalliques », *Emballages*, juin 2000, doi: 10.51257/a-v1-f1310.
- [29] D. Groner et D. Groner, « U.S. Air Force aging aircraft corrosion », in *38th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Kissimmee, FL, U.S.A.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, avr. 1997. doi: 10.2514/6.1997-1364.
- [30] K. Anderson, J. Weritz, J. G. Kaufman, ASM International, et ASM International, Éd., *ASM handbook. Volume 2A: Aluminium science and technology / volume editors: Kevin Anderson (FASM, Mercury Marine)*,

- John Weritz (Aluminum Association), J. Gilbert Kaufman (FASM, Kaufman Associates)*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2018.
- [31] J. De Luccia, « The corrosion of aging aircraft and its consequences », in *32nd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Baltimore, MD, U.S.A.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, avr. 1991. doi: 10.2514/6.1991-953.
 - [32] F. Menan, « Influence de la corrosion saline sur la tolérance aux dommages d'un alliage d'aluminium aéronautique 2XXX », 2008. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2008POIT2301/document>
 - [33] M. O. Speidel, « Stress corrosion cracking of aluminum alloys », *Metall Trans A*, vol. 6, n° 4, p. 631-651, avr. 1975, doi: 10.1007/BF02672284.
 - [34] A. Bastier, « Modélisation du soudage d'alliages d'aluminium par friction et malaxage », 2006. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2006EPXX0045/document>
 - [35] P. Arnaud, *Les cours de Paul Arnaud. Chimie Physique*, 6^e éd. DUNOD, 2007.
 - [36] *Vade-mecum des matériaux*, Fédération Française des Matériaux. 2010.
 - [37] A. Rivière, « Cours de matériaux ». ISAE ENSMA, 2003.
 - [38] R. Lefaux, *L'industrie du fer blanc et des emballages métalliques*. Office scientifique et technique des pêches maritimes, 1947. [En ligne]. Disponible sur: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00022/13290/10334.pdf>
 - [39] VIGNES et ANDRE, *Une vie de fer-blanc Expériences sur l'élaboration, les propriétés et le recyclage d'un matériau*, BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS Vol 88., vol. 88. 1994.
 - [40] Techniques de l'Ingénieur, « M240 Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium ».
 - [41] Hocheid, *Que sais-je ? La métallurgie*, Presses Universitaires de France. 1970.
 - [42] S. Pommier, « Science des Matériaux ». ENS CACHAN, 2005.
 - [43] M. Dupeux et J. Gerbaud, *Exercices et problèmes de sciences des matériaux*. in Sciences sup. Paris: Dunod, 2010.
 - [44] J. Hertz, « Diagrammes d'équilibre - Alliages binaires », *Étude et propriétés des métaux*, déc. 1999, doi: 10.51257/a-v2-m70.
 - [45] NF EN ISO 8044 AFNOR, « NF EN ISO 8044 Corrosion des métaux et alliages - Vocabulaire ». AFNOR, mars 2020.