

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté Technologie
Département des génie mécanique



Intitulé : Traitement Thermique

Préparé par :

Dr Rassim YOUNES

Maître de conférences de classe A au Département Génie mécanique
Faculté de Technologie, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, ALGERIE.

Maître de conférences de classe A
Université A.MIRA de Bejaia
Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

ENGAGEMENT

Je soussignée Mr Rassim YOUNES Maître de conférences classe A à l'université A.MIRA de Bejaia, que le Polycopié ci-joint, intitulé : **Traitements Thermiques**, relève d'un travail personnel résultant des efforts fournis lors de mes activités pédagogiques.

Signature

Avant-propos

Ce fascicule a été conçu comme support de cours pour les enseignements du module "**Traitement thermique**", que j'ai assuré au niveau du Département du génie mécanique, Faculté de Technologie l'université A/Mira de Bejaia.

Ce cours s'intéresse aux fondements des traitement thermique. Il a pour but de familiariser les étudiants avec les principaux éléments de science des matériaux, métallurgie, et traitement thermique. Il prolonge le cours de science des matériaux de deuxième année de licence génie mécanique.

Ce support a pour objectif de donner aux étudiants, à travers le contenu des chapitres et les séries d'exercice, les bases de la compréhension des **Traitement thermique**.

On a conçu le programme détaillé de ce module "traitement thermique" dans le cadre du cycle Master génie mécanique option, génie matériaux en s'appuyant sur diverses références : des ouvrages reconnus dans la discipline, mais aussi et surtout des ressources en ligne. Les principales références que nous avons utilisées pour la composition de ce support sont données dans la bibliographie, particulièrement l'ouvrage D. Guitard,;Mécanique du matériau céramique et composites, Cépadues Ed. M.F. Ashby,;Matériaux. . Microstructure et mise en œuvre,;Dunod. J. Bodig, B.A. Jayne, " Mechanics of Wood and Wood composites", Van Nostrand Reinhold.. J.M. Dinwoodie, "Timber, its Nature and behavior", Van Nostrand Reinhold.H.E. Desch, Timber, its Structure, Proprieties, and utilization", Macmillan.. D. Gay, "Matériaux composites", Hermes.N.C. Hillyard, "Mechanics of Cellular Plastics" Ap. Sc. Publishers.. M. Grayson, "Encyclopedia of Composite Materials and Components".

Université Abderrahmane Mira-Béjaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Intitulée du module : Traitement thermique

Objectifs de l'enseignement:

- Mettre en œuvre les principaux traitements thermiques et les principales techniques expérimentales pour l'étude des transformations structurales des alliages métalliques
- Mettre en évidence les modifications des propriétés et la valorisation des matériaux obtenues à l'issue des traitements
- Mettre en évidence les corrélations entre les comportements, les traitements et les structures.

Connaissances préalables recommandées:

Thermodynamique (compréhension des diagrammes d'équilibre et de phase, thermochimie), notions de mécanique. Métaux et alliages

Contenu de la matière:

- Les traitements thermiques industriels classiques (recuits et trempes, recuits)
- Traitements thermochimiques de diffusion (Cémentation, Nitruration etc...)

- Les observations micrographiques et la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques

Utilisation de documents et de logiciels professionnels (diagrammes de transformations, traitements thermiques, prévision des caractéristiques)

(Selon les moyens disponibles dans l'établissement)

Les manipulations : Chaque manipulation est conçue comme un projet expérimental associant le matériau objet de l'étude, les traitements, et la caractérisation. Les différentes manipulations abordent les thèmes suivants :

- La modification des propriétés des alliages par traitement thermique dans la masse et l'étude des mécanismes de durcissement des alliages métalliques
- La prévision des caractéristiques mécaniques des aciers
- La modification des propriétés superficielles des matériaux
- La déformation à froid et les effets des recuits après écrouissage

Mode d'évaluation:

Contrôle continu: 40%; Examen: 60%.

Références bibliographiques :

- Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés, normalisation / J. Barralis ; G. Maeder / AFNOR /1997
- Matériaux industriels : matériaux métalliques / M. Colombié / Dunod / 2000
- Métallurgie : métaux, alliages, propriétés / G. Murry / Dunod / 2004

- Métallurgie Tome I : alliages métalliques / C. Chaussin ; G. Hilly / Dunod /1967
- Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques et thermochimiques des aciers / A. Constant ; G. Henry ; J.C. Charbonnier / Pyc Edition / 1992
- Eléments de Métallurgie Physique T3 à T5 / Adda ; Philibert ; Quere ; Dupouy / CEA / 1988
- Science des matériaux : métallurgie mécanique - Du microscopique au macroscopique / Cornet ; Hlawka / Ellipses / 2006 / Technosup

LISTE

DES

FIGURES

Chapitre I : Définition des céramiques parmi les matériaux

Figure 1	Exemple de l'atome de lithium.....	06
Figure 2	Schémas des structures de bandes. a) d'un amas d'atomes de métal (la bande de conduction comporte des états disponibles); b) d'un amas d'atomes de non-métal (la bande interdite a une largeur E importante); c) d'un amas d'atomes de semi-conducteur (la bande interdite a une largeur faible).....	09
Figure 3	molécule de dichlore Cl_2	10
Figure 4	Le chlorure de sodium $NaCl$	10
Figure 5	Cristal de sodium Na	11
Figure 6	Liaison secondaire	11
Figure 7	Courbe essai de Traction	13

Chapitre II : Diagramme D'équilibre Binaire et ternaire

Figure 1	Règle de l'horizon	25
Figure 2	Lecture du diagramme d'équilibre	27
Figure 3	Les deux diagrammes d'équilibre binaire suivants présentent respectivement le diagramme Ni-Cu et $Al_2O_3-Cr_2O_3$	28
Figure 4	Diagramme eutectique	30
Figure 5	Diagramme Pb-Sn	34
Figure 6	Diagramme péritectique	36

Liste des figures

Figure 7	Diagramme monotectique	37
Figure 8	Diagramme binaire	38
Figure 9	Deux types de transformations à la fois.....	39
Figure 10	Diagramme binaire.....	39
Figure 11	Ségrégation mineure.....	40
Figure 12	Les trois zones de formation.....	41
Figure 13	Système ternaire en représentation isotherme.....	44
Figure 14	Diagramme ternaire présentant une transformation eutectique.....	45
Figure 15	Projection des équilibres invariants.....	45
Figure 16	Isoplèthe du diagramme.....	46
Figure 17	Diagramme ternaire péritectique du premier type.....	46
Figure 18	Projection des équilibres invariants.....	47
Figure 19	Diagramme ternaire péritectique de deuxième type.....	48

Chapitre III : Diagramme Fer Carbone

Figure 1	courbe de refroidissement du fer pur.....	52
Figure 2	Diagramme fer cémentite	56
Figure 3	les divers constituants micrographiques des aciers et des fontes.....	65
Figure 4	les divers constituants micrographiques des aciers et des fontes.....	65
Figure 5	Diagramme d'équilibre Fe-Fe ₃ C et courbes de refroidissement de l'acier(a) et de la fonte (b).....	68

Liste des figures

Figure 6	la structure de l'acier à 0,05 % C.....	69
Figure 7	La structure de l'acier à 0,15 % C	70
Figure 8	Aciers à 0,25% C.....	71
Figure 9	Aciers à 0,40% C.....	72
Figure 10	Aciers à 0,60%C.....	73
Figure 11	Eutectoï des aciers à 0,80%C.....	74
Figure 12	Perlite lamellaire fine	74
Figure 13	Perlite lamellaire épaisse.....	74
Figure 14	Perlite lamellaire épaisse, la ferrite est fort attaquée.....	75
Figure 15	Perlite lamellaire épaisse, la ferrite est plus attaquée.....	75
Figure 16	Perlite globulaire, la cémentite de la perlite.....	75
Figure 17	Perlite globulaire, les grains noirs représentent la cémentite	76
Figure 18	Perlite sombre, cémentite secondaire claire.....	77
Figure 19	Cémentite sombre, perlite claire.....	77
Figure 20	Perlite avec bandes larges de cémentite secondaire sur les joints.....	77
Figure 21	La cémentite sous forme d'aiguilles se trouve partiellement, sur les joints de grains à l'intérieur des cristaux d'austénite première.....	78
Figure 22	Perlite + des halos de ferrite en tourant la cémentite secondaire.....	78
Figure 23	Cémentite globulaire (recuit d'adoucissement).....	78

Liste des figures

Figure 24	Perlite+lédéburite+cémentite secondaire dans les joints de grains.....	80
Figure 25	Perlite+cristaux mixtes (sombre) dans la perlite+lédéburite.....	81
Figure 26	Lédéburite : les cristaux du lédéburite ont la forme dendritique.....	82
Figure 27	Lédéburite : les cristaux du lédéburite ont la forme globulaire.....	82
Figure 28	Cristaux decémentite primaire (aiguilles) dans le lédéburite.....	83
Figure 29	Cristaux decémentite primaire (aiguilles) dans le lédéburite.....	83
Figure 30	Triangle des structure de l'alliage Fe-C.....	90
Figure 31	le diagramme de Uhlit Zsch.....	92
Figure 32	Diagramme Fer- graphite (système stable).....	96
Figure 33	Influence du carbone.....	99
Figure 34	Teneur en elements d'alliages.....	102
Figure 35	Teneur en elements d'alliages.....	103

Chapitre 4 : Traitement thermique

Figure 1	Le cycle thermique.....	109
Figure 2	Le cycle thermique.....	115
Figure 3	Le cycle thermique.....	118
Figure 4	Le cycle thermique.....	119
Figure 5	Le cycle thermique.....	122
Figure 6	Le cycle thermique lors d'une trempe.....	131
Figure 7	Le cycle thermique lors d'une trempe subzéro ou cryogénique.....	134
Figure 8	Le cycle thermique lors d'un revenu.....	134

Liste des figures

LISTE

DES

Tableaux

Chapitre 1 : Définition des céramiques parmi les matériaux

Tableau 1	Masse et charges électriques des particules élémentaires.....	7
Tableau 2	Principe de la classification périodique des éléments chimique.....	8
Tableau 3	Les différents éléments chimiques	20
Tableau 4	Masse volumique.....	20
Tableau 5	Propriétés électriques.....	20
Tableau 6	Propriétés thermiques.....	21

Chapitre 2: Diagramme D'équilibre Binaire et ternaire

Tableau 1	Etat d'un mélange au cours de son refroidissement.....	28
Tableau 2	Alliage non concerné par l'horizontale eutectique: $C_0 < C(S_1)$	32
Tableau 3	Alliage hypoeutectique: $C(S_1) < C_0 < C(E)$	32
Tableau 4	Alliage eutectique : $C_0 = C(E)$	33

Chapitre 3 : diagramme Fer Carbone

Tableau 1	les caractéristiques des différentes phases.....	53
Tableau 2	Les points caractéristiques du diagramme fer-carbone stable et métastable...	59

Liste des tableaux

Tableau 3	Définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone.....	60
Tableau 4	Les trois différentes formes de liaisons de la cémentite.....	62
Tableau 5	la dureté des différents constituants des aciers.....	65
Tableau 6	Ferrite alliée: dureté après avoir ajouté successivement 1% en poids des éléments.....	65
Tableau 7	l'influence des principaux éléments d'alliage sur les différentes propriétés des aciers.....	106

Chapitre 4 : Traitement thermique

Tableau 1	Petit lexique français-anglais des concepts utilisés en traitement Thermique.....	112
Tableau 2	La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe.....	132

Table des matières

Introduction	4
1 Chapitre 1 : Définition des céramiques parmi les matériaux.....	6
1.1 Classification des éléments chimiques	6
1.2 Liaisons chimiques	9
1.2.1 Liaisons fortes	9
1.2.2 Liaisons faibles ou liaisons secondaires	11
1.3 Essais des matériaux.....	13
1.4 Les aciers (FER+ 0,08 à 1% deCarbone)	14
1.4.1 Classification par emplois.	14
1.4.2 Classificationparcompositionchimique.	14
1.5 LES FONTES (Fer de 1,67 à 4,2% de Carbone).....	16
1.5.1 Les fontes à Graphite Lamellaire.....	16
1.5.2 Les fontes malléables à Graphite Sphéroïdal	16
1.6 LES ALLIAGES NON FERREUX.....	17
1.6.1 Aluminium et ses alliages.....	17
1.6.2 Cuivre et ses alliages	17
1.7 LES POLYMERESOU MATIERES PLASTIQUES.....	18
1.7.1 Les thermoplastiques	18
1.7.2 Les thermodurcissables	19
1.7.3 Les élastomères ou«caoutchoucs».....	19
1.8 Les Céramiques.	19
1.8.1 Les céramiques traditionnelles	19
1.8.2 Lescéramiques techniques.....	19
1.9 Les matériaux composites.	19
1.9.1 Massevolumique.....	20

1.9.2	Propriétés thermiques.....	21
2	Chapitre 2: Diagramme D'équilibre Binaire et ternaire	24
2.1	Diagramme d'équilibre binaire.....	24
2.1.1	Règles d'utilisation	24
2.1.2	Système à miscibilité totale à l'état solide.....	26
2.1.3	Allure et lecture du diagramme d'équilibre.....	27
2.1.4	Système à miscibilité partielle à l'état solide	29
2.1.5	Diagrammes d'équilibre binaires réels	37
2.1.6	Réalité de la solidification des alliages.....	40
2.2	Diagramme Ternaire.....	43
2.2.1	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
3	Chapitre 3 : diagramme fer Carbone	50
3.1	DIAGRAMME FER-CARBONE	50
3.1.1	Le fer et ses caractéristiques	50
3.1.2	Le carbone et ses caractéristiques.....	53
3.1.3	Diagramme d'équilibre: Fer-cémentite	55
3.1.4	Solidification et transformation des aciers et fontes.....	68
3.1.5	Aciers hypereutectoïdes.....	77
3.1.6	Fontes hypoeutectiques	80
3.1.7	Fontes eutectiques	83
3.1.8	Fontes hypereutectiques	83
3.1.9	Détermination de la position des composants dans la structure	85
3.1.10	Diagramme d'équilibre fer-graphite.....	95
3.1.11	Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier	99
3.1.12	Influence des éléments chimiques constants	100
3.1.13	Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier.....	103
3.1.14	Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de la fonte.....	139
4	Chapitre 4 : Traitement thermique	139

4.1	L'univers des traitements thermiques.....	109
4.2	Les traitements thermiques de l'acier.....	112
4.2.1	Les recuits.....	113
4.2.2	La trempe de l'acier.....	148
4.2.3	Les revenus.....	135
4.3	L'univers des traitements thermiques.....	1137
4.3.1	Lacémentation	1138
4.3.2	La nitruration.....	15141
4.3.3	La nitrocarburation	15142

Introduction

Dans l'univers de l'ingénierie, les matériaux occupent une place centrale car sans eux, rien ne peut être fabriqué, rien ne peut être fait. Ils constituent une technologie-clé transversale. Les caractéristiques d'un matériau donné (ou d'un groupe de matériaux analogues) conditionnent largement la manière dont il peut être travaillé; en retour, sa mise en œuvre peut fortement influencer sa microstructure ; et ceci détermine les propriétés du matériau dans la pièce finie et sa capacité à bien remplir sa fonction dans l'application prévue. Dans de nombreux cas, des choix s'offrent à l'ingénieur : choix de différents matériaux ou de différents procédés de mise en œuvre. L'innovation prend souvent la forme du remplacement d'une pièce faite d'une catégorie de matériau (un métal, par exemple) par une autre (en composite à fibres, par exemple). Un tel changement radical de matériau implique habituellement de reconcevoir la pièce de manière à ce que le procédé de fabrication, la structure et les propriétés du matériau de substitution soient pleinement pris en compte. Malgré tout, dans certains cas, il n'y a vraiment qu'un seul type de matériau qui puisse convenir pour remplir la fonction demandée : sans les superalliages, nous devrions toujours voler dans des avions à moteurs à pistons ; sans les pneumatiques en caoutchouc, nous devrions voyager sur terre essentiellement en chemin de fer ; sans ciment et béton, la construction moderne n'existerait pas ; et nous ne pourrions pas nous passer de papier, un excellent composite à base de matériau naturel.

La métallurgie est la branche de la science qui s'occupe de la relation générale entre la composition, la structure et les propriétés des métaux et des alliages, ainsi que les changements apportés par la métallurgie physique. propriétés des métaux et des alliages, Le but de la métallurgie, en tant que science, est d'établir les lois qui régissent la structure d'un alliage. Les lois physiques qui régissent la structure d'un alliage et ses propriétés. et de trouver la meilleure composition, les meilleures techniques de fabrication et le meilleur traitement possible de l'alliage pour obtenir un résultat satisfaisant, de fabrication et de traitement de l'alliage pour obtenir les propriétés physiques et mécaniques requises propriétés physiques et mécaniques. .

Tous les métaux et leurs alliages sont des solides cristallins : Ils diffèrent des solides amorphes dans lesquels les atomes sont disposés de manière chaotique, car les solides

cristallins ont une structure interne définie et ordonnée répétée en trois dimensions. Si l'on considère que les centres des atomes sont comme étant reliés entre eux par des lignes droites, on obtiendra un système comprenant un grand nombre d'atomes égaux. un système composé d'un grand nombre de parallélépipèdes égaux. Ce système est connu sous le nom d'espace ou de réseau cristallin. Le plus petit parallélépipède qui pourrait être transposé dans trois directions pour construire le réseau spatial est appelé pour construire le réseau spatial est appelé cellule unitaire. Les réseaux spatiaux de diverses substances diffèrent par la taille et la répartition de leurs cellules unitaires.

Le traitement thermique des métaux est une discipline fondamentale dans l'ingénierie des matériaux, qui vise à modifier les propriétés des métaux en les soumettant à des cycles de chauffage et de refroidissement contrôlés. Ce processus peut être utilisé pour améliorer la résistance, la dureté, la ductilité, la ténacité, la résistance à la corrosion et d'autres caractéristiques des métaux. Il existe différents types de traitements thermiques des métaux, chacun ayant ses propres objectifs et méthodes. Le durcissement structural est un traitement thermique qui vise à augmenter la résistance des métaux en formant une structure cristalline plus dure et plus résistante. Cela peut être réalisé par des méthodes telles que le durcissement par précipitation et la transformation de phase. Le traitement thermo-chimique est un processus qui implique à la fois des variations de température et de composition chimique, telles que la nitruration et la cémentation. Cela permet d'améliorer les propriétés de surface des métaux en introduisant des éléments chimiques ou en formant des couches protectrices. En comprenant les principes fondamentaux et les techniques du traitement thermique des métaux, il est possible d'optimiser les propriétés des matériaux pour répondre aux exigences spécifiques des applications industrielles, de l'aérospatiale, de l'automobile et de nombreux autres domaines.

1 Chapitre 1 : Définition des céramiques parmi les matériaux

Il existe trois grandes classes de matériaux :

- Les métaux et leurs alliages ;
- Les polymères organiques ;
- Les céramiques.

A ces trois classes, il convient d'en ajouter une quatrième :

► Les matériaux composites, qui sont des « mélanges hétérogènes » de matériaux des trois classes précédentes.

D'une manière générale, nous considèrerons qu'un matériau céramique est un solide inorganique non métallique. C'est la définition de la céramique au sens large du terme. Ainsi, les céramiques ne sont pas définies par rapport à une technologie (dont l'étape majeure serait le frittage) mais par référence à une nature chimique.

1.1 Classification des éléments chimiques

Les atomes des éléments chimiques diffèrent par leur structure à l'échelle subatomique, c'est-à-dire le nombre et la nature des particules élémentaires qui les constituent : – noyau : protons et éventuellement neutrons; – cortège électronique gravitant autour du noyau : électrons en nombre égal aux protons dans un atome à l'équilibre. Les protons sont chargés positivement et les électrons négativement, de charges élémentaires égales en valeurs absolues, de sorte que

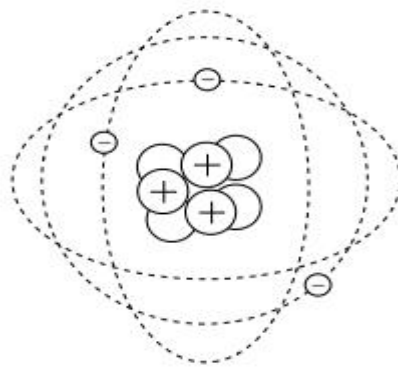


Figure 1: Exemple de l'atome de lithium.

– 3 électrons – 3 protons \Rightarrow **numéro atomique (nombre de proton $Z=3$)**

Noyau :

– 3 protons – 4 neutrons \Rightarrow **masse atomique (nombre de protons et de neutrons) $A=7$**

l'atome est électriquement neutre à l'état d'équilibre (figure 1). La masse de l'électron est négligeable devant celle du proton ou du neutron (tableau 1). Les orbites des électrons occupent dans un atome des couches successives, correspondant à des niveaux d'énergie discrets, qui deviennent des **bandes** dans les solides regroupant plusieurs atomes.

Ces niveaux ne peuvent contenir qu'un nombre limité d'électrons : deux pour le premier, huit pour les niveaux suivants (du moins lorsqu'ils se trouvent en position externe), et ils sont séparés par des **bandes interdites**. On appelle **énergie de Fermi** de l'atome considéré la limite supérieure du remplissage des états d'énergie électroniques à l'équilibre thermodynamique et au zéro absolu.

Tableau 1 Masse et charges électriques des particules élémentaires.





















Particule	Masse (au repos)	Charge électrique
Électron	$9,110 \cdot 10^{-31}$ kg	$-1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Proton	$1,673 \cdot 10^{-27}$ kg	$-1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Neutron	$1,675 \cdot 10^{-27}$ kg	0

Tableau de classification périodique des éléments chimiques ou tableau de Mendéléiev.(Tableaux 2)

Les lignes ou périodes sont les niveaux successifs des couches électroniques. Les colonnes ou groupes sont le nombre d'électrons dans la couche externe. À partir du deuxième élément de la quatrième période (calcium), les couches électroniques internes peuvent recevoir plus de huit électrons; des éléments supplémentaires s'intercalent donc avant le passage au groupe suivant. Les propriétés chimiques d'un élément proviennent essentiellement de ses électrons, et en particulier de ceux de la couche externe, appelés

électrons de valence; ces propriétés sont donc liées au groupe (colonne du tableau de classification périodique) auquel il appartient.

Tableau 2 PRINCIPE DE LA CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

	Groupe I	Groupe II	Groupe III	Groupe IV	Groupe V	Groupe VI	Groupe VII	Groupe VIII
1 ^{re} Période (bande K)	Z = 1 A = 1  Hydrogène H							Z = 2 A = 4  Hélium He
2 ^{de} Période (bandes K et L)	Z = 3 A = 7  Lithium Li	Z = 4 A = 9  Béryllium Be	Z = 5 A = 11  Bore B	Z = 6 A = 12  Carbone C	Z = 7 A = 14  Azote N	Z = 8 A = 16  Oxygène O	Z = 9 A = 19  Fluor F	Z = 10 A = 20  Néon Ne
3 ^{de} Période (bandes K, L et M)	Z = 11 A = 23  Sodium Na	Z = 12 A = 24  Magnésium Mg	Z = 13 A = 27  Aluminium Al	Z = 14 A = 28  Silicium Si	Z = 15 A = 31  Phosphore P	Z = 16 A = 32  Soufre S	Z = 17 A = 35  Chlore Cl	Z = 18 A = 40  Argon Ar
4 ^{de} Période (bandes K, L, M et N)	Z = 19 A = 39  Potassium K	Z = 20 A = 40  Calcium Ca	...					
5 ^e Période...								

Isotopes. Éléments possédant le même numéro atomique (donc les mêmes propriétés électroniques et chimiques), mais des masses atomiques différentes, en raison d'un nombre différent de neutrons. Dans la nature, certains éléments chimiques existent sous forme de mélanges d'isotopes; ceci entraîne des valeurs de masses atomiques moyennes non entières (tableau .1).

Propriétés des groupes. Les éléments du groupe VIII, appelés **gaz rares**, sont caractérisés par une couche externe complète; ceci leur confère une stabilité chimique exceptionnelle. Les éléments du groupe I A (tableau 2) ne possèdent qu'un seul électron sur leurs couches externes : ils ont tendance à s'en défaire pour avoir une couche extérieure saturée et donner

des ions positifs ou **cations**. Cette tendance s'étend aussi à tous les éléments de la partie gauche du tableau, appelés **métaux**, qui sont tous donneurs d'électrons.

Les éléments du groupe VII A possèdent sept électrons sur leurs couches externes : ils ont tendance à la compléter en captant un électron disponible dans leur voisinage pour donner des ions négatifs ou **anions**.

Cette tendance s'étend aussi à certains éléments de la partie droite du tableau, appelés **non-métaux**, tous accepteurs d'électrons. Certains éléments situés à la limite entre ces deux zones présentent des caractères mixtes, variables selon le champ électrique auquel ils sont soumis (ils sont semi-conducteurs). La figure 2 illustre ces différences de comportement par les structures de bandes de ces divers types atomes.

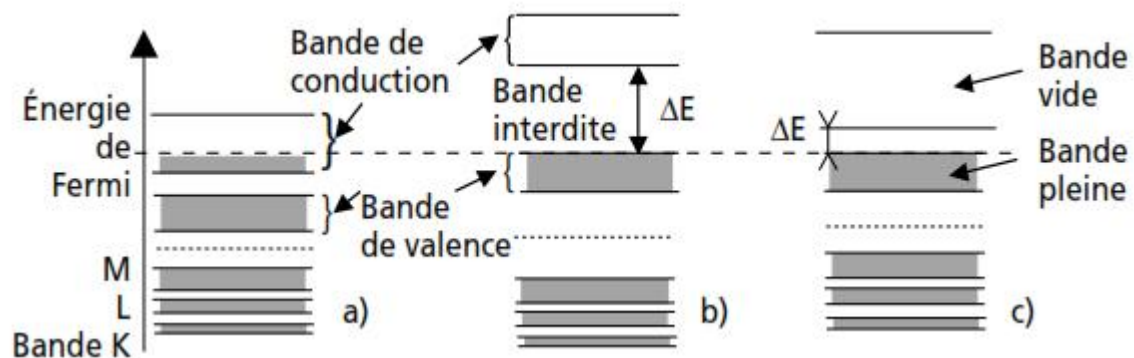


Figure 2: Schémas des structures de bandes. a) d'un amas d'atomes de métal (la bande de conduction comporte des états disponibles); b) d'un amas d'atomes de non-métal (la bande interdite a une largeur E importante); c) d'un amas d'atomes de semi-conducteur (la bande interdite a une largeur faible).

1.2 Liaisons chimiques

1.2.1 Liaisons fortes

a) Liaison covalente

Elle est assurée par la mise en commun de deux électrons pour compléter la couche externe de chaque

atome. Elle apparaît entre deux atomes de non métaux (liaison assurée par des électrons de la bande de valence).

Exemple. La molécule de dichlore Cl_2

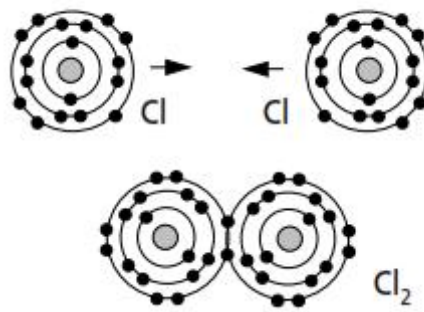


Figure 3 : molécule de dichlore Cl_2

b) Liaison ionique

Elle est assurée par le transfert d'un électron d'un atome à l'autre. Elle apparaît entre un atome d'un métal et un atome d'un non-métal. Après leur liaison, les deux atomes deviennent des ions chargés électriquement.

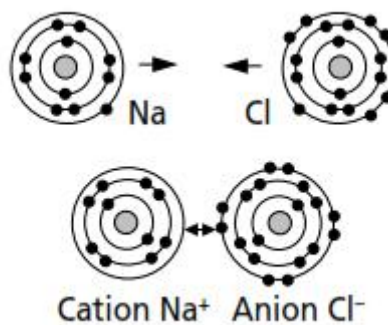


Figure 4 : Le chlorure de sodium NaCl .

c) Liaison métallique

Elle est assurée par la mise en commun d'électrons de la couche périphérique; le « gaz » constitué par ces électrons libres et délocalisés assure la cohésion de l'ensemble des cations restants.

Elle apparaît entre les éléments d'un amas d'atomes métalliques (liaison assurée par les électrons de la bande de conduction). Les électrons de la liaison métallique sont mobiles et disponibles pour assurer la circulation éventuelle d'un courant électrique.

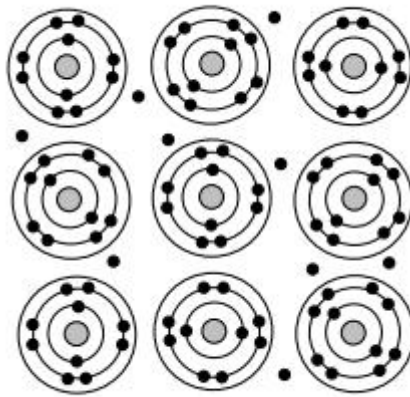


Figure 5 : Cristal de sodium Na.

1.2.2 Liaisons faibles ou liaisons secondaires

Ce sont de simples attractions électrostatiques entre charges électriques de signes opposés. Elles apparaissent entre les pôles + et - de molécules à répartitions de charges inhomogènes ou polarisables. Elles agissent à plus longue distance, mais avec une intensité plus faible que les liaisons fortes.

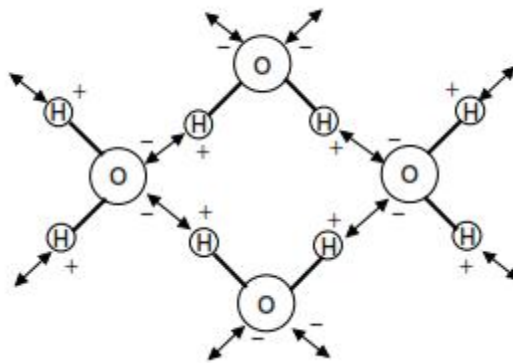


Figure 6 : Liaison secondaire

Exemples.

- Liaisons de Van der Waals entre macromolécules dans un polymère.
- Liaisons-hydrogène entre molécules d'eau H₂O dans la glace (cf. schéma ci-dessus).

La définition complète d'un organe de machine exige la détermination de sa forme, de ses dimensions et de sa matière. Le choix d'un matériau dépend de plusieurs critères:

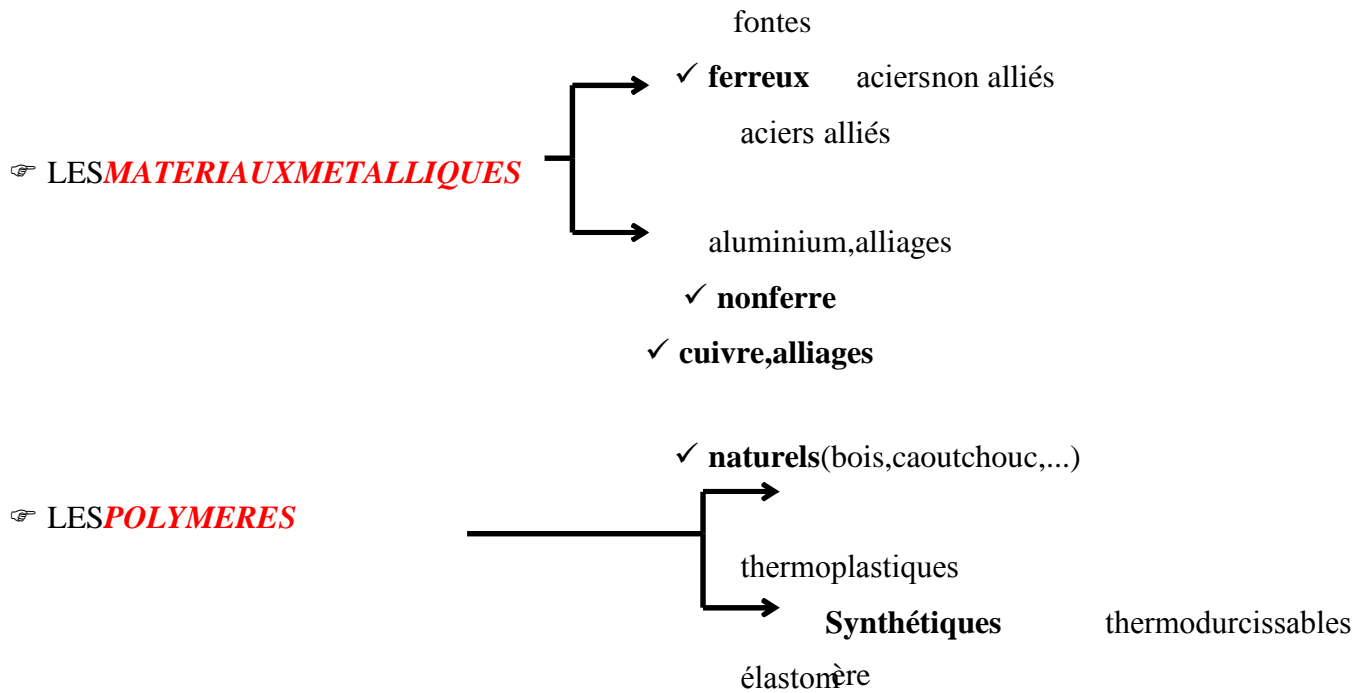
Caractéristiques **mécaniques** : limite élastique, masse, dureté, résilience...

Caractéristiques *physico-chimiques* : comportement à la corrosion, vieillissement...

Caractéristiques de *mise en œuvre* : usinabilité, soudabilité, trempabilité...

Caractéristiques *économiques*: prix, disponibilité, expérience industrielle...

On peut regrouper les matériaux en familles:



1.3 Essais des matériaux

Pour étudier les caractéristiques mécaniques des matériaux, on réalise des essais.

Essai de fatigue: consiste à appliquer à un matériau une sollicitation proche de celle qu'elle subira en service et à comptabiliser le nombre de cycles jusqu'à la rupture de la pièce.

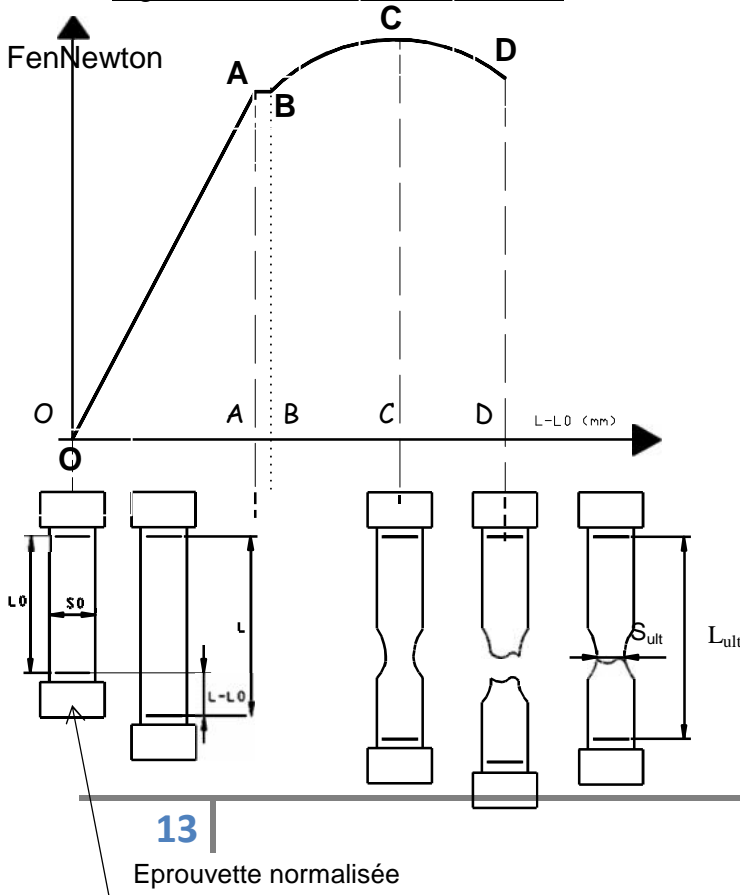
Essai de dureté: consiste à déformer la surface d'une pièce par application d'un effort connu. Dureté Brinel (sphère), dureté Vickers, Rockwell (cône).

Essai de choc: mesure la résistance au choc ou résilience.

Essai de traction: consiste à "tirer" sur une éprouvette de longueur et de diamètre normalisés, fabriquée dans le matériau à tester, jusqu'à sa rupture.

L'essai de traction est donc un essai destructif. Durant cet essai, on enregistre la courbe (graphique ci-dessous) donnant, en fonction de l'allongement de l'éprouvette, l'intensité avec laquelle on "tire".

Figure 7 : Courbe essai de Traction



Zone OA: DOMAINE ELASTIQUE C'est une zone linéaire: la charge est proportionnelle à l'allongement de l'éprouvette.

Zone AD: DOMAINE PLASTIQUE Si on supprime la charge, les déformations sont permanentes.

Zone AB: ZONE DE GRAND GLISSEMENT

Zone CD: STRICTION

Forte diminution de la section jusqu'à rupture.

EnA correspond une action mécanique d'intensité F qui est la charge maximale admise par l'éprouvette dans le domaine élastique. On note : $Re = Fe/S_0$, Re est la limite élastique admise par le matériau.

EnC correspond une action mécanique d'intensité Fr qui est la charge maximale admise par l'éprouvette pendant l'essai. On note:

$Rm = Fr/S_0$, Rm est la limite à la rupture admise par le matériau.

On note $A\% = 100 * (L_{ult} - L_0) / L_0$

$A\%$ est l'allongement exprimé en pourcentage.

Si $A\% \geq 5\%$, le matériau est considéré comme

ductile. Si $A\% < 5\%$, le matériau est dit **fragile**

1.4 Les aciers (FER+0,08à1% de Carbone)

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone avec éventuellement des éléments d'addition.

1.4.1 Classification par emplois.

La désignation commence par la lettre **S** pour les aciers d'usage général et par la lettre **E** pour les aciers de construction mécanique.

Le nombre qui suit indique la valeur minimale de limite élasticité en méga pascals.

Ex: S235

S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre **G**.

1.4.2 Classification par composition chimique.

1.4.2.1 Aciers non alliés.

Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction mécanique. La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés: poutrelle, barre,...) aux dimensions normalisées.

Utilisation: *Ce sont des aciers dont l'élaboration n'a pas été conduite en vue d'une application déterminée.*

Désignation: On écrit successivement:

-Lettre C+ pourcentage de carbone multiplié par100. (Ex: C 35: 0,35%de carbone)

1.4.2.2 Aciers faiblement alliés.

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse **5%** en masse (ce pourcentage est ramené à1%pour le manganèse).

Utilisation: *Ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance.*

Désignation : On écrit successivement:

- Un **nombre** égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les **symboles chimiques** des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les **teneurs** des principaux éléments d'addition (multipliées par 4, 10, 100, ou 1000C annexe)
- Eventuellement des **indications supplémentaires** concernant la soudabilité(S), l'aptitude au moulage(M), ou la déformation à froid(DF).

Exemple : **35CrMo4 S** **0,35% de Carbone**

1 % de Chrome, moins de 1 % de Molybdène Il est soudable.

1.4.2.3 Aciers fortement alliés.

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse 5% en masse.

Utilisation : Ce sont des aciers réservés à des usages particuliers. Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui n'est autre qu'un acier fortement allié avec du chrome (%chrome > 11%)

Désignation : On écrit successivement :

- La lettre **X**.
- Un **nombre** égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les **symboles chimiques** des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les **teneurs** des principaux éléments. Exemples: **X6 CrNi MoTi17-**

12 X=Acier fortement allié

**0,06 % de Carbone 17% de Chrome 12 % de Nickel
du Molybdène et du Titane (moins de 12%)**

X4 Cr Mo S18

X = Acier fortement allié

0,04 % de Carbone 18 % de Chrome du Molybdène et du Soufre (moins de 18%)

1.5 LES FONTES (Fer de 1,67 à 4,2% de Carbone)

Les fontes sont également des alliages de fer et de carbone. Elles ont une *excellente coulabilité*. Elles permettent donc d'obtenir des pièces de fonderie (pièces moulées) aux formes complexes. Elles sont *assez fragiles* (cassantes), *difficilement soudables*, et ont une *bonne usinabilité*.

1.5.1 Les fontes à Graphite Lamellaire.

Les fontes grises sont les plus couramment utilisées parce qu'elles:

- sont économiques.
- amortissent bien les vibrations.
- ont une bonne coulabilité et usinabilité.
- sont peu oxydables.
- ont une bonne résistance à l'usure par frottement.
- résistent bien aux sollicitations de compression.

Utilisation: *Carters, bâtis, blocs moteur, pièces aux formes complexes...*

Désignation : Après le préfixe **EN**, les fontes sont désignées par le symbole **GJL** suivi de la valeur en mégapascals de la résistance minimale à la rupture par extension.

Exemple : **EN-GJL-300 EN: Norme européenne**

Fonte à Graphite Lamellaire Re mini=300MPa

Cette désignation est symbolique, la correspondance numérique dans la nouvelle norme est: EN-JL-1050.

1.5.2 Les fontes malléables à Graphite Sphéroïdal

Les fontes à graphite sphéroïdal sont obtenues par adjonction d'une faible quantité de magnésium avant moulage. Elles sont plus légères et ont une meilleure résistance mécanique que les fontes grises, donc elles gardent les mêmes propriétés.

Utilisation: *Etriers de freins, culbuteur, vilebrequin, tuyauteries soumises à hautes pressions*

Désignation: Après le préfixe **EN**, les fontes sont désignées par le symbole (**GJMW,GJMB,GJS**) suivi de la valeur en méga pascals de la résistance minimale à la rupture par extension et du pourcentage de l'allongement après rupture.

Exemple : **EN-GJS-400-18 EN:Norme européenne**

**Fonte à Graphite Sphéroïdale Re mini=400MPa
A%=18**

Cette désignation est symbolique, la correspondance numérique dans la nouvelle norme est: EN-JS-1020.

1.6 LES ALLIAGES NONFERREUX.

1.6.1 Aluminium et ses alliages

L'aluminium est obtenu à partir d'un minerai appelé bauxite. Il est léger (densité=2,7), bon conducteur d'électricité et de chaleur. Sa résistance mécanique est faible, il est ductile et facilement usinable. Il est très résistant à la corrosion.

Utilisation: *aéronautique du fait de leur légèreté*

Désignation : La désignation utilise un code numérique. Il peut éventuellement être suivi par une désignation utilisant les symboles chimiques.

Exemple:EN-AW-2017 (Al Cu4 MgSi)

Alliage d'Aluminium4 %de Cuivre Magnésium et du Silicium(moins de4 %)

1.6.2 Cuivre et ses alliages

Il existe de très nombreux alliages de cuivre dont les plus connus sont : les bronzes, les laitons, les cupro-aluminiums, les cupro nickels et les maille chorts.

cuiivre+zinc	=	<i>LAITON</i>
cuiivre+étain	=	<i>BRONZE</i>
cuiivre+aluminium	=	<i>CUPRO-ALUMINIUM</i>
cuiivre+ nickel	=	<i>CUPRONICKEL</i>
cuiivre+ nickel+ zinc	=	<i>MAILLECHORT</i>

Les laitons: Les laitons sont faciles à usiner et ont une bonne résistance à la corrosion. Ils peuvent être moulés ou forgés. Ils sont utilisés pour les pièces décolletées, tubes,...

Les bronzes: Les bronzes ont une bonne résistance à la corrosion, un faible coefficient de frottement et sont faciles à mouler. Ils sont utilisés pour réaliser, entre autres, les coussinets et bagues de frottement.

Désignation : La désignation utilise un code numérique. Il peut éventuellement être suivi par une désignation utilisant les symboles chimiques.

Symbole de l'élément de base CU+ élément d'addition1 + % de l'élément d'addition1+ élément d'addition 2+ % de l'élément d'addition2+...

Exemple: CW612N(CUZn36Pb3) *Alliage de Cuivre 36% de Zinc 3% de Plomb*

1.7 LES POLYMERES OU MATIERES PLASTIQUES.

Un plastique est un mélange dont le constituant de base est une résine ou ***polymère***, à laquelle on associe des ***adjuvants*** (plastifiants, anti-oxydants...) et des ***additifs*** (colorants, ignifugeants).

1.7.1 Les thermoplastiques

Très nombreux, ils sont les plus utilisés. Ils ramollissent et ***se déforment à la chaleur***. Ils peuvent en théorie, être refondus et remis en œuvre un grand nombre de fois (comportement thermique comparable aux métaux).

Exemples: ***ABS, PMMA, PTFE, PP***

1.7.2 Les thermodurcissables

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

Exemples: *EP (araldite), UP (polyester)*.

1.7.3 Les élastomères ou «caoutchoucs»

On peut les considérer comme une famille supplémentaire de polymères aux propriétés très particulières. Ils sont caractérisés par une très *grande élasticité*.

1.8 Les Céramiques.

Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion mais sont fragiles.

1.8.1 Les céramiques traditionnelles

Elles regroupent les ciments, les plâtres... et les produits à base de silice.

1.8.2 Les céramiques techniques

Plus récentes, elles sont soit fonctionnelles, à « usage électrique », soit structurales, à usage mécanique ou thermomécanique.

Utilisations : *fibre optique (silicium), outils de coupe (carbures), joints d'étanchéité, isolants...*

1.9 Les matériaux composites.

Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant) renforcé par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau.

En renfort, on utilise la fibre de verre (économique), la fibre de carbone (plus coûteuse) et enfin les fibres organiques (kevlar).

élément	Symbole chimique	Symbole métallurgique	Facteur Multiplicateur
Aluminium	Al	A	10
Azote	N	N	100
Bore	B	B	1000
Chrome	Cr	C	4
Cobalt	Co	K	4
Cuivre	Cu	U	10
Magnésium	Mg	G	10
Manganèse	Mn	M	4
Molybdène	Mo	D	10
Nickel	Ni	N	4
Phosphore	P	P	100
Plomb	Pb	Pb	10
Silicium	Si	S	4
Soufre	S	F	100
Titane	Ti	T	10
Tungstène	W	W	4
Vanadium	V	V	10

Tableau 3 : Les différents éléments chimiques

1.9.1 Masse volumique

Matériaux	Acier	Alliage d'aluminium	Bronze	Nylon	caoutchouc	Fibres de verre	Fibres de carbone
En kg/m ³	<i>7800</i>	<i>2700</i>	<i>8900</i>	<i>1100</i>	<i>1000</i>	<i>2500</i>	<i>1750</i>

Tableau 4 : Masse volumique

Type de matériau	Résistivité en Ohm.cm	Comportement électrique
Polystyrène	10^{-17}	<i>ISOLANT</i>
Nylon	10^{-14}	
Verre	10^{-10}	
Silicium pur	10^6	<i>SEMICONDUCTEUR</i>
Alliages ferreux	10^{17}	<i>CONDUCTEUR</i>
Aluminium	3.10^{17}	
Cuivre	$1,5.10^{17}$	

Tableau 5 : Propriétés électriques

1.9.2 Propriétés thermiques

Type de matériau	Conductibilité W/m/C°	Comportement thermique
Laine de verre	0.04	<i>ISOLANT</i>
Bétoncellulaire	0.1	
Nylon	0.2	
Verre	1	
Fer	62	<i>CONDUCTEUR</i>
Aluminium	210	
Cuivre	380	

Tableau 6 : Propriétés thermiques

Exercice

1. Les fontes et aciers

a. Quelle différence principale existe-t-il entre les fontes et les aciers ?

-

b. Comment reconnaît-on ces 2 matériaux sur un dessin ? illustrez votre réponse.

-

2. Les alliages d'aluminium

a. Quels sont les principaux avantages de l'aluminium par rapport à l'acier ?

-

b. Comment reconnaît-on ce matériau sur un dessin ? illustrez votre réponse.

-

c. Est-ce que tous les alliages d'aluminium sont recyclables ?

3. Désignations normalisées

a. A quoi sert une désignation normalisée ?

-

b. Interpréter ces désignations normalisée ?

X4 Cr Mo 18-10

Cu Sn 8

100 Cr 6

S 355

Al Cu 4 Mg 2 Si

EN-GJL-350

30 Ni Cr Mo 8-6-2

C 35

Exercice 2

1/Quelle est la désignation d'un acier non-allié pour traitement thermique contenant 1% de carbone ?

.....

2/- Donner la désignation d'un acier fortement allié contenant 0,3% de carbone et 13% de chrome ?

.....

3/Quelle est la désignation d'un acier faiblement allié contenant 0,35% de carbone, 1% de chrome et du molybdène ?

.....
4/ Que signifie la désignation X 160 Cr Mo V 12, ancienne norme Z160CDV12, utilisée pour un acier

.....
5/Donner la désignation d'un acier faiblement allié contenant 0,3% de carbone, 4% de nickel, du chrome et du molybdène ?

.....
6/Quelle est la désignation normalisée d'un bronze contenant 8% d'étain (Sn) et du phosphore ?

.....
7/Quelle est la désignation normalisée d'un laiton contenant 39% de zinc et 2% de plomb ?

.....

2 Chapitre 2: Diagramme D'équilibre Binaire et ternaire

2.1 Diagramme d'équilibre binaire

2.2 Définition

Le diagramme d'équilibre binaire est un système formé de deux composants (Fe-C, Cu-Zn, Al_2O_3 - Cr_2O_3 , Cu-Mg,...) et qui permet de représenter les domaines de stabilité des phases et des conditions d'équilibre entre plusieurs phases en fonction de la température et la composition (exprimée en pourcentage massique, atomique ou molaire).

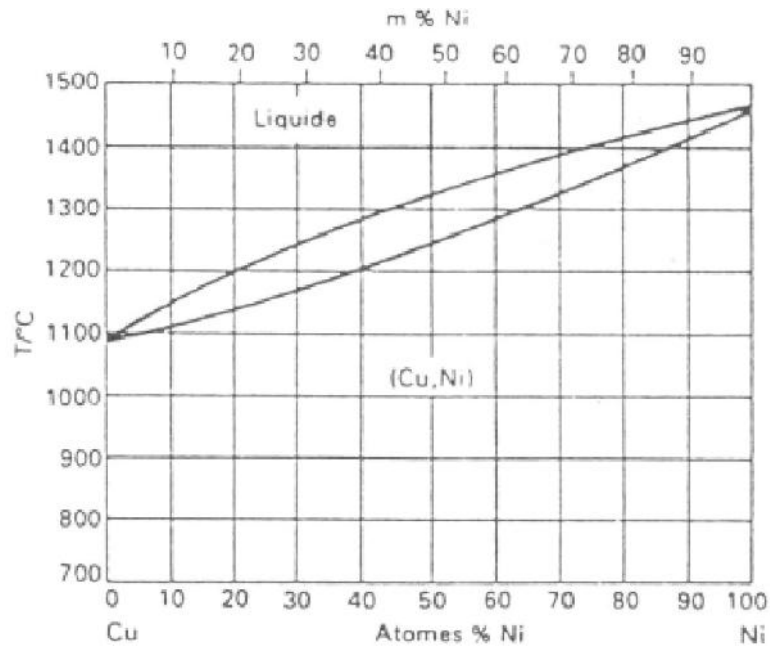
Suivant la miscibilité des éléments du système, on distingue deux types de diagrammes binaires.

- Diagramme d'équilibre binaire d'un système à miscibilité totale à l'état solide,
- Diagramme d'équilibre binaire d'un système à miscibilité partielle à l'état solide.

2.2.1 Règles d'utilisation

2.2.1.1 Règle de l'horizontale

Figure 1 : règle de l'horizon



Pour, un alliage en cours de solidification, elle permet de connaître les compositions des phases solide et liquide en présence. A une température T, les compositions des phases solide et liquide sont données respectivement par les abscisses des points d'intersection de l'horizontale à la température T avec le liquidus et le solidus ou bien avec deux branches différentes d'un diagramme. Exemple d'application: Soit le diagramme de l'alliage binaire Cu-Ni

L'alliage à 70% de Ni et 30% de Cu à la température T_a correspondant au point M. Si nous prenons comme $T_a=1350^\circ\text{C}$, l'horizontale passant par cette température coupe le liquidus au point L et le solidus au point S. Les projections de L et S sur l'axe des abscisses donnent: $l=56\%$ de Ni $s=84\%$ de Ni donc la phase liquide contient 56% de Ni et la phase solide contient 84% de Ni

2.2.1.2 Règle des segments inverses

Pour un alliage en cours de solidification dont le point figuratif M (à la température T_0) :

- le % de la phase liquide est égale: ML/LS
- le % de la phase solide est égale à: MS/LS

L et S étant les intersections de l'horizontale avec le liquidus et le solidus

Exemple d'application:

Dans l'alliage à 70 de Ni et 30% de Cu à $T_0 = 1350^\circ\text{C}$ on a

$$MS = 84 - 70 = 14$$

$$ML = 70 - 56 = 14$$

$$LS = 84 - 56 = 28$$

2.2.2 Système à miscibilité totale à l'état solide

Condition de miscibilité : En général, pour que deux éléments A et B puissent être entièrement miscibles (soluble en toute proportion), à l'état solide, quatre conditions doivent être remplies:

- les diamètres atomiques des éléments A et B ne diffèrent pas plus que 15%,
- les éléments doivent avoir la même structure cristalline,
- les valences des deux éléments doivent être égales (nombre d'électrons sur la couche extérieure de l'atome pouvant faire une liaison avec un autre atome),
- Une électronégativité semblable.

2.2.3 Allure et lecture du diagramme d'équilibre

Dans ces conditions, le diagramme binaire prend une forme très simple : la solution solide est monophasée. Deux phases sont présentes (phase liquide et une autre solide). Alors seulement trois domaines sont présents:

- Domaine d'une phase liquide(L),
- Domaine d'une phase solide(S) Domaine intermédiaire contenant les deux phases en équilibre (L+S). Ce domaine est

limité par la courbe au-dessus appelée liquidus, et par la courbe solidus. au-dessous appelée

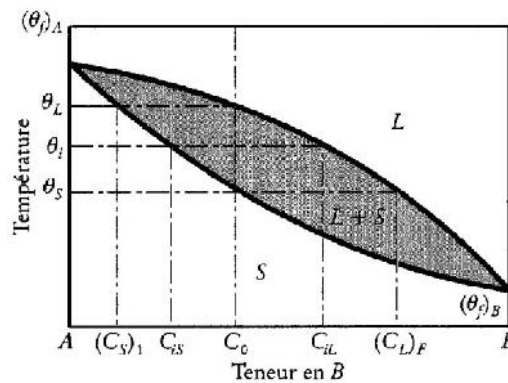


Figure 2 : Lecture du diagramme d'équilibre

Pour présenter la lecture de ce diagramme, examinons un mélange entièrement liquide de composition C_0 au cours de son refroidissement:

Température	Etat du mélange
$T > T_L$	Le mélange est entièrement liquide(L), la composition du mélange est $C_0\%$ de B et $(100-C_0)\%$ de A.
$T = T_L$	Le mélange commence à entrer dans le domaine biphasé formé par une phase liquide et une autre solide (L+S). la composition du premier solide formé à cette température est égale à $(C_S)_1$ de B et la composition du liquide est très Proche de $C_0\%$ de B.

$T_s < T = T_i < T_L$	<p>Dans l'intervalle de solidification, la composition de la phase solide est C_{is}% de B et celle de la phase liquide est C_{iL}% de B.</p> <p>Le pourcentage du solide formé est donné par l'équation suivante:</p> $f_s(\%) = \frac{C_{iL} - C_0}{C_{iL} - C_{is}} * 100$ <p>Le pourcentage du liquide restant est donné par l'équation suivante:</p> $f_L(\%) = \frac{C_0 - C_{is}}{C_{iL} - C_{is}} * 100$ <p>Avec $f_s + f_L = 1$</p>
$T = T_s$	<p>Le mélange est presque solidifié. La composition du solide est C_0% de B alors que celle du dernier liquide restant est $(C_L)_F$% de B. On remarque que ce phénomène nécessite une redistribution des atomes entre Les deux phases pour que l'équilibre soit maintenu en tout temps; c'est le phénomène de la diffusion : déplacement des atomes à l'état solides.</p>
$T < T_s$	<p>Une fois la solidification est terminée, le mélange solides e trouve avec une Composition uniforme C_0 à une température inférieure à T_s.</p>

Tableau 1 : Etat d'un mélange au cours de son refroidissement

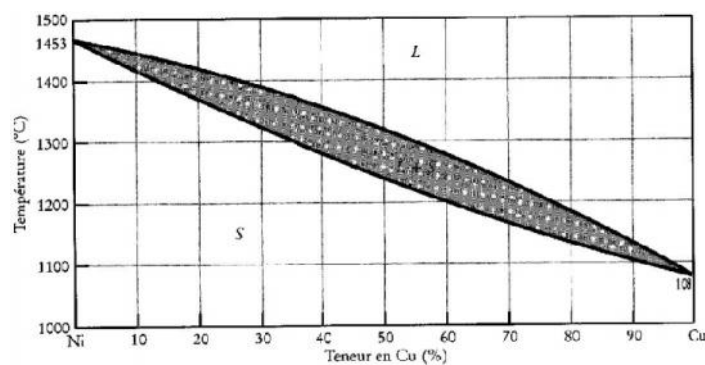
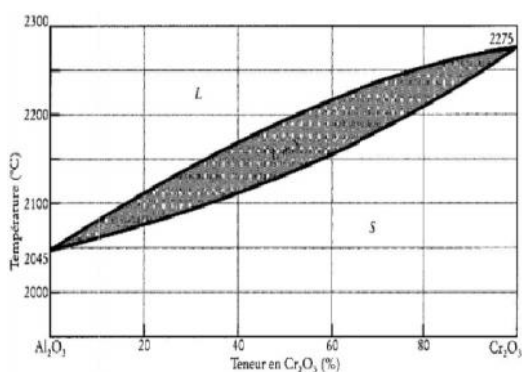


Figure 3 : Les deux diagrammes d'équilibre binaire suivants présentent respectivement le diagramme Ni-Cu et $Al_2O_3-Cr_2O_3$

Prenons le cas du diagramme Ni-Cu et considérons un alliage composé de 40% de Cu et 60% de Ni:

- La solidification débute à 1350°C et se termine à 1280°C
- L'intervalle de solidification est 70°C
- Le premier solide se forme à une composition de 23% de Cu
- Le dernier liquide présent à une composition de Cu de 58%
- A 1300°C la composition de la phase liquide est 53% de Cu et la décomposition de la phase solide est de 35%

$$f_s = \frac{53-40}{53-35} = 0,72 = 72\%$$

$$f_L = 100 - 72 = 28\%$$

$$f_L = 100 - 72 = 28\%$$

2.2.4 Système à miscibilité partielle à l'état solide

Quand les règles de miscibilité ne sont pas respectées, le cas le plus fréquent, la miscibilité est donc partielle. Alors dans certains domaines de compositions, on obtient des solutions solides biphasées. Le diagramme d'équilibre prend donc une forme plus complexe. Il existe trois types de diagrammes spécifiques (typiques):

- Diagramme eutectique caractérisé par une transformation eutectique,
- Diagramme péritectique caractérisé par une transformation péritectique,
- Diagramme monotectique caractérisé par une transformation monotectique.

2.2.4.1 Diagramme eutectique

Son appellation est déduite de la transformation eutectique. Ce type de diagramme a une importance particulière car il conduit à des microstructures de morphologie caractéristique. En plus, sa connaissance aide beaucoup à comprendre des diagrammes binaires souvent utilisés: Fe-C, Al-Si, Cu-Zn, H₂O-NaCl, ...).

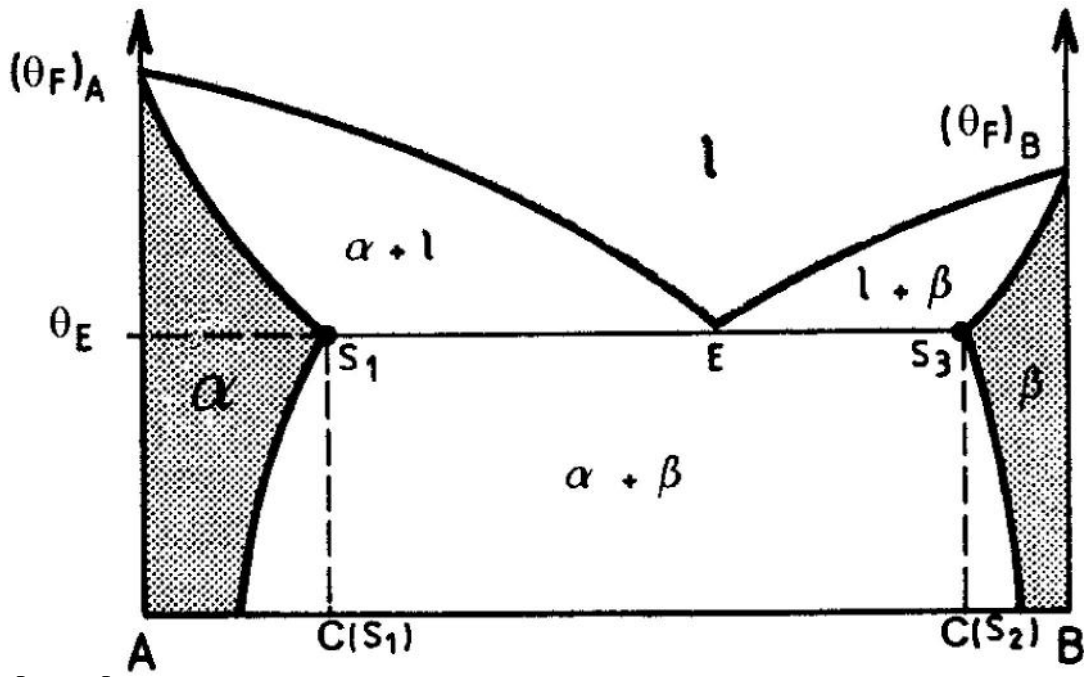


Figure 4 : Diagramme eutectique

1- Un liquide (L),

2- Une solution solide() de B dans A, Une solution solide() de A dans B.

Six domaines sont donc présents (L,L+ ,L+ , , , +). L'allure générale du

diagramme d'équilibre est présentée par le diagramme ci contre.

- 1- le segment $[S_1, S_3]$ est appelé l'horizontale eutectique,
- 2- le point (E) est appelé point eutectique,
- 3- pour un alliage concerné par l'horizontale eutectique, la partie de la phase () formée avant l'horizontale eutectique est appelée proeutectique
- 4- pour un alliage concerné par l'horizontale eutectique, la partie de la phase () formée après l'horizontale eutectique est appelée eutectique.
- 5- l'alliage dont la verticale caractéristique passe par le point(E) est appelé alliage eutectique,
- 6- l'alliage dont la verticale caractéristique passe entre les points(S_1)et(E) est appelé alliage hypoeutectique,
- 7- l'alliage dont la verticale caractéristique passe entre les points(E)et(S_3) est appelé alliage hypereutectique,

La lecture de ce diagramme est relativement différente du précédent, mais tout en conservant le même principe de lecture. Examinons l'évolution de quatre types de mélanges entièrement liquides de composition (C_0) au cours de leur refroidissement. Pour cela, on note

- T_L : la température du début de solidification,
- T_s : la température de la fin de solidification,
- T_E : la température de l'horizontale eutectique,
- T_t : la température d'une transformation au-dessous de l'horizontale eutectique.

2.2.4.1.1 Alliage non concerné par l'horizontale eutectique: $C_0 < C(S_1)$

Température	Etat du mélange
$T > T_L$	Le mélange est à l'état liquide de composition homogène $C_0\%$ de B.
$T = T_L$	C'est le début de la solidification. Les premiers cristaux de la phase () sont apparus.
$T_s < T < T_L$	La solidification continue. La détermination de la composition et du pourcentage du solide () et du liquide (L) est analogue à celle présentée pour le type précédent du diagramme d'équilibre.
$T = T_s$	C'est la fin de la solidification

$T_t < T < T_s$	Une fois la solidification est terminée, le mélange se trouve avec une Composition uniforme C_0 sous la forme d'une solution solide de B dans A.
$T < T_t$	Une fois la température baisse au dessous de T_t , une partie de la phase()se transforme en une solution solide de A dans B d'où la formation d'une nouvelle phase(). On obtient donc un domaine biphasé (+).

Tableau 2 : Alliage non concerné par l'horizontale eutectique: $C_0 < C(S_1)$

Alliage hypoeutectique: $C(S_1) < C_0 < C(E)$

Temp	Etat du mélange
$T > t_L$	Le mélange est à l'état liquide de composition homogène $C_0\%$ de B.
$T = t_L$	C'est le début de la solidification. Les premiers cristaux de la phase() sont apparus. Les grains de la phase() formés avant l'eutectique sont dits proeutectiques.
$T_E < T < T_L$	La solidification continue et la détermination de la composition et du
	Pourcentage du solide() et du liquide(L) est analogue à celle présentée pour le Type précédent du diagramme d'équilibre.
$T = T_E$	C'est la fin de la solidification. La solution solide proeutectique ne subit aucune transformation. Seul le liquide va subir la transformation en phase ()et().
$T < T_E$	Une fois la température baisse au-dessous de T_E , l'alliage est biphasé. Il Comporte des cristaux de solution solide()(proeutectique et eutectique) et des cristaux de solution solide() eutectique.

Tableau 3 : Alliage hypoeutectique: $C(S_1) < C_0 < C(E)$

2.2.4.1.2 Alliage hypereutectique : $C(E) < C_0 < C(S_3)$

L'étude du refroidissement est similaire à celle faite pour l'alliage hypoeutectique, la phase proeutectique étant cette fois-ci la phase().

2.2.4.1.3 Alliage eutectique : $C_0 = C(E)$

La composition de l'alliage est égale à celle du point eutectique. C'est lui qui demeure liquide à la température la plus basse de tous les alliages A-B. La description du refroidissement est la suivante:

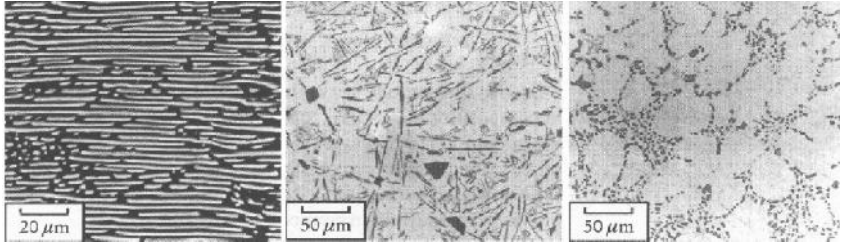
Température	Etat du mélange
$> E$	Le mélange est à l'état liquide de composition homogène $C_0\%$ de B.
$= E$	Deux nouvelles phases () et () apparaissent par germination à partir du liquide.
$< E$	<p>La composition et la quantité des deux phases () et () de l'alliage évoluent suivant les règles décrites précédemment. Les deux phases apparaissent sous</p>  <p>forme de très fins agrégats. Les microstructures les plus rencontrées sont la structure lamellaire et globulaire, a ciculaire et en bâtonnets.</p> <p style="text-align: center;"><i>Exemples de diagrammes eutectiques</i></p>

Tableau 4 : Alliage eutectique : $C_0 = C(E)$

Prenons le cas du diagramme Pb-Sn:

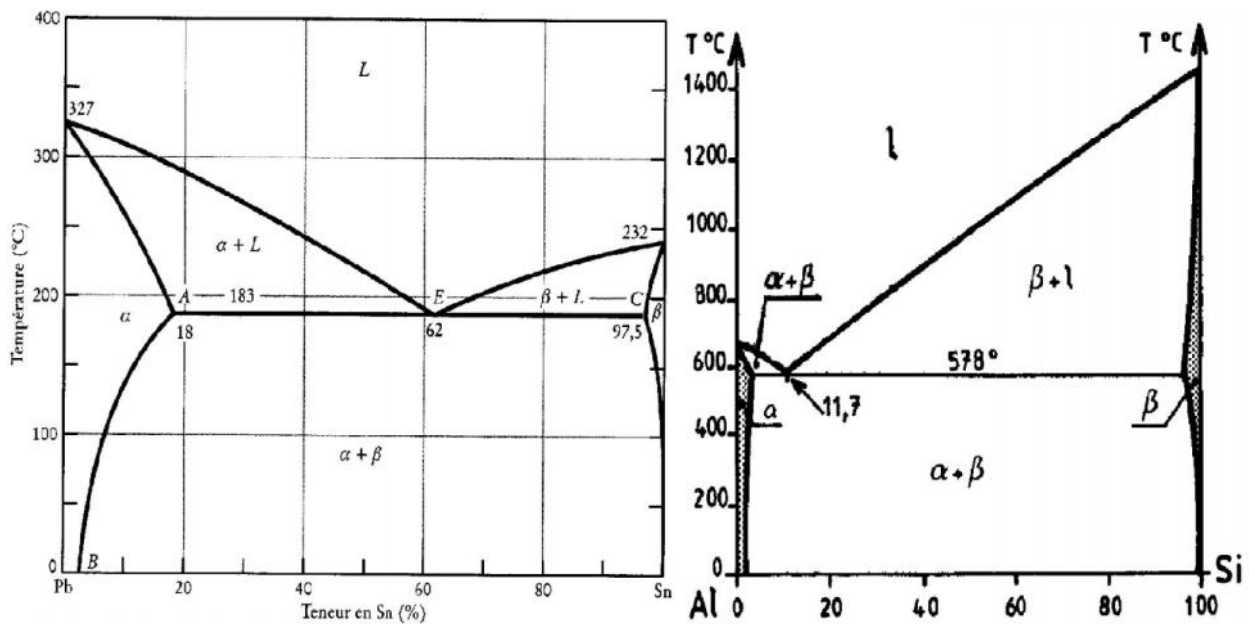


Figure 5 : Diagramme Pb-Sn

Remarques:

- La solubilité de l'étain dans le plomb à l'état solide est de 18% à la température 183°C (point A)
- La solubilité de l'étain dans le plomb passe de 18% à la température 183°C à 2% environ à la température ambiante.
- La solubilité du plomb dans l'étain à l'état solide est limitée à 2,5% à la température 183°C (point C)
- Nous avons au point eutectique: deux phases solides, (18%Sn) et (97,5%), sont en équilibre avec une phase liquide (62% Sn) à 183°C.

Considérons un alliage de composition eutectique (62%Sn, 38%Pb) et examinons ce qui se passe au cours de sa solidification:

- Tant que la température est supérieure à 183°C, l'alliage est entièrement liquide
- Au cours de la solidification pour $T < 183^\circ\text{C}$ deux phases solides distinctes se forment simultanément, la phase (18%Sn) et la phase (97.5%Sn) donc on est en présence d'un solide biphasé. La proportion de chacune de ces phases peut alors se calculer par la règle des segments inverses:

Considérons un alliage de composition comprise entre 18% et 97,5% de Sn par exemple 30% de Sn et 70% de Pb et examinons ce qui se passe au cours de sa solidification :

- La solidification débute à la température 262°C par la formation d'une première phase solide contenant 10% de Sn
- A 183°C il y a deux phases en présence: une solide contenant 18% de Sn et un liquide qui contient 62% de Sn ; la proportion de chacune de ces phases, calculée par la règle des segments inverses, est de 0,73 pour la phase et de 0,27 pour la phase liquide
- A la température eutectique, le liquide restant, de composition eutectique, se solidifie et donne un constituant eutectique.
- A 183°C on est en présence d'un alliage biphasé, qu'on peut décrire comme suit:

*phase : $C = 18\%$ de Sn, et phase : $C = 97,5\%$ de Sn

Nous pouvons considérer que cet alliage formé de deux constituants : (primaire ou pro eutectique), c'est à dire la partie de la phase qui s'est formé avant l'eutectique, à une température $>183^{\circ}\text{C}$ et eutectique:

- primaire: $C_1 = 18\%$ Sn, $f_1 = 0,73$
- eutectique: $C_E = 62\%$ Sn, $f_E = 0,27$

Le même raisonnement peut s'appliquer à un alliage riche en étain : 70% par exemple. Dans ce cas après solidification, il existe deux constituants, du primaire dont la proportion est de 0,33 et de l'eutectique.

2.2.4.2 Diagramme péritectique

Son appellation est déduite de la transformation péritectique présente dans le diagramme. L'allure générale du diagramme d'équilibre est présentée par le diagramme ci-contre. Le

segment $[S_1, P]$ est appelé l'horizontale péritectique. Le point (P) est appelé point péritectique. Par rapport au diagramme eutectique, les deux branches du liquidus et du solidus sont situées de part et d'autre de l'horizontale péritectique. Ce type de diagramme est moins important que le diagramme eutectique. Cependant il est caractéristique des systèmes Ag-Pt, Ag-Au, Cu-Sn, ... Les lois de refroidissement d'un alliage de concentration donnée C_0 restent analogues à celles décrites pour un diagramme eutectique.

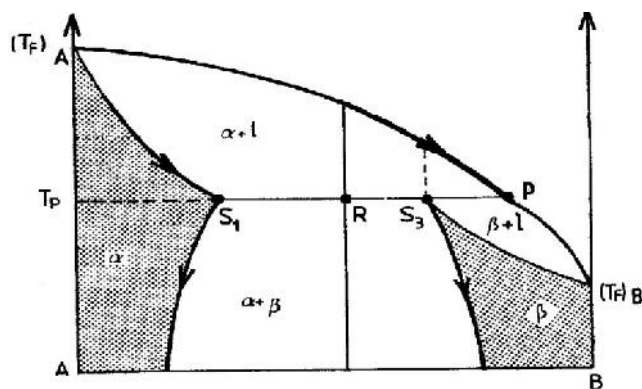


Figure 6 : Diagramme péritectique

2.2.4.3 Diagramme monotectique

Son appellation est déduite de la transformation monotectique présente dans le diagramme. Il est caractérisé par l'existence d'un domaine à deux phases liquides non miscibles. Deux éléments de masses volumiques très différentes comme le cas de Cu et Pb pourront s'allier suivant un diagramme de ce type. Le raisonnement de refroidissement sur ce diagramme de phase est de la même façon que pour les diagrammes eutectique et péritectique.

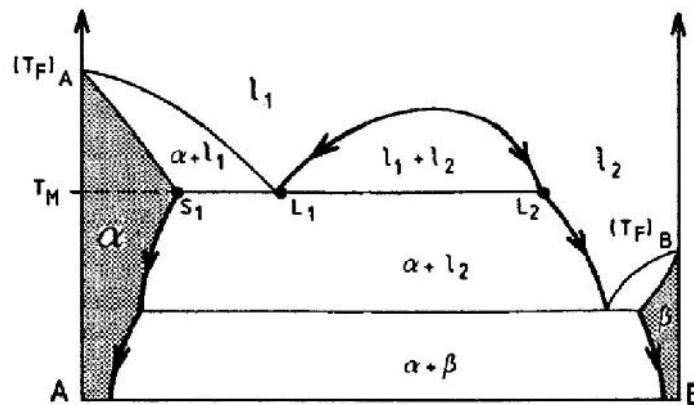


Figure 7 : Diagramme monotectique

2.2.5 Diagrammes d'équilibre binaires réels

Dans le cas général, les diagrammes d'équilibre sont plus complexes que ceux présentés. Cette complexité survient surtout lorsque les alliages donnent naissance à des composés définis (Fe_3C par exemple pour le Fe-C), ou à plusieurs solutions solides (, , , ,). En effet les diagrammes peuvent présenter entre les composants situés à chaque extrémité du diagramme des phases intermédiaires. De ce fait,

- Un diagramme peut associer à la fois plusieurs transformations simples de même types (3 transformations eutectiques, 5 transformations péritectiques, ...),

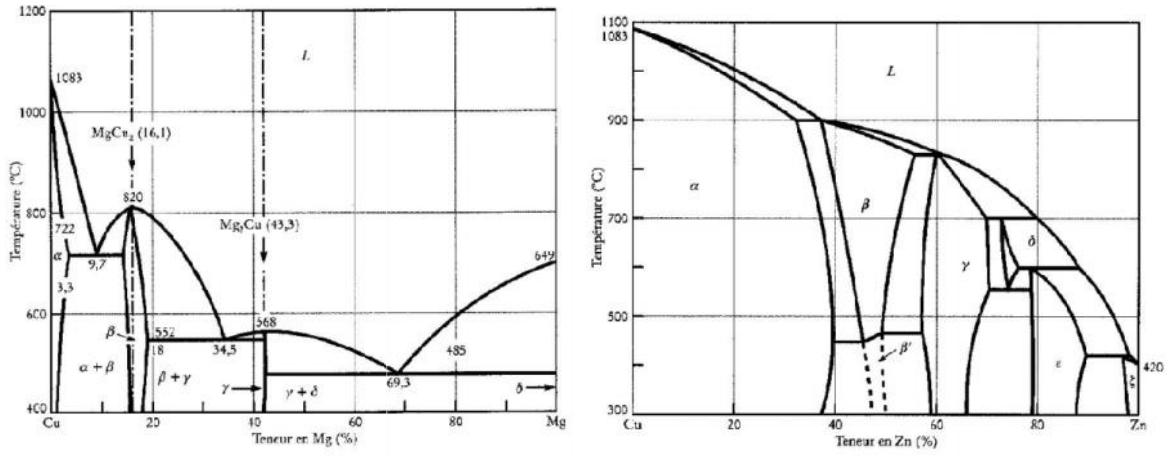


Figure 8 : Diagramme binaire

- Un diagramme peut associer à la fois deux types de transformations simples (une transformation eutectique associée à une autre péritectique,...),

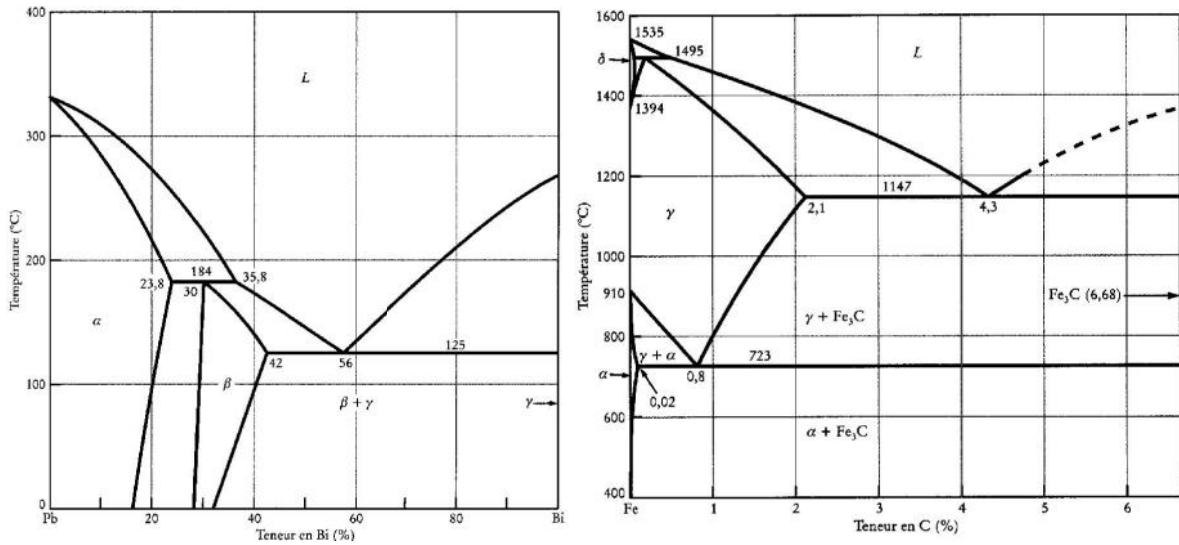


Figure 9 : Deux types de transformations à la fois

- Même une fois solidifié, un matériau peut subir des transformations qui se traduisent par des changements de phases ou l'apparition de nouvelles phases. Ce phénomène est expliqué par le fait que les atomes cherchent la structure la plus stable sous l'effet de l'agitation thermique. Nous pouvons même assister à des transformations analogues aux trois déjà présentées mais à l'état solide. Dans ce cas le principe de description reste toujours le même, seule la terminaison de l'appellation change : transformation eutectoïde, péritectoïde et monotectoïde.

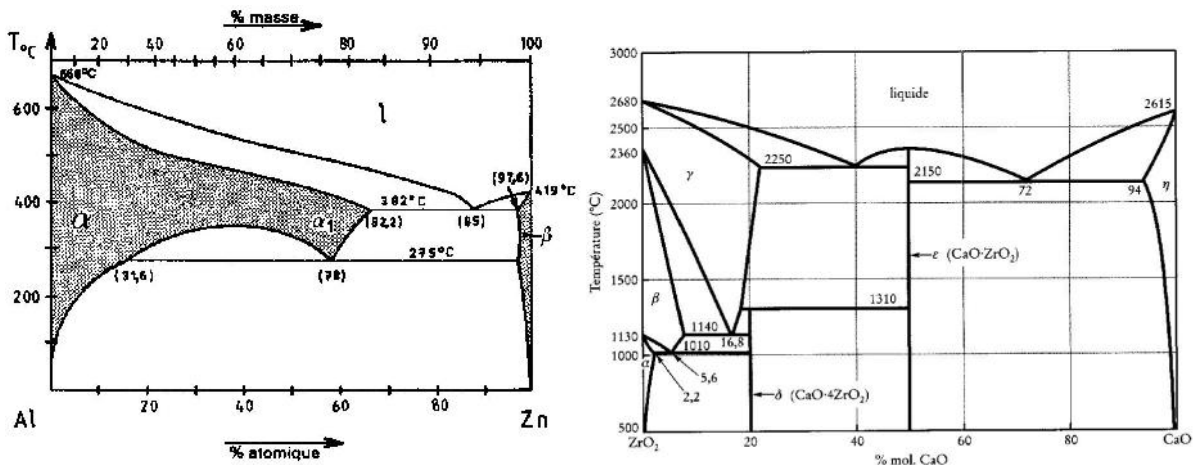


Figure 10 : Diagramme binaire

- Dans un domaine à deux phases la composition de chacune des phases en équilibre à une température est donnée par l'intersection de l'horizontal et des frontières qui

séparent ce domaine des deux domaines monophasés adjacents

2.2.6 Réalité de la solidification des alliages

Les diagrammes d'équilibre sont élaborés en supposant une série d'hypothèses telles que une solidification à l'équilibre, une vitesse de refroidissement suffisante pour que la diffusion s'effectue à l'état solide, une vitesse de refroidissement homogène pour tout le mélange, une composition pure en A et B,... Mais la pratique montre qu'il est difficile de respecter ces hypothèses notamment à l'échelle industrielle. En conséquence, plusieurs phénomènes d'hétérogénéité peuvent éventuellement apparaître.

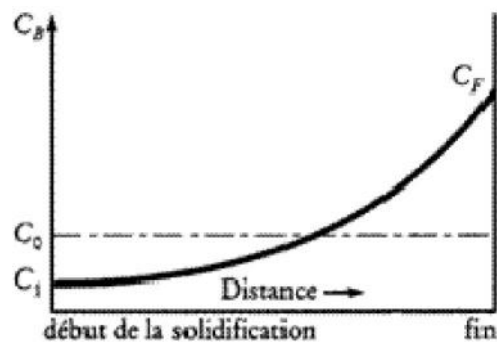
Cependant les règles exposées pour les diagrammes simples s'appliquent toujours : détermination de la nature, la composition et la fraction des constituants de tout alliage. Toutefois, trois règles restent généralement applicables

- Un diagramme d'équilibre donne les limites des domaines d'existence, en température et en composition des mélanges monophasés,
- Deux domaines monophasés sont séparés par une région à deux phases,

2.2.6.1 Ségrégation mineure

En pratique, une solidification entièrement à l'équilibre ne peut jamais se produire: le temps requis pour que la composition du solide s'uniformise continuellement par diffusion serait excessivement long. Lorsqu'on dit qu'un alliage de composition C_0 en 'est que la moyenne. En réalité elle varie de C_1 , composition du premier germe solide formé, à C_F , composition du dernier solide formé. De ce fait, au sein d'un grain on trouve une variation de composition. Ce phénomène est appelé ségrégation mineure. On observe donc une température de fin de solidification différente de celle prévue par le diagramme d'équilibre.

Figure 11 : Ségrégation mineure



2.2.6.2 Ségrégation majeure

Le centre de la pièce se solidifie en dernier. Sa composition est différente de celle de la

zone qui s'est solidifier en premier (parois). Cette différence dans certains cas n'est pas négligeable. Par exemple pour un lingot d'acier de teneur moyenne en carbone de 0,44%, elle peut atteindre 0,36% en surface et jusqu'au 0,61% au cœur. On peut donc conclure que les propriétés mécaniques varient de façon importante de la surface du lingot à son cœur.

2.2.6.3 Différence de structure

Une pièce brute distinctes dont la de solidification présente en général trois zones formation dépend des conditions de refroidissement:

Zone de peau: quand le matériau en fusion entre en contact avec un moule de température très inférieure à celle du liquidus, il est brusquement refroidi. Il se forme alors de nombreux cristaux dendritiques orientés au hasard

Zone basaltique : une fois la zone de peau formée, la vitesse de refroidissement diminue, la croissance dendritique des grains se poursuit. Les grains formés ont la même section et la même orientation. La longueur du grain basaltique peut attendre plusieurs centimètres.

Zone équiaxe : en fin de solidification l'évolution de la zone basaltique est limitée par la germination de nombreux cristaux au sein du liquide restant. Les grains sont orientés au hasard.

Ces trois zones ne sont pas toujours présentes. Leur présence est liée à l'épaisseur de la pièce, à la pureté du matériau ou de l'alliage,...

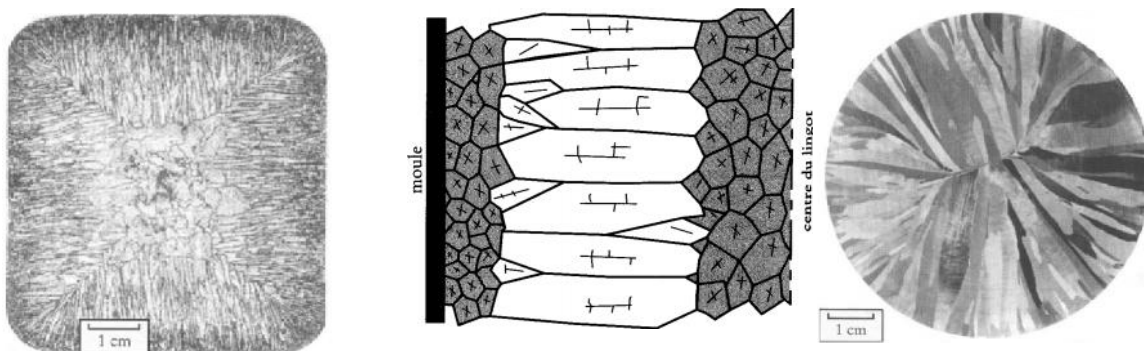


Figure 12 : Les trois zones de formation

2.2.6.4 Eléments d'addition

Dans l'industrie, les alliages ne sont jamais purs c'est à dire, ils ne sont jamais formés de deux types d'atome A et B mais ils contiennent des éléments d'addition. Ces éléments d'addition dont le pourcentage faible ont dans certains cas pratiques une influence sur la stabilité de la solidification et sur les températures des transformations. Ils influent notamment sur la répartition des domaines de stabilité des phases.

Bien que les alliages industriels contiennent toujours des impuretés et des éléments d'additions, la solidification est faite hors équilibre au sein du grain et au sein de la pièce, il est toujours nécessaire d'étudier le diagramme du système binaire en équilibre qui servira de référence à l'étude pratique de l'alliage concerné.

2.3 Diagramme Ternaire

La thermodynamique, appliquée à l'étude des équilibres chimiques faisant intervenir plusieurs phases dans un système métallique, permet de prévoir et de calculer les compositions en fonction de la température. Elle permet en outre de vérifier la compatibilité dans les diagrammes de phases. L'étude de tels systèmes est un problème thermodynamique, car elle permet de calculer les grandeurs G , H , S ... en fonction de la composition et de la température, elle permet aussi, de vérifier la compatibilité, entre les données thermodynamiques et les diagrammes d'équilibres de phases expérimentaux. La détermination des grandeurs G , H , S nécessite généralement l'utilisation de modèle thermodynamique théorique pour les phases liquide et solide et on les relie par les données thermodynamiques expérimentales [1]. Dans ce chapitre nous allons exposer aussi brièvement que possible, les notions relatives à la construction des diagrammes de phases ternaires et les réactions invariantes qui apparaissent. La fin de ce chapitre fait état d'une approche thermodynamique de ces systèmes.

I.2. Lecture d'un diagramme de phases ternaire

La lecture d'un diagramme dans l'espace n'est pas commode, c'est le plus souvent des coupes horizontales ou verticales, ou encore les projections sur un plan horizontal des lignes ou des surfaces remarquables, qui sont utilisées. Une phase est définie par ses concentrations x' , y' , z' en chacun de ses éléments A, B, C. Les concentrations peuvent s'exprimer en pourcentage massique ou atomique, elles sont alors définies par la relation :

$$x' + y' + z' = 100 \text{ (I-1)}$$

Soit en fraction, massique, ou atomique, et alors

$$x' + y' + z' = 1 \text{ (I-2)}$$

La représentation la plus commode pour les concentrations, dans le plan horizontal, utilise une grille triangulaire équilatérale (figure 13). Chaque sommet représente un métal pur et à tout point sur un côté du triangle correspond un alliage binaire des métaux représentés par les deux sommets que joint chaque côté [2]. Il existe deux façons de lire les concentrations sur cette grille. Pour un point X, par exemple, les compositions x' , y' , z' en A, B et C sont proportionnelles aux distances du point X aux trois cotés du triangle ABC, (figure 13).

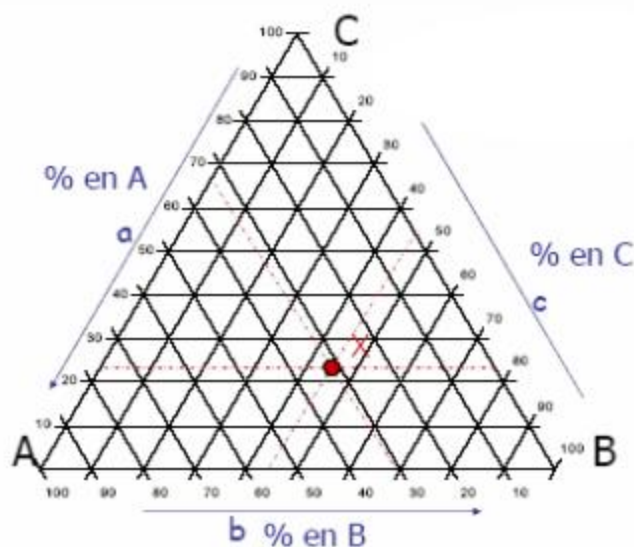


Figure 13 : Système ternaire en représentation isotherme [2]

I.3. Types de diagrammes

I.3.1. Diagramme ternaire eutectique

Si les trois systèmes binaires présentent des lacunes de solubilité, le diagramme ternaire met en évidence l'existence de trois solutions solides limitées ternaires auxquelles correspondent trois nappes de solidus et trois nappes de liquidus, ces dernières se rencontrent deux à deux suivant des courbes concourantes en un point qui représente un liquide en équilibre à une seule température avec les trois phases solides, et [3]. Dans le cas de l'eutectique (figure 14), le point O représentant la phase liquide est situé à l'intérieur du triangle $m_1m_2m_3$. Si on soustrait des calories au système formé par les quatre phases, la réaction suivante se produit :

Liq + + (I-3)

Elle se poursuit jusqu'à la disparition totale du liquide

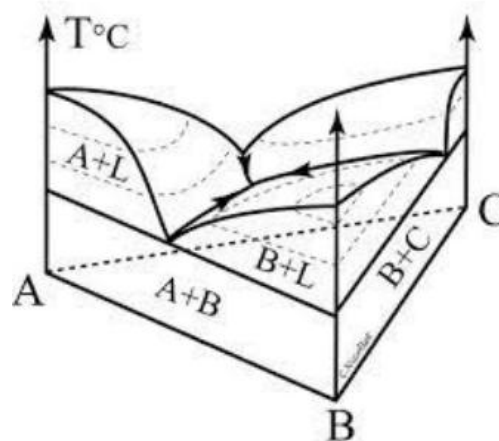


Figure 14 : Diagramme ternaire présentant une transformation eutectique

Le diagramme polythermique de la figure 14 est représenté en projection sur le plan des compositions par la figure 15. Une coupe isopléthique MN, coupant une seule ligne monovariante (E1v) est donnée par la figure 16.

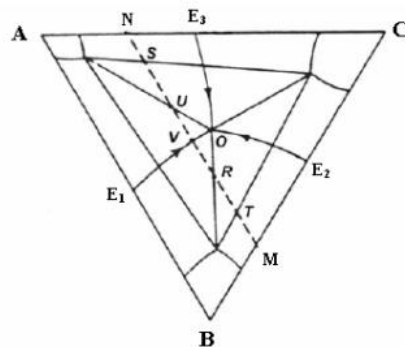


Figure 15 : Projection des équilibres invariants

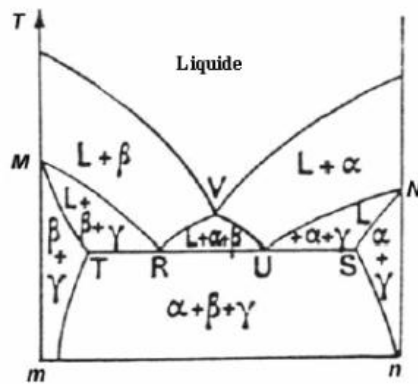


Figure 16: Isoplèthe du diagramme

I.3.2. Diagramme ternaire péritectique

I.3.2.1. Premier type

Si deux des trois systèmes binaires présentent un eutectique et le troisième un péritectique, le diagramme résultant est conforme à la figure 17. Deux des trois vallées sont situées au-dessus du plan horizontal passant par m_1 , la troisième est toute entière au dessous.

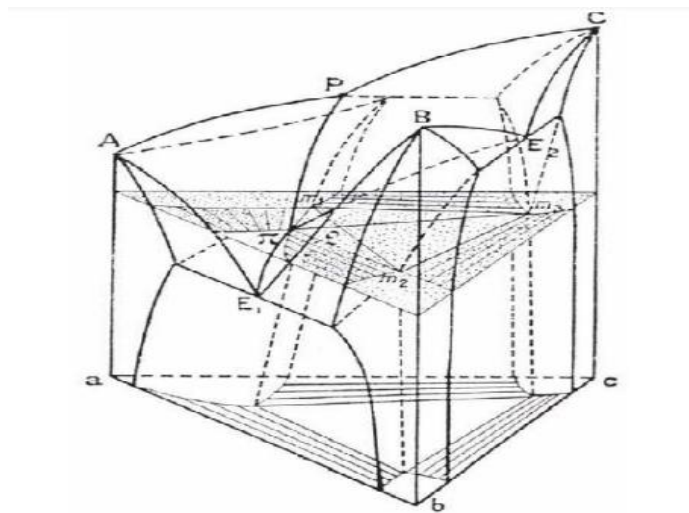


Figure 17 : Diagramme ternaire péritectique du premier type

En orientant les flèches dans le sens des températures décroissantes, on obtient en projection la disposition de la figure 18. Il faut donc admettre que la température de solidification d'un alliage binaire, tel que p ou e2

est abaissée par l'addition d'un troisième élément, tandis que celle de l'eutectique e1 est élevée par l'addition du métal C. A la température du point π , quatre phases sont en équilibre. Comme la nappe de solidus correspondant à la solution solide S_1 dépasse vers la droite la nappe de liquidus conjuguée, le point π , qui représente la phase liquide, forme un quadrilatère avec les points m_1, m_2, m_3 qui concernent les solutions solides S_1, S_2, S_3 . Si on soustrait des calories au système formé de ces quatre phases, nous allons voir que la réaction s'écrit : $liq + m_3 \rightarrow m_1 + m_2$ (I.4) Elle se poursuit jusqu'à la disparition de l'une des deux phases réagissantes. Cette réaction est totale pour tous les alliages dont les points figuratifs sont situés sur la droite $m_1 m_2$ [4].

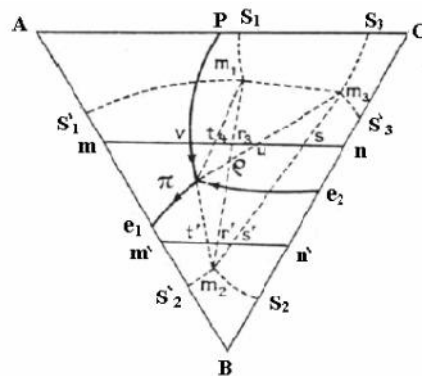


Figure 18 : Projection des équilibres invariants

I.3.2.2. Deuxième type

La réaction $Liq + S_1 + S_2 \rightarrow S_3$ n'a pas sa correspondante dans les systèmes binaires. Elle entraîne bien la dissolution dans le liquide d'une phase solide précédemment formée, mais elle conduit à la cristallisation simultanée de deux nouvelles phases solides. On rencontre dans certains alliages ternaires un point péritectique d'un type différent, lorsque deux des systèmes binaires présentent un péritectique (figure 19). Les trois nappes de liquidus se rencontrent alors suivant trois courbes, dont deux sont au-dessous de la température d'équilibre des quatre phases : π est situé à une température inférieure à celle de E, mais supérieure à celle de P1 et de P2. A chacune des nappes du liquidus correspond une nappe de solidus. Les deux nappes, de solidus relatives aux solutions S_1 et S_2 ont des dispositions classiques et le trièdre qui régit l'équilibre entre les phases Liq, S_1 et S_2 est situé au-dessus du plan horizontal π . Mais la présence des points péritectiques P1 et P2 dans les systèmes binaires A-C et B-C entraîne une disposition différente pour la nappe de solidus relative à la solution S_3 .

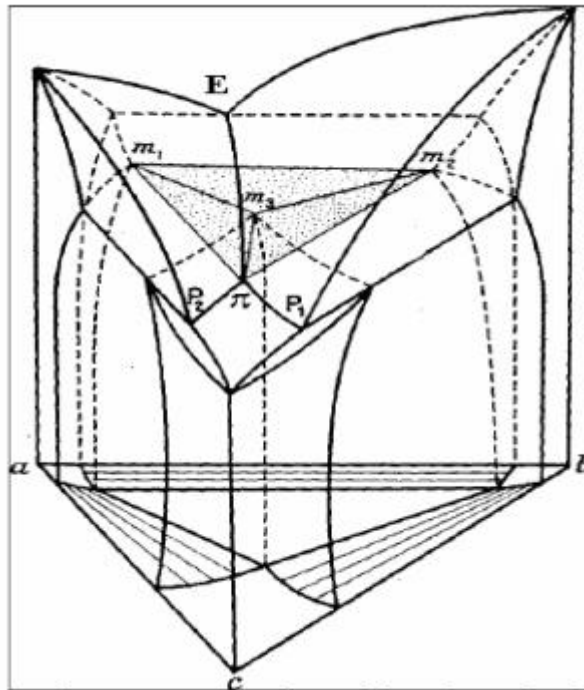


Figure 19 : Diagramme ternaire péritectique de deuxième type

Sur le plan horizontal, elle se projette suivant une surface $cs1m3s3c$ plus grande que celle de la nappe de liquidus correspondante et elle la déborde vers le côté $a\ b$ du triangle de référence .

exercice

Exo.1 : 1 Kg d'un laiton α contient 0,7 Kg de cuivre et 0,3 Kg de zinc. Calculer la concentration massique en cuivre et en zinc de ce laiton α .

La masse atomique du cuivre est de 63,5 g et celle du zinc est de 65.4 g. Calculer la concentration atomique at% en cuivre et en zinc de ce laiton.

Exo.2 : Un alliage est formé de x_A at % de A de masse atomique M_A et de x_B at % de B de masse atomique M_B . Etablir une expression de la composition massique de A. Par symétrie, écrire l'expression donnant la composition de B.

Soit un alliage A-B, la composition massique de cet alliage est de 2% en A. Quelle est la composition atomique de cet alliage ?

Calculer le pourcentage massique (m%) d'un élément A dans un alliage binaire A-B à 30 at % de B.

On donne $M_A = 70\text{g}$; $M_B = 40\text{g}$

3 Chapitre 3 : diagramme Fer Carbone

3.1 DIAGRAMME FER-CARBONE

3.1.1 Le fer et ses caractéristiques

Le fer est le métal de base le plus important pour les alliages techniques. Il est relativement abondant dans l'écorce terrestre (4,7 % en masse) sous forme d'états combinés dans de nombreuses roches. Le fer pur n'est pas employé dans l'industrie, les plus employés sont les alliages de fer avec le carbone qui sont la fonte et l'acier. Le fer pur est obtenu soit :

- Par électrolyse des sels de fer(ferélectrolytique).
- Par décomposition thermique du pentacarbonyl de fer($\text{Fe}(\text{CO})_5$).
- Par recuit de longue durée du fer doux dans un courant d'hydrogène à des température de 1000°C à 1400°C .

Avec 99,9 % de fer, il est déjà pur, mais il contient toujours des traces de différents éléments. Le fer le plus pur qui peut s'obtenir actuellement contient 99,999 % de fer. Le fer est de couleur blanche possédant les caractéristiques suivantes:

- Masse atomique:55,85.
- Nombre atomique:26.
- Rayon atomique $1,27\text{\AA}$ (CFC).
- Masse volumique $7,8\text{g/cm}^3$.
- Température de fusion 1539°C .

Il possède une dureté HB de 60 kp/mm^2 , une contrainte limite de traction d'environ 20kp/mm^2 et une faible limite d'élasticité. C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité (une résistivité électrique à 20°C de $9,76 \cdot 10^{-8}\text{ m}$). Grâce à sa grande perméabilité magnétique, il est très utilisé dans l'électrotechnique. Les propriétés magnétiques du fer dépendent dans une grande mesure de l'impureté et des régimes de traitement thermiques.

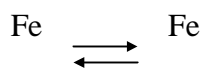
On connaît deux formes (variétés) allotropiques du fer (deux réseaux cristallins différents). Le

fer dont le réseau est cubique centré (CC) et le fer dont le réseau est cubique à faces centrées (C.F.C). Le phénomène de la modification du réseau cristallin sous l'effet de la température porte le nom de transformation allotropique.

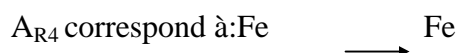
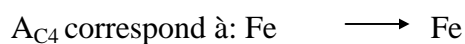
Ces transformations sont établies grâce aux paliers thermiques des courbes de refroidissement ou de chauffage. Les courbes (fig.1) de chauffage ou de refroidissement du fer sont caractérisées par plusieurs points d'arrêt (point critique ou palier) correspondant à des températures définies pour des transformations déterminées.

Le fer existe aux températures inférieures à 910°C et supérieures à 1392°C. Aux températures supérieures à 1392°C, le fer est désigné par Fe_γ. Le fer possède un réseau cubique centré, il est magnétique jusqu'à la température de 768°C. Cette température est appelée point de curie, qui correspond à la transformation magnétique.

Le Fer_α existe entre 910°C et 1392°C, il est paramagnétique et il a un réseau cristallin cubique à faces centrées. Si on étudie les courbes de refroidissement et de chauffage, on peut constater les transformations suivantes : le premier point d'arrêt apparaît à la température de 1539°C (température de fusion du fer). Avec l'abaissement de la température, la totalité du fer se solidifie et se cristallise à la température de 1392°C, à cette température, il y a apparition du deuxième point d'arrêt correspondant à la transformation:



Ce point est désigné par A_{C4}, ou A_{R4}, respectivement pour le chauffage ou le refroidissement:



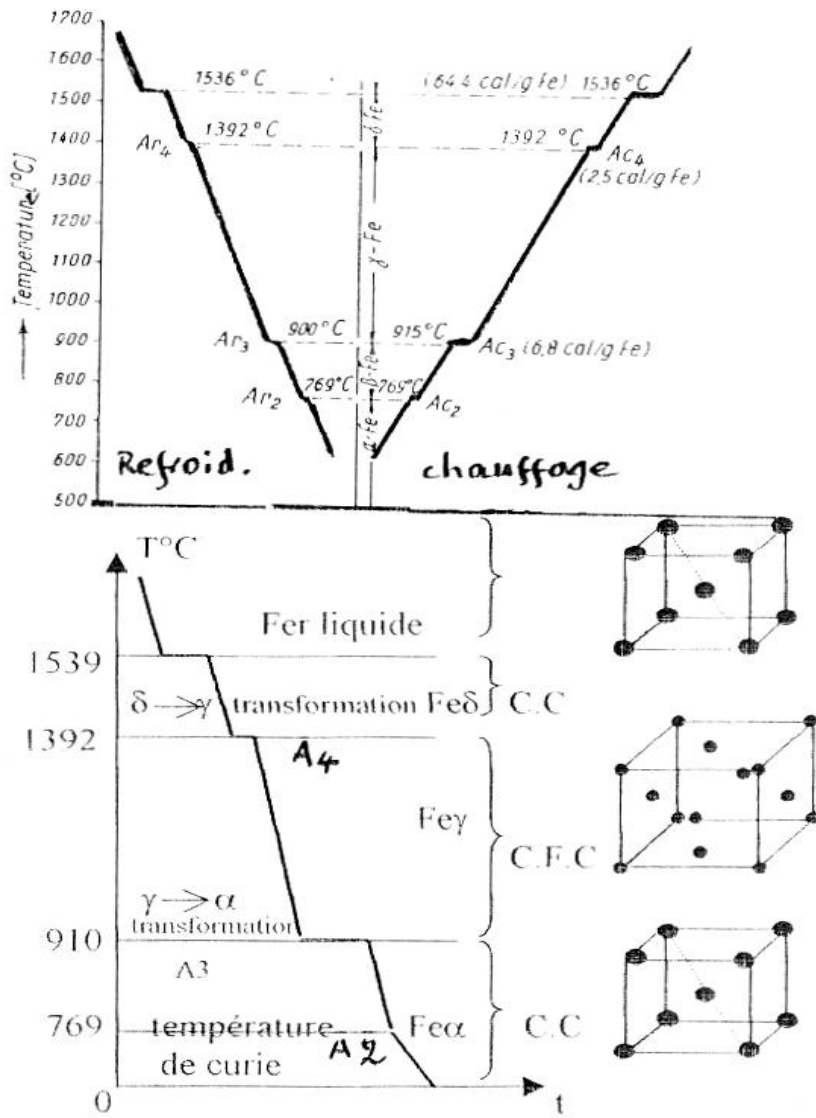


Figure 1: courbe de refroidissement du fer pur.

Le troisième point critique (palier) se trouve à la température de 911°C, ce point est désigné par A_{C3} , ou A_{R3} .

A_{R3} correspond à la transformation: Fe \longrightarrow Fe lors du refroidissement.
 A_{C3} correspond à la transformation: Fe \longrightarrow Fe lors du chauffage.

Le quatrième point est désigné par A_{R2} ou A_{C2} , correspondant à la transformation magnétique dont la température est de 768°C, appelé aussi point de Curie, au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques et devient paramagnétique. Si on examine un morceau de fer à l'aide d'un aimant à la température de 750°C et 800°C, on constate qu'à 750°C, il est toujours attiré par l'aimant, tandis qu'à 800°C, il n'est plus attiré. Au dessous de A_{R2} ou A_{C2} on a la présence du Fe ..

Le tableau ci-après, résume les caractéristiques des différentes phases:

Phase	Réseau Cristallin	Constante du Réseau en mm	Domaine D'existence	Solubilité Maximale	Désignation structure
Fe	CC	a=29,3-T=1425°C	1536>T>1392°C	0,10%-T=1493°C	-Ferrite
Fe	C.F.C	a=36,4-T=1100°C	1392>T>911°C	2,06%-T=1147°C	Austénite
Fe	CC	a=28,66 -T=20°C	T< 911°C	0,02%-T=723°C	Ferrite
Fe ₃ C	Rhombo-édrique	a=45,15 b=50,84- T=20°C c=67,30	T<1330°C		Cémentite

Tableau 1 : les caractéristiques des différentes phases

3.1.2 Le carbone et ses caractéristiques

C'est un élément non métallique peut abondant, (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille, etc. Ses caractéristiques sont les suivantes:

- Numéro atomique:6.
- Masse atomique:12.
- Rayon atomique:0,77Å.
- Masse volumique:2,5g/cm³.

- Température de fusion:3500°C.

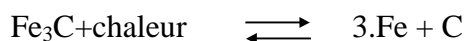
C'est un élément polymorphe et il existe deux variétés cristallines dans les conditions ordinaires, le diamant et le graphite. La variété du diamant est métastable à réseau cristallin C.F.C et il est classé comme le plus dur de corps solides, c'est aussi un isolant électrique.

Le graphite possède un réseau hexagonal simple, c'est un matériau réfractaire, relativement bon conducteur d'électricité. On l'utilise à l'état poudre pour les mines de crayons, pour la lubrification (combinaison de graphite et de graisse), dans les bronzes graphités ou encore en suspension colloïdale.

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe₃C appelée cémentite ou carbone de fer.

La phase inter métallique cémentite a une structure très compliquée et elle est très dure(HB = 800kp/mm²). La Formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement).

Lorsque le refroidissement du métal liquide est lent les atomes de carbone se cristallisent en formant le graphite et dans le cas contraire lorsque le refroidissement est rapide on a la formation de la cémentite (Fe₃C), qui ne peut se décomposer à la température ambiante, mais à un maintien de température supérieure à 500°C et d'une durée très longue. La cémentite peut se décomposer en graphite suivant la réaction :



La présence aussi du silicium peut favoriser la décomposition de la cémentite (formation du graphite).Donc on a l'existence de deux diagrammes d'équilibres:

- Le diagramme d'équilibre métastable Fe-Fe₃C (cémentite).
- Le diagramme d'équilibre stable fer-graphite.

3.1.3 Diagramme d'équilibre: Fer-cémentite

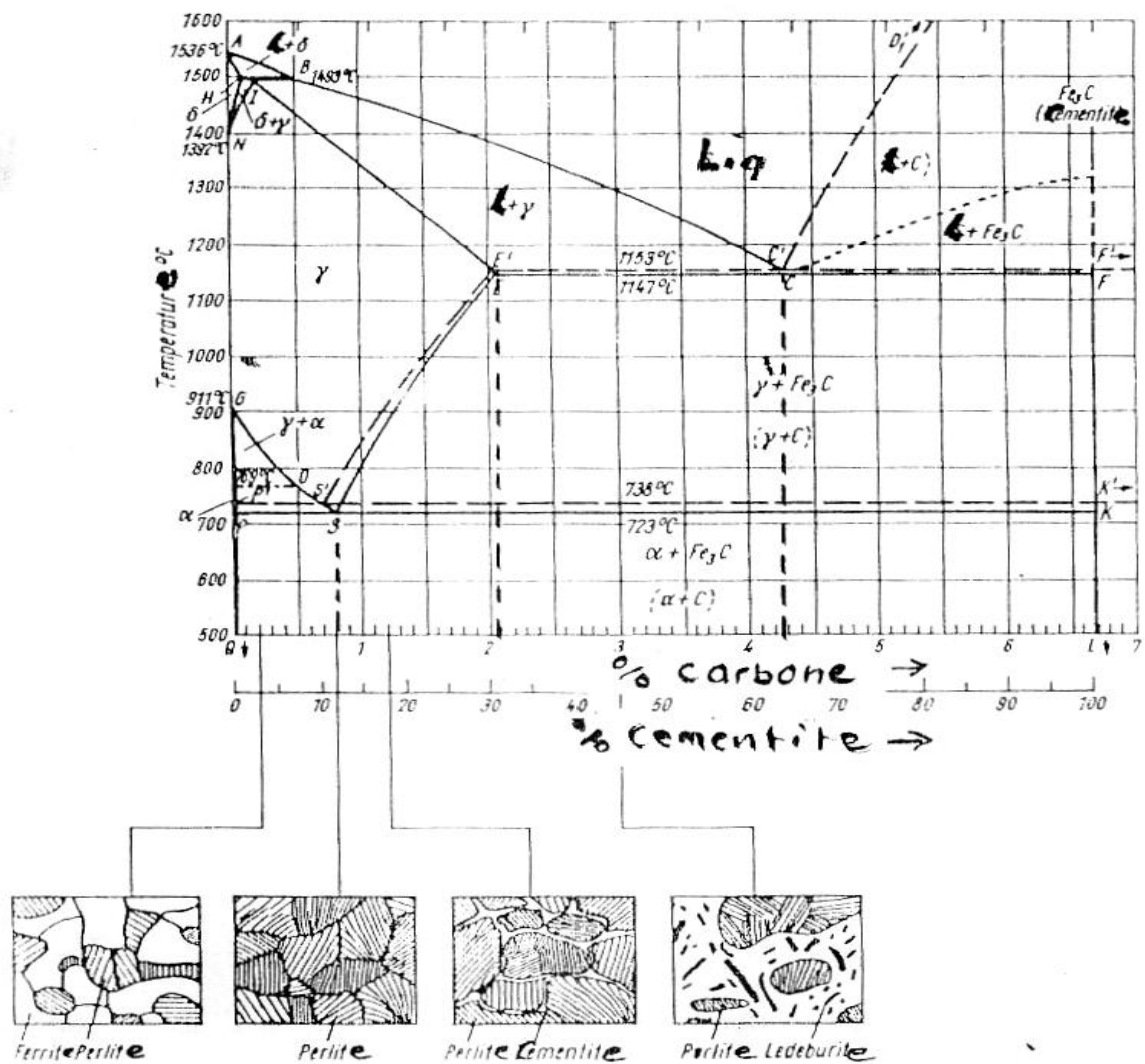
C'est le diagramme d'équilibre Fer-carbone métastable. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. La cémentite correspond à 6,67 % de carbone.

La figure 2 représente à la fois les deux diagrammes, celui représenté par des traits en pointillés correspondant au diagramme stable fer-graphite et l'autre en trait continu correspondant au diagramme métastable fer-cémentite.

Pour des températures élevées, la cémentite se décompose en fer et en carbone et c'est la cause qui ne laisse pas connaître la température de fusion de la cémentite, on considère sa température de fusion à environ 1392°C et peut être, elle est plus élevée.

Sur la figure 120, le fer pur représente la partie limite gauche et la cémentite la partie limite droite. La cémentite contient 6,67 % de carbone. Les alliages de fer et de carbone contenant plus de 6,67 % de carbone n'ont aucun intérêt dans l'industrie, à part les ferro-manganèses qui contiennent de 6 à 8 % de carbone.

Le diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C métastable, possède une structure analogue à celle du système eutectique plomb-antimoine. Les complications qui existent dans le fer sont les différentes modifications allotropiques du fer et les différentes capacités de dissolution du carbone. Les aciers et aciers de moulage se solidifient selon le système métastable, tandis que la solidification des fontes de moulage s'effectue, le plus souvent, suivant la forme stable et métastable suite à la haute teneur en carbone et en refroidissement lent.



(fig.120)

Figure 2 : Diagramme fer cémentite

3.1.3.1 Les points caractéristiques du diagramme

- A: correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).
- D: correspond à la température de fission de la cémentite (1392°C).
- B: 0,51% C dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite et l'austénite à la température péritectique 1493°C.
- H: 0,10% C teneur limite du carbone dans la ferrite à 1493°C.
- I: 0,16% C dans l'austénite à la température péritectique 1499°C.

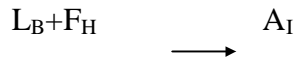
- N(1392°C) et G (910°C) marquent la transformation polymorphe réciproque ferrite-austénite(\rightleftharpoons).
- E : 2,1 % C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF1147°C).
- S:0,8 %C dans l'austénite à la température eutectoïde 727°C.
- P:0,02 %C teneur limite dans la ferrite à la température eutectoïde 727°C.
- C:4,3%C transformation eutectique à la température 1147°C.

Les liquides du diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C qui déterminent le processus de cristallisation ont la notation et le sens physique suivant:

- AB : liquidus qui matérialise la température de début de cristallisation de la ferrite à partir de l'alliage liquide.
- NH et NI: limite supérieure intérieure de la coexistence des deux phases ferrite et austénite (A).
- BC : liquidus qui marque le début de cristallisation de l'austénite A à partir de l'alliage liquide.
- CD : liquidus correspondant au début de cristallisation de la cémentite primaire (C_{m1}) à partir de l'alliage liquidé.

Donc ABCD représente la ligne liquidus pour tout le diagramme au dessus de ABCD, tous les alliages sont à l'état liquide.

- AH : ligne de solidus traduisant les températures délimitant le domaine de l'alliage liquide et les cristaux Fe . Au dessous existent uniquement les cristaux de ferrite .
- HIB: ligne de transformation péritectique (T=1499°C, C=constante), A la température inférieure à 1499°C, on a l'amorce de la réaction péritectique (interaction du liquide de composition B avec les cristaux de fonte de composition H dégage de l'austénite de composition I.



- ECF : cette ligne correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé lédéburite(L_b).

Donc AHIECF représente la ligne de solidus, au dessous de cette ligne, tous les alliages se trouvent à l'état cristallin (solide). Entre les lignes de solidus et de liquidus, tous les alliages se trouvent à l'état pâteux avec des composantes hétérogènes de liquide et de cristaux (ferrite, austénite, cémentite) ayant des compositions différentes et dans des portions variables.

Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06% C s'appellent aciers et dont la teneur en carbone est inférieure à 2,06 % C s'appellent fontes. Cette délimitation coïncide avec la solubilité limite du carbone dans l'austénite. L'austénite possède une structure très plastique, ce qui rend les aciers malléables, les fontes possèdent de bonnes propriétés de fonderie, un point de fusion plus bas et des retraits plus petits dus à la présence dans la propriétés de fonderie, Les points de transformations des aciers jouent un rôle prédominant dans la détermination des températures des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit et cémentation).

Ces points sont notés par A_0 , A_1 , A_2 , A_3 et A_{cm} , lors du chauffage ou du refroidissements ont notés respectivement par A_{C0} , A_{C1} , A_{C2} , A_{C3} et A_{CCm} et A_{r0} , A_{r1} , A_{r2} , A_{r3} et A_{rCm} .

A_0 : ($T=210^\circ\text{C}$) correspond à la transformation lors du chauffage de la cémentite ferromagnétique en cémentite non magnétique.

- A_1 : ($T=727^\circ\text{C}$) correspond à la transformation réversible perlite –austénite.
- A_2 : point de curie ($T=769^\circ\text{C}$), au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques, cette température est marquée par ligne MO.
- A_3 , correspond aux températures associées à la ligne SE (Cm est les symbole abrégé de la cémentite)1

Donc les lignes GOS et SE représentent le lieu des points A_3 et A_{cm} définissant des températures variables.

Les points caractéristiques du diagramme fer-carbone stable et métastable sont donnés dans le tableau suivant :

Point	Température en °C	% de carbone
A	1539	0
B	1499	0,51
C	1147	4,30
D	1392	6,67
E	1147	2,06
F	1147	6,67
G	910	0
H	1499	0,10
I	1499	0,16
K	723	6,67
M	760	0
N	1392	0
P	727	0,02
Q	20	0,006
C'	1147	4,30
E'	1153	2,03
S'	727	0,69

Tableau 2 : Les points caractéristiques du diagramme fer-carbone stable et métastable

A partir du diagramme fer-cémentite, on peut définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone.

Désignation	% de carbone
Aciers hypoeutectiques	0,02 à 0,8
Aciers eutectoïdes	0,8
Aciers hypereutectiques	0,8 à 2,06
Aciers hypoeutectiques	2,06 à 4,3
Fontes eutectiques	4,3

Fontes hypereutectiques	4,3à 6,67
-------------------------	-----------

Tableau 3 : Définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone.

3.1.3.2 Définitions des constituants micrographiques

3.1.3.2.1 Le carbone

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable de diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite Fe_3C .

3.1.3.2.2 La ferrite(F)

C'est une solution solide de carbone dans le fer α , c'est à dire la ferrite est constituée par du fer renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0,02 %), ainsi que d'autres inclusions.

On distingue la ferrite α à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02% et la ferrite γ à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1 %. La ferrite est peu tendre et très ductile ($HV = 90$, $R_m = 300 \text{ N/mm}^2$, $K = 300 \text{ J/cm}^2$), Elle est magnétique à température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect de grains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C .

3.1.3.2.3 L'austénite(A)

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer γ , La solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2,14 %. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable ($HB = 300$). La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est anti-ferromagnétique.

3.1.3.2.4 La cémentite(C)

La cémentite ou carbone de fer (Fe_3C) est une combinaison chimique de fer et

de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67%. Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure (HB = 700) mais fragile. La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

- Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- Grains dans les aciers avant subit un traitement thermique de recuit.
- Précipites inter-granulaires dans les aciers ayant un pourcentage de carbone supérieur à 0,8 %.

Selon le diagramme Fe-Fe₃C et lors du refroidissement, la cémentite peut exister sous trois différentes formes de liaisons mais avec la même composition chimique.

Désignation	Obtention par:
Cémentite primaire	Cristallisation primaire du métal liquide suivant la ligne CD
Cémentite secondaire	Ségrégation à partir de l'austénite suivant la ligne ES
Cémentite tertiaire	Ségrégation à partir de la ferrite suivant la ligne PQ

Tableau 4 : Les trois différentes formes de liaisons de la cémentite

3.1.3.2.5 la perlite(P)

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite, sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88 % de ferrite et 12 % de cémentite). Elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8 % de carbone.

Elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85 %. La perlite est dure (HV = 200) et assez ductile $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$, $A = 10^{40}$.

3.1.3.2.6 La troostite(T)

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes (huile). Les nodules de troostite qui se développent à partir des joints de grains sont constitués par des lamelles de ferrite-cémentite non séparables en microscopie optique. Cette microstructure est caractérisée d'une trempe douce. Les caractéristiques mécaniques de la troostite sont assez importantes (HV 450).

3.1.3.2.7 La bainite (B)

Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées. On distingue des bainites supérieures qui peuvent être considérées comme

étant des plaquettes de ferrite contenant des carbures apparaissant parallèlement à l'axe de la plaquette, et des bainites inférieures qui s'assimilent à des plaquettes de ferrite contenant une fine précipitation de carbures dispersés dans la plaquette de ferrite. Ces carbures ne sont discernables qu'en microscopie électronique. Les caractéristiques mécaniques associées à une texture bainitique approchent celles d'une structure martensitique.

3.1.3.2.8 La sorbite (S)

Ce constituant n'est plus un produit de décomposition directe de l'austénite puisqu'il correspond, en fait, à un stade de décomposition de la martensite pour des températures supérieures à environ 400°C. C'est un mélange complexe de carbure finement réparti dans une matrice ferritique distordue. Elle conduit à des propriétés mécaniques intéressantes. Par exemple la dureté reste encore élevée (HV 300 à 400) pour une bonne résilience.

3.1.3.2.9 La martensite ' (M)

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite. La martensite possède une grande dureté (HV = 700 à 900), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies: massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés. Toutes ces microtextures ou microstructures sont toutes des produits de décomposition de l'austénite. Elles sont composées d'un mélange de ferrite et de carbure (cémentite ou carbure plus ou moins complexes). La morphologie des deux phases en présence dépendent essentiellement de la vitesse de refroidissement.

3.1.3.2.10 Le lédéburite I (L_I)

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide avec 4,3% de carbone à la température eutectique. Le lédéburite I contient 51,4 % d'austénite et 48,6 % de cémentite et peut contenir 2,06 à 6,67 % de carbone. Son domaine de stabilité est 723°C à 1147°C.

3.1.3.2.11 Le lédéburite II (L_{II})

Le lédéburite II provient durant le refroidissement du lédéburite I par décomposition eutectoïde à la température de 723°C. Le lédéburite II contient 51,4 % de perlite et 48,6 % de cémentite. Durant la solidification des alliages de fer et de carbone, il y a lieu trois types de transformations iso thermiques, il s'agit des réactions péritectiques, eutectiques et eutectoïdes.

Remarques:

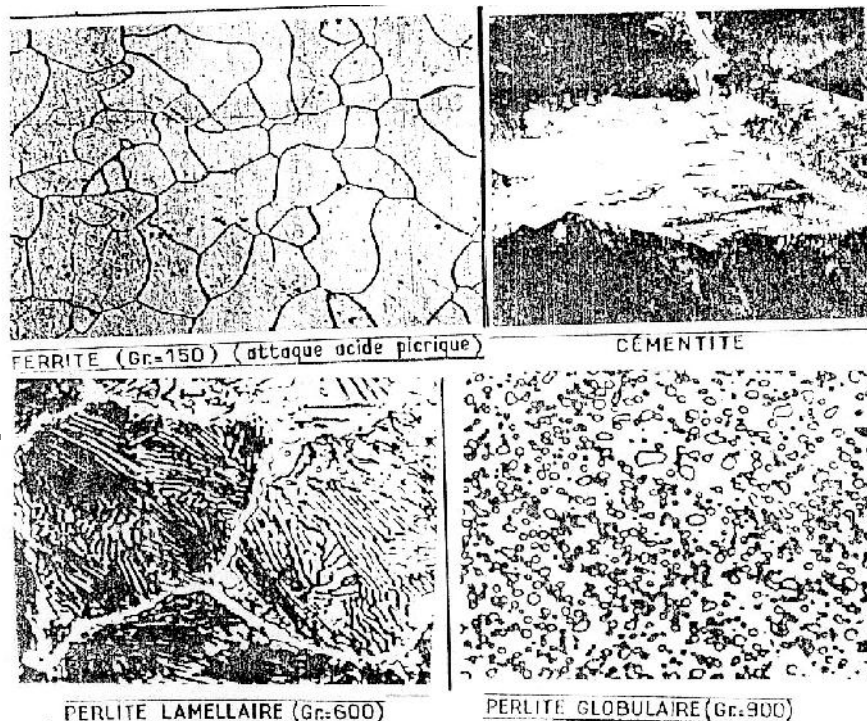
Les traitements et les textures que nous venons de passer en revue ne sont pas uniquement applicables à des aciers faiblement alliés, ils sont directement transposables à tous les alliages métalliques possédant un diagramme similaire (exemple fer-Cu, Ti-CU, certains laitons, certains bronzes d'aluminium, etc.). Toutefois, les caractéristiques mécaniques peuvent être différentes d'un alliage à l'autre. Dans le tableau suivant, est exposée à titre de comparaison, la dureté des différents constituants des aciers.

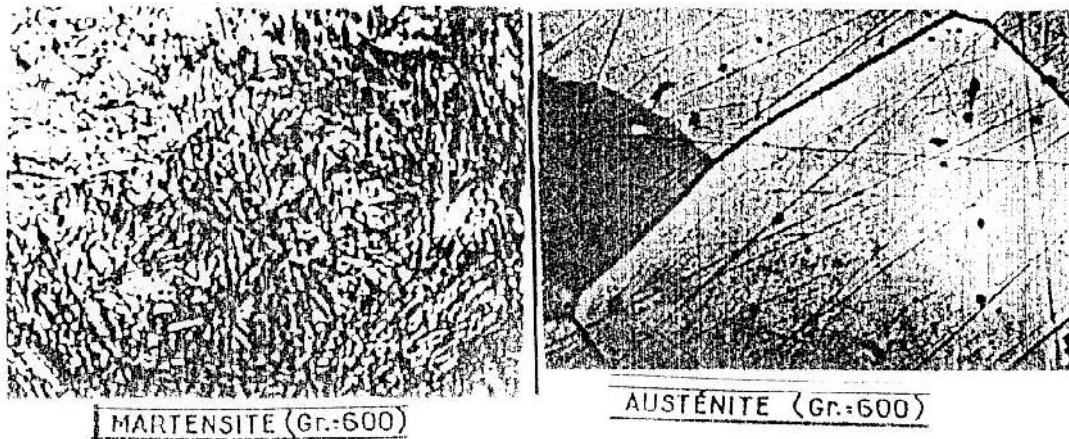
Constituant pur	HB	HV	HRc	Rm en kgf/mm ²
Ferrite non alliée	45			24
Ferrite écrouie	50à 80			
Perlite lamellaire	200à250	215à265	20	75
Perlite grenue	160à 170	175		60
Austénite	230à280	235à285	20à25	85
Sorbite	250à300	260à310	25à30	90
Troostite	400à450	425à480	45à50	150
Martensite	650à 750	750à 900	60à 65	250
Cémentite	600à 650			225
Lédéburite	360à 375			130

Tableau 5 : la dureté des différents constituants des aciers.

Tableau 6 : Ferrite alliée: dureté après avoir ajouté successivement 1% en poids des éléments suivants							
Elément	Cr	Mo	Cu	Ni(V)	W	Mn	Ti
DuretéHV	74	80à85	80à88	80à94	80à98	90	105

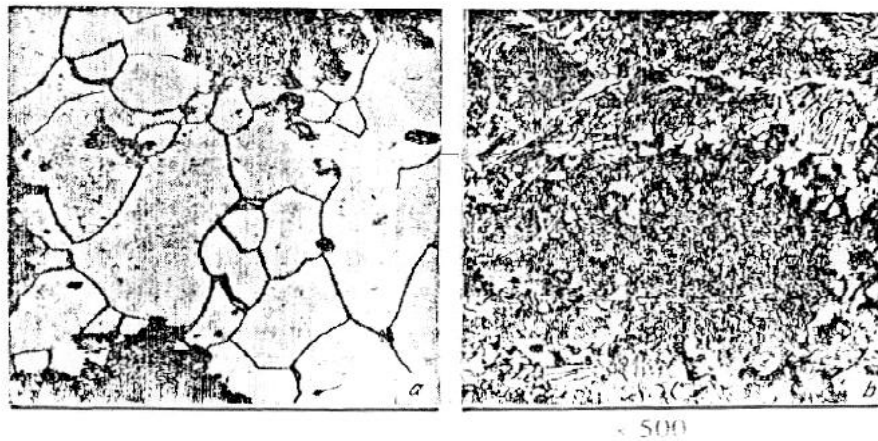
Sur les figures 3 et 4, sont représentés les divers constituants micrographiques des aciers et des fontes:





(fig.121)

Figure 3 :



microstructure de la fonte malléable
 (a) : fonte ferritique (b) : fonte perlitique

(fig.4)

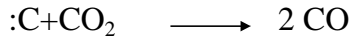
Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à coeur blanc)

Si dans le cas de la malléabilisation par graphitisation, on procède par un traitement thermique dans ce cas de malléabilisation par décarburation, on procède par un traitement mixte thermo-chimique. Il consiste à chauffer la fonte à 960°C durant 50 à 100 heures dans un milieu oxydant constitué de minerai de fer de manière à éliminer le carbone de la fonte sous forme de gaz. L'oxydation du carbone se déroule comme suit:

- L'oxygène ambiant de la casse réagit avec le carbone de la surface des pièces en

donnant les gaz CO et CO₂

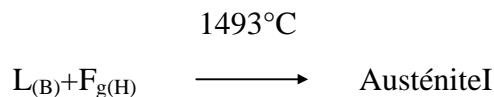
- L'oxyde de carbone réagit avec le minerai de fer en donnant du CO₂.
- Le gaz CO₂ formé agit sur le carbone de la fonte suivant la réaction



Ainsi, l'oxydation porte sur le carbone de l'austénite de la surface de la pièce et le carbone diffuse du centre vers la périphérie pour remplacer le carbone oxydé et la cémentite entre en solution. Les transformations

3.1.3.2.12 Transformation péritectique

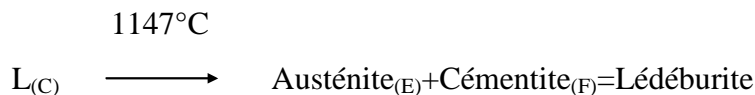
Durant le refroidissement des alliages titrant de 0,1 à 0,51 % de carbone, se précipite la ferrite (F) suivant la ligne AB. A la température de 1493°C, il y a interaction péritectique des cristaux (0,1 % C) avec le reste du liquide de composition B (0,51 % C), (L_B), enformant l'austénite de composition I (0,16 %C) selon la réaction péritectique:



3.1.3.2.13 Transformation eutectique

Les alliages liquides titrant de 2,06 à 6,67 % C se solidifient suivant la ligne BC en donnant de l'austénite primaire suivant la ligne CD en donnant la cémentite primaire.

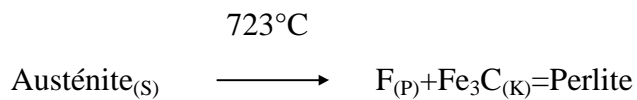
A la température eutectique de 1147°C, se décompose le liquide eutectique restant(4,3%C) en austénite(2,06 %C) et cémentite (6,67% C) selon la réaction eutectique :



Le mélange formé d'austénite (E) et de cémentite (F) est appelé lédéburite selon le nom du métallurgiste allemand Ledebur.

3.1.3.2.14 Transformation eutectoïde

A la température eutectoïde de 723°C se décompose l'austénite eutectoïde titrant 0,8%C en formant la ferrite avec 0,02 % C (F_p) et la cémentite secondaire avec 6,67 % C ($Fe_3C_{(K)}$) suivant la réaction eutectoïde :



Le mélange constitué de ferrite F_p et de cémentite $Fe_3C_{(K)}$ s'appelle perlite.

3.1.4 Solidification et transformation des aciers et fontes

La partie qui sera consacrée à l'étude de la solidification et transformation des différents alliages de fer et de carbone (fontes et aciers) pouvant exister selon le diagramme Fe- Fe_3C comme le montre la figure5, les aciers et fontes suivantes:

- Aciers hypoeutectoïdes.
- Aciers eutectoïdes.
- Aciers hypereutectoïdes.
- Fontes hypoeutectiques.
- Fontes eutectoïdes.
- Fontes hypereutectiques.

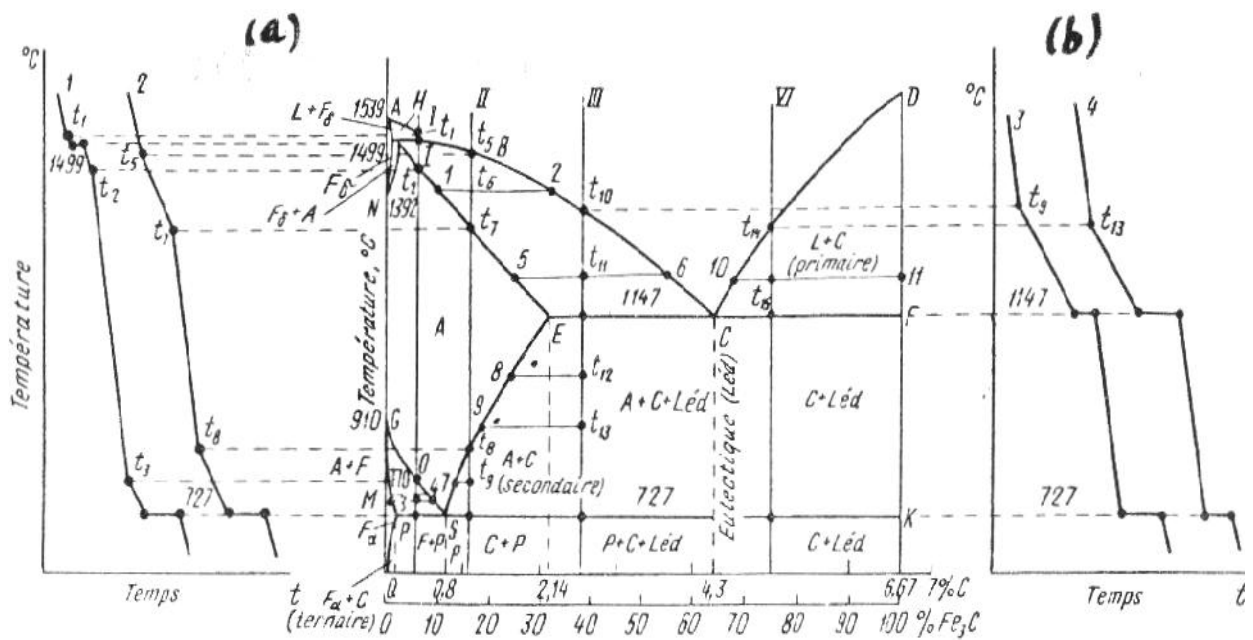
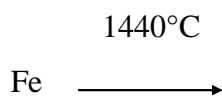


Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C et courbes de refroidissement de l'acier(a) et de la fonte (b)

(fig.5)

Aciers hypoeutectoïde

Lorsque la ligne liquidus AB est atteinte, il y a précipitation des cristaux primaires Fe dans l'alliage liquide. Après dépassement de la ligne solidus AH (T=1510°C), la totalité de l'alliage est solidifié et se compose de la terme Fe. A la température 1440°C (ligne NH),commence la transformation de la ferrite Fe en austénite () pauvre en carbone et selon la réaction:

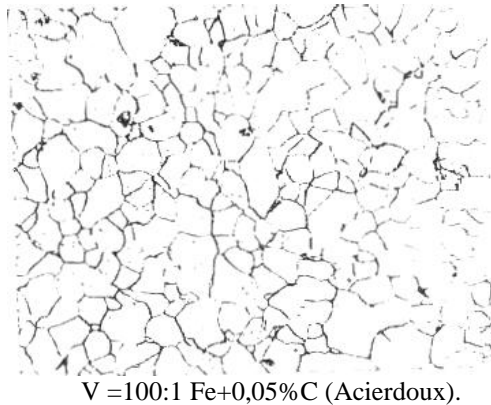


Et se termine à la température de1120°C où l'acier se compose uniquement des cristaux d'austénite(). Lorsque la ligne GOS est atteinte(T=900°C), il ya précipitation de la ferrite à partir de l'austénite et le reste de l'austénites' enrichit en carbone.

A la température T = 723°C, les cristaux d'austénite contenant 0,80 % de carbone, se décomposent en donnant la perlite suivant la réaction eutectoïde, mais en faible quantité. A la température T = 769°C, la ferrite Fe précipitée passe de l'état paramagnétique à l'état ferromagnétique. Si on poursuit le refroidissement au dessous de 723°C, la solubilité du carbone

dans Fe₃C diminue. Le carbone précipité se dépose sous forme de cémentite(cémentite tertiaire), dans les joints de grains de la ferrite Fe₂.

La figure 6 montre la structure de l'acier à 0,05 % C et à la température ambiante (agrandissement x 100). A coté des cristaux de ferrite clairs, on peut distinguer les taches sombres dans les joints de grains de Fe₂, représentant la perlite et à l'intérieur des grains de Fe₂, les taches sombres représentant la scorie restant dans l'acier.



(fig.6)

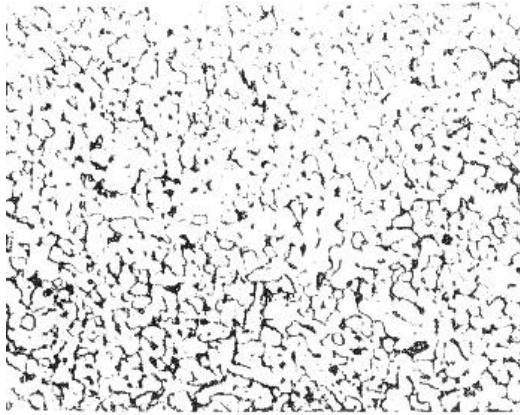
Aciers à 0,15% C:

A la température de 1525°C se précipitent les cristaux de ferrite à partir de l'alliage liquide et à la température de 1493°C, il y a transformation péritectique d'une partie de la ferrite Fe₂ en austénite. Avec l'abaissement de la température, tout le reste de la ferrite Fe₂ se transforme en austénite.

A la température $T = 1475^{\circ}\text{C}$, et lorsque le ligne IN est atteinte, l'acier se compose uniquement de l'austénite à 0,15%C.

A $T = 860^{\circ}\text{C}$, et lorsque la ligne GOS est atteinte, il y a précipitation de la ferrite₂, pauvre en carbone, à partir de l'austénite, le reste de l'austénite s'enrichit en carbone avec la diminution de la température où le % C est de 0,8 % à $T=723^{\circ}\text{C}$, à cette température, il y a lieu la transformation eutectoïde par décomposition de l'austénite en perlite.

La structure de l'acier à 0,15 % C, (fig.7), est constituée de ferrite (clair) et de perlite(parties sombres).



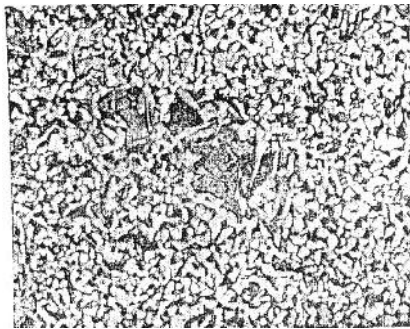
V =100:1 Fe+0,15% C(Aciercémenté).

(fig.7)

Aciers à 0,25% C:

A la température $T = 1520^{\circ}\text{C}$, se précipitent les cristaux primaires de ferrite et rapidement à la température péritectique $T = 1493^{\circ}\text{C}$, il y a transformation de la ferrite en austénite. Avec la diminution de la température, le reste du liquide se solidifie suivant la ligne IE du solidus en formant de l'austénite.

À $T = 1475^{\circ}\text{C}$, tout le liquide est solidifié et se compose uniquement de l'austénite à 0,25% C. La précipitation de la ferrite, pauvre en carbone, commence lorsque la température aura atteint la ligne GOS (une cristallisation secondaire), l'austénite s'enrichit en carbone jusqu'à 0,8 % C, point eutectoïde où $T=723^{\circ}\text{C}$ l'austénite à 0,8 % C, se décompose en perlite. La structure de ce type d'acier se compose de la perlite et de la ferrite (fig. 8).

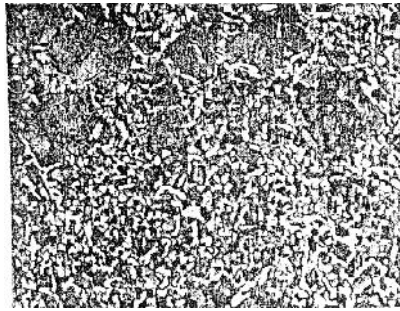


V = 100:1 Fe+0,25% C (Acier de construction).

(fig.8)

Aciers à 0,40% C:

Lors de la solidification et avec l'abaissement de la température, se précipitent les cristaux de ferrite, ensuite l'austénite (transformation péritectique). La cristallisation se termine à $T = 1450^{\circ}\text{C}$ de la ligne IE et l'alliage se compose uniquement de l'austénite. Une cristallisation secondaire débute à la ligne GOS avec précipitation de la ferrite et se termine par la décomposition eutectoïde de l'austénite 0,8 % C en perlite à $T = 723^{\circ}\text{C}$. La structure de cet acier est représentée par la figure 9 où l'on distingue bien les deux composants ferrite et perlite.

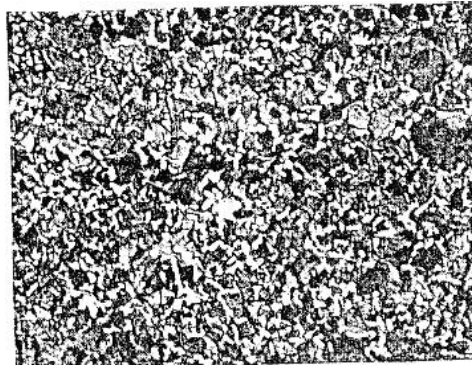


V =100:1 Fe+0,40%C(Acieràtraitementthermique:revenu).

(fig.9)

Aciers à 0,60%C:

Entre 1490°C et 1410°C, se précipite l'austénite primaire. La cristallisation secondaire se déroule de la même façon que celle de l'acier à 0,40 % C, seulement la portion de la perlite augmente par rapport à celle de la ferrite. La structure métallographique de ce type d'acier se compose de la ferrite et de la perlite(fig.10).

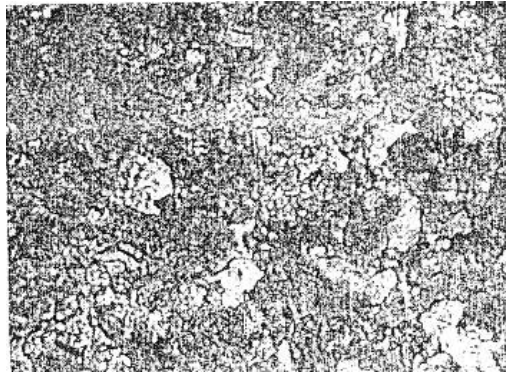


V =100:1 Fe+0,60%C(Acieràtraitementthermiqueouacieràoutils).

(fig.10)

Aciers eutectoïdes des aciers à 0,80%C:

La cristallisation primaire de cet acier s'effectue comme celle de l'acier à 0,60% C et la cristallisation secondaire s'effectue sans transformation de la ferrite, à partir de l'austénite, il y a transformation eutectoïde directe de l'austénite en perlite. Les points A_3 et A_1 , coïncident et la courbe de refroidissement ne porte pas de point de flexion A_{r3} ou de palier A_{r1} . La figure 11, montre la structure métallographique (perlite pure) de l'acier eutectoïde.



V =100:1 Fe+0,80%C(Acierpouroutils).

(fig.11)

Selon le diagramme Fer-carbone, l'alliage eutectoïde se décompose en deux constituants, à savoir la ferrite et la cémentite. A la température $T=723^{\circ}\text{C}$ et avec un refroidissement lent, se forme de la perlite lamellaire à cause de la présence d'une grande quantité de ferrite(88%) et d'une faible quantité de cémentite(12%) dans l'alliage.

Les figures 12, 13, 14, et 15 montrent la structure fine et épaisse de l'eutectoïde perlite obtenue par différents grossissements.



V =500:1

Perlitelamellairefine.

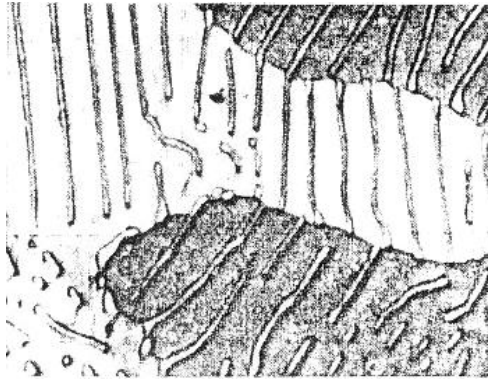
(fig.12)



V =500:1

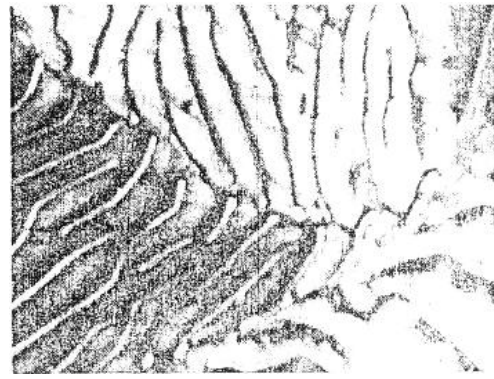
Perlitelamellaireépaisse.

(fig.13)



V=1000:1
 Perlite lamellaire
 épaisse. La ferrite est fort attaquée.

(fig.14)



V=2000:1
 Perlite lamellaire
 épaisse. La ferrite est plus attaquée.

(fig.15)

On peut modifier la forme de la cémentite lamellaire soit par l'intermédiaire d'un refroidissement extra long, dans le domaine de l'austénite, ou par trempe de plusieurs heures de la perlite lamellaire à la température $T = 700^{\circ}\text{C}$. Sous l'influence de la tension superficielle, les particules lamellaires de la cémentite se divisent en petites particules ayant la forme globulaire.

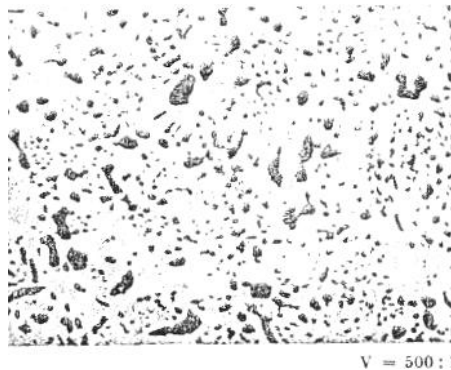
La figure 16 montre la structure d'un acier à 0,90 % C, lequel a été trempé durant 10 heures à $T=700^{\circ}\text{C}$, on peut constater la transformation de la cémentite lamellaire en cémentite globulaire, ce qui donne une perlite globulaire



V =500:1 Perlite globulaire. La cémentite de la perlite. Les sphères formées par la cémentite de la perlite ne sont pas réguliers. (attaque avec HNO_3 à 1%). (fig.16)

Et enfin la figure 17 montre la structure du même acier avec une perlite globulaire, où la cémentite est sombre et la ferrite est claire Le procédé utilisé pour l'obtention de la perlite globulaire

est appelé trempe d'adoucissement, car la perlite globulaire possède une dureté faible par rapport la perlite lamellaire.



V =500:1

Perlite globulaire. Les grains noirs représentent la
cémentite(attaqueNaOHchaud)

(fig.17)

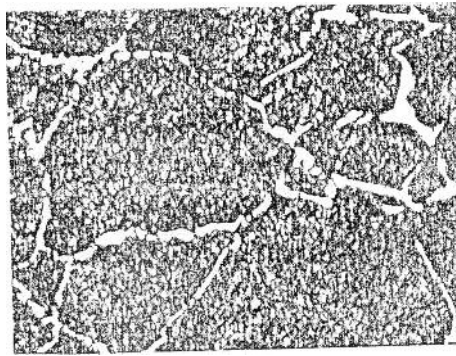
3.1.5 Aciers hypereutectoides

3.1.5.1 Aciers à 1,15%C:

L'alliage liquide se solidifie par la précipitation de l'austénite, à la fin de la solidification et dans le domaine de température entre 850°C et 1320°C, l'acier se compose uniquement de l'austénite.

Avec la diminution de la température et lorsque la solubilité de l'austénite par le carbone, ligne SE est atteinte, le carbone en excès se précipite sous forme de cémentite secondaire dans les joints de grains de l'austénite. Plus la température diminue, plus la quantité de cémentite secondaire cristallisée est importante, ce qui rend les couches de la cémentite plus épaisses, mais à la température $T=723^{\circ}\text{C}$, l'austénite contenant 0,80%C se décompose en perlite.

Les figures 18 et 19 montrent la structure d'un acier hypereutectoides à 1,15% C. La figure 121 est obtenue par l'attaque à l'acide nitrique à 1%, qui donne une couleur sombre jusqu'à noire de la perlite, la cémentite n'est pas attaquée et reste claire. Tandis que la figure 122, elle est obtenue par l'attaque à l'aide d'une base (solution de sodium) où la cémentite est sombre et la perlite est claire.



V =500:1

Fe+1,15%C(acier à outils)Perlite
sombre, cémentite secondaire claire

(fig.18)

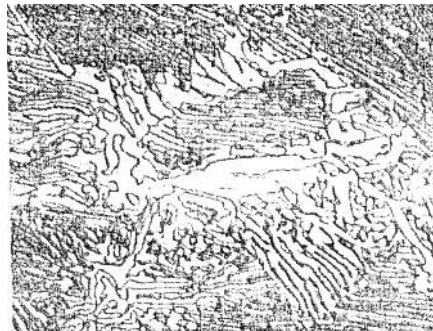


V =500:1

Fe + 1,15 % C (acier à outils)
Cémentite sombre, perlite claire

(fig.19)

Plus la teneur en carbone dans l'acier est élevée, plus les couches de la cémentite deviennent épaisses. La figure 20 montre la structure d'un acier avec 1,61%C.



V = 500 :

1Fe+1,61%C

Perlite avec bandes larges de cémentite secondaire sur les joints

(fig.20)

La perlite de la cémentite secondaire dans les joints des grains de l'austénite s'effectue seulement lorsque le refroidissement est lent, dans le cas contraire, le carbone n'aura pas suffisamment de temps pour sortir de l'intérieur de l'austénite et se précipite dans les joints des grains de l'austénite.

Donc le résultat, c'est que la cémentite secondaire se précipite partiellement ou totalement, à l'intérieur de l'austénite sous formes d'aiguilles comme le montre la figure 21.



V= 500 :
1Fe+1,31%C

La cémentite sous forme d'aiguilles se trouve partiellement

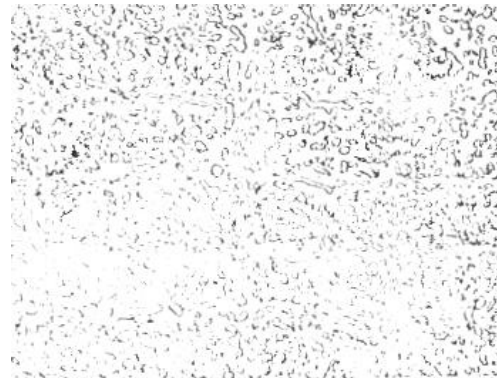
Sur les joints de grains à l'intérieur des cristaux d'austénite première.

(fig.21)

Une telle structure n'est pas souhaitée à cause de sa fragilité. Si on veut obtenir un acier avec une structure globulaire fine et homogène, l'acier doit subir en premier un refroidissement relativement rapide au dessus de la ligne SE, ce qui donne un état perlitique fin, ensuite un traitement d'adoucissement. Les figures 22 et 23 représentent, respectivement, la structure des aciers avec 1,50% C et 1,30 % C.



V = 500 :
1Fe+1,50%C
Perlite + des halos de ferrite
en tourant la cémentite
secondaire
(fig.22)



V = 500 :
1Fe+1,50%C
Cémentite globulaire
(recuit d'adoucissement)
(fig.23)

Si la teneur du carbone augmente jusqu'à 2,06 % C, il y a précipitation d'un nouveau composant structurel eutecticum lédéburite. Dans ce cas, les alliages ne sont plus forgeables et portent le nom de fontes blanches.

3.1.6 Fontes hypo eutectiques

3.1.6.1 Fontes à 2,15% C :

A partir de l'alliage liquide et à la température de 1380°C se précipite l'austénite primaire, pauvre en carbone, le reste du liquide s'enrichit en carbone.

A la température $T = 1147^{\circ}\text{C}$, l'austénite contenant 2,06 % C (point E) et le reste du métal contenant 4,3% C (point C), se solidifient eutectiquement en formant le lédéburite.

Avec l'abaissement de la température et, lors du refroidissement, se reproduisent des transformations dans l'alliage, à partir de l'austénite primaire se trouvant dans le lédéburite, se précipite la cémentite secondaire (Cm_{II}), jusqu'à la température $T = 723^{\circ}\text{C}$, l'austénite à 0,8% se transforme en perlite (eutectoïde).

A la température ambiante, la structure d'une telle fonte se compose de l'austénite primaire dissoute dans la perlite du lédéburite et de la cémentite secondaire dans les joints de grains, (fig.24).



V =500:1

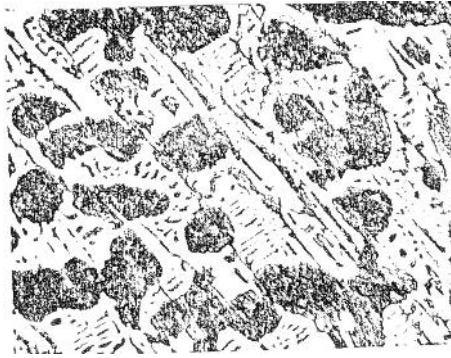
Perlite+lédéburite+cémentite secondaire dans les joints de grains.

(fig.24)

3.1.6.2 Fontes à 2,5% C:

Lors du refroidissement et à partir de la température $T=1350^{\circ}\text{C}$, se précipite l'austénite primaire suivant la ligne BC.

Jusqu'à la température $T = 1147^{\circ}\text{C}$, le reste du métal liquide contient 4,3 % C (point C) et se transforme eutectiquement en lédéburite, si on poursuit le refroidissement, se précipite la cémentite secondaire à partir de l'austénite jusqu'à $T = 723^{\circ}\text{C}$. L'austénite décarburée jusqu'à 0,8 % C se transforme en perlite. A la température ambiante, la structure d'une telle fonte se compose de la perlite, de l'austénite dendritique et du lédéburite, (fig.25).



V = 100 :
1Fe+2,5%C

Perlite+cristaux mixtes (sombre) dans la perlite+lédéburite

(fig.25)

3.1.7 Fontes eutectiques

3.1.7.1 Fontes à 3,4%C:

L'alliage liquide à 4,3 % C se solidifie sans précipitation primaire et donne directement à $T = 1147^{\circ}\text{C}$ (point C), l'eutectique le lédéburite. La structure caractéristique du lédéburite est représentée par les figures 26 et 27.



V = 500 :

1Fe+4,3%C

Lédéburite : les cristaux du lédéburite ont la forme dendritique.

(fig.26)



V = 500 :

1Fe+4,3%C

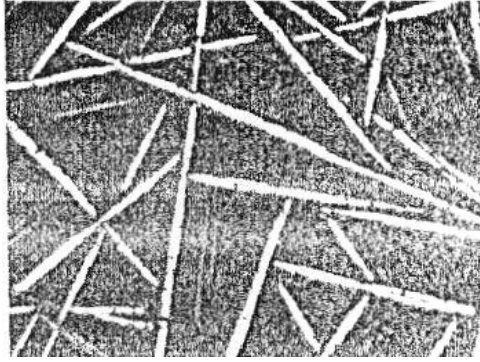
Lédéburite : les cristaux du lédéburite ont la forme globulaire.

(fig.27)

3.1.8 Fontes hyper eutectiques

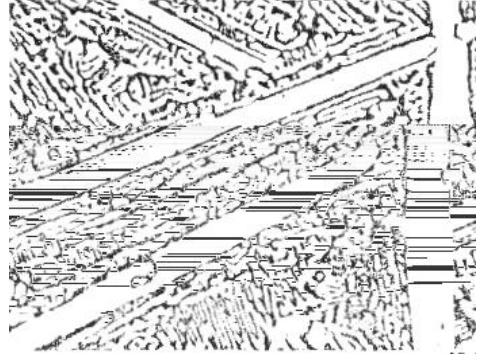
3.1.8.1 Fontes à 5,5% C :

Lors du refroidissement et lorsque le liquidus Cd est atteint, il y a précipitation de la cémentite primaire. Avec la diminution de la température, le reste du liquide devient pauvre en carbone et contient à $T = 1147^{\circ}\text{C}$, une teneur en carbone de 4,3 %, à cette température et concentration, il se solidifie eutectiquement en donnant du lédéburite. La structure, à la température ambiante, se compose de la cémentite primaire noyée dans le lédéburite (fig 28et29).



V =100:1
Fe +5,5 %C

Cristaux decémentite primaire (aiguilles) dans leledéburite.
(fig.28)



V =500:1
Fe +5,5 %C

(fig.29)

3.1.9 Détermination de la position des composants dans la structure

Non seulement, la quantité absolue de la ferrite et la cémentite joue un rôle important dans la détermination des propriétés de l'acier et de la fonte, mais aussi les différents constituants rentrant dans les différentes structures.

Connaissant la teneur en carbone d'un alliage, on peut facilement déterminer la quantité totale de la cémentite par la règle de trois, par exemple :

Une fonte à 2,5% C contient $25 / 6,67 \times 100\% = 37,5\%$, Et le reste $100\% - 37,5\% = 62,5\%$ de ferrite.

Il sera compliqué si on ne veut pas déterminer la quantité des phases, mais la quantité de chaque composant de la structure. Dans ce cas, l'utilisation de la loi de levier nous facilitera le calcul.

Selon le % du carbone (X % C), la ligne PS du diagramme est divisée en deux parties PX et XS, pour déterminer la portion de la ferrite et de la perlite, on utilise les deux équations:

(1) Portion de ferrite (%) x PX = portion de perlite (%) x SX.

(2) Portion de ferrite (%) + portion de perlite (%) = 100%.

Donc c'est un système d'équations à deux inconnues, par exemple pour déterminer la portion de la perlite on a :

$$\text{Portion de ferrite} = \frac{\text{Portion de perlite} \times SX}{PX}$$

$$\frac{\text{Portion de perlite} \times SX}{PX} + \text{Portion de perlite} = 100$$

$$\text{Portion de perlite} = \frac{PX \times 100}{PX + SX}$$

$$\text{Portion de ferrite} = \frac{SX \times 100}{PX + SX} = 100 - \text{portion de perlite}$$

A partir de la teneur de 0,8 % C, on utilise la ligne SK pour déterminer les leviers

correspondants. Si on considère dans cette ligne un alliage à x % C, on peut déterminer selon les deux équations ci-dessous, la quantité de la perlite et de la cémentite secondaire :

(3) Portion de la perlite % + Sx = portion de cémentite xkx.

(4) Portion de perlite % + portion de cémentite % = 100%.

Par exemple, pour déterminer le % de cémentite secondaire, on a :

$$\text{Portion de cémentite secondaire \%} = \frac{Sx \times 100}{Sx + kx}$$

$$\text{Et la portion de perlite} = \frac{kx \times 100}{Sx + kx}$$

Exemple1:

Combien de % de cémentite et de ferrite contient l'eutectoïde perlite

?Les leviers sont :

$$a = 0,8\% - 0,0 = 0,8$$

$$b = 6,7 - 0,8 = 5,9$$

$$\text{Masse de cémentite} = \frac{0,8}{5,9 + 0,8} \times 100\% = 12\%$$

$$\text{Masse de ferrite} = 100\% - 12\% = 88\%$$

Exemple2:

Combien de % contient l'eutecticum lédéburite, les composants, l'austénite et la cémentite?

$$a = 4,3 - 2,06 = 2,24$$

$$b = 6,67 - 4,3 = 2,37$$

$$\text{Masse de cémentite} = \frac{2,24}{2,24 + 2,37} \times 100\% = 48,6\%$$

$$\text{Masse de l'austénite} = 100\% - 48,6\% = 51,4\%$$

Exemple3:

Combien contient un acier à 0,35% C, de ferrite et de perlite ?

$$a = 0,35 - 0,0 = 0,35$$

$$b = 0,8 - 0,35 = 0,45$$

$$\text{Masse de ferrite} = \frac{0,45}{0,45 + 0,35} \times 100\% = 56\%$$

$$\text{Masse de la perlite} = 100\% - 56\% = 44\%$$

Exemple4:

Déterminer le % de la cémentite secondaire et de la perlite contenues dans un acier à 1,7%C.

$$a=1,7-0,8=0,9$$

$$b=6,7-1,7= 5$$

$$\text{Masse de la perlite} = \frac{5}{0,9+5} \times 100\% = 85\%$$

$$\text{Masse de la cémentite} = 100\% - 85\% = 15\%$$

Exemple 5:

Déterminer le % de l'austénite précipité, de la cémentite secondaire et du lédéburite d'une fonte à 2,5 % C.

A la température 1147°C, on a seulement la présence de l'austénite et du lédéburite, la portion de chaque composant est :

$$a = 2,5 - 2,06 = 0,44$$

$$b = 4,3 - 2,5 = 1,8$$

$$\text{Masse de l'austénite} = \frac{1,8}{1,8 + 0,44} \times 100\% = 80,5\%$$

$$\text{Masse du lédéburite} = \frac{0,44}{1,8 + 0,44} \times 100\% = 19,5\%$$

Mais les 80,5%, lors du refroidissement se cristallisent en donnant la cémentite secondaire et la perlite. La quantité de cémentite précipité à partir des 80,5 %, de l'austénite peut être calculée de la façon suivante:

100% d'austénite donne une quantité de 21,5 % de cémentite, comme il a été calculé dans l'exemple 4. Mais dans ce cas, on a seulement 80,5% d'austénite, donc on aura:

$$\frac{80,5}{100} \times 21,5 = 17,3\% \text{ de cémentite secondaire}$$

et $80,5 - 17,3 = 63,2\%$ d'austénite précipitée dans la perlite à la température 723°C. Donc une fonte à 2,5% C contient à la température ambiante, 19,5% de lédéburite.

63,2% d'austénite précipitée dans la perlite et 17,3 % de cémentite secondaire.

Exemple 6:

Déterminer le % de cémentite primaire et de lédéburite contenus dans une fonte avec 5,0% C.

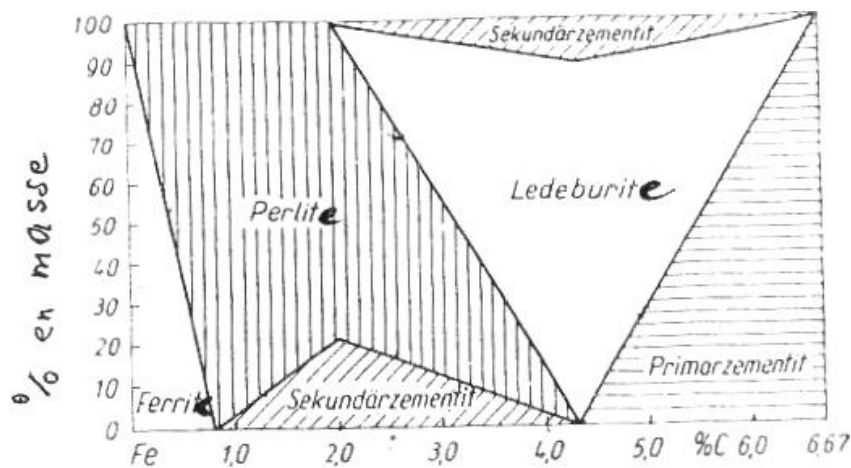
$$A = 5,0 - 4,3 = 0,7$$

$$B = 6,7 - 5,0 = 1,7$$

$$\text{Masse de l'édéburite} = \frac{1,7}{1,7+0,7} \times 100\% = 70,8\%$$

$$\text{Masse de la cémentite primaire} = 100\% - 70,8\% = 29,2\%$$

Une autre méthode, plus pratique, est utilisée pour déterminer les portions de chaque composant de la structure d'un alliage, elle est représentée par le diagramme de structure ou triangle de structure (fig.133).



Triangle des structure de l'alliage Fe-C

(fig.30)

Dans ce diagramme, les ordonnées expriment la portion en % des différents composants structuraux et l'abscisse, la teneur en carbone de l'alliage. A partir d'un tel diagramme, on peut lire directement les portions en % de chaque composant.

- 0% C correspond à 100% de ferrite.
- 0,8% C correspond à 100% de perlite.
- 4,3% C correspond à 100% de lédéburite.
- 6,67% C correspond à 100% de cémentite primaire.

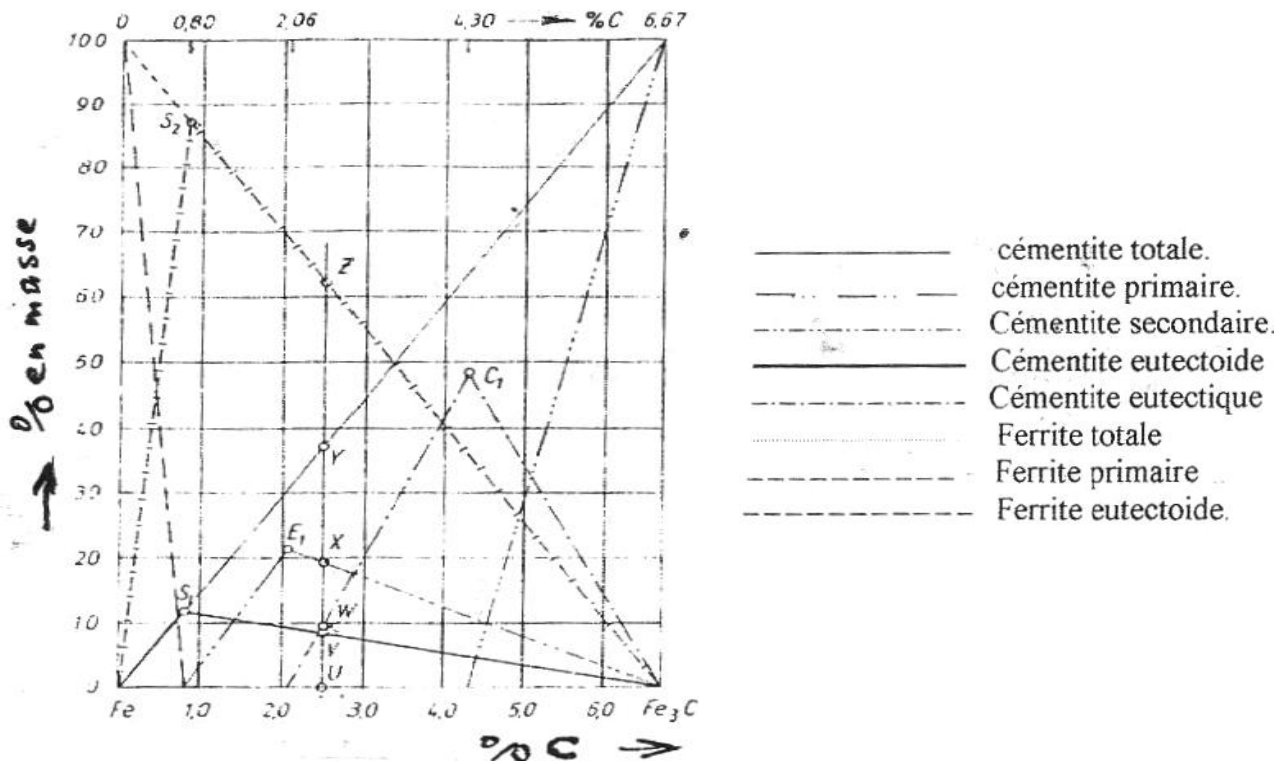
Par exemple, pour un acier à 0,6 % C, on peut lire directement : ferrite = 25 % et pour une fonte à 2,5 % C, on peut en déduire directement du diagramme 17 % de cémentite secondaire, 63 % de perlite et 20 % de lédéburite dans laquelle existe 2 % de cémentite secondaire.

Un autre diagramme très utilisé en pratique, est le diagramme de Uhlitzsch, amélioré par Sauer, (fig.31). Dans ce diagramme, les ordonnées expriment la portion en % des différents constituants structuraux et l'abscisse, la teneur en carbone (cémentite de l'alliage).

Seulement pour les points S_1 , S_2 , E, et C_1 , il est nécessaire d'utiliser la loi de levier afin de calculer la portion et la faire correspondre avec les points correspondant du diagramme. Par exemple, une fonte avec 2,5 % C, on trouve les portions suivantes :

- Ligne UV=8,5%=la cémentite contenue dans la perlite eutectoïde.

- Ligne UW=9.5% =cémentite contenue dans le lédéburite eutectique.
- Ligne UX=19%=cémentite secondaire à partir des cristaux mixtes .
- Ligne UN=37%=8,5+9,5 +19 =37%=cémentite totale.
- Ligne UZ= 63,0%= ferrite contenue dans la perlite eutectoïde.

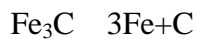


(fig.31)

- $S_1=12\%$ cémentite eutectoïde.
- $S_2=88\%$ ferrite eutectoïde.
- $E_1=21,5\%$ cémentite secondaire.
- $C_1=48,6\%$ cémentite eutectique.

Et pour un alliage avec 4,3% C, lequel se solidifie en eutectique pur, se compose de 4,5% de cémentite secondaire et de 48,5% de cémentite contenue dans le lédéburite. Donc la totalité de la cémentite sera : $4,5 + 111 + 48,5 = 64 \%$, et le reste, c'est à dire 36 % de ferrite eutectoïde.

Pour des teneurs élevées en carbone, la cémentite n'est pas stable et se décompose surtout pour des refroidissements très lents.



Le graphite se précipite suivant la ligne C'D' (voir diagramme Fe-C), est appelé graphite moussieux, car suite à sa faible densité relative à celle du fer, il y a ségrégation et forme à la surface du bain une masse mousseuse.

Dans la structure, il est très rare de trouver le graphite primaire. Le graphite forme avec les cristaux mixtes pour 4,25 % C à $T = 1153^{\circ}\text{C}$, l'eutectique graphite-austénite, à cet effet, la ligne de solubilité IE des cristaux mixtes, elle n'est pas coupée par l'eutecticale à 2,06 %C, mais presque à 2,03 % C, au point E', la ligne ES est déplacée vers des teneurs en carbone plus basses, jusqu'à E'S' et la ligne PSK vers des températures plus élevées P'S'K' (738°C au lieu de 723°C).

Les alliages qui se solidifient selon le diagramme Fe-C stable (en pointillés), contiennent dans leur structure l'eutectique ferrite-graphite ou les cristaux primaires de ferrite (formés à partir de l'austénite) ou encore les cristaux de graphite emmagasinés dans l'eutectique ferrite-graphite.

Les alliages se solidifient suivant le système méta stable Fe-Fe₃C, peuvent être transformés en système stable Fe-C, par l'intermédiaire d'un recuit, où la décomposition de la cémentite commence à T = 500°C, mais cela peut conduire à des difficultés lors de l'utilisation des fontes à des températures élevées, car la quantité du fer et du carbone obtenue après décomposition de la cémentite occupe un volume plus important que celui occupé par la cémentite primitive.

Ce phénomène est appelé "croissance de la fonte" et il est désagréable pour les pièces en fonte travaillant en température élevée, tels que, par exemple, les segments de piston.

Mais d'un autre côté, on utilise le phénomène de décomposition de la cémentite comme moyen pur obtenir une fonte, possédant une bonne coulabilité, ductile mais fragile, qui est la fonte malléable.

3.1.10 Diagramme d'équilibre fer-graphite

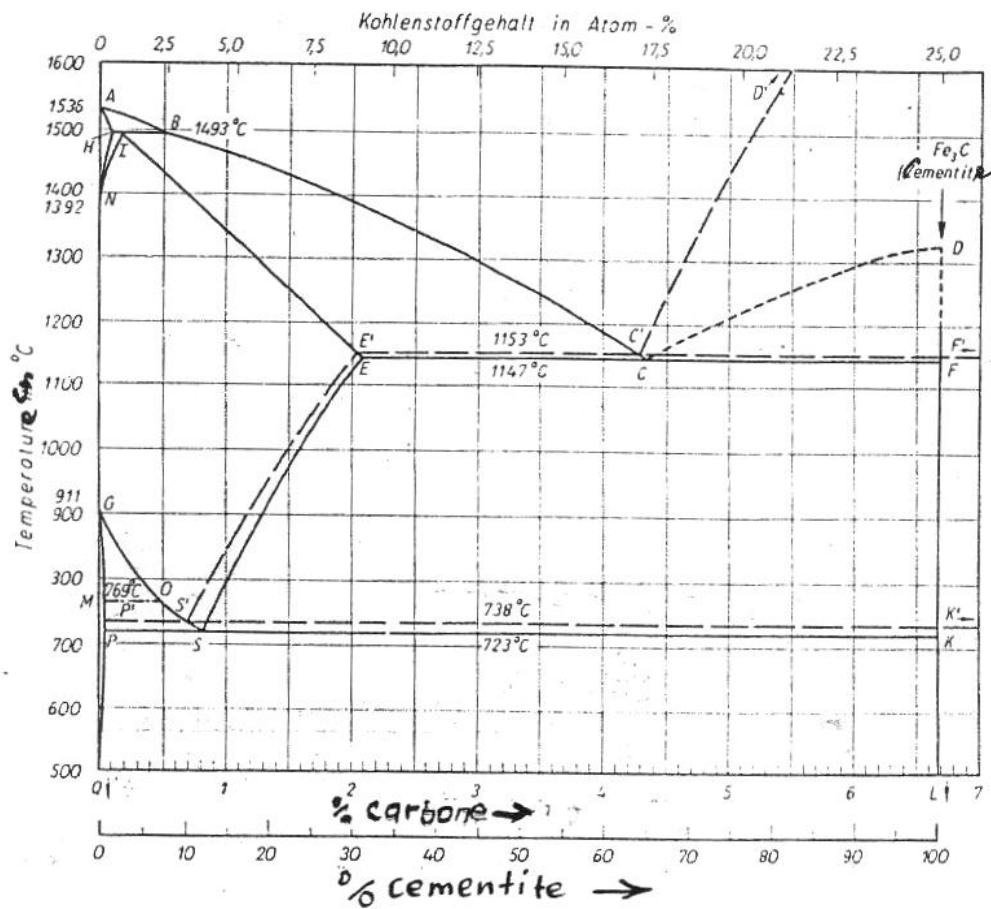
La formation d'une phase stable de graphite dans la fonte, peut se produire soit par précipitation immédiate de graphite à partir de la solution liquide (solide), soit par décomposition de la cémentite déjà formée. Le processus de formation du graphite dans la fonte s'appelle graphitisation.

Sur le diagramme représenté sur la figure 32, les traits en pointillés correspondent au diagramme Fer- graphite (système stable). Dans le système stable, le graphite primaire se cristallise suivant les températures correspondants à la ligne E'C'F' (1153°C), la ligne E'S' délimite la domaine de la précipitation du graphite secondaire et la ligne S'K' (738°C) du graphite eutectoïde.

Si lors d'une cristallisation eutectique:

- Il n'y a que le graphite qui se dégage, la fonte obtenue est dite fonte grise.
- Si la précipitation s'accompagne de cémentite, la fonte s'appelle fonte traitée.
- Si la cémentite est seule à se dégager, la fonte est dite blanche.

La probabilité de l'apparition dans la phase liquide (austénite) de la cémentite contenant 6,67% C est nettement plus grande que celle de la formation du graphite composé d'atomes de carbone. La formation du graphite à partir de la phase liquide, n'est possible qu'à très faible vitesse de refroidissement.



(fig.32)

Lorsque le degré de surfusion n'est pas très grand, un refroidissement accéléré inhibe partiellement ou complètement la précipitation du graphite et contribue à la formation de la cémentite. La surfusion de la fonte liquide au dessous de 1147°C conduit à la formation de la cémentite.

Les inclusions tels que SiO₂, Al₂O₃, graphite contenus dans une fonte liquide, jouent le rôle d'un support tout prêt et rendent plus facile la formation et le développement des germes de graphite.

Si lors d'une cristallisation eutectique, il n'y a que le graphite qui se dégage, la fonte s'appelle "fonte grise", si la précipitation du graphite s'accompagne de celle de la cémentite, la fonte s'appelle "fonte truitée" et enfin, s'il n'y a que la cémentite qui se dégage, la fonte s'appelle "fonte blanche".

En présence des germes de graphite déjà existants, le dépôt du graphite peut avoir lieu aux

températures inférieures à 1147°C. Ce dépôt est également favorisé par l'addition de silicium qui contribue à la graphitisation. Pour accélérer la graphitisation, à partir de la phase liquide, on introduit intentionnellement dans la fonte ce qu'on appelle les inoculants qui forment les couches de cristallisation supplémentaire. Le graphite précipité par la phase liquide se développe à partir d'un seul centre et se ramifie dans toutes les directions.

Lorsque la cristallisation s'accompagne de la formation de la cémentite (primaire ou eutectique), certaines conditions sont susceptibles de déclencher sa décomposition en précipitant l'austénite et le graphite. Un refroidissement lent rend thermodynamiquement possible le dépôt de graphite à partir de l'austénite et la formation entre 727°C et 738°C du graphite eutectoïde. Dans les fontes grises, la quasi totalité du graphite se forme pendant la cristallisation à partir de la phase liquide.

La graphitisation se produit également dans une fonte dont le carbone de cémentite, qui subit un chauffage prolongé à des températures élevées. A la température inférieure à 738°C, cette graphitisation consiste en une décomposition de la cémentite en graphite et en ferrite et aux températures plus élevées en graphite et austénite.

Les éléments graphitisants sont : Si, C, Al, Cu, Ni et Zr. Ils favorisent la formation des premiers germes servant de supports de croissance pour le graphite. Parmi ces éléments, le plus important est le silicium.

3.1.11 Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2 % (<< 2%), outre le fer et le carbone qui sont les éléments essentiels rentrant dans leur composition, les aciers se composent de plusieurs autres inclusions ou impuretés constantes ou inévitables telles que Mn, Si, P, O, N, H, etc., qui influent sur leurs propriétés. La présence de ces inclusions s'explique soit par:

- La difficulté de l'élimination de certaines d'entre elles lors de l'élaboration(S,P).
- Leurs passages dans l'acier lors de l'opération de dés oxydation (Mn,Si).
- L'addition en vue d'améliorer les propriétés de l'acier (Cr,Ni,Mo,etc.)

Les fontes contiennent ces mêmes inclusions ou impuretés mais en teneurs plus grandes.

L'influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier peut être divisée en deux groupes les éléments chimiques constants et les éléments d'alliages.

3.1.12 Influence des éléments chimiques constants

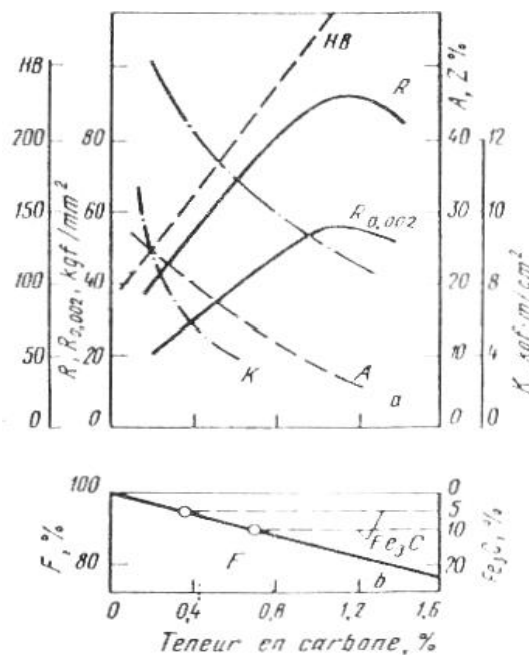
La fragilité et la plasticité sont les propriétés essentielles de l'acier, le même métal peut être ductile ou fragile selon :

- La composition chimique.
- L'état de surface.
- La température.

Parmi les éléments chimiques, généralement contenus dans les aciers ordinaires, on peut citer : C, Si, Mn, P, S, N₂, O₂, H₂.

3.1.12.1 Le carbone:

Après refroidissement lent, la structure d'un acier se compose de la ferrite et de la Cémentite (deux phases). La quantité de cémentite est directement proportionnelle à la teneur en carbone, (fig 33).



Influence du carbone:

a- sur les propriétés mécaniques de l'acier,

b-sur le nombre de phases présentes dans l'acier.

(fig.33)

La ferrite, une fois associée à la cémentite, donne la perlite. Le carbone est un élément qui a une grande influence sur les propriétés de l'acier. L'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience.

Notons toute fois que la résistance commence à chuter à partir de 1,2%C(fig.33).

Les propriétés physiques changent aussi et on observe:

- La diminution de la densité, de la conductibilité thermique, de l'induction rémanente et de la permittivité.
- L'augmentation de la résistivité électrique et de la force coercitive.

L'influence la plus importante du carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier est surtout du eau fait que, par trempe on obtient un constituant très dur, appelé la martensite.

3.1.12.2 Le silicium:

La teneur du silicium dans l'acier varie de 0,05 à 0,3 %, il existe surtout à l'état de solution ferrite. Son influence n'est pas très importante sur les propriétés de l'acier, mais rend toute fois, l'acier plus homogène à la coulée, en s'opposant, grâce à son pouvoir réducteur à la formation de soufflures, l'un des défauts les plus fréquents qu'on rencontre après solidification de l'acier. Sa présence en grande quantité permet une bonne désoxydation de l'acier.

Le manganèse:

Le manganèse existe en solution dans la ferrite sous forme de MnS et surtout sous forme de carbure Mn_3C associé à la cémentite Fe_3C . Sa teneur dans l'acier varie de 0,2 à 0,8 %. La présence du manganèse dans l'acier est très souhaitée, car d'une part, il augmente la dureté de l'acier et sa trempabilité, et d'autre part, il joue le rôle d'antidote du soufre, car le soufre est moins nocif dans la mesure où il se trouve sous forme de MnS et non sous forme de FeS ou de soufre libre.

3.1.12.3 Le phosphore:

Il existe en solution dans la ferrite et provoque un grossissement du grain, ce qui augmente la

fragilité de l'acier à froid. En se ségréguant facilement, il contribue à l'hétérogénéité de l'acier. Sa teneur doit être limitée de 0,025 à 0,040 %. Le phosphore augmente la limite élastique et la charge de rupture tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité.

3.1.12.4 Le soufre:

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A Froid, le soufre amène également une diminution importante de la résistance. La teneur limite en soufre doit être inférieure à (0,035 à 0,060%), généralement inférieure à ¼ de la teneur en manganèse. Parfois, on utilise des aciers de décolletage riches en soufre (0,015 à 0,025%), afin de faciliter la fragmentation des copeaux. Un minimum de soufre (0,02%), est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité.

3.1.12.5 Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène :

L'azote et l'oxygène sont contenus dans un acier sous forme d'inclusions non métalliques fragiles tels que FeO, SiO₂, Al₂O₃ (oxydes) et Fe₄N (nitrures), de solution solide ou à l'état libre dans les volumes défectueux du métal (retassures, criques, etc.). Les inclusions d'insertion (azote, oxygène), en se concentrant aux joints de grains, forment le long de ces joints, des nitrures et des oxydes, en élevant ainsi le seuil de fragilité à froid et en altérant la résistance à la rupture pour devenir fragile. Les inclusions non métalliques (oxydes, nitrures, scories), étant des concentrateurs de contraintes, sont susceptibles de réduire sensiblement, si leur quantité est importante ou s'ils s'accumulent en agrégats, la limite de fatigue et la résilience.

L'hydrogène dissout dans l'acier est un élément très nocif, qui exerce une forte action fragilisante. Absorbé pendant la fusion, l'hydrogène, non seulement rend l'acier plus fragile, mais détermine dans les laminés et les grosses pièces de forge, la formation des flocons. Les flocons sont des criques très fins et d'une forme ovale ou arrondie, qui apparaissent dans une cassure sous la forme de tache sou flocons argentés. Il s'altère brusquement les propriétés de l'acier. Leur présence rend le métal inutilisable dans l'industrie. La fragilisation par H₂s'observe souvent, lors du soudage. L'hydrogène est alors une source de criques à froid dans le métal d'apport et de base. La coulée et la fusion sous vide, diminuent sensiblement la teneur en H₂ dans l'acier.

3.1.13 Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier

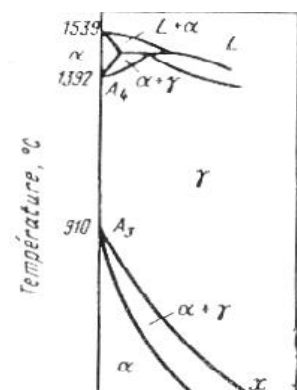
L'addition des éléments d'alliages peut donner lieu à:

- La formation des solutions solides dans le fer.
- La dissolution de ces éléments dans la cémentite, en remplaçant dans son réseau, les atomes de fer ou à la formation des carbures particuliers.
- La production (lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée), des composés intermétalliques avec le fer.

Les éléments d'alliages ont une influence sur les transformations allotropiques du fer. Tous ces éléments, à l'exception de C, N, H et en partie du bore, formant avec le fer des solutions solides de substitution. Leur dissolution dans le fer, influe fortement sur les positions des points $A_4(1392^\circ\text{C})$ et $A_3(910^\circ\text{C})$, qui déterminent le domaine des températures d'existence du fer et . L'action exercée par les éléments d'alliages sur les variétés allotropiques du fer permet de les classer en deux groupes.

3.1.13.1 Eléments gammagènes:

Comme le Ni et le Mn, ces éléments abaissent le point A_3 et élèvent le point A_4 , ce qui donne une extension du domaine de la phase γ et une réduction du domaine de la phase α . La figure 34 montre l'addition de ces éléments qui fait monter le point A_4 jusqu'à la ligne solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage, le point A_3 descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation réciproque en α et en γ . Les alliages de ce type sont dit austénitiques. Les alliages qui ne subissent que partiellement la transformation en α , s'appellent demi-austénitiques.

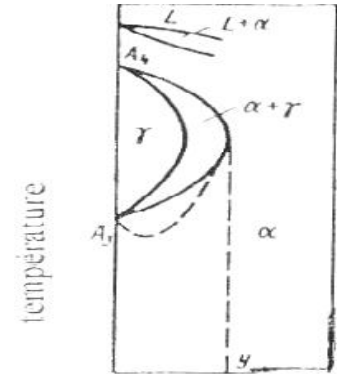


Teneur en éléments d'alliages.

(fig.34)

3.1.13.2 *Eléments alphagènes:*

Ce sont les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si, ..., ces éléments abaissent le point A_4 , et élèvent le point A_3 . Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliages, les lignes de transformation A_3 et A_4 , se rencontrent et le domaine de la phase γ se trouve complètement fermé, c'est à dire, il y a extension du domaine de la phase (ferritique) et un rétrécissement du domaine (eutenitique), (fig.35). Les alliages de ce types ont dit "ferritiques". Lorsque la transformation en α ne se produit que partiellement, les alliages s'appellent demi-ferritiques.



Teneur en elements d'alliages.

(fig.35)

Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur l'influence des principaux éléments d'alliage sur les différentes propriétés des aciers.

Eléments	Déplacement du point S (eutectïde)	Déplacement des points de transformation	Formation de carbures	Affinage de grains	Augmente (+)	Diminue (-)
S	-	-	Non	-	Usinabilité, Fragilité à chaud	Fluidité
P	-	-	-	Non	Résistance à la corrosion, résistance à chaud, fragilité à froid	Allongement, résistance aux chocs
Si	-	↑	Non	Non	Grossissement du grain, résistance chimique d'aciers réfractaires, trempabilité, désoxydation	Solubilité du carbone, soudabilité, vitesse critique de trempe (Vcr)
Mn	←	↓	Oui	-	Résistance aux chocs, à l'usure, à la traction, trempabilité, désoxydation	Usinabilité, température de transformation, Vcr de trempe
Ni	←	↓	-	Oui	Résistance à la fatigue, à la corrosion, résilience, trempabilité	Vitesse de grossissement du grain, risque de surchauffe, Vcr de trempe
Cr	←	↑	Oui	-	Résistance à la traction, à la corrosion et à l'usure, capacité de coupe, pénétration de trempe	Déformation, Vcr de trempe
Mo	←	↑	Oui	-	Résistance à la traction et à la fatigue, dureté, trempabilité	Allongement, forgeabilité
W	←	↑	Oui	Oui	Résistance à l'usure, dureté, capacité de coupe	

Tableau 7 : l'influence des principaux éléments d'alliage sur les différentes propriétés des aciers.

3.1.14 Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de la fonte

La fonte liquide comporte des inclusions variées. Quelques unes sont souvent introduites intentionnellement. Outre leurs caractères alphas ou gammagènes et leurs actions sur la trempabilité, valables pour tous les alliages ferreux, les éléments introduits dans les fontes sont caractérisés par leurs actions:

- Graphitisantes (Si,C,Al,Cu,Ni,Zr,...) qui se traduisent par la création de germes servant de supports de croissance pour le graphite.
- Antigrahitisantes (Cr,Mo, Mn,S,V, W,B,...).

Nous donnons quelques indications spécifiques des principaux éléments contenus dans les fontes.

a. Cuivre et nickel : Eléments graphitisants qui contribuent fortement à l'affinement de la perlite par leur action gammagène. En outre, le cuivre est fortement antiferritisant, alors que le nickel est sans effet. L'introduction dans la fonte de ces deux éléments, entraîne une augmentation de la résistance et de la dureté.

b. Silicium : Elément graphitisant de base dans les fontes grises ($\% > 3$), ce qui diminue la solubilité du carbone à l'état liquide dans l'eutectique et à l'état solide dans l'austénite. Il augmente la réfractarité des fontes et de leur tenue à certaines corrosions.

c. Chrome: Elément antigrahitisant qui stabilise les carbures en retardant leur décomposition thermique ainsi que l'oxydation interne, et de ce fait améliore la tenue au chaud.

d. Manganèse : Il empêche la graphitisation et renforce les liaisons atomiques entre le fer et le carbone dans la cémentite.

e. molybdène : Il est surtout utilisé pour son importante action sur le 'nez perlitique' des courbes T.T.T, il améliore considérablement la résistance au choc thermique.

f. Soufre : Il est un élément nuisible qui dégrade les propriétés mécaniques de la fonte. Il abaisse la coulabilité et contribue à la formation de souillures dans les pièces moulées.

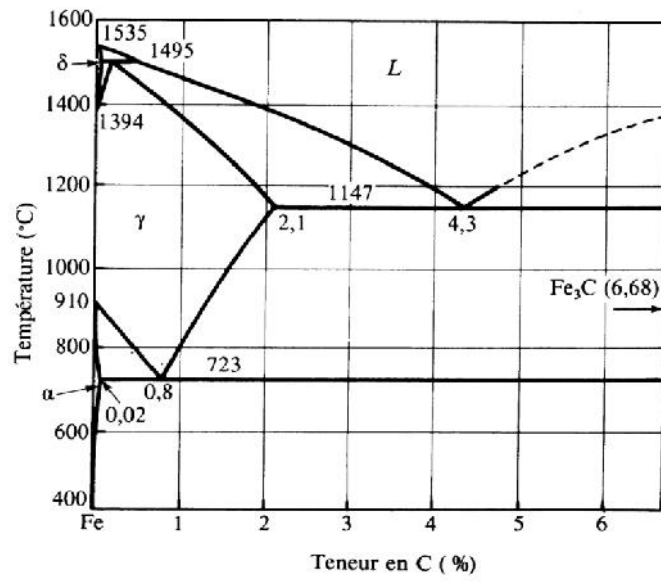
Exercice

Exo.1 : Considérez un acier contenant 0,6 %m. de carbone et qui se solidifie à l'équilibre. Répondez aux questions suivantes en utilisant le diagramme Fe – C (fig. 1)

- a) Quel est le type de cet acier ?
- b) Quel est l'intervalle de solidification (en °C) de cet acier ?
- c) À quelle température apparaît la ferrite au cours du refroidissement ?
- d) À 722 °C, quelles sont les phases de cet acier, leur composition et leur proportion ?
- e) À 722 °C, quels sont les constituants de cet acier, leur composition et leur proportion ?

Exo.2 : Considérez une fonte blanche contenant 3 %m. de carbone et qui se solidifie à l'équilibre. Répondez aux questions suivantes en utilisant le diagramme Fe – C (fig. 1)

- a) Quelle est la température de début de solidification de cette fonte ?
- b) Quelle est la première phase solide qui apparaît à cette température ?
- c) Quelle est la température de fin de solidification de cette fonte ?
- d) À 1148 °C, quelles sont les phases en présence, leur composition et leur proportion ?
- e) À 722 °C, quels sont les constituants de cette fonte, leur composition et leur proportion ?

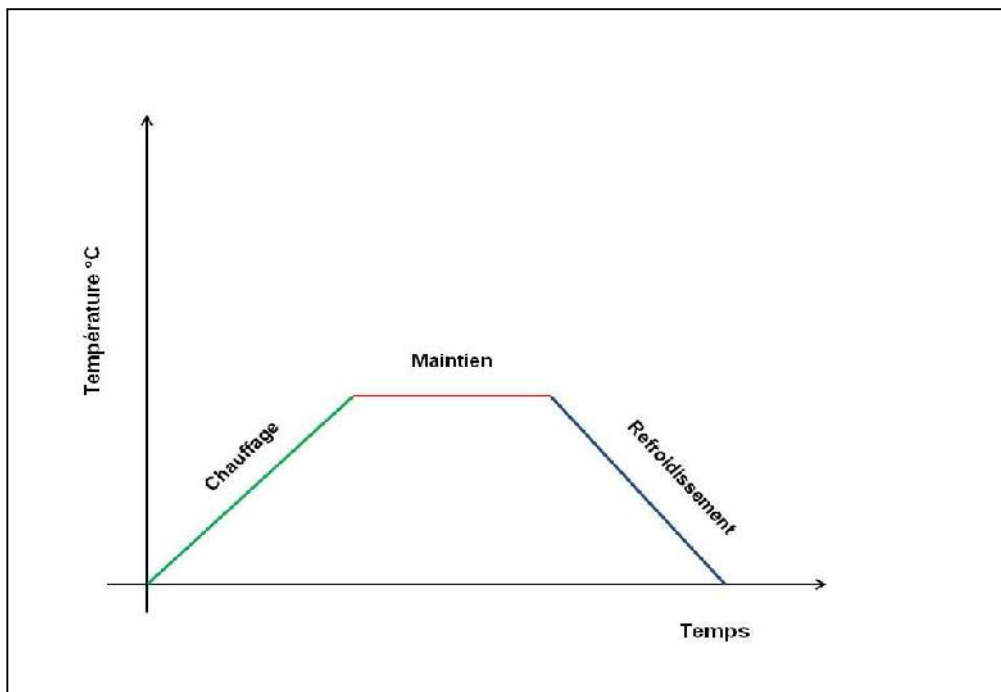


4 Chapitre 4 : Traitement thermique

4.1 L'univers des traitements thermiques

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée *cycle thermique* (*chauffage, maintien et refroidissement*).

Figure1–Le cycle thermique



Les effets des traitements thermiques, pour une pièce, dépendent:

- De la température maximale;
- De la durée de maintien de la pièce à cette température;
- Du milieu dans lequel se trouve la pièce à cette température;

- De la vitesse de variation de la température lors du chauffage et surtout lors du refroidissement;
- Des dimensions de la pièce à traiter (effet de masse).

Dans l'industrie, les traitements thermiques sont définis et encadrés par différentes associations. Ils en existent plusieurs dont voici les principales utilisées en Amérique du Nord.

- ASTM(American Society for Testing and Materials);
- AISI(American Iron Steel Institute);
- SAE(Society of Automotive Engineer);
- AWS(American Welding Society);
- API(American Petroleum Institute);
- ASME(American Society Mechanical Engineer);
- UNS(Système unifié SAE, AISI et ASTM);
- CSA(W59,W59.2, W186,etc.).

Ces associations permettent d'encadrer et d'obtenir les différentes recettes de traitement thermique visant à atteindre les propriétés désirées.

Avant d'aller plus loin, voici un petit lexique français-anglais des principaux concepts utilisés dans l'univers des traitements thermiques.

Tableau1– Petit lexique français-anglais des concepts utilisés en traitement thermique

Terminologie française	Terminologie anglaise
Traitement thermique	Heat treatment
Cycle thermique	Thermal cycle
Traitement d'homogénéisation	Homogenizing anneal
Mise en solution	Solution heat treatment
Recuit	Anneal
Recuit de détente	Stress reliefanneal
Traitement de normalisation	Normalizing
Recuit de regeneration (affinage)	Grain refining
Recuit d'adoucissement	Softening
Austénisation	Austenizing
Malléabilisation	Malleablizing
Trempe	Quench/Hardening
Trempebainitique	Austempering
Trempe martensitique	Martempering
Revenu	Tempering
Vieillissement	Ageing

Cela dit, il existe une multitude de traitements thermiques spécifiques aux différents alliages. L'influence et la nature des traitements thermiques sont très différentes pour les alliages ferreux et pour les alliages non ferreux. Pour cette raison, nous les abordons séparément. Pour des raisons similaires, nous traitons de manière distincte tout ce qui entoure la question des traitements thermo-chimiques. Ainsi, le chapitre 2 s'intéresse principalement aux traitements thermiques liés à l'acier alors que le chapitre 3 s'intéresse aux traitements thermo-chimiques exécutés sur ce même matériau. Le chapitre 4 se rapporte aux traitements thermiques relatifs à la fonte tandis que le chapitre 5 jette un éclairage sur ceux concernant l'aluminium.

4.2 Les traitements thermiques de l'acier

Nous présentons dans cette section les principaux types de traitements thermiques liés à l'acier offerts sur le marché. Ceux-ci sont exposés sous forme de fiches signalétiques dans les quelles on retrouve de l'information sur le but du traitement, sur le champ d'application, le cycle thermique et les technologies de chauffe qui y sont associés.

4.2.1 Les recuits

Les **recuits** («*annealing*») consistent en un traitement thermique visant l'obtention d'états proches de l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire la restauration des propriétés originales du matériau. Ce procédé se déroule dans une atmosphère protégée pour prévenir l'oxydation de la surface métallique. Par exemple, quand on fabrique des carrosseries d'automobile, une tôle obtenue par laminage à froid sera trop résistante et pas assez ductile pour pouvoir être emboutie. Dans un tel procédé de fabrication, les déformations plastiques peuvent atteindre 50%. Si une tôle laminée à froid était utilisée pour l'emboutissage, il y aurait des risques de déchirure des tôles et la capacité des presses d'emboutissage devrait être doublée ou triplée.

Le recuit a donc pour but, séparément ou simultanément:

- De supprimer les effets sur la structure:
 - De la solidification;
 - d'une déformation plastique;
 - d'une soudure;
 - d'un traitement thermique antérieur.
- De mettre le métal dans un état adouci défini ou de le faire tendre vers un état si la structure a été perturbée par des traitements antérieurs;
- De provoquer la formation de structures favorables à l'usinage ou à la déformation à froid;
- De provoquer la formation d'une structure déterminée en vue, par exemple, de réaliser un traitement thermique ultérieur;
- d'éliminer ou de réduire les contraintes internes de la pièce;
- d'atténuer l'hétérogénéité de la composition chimique.

Le recuit comporte un chauffage et un maintien à une température égale ou supérieur à Ac1, suivi d'un refroidissement généralement lent. Cela dit, on distingue divers types de recuits, soit des recuits d'homogénéisation, de régénération, d'adoucissement, de détente, de sphéroïdisation, de normalisation, de recuit total, etc.

4.2.1.1 Le recuit d'homogénéisation

RECUIT D'HOMOGENÉISATION

But du traitement:

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de fonderie pour lesquels le refroidissement a entraîné une mauvaise répartition des constituants (hétérogénéité). Il a pour but de réduire cette hétérogénéité.

En fait, ce traitement vise à la fois une composition chimique homogène et adoucissement du matériel, par chauffe et retenue prolongée à température élevée.

Champ d'application:

Aciers bruts decoulée;

Aciers moulés.

Cycle thermique:

A B:Chauffage;

B C : Maintien pendant plusieurs heures à une température élevée, soit de 1000 °C à 1200 °C
=domaine austénitique;

C D:Refroidissementlent.

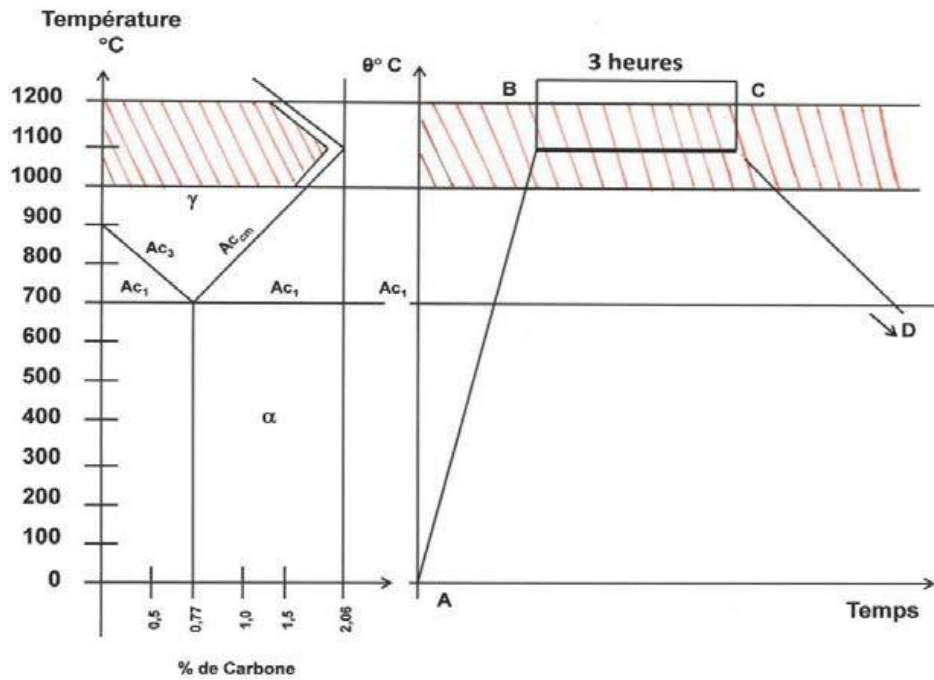


Figure 2 : Cycle thermique

Technologies de chauffe:

Four à l'air;

Four sous

vide;

Four à atmosphère contrôlée;

Four à bain de sel.

4.2.1.2 *Le recuit de régénération*

RECUIT DE RÉGÉNÉRATION (ou d’AFFINAGE STRUCTURALE)

But du traitement:

Le maintien prolongé de l’acier à une température supérieure à Ac_3^4 (domaine austénitique) favorise le grossissement des grains d’austénite. Lors du refroidissement, de gros grains de perlite apparaissent. Le métal dit «surchauffé» présente alors une certaine fragilité. Le recuit de régénération a pour but d’affiner ce grain et de rendre à l’acier sa structure fine.

Champ d’application:

- Pièces forgées à haute température;
- Aciers moulés; pièces avec des soudures.

Cycle thermique:

- A B:** Chauffage rapide avec fragmentation des grains;
- B C:** Maintien à une température Ac_3 , le temps nécessaire pour permettre une uniformisation de la température (durée variant selon les dimensions de la pièce), entre $750^\circ C$ à $950^\circ C$;
- C D:** Refroidissement lent à l’air.

Technologies de chauffe:

Four à l'air;

Four sous

vide;

Four à atmosphère contrôlée;

Four à bain de sel.

4.2.1.3 Le recuit d'adoucissement

RECUIT D'ADOUCCISEMENT

But du traitement:

Le recuit d'adoucissement s'effectue sur les pièces trempées ans le but de faire disparaître les effets de la trempe. Il permet par la suite un usinage plus facile. Une méthode particulière d'adoucissement consiste à utiliser un cycle thermique permettant de «sphéroïdiser» ou «globulariser» la perlite, en chauffant l'acier et en le laissant refroidir tout juste au-dessous et autour du quel on fait intervenir de faibles variations de température pour faciliter la formation de petites sphérules de carbure de fer, dans une matrice perlitique.

Champ d'application:

Aciers au carbone; Aciers alliés.

Cycle thermique:

A B:Chauffage;

B C:Maintien à une température A_{c3} , pendant une courte durée (minimum 15 minutes pour les petites pièces);

C D:Refroidissement très lent (à l'air, au four ou dans une matière isolante: cendres, sable, chaux).

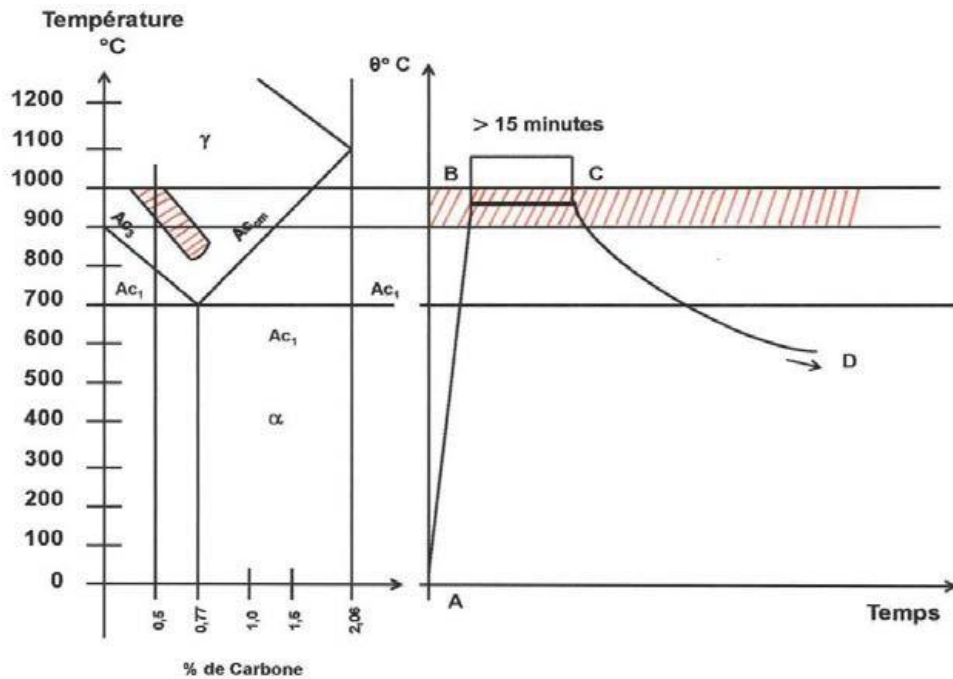


Figure 3 : Cycle thermique

Technologies de chauffe:

Four à l'air;

Four sous

vide;

Four à atmosphère contrôlée;

Four à bain de sel.

4.2.1.4 Le recuit de sphéroïdisation

RECUIT DE SPHÉROÏDISATION (ou de COALESCENCE ou de GLOBULISATION)

But du traitement:

Ce recuit consiste, après chauffage à une température légèrement inférieure à Ac_1 , à maintenir l'acier à cette température pendant un temps plus ou moins long, puis à le refroidir lentement, de façon qu'il soit dans un état aussi doux que possible et exempt de contraintes. Il s'agit également d'un recuit permettant de faire évoluer la forme géométrique des carbures, telles que les lamelles de cémentite, vers la forme sphérique stable. Il sert également à améliorer la capacité de déformation à froid du matériau traité.

Champ d'application:

Aciers à haute teneur en carbone;

Acier hyper eutectoïde; Aciers alliés.

Cycle thermique:

A B : Chauffage;

B C: Maintien pendant de 2 à 3 heures à une température comprise entre 700° C et 730° C, autour de Ac_1^5 ;

C D: Refroidissement très lent dans le four.

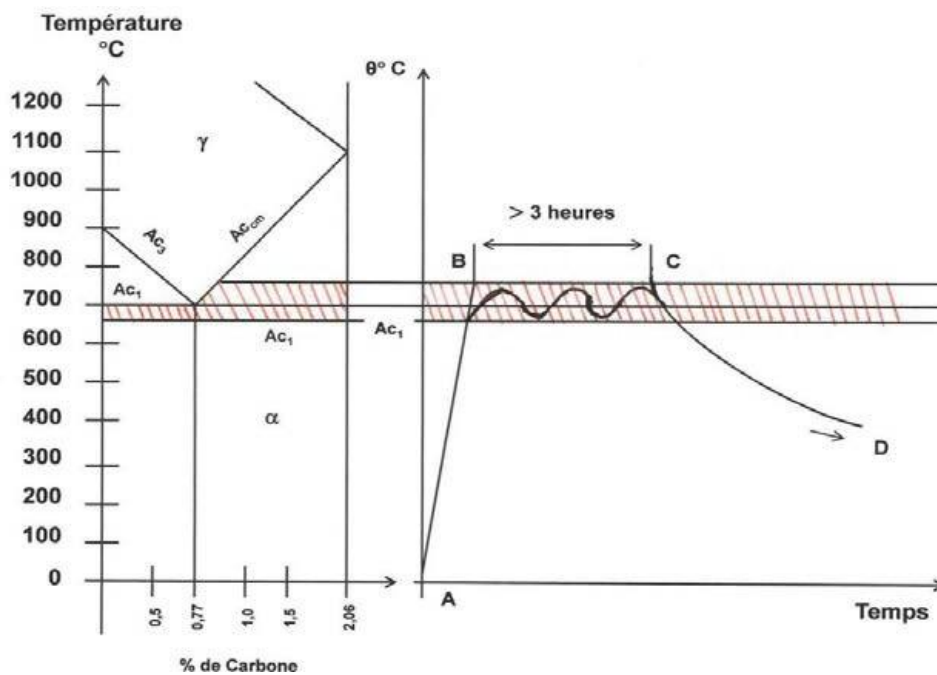


Figure 4 : Le cycle thermique

Technologies de chauffe:

Four à l'air;

Four sous

vide;

Four à atmosphère contrôlée;

Four à bain de sel.

4.2.1.5 *Le recuit complet*

RECUIT COMPLET (ou TOTAL)

But du traitement:

Le recuit complet est un traitement qui annule tous les traitements précédents. Bien que semblable au recuit de normalisation, le refroidissement se fait toutefois de manière contrôlée au four car selon la nuance d'acier traitée et l'épaisseur, il se peut que le refroidissement à l'air calme suffise à tremper la pièce ou à donner une structure qui rend l'acier non apte à l'usinage. Les températures et les temps de traitement sont sensiblement les mêmes que pour le recuit de normalisation avec un maintien d'une minute par millimètre d'épaisseur de la pièce. Ce recuit permet de détruire partiellement ou totalement l'effet d'écrouissage que le métal a subi préalablement.

4.2.1.6 *Les traitements genre recuit*

Les traitements qui suivent ne peuvent pas être considérés comme recuits parce que:

- La température de chauffage est inférieure à Ac_1 (recristallisation, restauration et relaxation) ou;
- La température est non stabilisée lors de la période de maintien qui est très courte (traitement de normalisation).

4.2.1.7 *Le recuit de normalisation*

RECUIT DE NORMALISATION

But du traitement:

Le recuit de normalisation consiste en un traitement thermique des aciers faiblement alliés comportant une austénitisation suivie d'un refroidissement à l'air calme, permettant en particulier d'affiner le grain. Ce traitement comme le recuit complet conduit à des structures ferrite-perlite. Cependant la température de maintien est plus élevée. En outre le refroidissement à l'air calme utilisé est plus rapide que dans le cas du recuit complet. Les

structures ferrito-perlitique obtenues correspondent donc à des grains ferritiques fins et à de faibles espacements lamellaires dans la perlite. Ces microstructures très homogènes peuvent être recherchées dans certaines applications mécaniques et constituent un état initial pour le traitement d'austénitisation avant trempe.

Champ d'application:

Aciers à haute teneur en carbone; Acier hyper eutectoïde; Aciers alliés.

Cycle thermique:

A B : Chauffage;

B C: Maintien pendant de 2 à 3 heures à une température comprise entre 700°C et 1200°C;

C D: Refroidissement lent à l'air.

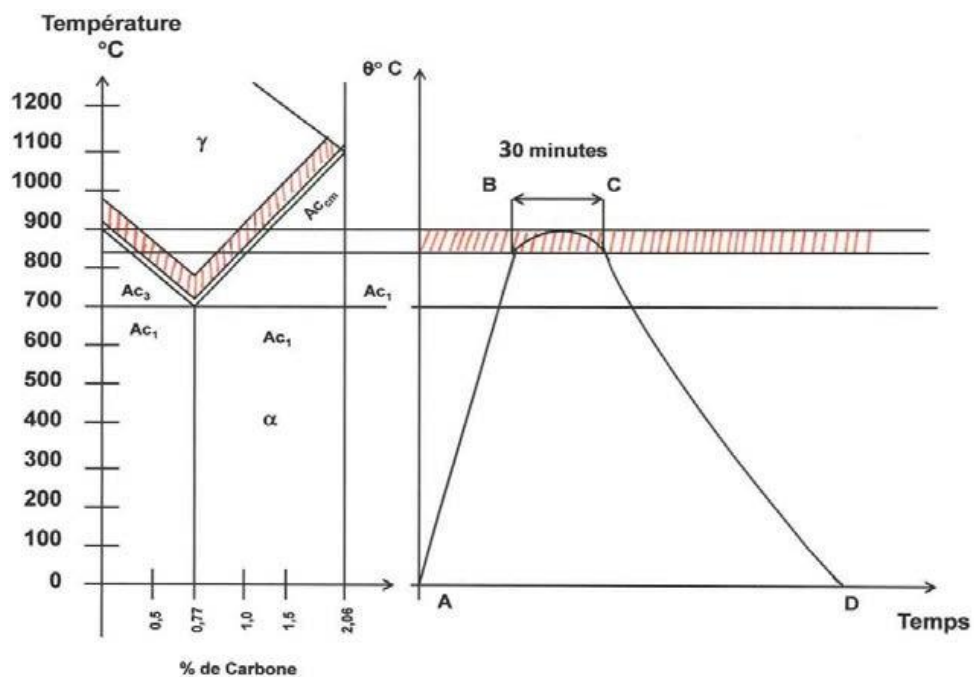


Figure 5 : Le cycle thermique

Technologies de chauffe:

Four à l'air;

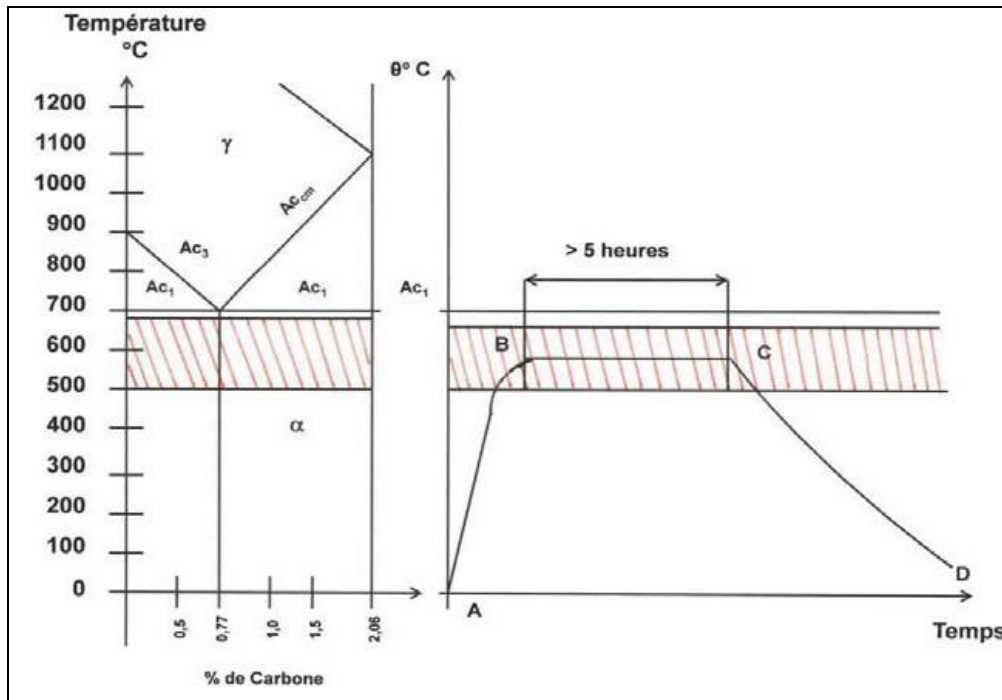
Four sous

vide;

Four à atmosphère contrôlée;

4.2.1.8 *Le recuit de recristallisation*

RECUIT DE RECRISTALLISATION
<p>But du traitement:</p> <p>C'est un recuit destiné à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin, après un recuit de stabilisation. On l'utilise également pour régulariser les effets des contraintes provoquées par la déformation à froid à une température inférieure, les parties extérieures des pièces ainsi façonnées étant plus écrouies qu'à cœur. Dans ce cas, la structure cristalline du métal a été d'autant plus modifiée que les contraintes de déformation ont été plus importantes. Ce traitement est absolument nécessaire entre chaque opération de déformation importante. La recristallisation s'accompagne généralement d'une réduction de la résistance et de la dureté d'un matériau, ainsi qu'une augmentation simultanée de la ductilité.</p>
<p>Champ d'application:</p> <p>Pièces estampées dans un acier laminé à froid;</p> <p>Pièces forgées pour faciliter les opérations ultérieures (rectification ou formage à froid).</p>
<p>Cycle thermique:</p> <p>A B: Chauffage;</p> <p>B C: Maintien pendant au moins 5 heures à une température comprise entre 500° C et 700°C (température proportionnelle au taux d'écrouissage);</p> <p>C D: Refroidissement lent.</p>



Technologies de chauffe:

Four à l'air;

Four sous

vide;

Four à atmosphère contrôlée;

Four à bain de sel.

4.2.1.9 *Le recuit de restauration*

RECUIT DE RESTAURATION

But du traitement:

Le recuit de restauration est similaire au traitement de recristallisation. Seule la température de traitement est inférieure (entre 200 et 450 °C). Il rétablit partiellement les propriétés de l'acier sans qu'il y ait modification apparente de la structure cristalline.

Champ d'application:

Aciers à haute teneur en carbone;
Acier hyper eutectoïde;
Aciers alliés.

4.2.1.10 Le recuit de détente

RECUIT DE DÉTENTE (ou de RELAXATION)

But du traitement:

Ce traitement est utilisé pour éliminer les tensions des pièces soudées et refroidies rapidement ou des produits fabriqués à froid. Le recuit est obtenu en traitant thermiquement la pièce à une température donnée pendant un certain laps de temps, puis en la refroidissant lentement jusqu'à revenir au seuil de température ambiante. Les paramètres temps et température dépendent de la nature de l'alliage. Il est également très utile pour détendre les contraintes emmagasinées pendant la mise en service de l'outil. Le recuit de détente est toujours effectué à une température inférieure à la température de transformation.

Champ d'application:

Aciers;

Fontes moulées.

Cycle thermique:

A B:Chauffage;

B C:Maintien de 5 à 10 heures à une température comprise entre 500° C et 650°C;

C D:Refroidissement très lent dans le four (éviter le refroidissement à l'air).

Technologies de chauffe:

Four à l'air;

Four sous

vide;

Four à atmosphère contrôlée;

Four à bain de sel.

4.2.2 La trempe de l'acier

En gros, la trempe est un traitement thermique de durcissement qui consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer austénitisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale. Ce mode de durcissement, commun à de nombreux métaux, est réalisé selon le schéma général, à travers trois opérations successives: austénitisation, trempe et revenu⁶.

La première étape consiste donc d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés au-dessus de son point de transformation (entre 30 °C et 50 °C). Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques en austénite et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

S'ensuit la trempe qui consiste en un traitement visant à refroidir rapidement le métal à partir de sa température d'austénitisation (généralement entre 815 °C à 870 °C / 1500 °F à 1600 °F) afin d'obtenir une constitution martensitique. C'est cette transformation qui permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du métal traité, notamment sa dureté.

La possibilité, de faire subir à un acier un durcissement par trempe, est soumise à deux conditions indispensables :

- **Une condition métallurgique:** existence d'un domaine austénitique sur le diagramme d'équilibre de l'acier choisi de manière à pouvoir austénitiser cet acier en le portant à une température convenable;
- **Une condition thermique:** possibilité de refroidir cet acier à une vitesse suffisante à partir de l'état austénitique de manière à provoquer la formation des constituants, hors d'équilibre, recherchés.

Le cycle thermique de la trempe sera caractéristique de la dureté finale recherchée. Ce degré

de dureté envisagé fera recourir à différentes méthodes de refroidissement. La vitesse de refroidissement dépend principalement, pour une pièce déterminée:

- De la chaleur spécifique et la conductibilité thermique de l'acier;
- de la masse, la forme et l'état de surface de la pièce; plus la pièce sera massive plus le temps sera long;
- du pouvoir refroidissant du médium de trempe (air, eau, eau-sel, huile, sel, air forcé, etc.).

Notons que la vitesse de refroidissement est maximale à la surface de la pièce et diminue vers le cœur.

4.2.2.1 Les différents types de trempe

On distingue différents types de trempe, soit la trempe martensitique, la trempe bainitique, la trempe austénitique (aussi appelée hyper trempe).

4.2.2.1.1 La trempe martensitique⁷

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure à la valeur critique M_s , généralement inférieure ou égale à 20°C . Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme **martensite**. Afin de pouvoir obtenir une structure martensitique, il faut que la vitesse de refroidissement soit supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. Il est évident que cette condition n'est pas réalisée en tous les points d'une pièce. En effet, la loi de refroidissement en un point d'une pièce dépend de la conductivité thermique du métal, de la forme et des dimensions de la pièce, ainsi que du pouvoir de refroidissement du fluide de trempe qui, lui, dépend de l'agitation du fluide.

Le milieu de trempe doit assurer le refroidissement dans toute la section des pièces, et l'obtention d'une structure martensitique sans produire de défauts tels que tapures⁸, déformations, contraintes résiduelles, etc. Le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse dans l'intervalle de température $A-M_s$. Ce ciperm et d'étouffer la décomposition de l'austénite sur fusionnée dans le domaine des transformations: perlitique et intermédiaire. Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique M_s-M_f .

Une grande vitesse de refroidissement dans l'intervalle martensitique est indésirable car elle accroît les contraintes résiduelles et produit des tapures. L'uniformisation de la température en cours de refroidissement permet de limiter les tensions thermiques et se traduit par une suppression des déformations des pièces et une augmentation de la résilience et du % d'allongement de l'acier.

Généralement, on utilise pour les bains de trempe, des liquides qui peuvent bouillir tels que l'eau, les solutions aqueuses de sels et d'alcalins, les huiles. La trempe par ces agents passe par une étape de refroidissement pelliculaire (ou caléfaction) où une gaine de vapeur protège les pièces et empêche le refroidissement. Une fois que l'agent refroidissant se met en ébullition, la gaine se rompt et l'évacuation de la chaleur s'accélère. Notons que l'agitateur permet aussi de rompre la gaine (le film).

Pour les aciers au carbone, on utilise le plus souvent de l'eau comme milieu de trempe, alors que pour les aciers alliés, c'est fréquemment de l'huile ou un bain de sel.

4.2.2.1.2 La trempe bainitique

Pour obtenir la bainite par trempe, l'acier austénitisé est refroidi à une température choisie, à vitesse suffisante pour éviter la transformation en ferrite ou perlite. On maintient à cette température (240°C à 450°C) pour obtenir une transformation totale et l'on refroidit ensuite à la température ambiante. La température choisie pour la trempe bainitique dépend de la microstructure désirée (et la dureté recherchée) et de la vitesse de transformation de l'acier.

Les propriétés de la bainite confèrent certaines qualités aux aciers, malgré les inconvénients signalés, en particulier, une meilleure ductilité (pour les fortes teneurs en carbone) que pour la trempe martensitique, et de meilleures propriétés de fluage, (aux températures de 400 °C à 500 °C) que la martensite revenue. Dans les deux cas, les structures obtenues (martensite ou bainite) présentent une dureté élevée.

4.2.2.1.3 La trempe austénitique (ou hyper trempe)¹⁰

Les aciers austénitiques¹¹ dont la structure ne change pas, aussi bien par chauffage que par

refroidissement, ne « prennent » pas la trempe. Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir ces aciers et consiste à chauffer les pièces vers 1 100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600°C à 800°C. Il est généralement effectué à l'eau. L'huile est utilisée comme fluide de trempe pour les aciers à forte teneur en nickel.

Cette technique est appliquée plus particulièrement au traitement des aciers inoxydables et des aciers ferromanganèse, pour permettre d'effectuer un usinage ultérieur ou maintenir, voire remettre en solution dans l'austénite, les carbures dont la précipitation dans les espaces inter-grains favoriserait la corrosion cristalline.

4.2.2.2 Les technologies de chauffe

Les trois types de trempe peuvent être exécutés dans à peu près tous les milieux de chauffe possibles : four sous atmosphère contrôlée, four sous vide, bain de sel, etc. En somme, le choix de la technologie de chauffe est établi en fonction de la nature des pièces, sa grosseur, sa conductibilité, etc. Ci-joint un graphique illustrant de manière générale le cycle d'un traitement par trempe. Précisons ici qu'un traitement de trempe est toujours suivi d'un ou de plusieurs traitements de revenu afin d'enlever la fragilité du matériel, d'éliminer les contraintes et d'ajuster la dureté finale.

4.2.2.3 Les milieux de trempe

La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier (se référer à l'essai Jominy¹²). La nature du bain de trempe (eau, huile, etc.) caractérise la vitesse de refroidissement de la pièce immergée après chauffage.

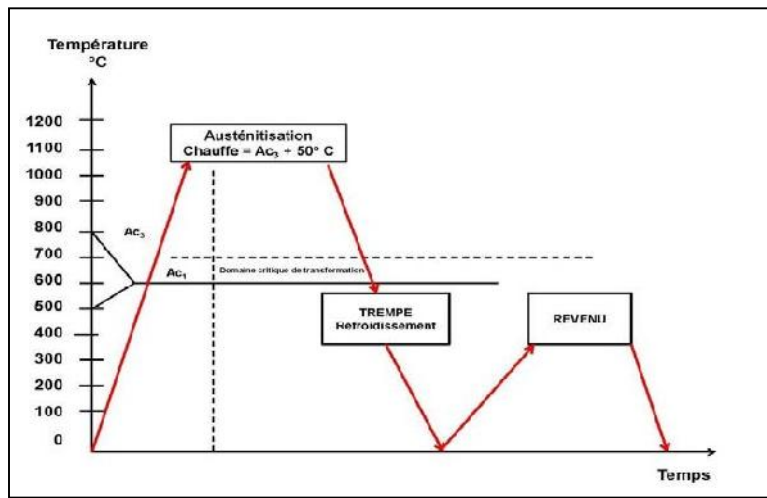


Figure 6–Le cycle thermique lors d'une trempe

Tableau 2 –La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe

Nature du bain	Vitesse de refroidissement
Saumure	220°C/seconde
Eau froide	160°C/seconde
Eau tiède	150°C/seconde
Eau chaude	140°C/seconde
Huile de trempe	70°C/seconde
Airsoufflé	20°C/seconde
Air calme	2°C/seconde
Dans un moule de sable	0,05°C/seconde
Dans le four	0,01°C/seconde(ou selon la programmation du cycle)

4.2.2.4 L'essai Jominy¹³

Il a pour but d'obtenir, en une seule opération sur une éprouvette normalisée des indications globales sur la trempabilité d'un acier, sous forme d'une courbe appelée courbe Jominy.

Cet essai est réalisé en trois étapes:

- l'austénitisation d'une éprouvette normalisée prélevée dans l'acier à tester.
- Le refroidissement en bout par un jet d'eau dans des conditions imposées.
- la mesure de dureté sur un méplat le long d'une génératrice et dont l'usinage ne doit pas provoquer un échauffement excessif. Les points de mesure de la dureté sont situés à: 1,5-3-5-7-9-11-13-15-20-30-40-50-60-70-80 mm de l'extrémité arrosée et sont désignés par J1,5 -J3-J5-Jx.

4.2.2.5 La trempe à l'eau

Ce traitement est réservé à des aciers peu alliés qui ont besoin de ce médium pour atteindre les caractéristiques recherchées (1045,W1). Le taux de refroidissement dans l'eau étant très élevé, ce traitement présente des risques importants de distorsion, voire de fissuration.

4.2.2.6 La trempe à l'huile

Ce traitement est réservée utilisée pour des aciers faiblement alliés comme 1045, 4140,4340,8620,9310,52100 ou des aciers outils tel que le O1.

4.2.2.7 La trempe à l'air forcée

Ce traitement est surtout utilisé sur des aciers dont les dimensions sont supérieures à la capacité des fours sous vide (par exemple, aciers inoxydables 410, 420, 431 et acier outilH13).

4.2.2.8 La trempe sous vide

Ce type de traitement s'adresse essentiellement aux aciers outils (A2, D2 S7, H13, H21,T1,M2)et aux aciers inoxydables martensitiques(410,420,440C).

4.2.2.9 La trempe subzéro(ou cryogénique)¹⁴

Ce procédé consiste à refroidir dans la neige carbonique, ou l'air liquide, les pièces traitées en trempe étagée martensitique dont la transformation austénite-martensite est insuffisante pour obtenir la dureté recherchée. Cette trempe est très intéressante avec les aciers cémentés pour les quels la température de trempe n'est qu'un compromis entre la température assurant la trempe à cœur et celle assurant la trempe des couches extérieures. Le traitement par le froid (ou traitement cryogénique) consiste à refroidir les pièces mécaniques en dessous de la température ambiante après un traitement thermique de trempe. La température de maintien se situe entre 0°C et 150 °C(le plus souvent entre 80°C et 100°C pour les aciers).

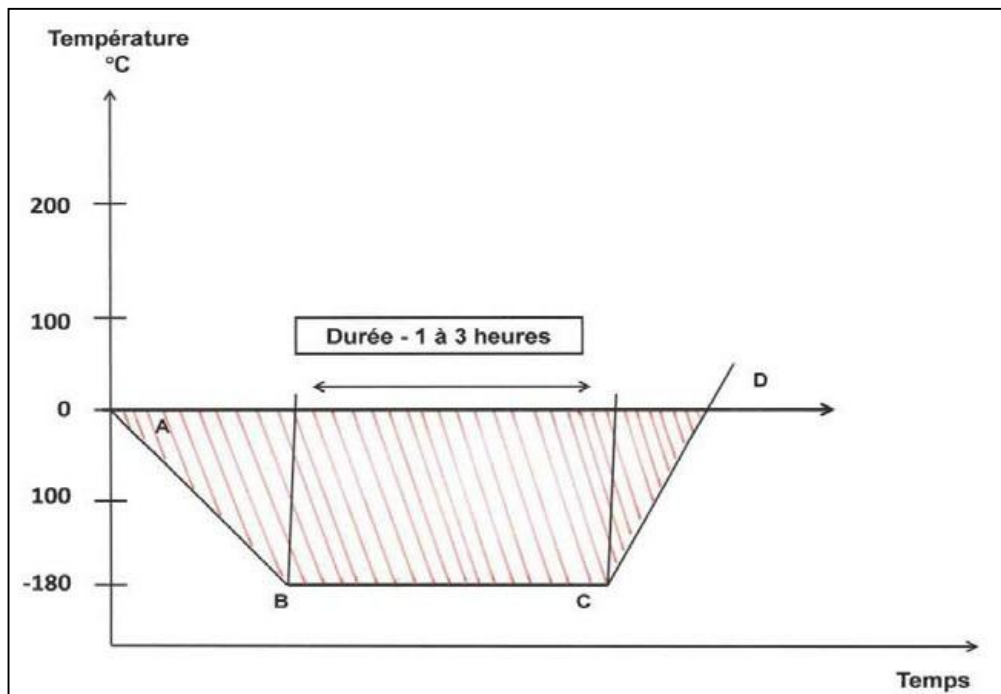
On justifie le choix de ce type de traitement par le froid sur les aciers par la nécessité d'atteindre une température inférieure à la température ambiante et qui suppose que des

transformations métallurgiques peuvent intervenir pour des températures atteintes inférieures à celle-ci. C'est le cas notamment de certains alliages fer-carbone pour lesquels le point M_f de fin de transformation de l'austénite en martensite est lui-même inférieur à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, d'où la subsistance après trempe d'austénite

Le traitement par le froid aura donc pour effet sur les aciers contenant de l'austénite résiduelle:

- d'augmenter la dureté et la limite élastique avec corrélativement une baisse de résilience et une augmentation des contraintes internes,
- d'augmenter la stabilité dimensionnelle des pièces. Il est ainsi particulièrement recommandé pour les calibres, les éléments à jeux très serrés.

Figure 7– Le cycle thermique lors d'une trempe subzéro ou cryogénique



4.2.3 Les revenus

Les revenus¹⁵ (« *tempering*») sont pour leur part effectués après la trempe, et visent à supprimer les tensions moléculaires internes dues au refroidissement rapide qui fragilise le matériau. Si cette opération n'est pas réalisée immédiatement après la trempe, un risque de rupture des pièces peut se produire plusieurs heures, voire plusieurs jours après la trempe. Cela dit, on parle ici pour le revenu d'un chauffage à faible température pendant plusieurs heures. À titre d'exemple, le revenu de la martensite des aciers favorise un retour partiel vers l'équilibre par diminution de la teneur en carbone de la martensite et par précipitation de carbure. Le résultat pratique est une augmentation de la ténacité¹⁶ de la structure, accompagné d'une diminution de la dureté.

Certains éléments sont importants à retenir lors de la réalisation des revenus. Tout d'abord, la température de revenu dépend des caractéristiques finales recherchées. Ensuite, il faut se rappeler que la fragilité de l'acier dépend de la vitesse de refroidissement. De plus, mentionnons que la suppression des contraintes résiduelles est plus complète lorsque la température de revenu est élevée et que le temps de maintien est grand.

Pour récapituler, il faut comprendre qu'après la trempe, on obtient un mélange de martensite, d'austénite résiduelle, de bainite et de carbures tandis que lors du revenu cette martensite se transforme en ferrite et en carbures et que l'austénite résiduelle se transforme en martensite et en bainite. En clair, on obtient un changement de propriétés par changement de structures.

On distingue principalement deux types de revenus, soit un de détente réalisé entre 140°C et 200° et qui vise à diminuer les contraintes internes et relever la limite d'élasticité des pièces, et un autre d'**adoucissement** exécuté entre 450 °C et 600 ° et qui vise la décomposition complète de la martensite par précipitation du carbone sous forme de cémentite Fe₃C.

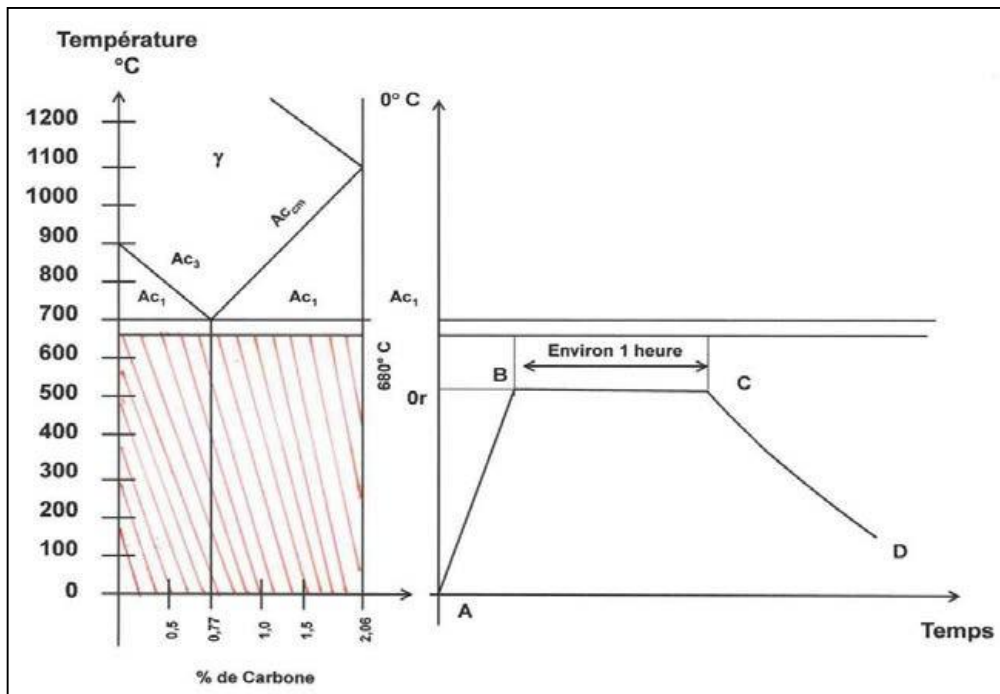
Il existe aussi d'autres types de revenus dont celui de durcissement qui est appliqué aux aciers alliés trempés. Pendant l'opération, les atomes de carbone quittent la martensite pour se combiner aux éléments d'alliage (vanadium, molybdène, tungstène, titane, chrome et manganèse). Il y a

formation de carbures alliés plus durs que la martensite.

Transformation se traduit par un accroissement de la dureté (durcissement secondaire). Ce type de revenu est appliqué aux aciers à coupe rapide.

- A B: Chauffage lent jusqu'à la température de revenu, inférieur à Ac_1 ;
- B C: Maintien de la pièce à cette température pendant environ une heure;
- C D: Refroidissement d'allure variable, plutôt lent.

Figure8–Le cycle thermique lors d'un revenu



4.3 L'univers des traitement thermochimiques

Outre les traitements thermiques décrits au chapitre précédent, il existe toute une gamme de traitements thermochimiques et qui diffèrent considérablement des premiers, dans la mesure que ceux-ci s'effectuent avec changement de la composition chimique d'une certaine épaisseur de la couche superficielle afin de donner des propriétés particulières aux pièces traitées.

On les définit comme suit : « traitement consistant à chauffer une pièce jusqu'à la température donnée dans un milieu solide, liquide ou gazeux, qui dégage facilement l'élément de diffusion à l'état atomique, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir. Donc à la différence d'un traitement thermique, un traitement thermochimique change non seulement la structure de l'acier, mais aussi la composition chimique des couches superficielles, ce qui permet de modifier dans de plus larges limites ses propriétés.»¹⁷

En clair, lorsqu'on a besoin d'une dureté superficielle plus élevée et une ductilité encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques. Cette modification se fait par l'insertion de divers gaz en fonction des types de traitements désirés : carbone, azote, ammoniac, oxyde de carbone, méthane, etc.

Un traitement thermochimique compte trois stades élémentaires:

- Un processus dont le siège est le milieu extérieur et qui assure le dégagement de l'élément diffusant à l'état atomique;
- Un contact des atomes d'élément diffusant avec la surface de la pièce en acier et formation des liaisons chimiques avec les atomes de fer (absorption);
- Une pénétration de l'élément saturant en profondeur dans le métal de base, c'est à dire, le stade de diffusion.

Les traitements thermiques les plus connus sont les traitements de cémentation, de carburation, de nitruration, de nitrocarburation et de carbonitruration.

4.3.1 La cémentation

TRAITEMENT DE CÉMENTATION (aussi appelé CARBURATION)

But du traitement:

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé par l'homme pour augmenter la dureté superficielle des pièces en acier. Pour cela, on augmente la teneur superficielle en carbone. La diffusion est toujours suivie de trempe à l'huile pour former des structures dures de martensite dans la couche enrichie.

Champ d'application:

Pièces d'usinage contenant des éléments tels que :Cr,Mo,Ni,B).

Les arbres, les portées de roulement à bille, les engrenages, les plaques d'usure.

Aciers:8620,4320,9310et17CrMo/acier à faible teneur en carbone.

Technologies de chauffe:

Four sous vide;

Four à atmosphère contrôlée;

Four à bain de sel.

Quelques précautions particulières sont à retenir lors d'un traitement thermochimique de cémentation. Tout d'abord, un nettoyage insuffisant peut entraîner des déformations après trempe pour les raisons qui suivent. Les déformations seront d'autant plus réduites que la profondeur de cémentation et la teneur en carbone seront homogènes. Des résidus d'huile de coupe peuvent constituer un obstacle local à la diffusion du carbone, créant ainsi des points à trempabilité différente. Le soufre contenu dans ces huiles peut modifier l'équilibre thermochimique en abaissant le potentiel carbone. La rouille est aussi un élément qui tend à abaisser ce potentiel carbone. Ensuite, dans certains cas, lors de la préparation des pièces, il faudra appliquer une peinture (Stop-off / No-Carb) pour éviter la déformation à certains endroits.

4.3.1.1 Les procédés de cémentation

On distingue trois autres procédés de cémentation, en l'occurrence la cémentation gazeuse, la

cémentation dite « sous vide » et la cémentation en caisse.

4.3.1.2 La cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse utilise soit le procédé à l'azote et méthanol, soit le procédé par générateur endothermique. Dans les deux cas, il se forme dans le four une atmosphère composée de monoxyde de carbone et d'hydrogène. L'opération s'effectue entre 900 °C et 950°C et dure plusieurs heures.¹⁸

Il s'agit là d'un procédé chimique de traitement superficiel, qui améliore la dureté de la pièce par diffusion de carbone aux couches superficielles, et qui améliore aussi la résistance à l'usure et à la fatigue. Les pièces de fabrication sont maintenues à une température élevée et sont mises en contact avec une atmosphère riche en carbone, de telle sorte que le carbone puisse se diffuser dans les couches superficielles de la pièce. Ce procédé est généralement réalisé dans un four de trempe sous atmosphère au sein duquel les pièces sont immédiatement trempées après le procédé de diffusion pour transformation martensitique.

Les conditions pour produire une atmosphère de potentiel carbone sont générées en ajoutant du gaz enrichi (gaz naturel ou de l'air dilué sur un gaz porteur endothermique pouvant être constitué à 40 % d'azote – 40 % d'hydrogène – 20 % de monoxyde de carbone (CO) – et moins de 0,1% de dioxyde de carbone (CO₂).

Enfin, la cémentation gazeuse permet de contrôler très exactement la profondeur de cémentation et elle est plus rapide que la cémentation encaisse, car le temps nécessaire pour chauffer le matériel se trouve économisé. Autre avantage, la cémentation peut être suivie par un cycle de diffusion au cours duquel il n'y a pas admission de gaz, ce qui fait baisser la teneur du carbone en surface et permet d'obtenir une meilleure graduation de la couche de cémentation. Ce procédé nécessite toute fois des investissements importants et son emploi ne peut donc être envisagé que pour des traitements de grandes séries de pièces.¹⁹

4.3.1.3 La cémentation «basse pression»

Les cémentations « basse pression » et « assistée plasma ou ionique » sont utilisées pour le traitement de petites ou moyennes pièces. Elles permettent d'obtenir une bonne qualité de la couche cimentée qui conduit, grâce à l'absence d'oxydation interne, à des caractéristiques de tenue en fatigue supérieures à celles obtenues avec les autres procédés. Il est possible de le réaliser par ce procédé des sur carburations (résistance à l'usure).

Il s'agit d'un procédé relativement moderne utilisé pour cimenter les pièces dans un environnement sans oxydant. Le procédé est réalisé à température élevée dans un four à vide utilisant des gaz pulsés d'hydrocarbure tels que le propane, l'éthylène et l'acétylène en tant que milieu de cémentation. Les avantages principaux sont les suivants : une surface sans oxydant (IGD), une faible distorsion, une bonne finition, une bonne pénétration pour les formes complexes et les trous, des performances de traitement régulières et des temps de traitement améliorés. Ce procédé ne s'applique pas à tous les aciers; il est principalement utilisé pour les pièces d'injection et de transmission dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatial. Étant donné la pression de trempe relativement faible, le traitement n'est pas universellement appliqué à tous les types d'alliages et d'aciers.²⁰ Il existe toutefois des fours sous vide avec trempe à l'huile, et qui sont de plus en plus populaires en termes d'utilisation pour l'exécution de ce traitement.

4.3.1.4 La cémentation encaisse

Ce procédé n'est cité que pour mémoire, il n'est pratiquement plus utilisé industriellement. Le principe est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon de bois, Le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900°C et 950 °C). Le ciment est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum $BaCO_3$. Il se présente soit sous forme de granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75%) et de carbonate de baryum (25 à 40%) en poudre, soit sous forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur. En huit heures environ, on obtient une profondeur de cémentation pouvant atteindre 1,6 mm.²¹

4.3.2 La nitruration²²

La nitruration gazeuse implique la diffusion d'azote dans les couches superficielles d'un acier faiblement carboné et faiblement allié en Al et / ou V maintenu à une température élevée. Cela forme une couche nitrurée, qui améliore la dureté superficielle. La nitruration se produit généralement à des températures oscillant entre 504 °C et 566 °C, à partir desquelles le matériau se trouve à l'état ferritique plutôt que dans le domaine austénitique utilisé pour la cémentation.

D'une façon générale, la nitruration est recommandée pour toutes pièces en acier, soumises à l'usure, au grippage, à la fatigue. Comme la température de traitement se situe entre 504 °C et 566 °C, les déformations sont limitées. Par ailleurs, la nitruration gazeuse, lorsqu'elle est réalisée sur des fours de technologie classique, est traditionnellement réservée aux pièces nécessitant de grandes profondeurs de couche, rectifiées après traitement. Les aciers les plus utilisés sont les aciers dits de « nitruration » tels que 42CrMo4, 40CrMnMo7, 33CrMoV12-9, 41CrAlMo7-10, Nitralloy135, NitralloyE2, NitralloyN1, 4140, 4340, etc.

Ce procédé est rendu possible du fait de la solubilité beaucoup plus élevée de la ferrite dans l'azote par rapport au carbone. Le fait de recourir à des températures inférieures de traitement et de ne pas devoir fournir une trempe permet d'obtenir des taux de distorsion moindres pour les pièces de fabrication. Règle générale, la zone traitée est de faible épaisseur: 0,2mm pour un traitement de 10 heures à 525 °C et 0,6 mm pour 60 heures à 525 °C. Ces faibles épaisseurs sont liées à la température de traitement.

La nitruration à l'état ferritique a pour avantage de ne pas interrompre le traitement précédent de la pièce en acier et de ne distordre que peu ou pas du tout la forme finale de la pièce. La nitruration doit être réalisée obligatoirement sur un acier préalablement trempé et incluant le revenu. Cette nitruration doit être réalisée obligatoirement à 50 °F et plus sous la température du dernier revenu de l'acier pour permettre de ne pas diminuer la dureté au cœur de l'acier. Cela signifie que les aciers hautement carbonés précédemment traités thermiquement peuvent être superficiellement durcis par nitruration. En fait, il est normal de déterminer tous les traitements thermiques appliqués à la pièce avant la nitruration. L'ammoniac NH_3 représente le gaz le plus courant utilisé pour la nitruration dans les fours "batch". Un des inconvénients du traitement de nitruration est que certains cycles de traitement peuvent être très longs, pouvant durer parfois jusqu'à 80 heures.

Enfin, selon les additions d'éléments complémentaires, éventuellement pour des raisons de commodité de mise en œuvre, on parle de nitrocarburation, sulfonitruration, etc. Les traitements de nitruration peuvent être effectués sous diverses technologies de chauffe : sous atmosphère, bain de sel, nitruration ionique ou par plasma, basse pression.²³

La nitruration permet d'augmenter la dureté en surface, d'accroître la résistance à l'usure et la vie en fatigue (surface en compression).

4.3.3 La nitrocarburation²⁵

La nitrocarburation est une variante du processus de nitruration. Il s'agit d'un processus de

diffusion thermochimique où des atomes d'azote, de carbone et, dans une très faible proportion, d'oxygène sont diffusés dans la surface de la pièce en acier, formant une couche de combinaison en surface et une couche de diffusion. Ce processus est réalisé principalement afin d'obtenir une résistance à l'usure de la couche superficielle et améliorer la résistance à la fatigue, car la surface est en compression. Les avantages du processus incluent la capacité de durcir les matériaux qui ne sont pas prétraités, la température relativement basse du processus qui minimise la déformation et le coût relativement économique par rapport à la cémentation.²⁶

Les industries concernées par ce type de traitement sont entre autres : pétrole et gaz, soupape, pompe, équipement agricole, automobile, emboutissage, textile, extrusion et moulage par injection et composants d'armes à feu. Les pièces principalement concernées sont : les engrenages et arbres de pignon, les robinets, sièges, billes, tiges, régulateurs, les composants de pompe-pistons, cylindre, les hacheurs de moissonneuse-batteuse, séparateurs, transfert de récolte, composants de coupe, les axes de boîte de vitesse, pièces d'embrayages, pompes à huile de moteur diesel, engrenages, vilebrequins et arbres à cames, etc.

La couche de combinaison est résistante à la corrosion et à l'usure, sans être fragilisée, contrairement à son équivalent dans le processus de nitruration. Étant donné qu'elle fournit une partie essentielle des propriétés requises par le processus, elle ne doit pas être éliminée par rectification ultérieure. En dessous de la couche de combinaison, la couche nitrurée améliore de façon significative la résistance à la fatigue du composant.

La carbonitruration²⁷

La carbonitruration est un traitement de diffusion généralement effectué entre 845 °C et 870°C dans une atmosphère gazeuse, en ajoutant 0,7 à 1,2% de carbone et 1,0-5,0% (<5%) d'azote (NH₃) à la surface des aciers au carbone ou des aciers faiblement alliés. Après le temps de diffusion, les composants sont directement trempés à l'huile. La profondeur cémentée atteinte n'est généralement pas supérieure à 0,7 mm environ et dépend non seulement des profondeurs de carbonitruration, mais aussi de la température de durcissement, la vitesse de trempe, la trempabilité de l'acier et les dimensions du composant. Une trempe peu énergétique, généralement à l'huile ou à l'air, est effectuée soit à la sortie des pièces du four après refroidissement, soit après un deuxième chauffage. Le traitement thermique est terminé par un

revenu à basse température, située entre 150 °C et 200 °C, pour les plages de profondeur de couche cémentée les plus profondes, ce qui permet de réduire la fragilisation en fonction des circonstances tribologiques.²⁸

Il y a une certaine analogie avec le traitement de cémentation. La cémentation, rappelons-le, consiste à enrichir en carbone la zone superficielle de pièces en acier à bas carbone, puis à les tremper de manière à obtenir une couche martensitique dure, résistant à l'usure et un cœur tendre et ductile, susceptible d'absorber des chocs. Ce traitement s'applique à des aciers de cémentation qui contiennent des éléments d'alliage destinés à améliorer la trempabilité et à conférer à la pièce une certaine résistance à cœur. Par contre, lorsqu'on désire obtenir un résultat analogue avec des aciers qui se prêtent moins bien à la trempe, tels que des aciers de décolletage, on procède à un traitement de carbonitruration. Dans ce cas, on ajoute à l'atmosphère de cémentation une quantité d'ammoniac généralement inférieure à 5 % du volume. À la température de traitement, l'ammoniac se décompose en azote et en hydrogène. Une partie de l'azote pénètre dans le réseau cristallin de l'acier en provoquant entre autres une augmentation importante de la trempabilité. Les pièces carbonitrurées peuvent donc ensuite être trempées.

Un inconvénient non négligeable est que, si l'azote augmente la trempabilité de l'acier, il abaisse fortement le point Ms (« Martensite Start ») et augmente donc le volume d'austénite résiduelle qui peut être, par suite, très élevé, et cette austénite n'est guère favorable, aux caractéristiques mécaniques, à la tenue en fatigue et à la stabilité dimensionnelle des pièces.

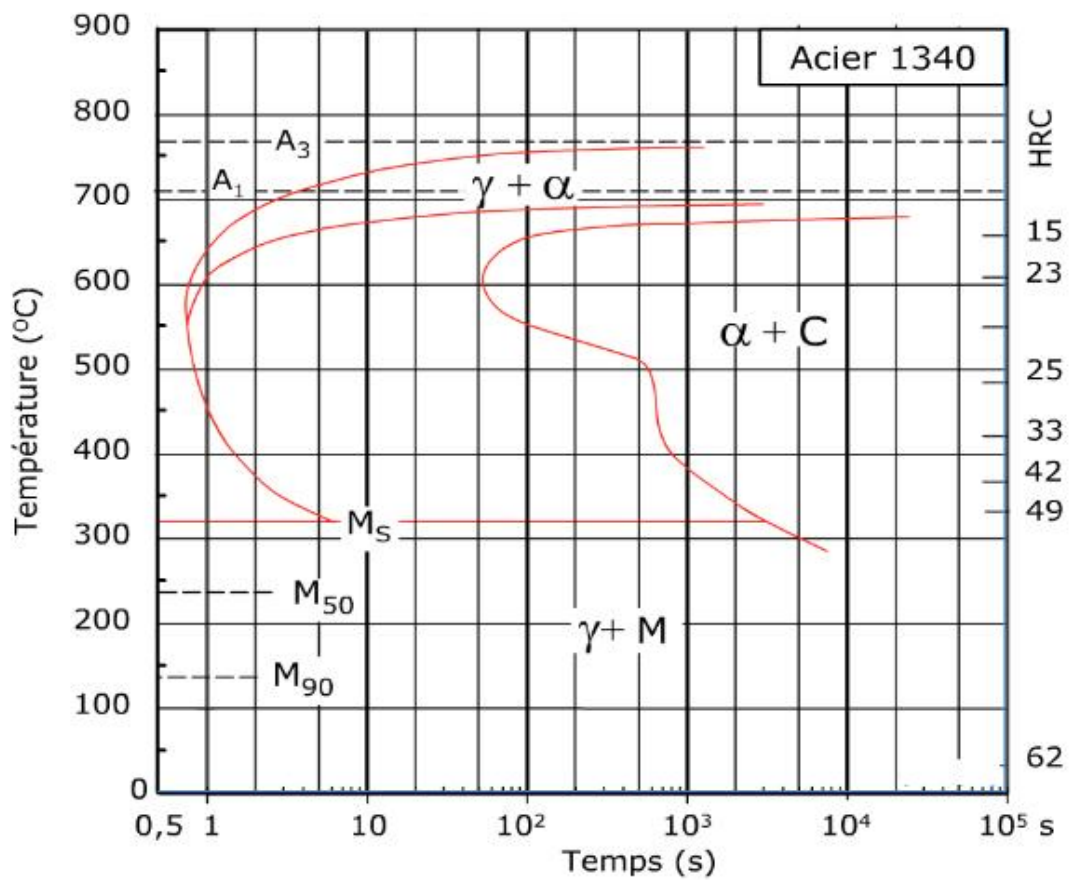
Exercice

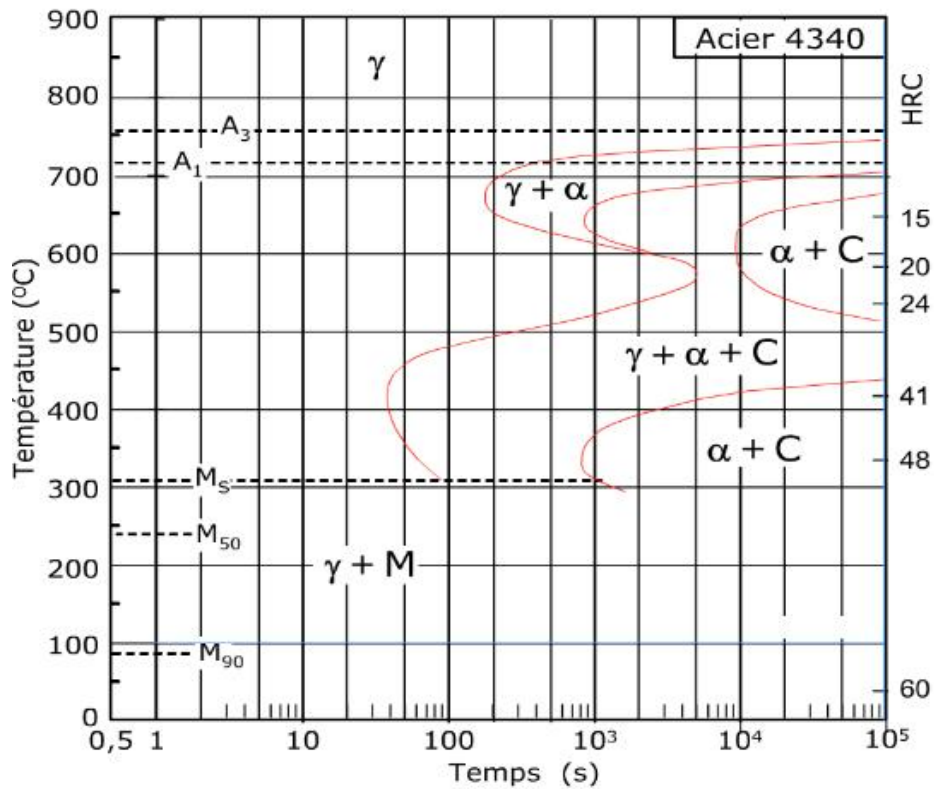
Exo.1: Aux aciers 1340 et 4140 (dont les diagrammes TTT sont donnés page suivante), vous appliquez les traitements thermiques suivants

Traitement	Caractéristiques
A	<ol style="list-style-type: none">1. Austénitisation à 850 °C, 30 min.2. Trempe à 650 °C et maintien pendant 1000 s.3. Refroidissement quelconque jusqu'à 20 °C.
B	<ol style="list-style-type: none">1. Austénitisation à 850 °C, 30 min.2. Trempe à 600 °C et maintien pendant 100 s.3. Trempe à l'eau à 20 °C.
C	<ol style="list-style-type: none">1. Austénitisation à 850 °C, 30 min.2. Trempe à 400 °C et maintien pendant 300 s.3. Trempe à l'eau à 20 °C.

a) Pour chacun de ces aciers et pour chacun des traitements thermiques subis, dites quels sont les constituants de l'acier et la dureté finale de l'acier. Présentez vos résultats sous la forme d'un tableau semblable au suivant

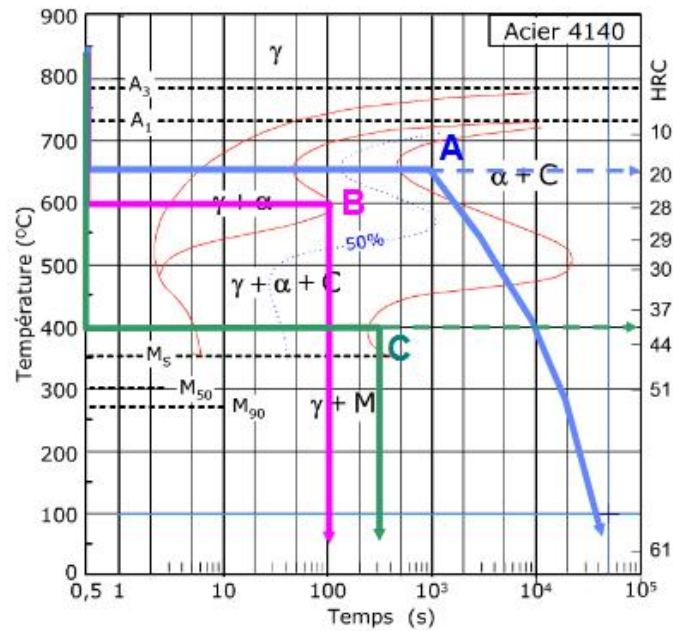
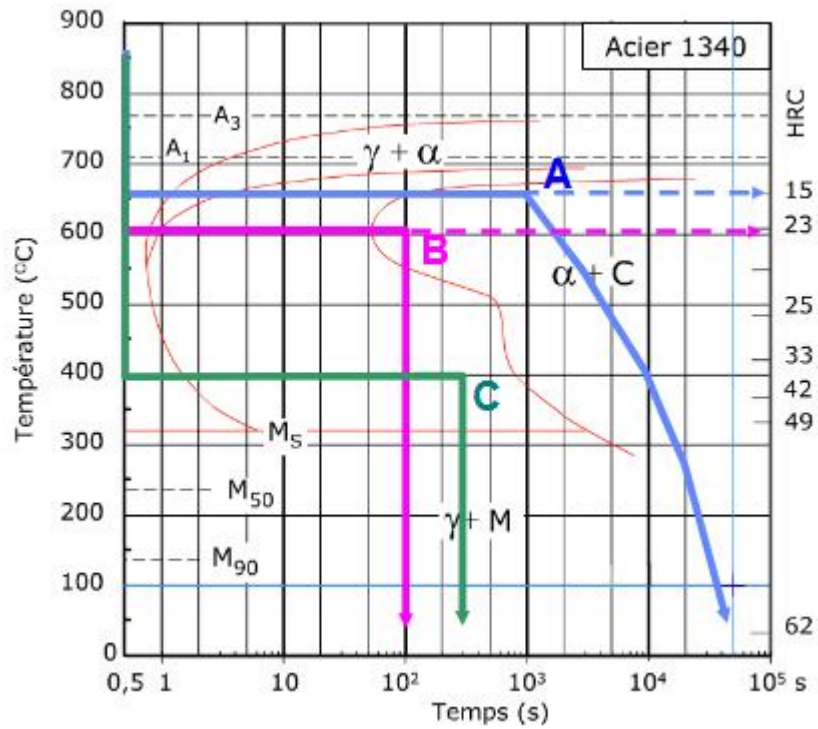
		Traitement A	Traitement B	Traitement C
Acier 1340	Constituants			
	Dureté (HRC)			
Acier 4340	Constituants			
	Dureté (HRC)			





Corrige exo1

Sur chacun des diagrammes TTT, traçons l'histoire thermique des traitements A, B et C en rappelant que leur étape 1 est identique et que l'origine des temps est prise sur le diagramme TTT à l'instant où la 1^{ère} trempe est effectuée (début de l'étape 2 du traitement).



Constituants et dureté des aciers après les traitements :

Pour déterminer les constituants présents à la fin d'un traitement, les règles suivantes s'appliquent :

1. Si la fin de l'étape 2 se termine dans le domaine des phases stables (ferrite) et C (cémentite) – c'est-à-dire à la droite de la courbe de fin de transformation –, ces phases stables et C se présenteront morphologiquement sous forme de constituants stables : ferrite, perlite ou bainite, plus ou moins grossière selon la température de transformation caractérisant l'étape 2. L'étape 3 (refroidissement quelconque ou trempe) n'a plus aucun effet sur la microstructure puisque les constituants obtenus à la fin de l'étape 2 sont stables. Dans un tel cas, on peut lire, sur l'échelle de droite du diagramme TTT, la dureté de l'acier obtenue

à 20 °C,

2. Si la fin de l'étape 2 se termine entre les courbes de début et de fin de transformation, une fraction seulement de l'austénite instable, présente dans l'acier au début de l'étape 2, s'est transformée en constituants stables à la fin de l'étape

3. Soumise à une trempe à 20 °C (étape 3), la fraction restante d'austénite instable se transformera en martensite. Dans ce cas, on ne peut plus connaître de façon précise la dureté finale de l'acier, puisque l'échelle de dureté a été dressée pour une austénite totalement transformée en phases stables ou en martensite en une seule étape. En appliquant ces règles, on peut donc dresser le tableau suivant des résultats :

		Traitement A	Traitement B	Traitement C
Acier 1340	Constituants	Ferrite + Perlite grossière	Ferrite (très peu) + Perlite fine	Bainite inférieure + Martensite (peu)
	Dureté (HRC)	15	23	Indéterminée
Acier 4140	Constituants	Ferrite + Perlite	Ferrite + Martensite	Bainite inférieure
	Dureté (HRC)	20	Indéterminée	≈ 40

Exo.2: En considérant le diagramme TTT de l'acier 3140 donné page suivante, répondez à ces questions, où T = température de trempe (en °C) et t = temps de transformation à cette température.

- a) Quelle est la température minimale d'austénitisation de cet acier ?
- b) Pour T = 700 / t = 3 s, quelles sont les phases en présence ?
- c) Pour T = 700 / t = 20 s, quelles sont les phases en présence ?
- d) Pour T = 650 / t = 100 s, quels sont les constituants en présence ? Quelle est la dureté ?
- e) Pour T = 450 / t = 20 s puis trempe à l'eau à 20°C, quels sont les constituants en présence ?
- f) Après une trempe à l'eau à 20 °C, quels sont les constituants en présence ? Quelle est la dureté ?

corrigé Exo.2:

a) Température minimale d'austénitisation Il faut austénitiser l'acier (mise en solution du carbone dans l'austénite) à une température au moins égale à la température A3 indiquée sur le diagramme TTT.

792 °C

b) Phases en présence après trempe à 700 °C et maintien de 3 s. Le point représentatif est dans le domaine de l'austénite instable. **instable**

c) Phases en présence après trempe à 700 °C et maintien de 20 s Le point représentatif est dans le domaine de l'austénite instable et de la ferrite stable. **instable et stable**

e) Constituants en présence après trempe à 650 °C et maintien de 100 s. Dureté

Le point représentatif est dans le domaine de la ferrite et du carbure de fer C. Les constituants sont donc de la ferrite et de la perlite. La transformation étant complète, l'acier a une dureté de 13 HRC après refroidissement à 20 °C

instable et perlite 13 HRC

e) Constituants en présence après trempe à 450 °C / maintien de 20 s, suivi d'une tempe à 20 °C Vingt secondes de transformation à 450 °C conduisent à une microstructure formée d'austénite instable et de bainite stable. Si l'on trempe cette microstructure à 20 °C, la bainite stable ne subit

aucune modification, alors que l'austénite instable se transforme en martensite. Les constituants présents à la fin du traitement sont donc de la bainite et de la martensite

bainite et martensite

f) Constituants en présence une tempe à 20 °C

L'austénite s'est transformée en martensite, dont la dureté est égale à 58 HRC.

martensite 58 HRC

Exo.2:

Répondez aux questions ci-dessous en cochant une ou plusieurs cases réponses.

1) Au cours de l'étape du vieillissement d'un traitement de durcissement structural, l'augmentation de la résistance à la traction R_m d'un alliage par le phénomène de précipitation dépend :

- de la fraction massique de précipités prévue par le diagramme d'équilibre ;
- de la taille des précipités formés au cours du vieillissement ;
- de la valence de l'élément d'addition ;
- de la distance moyenne entre les précipités formés au cours du vieillissement ;
- de la limite d'élasticité des précipités ;
- du pourcentage de martensite formé après trempe.

2) Après la trempe d'un alliage "Al-4 % Cu", l'alliage est constitué :

- d'un mélange de phases α et θ ;
- d'une solution de phase α sursaturée en cuivre ;
- de martensite β' ;
- d'une seule phase métastable ;
- d'une seule phase stable.

3) L'objectif fondamental visé lors du durcissement d'un métal pur ou d'un alliage est

d'obtenir :

la formation de précipités cohérents ;

une transformation martensitique ;

les phases prévues par le diagramme d'équilibre ;

une augmentation de la cission critique * de mise en mouvement des dislocations ;

une augmentation de la rigidité du métal ou de l'alliage ;

une augmentation de la ductilité du matériau.

4) Le revenu de la martensite d'un acier au carbone a pour effet(s) :

d'augmenter la ténacité de l'acier ;

d'augmenter la rigidité de l'acier ;

d'augmenter la dureté de l'acier ;

de diminuer les contraintes résiduelles dans l'acier ;

de diminuer la ductilité de l'acier.

5) Après austénitisation, on trempe à l'eau un acier eutectoïde non allié, puis on lui applique un revenu d'une heure à 450 °C. Quelle est la dureté finale de l'acier ? (Consultez les fig.)

42 HRC ;

47 HRC ;

58 HRC ;

64 HRC ;

67 HRC ;

72 HRC.

6) Lors d'un traitement de durcissement structural effectué sur un alliage d'aluminium, laquelle des étapes suivantes est recommandée pour obtenir la limite d'élasticité la plus élevée ?

Chauffer la pièce à une température où il n'y a qu'une phase avant de tremper ;

Refroidir assez rapidement pour qu'il n'y ait pas précipitation d'une deuxième phase ;

Après trempe, vieillir à une température T où il se forme des précipités d'équilibre ;

Après trempe, vieillir à une température T où il se forme de fins précipités uniformément distribués.

7) Le traitement de durcissement structural d'un alliage d'aluminium a pour effet d'augmenter sa limite d'élasticité $R_{e0,2}$, parce que la distance moyenne entre les précipités formés est très grande.

La phrase est entièrement vraie ;

Les deux affirmations sont vraies, mais le "parce que" est faux;

La première affirmation est vraie, mais la deuxième est fausse ;

La deuxième affirmation est vraie, mais la première est fausse ;

Les deux affirmations sont fausses.

8) Après qu'un acier au carbone ait été austénitisé, puis trempé et maintenu à une température constante supérieure à M_s , lesquelles des affirmations suivantes sont vraies :

la transformation de l'austénite métastable est immédiate ;

il existe un temps minimal pour que l'austénite soit complètement transformée ;

l'austénite se transforme progressivement en martensite ;

il existe un temps minimal pour que l'austénite commence à se transformer ;

l'austénite se décompose en phases stables après un temps minimal ;

la morphologie des phases stables dépend de la température de transformation de l'austénite.

Corrigé Exo.2:

Répondez aux questions ci-dessous en cochant une ou plusieurs cases réponses.

1) Au cours de l'étape du vieillissement d'un traitement de durcissement structural, l'augmentation de la résistance à la traction R_m d'un alliage par le phénomène de précipitation dépend :

de la fraction massique de précipités prévue par le diagramme d'équilibre ;

de la taille des précipités formés au cours du vieillissement ;

de la valence de l'élément d'addition ;
de la distance moyenne entre les précipités formés au cours du vieillissement ;
de la limite d'élasticité des précipités ;
du pourcentage de martensite formé après trempe.

2) Après la trempe d'un alliage "Al-4 % Cu", l'alliage est constitué :

d'un mélange de phases α et β ;
d'une solution de phase α sursaturée en cuivre ;
de martensite β' ;
d'une seule phase métastable ;
d'une seule phase stable.

3) L'objectif fondamental visé lors du durcissement d'un métal pur ou d'un alliage est d'obtenir :

la formation de précipités cohérents ;
une transformation martensitique ;
les phases prévues par le diagramme d'équilibre ;
une augmentation de la cission critique
* de mise en mouvement des dislocations ;
une augmentation de la rigidité du métal ou de l'alliage ;
une augmentation de la ductilité du matériau.

4) Le revenu de la martensite d'un acier au carbone a pour effet(s) :

d'augmenter la ténacité de l'acier ;
d'augmenter la rigidité de l'acier ;
d'augmenter la dureté de l'acier ;
de diminuer les contraintes résiduelles dans l'acier ;
de diminuer la ductilité de l'acier.

5) Après austénitisation, on trempe à l'eau un acier eutectoïde non allié, puis on lui applique un revenu d'une heure à 450 °C. Quelle est la dureté finale de l'acier ? (Consultez les fig.

6.20 et 6.25, aux p. 251 et 256 du livre Des Matériaux.)

42 HRC ;

47 HRC ;

58 HRC ;

64 HRC ;

67 HRC ;

72 HRC.

6) Lors d'un traitement de durcissement structural effectué sur un alliage d'aluminium, laquelle des étapes suivantes est recommandée pour obtenir la limite d'élasticité la plus élevée ?

Chauffer la pièce à une température où il n'y a qu'une phase avant de tremper ;

Refroidir assez rapidement pour qu'il n'y ait pas précipitation d'une deuxième phase ;

Après trempe, vieillir à une température T où il se forme des précipités d'équilibre ;

Après trempe, vieillir à une température T où il se forme de fins précipités uniformément distribués.

7) Le traitement de durcissement structural d'un alliage d'aluminium a pour effet d'augmenter sa limite d'élasticité $R_{e0,2}$, parce que la distance moyenne entre les précipités formés est très grande.

La phrase est entièrement vraie ;

Les deux affirmations sont vraies, mais le "parce que" est faux ;

La première affirmation est vraie, mais la deuxième est fausse ;

La deuxième affirmation est vraie, mais la première est fausse ;

Les deux affirmations sont fausses.

8) Après qu'un acier au carbone ait été austénitisé, puis trempé et maintenu à une température constante supérieure à M_s , lesquelles des affirmations suivantes sont vraies :

la transformation de l'austénite métastable est immédiate ;

il existe un temps minimal pour que l'austénite soit complètement transformée ;

l'austénite se transforme progressivement en martensite ;

il existe un temps minimal pour que l'austénite commence à se transformer ;

l'austénite se décompose en phases stables après un temps minimal ;

la morphologie des phases stables dépend de la température de transformation de l'austénite

Références

- [1] Leroux, C. ;& Jacquot, P. : Les traitements et revêtements de surface des alliages métalliques. Classification–Applications–Tendances et développements. Metallurgical Research & Technology, 108(5), 295-311. (2011). <https://doi.org/10.1051/metal/2011064>
- [2] Sheppard, P.; Ninon, K.; Phetsantad, S.; Khailaihong, M.; Sukhonkhet, C.; Koiprasert, H.;& Wongpisarn, W.: Thermal Spraying and Its Applications in Thai Industries. CHIANG MAI JOURNAL OF SCIENCE, 40(5), 822-830 (2013). <http://it.science.cmu.ac.th/ejournal/>
- [3] Sharma, S. P.; Dwivedi, D. K.;& Jain, P. K.: Abrasive wear behavior of continuously compacted thermal-sprayed Ni base alloy powder coatings in different conditions. International Journal of Surface Science and Engineering, 2(3-4), 240-251 (2008). <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2008.020496>
- [4] Yao, S. H.: Tribological behavior of NiCrBSi–WC (Co) coatings. Materials Research Innovations, 18(sup2), S2-332 (2014). <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000436>
- [5] Battez, A. H.; Viesca, J. L.; González, R.; Blanco, D.; Asedegbega, E.;& Osorio, A.: Friction reduction properties of a CuO nanolubricant used as lubricant for a NiCrBSi coating. Wear, 268(1-2), 325-328 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.018>
- [6] Tobar, M. J.; Álvarez, C.; Amado, J. M.; Rodríguez, G.;& Yáñez, A.: Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel. Surface and Coatings Technology, 200(22-23), 6313-6317 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.093>

- [7] Karmakar, R.; Maji, P.;& Ghosh, S. K.: A review on the nickel based metal matrix composite coating. *Metals and Materials International*, 27, 2134-2145 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00872-w>
- [8] Fazel, M.; Jazi, M. G.; Bahramzadeh, S.; Bakhshi, S. R.;& Ramazani, M.: Effect of solid lubricant particles on room and elevated temperature tribological properties of Ni–SiC composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 254, 252-259 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.027>
- [9] Lee, L.; Behera, P.; Sriraman, K. R.;& Chromik, R. R.: The effect of contact stress on the sliding wear behavior of Zn-Ni electrodeposited coatings. *Wear*, 400, 82-92 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.018>
- [10] Hernando, J.; Jairo, O. J.;& Edgar, A. J.: Tribological Behavior of Ni-Based Coatings Deposited via Spray and Fuse Technique. *Coatings*, 10(11), 1080 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10111080>
- [11] Hou, Q. Y.; He, Y. Z.; Zhang, Q. A.;& Gao, J. S.: Influence of molybdenum on the microstructure and wear resistance of nickel-based alloy coating obtained by plasma transferred arc process. *Materials & design*, 28(6), 1982-1987 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.04.005>
- [12] Zhang, X. C. ; Xu, B. S. ; Tu, S. T. ; Xuan, F. Z. ; Wang, H. D. ;& Wu, Y. X. : Effect of spraying power on the microstructure and mechanical properties of supersonic plasma-sprayed Ni-based alloy coatings. *Applied Surface Science*, 254(20), 6318-6326(2008). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.03.148>
- [13] Prashar, G.;& Vasudev, H.: A review on the influence of process parameters and heat treatment on the corrosion performance of Ni-based thermal spray coatings. *Surface Review and Letters*, 29(01), 2230001 (2022). <https://doi.org/10.1142/S0218625X22300015>
- [14] Kim, K.;& Kim, W.: Effect of Heat Treatment on Microstructure and Thermal Conductivity of Thermal Barrier Coating. *Materials*, 14(24), 7801 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14247801>
- [15] Li, B.; Gao, Y.; Jia, J.; Han, M.; Guo, H.;& Wang, W.: Influence of heat treatments on the microstructure as well as mechanical and tribological properties of NiCrAlY-Mo-Ag

- coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 686, 503-510 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.075>
- [16] Liu, L.; Xu, H.; Xiao, J.; Wei, X.; Zhang, G.; & Zhang, C.: Effect of heat treatment on structure and property evolutions of atmospheric plasma sprayed NiCrBSi coatings. *Surface and Coatings Technology*, 325, 548-554 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.011>
- [17] Crowe, T.; & Guraydin, A.: The Effects of Heat Treatment on Area Percent Porosity and Corrosion Behavior of High-Nickel Thermal Spray Coatings (2011). <https://digitalcommons.calpoly.edu/matesp/12>
- [18] Daram, P.; & Banjongprasert, C.: The influence of post treatments on the microstructure and corrosion behavior of thermally sprayed NiCrMoAl alloy coating. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125166 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125166>
- [19] Sudharshan Phani, P.; Oliver, W. C.; & Pharr, G. M.: Measurement of hardness and elastic modulus by load and depth sensing indentation: Improvements to the technique based on continuous stiffness measurement. *Journal of Materials Research*, 36, 2137-2153 (2021). <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
- [20] Fischer-Cripps, A. C.; & Fischer-Cripps, A. C.: Factors affecting nanoindentation test data. *Nanoindentation*, 77-104 (2011). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9872-9_4
- [21] Franco Jr, A. R., Pintaúde, G., Sinatora, A., Pinedo, C. E., Tschiptschin, A. P. (2004). The use of a Vickers indenter in depth sensing indentation for measuring elastic modulus and Vickers hardness. *Materials Research*, 7, 483-491 (2004). <https://doi.org/10.1590/S1516-14392004000300018>
- [22] Matthes, B.; Broszeit, E.; Aromaa, J.; Ronkainen, H.; Hannula, S. P.; Leyland, A.; & Matthews, A.: Corrosion performance of some titanium-based hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 49(1-3), 489-495 (1991). [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90105-6)
- [23] Ndumia, J. N.; Zhu, J.; Gbenontin, B. V.; Kang, M.; Liu, X.; & Nyambura, S. M.: Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Corrosion Behavior of Arc-Sprayed FeCrAl/Al

- Coating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(4), 1489-1497 (2023).<https://doi.org/10.1007/s11665-022-07241-1>
- [24] Xie, Q. ; Fu, Z. ; Wei, X. ; Li, X. ; Yue, W. ; Kang, J. ; ... & Meng, J. : Effect of substrate bias current on structure and properties of CrNx films deposited by plasma enhanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 365, 134-142 (2019).<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.090>
- [25] Eskandari, A.; Shafyei, A.; Sayyedani, F.; Afsous, M.;& Adamzadeh, M.: Investigating the Microstructural, Mechanical, and Tribological Properties of NiCrBSi High-Velocity Oxygen Fuel and High-Pressure High-Velocity Oxygen Fuel Coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(4), 1671-1682 (2023).<https://doi.org/10.1007/s11665-022-07249-7>
- [26] Afsous, M. ; Shafyei, A. ; Soltani, M. ;& Eskandari, A. : Characterization and evaluation of tribological properties of NiCrBSi-Gr composite coatings deposited on stainless steel 420 by HVOF. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29, 773-788 (2020).<https://doi.org/10.1007/s11666-020-00998-8>
- [27] Younes, R.; Bradai, M. A.; Sadeddine, A.;& Mouadji, Y.: Microstructure and Tribological Performance of Thermally Sprayed Molybdenum Coating. *Chemistry Africa*, 5(2), 269-278 (2022).<https://doi.org/10.1007/s42250-021-00306-z>
- [28] Michalak, M.; Sokołowski, P.; Szala, M.; Walczak, M.; Łatka, L.; Toma, F. L.;& Björklund, S.: Wear behavior analysis of Al₂O₃ coatings manufactured by APS and HVOF spraying processes using powder and suspension feedstocks. *Coatings*, 11(8), 879 (2021).<https://doi.org/10.3390/coatings11080879>
- [29] Natarajan, S.; Anand, E. E.; Akhilesh, K. S.; Rajagopal, A.;& Nambiar, P. P.: Effect of graphite addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of plasma sprayed NiCrBSi coatings. *Materials chemistry and physics*, 175, 100-106 (2016).<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.02.076>
- [30] Wang, X. H.; Li, J. S.; Rui, H. U.;& Kou, H. C.: Mechanical properties and pore structure deformation behavior of biomedical porous titanium. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(5), 1543-1550 (2015).[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63756-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63756-6)

- [31] Li, J.;& Ding, C.: Determining microhardness and elastic modulus of plasma-sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings using Knoop indentation testing. *Surface and Coatings Technology*, 135(2-3), 229-237 (2001).[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01066-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01066-5)
- [32] Mouadji, Y.; Bradai, M. A.; Younes, R.; Sad-eddine, A.;& Benabbas, A.: Influence of heat treatment on microstructure and tribological properties of flame spraying Fe-Ni-Al alloy coating. *Journal of Central South University*, 25(3), 473-481 (2018).<https://doi.org/10.1007/s11771-018-3751-6>
- [33] Michalak, M.; Sokołowski, P.; Szala, M.; Walczak, M.; Łatka, L.; Toma, F. L.;& Björklund, S.: Wear behavior analysis of Al₂O₃ coatings manufactured by APS and HVOF spraying processes using powder and suspension feedstocks. *Coatings*, 11(8), 879 (2021).<https://doi.org/10.3390/coatings11080879>
- [34] Haixiang, C.;& Dejun, K.: Comparison on electrochemical corrosion performances of arc and laser thermal sprayed Al-Ti-Ni coatings in marine environment. *Materials Chemistry and Physics*, 251, 123200 (2020).<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123200>
- [35] Bergant, Z.; Trdan, U.;& Grum, J.: Effect of high-temperature furnace treatment on the microstructure and corrosion behavior of NiCrBSi flame-sprayed coatings. *Corrosion Science*, 88, 372-386 (2014).<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.057>
- [36] Xu, C.; Du, L.; Yang, B.;& Zhang, W.: The effect of Al content on the galvanic corrosion behavior of coupled Ni/graphite and Ni-Al coatings. *Corrosion science*, 53(6), 2066-2074 (2011).<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.02.019>
- [37] Suegama, P. H.; Fugivara, C. S.; Benedetti, A. V.; Fernández, J.; Delgado, J.;& Guilemany, J. M.: Electrochemical behavior of thermally sprayed stainless steel coatings in 3.4% NaCl solution. *Corrosion Science*, 47(3), 605-620 (2005).<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.07.003>
- [38] Li, B.; Li, C.; Gao, Y.; Guo, H.; Zheng, Q.; Kang, Y.;& Zhao, S.: Influence of Heat Treatment on Corrosion-Wear Behavior of Ni-Based Coating in Artificial Seawater. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 7828-7834 (2019).<https://doi.org/10.1007/s11665-019-04490-5>
- [39] Lang, E. (Ed.): The role of active elements in the oxidation behavior of high temperature metals and alloys. Springer Science & Business Media (2012). DOI:10.1007/978-94-009-1147-5

- [40] Bohn, R.; Haubold, T.; Birringer, R.;& Gleiter, H.: Nanocrystalline intermetallic compounds—An approach to ductility? *Scripta metallurgica et materialia*, 25(4), 811-816 (1991).[https://doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90230-X](https://doi.org/10.1016/0956-716X(91)90230-X)
- [41] Wen, Z. H.; Bai, Y.; Yang, J. F.;& Huang, J.: Corrosion resistance of vacuum re-melted Ni60-NiCrMoY alloy coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 711, 659-669 (2017).<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.318>
- [42] Liu, Z.; Dong, Y.; Chu, Z.; Yang, Y.; Li, Y.;& Yan, D.: Corrosion behavior of plasma sprayed ceramic and metallic coatings on carbon steel in simulated seawater. *Materials & Design (1980-2015)*, 52, 630-637 (2013).<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.002>
- [43] Zou, Y.; Wu, Y.;Zou, G.; Wang, G.; Zheng, Z.; Qiu, Z.; ... & Zeng, D.: Tribological properties and corrosion behavior of AC-HVAF sprayed nanostructured NiCrCoAlY-TiB₂ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 406, 126739 (2021).<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126739>
- [44] Wen, J.; Cui, H.; Wei, N.; Song, X.; Zhang, G.; Wang, C.;& Song, Q.: Effect of phase composition and microstructure on the corrosion resistance of Ni-Al intermetallic compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 2424-2433 (2017).<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.138>
- [45] Haixiang, C.;& Dejun, K.: Comparison on electrochemical corrosion performances of arc and laser thermal sprayed Al-Ti-Ni coatings in marine environment. *Materials Chemistry and Physics*, 251, 123200 (2020).<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123200>

CHAPITRE I

CHAPITRE II

CHAPITRE III

CHAPITRE IV