

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Echahid HAMMA Lakhdar EL-OUED



Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Polycopié de Cours

(Niveau : 2^{ème} année Licence Génie Mécanique)

Science des Matériaux

Elaboré Par :

Dr. Mohammed Iliasse BOULIFA

Année universitaire : 2020-2021

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

Université Echahid Hamma Lakhdar EL-OUED

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Polycopié de Cours

Science des Matériaux

(Niveau : 2^{ème} année Licence Génie Mécanique)

Elaboré Par :

Dr. Mohammed Iliasse BOULIFA

Maitre de conférences "B"

Année universitaire : 2020-2021

SOMMAIRE

Avant-propos	i
Partie I : Plan de cours	
1. Information sur le cours.....	ii
2. Présentation du cours.....	ii
3. Contenu.....	iii
4. Pré-requis.....	vi
5. Place du cours dans le programme.....	vi
6. Visées d'apprentissages.....	vi
7. Modalités d'évaluation des apprentissages.....	vii
8. Activités d'enseignement-apprentissage.....	ix
9. Alignement pédagogique.....	x
10. Modalités de fonctionnement.....	xi
11. Ressources d'aides.....	xi
Partie II : Cours	
Chapitre I : Généralités	1
I.1. Classification des matériaux.....	1
I.1.1. Métaux et alliages.....	2
I.1.2. Céramiques et Verres.....	2
I.1.3. Polymères.....	2
I.1.4. Matériaux composites.....	3
I.2. Domaines d'utilisations.....	4
I.3. Structure des matériaux : matériaux amorphes et matériaux cristallins.....	6

I.4. Notions de cristallographie.....	9
Chapitre II : Diagrammes d'équilibre.....	22
II.1. Cristallisation de matériaux.....	22
II.1.1. Principe de la cristallisation et courbes de refroidissement.....	22
II.1.2. Cristallisation d'un métal pur.....	25
II.1.3. Cristallisation d'un alliage.....	27
II.2. Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles.....	29
II.3. Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles.....	32
Chapitre III : Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	37
III.1. Caractéristiques du fer et du carbone.....	37
III.2. Diagramme d'équilibre fer-cémentite	42
III.3. Diagramme d'équilibre fer-graphite.....	49
III.4. Désignation normalisée des aciers et des fontes.....	53
III.5. Désignation normalisée d'autres aciers alliés.....	57
Chapitre IV : Traitements thermiques et traitements thermochimiques de diffusion.....	60
IV.1. Traitements thermiques.....	61
IV.1. 1. Buts des Traitements thermiques.....	61
IV.1. 2. Procédés des traitements thermiques.....	62
IV.1. 3. Constituants métallographiques issus des traitements thermiques.....	63
IV.1. 4. Effet de la température d'austénitisation, de la teneur en carbone et des éléments d'alliage sur le processus des traitements thermiques.....	64
IV.1. 5. Classification des traitements thermiques.....	65
IV.1.5.1. Recuit.....	66

IV.1.5.2. Trempe et Revenu	68
IV.2. Traitements thermochimiques.....	70
IV.2.1. Cémentation.....	70
IV.2.2. Nitruration.....	71
IV.2.3. Carbonitruration.....	72
V. Références bibliographiques.....	73

Avant-propos

Ce polycopié du cours pour l'enseignement de la science des matériaux, est destiné aux étudiants de deuxième année licence génie mécanique du domaine des sciences et techniques. Ce dernier se compose de deux parties. La première partie présente le plan détaillé du cours, version adaptée aux canevas proposés par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. La deuxième partie concerne le cours contenant les concepts fondamentaux de la science des matériaux. Le contenu de ce cours est le résultat d'une recherche bibliographique basée sur de nombreux documents et ouvrages.

Partie I

Plan de cours

Plan de Cours

1. Informations sur le cours

- **Faculté** : Technologie ;
- **Département** : Génie Mécanique ;
- **Public cible** : 2^{ème} année Licence Génie Mécanique ;
- **Intitulé du cours** : Science des Matériaux ;
- **Crédit** : 01 ;
- **Coefficient** : 01 ;
- **Durée** : 14 semaines ;
- **Volume horaire global** : 22.5 Heures ;
- **Volume horaire de travail requis / semaine** : 01.5 Heures ;
- **Modalité d'évaluation** : 100% Examen ;
- **Enseignant** :
 - ✓ **Cours** : Dr. Mohammed Iliasse BOULIFA ;
 - ✓ **Contact** : par mail au boulifa-mohiliasse@univ-eloued.dz ;
 - ✓ **Disponibilité** : Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique ;
 - ✓ **Réponse sur le forum** : toute question en relation avec le cours doit être postée sur le forum dédié pour que vous puissiez, tous, tirer profit de ma réponse, je m'engage à répondre aux questions postées dans un délai de 48 heures ;
 - ✓ **Par mail** : Je m'engage à répondre par mail dans 48 heures qui suivent la réception du message, sauf en cas d'imprévu. J'attire votre attention que le canal de communication privilégié est le forum. L'e-mail est réservé aux « urgences » (en cas de problème d'accès à la plateforme) et doit être utilisé avec discernement.

2. Présentation du cours

La science des matériaux repose sur la relation entre les propriétés, la morphologie structurale et la mise en œuvre des matériaux qui constituent les objets qui nous entourent (métaux, polymères, semi-conducteurs, céramiques, composites, etc.). Elle est au cœur de beaucoup des grandes révolutions techniques.

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel. La réussite technique et le succès commercial d'un produit fabriqué dépendent en grande partie du ou des matériaux choisis. Sélectionner un matériau n'est généralement pas une opération simple compte tenu de la grande variété proposée. Le choix dépend autant du prix que des qualités propres du matériau et du procédé

de fabrication retenu pour sa réalisation. La sélection est le plus souvent effectuée en équipe, client et concepteur étant associés aux techniciens de fabrication.

Ce cours intitulé «science des matériaux» permet d'approfondir dans le domaine de l'industrie, les connaissances relatives à la structure et aux propriétés des matériaux, à leur évolution et leur comportement au cours des traitements thermiques et être capable à expliquer les phénomènes des transformations de phases qui en découlent. Le cours est devisé en un ensemble d'unités d'apprentissage qui permettent d'acquérir des compétences en matière d'utilisation des matériaux dans l'industrie liés à la discipline tels que le choix et la sélection des matériaux, les domaines d'utilisation et les traitements des matériaux métalliques. L'acquisition scientifique dans le domaine des matériaux permettent aux apprenants de contribuer fortement au développement de nouveaux produits bien adaptés aux exigences du marché.

3. Contenu

Le cours est subdivisé en quatre unités d'apprentissages. Chaque unité est traitée à travers des séquences pédagogiques permettant l'assimilation des concepts prévus. Cette assimilation est consolidée par des activités d'apprentissages où ces notions sont mises en œuvre, d'où l'intérêt de ce cours. L'ensemble des unités d'apprentissage sont décrites ci-dessous.

Ces unités donnent un aperçu général sur la science des matériaux, la relation entre les propriétés, la morphologie structurale et la mise en œuvre des matériaux qui constituent les objets qui nous entourent (métaux, polymères, semi-conducteurs, céramiques, composites, etc.).

a. Généralités

Ce chapitre traite la classification des matériaux, domaines d'utilisations, structure des matériaux et la notion de cristallographie.

b. Diagrammes d'équilibre

Dans cette partie sont présentés et expliqués les diagrammes d'équilibre, leurs constituants, le principe de la cristallisation et les courbes de refroidissement ainsi la cristallisation d'un métal pur et la cristallisation d'un alliage.

c. Diagramme d'équilibre fer-carbone

Cette unité traite en particulier les diagrammes fer-carbone et fer-cémentite, les caractéristiques du fer et du carbone et ainsi que la désignation normalisée des aciers et des fontes.

d. Traitements thermiques et traitements thermo-chimiques de diffusion

Dans cette partie sont présentés les différents traitements des métaux tels que les traitements thermiques et les traitements thermo-chimiques.

a. Généralités

- Classification des matériaux :
 - ✓ Métaux et alliages ;
 - ✓ Céramiques et verres ;
 - ✓ Polymères ;
 - ✓ Matériaux composites.
- Domaines d'utilisations.
- Structure des matériaux : matériaux amorphes et matériaux cristallins.
- Notions de cristallographie.

b. Diagrammes d'équilibre

- Cristallisation des matériaux :
 - ✓ Principe de la cristallisation et courbes de refroidissement ;
 - ✓ Cristallisation d'un métal pur ;
 - ✓ Cristallisation d'un alliage.
- Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles.
- Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles.

c. Diagramme d'équilibre fer-carbone

- Caractéristiques du fer et du carbone.
- Diagramme d'équilibre fer-carbone.
- Diagramme d'équilibre fer-cémentite.
- Désignation normalisée des aciers et des fontes.
- Désignation normalisée d'autres aciers alliés.

e. Traitements thermiques et traitement thermochimiques de diffusion

- Traitements thermiques :
 - ✓ Recuit ;
 - ✓ Trempe ;
 - ✓ Revenu.
- Traitements thermochimiques :
 - ✓ Cémentation ;
 - ✓ Nitruration ;
 - ✓ Carbonitruration.

Le contenu de ce module est représenté schématiquement sous forme de carte conceptuelle présentée par la figure 1.

Spécialité: Génie mécanique
 Semestre: 4
 Unité d'enseignement: UED 2.2
 Matière 2: Science des matériaux
 VHS: 22h30 (Cours: 1h30)
 Crédits: 1
 Coefficient: 1
 Mode d'évaluation : Examen 100%

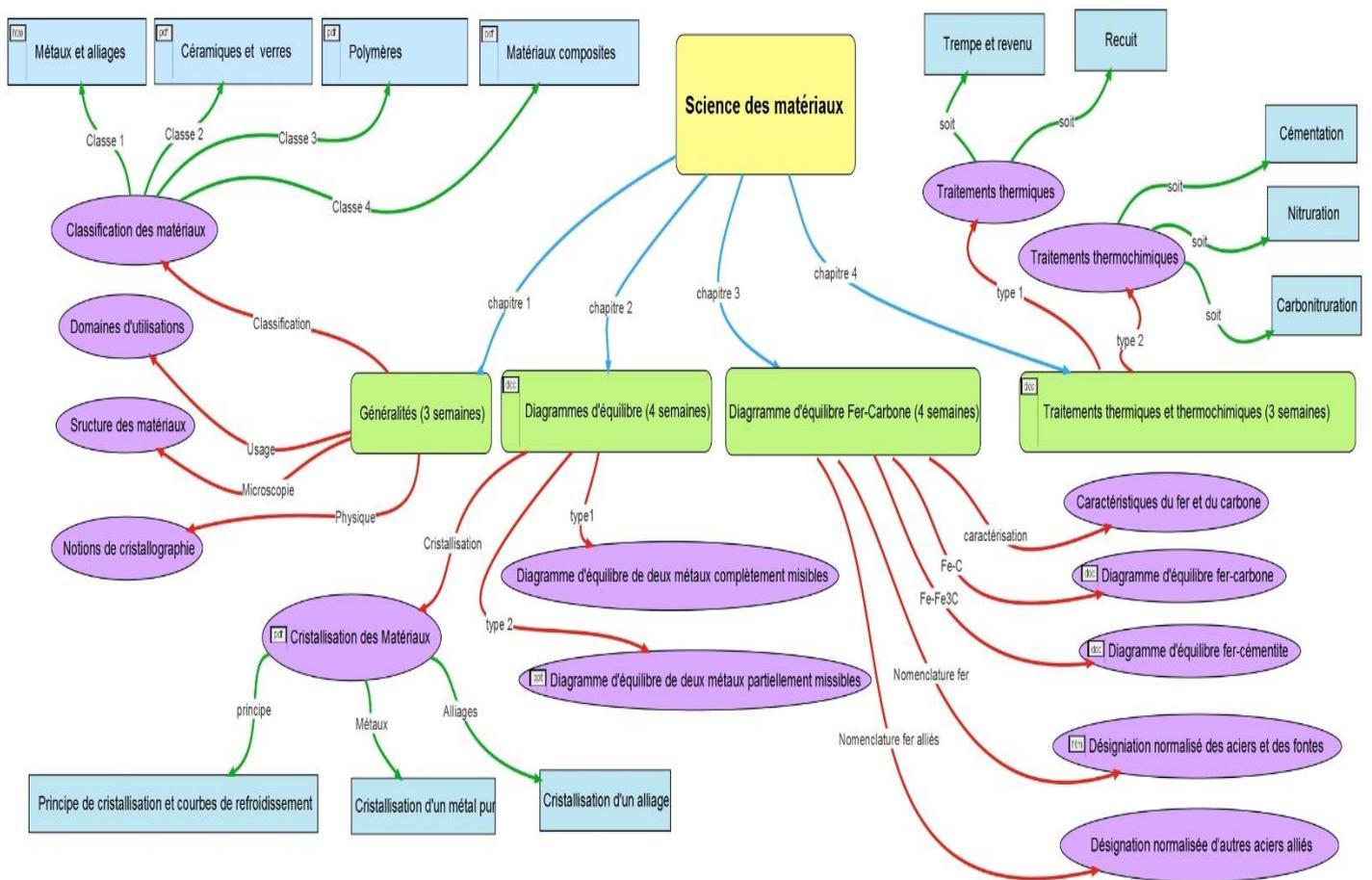


Figure 1. Programme du cours science des matériaux

4. prérequis

L'étudiant doit avoir préalablement prérequis sur matières fondamentales du S1 et S2 à savoir :

- Structure de la matière
- Thermodynamique

Pour tester ces deux prérequis, un test d'entrée est mis à la disposition des apprenants sur la plateforme d'enseignement à distance :

<http://elearning.univ-eloued.dz>

« Utiliser votre identifiant (Username et Password) après inscription sur la plateforme puis choisie le cours en question « SDM ».

Le test est disponible dès la première semaine et il est accessible tous le temps afin que vous puissiez le refaire.

5. Place du cours dans le programme

Le cours science des matériaux tient une place très importante dans le programme d'enseignement dédié aux étudiants inscrit en deuxième année licence, spécialité : "génie mécanique". Ce cours fait partie des unités d'enseignement de découverte. Cette unité d'enseignement a pour code : UED 2.2. Elle permet d'approfondir les connaissances relatives à la structure et les propriétés des matériaux, à leur évolution et leur comportement au cours des traitements thermiques et thermochimiques. Ce cours aussi permet aux étudiants d'être capables à expliquer les phénomènes techniques impliqués dans chaque état des propriétés et de transformation.

6. Visées d'apprentissages

La compétence visée, à l'issue de ce cours consiste à ce que l'étudiant sera capable de :

- Classer et sélectionner les matériaux ;
- Expliquer les notions de base de cristallographie ;
- Reconstruire et interpréter les diagrammes d'équilibre ;
- Appliquer les traitements thermiques et thermochimiques.

C'est une performance complexe, que l'apprenant va construire progressivement en maîtrisant des savoirs, en mettant en œuvre des savoir-faire et en le faisant avec un savoir-être de professionnel.

- En termes de savoir, l'apprenant doit apprendre à classer les matériaux selon leur composition chimique et leur structure, leurs domaines d'utilisation et les notions de base de cristallographie ;
- En termes de savoir-faire :

- ✓ L'apprenant doit être capable de reconstruire et d'expliquer les diagrammes d'équilibre, les phénomènes transformation de phases sous l'effet de la température ;
- ✓ L'apprenant doit être capable de maîtriser les mécanismes de traitement thermique et thermochimique.
- En termes de savoir-être, l'apprenant doit respecter des exigences et les conditions d'utilisation des diagrammes d'équilibre et de traitements thermiques et thermochimiques.

7. Modalités d'évaluation des apprentissages

7.1. Examen final

L'examen final sera programmé à la fin du programme. Il s'agit d'un examen écrit et qui porte sur tout ce que les apprenants ont acquis dans le présent cours pendant le semestre, qui compte sur 100% de la note finale. L'apprenant aura :

- A répondre à des questions de synthèse (via un QCM) ;
- A répondre à des questions de réflexion (dont il était entraîné à répondre sur ce genre de questions posées lors du cours et les quiz proposés en ligne).

Les réponses des apprenants sont évaluées par rapport à un corrigé type réalisé selon les informations données dans les unités apprentissages.

7.2. Evaluation formative

Elle est assurée par des activités ponctuelles (à distance et en présentiel). Elle n'est pas rémunérée par des notes mais elle aide l'apprenant à réussir son examen final.

Chaque activité d'apprentissage est concrétisée par une série d'exercice qui prenne la forme du QCM, questions courtes ou textes à compléter. Tous les quiz réalisés sont suivis par un feedback servant soit à vous permettre de passer à l'unité suivante, soit à revoir l'unité.

Des examens blancs à travers un ensemble de questions englobant tous les éléments acquis dans le cours. Le feedback est affiché à la fin du test afin d'orienter l'apprenant vers les points à revoir soit :

- **A distance**

Tous les quiz réalisés sont suivis par un feedback servant soit à passer à l'unité suivante, soit à revoir l'unité.

- **En présentiel**

La présence au cours permet à l'apprenant de tirer profit des débats initiés par des questions, des échanges et des interactions entre enseignant-apprenant, ce qui aide à mieux comprendre les concepts donnés et cerner le sujet en question.

Le tableau 1. résume les types et modalités d'évaluation du cours :

Tableau 1. Types et modalités d'évaluation du cours

Type d'évaluation	Période de l'évaluation	Modalité de l'évaluation		Objectifs de l'évaluation
Diagnostique	Au début du cours	test des pré-requis	Quiz en ligne	Tester les connaissances préalables permettant le bon suivi du cours et pour une orientation en cas d'échec.
Formative	Pendant le semestre	Activités d'apprentissage	Questions orales.	Tester les connaissances acquises nécessaires au bon déroulement de l'unité d'apprentissage.
			Exercices d'application	Permettre la mise en relation entre les connaissances acquises et leurs applications
			Quiz en ligne.	Développer l'autonomie de l'apprenant quant à la réalisation des exercices ce qui permet de détecter ses lacunes et corriger ses points faibles avant de passer à la prochaine unité d'apprentissage.
Sommativ	Pendant le semestre	Activités d'apprentissage	Interrogations de courte durée	Se préparer à l'examen final
			Projet individuel	Développer l'autonomie de l'apprenant et le préparer à la réalisation d'un grand projet qui sera collectif.
			Projet collectif.	Développer l'aspect professionnel et mesurer L'attitude de l'apprenant quant au travail d'équipe (l'esprit organisationnel, mutualisation des travaux, respect des points de vu, travail collaboratif...)
Certificative	A la fin du semestre	Examen sur table	Exercices et éventuellement des questions de cours	Prise de décision quant à la validation du cursus.

8. Activités d'enseignement-apprentissage

Afin que l'apprenant puisse assimiler les nouvelles connaissances et développer son aspect professionnel, le cours propose plusieurs méthodes ayant leurs spécificités et leurs avantages :

➤ En présentiel

- ✓ La transmission des savoirs est assurée à travers un cours magistral, durant lequel les étudiants sont invités à prendre des notes qui leur permettront de réaliser des activités d'apprentissage proposées pendant la séance ;
- ✓ Les étudiants sont invités à la participation aux débats, initiés par des questions posées sur la séquence pédagogique en cours, sans aucune forme d'évaluation, dans le but de développer des échanges entre les apprenants et enseignant. Ils sont invités à participer librement à ces débats en proposant des réponses aux questions posées afin de mobiliser leurs connaissances et de comparer leurs points de vue et d'en tirer des bénéfices pédagogiques de ces échanges ;
- ✓ Des projets individuels sont proposés, afin de développer l'autonomie des apprenants et leurs réflexions.

➤ A distance

Les apprenants sont appelés à :

- ✓ Participer au forum intitulé « débat » qui se trouve au début de la section contenant le « chapitre ». Une question est posée sur le forum au début de chaque chapitre et autour de laquelle un débat doit se construire, en répondant, en prenant connaissance des réponses des autres, en les analysant, en comparant les réponses afin de déduire les lacunes. C'est une méthode qui permet d'aider les apprenants au développement de leurs réflexions et à la prise de conscience de leurs progressions ;
- ✓ Consulter le cours, en PDF ou en page web (SCORM) mis à leur disposition pour les aider à organiser leurs prises de notes en présentiel. Cette version contient également des activités d'apprentissage insérées dans les différentes séquences pédagogiques.

A la fin de chaque activité d'apprentissage :

- ✓ Faire le quiz, contenant différents types de questions (QCM, QCU, question à trou, questions à réponses courtes...), ce qui devrait aider les apprenants à faire une synthèse de ce qu'ils ont appris et de détecter leurs lacunes ;
- ✓ Poser des questions à propos du chapitre en cours sur le forum intitulé « *Posez ici vos questions* » et répondre à leurs camarades. Il s'agit d'encourager les échanges entre eux, de développer la métacognition et le conflit sociocognitif.

Le tableau 2. donne une vue globale des objectifs et de l'ensemble des méthodes qui viennent d'être présentées pour aider à comprendre pourquoi les méthodes sont pertinentes et complémentaires.

Tableau 2. Vue globale des objectifs et les méthodes déployées

Vue globale des objectifs et des méthodes déployées		
Modalités	En présentiel	En ligne à travers
Les savoirs	Cours théorique en amphi Débats en amphi Prise de notes	<ul style="list-style-type: none"> • Les forums • Les quiz • Le cours en ligne
Les savoirs-faire	Interrogations écrites et orales Projet individuel (présentation et consultation avec l'enseignant)	<ul style="list-style-type: none"> • Les quiz d'auto-évaluation • Le projet individuel (dépôt et interactions entre les pairs).
Les savoirs-être	Projet individuel (présentation et consultation avec l'enseignant)	Le projet individuel (dépôt et interactions entre les pairs).

9. Alignement pédagogique

La compétence visée dans ce cours repose sur les trois piliers : savoir ; savoir-faire et savoir être tous ces piliers sont nécessaires et nécessitent des méthodes pour pouvoir les atteindre et des évaluations pour tester la compréhension des étudiants et se renseigner sur l'atteinte des objectifs. Les objectifs généraux et spécifiques tracés du cours ont été présentés ainsi que les compétences que l'apprenant doit posséder au terme du cours. Un test de niveau (pré-test) pour contrôler et avoir une idée sur le degré de connaissance des apprenants et pour pouvoir réussir le cours est nécessaire.

Pour que l'étudiant puisse consulter son cours, ceci est disponible sur la plateforme E-learning en format PDF ou page web et par la suite nous détaillons chaque chapitre du cours en s'appuyant sur plusieurs activités d'apprentissage.

Le savoir-être permet à l'apprenant de développer son autonomie et sa réflexion progressivement vis-à-vis de la réalisation des projets individuels. L'apprenant doit respecter des exigences et les conditions d'utilisation des diagrammes d'équilibre et de traitements thermiques et thermo-chimique. Tout en profitant des débats entamés en amphi ou en ligne à travers les forums de discussion, l'évaluation porte sur la présentation, la clarté et le fond du travail ainsi que le respect des échéances.

10. Modalités de fonctionnement

L'étudiant doit être intelligent pour savoir que certaines remarques doivent être prise en considération à savoir :

- la présence au cours est très importante pour l'étudiant pour mieux comprendre les explications;
- La participation dans le cours telle que les réponses aux questions posées par l'enseignant facilite la compréhension du cours ;
- Donner des exemples et prendre la parole pour définir une notion proposée par l'enseignant ;
- Le respect et le sérieux avec une bonne tenue en salle (respect mutuel entre étudiant-étudiant et étudiant-enseignant) ;
- Le bon usage du courriel pour bien discuter avec l'enseignant et télécharger le support du cours et la documentation et déposer les versions numériques des exposés de tous les étudiants, pour que tout le monde en bénéficie ;
- Faire les travaux individuel ou collectif à la maison ;
- Retenir le cours de telle sorte qu'une fois le programme achevé, l'étudiant doit pouvoir répondre aux questions de l'examen.

11. Ressources d'aide

Les références bibliographiques utilisées lors de l'élaboration de ce polycopié sont présentées dans les pages 73 et 74 de la partie 2 (cours).

Partie II

Cours

Chapitre I : Généralités

Objectifs du chapitre

À l'issue de ce chapitre l'étudiant doit être capable de :

- Classer les matériaux selon leur composition chimique et leur structure métallographique ;
- Sélectionner les matériaux pour une bonne utilisation ;
- Différencier entre les propriétés des corps cristallins et des corps amorphe ;
- Expliquer les notions de base de cristallographie.

I.1. Classification des matériaux

Les matériaux de structure peuvent être classés en quatre grandes familles selon leurs compositions chimiques et structures atomique (nature des liaisons entre les atomes). On peut distinguer :

- Les métaux et alliages ;
- Les céramiques et les verres ;
- Les polymères ;
- Les matériaux composites.

La figure I.1. présente les principales familles des matériaux

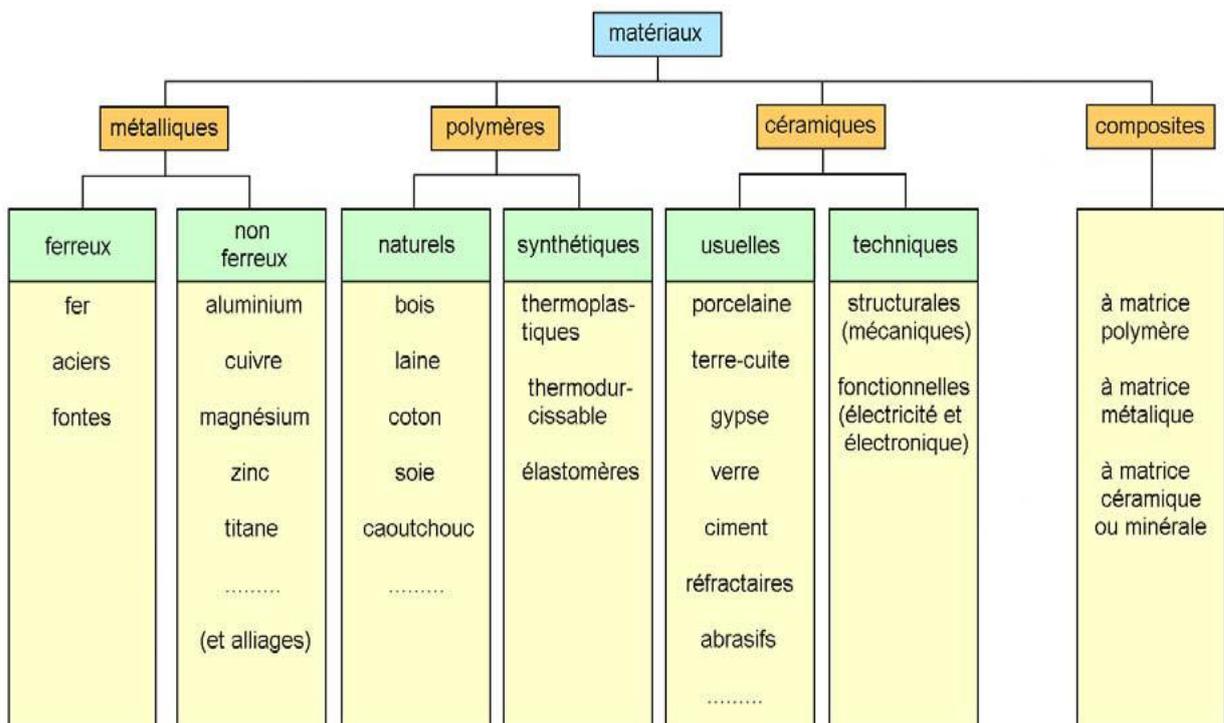


Figure I.1. Principales familles des matériaux

I.1.1. Métaux et alliages

Les matériaux métalliques, sont ceux qui font intervenir une liaison métallique : matériaux durs, rigides et déformables plastiquement. Ce sont des métaux ou des alliages métalliques : fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc. Les métaux et leurs alliages sont ordinairement bons conducteurs de la chaleur, de l'électricité, opaques à la lumière visible qu'ils réfléchissent.

On les obtient soit par réduction à haute température de leurs oxydes en présence de carbone (ex. fer) ou par électrolyse à haute température (ex. aluminium). Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales et pour l'essentiel des métaux ferreux (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique (rivetage, clinchage...). Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques.

I.1.2. Céramiques et verres

Les matériaux minéraux ou céramiques, à liaison ionique et liaison covalente, sont les matériaux inorganiques les plus anciens et les plus couramment utilisés en Génie Civil (pierre, brique, verre...). Souvent ils sont mis en œuvre à l'état pâteux. Ils ne deviennent fragiles qu'après la prise. Ces matériaux sont caractérisés par leur résistance mécanique et thermique (réfractaires), une résistance à l'abrasion, mais pas aux chocs, moins denses que les métaux, et sont isolants thermiques et électriques. Ce sont des roches, des céramiques ou des verres : porcelaine, pierre naturelle, plâtre, etc. et généralement poreux et fragiles.

I.1.3. Polymères

Les matériaux organiques ou polymères organiques à liaison covalente et liaison secondaire sont des matériaux constitués de molécules formant de longues chaînes de carbone. Ce sont matériaux faciles à mettre en forme, et supportent rarement des températures supérieures à 200 °C. Ils sont d'origine animale, végétale ou synthétique (bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, caoutchouc, cuir, etc...). Ce sont presque toujours des isolants thermique et électrique.

Ces matériaux sont récents. Ce sont de larges macromolécules organiques, comme par exemple le polyéthylène $(C_2H_4)_n$ dont le nombre de monomères n varie entre 100 et 1000 et la masse molaire de $M=100$ à 10^3 kg/mol. Les matières plastiques ont l'avantage de pouvoir être mises en forme par déformation plastique ou injection à l'état liquide. Elles peuvent être thermoplastiques (recyclables et ductiles, comme les métaux) ou thermodurcissables. Elles sont en général mauvais conducteurs de chaleur et d'électricité et très peu denses.

I.1.4. Matériaux composites

Les matériaux composites sont des assemblages (des combinaisons hétérogènes) d'au moins deux des trois types de matériaux déjà cités, non miscibles, mais dont la structure est définie en fonction de l'application : plastiques renforcés de fibre de verre, fibre de carbone, contreplaqué, béton, béton armé, ou bien se développe naturellement sous l'effet des sollicitations mécaniques ou thermique (ex. bois : fibres de lignine dans une matrice de cellulose ou métaux texturés par déformation plastique intense).

Le tableau I.1. présente quelques ordres de grandeurs des valeurs moyennes et des fourchettes de quelques propriétés par grande famille de matériaux.

Tableau I.1. Ordres de grandeurs des valeurs moyennes et des fourchettes de quelques propriétés par grande famille de matériaux

Propriété	Métaux	Céramiques	Polymères
Densité ρ [kg/m ³]	8000 (2000..22000)	4000 (2000..18000)	1000 (900..2000)
Dilatation thermique α [1/K]	$10 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-6}$.. $100 \cdot 10^{-6}$)	$3 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-6}$.. $20 \cdot 10^{-6}$)	$100 \cdot 10^{-6}$ ($50 \cdot 10^{-6}$.. $500 \cdot 10^{-6}$)
Capacité calorifique c_p [J/(kg·K)]	500 (100..1000)	900 (500..1000)	1500 (1000..3000)
Conductivité thermique k [W/(m·K)]	100 (10.. 500)	1 (0.1.. 20)	1 (0.1.. 20)
Température de fusion ou de transition vitreuse T_m [K]	1000 (250..3700)	2000 (1000..4000)	400 (350..600)
Module d'élasticité, module de Young E [GPa]	200 (20..400)	200 (100..500)	1 (10^{-3} ..10)
Coefficient de Poisson	0.3 (0.25..0.35)	0.25 (0.2..0.3)	0.4 (0.3..0.5)
Contrainte à rupture σ_Y [MPa]	500 (100..3500)	100 (10..400 tract.) (50..5000 compr.)	50 (10..150 tract.) (10..350 compr.)
Dureté	Moyenne	Haute	Basse
Usinabilité	Bonne	Très mauvaise	Très Bonne
Résistance à l'impact	Bonne	Mauvaise	Très Mauvaise
Résistance au fluage thermique	Moyenne	Excellente	Très mauvaise
Conductivité électrique	Haute	Très faible	Très faible
Résistance à la corrosion	Moyenne	Excellente	Bonne

I.2. Domaines d'utilisations

I.2.1. Métaux et alliages

Quelques applications des grandes classes des matériaux sont montrées par la figure I.2.



Figure I.2. Exemples d'application des matériaux métalliques

I.2.2. Céramiques et verres

La figure I.3. montre quelques applications en céramiques et en verres (vitres, disques de frein en carbone-céramique, outils de machine-outil en carbure de tungstène, pot catalytique en zircone...).



Figure I.3. Exemples d'application de céramiques

I.2.3. Polymères

La figure I.4. montre quelques applications à base de polymères (bouteilles d'eau en polytéréphtalate d'éthylène (PET), CD en polycarbonate (PC), vêtements en polyéthylène (PE), Rilsan, Gore-tex, bouteilles de lait, canalisations en polyéthylène à haute densité (PEHD), pièces mécaniques en polyamide, mousses d'isolation en polyuréthane (PUR), sacs biodégradables en acide polylactique (PLA), etc...).



Figure I.4. Exemples d'application des polymères

I.2.4. Composites

La figure I.5. montre quelques applications en composites (coques de bateaux, pales d'hélicoptères, aubes de turbine, casques de moto, skis, surfs, planches à voile, arbres de transmission, etc...)

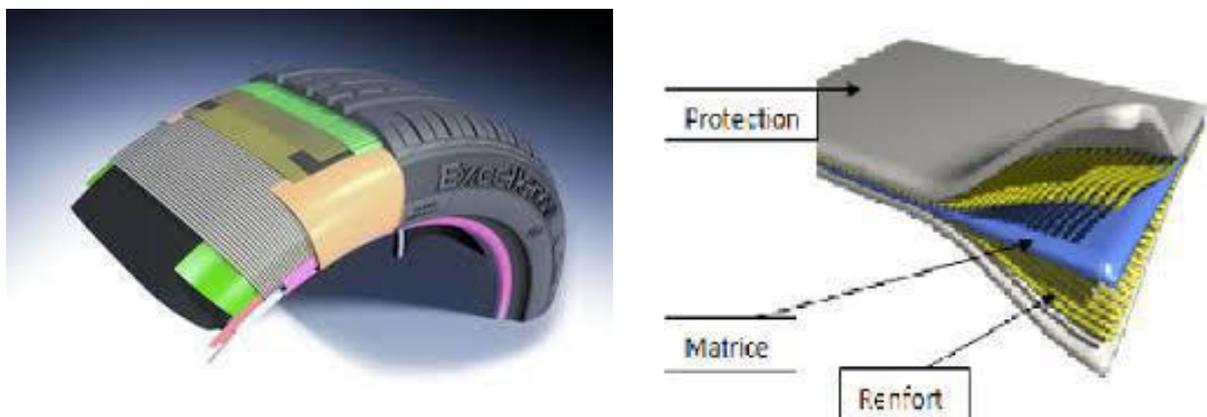


Figure I.5. Exemples d'application des composites

Remarque. Le développement de la protection de l'environnement et du recyclage encourage les entreprises à rechercher de nouveaux matériaux, comme les matériaux biodégradables. L'acide polylactique, extrait de végétaux comme la betterave ou le maïs, en est un bon exemple. Il est actuellement utilisé pour les fils de suture résorbables, pour remplacer les sacs plastiques, ou encore pour les boîtes plastiques.

I.3. Structure des matériaux

I.3.1. Différents états de la matière

La matière dans la nature existe sous trois états différents : état gazeux, état liquide et état solide (figure I.6). Ces états diffèrent entre eux par les interactions entre ses particules constitutives (atomes, molécules ou ions). Les liquides et les gaz sont des fluides déformables sous l'action de forces très faibles. Ils prennent la forme du récipient qui les contient. Par contre les solides ont une forme propre et leur déformation exige des forces extérieures importantes.

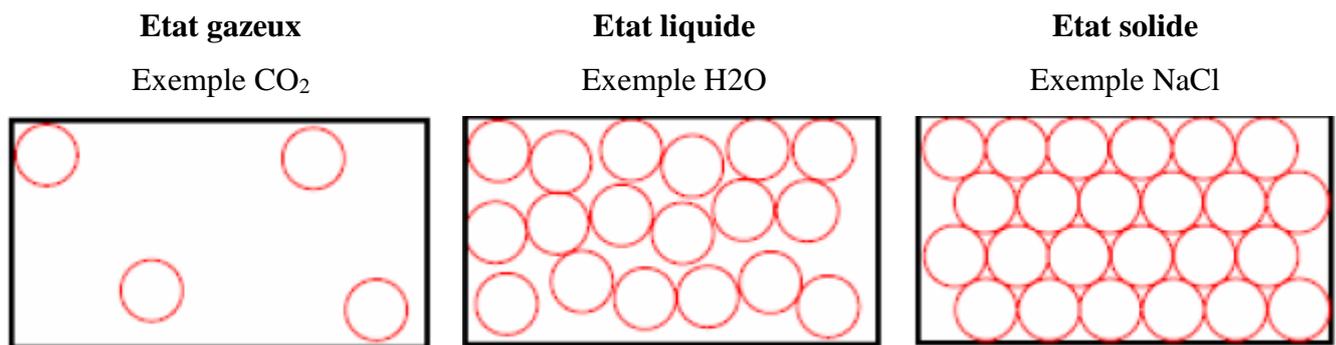


Figure I.6. Etats de la matière

a. Etat gazeux

Les molécules sont indépendantes les unes des autres. Les variables caractérisant cet état sont : le volume, la pression et la température (V, P et T) ; Exemples : H₂, NH₃, CO₂.

b. Etat liquide

Les molécules ne sont plus libres et les forces exercées entre elles sont plus importantes. Les variables utilisées sont la température et le volume (T et V). Exemple : H₂O. Si on continue à diminuer la température d'un liquide jusqu'à sa température de solidification tout, le liquide prend une forme rigide et présente une forte résistance à la déformation.

c. Etat solide

Les forces de liaison entre les particules qui forment le solide (atomes ou molécules) sont plus fortes d'où une grande rigidité. Les solides qu'ils soient naturels ou artificiels peuvent être divisés en deux catégories : les solide amorphes (les matériaux amorphes) et les solides cristallins (matériaux cristallins) (figure I.7).

Par structure cristalline on entend l'arrangement des atomes dans un cristal. Un cristal est défini comme étant un corps solide qui a une structure réticulaire et se compose d'atomes (ions) répartis suivant une succession déterminée qui se produit périodiquement dans les trois dimensions. L'absence de structure réticulaire caractérise le corps amorphe.

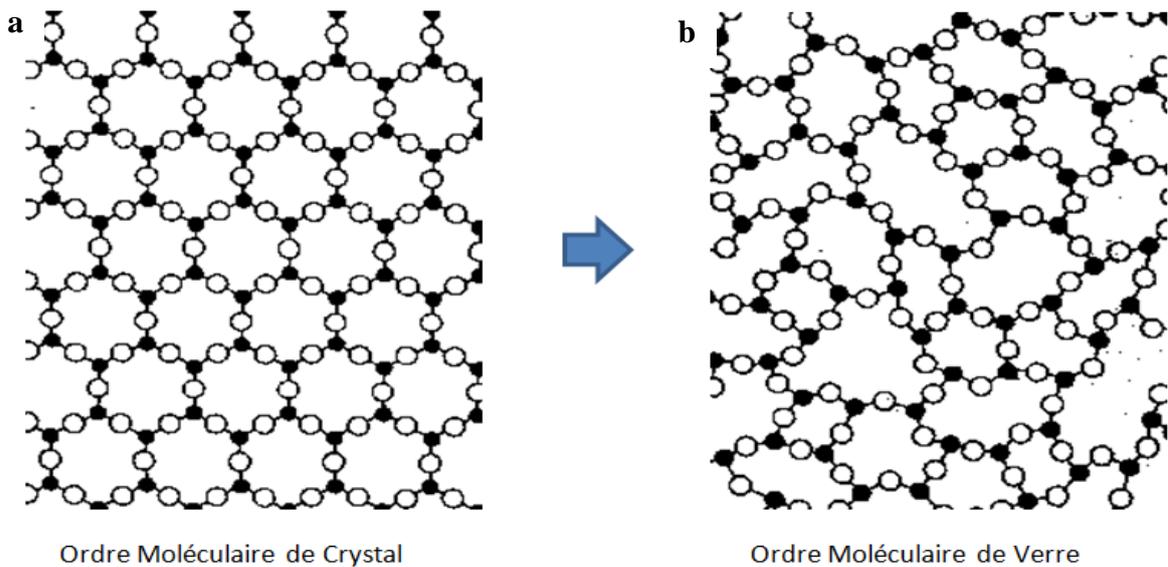


Figure 1.7. Structure cristalline (a) et structure amorphe (b)

I.3.2. Solides amorphes (matériaux amorphes)

Les propriétés des corps amorphes diffèrent largement de celle des corps cristallins. Les corps amorphes sont caractérisés par une disposition chaotique de leurs atomes ce qui donne une structure interne désordonnée (comme un liquide). Un corps amorphe n'a pas de forme géométrique naturelle. Ils sont assimilés à des liquides figés.

Exemples : Les verres, les matières plastiques (caoutchouc).

Les corps amorphes sont caractérisés par :

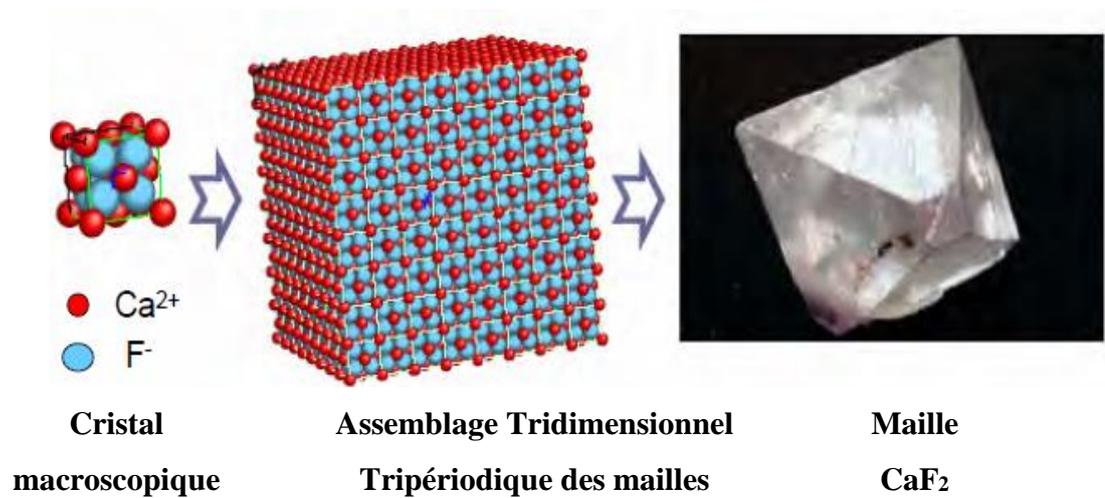
- L'absence d'une température de fusion nettement déterminée. La température de fusion s'étale sur un large domaine de température. (analyse thermique) ;
- L'isotropie (mêmes propriétés physiques et chimiques dans toutes directions) surtout les propriétés ;
- Le diagramme de diffraction des rayons X (DRX) est continu.

I.3.3. Solides cristallins (matériaux cristallins) :

Les Solides cristallins sont caractérisés par

- Un état ordonné, avec des formes géométriques régulières (cubes, hexagones ...etc.) ;
- Des atomes arrangés de façon régulière et répétitive ;
- Un ordre gardé à une longue distance ;
- Des liaisons très fortes (ionique, métallique, etc...).

Exemples : Cristaux de NaCl, de CaF₂ (figure I.8).

Figure I.8. Exemple de cristal du CaF_2

Le corps cristallin est défini par :

- Des diagrammes de diffraction de Rayon X (DRX) discontinus et sous forme de raies ;
- Des températures de fusion franches (Étude par l'Analyse Thermique) ;
- Des propriétés physiques qui varient d'une direction à l'autre : composés anisotropes ;
- Des faces planes qui ont une symétrie (observation par le MEB).

L'étude de ces arrangements ordonnés et de ces symétries dans les solides cristallisés est développée par la cristallographie.

Remarques

On remarque ainsi une différence caractéristique dans les courbes de refroidissement des corps amorphes et cristallins. Le refroidissement des corps amorphes se traduit par une courbe décroissante et continue ;

Aujourd'hui les solides amorphes représentent un grand intérêt dans le domaine de la technologie. Les semi-conducteurs amorphes peuvent remplacer des composants électroniques. Des mémoires d'ordinateurs ont été élaborées à partir de matériaux amorphes.

I.4. Notions de cristallographie

I.4.1. Définition de la Cristallographie

La cristallographie est une science qui étudie les cristaux, c'est à dire la formation, la croissance, la forme extérieure, la structure interne et les propriétés physiques de la matière cristallisée. La cristallographie se distingue progressivement de la minéralogie et se rapproche de la physique et de la chimie en devenant une science indépendante.

La cristallographie est la branche de la science qui se consacre à l'étude de la matière cristalline à l'échelle atomique. Elle s'intéresse essentiellement aux distributions spatiales des atomes ou groupe d'atomes qui sont étroitement liées aux propriétés physico-chimiques d'un cristal.

I.4.2. Etats cristallin

Définition d'un Cristal

Un cristal est un solide polyédrique, à structure régulière et périodique, formée d'un ensemble ordonné d'un grand nombre d'atomes (figure I.9.), de molécules ou d'ions ayant des faces planes qui se rencontrent le long d'arêtes droites (figure I.10.).

Il peut être décrit par translation suivant les trois directions de référence d'une entité de base qu'on appelle la maille. La description du cristal nécessite la connaissance du réseau et celle du motif.

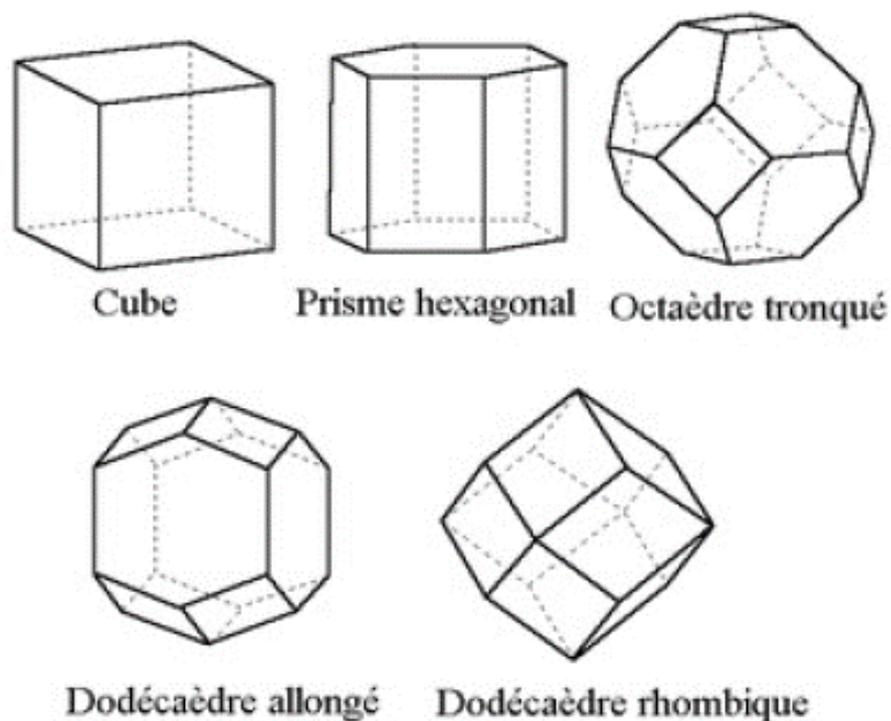


Figure I.9. Représentation de quelques formes polyédriques

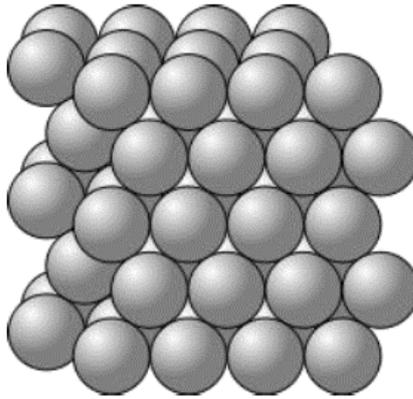


Figure I.10. Arrangement des atomes dans un cristal

Il existe deux types de solides cristallisés :

- ✓ Les cristaux moléculaires
- ✓ Les cristaux macromoléculaires

Les cristaux moléculaires sont formés par des empilements réguliers des molécules, c'est le cas par exemple du diode I_2 , du dioxyde de carbone CO_2 , de l'eau H_2O .etc.

Dans les cristaux macromoléculaires, la notion de molécule en tant qu'entité chimique indépendante est remplacée par le cristal qui constitue ainsi une molécule. On classe parmi les cristaux macromoléculaires :

- Les cristaux ioniques ($NaCl$, $CsCl$, CaF_2 etc...) ;
- Les cristaux covalents (carbone à l'état graphite ou diamant, Si , Ge etc...) ;
- Les cristaux métalliques (Na , Fe , Cu etc...).

Cristal idéal

Le cristal idéal ou parfait est constitué d'une répartition régulière des atomes, des ions ou des molécules suivant les trois dimensions de l'espace et l'arrangement régulier des atomes s'étend pratiquement à l'infini. Il peut être caractérisé comme l'association d'un réseau de points obtenu par des translations, d'un motif de plus petite entité discernable qui se répète par translation.

Cristal réel

Un cristal réel contient un nombre très grand d'atomes. Il n'est pas parfaitement périodique car il présente des défauts comme des lacunes ou des dislocations. Un cristal réel (ou polycristal) est constitué de plusieurs monocristaux, appelés grains ou cristallites (figures I.11 et I.12). Ces monocristaux ont des orientations différentes et sont séparés entre eux par des joints de grains.

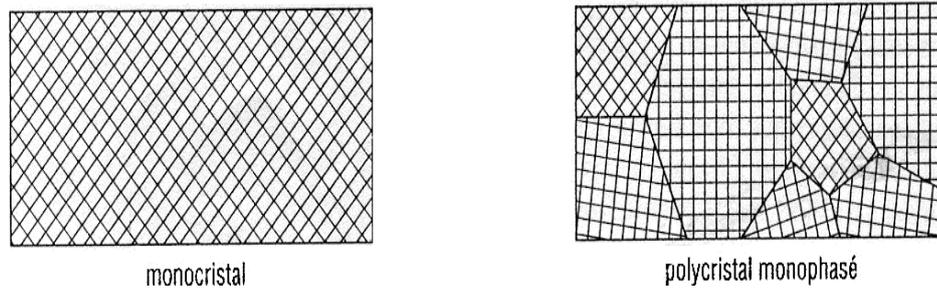


Figure I.11. Représentation schématique d'un monocristal et d'un polycristal

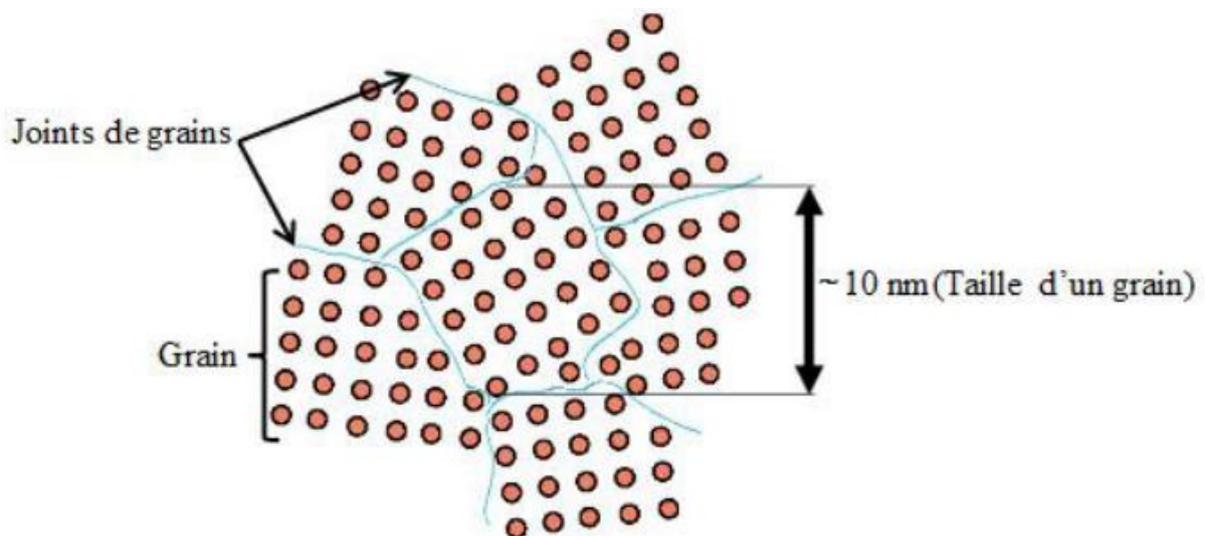


Figure I.12. Représentation d'un cristal réel formé de plusieurs monocristaux

Propriétés des corps cristallins

Les corps cristallins sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- a. Ils sont caractérisés par une certaine anisotropie (les propriétés physiques ne sont pas les mêmes dans les différentes directions). L'anisotropie peut être constatée à l'échelle macro et microscopique.
- b. Un matériau cristallin peut présenter soit :
 - ✓ Un monocristal (cristal unique) par exemple le cristal de quartz, le diamant etc.
 - ✓ Un polycristal ou une agglomération de petits cristaux (échantillon d'acier).
- c. Les cristaux sont caractérisés par des faces planes, des arêtes rectilignes et des sommets tels :

$$F + S = A + 2 \quad (1)$$

F : faces, S : sommets, A : arêtes.

Les faces sont caractérisées par deux lois :

- ✓ Si l'on rapporte les différentes faces d'un cristal à un système de coordonnées à 3 dimensions, la position d'une face quelconque peut toujours être exprimée par trois nombres entiers simples.
- ✓ Si on fait intervenir la notion de réseau tridimensionnel, la position de tout point du réseau peut être indiquée par des coordonnées par rapport à un système d'axes dont l'origine est placée en un nœud du réseau

d. La plupart des cristaux se comportent d'une façon inattendue par rapport à la lumière. Les rayons lumineux se propagent à des vitesses différentes dans les milieux cristallins.

e. Les propriétés d'un cristal peuvent avoir la même valeur dans plusieurs directions et l'on décèle suivant ces directions une symétrie de diverses natures.

I.4.3. Maille, réseau, motif et structure cristalline

Maille

La maille élémentaire est le plus petit parallélépipède qui permet de reproduire tous les réseaux tridimensionnels par translation continue de ces éléments suivant les trois directions. Un réseau cristallin d'un solide est composé d'un nombre infini de mailles élémentaires à l'intérieur desquelles les atomes sont disposés dans un ordre bien défini. Elle est définie par trois vecteurs a , b et c (les périodes suivant les axes ox , oy et oz , respectivement) non coplanaires et trois angles α , β et γ (figure I.13.). Avec cette maille on peut remplir tout l'espace du cristal sans laisser des lacunes.

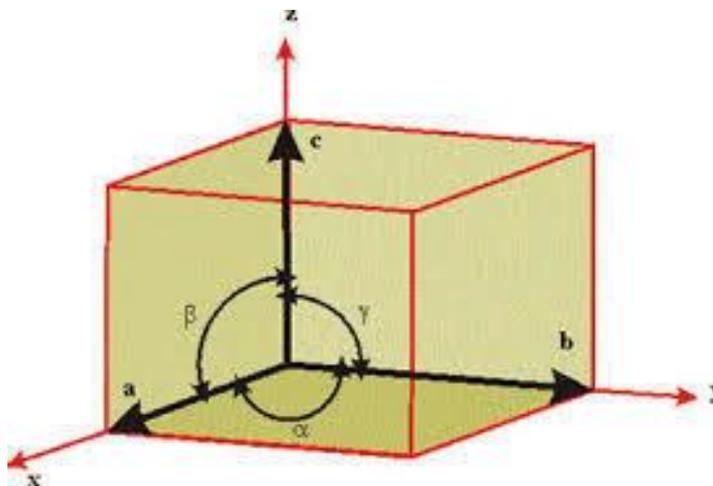


Figure I.13. Maille cristalline (a , b , c , α , β , γ)

Parmi les systèmes cristallins, on trouve (figure I.14.) :

- ✓ **Maille cubique :**
 - **Maille cubique simple :** atomes présents uniquement aux points du réseau ;
 - **Maille cubique à centré (système CC) :** il y a un atome supplémentaire au centre du cube.

- **Maille cubique faces centrées (système CFC)** : chaque face comporte un atome au centre de celle-ci.

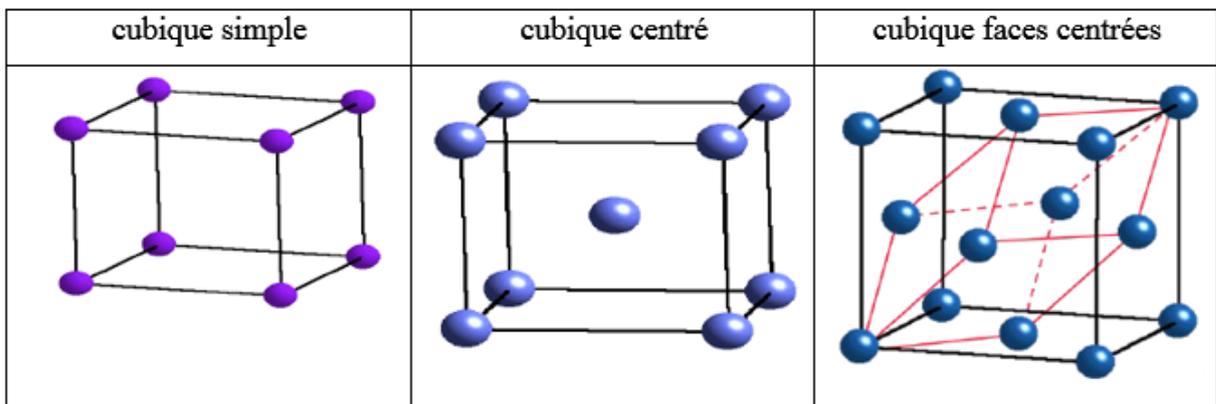


Figure I.14. Différentes structures du système cubique

- ✓ **Maille hexagonal** (figure I.15.) : le système hexagonal peut se décomposer en prismes à base losangique.

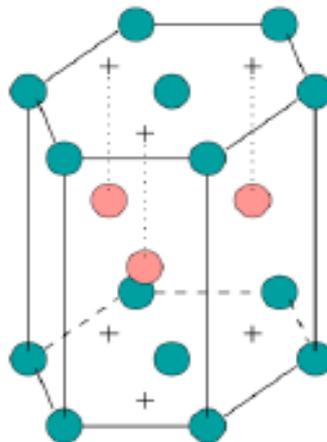


Figure I.15. Structure du système hexagonal

- **Calcul du nombre d'atomes dans les systèmes cubique, et hexagonal compacte** (figure I.16.)

- ✓ **Cubique simple**

$$8 \times \frac{1}{8} = 1 \text{ atome par maille}$$

- ✓ **Cubique à faces centrées (CFC)**

$$1 \text{ atome à chaque sommet : } (8 \times \frac{1}{8})$$

$$\text{atome au centre de chaque face } (6 \times \frac{1}{2})$$

$$\text{donc : } (6 \times \frac{1}{2}) + (8 \times \frac{1}{8}) = 4 \text{ atomes par maille}$$

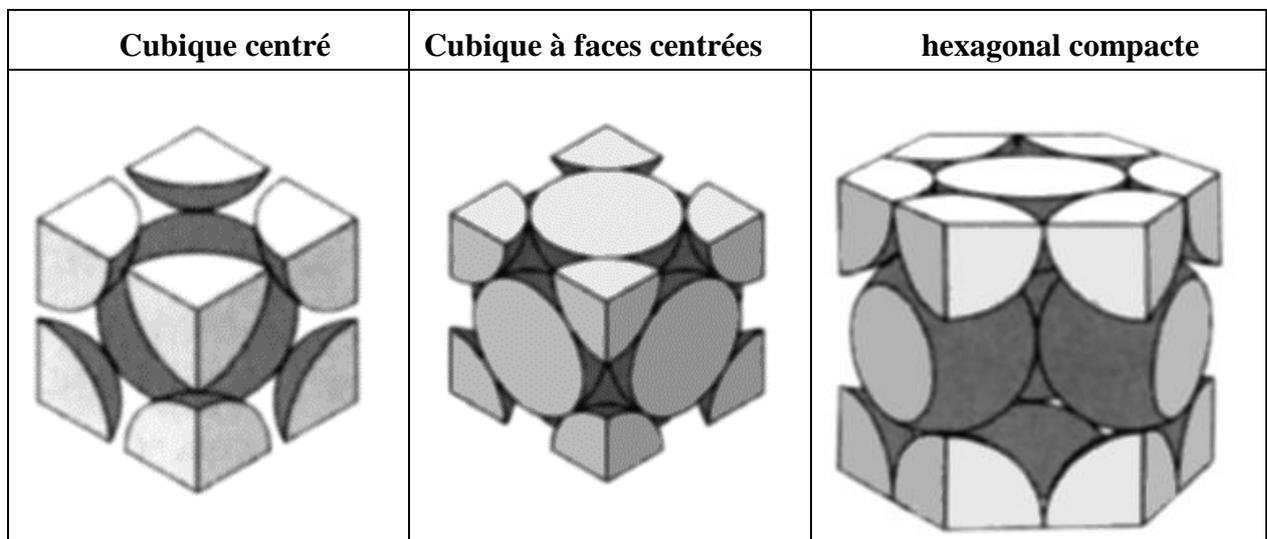
✓ **Cubique centré (CC)**1 atome à chaque sommet : $(8 \times 1/8)$ 1 atome au centre du cube : $(1 \times 1/1)$ donc : $(8 \times 1/8) + (1 \times 1/1) = 2$ atomes par maille✓ **Hexagonal compacte (HC)**1 atome à chaque sommet : $(12 \times 1/6)$ atome au centre des 2 bases : $(2 \times 1/2)$ 3 atomes au centre : $3 \times 1/1$ Donc : $(12 \times 1/6) + (2 \times 1/2) + (3 \times 1/1) = 6$ atomes par maille

Figure I.16. Nombre d'atomes dans les trois structures du système CC, CFC et HC

Maille de Wigner-Seitz

On appelle maille de Wigner-Seitz, l'ensemble de points les plus proches d'un nœud origine que de n'importe quel autre nœud (figure I.17.). L'avantage de cette maille est qu'elle est primitive et possède la symétrie du réseau. C'est pourquoi elle est utilisée en physique. L'inconvénient de cette maille est qu'elle n'est forcément pas parallélépipédique. Elle est constituée en traçant les segments qui relient un nœud particulier à tous ses voisins et en construisant les plans médians (en deux dimensions les médiatrices) de ces segments. La maille de Wigner-Seitz est alors le plus petit volume (en 2 D, la plus petite surface) enfermé par ces plans (médiatrices).

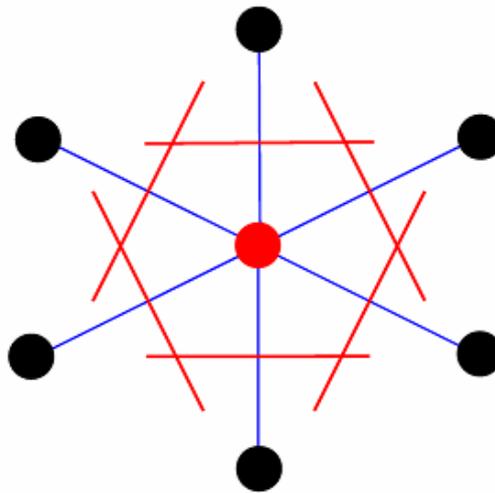


Figure I.17. Méthode de détermination d'une cellule de Wigner-Seitz

Réseau cristallin

Un réseau cristallin (figure I.18.) est constitué par un assemblage d'atomes (ions) arrangés suivant un motif qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Donc un réseau cristallin est un réseau spatial imaginaire ayant pour nœuds des atomes (sommets des parallélépipèdes). Les droites passant par ces nœuds sont appelées rangés.

Le réseau est engendré par la translation de la maille par les vecteurs de base. Tous les nœuds du réseau sont définis par cette translation. Ou autrement dit, le réseau cristallin est une notion purement géométrique et constitué de l'ensemble de points, extrémités de tous les vecteurs de translations possibles.

Le vecteur de translation s'écrit :

$$\vec{T} = u \cdot \vec{a} + v \cdot \vec{b} + w \cdot \vec{c} \quad (2)$$

Tel que : u, v et w trois entiers. a, b et c : trois périodes suivants les trois directions de l'espace ox, oy et oz, respectivement.

Motif

C'est la reproduction indéfiniment et régulièrement des atomes ou ions dans le cristal. Un motif (figure I.18.) est un atome (ion ou molécule) ou un groupement d'atomes de même nature ou de nature différente qui se répète périodiquement, suivant les trois directions de l'espace pour décrire le cristal. L'ensemble régulier de motifs est appelé réseau :

Contrairement au motif le nœud, n'a pas de réalité physique.

La rangée du réseau est un ensemble de nœuds alignés qui est une droite passant par des nœuds du réseau. La distance qui sépare deux nœuds consécutifs d'une rangée est appelée période ou paramètre de rangée.

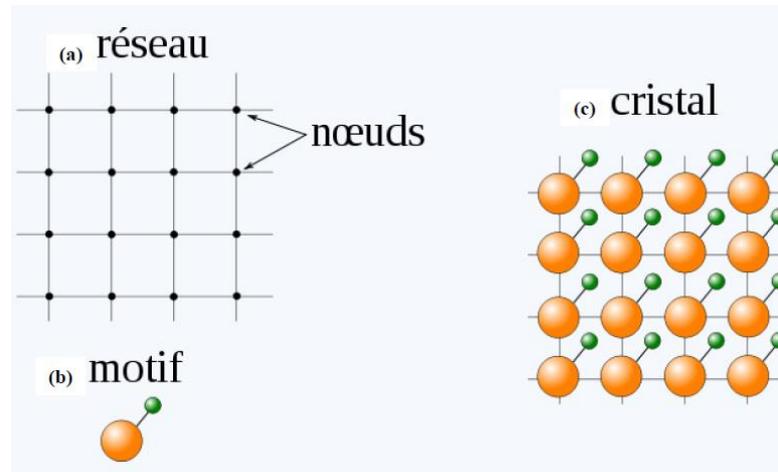


Figure I.18. Représentation à 2 dimensions : (a) réseau (b) et motif (c) structure cristalline (cristal)

Structure cristalline

Pour expliquer les particularités observées dans les cristaux, on doit admettre que tout corps cristallin a une structure ordonnée réticulaire (figure I.19.) qui est indépendante de la nature et de la forme des particules matérielles élémentaires constituant le cristal.

Tous les nœuds sont groupés dans des plans parallèles équidistants appelés plans réticulaires. La distance entre deux plans voisins de la même famille est la distance inter-réticulaire.

Tous les parallélépipèdes qui ont pour sommets des nœuds sont appelés maille du réseau, c'est-à-dire que le volume minimal d'un cristal qui permet de juger de la structure atomique du volume tout entier s'appelle maille cristalline élémentaire.

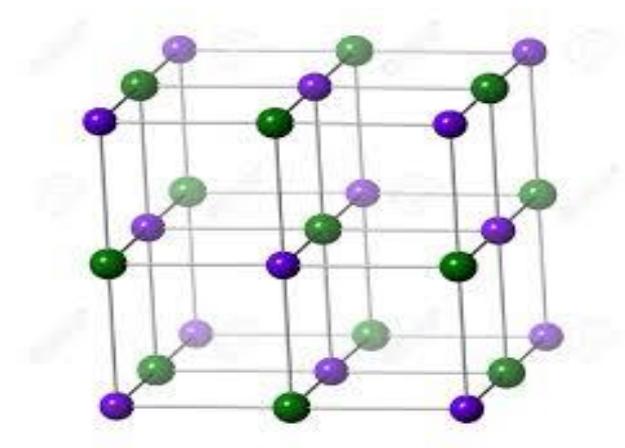


Figure I.19. Structure ordonné réticulaire

D'une manière plus simple on peut mettre on peut considérer que structure cristalline est (figure I.20.) :

Structure cristalline = Réseau + Motif

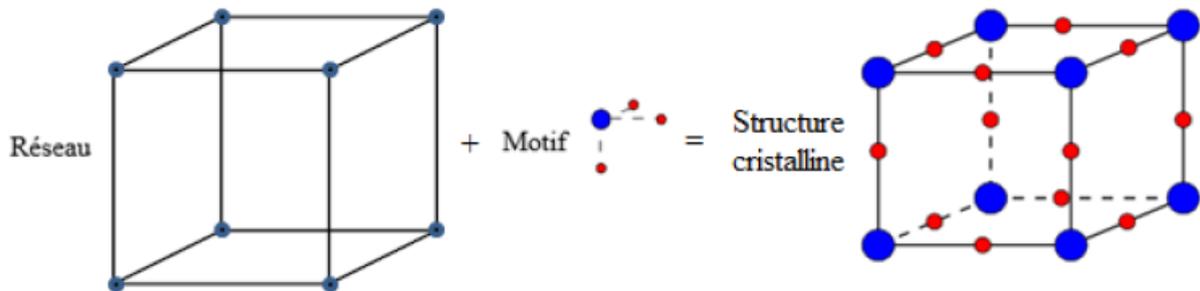
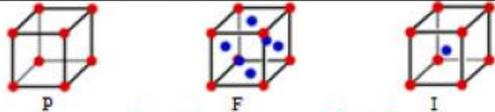
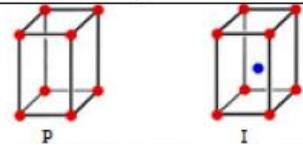
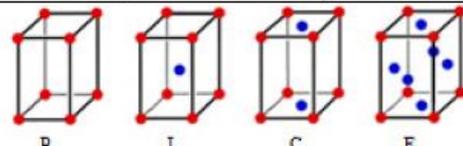
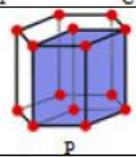
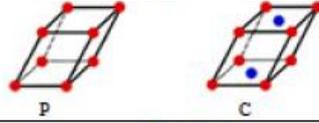
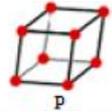


Figure I.20. Structure cristalline tridimensionnelle

I.4.4. Réseaux de Bravais

Le nombre de systèmes cristallins possibles est montré par Auguste Bravais (1848), qui était très limité. Il a classé 14 types de réseaux qui sont groupés dans sept systèmes cristallins. (tableau I.2).

Tableau I. 2. Systèmes cristallins de Bravais

Les 14 réseaux cristallins de Bravais	
Système cubique $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a=b=c$	
Système tétragonal $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a=b \neq c$	
Système orthorhombique $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a \neq b \neq c$	
Système hexagonal $\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$ $a=b \neq c$	
Système monoclinique $\alpha=\gamma=90^\circ, \beta \neq 120^\circ$ $a \neq b \neq c$	
Système triclinique $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$	
Système rhomboédrique $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$ $a=b=c$	

Système cubique

Le système cubique peut avoir un réseau :

- ✓ Réseau cubique simple (P) : atomes présents uniquement aux points du réseau ;
- ✓ Réseau cubique centré (I) : un atome supplémentaire au centre du cube ;
- ✓ Réseau cubique faces centrées (F) : chaque face comporte un atome au centre de celle-ci.

Système hexagonal

le système hexagonal peut se décomposer en prismes à base losangique (P).

Système orthorhombique

Le système orthorhombique peut être simple (P), à 2 faces centrées (C), à faces centrées (F) et à prismes centrés (I).

Système monoclinique : simple (P) ou à faces centrées (F).

Système rhomboédrique : 1 seul réseau (P).

Système tétragonal (quadratique) : simple (P) ou centré (I).

➤ **Système triclinique** : 1 seul réseau (P).

I.4.5. Plans et directions cristallographiques

Pour une structure cubique, du fait de la périodicité du réseau, on peut repérer tout atome du réseau cristallin à l'aide d'indices entiers (x, y et z), et tout plan du réseau cristallin par des indices entiers (indices de Miller), notés généralement $(h\ k\ l)$ pour les plans et $[uvw]$ pour les directions.

Méthode pour désigner un plan

La méthode qui permet de désigner un plan peut être réalisée en :

1. Dessinant un plan dans la maille élémentaire qui ne passe pas par l'origine ;
2. Exprimant les coordonnées des points d'intersection du plan avec les trois (3) axes dans la base (a , b et c) ;
3. Prenant l'inverse de ces coordonnées (uniquement pour les plans) ;
4. Ramenant ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
5. Notant le plan de la façon suivante (hkl) (indices de Miller du plan). Exemple : (figure I.21.)

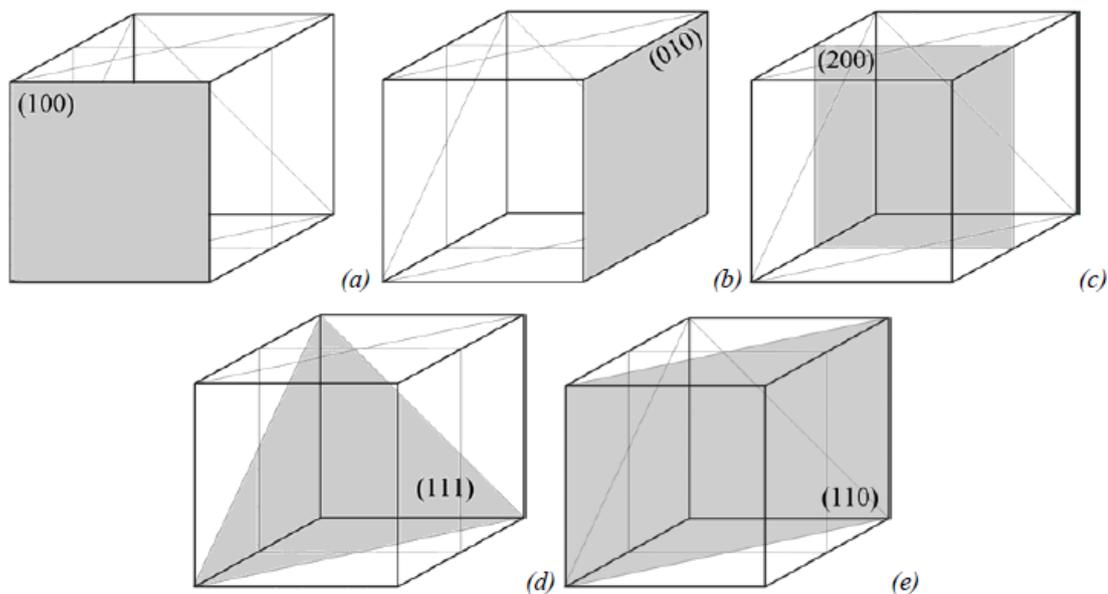


Figure I.21. Exemples des indices de Miller pour les plans

Méthode de désignation d'une direction

La méthode de désignation d'une direction est réalisée en

1. Traçant dans la maille élémentaire un vecteur parallèle à la direction et passant par l'origine ;
2. Projetant le vecteur sur les axes et exprimer ses coordonnées dans la base (a , b , c) ;
3. Ramenant ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
4. Notant la direction de la façon suivante : $[uvw]$ (indices de Miller de la direction).

Exemples : (figure I.22.) :

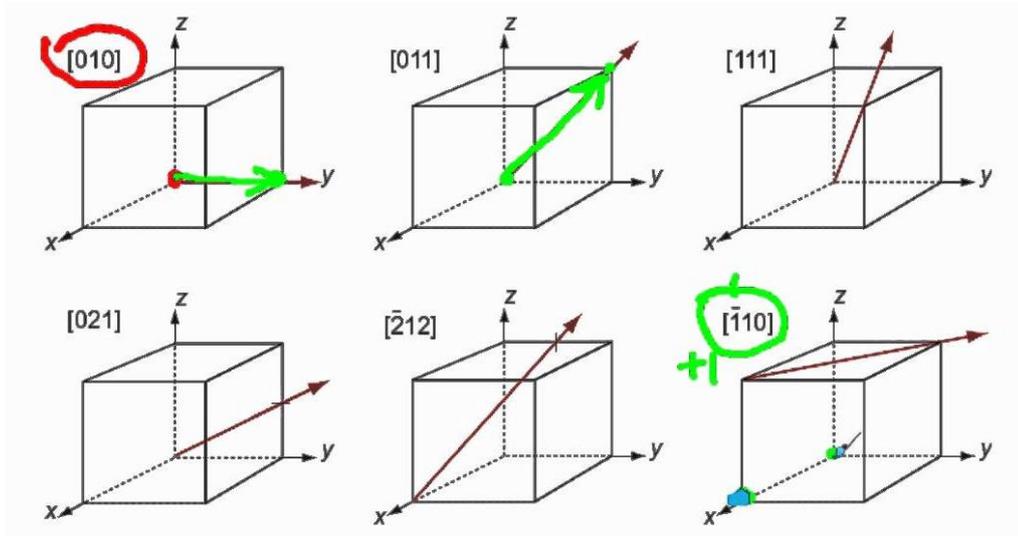


Figure I.22. Exemples des indices de Miller pour les directions

Coordinnence

La coordinnence (ou coordinnance) d'un atome est le nombre d'atomes voisins les plus proches dans les trois directions de l'espace. Elle s'appelle aussi le nombre de coordinnation ou l'indice de coordinnation.

Exemple :

Coordinnence du cristal de polonium : Pour le polonium la coordinnence Po/Po vaut 6 (Figure I.23.).

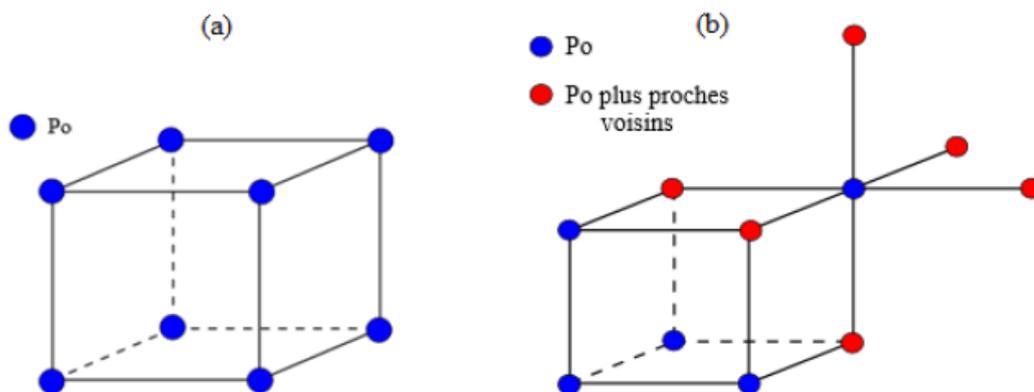


Figure I.23. (a) Cristal de Polonium et (b) Coordinnence du Polonium.

Compacité (densité d'empilement)

En cristallographie, les constituants du cristal (ions, atomes, molécules etc...) sont considérés comme des « sphères dures rigides et indéformables ». Donc on cherche le meilleur moyen d'empiler ces sphères. C'est-à-dire comment les disposer de sorte à en placer un maximum de sphères, dans un espace minimum.

La compacité "C" d'un cristal est le volume occupé par les atomes du motif dans la maille sur le volume de la maille (elle est donc toujours inférieure à 1). La compacité est donnée par la relation :

$$C = \frac{\text{volume occupé par les atomes}}{\text{volume de la maille}} \quad (3)$$

$$V_{\text{maille}} = a^3 V_{\text{motif}} = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (4)$$

Où: a , l'arrête et R , rayon de l'atome

Chapitre II : Diagrammes d'équilibre

Objectifs du chapitre

À l'issue de ce chapitre l'étudiant doit être capable de :

- Reconstruire et interpréter les courbes de refroidissement d'un corps pur et des alliages ;
- Examiner un diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles ;
- Examiner un diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles et extraire le point eutectique et le point péritectique.

II.1. Cristallisation de matériaux

II.1.1. Principe de la cristallisation et courbes de refroidissement

Les diagrammes d'équilibre (autrement dit les diagrammes de phases) sont des représentations graphiques qui résument les constituants d'équilibre d'un système d'alliage, de présenter pour un mélange donné, les phases en présence, en équilibre les unes avec les autres et en accord avec les lois de la thermodynamique.

Pour construire un tel système, il faut lier un nombre de composants indépendants (C) qui vont permettre la formation d'un nombre de phases (ϕ). Dans les diagrammes de phases figurent les zones d'existence des phases dans un repère température-composition. Comme ils montrent aussi des domaines hétérogènes constitués par des mélanges de phases (domaine liquide, solide, liquide + solide).

Les facteurs physiques influençant sur la nature et la composition des phases en présence sont :

- ✓ La température qui a un rôle particulièrement important lors de la coulée et la solidification des alliages, ce qui entraîne des modifications de leur propriétés mécaniques ;
- ✓ La pression qui est généralement négligée car elle n'a d'influence qu'à des niveaux beaucoup élevés.

On peut trouver deux types de transformations dans les diagrammes de phases. Les transformations liquide-solide donnent les diagrammes de solidification et les transformations solide-solide permettant de prévoir les propriétés d'un alliage après traitement thermique.

Définitions

Une phase est un domaine du matériau dont les propriétés physiques et chimiques sont uniformes. C'est l'état sous lequel on trouvera un composant A ou un mélange de composants (A + B). Une phase peut être gazeuse, liquide ou solide. Cette région ou cet ensemble de régions sont caractérisés par une structure et par un arrangement atomique identique.

Un composant est un corps pur. Il peut être simple (exemples : Ti, Ag, Cu etc...) ou un composé chimique (H_2O , Al_2O_3 , SiO_2 etc...).

Un composant peut être présent dans différentes phases, comme un glaçon dans de l'eau liquide, c'est-à-dire, il se trouve en même temps à l'état liquide et à l'état solide. Deux composants mélangés peuvent ne former qu'une seule phase, comme l'eau et l'alcool. S'ils peuvent se mélanger quel que soit le dosage, on dit qu'ils sont totalement miscibles. S'ils ne se mélangent pas, comme l'eau et l'huile, ils forment alors deux phase, distinctes et sont dits non miscibles. Certains métaux ne sont pas miscibles, par exemple le germanium et l'aluminium, pour lesquels, dès le stade de la fusion, les deux phases se retrouvent totalement séparées.

Solidification

Le refroidissement d'un métal ou d'un alliage en fusion jusqu'à la température ambiante entraîne une solidification. Le passage de la phase liquide à la phase solide s'appelle changement de phase.

La cristallisation (phénomène de germination et croissance) commence par la formation de germes et se poursuit avec leur développement et l'augmentation de leur nombre jusqu'à la solidification totale (figure II.1).

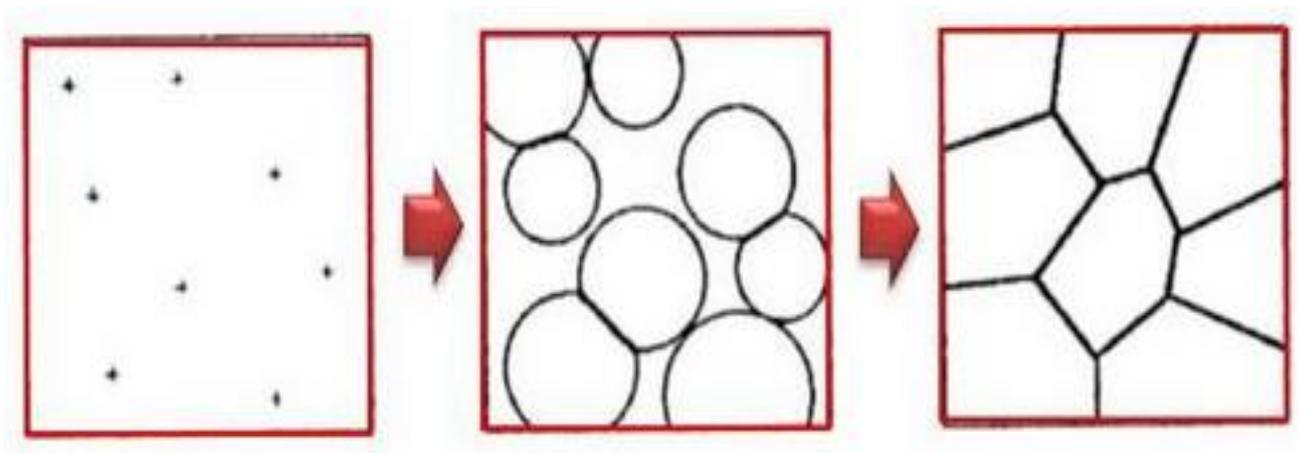


Figure II.1. Représentation schématique de la de germination et croissance

Pour étudier la cristallisation d'un matériau, on le porte en fusion, (état liquide) dans un creuset, enfermé dans une enceinte isotherme, afin de limiter la vitesse de refroidissement. La température à l'intérieur du creuset est mesurée à l'aide d'un thermocouple qui est relié à un enregistreur. Ce dernier permet de tracer la courbe de refroidissement $T = f(t)$ (figure II.2.)

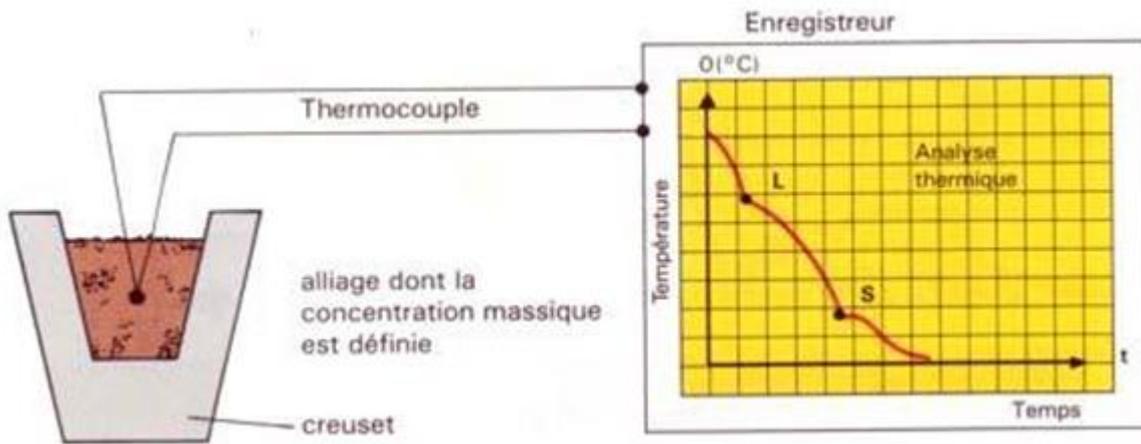


Figure II.2. Méthode de détermination des courbes de refroidissement

Courbe de refroidissement

La courbe de refroidissement (Figure II.3) est une courbe qui représente le changement de l'état du matériau, généralement d'un gaz à un solide ou d'un liquide à un solide. La variable indépendante (axe des abscisses) est le temps et la variable dépendante (axe des ordonnées) est la température. Cette courbe détermine la variation de la température, dans une fourchette de temps, jusqu'à atteindre la température ambiante.

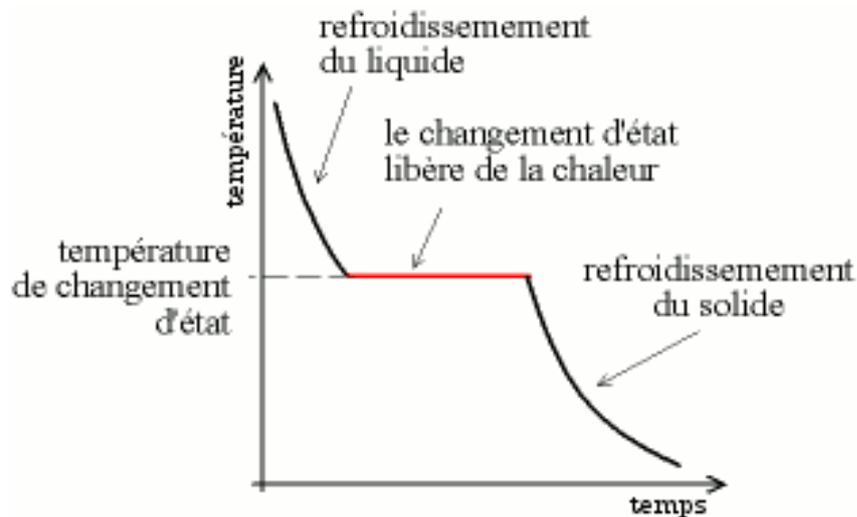


Figure II.3. Courbe de refroidissement

Remarques

Les diagrammes de phases binaires sont les diagrammes les plus simples à établir. Les courbes du diagramme de phases déterminent :

1. Les limites de domaines dans lesquels peuvent exister des phases ;
2. La composition chimique ;
3. Les proportions des différentes phases.

Notion de variance

La variance d'un système est le nombre de facteurs que l'on peut faire varier indépendamment les uns des autres sans provoquer la rupture de l'équilibre.

La variance d'un système est déterminée par :

$$V = c + 2 - \varphi \quad (5)$$

V : Variance

C : Nombre de constituants indépendants

2 : Nombre de variables intensives T et P

φ : Nombre de phases

Pour ce qui est des phases liquides et solides, la pression n'a que peu d'influence et peut être négligée, ce qui permet d'étudier sous un diagramme 2D l'effet de la température et de la composition.

$$V = c + 1 - \varphi \quad (6)$$

1 : variable intensive (T)

II.1.2. Cristallisation d'un métal pur

Lorsqu'un métal, en fusion et refroidi sous pression constante (pression atmosphérique par exemple), le changement de phase s'effectue toujours à une température fixe (point de fusion), c'est-à-dire la température reste constante pendant toute la durée de solidification. Les deux phases liquide et solide co-existent au niveau de ce point de fusion.

Ce point de fusion est déterminé en enregistrant la courbe de refroidissement (température en fonction du temps). La cristallisation étant un phénomène exothermique, au passage du point de fusion. La chaleur perdue lors du refroidissement du matériau est temporairement compensée, ce que montre la figure II. 4. Ce palier isotherme est d'autant plus marqué que le refroidissement est lent et que la masse de matériau est plus grande.

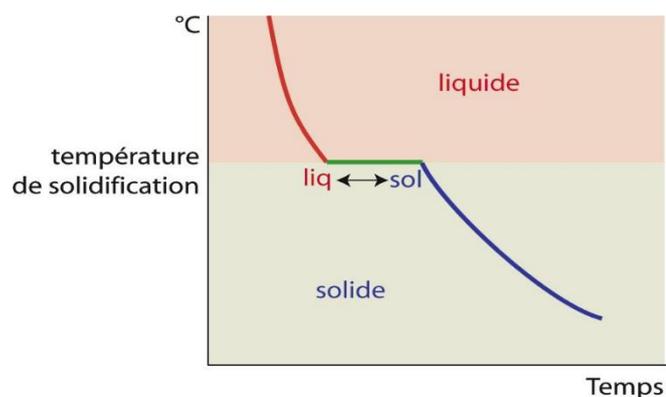


Figure II.4. Courbe de refroidissement d'un métal pur

La cristallisation des métaux à l'état pur, ne se fait que difficilement. Elle s'amorce en dessous de la température de fusion T_f (figure. II.5.). On dit que le métal est en "surfusion".

La surfusion est l'état d'un matériau qui reste en phase liquide alors que sa température est plus basse que son point de solidification. C'est un état dit métastable, c'est-à-dire qu'une petite perturbation existe pour déclencher brusquement le changement vers la phase solide.

Le niveau de surfusion est faible, lorsque le refroidissement est très lent. Dans ce cas, la cristallisation se produit à une température voisine de celle de l'état d'équilibre. Le degré de surfusion (ΔT) est déterminé en fonction de la nature et la pureté du métal.

Généralement $\Delta T = (10 \text{ à } 30^\circ\text{C})$, sauf pour les métaux très purs, par exemple $\Delta T(\text{Sn}) = 118^\circ\text{C}$ et $\Delta T(\text{Sb}) = 135^\circ\text{C}$.

La figure II.5. représente une courbe de refroidissement d'un système mono-constituant pur.

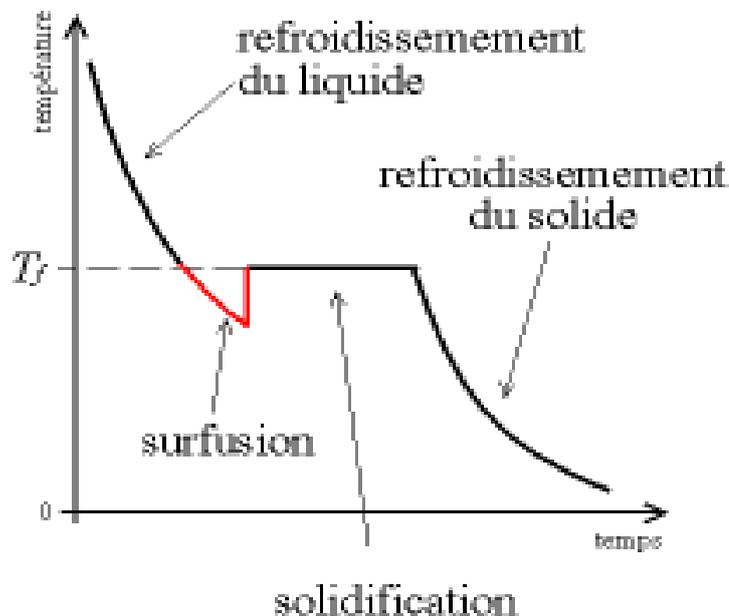


Figure II.5. Courbe de refroidissement d'un métal pur avec surfusion

Le diagramme de phase d'un corps pur dont le diagramme d'équilibre est présenté par la figure II.6. C'est le cas où il n'y a pas de variation de composition. Les seules variables sont la température T et la pression P . En général, on met en abscisse la température T et en ordonnée la pression P .

Dans les cas de ce type de diagramme, les trois branches du diagramme délimitent les trois états du corps correspondant :

- Un état gazeux dans la zone de haute température, basse pression ;
- Un état solide dans la zone de basse température, haute pression ;
- Un état liquide dans la zone de haute température, haute pression.

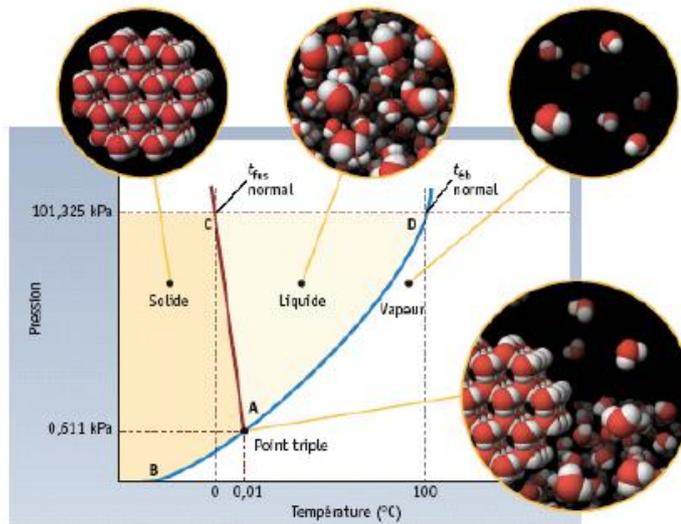


Figure II.6. Diagramme d'équilibre d'un corps pur

Sur la figure II.7. on présente comme exemple le diagramme d'équilibre de l'eau.

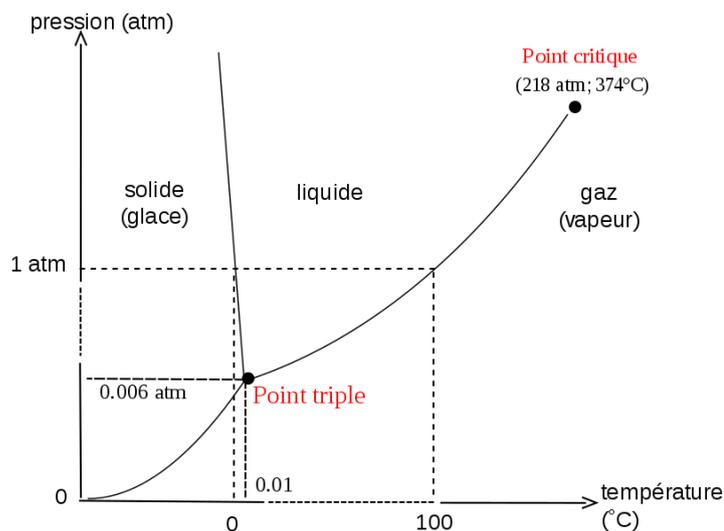


Figure II.7. Diagramme d'équilibre de l'eau

II.1.3. Cristallisation d'un alliage

Un alliage est un mélange homogène de deux métaux A et B. À l'état liquide, la solubilité de la majorité des métaux qui forment une solution liquide monophasée est illimitée. Le fer et le plomb sont des métaux presque non miscibles l'un dans l'autre à l'état liquides et se séparent en fonction de leur densité en deux couches.

La cristallisation d'un alliage ne se produit que pendant la surfusion et la formation de germes stables (aptes à la croissance). La composition des phases d'un alliage dépend de celle de la solution liquide mère. C'est pourquoi les fluctuations structurales et énergétiques d'un alliage ne suffisent pas pour produire un germe stable.

La solidification d'un alliage exige en plus, des fluctuations de concentrations. Il s'agit des écarts momentanés de la composition chimique, de petits volumes isolés par rapport à sa composition moyenne. L'origine des fluctuations est, sans doute, liée à la migration des atomes par diffusion, suite à l'agitation thermique de la solution liquide.

Les alliages sont obtenus par fusion, de deux ou plusieurs éléments. C'est à dire l'addition à un métal pur, un ou plusieurs éléments, métalliques ou non. Ces éléments peuvent modifier profondément ses propriétés. Les substances qui forment les alliages sont appelées : "composants". Selon le nombre de composants, un alliage peut être :

- Binaire (deux composants) ;
- Ternaire (trois composants) ;
- Quaternaire (quatre composants), etc.

Pour avoir un alliage, des proportions bien définies de ces constituants différents sont fondues et mélangées, puis l'ensemble est refroidi. Le résultat du mélange varie selon les variations relatives de taille des atomes, le type de maille d'origine et des propriétés électroniques des différents constituants.

Pendant l'étude des alliages, les courbes de solidification deviennent beaucoup plus complexes. Elles comportent alors plusieurs sections de courbes raccordées par des points d'inflexion (figure II.7). parfois, elles comportent des paliers de solidification isotherme. Chaque point d'inflexion correspond à une variation du nombre de phases. Ainsi, entre deux points d'inflexion successifs, l'alliage comporte le même nombre de phases.

Le point d'inflexion le plus élevé correspond à l'apparition d'un premier cristal dans l'alliage liquide, le point d'inflexion le plus bas correspond à la solidification des dernières traces d'alliage liquide. L'analyse thermique dans ce cas, permet de suivre la solidification d'un alliage de l'état liquide à l'état solide.

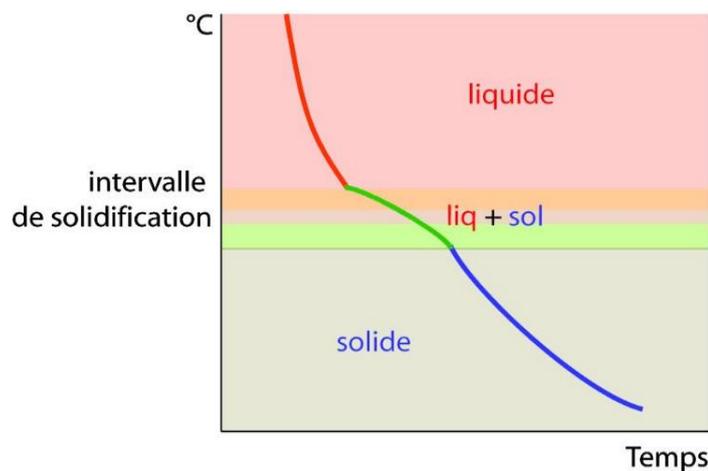


Figure II.7. Exemple de courbe de refroidissement d'un alliage de composition A-B

II.2. Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles

À l'état solide, Il est très rare que deux métaux soient solubles en toute proportion puisque l'admission d'un atome étranger dans le réseau d'un métal provoque des perturbations.

Dans ce type d'alliage, le métal pur se solidifie à une température déterminée, donc les deux éléments forment des solutions solides de même structure cristalline, les paramètres de Maille sont proche. Dans ce cas on a :

- Des éléments purs se cristallisant dans le même réseau ;
- Des rayons atomiques proches (écart inférieur à 15%) ;
- Des propriétés physiques et chimiques proches, en particulier des électronégativités (capacité à attirer les électrons proches).

Au contraire, un alliage possède un intervalle de solidification dont la grandeur dépend de sa composition. A une température T comprise dans cet intervalle, il y a donc deux phases en présence dans l'alliage, une solution liquide et une solution solide.

Dans ce type de diagramme (figure II.8), les points représentatifs de ces deux phases liquide et solide, décrivent donc deux courbes dites liquidus et solidus. Les lignes liquidus et solidus délimitent dans ce diagramme trois domaines :

Dans le domaine I (liquide), et aux températures supérieures à la ligne liquidus, se présente uniquement par une seule phase qui est le liquide homogène.

Dans le domaine II (liquide + solide), entre le liquidus et le solidus, existent le liquide et les cristaux mixtes comme phase thermodynamiquement stable.

Dans le domaine III (solide), au-dessous de la ligne solidus, où se trouve seulement une phase solide. Les cristaux mixtes de substitution dont les paramètres du réseau sont linéaires et dont le composant A pur peut passer dans le composant B pur.

Pour un système homogène, le diagramme d'équilibre permet, non seulement, de définir le nombre et type de phases existants pour les différentes températures et concentration mais aussi de déterminer les quantités de ces phases dans la structure. La miscibilité totale des deux composantes à l'état solide et liquide présente un cas limite de la formation des alliages. Ce type de diagramme est appelé diagramme à un fuseau.

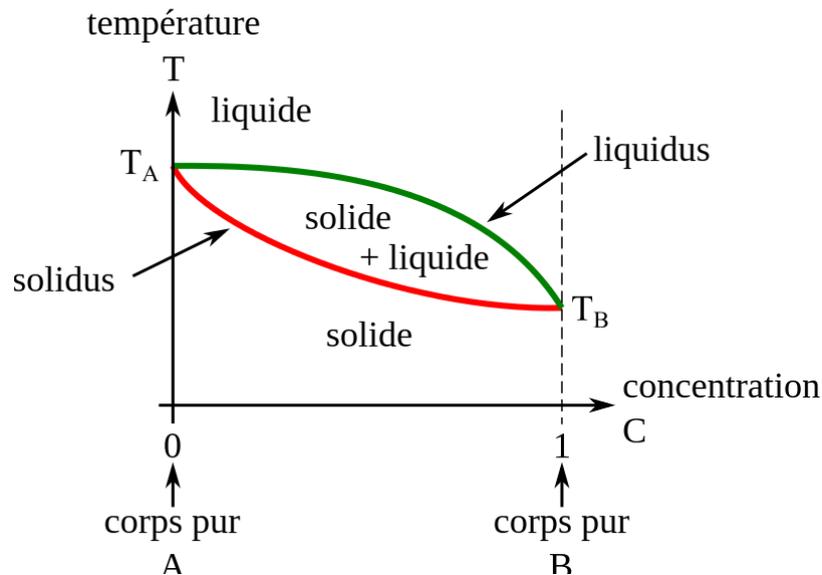


Figure II.8. Schématisation d'un diagramme de phase de deux corps complètement miscibles

Pour construire le diagramme de phase d'un alliage binaire A-B (exemple Cu-Ni, figure II.9), il suffit d'enregistrer les courbes de refroidissement pour chaque concentration de B dans A en partant de A, métal pur jusqu'à B, métal pur. Le type de ce diagramme est représenté sur la figure II.10 (exemple Cu-Ni) avec la courbe de refroidissement et structure de la miscibilité des composants A et B.

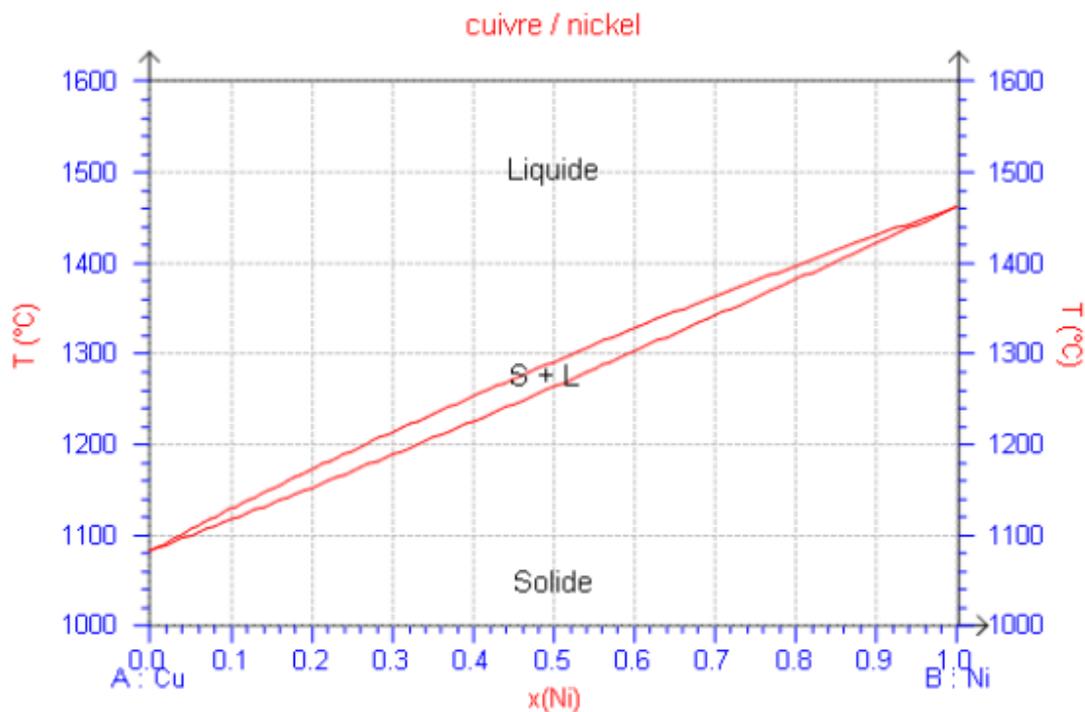


Figure II.9. Exemple de diagramme de phase de l'alliage Cu-Ni

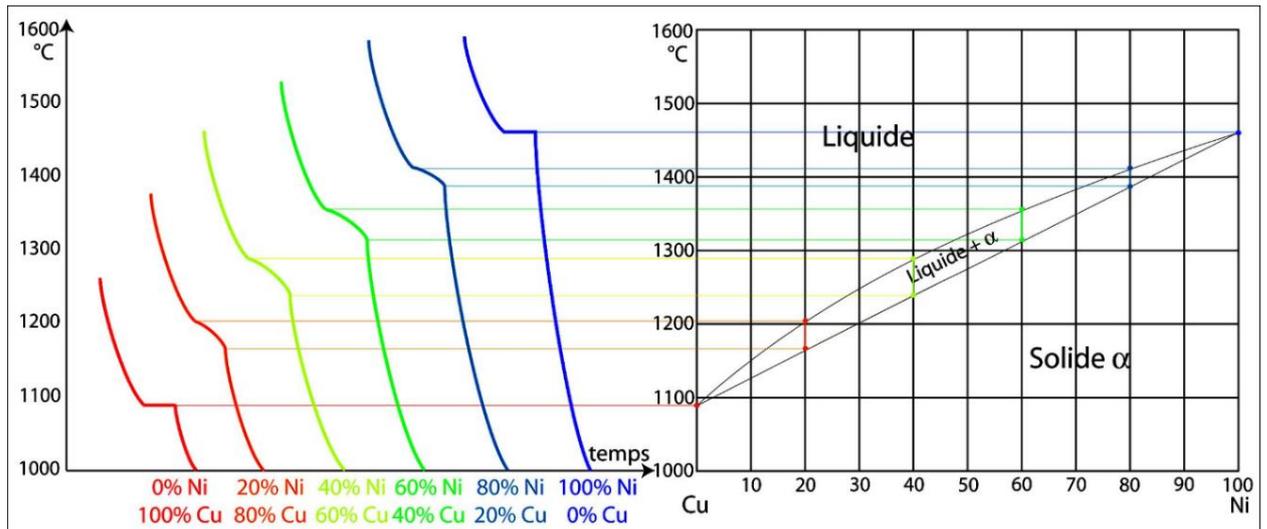


Figure II.10. Exemple de construction du diagramme de phase de l'alliage Cu-Ni

Chaque point du diagramme correspond à un alliage dont la composition est donnée par la projection orthogonale du point sur l'axe des abscisses.

La courbe de refroidissement du cuivre avec un palier à 1084°C correspondant à sa température de fusion et celle du nickel avec un palier à 1453°C correspondant à sa température de fusion. Entre ces deux extrêmes, les alliages à différentes concentrations présentent un intervalle de solidification non isotherme. De 0% de nickel à 100% de nickel, les points d'inflexion supérieurs qui correspondent au début de la solidification forment une courbe appelée liquidus. Par contre les points d'inflexion inférieurs qui correspondent à la solidification totale forment une courbe appelée solidus.

Règles de miscibilité totale à l'état solide

En général, pour que deux éléments A et B puissent être complètement miscibles à l'état solide, les quatre conditions suivantes doivent être remplies :

- Le diamètre atomique des éléments A et B ne doit pas différer de plus de 15% ;
- Les deux éléments A et B doivent avoir la même structure cristalline ;
- Les valences des deux éléments doivent être égales ;
- L'électronégativité de A et celle de B doivent être semblables.

Si l'une des règles énoncées n'est pas respectée, on parle de miscibilité partielle à l'état solide entre A et B. En effet, l'addition d'atomes de B dans des atomes de A, ou réciproquement, entraîne une distorsion du réseau des atomes A et une augmentation de l'énergie interne du système. Les lois de la thermodynamique conduisent alors le mélange à se séparer en deux phases l'une riche en A, l'autre riche en B ou à former des composés intermédiaires définis de type A_xB_y .

II.3. Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles

Dans ce type de diagrammes, on rencontre deux courbes de différentes enthalpies libres pour l'état solide correspondant à deux solutions solide α et β des alliages binaires représentent certainement le cas le plus fréquent. Il existe deux types de transformations correspondant à deux types de diagrammes d'équilibre des solutions limitées en fonction de la position de la température du point triple, par rapport aux températures de fusion des constituants purs : les diagrammes avec point eutectique et les diagrammes avec point péritectique. Dans la majorité de ces alliages, il n'existe pas de miscibilité des constituants en toutes proportions à l'état solide. Dans le cas le plus fréquent, il existe deux solutions solides :

α : Solution solide primaire de B dans A (riche en A) ;

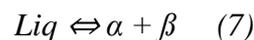
β : Solution solide primaire de A dans B (riche en B).

II.3.1. Diagrammes avec point eutectique

Il existe dans ce type de diagramme, un point fixe dont la température est inférieure à celle de fusion des deux constituants. Les deux fuseaux de solidifications se rencontrent dans la zone centrale du diagramme en faisant apparaître un point d'équilibre invariant entre une phase liquide commune et deux phases appartenant respectivement aux deux solutions solides appelé point eutectique.

L'exemple présenté ici est l'alliage binaire argent-cuivre (figure II.11.). Les températures de fusion de l'argent et du cuivre purs sont respectivement de 962°C et de 1083°C. À 779°C, la solubilité du cuivre dans l'argent est de 8,8% massique et la solubilité de l'argent dans le cuivre est de 8% massique. Pour les alliages compris entre ces deux intervalles, l'ensemble des courbes de refroidissement présente un palier isotherme dont la longueur maximale se situe au point eutectique (point E situé à 779°C avec 60,1% d'argent et 39,9% de cuivre).

Au niveau du point eutectique E, l'équilibre s'établit entre trois phases : une phase liquide d'une part et deux phases solides d'autre part. À ce point, un liquide se transforme simultanément en deux phases solides :



Les alliages situés à gauche du point eutectique s'appellent les alliages hypo-eutectiques et ceux situés à droite, les alliages hyper-eutectiques. Cette appellation est purement conventionnelle et dépend évidemment de l'orientation du diagramme de phase.

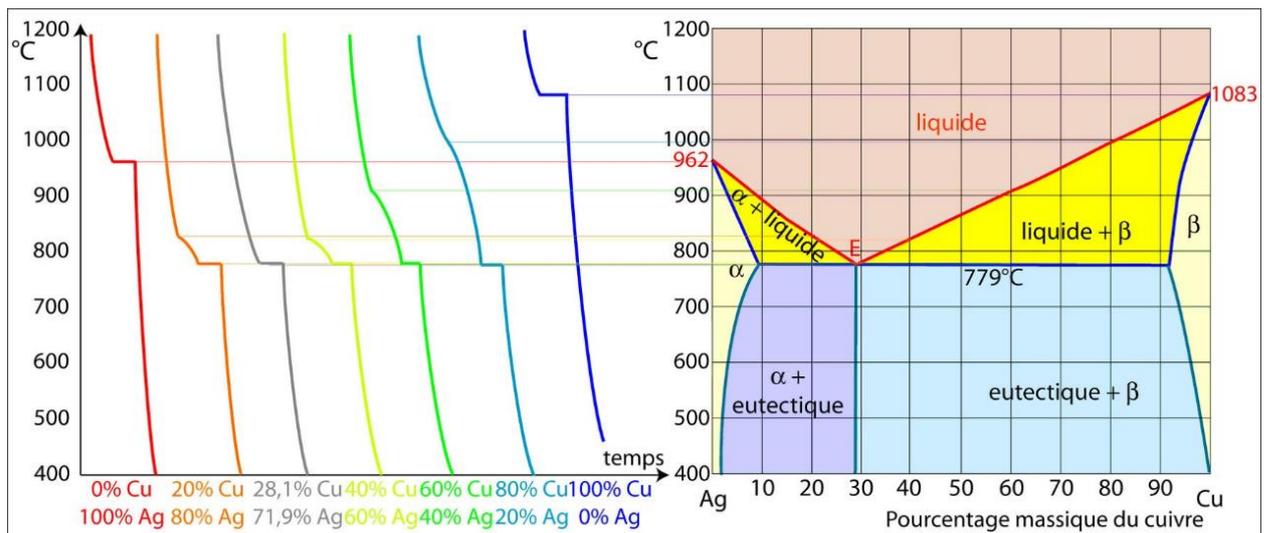
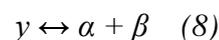


Figure II.11. Construction d'un diagramme de phases avec point eutectique

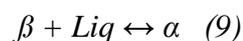
Remarque

Pour les diagrammes avec point eutectoïde, Le mécanisme de la transformation eutectoïde ressemble beaucoup à la transformation eutectique, mais au cours de cette transformation, une phase solide qui se transforme simultanément en deux nouvelles phases solides.



II.3.2. Diagrammes avec point péritectique

Dans une transformation péritectique, la température de l'équilibre péritectique est comprise entre les températures de fusion des deux constituants du système. Cette caractéristique résulte de l'influence différente des constituants sur la fusion des solutions solides qu'ils forment. Une phase liquide et une phase solide se transforment en une seule phase solide de composition définie. Le point péritectique (point P, figure II.12) est invariant, à température fixe avec un équilibre entre les trois phases.



La partie supérieure du diagramme de phases de l'alliage argent platine (figure II.12) illustre l'aspect typique d'une transformation de type péritectique. Le point péritectique se situe à 1185°C pour une composition de 55% massique de platine et 45% massique d'argent.

À cette composition, juste au-dessus de 1185°C coexistent deux phases, une phase β solide de composition $C_\beta = 86\%$ Pt (platine) et une phase liquide de composition $C_l = 32\%$ Pt (platine). À 1185°C, ces deux phases se transforment brutalement en une seule phase solide α de composition : $C_\alpha = 55\%$ Pt (platine)

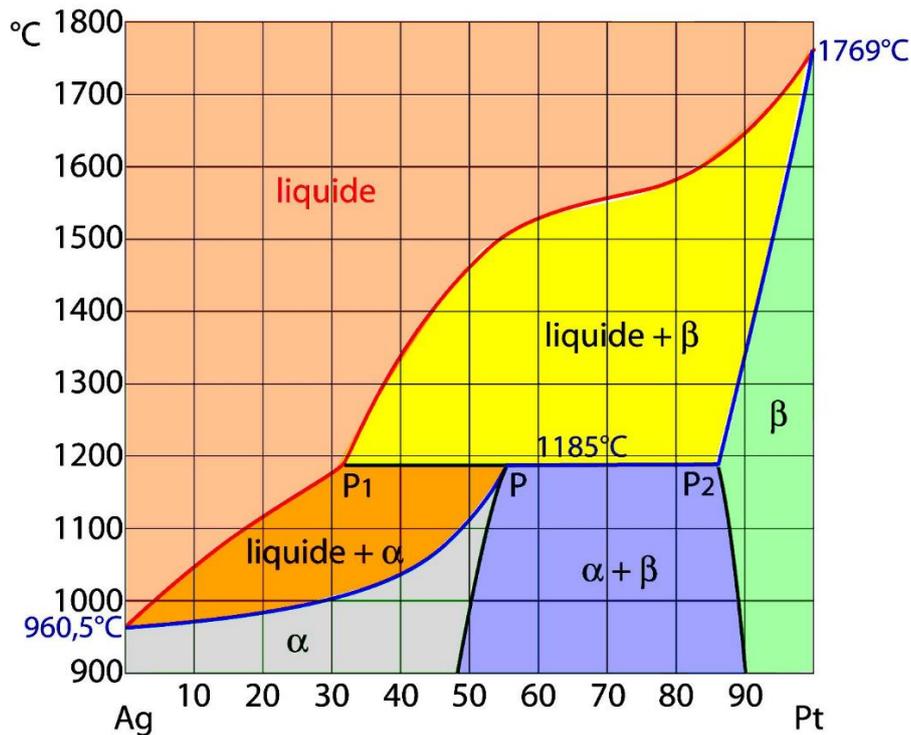


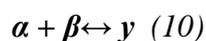
Figure II.12. Diagramme de phase péricentrique de l'alliage Ag-Pt

Les alliages dont la composition est inférieure à celle de P1 (32% Pt) et ceux dont la composition est supérieure à P2 (86% Pt) se comportent comme des solutions solides à un seul fuseau. Les alliages dont la composition est comprise entre P1 et P vont voir apparaître dans un premier temps dans la phase liquide une phase β dont la composition va évoluer progressivement jusqu'à la concentration en P2 (86% Pt). Lorsque la température péricentrique est atteinte, il se produit une transformation isotherme de ce solide β (86% Pt) en solide α (55% Pt). Après cette transformation, il subsiste encore une phase liquide. La solidification va se poursuivre en évoluant vers une phase α unique.

Les alliages dont la composition est comprise entre P et P2 débutent de façon identique aux précédents, mais lorsque la température péricentrique est atteinte, une partie de la phase β va disparaître et combinée avec le liquide vont former la phase α . Cependant la quantité de liquide n'est pas suffisante pour faire disparaître la totalité de la phase β . Celle-ci va coexister avec la phase α et donnera ainsi un alliage biphasé.

Remarque

Pour les diagrammes avec point péricentrique, le mécanisme de la transformation péricentrique est très ressemblant à la transformation péricentrique, mais au cours de cette transformation solide, ce sont deux phases solides qui se transforment simultanément en une nouvelle phase solide.



Règles de phases

Les formes des diagrammes varient du plus simple (figure II.13) au plus compliqué. En réalité les diagrammes compliqués associent différentes transformations à l'état liquide (fuseau, eutectique, péritectique) ou à l'état solide (eutectoïde). Le système fer-carbone est un bon exemple de telles associations. Dans tous les cas on peut interpréter facilement les diagrammes en les subdivisant en éléments simples et en leur appliquant des règles de lecture également très simples :

Règle de la verticale

Après refroidissement de l'alliage liquide au point P, en P3 (figure II.13), sa composition est invariable. L'alliage est constitué d'un mélange de solutions solides α et β .

Règle de l'horizontale

À une température donnée, il existe un équilibre entre les points homologues situés sur les frontières d'un domaine biphasé.

À la température T_1 on dit que le point L est en équilibre avec le point S (figure II.13), ce qui explique que pour la température considérée, dans la zone grise, il existe un mélange biphasé de liquide de composition (massique) L et de solide de composition S.

À la température T_2 on a un mélange biphasé de solution solide β (composition m) et de solution solide α (composition n).

Règle des segments inverses

Étant donné que dans les zones grises, l'alliage est constitué d'un mélange de deux phases (pour un système binaire) bien identifiées, il est important de connaître les proportions (% massiques) de ces deux phases. Ces proportions dépendent de la composition initiale.

On a à :

$$T1 : \% \text{ liquide} = \frac{100P1S}{LS} \quad (11) ;$$

$$\% \text{ Solide} = \frac{100P1L}{LS} \quad (12) ;$$

$$T2 : \% \text{ Solide } \beta = \frac{100P2N}{MN} \quad (13) ;$$

$$\% \text{ solide } \alpha = \frac{100P2M}{MN} \quad (14).$$

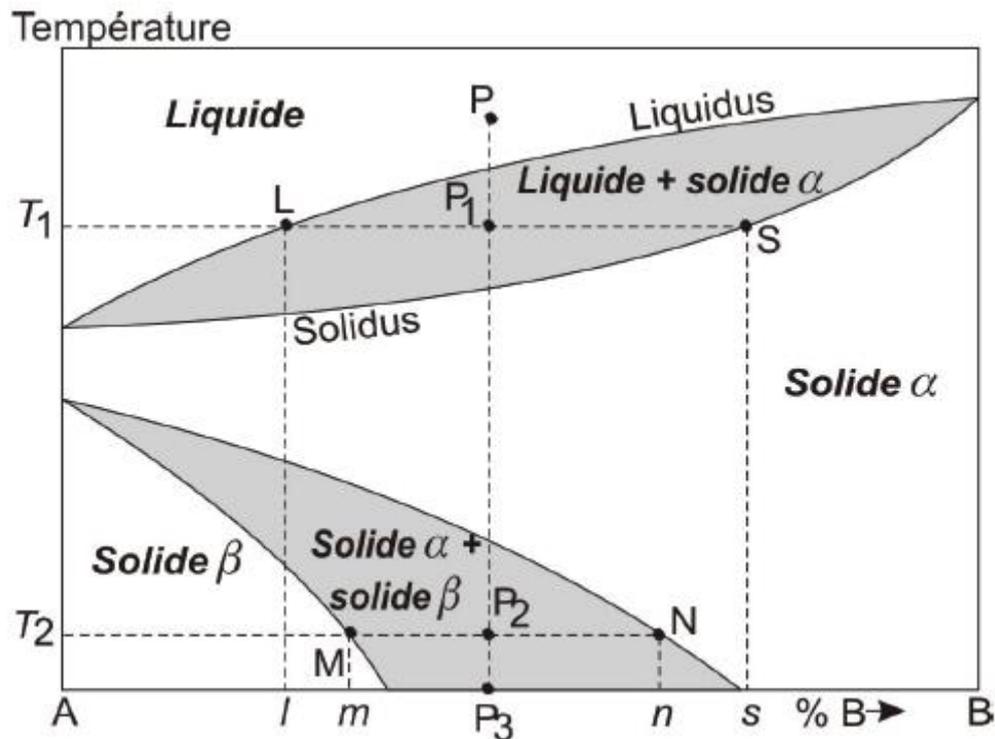


Figure II.13. Allure générale d'un diagramme binaire d'équilibre entre phases. Sauf indications particulières on utilise des pourcentages massiques

Les diagrammes d'équilibre binaires sont simples à interpréter par rapport aux diagrammes de phase ternaires. Ils peuvent combiner parfois de nombreuses transformations à l'état liquide comme à l'état solide. Pour comprendre l'évolution des phases présentes, il est préférable de dissocier ces différentes transformations. Les diagrammes de phase ternaires permettent d'analyser le comportement au cours d'une fusion ou d'une solidification de ces alliages. La plupart des alliages commerciaux sont des alliages à plus de trois composants. La constitution, l'analyse et l'interprétation de ces alliages est beaucoup plus complexe.

Chapitre III : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

Objectifs du chapitre

À l'issue de ce chapitre l'étudiant doit être capable de :

- Connaître les caractéristiques du fer et du carbone ;
- Différencier entre les systèmes fer-graphite et fer-cémentite ;
- Expliquer les différentes phases des diagrammes ;

Le diagramme fer-carbone décrit les différents états du mélange de fer et de carbone selon la proportion du fer et du carbone dans le mélange. Généralement au-dessus de 2 % de carbone on parle de fontes et en dessous de cette teneur en carbone on parle d'acier. Les fontes sont des alliages fer-carbone. Il s'agit d'alliages contenant entre 2.11 et 6.67 % de carbone. Lors d'une coulée, il se forme de la cémentite ou du graphite. Le terme « fonte » est parfois utilisé pour désigner des objets moulés.

III.1. Caractéristiques du fer et du carbone

III.1.1. Caractéristiques du fer

Dans l'industrie, le fer est le métal de base le plus important pour l'obtention des alliages techniques. Le fer pur n'est pas employé à l'échelle industrielle. Les alliages de fer avec le carbone (fontes et aciers) sont les plus employés.

Le fer pur est obtenu avec 99.9 % de fer. Il contient toujours des teneurs de différents éléments. Le fer le plus pur est actuellement obtenu avec 99.999 % de fer. Le fer est de couleur blanche, il possède les caractéristiques suivantes :

- Rayon atomique 1.27 Å (CFC) ;
- Nombre atomique : 26 ;
- Masse atomique : 55.85 ;
- Masse volumique 7.8 g/cm³ ;
- Température de fusion 1539°C.

La dureté du fer est de (80-450 HB) et sa contrainte limite de traction est d'environ (200-1460) MPa. Il possède une limite d'élasticité très faible. Il est considéré comme un bon conducteur de chaleur et d'électricité et sa résistivité électrique à 20°C est de $9.76 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

Il est très employé dans le domaine de l'électrotechnique à cause de sa grande perméabilité magnétique. Les propriétés magnétiques du fer dépendent dans une grande partie de sa pureté et des régimes de traitement thermiques appliqués.

Le fer présente deux formes allotropiques variées α et γ (deux réseaux cristallins différents). Le fer α a un réseau cubique centré (CC) et le fer γ a un réseau cubique à faces centrées (C.F.C). Le phénomène du changement du réseau cristallin sous l'effet de la température porte le nom de transformation allotropique (Figure III.1.)

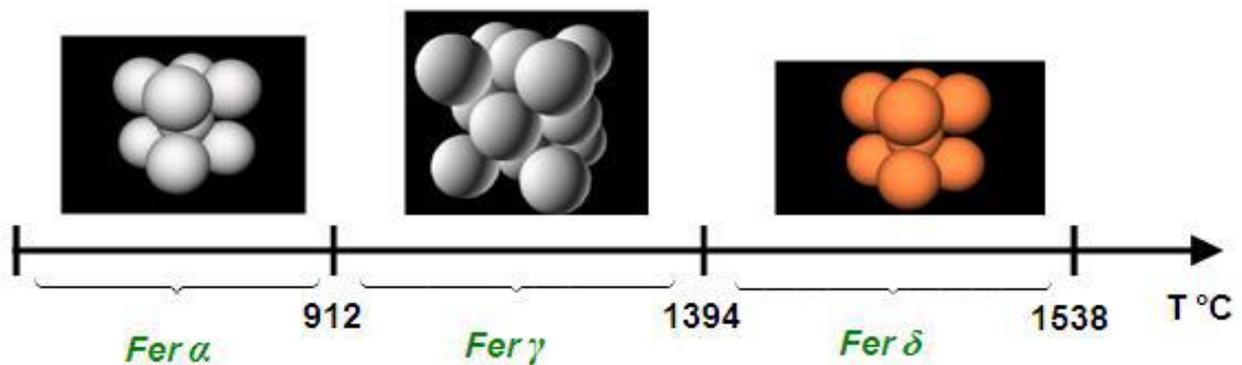


Figure III.1. Changement du réseau cristallin du fer sous l'effet de la température

La courbe de refroidissement présentée par la figure III.2 explique en détail les transformations allotropiques du fer pur :

A des basses températures et jusqu'à 912°C (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC). On l'appelle alors fer α . Le fer α dissout très peu de carbone (0.02 %C au maximum à 723°C et moins de 0.01%C à 300°C) ;

A des températures supérieures à 912°C et jusqu'à 1394°C (A4), le réseau cristallin est de type cubique à faces centrées (CFC), on l'appelle Fer γ . Le fer γ dissout 0.8% C à 723°C et 2.14 %C à 1147°C ;

Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1539°C , le fer retrouve la structure cubique centrée du fer α . On l'appelle alors fer δ . Il dissout plus de carbone que le fer α (0.07% C au maximum à 1493°C).

Le fer est ferromagnétique jusqu'à 768°C (A2) point de Curie, au-delà il devient paramagnétique. Le caractère ferromagnétique se dit d'une substance qui peut prendre une forte aimantation.

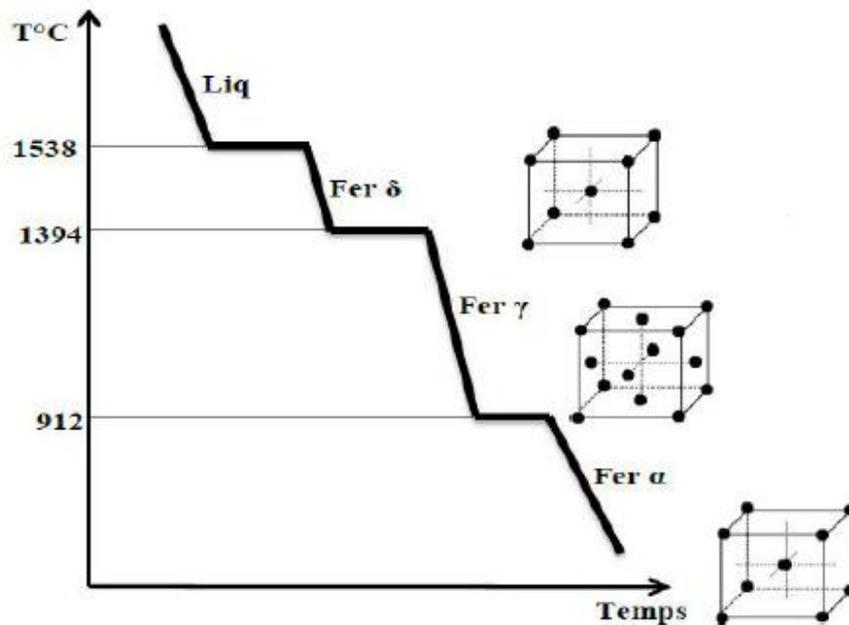


Figure III.2. Transformation allotropiques du fer pur

III.1.2. Caractéristiques du carbone

Le carbone est un élément non métallique peut abondant, (0.1% en masse dans l'écorce terrestre). Il se trouve rarement 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.

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 .

Il possède les caractéristiques suivantes :

- Rayon atomique : 0,77 Å ;
- Numéro atomique : 6 ;
- Masse atomique : 12 ;
- Masse volumique : 2.5 g/cm³ ;
- Température de fusion : 3500°C.

Le diamant est une macromolécule métastable du type cristal covalent parce que tous ses atomes sont associés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Sa forme cristalline est cubique à faces centrées.

La variété du diamant est métastable à réseau cristallin C.F.C et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est aussi un isolant électrique ;

Le graphite a une structure lamellaire très facilement clivable. Il est formé de molécules géantes planes ayant des atomes placés aux nœuds d'un réseau hexagonal régulier. C'est un matériau réfractaire et relativement bon conducteur d'électricité. On l'utilise à l'état de poudre pour mines de crayon.

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 Fe_3C appelée cémentite ou carbure de fer.

III.1.3. Différentes phases du système Fer-Carbone

➤ Ferrite α

La ferrite α est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer α , existant en dessous de 906°C et se cristallisant dans le système cubique centré. Le côté du cube élémentaire mesure 2.87×10^{-8} cm à la température 20°C. (solubilité maximale du carbone est de : 0.02% C à 723°C). Elle est relativement tendre ($HB \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPa), très ductile ($A \approx 35\%$) et ferromagnétique jusqu'à 768°C. Entre 768 et 906°C, le fer α n'est plus ferromagnétique.

➤ Ferrite δ

La ferrite δ est une solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centré CC, de maille de 2.93×10^{-8} cm. Le fer δ existe de 1401°C jusqu'à la température de fusion 1539°C. Il est amagnétique et dissout un peu plus de carbone (0.10% au maximum à 1493°C) que le fer α .

➤ Austénite γ

L'austénite γ est une solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le fer γ et existe entre 906 et 1401°C, de structure cubique à face centrée. Le côté du cube élémentaire mesure 3.63×10^{-8} cm à 1100°C. La solubilité du carbone croît de 0.8% de carbone à 721°C jusqu'à 1.7% à 1145°C puis décroît jusqu'à 0.17% à 1487°C. Elle est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile. Le fer γ (austénite) est amagnétique, dissout facilement le carbone, plus dense et plus dilatable que le fer α (ferrite).

➤ Perlite

C'est un agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant se forme à 0.8% C et à 727°C. La perlite est dure ($HB \approx 200-300$), résistante ($R_m \approx 850$ MPa) et assez ductile ($A \approx 10$).

➤ Lédéburite

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide à 4,3 % de carbone à la température eutectique (1147°C).

➤ Cémentite (carbure de fer Fe₃C)

La cémentite est un composé chimiquement défini. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanches hypereutectiques. Elle est très dure et très fragile.

➤ Graphite

Le graphite présent dans toutes les fontes grises est une variété cristallisée du carbone. Les lamelles, nodules ou sphères de graphite sont des empilements d'atomes de carbone disposés sur des mailles hexagonales. Le graphite est un corps très stable qui ne se dissocie qu'à 3650 °C par sublimation. En conséquence, aucun traitement thermique ne peut altérer le graphite.

Le tableau III.1. résume les caractéristiques des principales phases.

Tableau III.1. Caractéristiques des principales phases

Phase	Réseau Cristallin	Constante du Réseau en nm	Domaine D'existence	Solubilité Maximale	Désignation structure
Fe δ	CC	a = 29,3 - T= 1425°C	1536>T>1392°C	0,10%-T=1493°C	δ -Ferrite
Fe γ	C.F.C	a = 36,4 - T=1100°C	1392>T>911°C	2,06%-T=1147°C	Austénite
Fe α	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

Diagramme stable-diagramme métastable

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :

- La première produit une phase riche en carbone de formule Fe₃C appelé carbure de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite.
- La deuxième forme une phase riche en carbone reste à l'état de graphite pur (Cgr), et a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite.

Il existe donc deux diagrammes d'équilibres, l'un appelé diagramme d'équilibre métastable Fe-Fe₃C (cémentite) et l'autre diagramme d'équilibre stable fer-graphite.

III.2. Diagramme d'équilibre fer-cémentite

C'est le diagramme d'équilibre fer-carbone métastable (figure III.3.) représentant la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (Fe_3C). Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008% C et 2% C) et les fontes (de 2% C à 6.67% C).

Pour chaque température et pour chaque teneur en carbone, ce diagramme indique la nature des phases et des constituants de l'alliage considéré.

Pour des températures élevées, la cémentite se décompose en fer et en carbone. on considère sa température de fusion à environ 1392°C et peut être plus élevée.

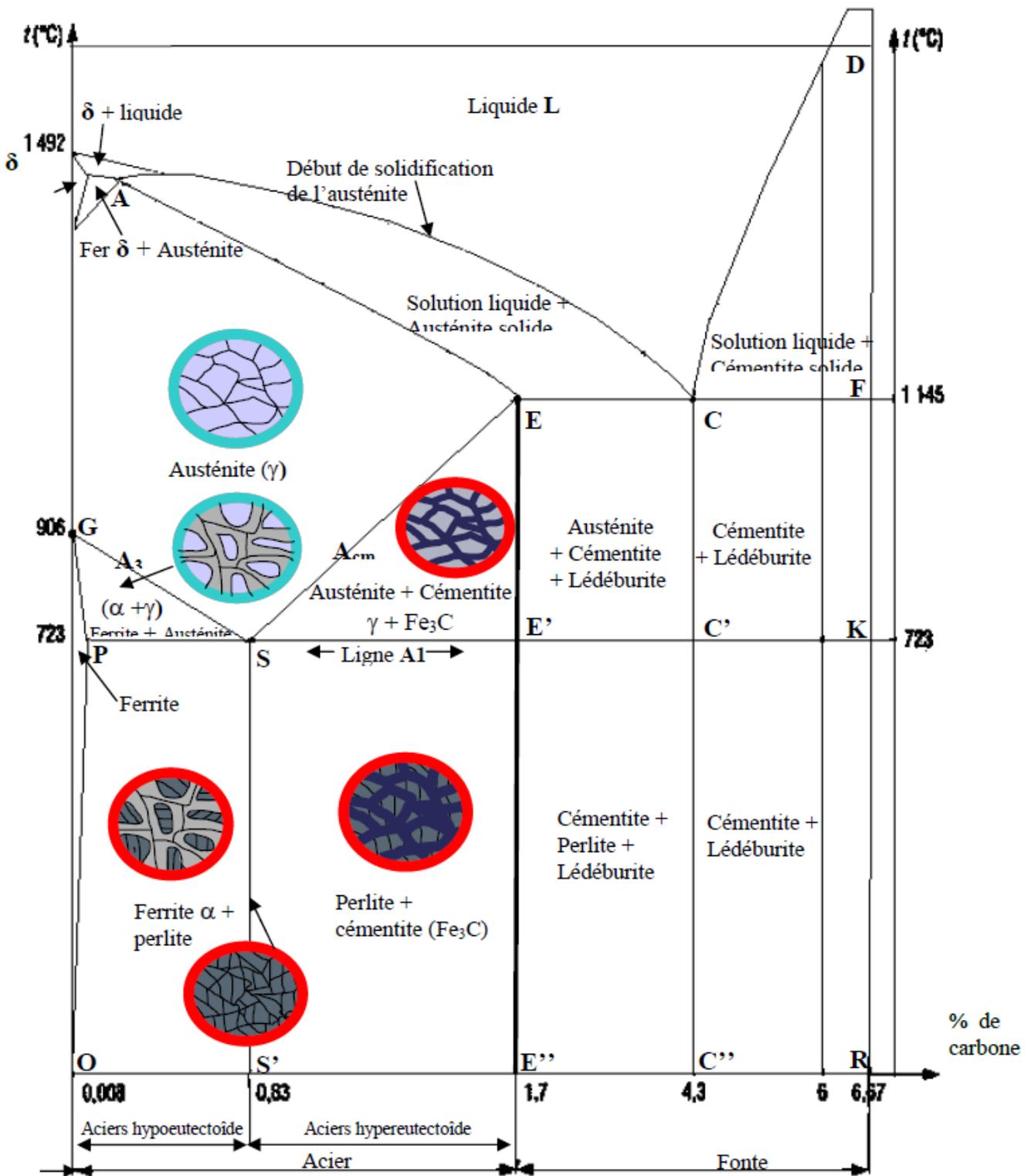


Figure III.3. Diagramme d'équilibre fer-cémentite

Analyse du diagramme fer- cémentite

a. Points caractéristiques du diagramme

Les points caractéristiques du diagramme sont :

- A : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C) ;
- D : correspond à la température de fusion de la cémentite (1392°C) ;
- E : 2,1 % C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF 1145°C);
- S : 0,8 % C et à 723°C ;
- P : 0,02 % C et à 723°C ;
- C : 4,3 % C et à 1145°C.

b. Lignes et courbes

- ECF : cette ligne correspond à la ligne de transformation eutectique appelée lédéburite (L_b) ;
- PSK : cette ligne correspond à ligne de transformation eutectoïde appelé perlite (P) ;
- A_{cm} : indique l'appauvrissement de l'austénite entre 1145 et 723°C ;
- A_1 : indique la fin de transformation de l'austénite en ferrite au refroidissement ;
- A_3 : précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite ou indique le début de transformation de l'austénite en ferrite au cours du refroidissement. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

c. Transformations

Le diagramme fer-cémentite (figure III.3) contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

- Eutectique à 1145°C (figure III.3) : il marque la température minimale d'existence du liquide ;
- Eutectoïde à 723°C (figure III.3) (A_1). Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus ;
- Péritectique à 1487°C, mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

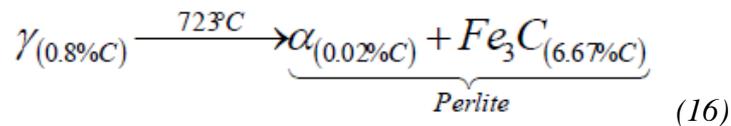
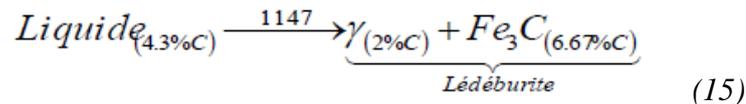
d. Réactions

➤ Réaction eutectoïde

Un premier point important doit être noté, correspondant à la teneur de 0.8%C et à 723°C. Ce point est dit eutectoïde. Les aciers qui contiennent moins de 0.8% C sont dits hypoeutectoïdes et ceux qui sont plus carburés hypereutectoïdes ;

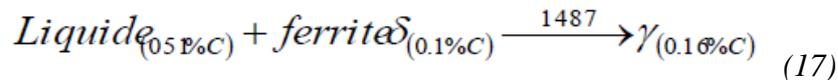
➤ Réaction eutectique

Un deuxième point remarquable doit être noté correspondant à la teneur de 4.3% de carbone à 1145°C, ce point est dit eutectique. A la température eutectique il existe trois phases en équilibre. Le liquide se solidifie, pour former les phases d'austénite et de cémentite s'appelle lédéburite. Les fontes qui contiennent moins de 4.3%C sont dites hypoeutectiques et celles qui sont carburés sont dites hypereutectiques ;



➤ Réaction péritectique

Un troisième point marquant correspondant à la teneur de 0.51% de carbone à 1487°C, ce point est dit péritectique.



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

(tableau III.2 et figures III.4, III.5, III.6, III.7, III.8, III.9)

Tableau III.2. Dénomination des aciers et des fontes suivant la teneur en carbone

% de carbone	Désignation
0,02 à 0,8	Aciers hypoeutectoïdes
0,8	Aciers eutectoïde
0,8 à 2,06	Aciers hypereutectoïdes
2,06 à 4,3	fontes hypoeutectiques
4,3	Fontes eutectiques
4,3 à 6,67	Fontes hypereutectiques

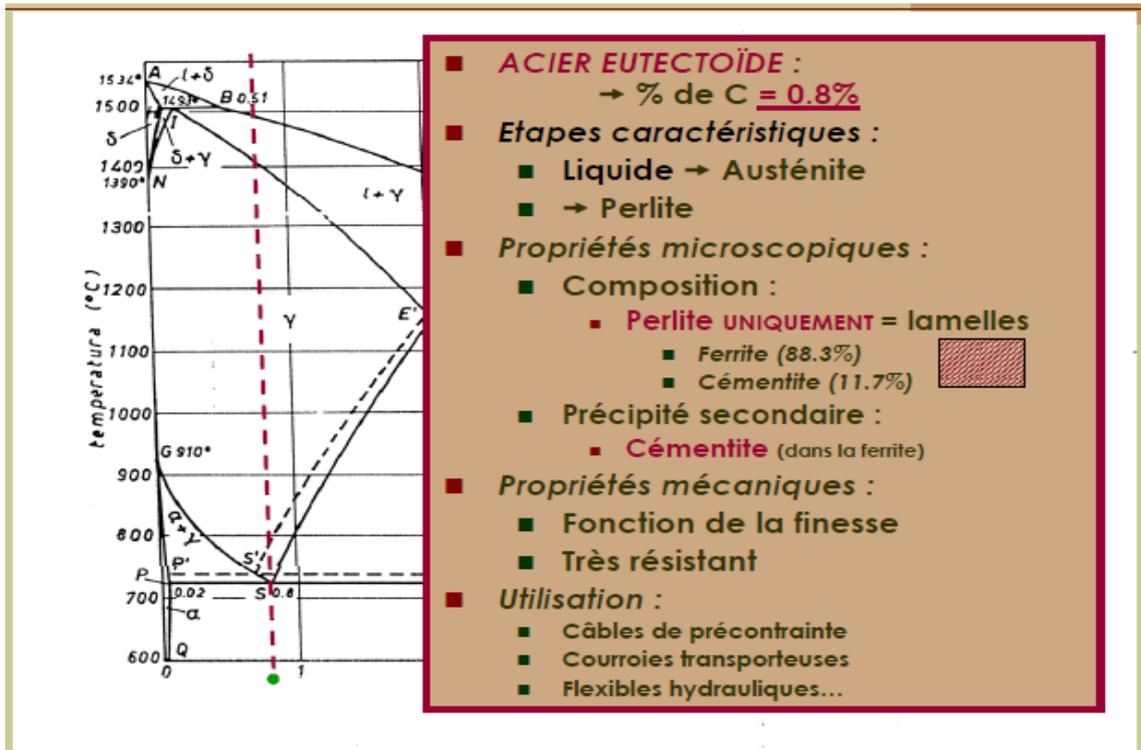


Figure III.4. Aciers eutectoïdes

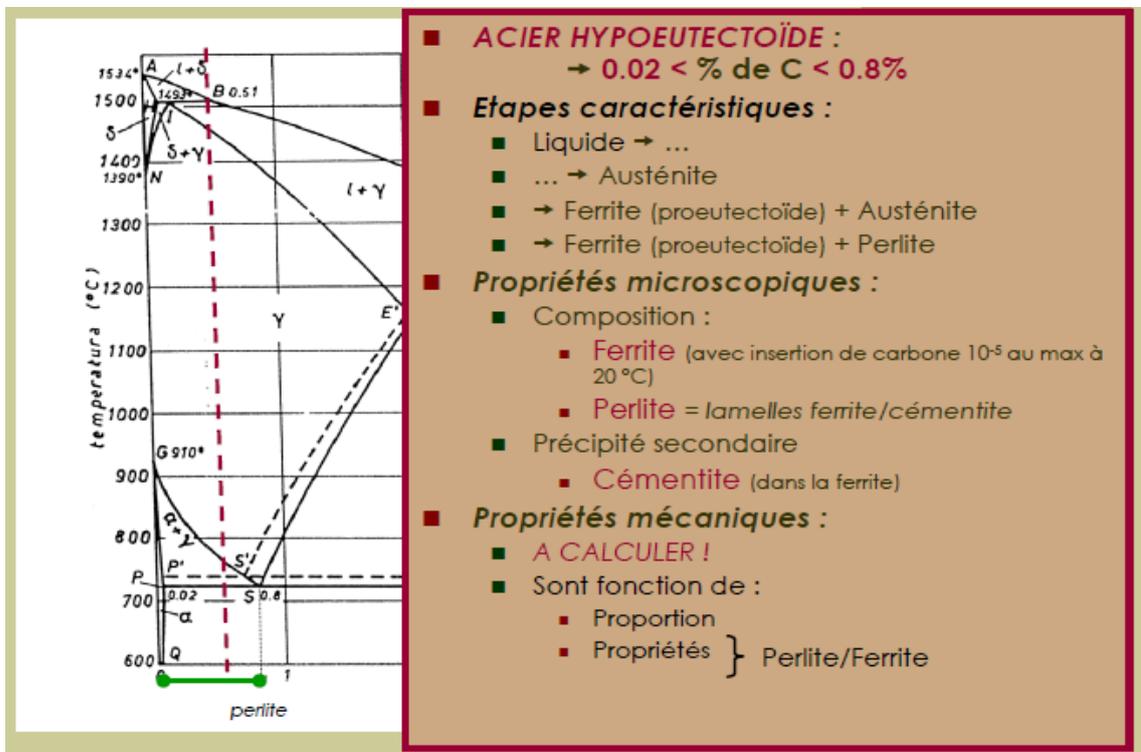


Figure III.5. Aciers hypoeutectoïdes

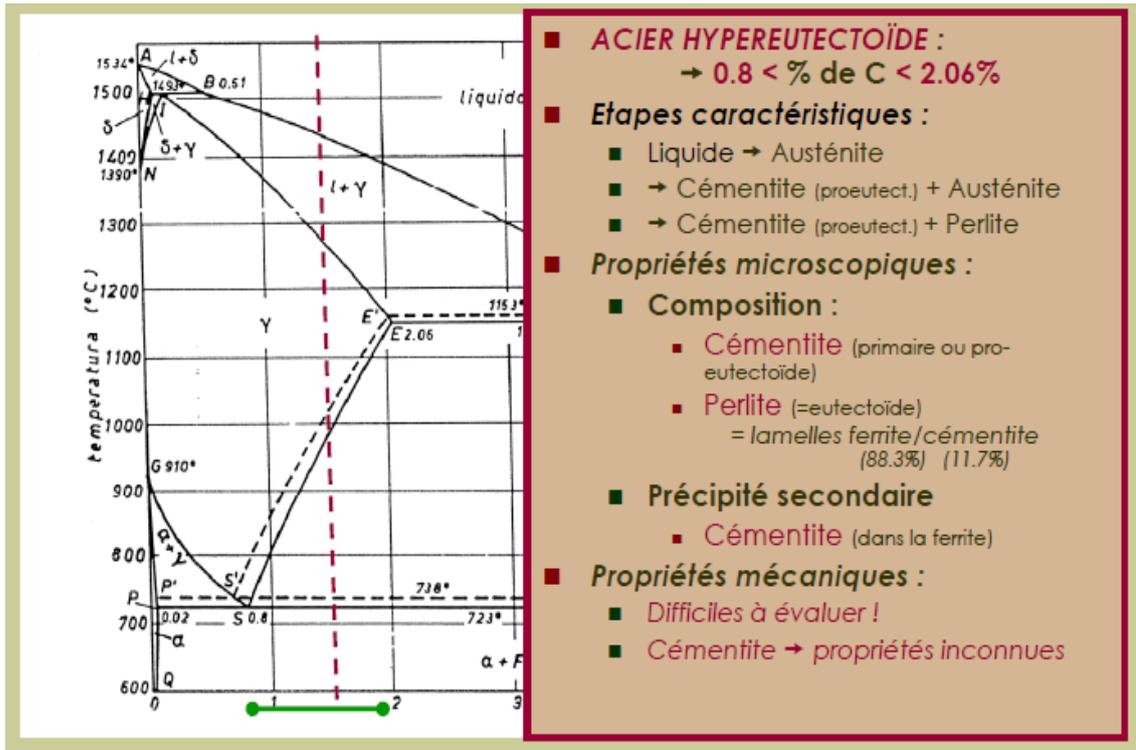


Figure III.6. Aciers hypereutectoïdes

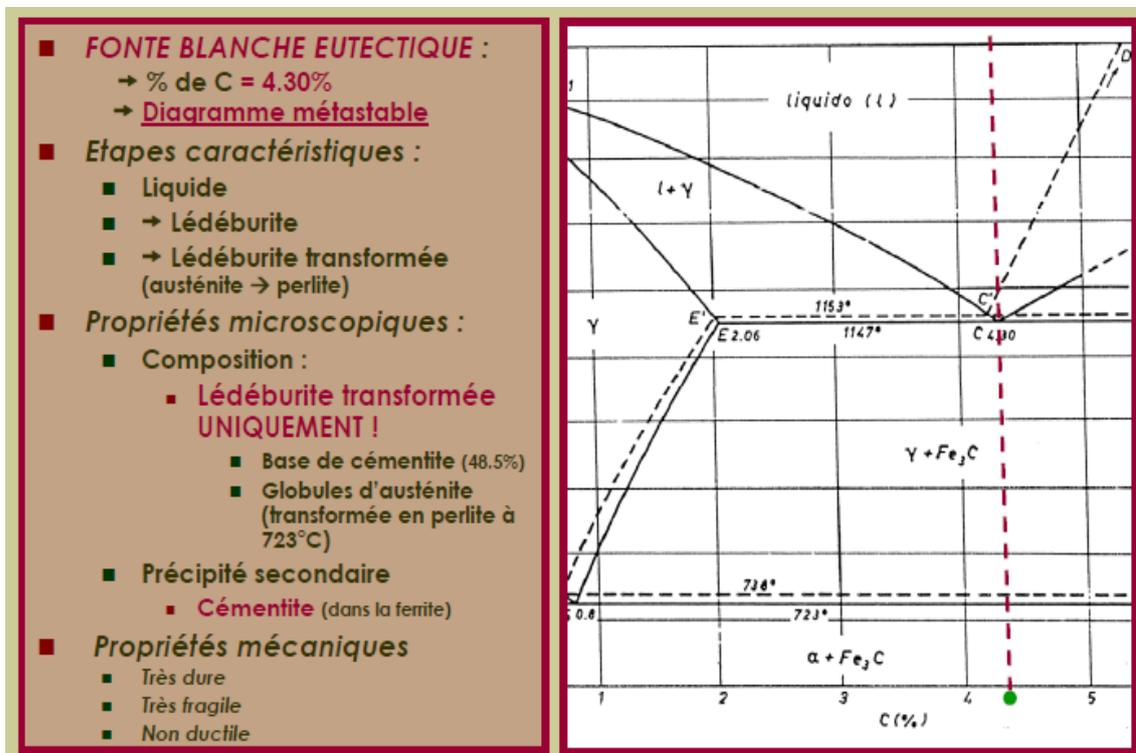


Figure III.7. Fontes eutectiques

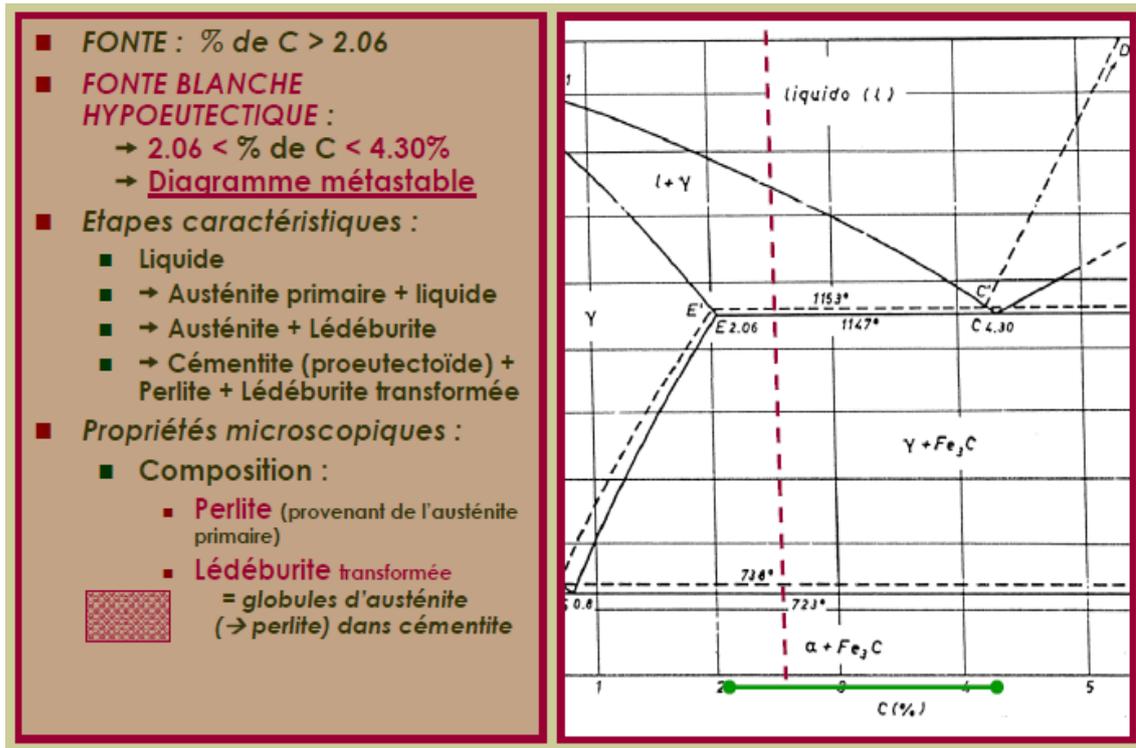


Figure III.8. Fontes hypoeutectiques

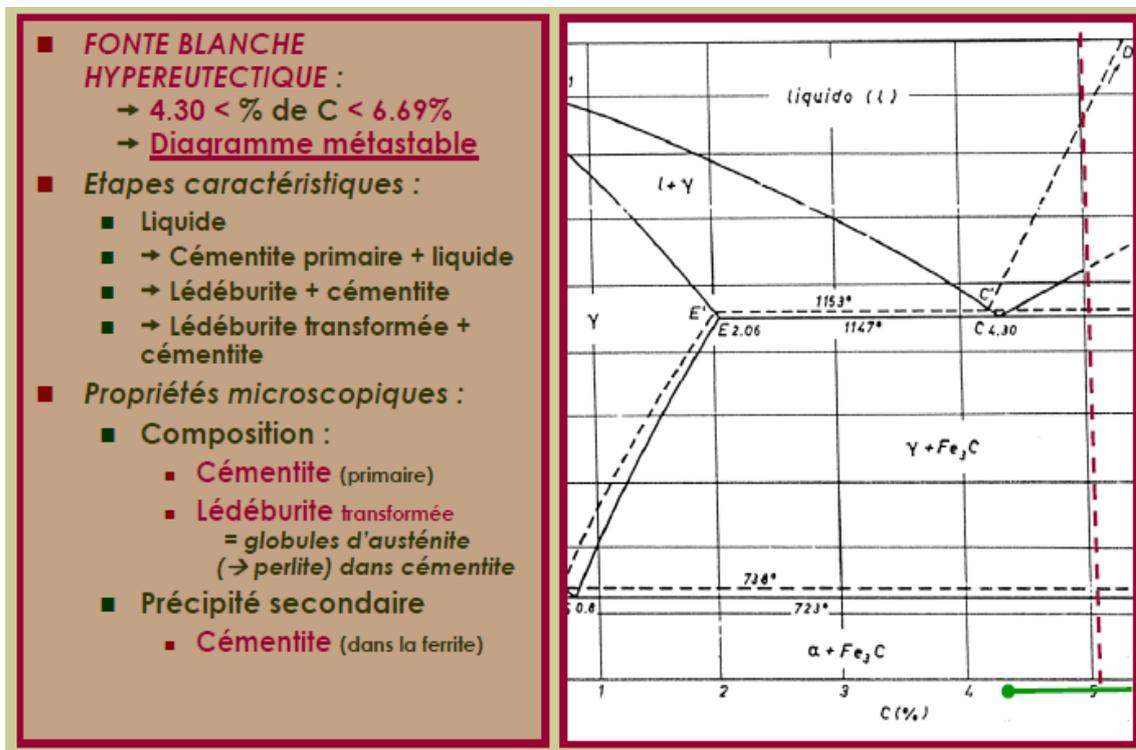


Figure III.9. Fontes hypereutectiques

III.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme fer-carbone se divise en deux types diagrammes : diagramme fer-graphite et diagramme fer-cémentite.

L'étude du diagramme fer-graphite est analogue à celui du diagramme fer-cémentite faite précédemment (figure III.10). Il suffit donc de remplacer le mot cémentite par le mot graphite. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. On doit seulement noter que les températures de l'eutectique et de l'eutectoïde sont plus élevées de quelques degrés (1153°C au lieu de 1148°C et 738°C au lieu de 727°C pour le diagramme fer-graphite et fer-cémentite respectivement). Il s'ensuit que toutes les teneurs en carbone des points d'intersections des isothermes (paliers) correspondants avec les branches obliques du diagramme sont légèrement abaissées. C'est ainsi que la teneur en carbone de l'austénite à 1153°C est de 2.03% au lieu de 2.11% et que la lédéburite ne contient que 4.25% au lieu de 4.3%. De même la perlite ne contient que 0.77% au lieu de 0.69 % (voir diagramme III.10).

Dans le système stable "fer-graphite", La phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur a une miscibilité nulle avec le fer. Son obtention exige la décomposition du carbure Fe_3C (lors d'un traitement) ou lors d'un refroidissement à une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir graphitisant tel que le silicium. C'est à dire la formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui se trouvent dans la fonte et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement). La présence aussi du silicium peut favoriser la décomposition de la cémentite (formation du graphite).

Le graphite primaire cristallise aux températures inférieures à celle de la courbe $EcCg$, et le graphite eutectique à la température correspondant à celles de la courbe $AEcB$ (voir diagramme figure III.10). La courbe AE délimite le domaine de précipitation du graphite secondaire ou proeutectoïde.

le zirconium (Zr) etc. Ces derniers forment des carbures durs (souvent complexes), augmentent la dureté et la résistance. La figure III.11. montre la tendance des éléments d'alliage à former des carbures, et leur dissolution dans le fer.

En plus de leur effet graphitisant ou antigrafitisant, ils peuvent se classer en :

➤ Élément stabilisateur d'austénite (gammagène) : Ces éléments augmentent le domaine d'existence de γ . Ils ont le même réseau cristallin que l'austénite (CFC), augmentent la température de formation d'austénite à partir de la phase liquide et diminuent celle de A_3 . Ces éléments sont le nickel (Ni), le manganèse (Mn), le cobalt (Co) et le cuivre (Cu) ;

➤ Élément stabilisateur de ferrite (alphagène) : Ces éléments diminuent le domaine d'existence de l'austénite (γ). Ils ont le même réseau cristallin que la ferrite (CC), diminuent la température de formation d'austénite à partir de la phase liquide, augmentent celle de A_3 et diminuent la solubilité de carbone dans l'austénite. Ces éléments sont le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), l'aluminium (Al) et le silicium (Si).

Le Tableau III.3 synthétise les éléments d'alliage alphagène et gammagène et leur effet dans la fonte.

Tableau III.3. Eléments stabilisateurs de ferrite et d'austénite

Effet	Eléments d'alliage	Effet
stabilisateur de ferrite (alphagène)	Cr, Si, Al, Mo, W, Ti, V	favorise l'existence de ferrite α
	B, S, Zr, Nb, Ce, Ta	rétrécit le domaine d'austénite γ
stabilisateur d'austénite (gammagène)	C, N, Cu	élargit le domaine existence d'austénite γ
	Ni, Mn, Co	favorise l'existence de la structure austénitique à la température ambiante

La figure III.11. montre l'effet des éléments d'alliage sur le domaine d'existence de la phase γ .

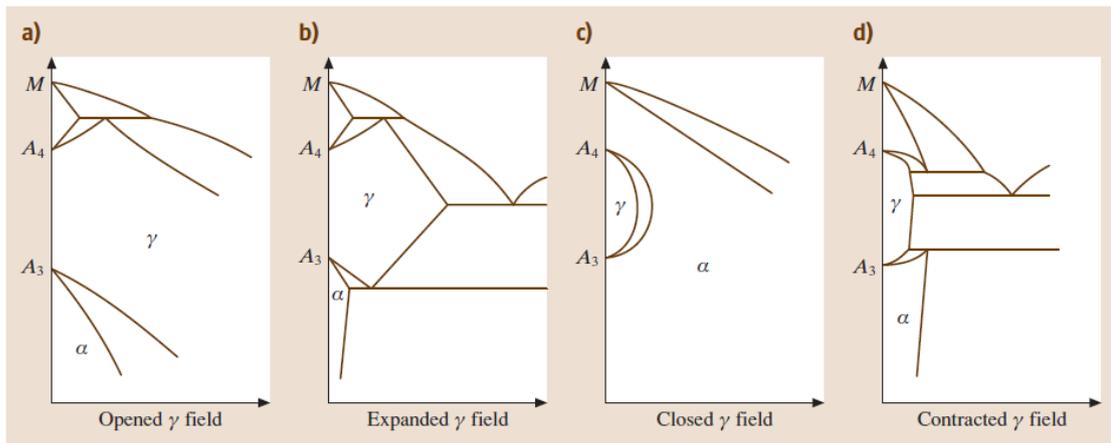


Figure III.11. Classification des phases des fontes alliées : a) ouverture du domaine de phase γ , b) augmentation du domaine de phase γ , c) fermeture du domaine de phase γ , et d) contraction du domaine de phase γ

La figure III.12. montre la synoptique des différentes possibilités de phases et structure des alliages fer-carbone

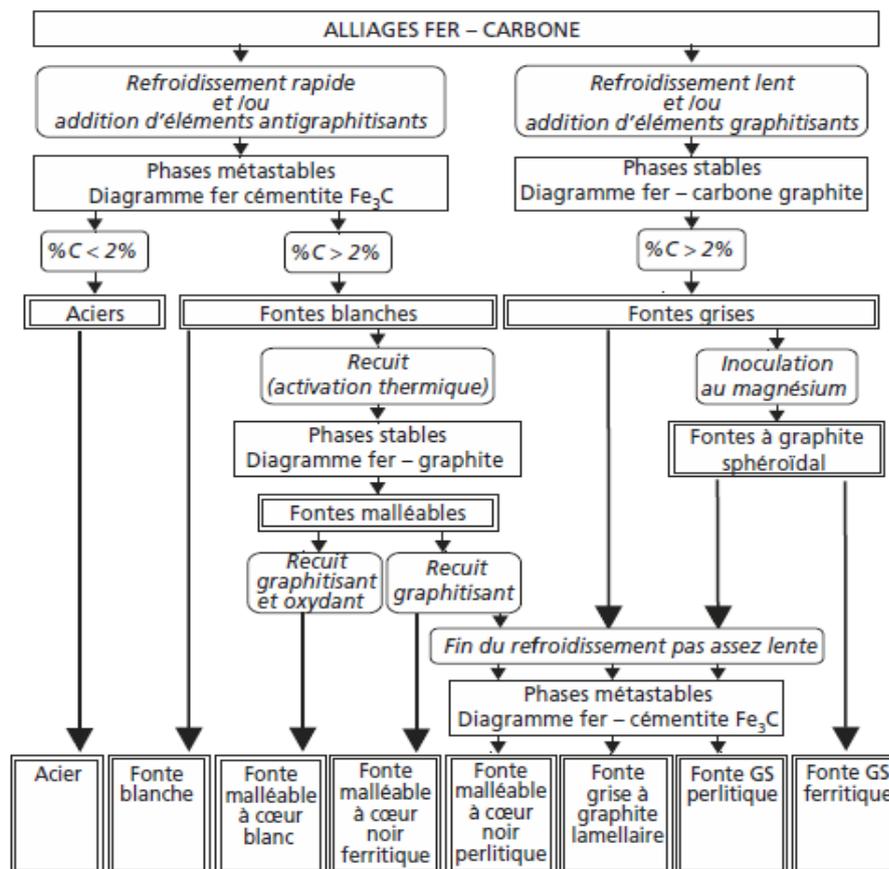


Figure III.12. Synoptique des différentes possibilités de phases et structure des alliages fer-carbone

III.4. Désignation normalisée des aciers et des fontes

Outre les désignations commerciales propres aux producteurs, la désignation des alliages métalliques fait l'objet de normes européennes, qui se sont substituées aux anciennes normes, (AFNOR pour la France par fois encore utilisées à tort). Des exemples de correspondances avec des normes internationales sont donnés aussi souvent que possible dans ce chapitre.

Les teneurs utilisées pour exprimer les compositions des différents constituants sont en pourcentages massiques.

III.4.1. Désignation des aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone avec éventuellement des éléments d'addition. La normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'aciers : les aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0.6%, sauf 1.65% pour le Mn (manganèse)), les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés.

Aciers non alliés

Désignation selon la composition chimique

Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction mécanique. La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, ...) aux dimensions normalisées. Ce sont des aciers dont l'élaboration n'a pas été conduite en vue d'une application déterminée.

Ces aciers sont désignés par la lettre **C** suivi d'un chiffre représentant la teneur moyenne en carbone multiplié par **100**.

Exemple :

C 45 Cet acier non allié (C) possédant une teneur en carbone de 0.45 %.

Remarque : S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « G ».

Exemple :

GC35 : Acier au carbone, moulé de 0.35% en carbone.

Les teneurs en carbone de ces aciers en divers éléments considérés comme des impuretés, ne doivent pas dépasser des limites définies par la norme NF EN 10020.

Désignation selon l'emploi

Ils sont caractérisés par une faible teneur en carbone, et sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses et des variantes réservées à des usages particuliers (moulage, soudage...). La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux

dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi-fini : pré-laqués, galvanisés, nervurés, ondulés, etc. Ils sont appliqués généralement en (construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...). Carrosseries, profilés pour le bâtiment, construction navale, plateforme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de construction etc...

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 élastique en mégapascals.

Aciers non-alliés d'usage général

Ils sont désignés par les lettres S + Re : Re est la valeur minimale de la limite d'élasticité en MPa.

Exemple : **S 235** (acier d'usage général, de limite élastique 235 MPa).

Remarque : S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « **G** ».

Exemple : GS235.

Aciers non-alliés pour la construction mécanique

Ils sont désignés par les lettres E + Re : Re est la valeur minimale de la limite d'élasticité en MPa.

Exemple :

E320 (acier de construction mécanique, de limite élastique 320MPa).

Remarque : S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « **G** ».

Exemple : GE335.

III.4.2. Désignation des Fontes

Les fontes sont des alliages de fer et de carbone où leurs teneurs en carbone sont comprises entre 2.14 et 6.67%. Elles possèdent une bonne coulabilité. Ces dernières permettent donc d'obtenir des pièces de fonderie (pièces moulées) de formes complexes. Elles sont en général assez fragiles (cassantes) à cause de la présence du graphite lamellaire présent dans leur structure, peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...) difficilement soudables et ont une bonne usinabilité.

On distingue :

➤ **Les fontes blanches.** Ce sont des fontes dont la cassure a une teinte très claire. Elles sont caractérisées par des teneurs en carbone et en silicium relativement faibles et par une teneur élevée de manganèse ;

➤ **Les fontes grises.** Ce sont des fontes industrielles dont tout le carbone se trouve sous forme de graphite (état cristallisé). Selon la forme du graphite on distingue :

✓ Les fontes à graphite lamellaire ;

Les lamelles de graphite des fontes grises agissent en tant que canalisations verticales d'effort qui déclenchent et propagent des fissures rendant la fonte fragile. La forme lamellaire du graphite agit comme des entailles diminuant la résistance à la traction, tout particulièrement lorsque les lamelles sont très grandes. Ces fontes sont caractérisées par les propriétés suivantes :

- Economiques ;
- Amortissent bien les vibrations ;
- Bonne coulabilité et usinabilité ;
- Peu oxydables ;
- Bonne résistance à l'usure par frottement et aux sollicitations de compression. ;

Grace à ces propriétés les fontes grises lamellaires sont utilisées dans l'industrie pour la fabrication de carters, bâtis de machine, blocs moteur, supports, pièces aux formes complexes etc ...

Désignation

La désignation de fontes a graphite lamellaire selon la norme européenne est par :

- Un préfixe **EN** suivi d'un tiret ;
- Des lettres **GJL** qui représente la fonte à graphite lamellaire ;
- Un tiret ;
- Un nombre correspondant à la résistance minimale à la rupture par traction en MPa.

Exemples

EN- GJL-250 : Cette fonte à graphite lamellaire possède une résistance à la traction d'au moins 250 MPa.

EN- GJL-300 : fonte à graphite lamellaire de résistance $R_{e\ mini} = 300$ MPa.

✓ Les fontes à graphite sphéroïdale ;

La fonte ductile à graphite sphéroïdal (**FGS**), appelée aussi fonte nodulaire. En ajoutant des quantités minimales de magnésium à la fonte avant coulée, le graphite prend une forme sphérique et non en lamelles.

Ces fontes sont caractérisées par les propriétés suivantes :

- Plus légères et avec une meilleure résistance mécanique que les fontes grises ;
- Bonne ductilité, résilience et usinabilité.

À cause de ces propriétés les fontes à graphite sphéroïdal sont utilisées dans l'industrie mécanique pour la production de vilebrequins, arbres de transmission, tuyauteries...

Désignation

La désignation de fontes à graphite sphéroïdale est composée de :

- Un préfixe **EN** suivi d'un tiret ;
- Des lettres **GJS** qui représente la fonte à graphite sphéroïdale ;
- Un tiret ;
- Un nombre correspondant à la résistance minimale à la rupture par traction en MPa ;
- Un tiret ;
- Un nombre correspondant à un allongement après rupture.

Exemples :

EN- GJS-500-7 : Cette fonte à graphite sphéroïdale possède une résistance à la traction d'au moins 500 MPa et une valeur minimale d'allongement de 7% ;

EN-GJS-400-18 : fonte à graphite sphéroïdale de résistance maximale par traction $R_m = 400\text{MPa}$ et d'allongement maximal $A\% = 18$.

➤ **Les fontes malléables.** La fonte malléable est produite par malléabilisation (un traitement thermique de longue durée : sorte de recuit) de la fonte blanche et ont des propriétés voisines de celle de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables. À cause de ces propriétés les fontes à graphite malléables sont utilisées dans l'industrie mécanique pour la fabrication de carters, boîtiers etc...

Les fontes malléables sont divisées en deux groupes, selon le traitement (procédé) de malléabilisation appliqué, fontes malléables à cœur blanc et fontes malléables à cœur noir

Désignation

La désignation de fontes malléables est composée de :

- Un préfixe **EN** suivi d'un tiret ;
- Des lettres **GJM** qui représente la fonte malléable ;
- Une lettre **W** pour les malléables à cœur blanc (white) ou la lettre **B** pour celles à cœur noir (black) ;
- Un nombre correspondant à la résistance minimale à la rupture par extension en MPa ;
- Un tiret ;
- Un nombre correspondant à l'allongement après rupture.

Exemples

EN- GJMW-450-7 : Cette fonte malléable à cœur blanc possède une résistance à la traction d'au moins 450 MPa et une valeur minimale d'allongement de 7%.

EN-GJMB 300-6 : Cette fonte malléable à cœur noir possède une résistance à la traction d'au moins 3000 MPa et une valeur minimale d'allongement de 6%.

III.5. Désignation normalisée d'autres aciers alliés

III.5.1. Aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur de chaque élément d'addition est inférieure à 5 % et dont la teneur en manganèse est inférieure à 1%. Ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance. Ils sont utilisés à l'état brut de coulée ou après un traitement thermique. La désignation est fonction de la composition.

Ces aciers sont désignés par :

- Pourcentage de carbone multiplié par 100 ;
- Symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre des teneurs décroissantes;
- Des teneurs des principaux éléments d'addition multipliés par un facteur dépendant du matériau : 4, 10, 100 ou 1000 (voir tableau III.4.) ;
- éventuellement, des indications supplémentaires concernant la soudabilité (**S**), l'aptitude au moulage (**M**) ou à la déformation à froid (**DF**).

Remarque Les pourcentages des éléments d'alliage minoritaires ne figurent pas forcément dans la désignation mais sont néanmoins précisés dans la norme de définition de la nuance concernée.

Tableau III.4. Facteurs multiplicatifs des pourcentages de différents éléments d'alliage dans les aciers faiblement alliés

Eléments	Facteur
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Exemples

20MoCr5 :

- Acier faiblement allié possédant une teneur en carbone de 0.2 % ;
- Teneur en molybdène est de 0,5 % ;
- Des traces (non quantifiées) de chrome.

35 Cr Mo 4S : acier à 0.35% de carbone, 1% de chrome, moins de 1% de molybdène. Cet acier est soudable

Remarque : Si l'acier est moulé, la désignation est précédée de la lettre **G**.

G18NiCrMo6 :

- Acier faiblement allié et moulé et possédant une teneur en carbone de 0.18 % ;
- Teneur en nickel est de 1.25 % ;
- Des traces (non quantifiées) de chrome et de molybdène.

III.5.2. Aciers fortement alliés

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse la teneur de 5% en masse. Ces aciers sont réservés à des usages particuliers.

Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%).

La désignation normalisée commence par la lettre **X**, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. La seule différence réside dans le coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition (teneur réelle).

La désignation de ces aciers est indiquée par :

- Une lettre « **X** »,
- Pourcentage de carbone multiplié par 100 ;
- Des symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes ;
- Des teneurs des éléments d'alliage séparées par un tiret.

Si les aciers désignés sont moulés, leur désignation est précédée de la lettre **G**.

Exemples :

X6 Ni Cr Ti 17-12

- Acier fortement (X) allié de teneur en carbone 0.06 % ;
- Allié au nickel (Ni), au chrome (Cr) et au titane (Ti) ;
- Teneur en nickel est de 17 % (17) ;
- Teneur en chrome est de 12 % (12) ;
- Des traces (non quantifiées) de titane.

GX6CrNiTi18-11 : Acier fortement allié et moulé, contenant 0,06 % de carbone, 18% de chrome, 11% de nickel et des traces de titane (< 1%).

Le Tableau III.5. synthétise la désignation normalisée des aciers et des fontes selon la norme européenne.

Le tableau III.5. Désignation normalisée des aciers et des fontes selon la norme européenne

ALLIAGES FERREUX																																																											
FONTES	ACIERS		SYMBOLES CHIMIQUES DES ELEMENTS D'ALLIAGE																																																								
	ACIERS NON ALLIES	ACIERS ALLIES																																																									
<p>A) LES FONTES A GRAPHITE LAMELLAIRE : Exemple de désignation symbolique :</p> <p style="text-align: center;">EN-GJL-200</p> <p>Préfixe ——— Rr en Mpa Symbole du type de fonte</p> <p>* Rr = Limite à la rupture en Mpa (N/mm²)</p> <p>B) LES FONTES MALLEABLES : Exemple de désignation symbolique :</p> <p style="text-align: center;">EN-GJMB-450-6</p> <p>Préfixe ——— Rr en Mpa ——— A% Symbole du type de fonte</p> <p>* A% = Pourcentage d'allongement après rupture</p> <p>C) LES FONTES GRAPHITE SPHEROÏDAL : Exemple de désignation symbolique :</p> <p style="text-align: center;">EN-GJS-400-18</p> <p>Préfixe ——— Rr en Mpa ——— A% Symbole du type de fonte</p>	<p>A) LES ACIERS D'USAGE GENERAL : S B) LES ACIERS DE CONSTRUCTION MECANIQUE : E Exemple de désignation :</p> <p style="text-align: center;">S 235 E 335</p> <p>Symbole ——— Re en Mpa</p> <p>* Re = Limite minimal délasticité en Mpa (N/mm²)</p> <p>C) LES ACIERS POUR TRAITEMENT THERMIQUE ET FORGEAGE : C Exemple de désignation :</p> <p style="text-align: center;">C 40</p> <p>Symbole ——— % de carbone x 100</p> <p>Acier non allié - 0,4% de carbone</p> <p>D) LES ACIERS NON ALLIES MOULES : Si un acier est moulé, sa désignation est précédée de la lettre G Exemples : GS 235 GS 335 GC40</p>	<p>A) LES ACIERS FAIBLEMENT ALLIES : (Aucun élément d'alliage n'atteint 5%) Exemple de désignation :</p> <p style="text-align: center;">30 Ni Cr Mo 8-6</p> <p>% de carbone x 100 Symbole des éléments d'alliage par teneur décroissante</p> <p>% des éléments d'alliage x4 pour Cr, Co, Mn, Ni, Si, W x10 pour Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr x100 pour Ce, N, P, S x1000 pour B</p> <p>16 Ni Cr Mo 8-6 : 0,16 % de carbone - 2% de Nickel - 1,5% de Chrome - faible % de Molybdène</p> <p>B) LES ACIERS FORTEMENT ALLIES : (Au moins un élément d'alliage atteint 5%) Exemple de désignation :</p> <p style="text-align: center;">X 5 Cr Ni 18-10</p> <p>Symbole ——— % réel des éléments d'alliage % de carbone x 100 ——— Symbole des éléments d'alliage par teneur décroissante</p> <p>X 5 Cr Ni 18-10 : 0,05% carbone - 18% de Chrome - 10% de Nickel</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Symbole</th> <th>Élément d'alliage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al</td><td>Aluminium</td></tr> <tr><td>Sb</td><td>Antimoine</td></tr> <tr><td>Ag</td><td>Argent</td></tr> <tr><td>Be</td><td>Béryllium</td></tr> <tr><td>Bi</td><td>Bismuth</td></tr> <tr><td>B</td><td>Bore</td></tr> <tr><td>Cd</td><td>Cadmium</td></tr> <tr><td>Ce</td><td>Cérium</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>Chrome</td></tr> <tr><td>Co</td><td>Cobalt</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>Cuivre</td></tr> <tr><td>Sn</td><td>Etain</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>Fer</td></tr> <tr><td>Ga</td><td>Gallium</td></tr> <tr><td>Li</td><td>Lithium</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>Magnésium</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>Manganèse</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>Molybdène</td></tr> <tr><td>Ni</td><td>Nickel</td></tr> <tr><td>Nb</td><td>Niobium</td></tr> <tr><td>Pb</td><td>Plomb</td></tr> <tr><td>Si</td><td>Silicium</td></tr> <tr><td>Sr</td><td>Strontium</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>Titane</td></tr> <tr><td>V</td><td>Vanadium</td></tr> <tr><td>Zn</td><td>Zinc</td></tr> <tr><td>Zr</td><td>Zirconium</td></tr> </tbody> </table>	Symbole	Élément d'alliage	Al	Aluminium	Sb	Antimoine	Ag	Argent	Be	Béryllium	Bi	Bismuth	B	Bore	Cd	Cadmium	Ce	Cérium	Cr	Chrome	Co	Cobalt	Cu	Cuivre	Sn	Etain	Fe	Fer	Ga	Gallium	Li	Lithium	Mg	Magnésium	Mn	Manganèse	Mo	Molybdène	Ni	Nickel	Nb	Niobium	Pb	Plomb	Si	Silicium	Sr	Strontium	Ti	Titane	V	Vanadium	Zn	Zinc	Zr	Zirconium
Symbole	Élément d'alliage																																																										
Al	Aluminium																																																										
Sb	Antimoine																																																										
Ag	Argent																																																										
Be	Béryllium																																																										
Bi	Bismuth																																																										
B	Bore																																																										
Cd	Cadmium																																																										
Ce	Cérium																																																										
Cr	Chrome																																																										
Co	Cobalt																																																										
Cu	Cuivre																																																										
Sn	Etain																																																										
Fe	Fer																																																										
Ga	Gallium																																																										
Li	Lithium																																																										
Mg	Magnésium																																																										
Mn	Manganèse																																																										
Mo	Molybdène																																																										
Ni	Nickel																																																										
Nb	Niobium																																																										
Pb	Plomb																																																										
Si	Silicium																																																										
Sr	Strontium																																																										
Ti	Titane																																																										
V	Vanadium																																																										
Zn	Zinc																																																										
Zr	Zirconium																																																										

Chapitre IV : Traitements thermiques et thermochimiques de diffusion

Objectifs du chapitre

À l'issue de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Expliquer les cycles de traitements thermiques et thermochimiques ;
- Différencier entre les différents types de traitements thermiques et thermochimiques ;
- Connaître les effets des traitements thermiques et thermochimiques sur les propriétés mécaniques.

La fabrication de pièces travaillant dans des conditions extrêmes, oblige les constructeurs à faire très bien attention aux matériaux à partir desquels ils vont les fabriquer. En effet, ils se trouvent dans l'obligation de modifier les caractéristiques de ces matériaux soit avant la fabrication soit à la fin de la fabrication. Pour des exigences des propriétés d'emplois on fait appel à des aciers alliés (aciers faiblement alliés et aciers fortement alliés), sauf les aciers de classe S et E, tout le reste des aciers sont capables de donner des performances mécaniques meilleurs par traitements thermiques, traitements thermochimiques et traitements thermomécaniques (figure IV. 1).

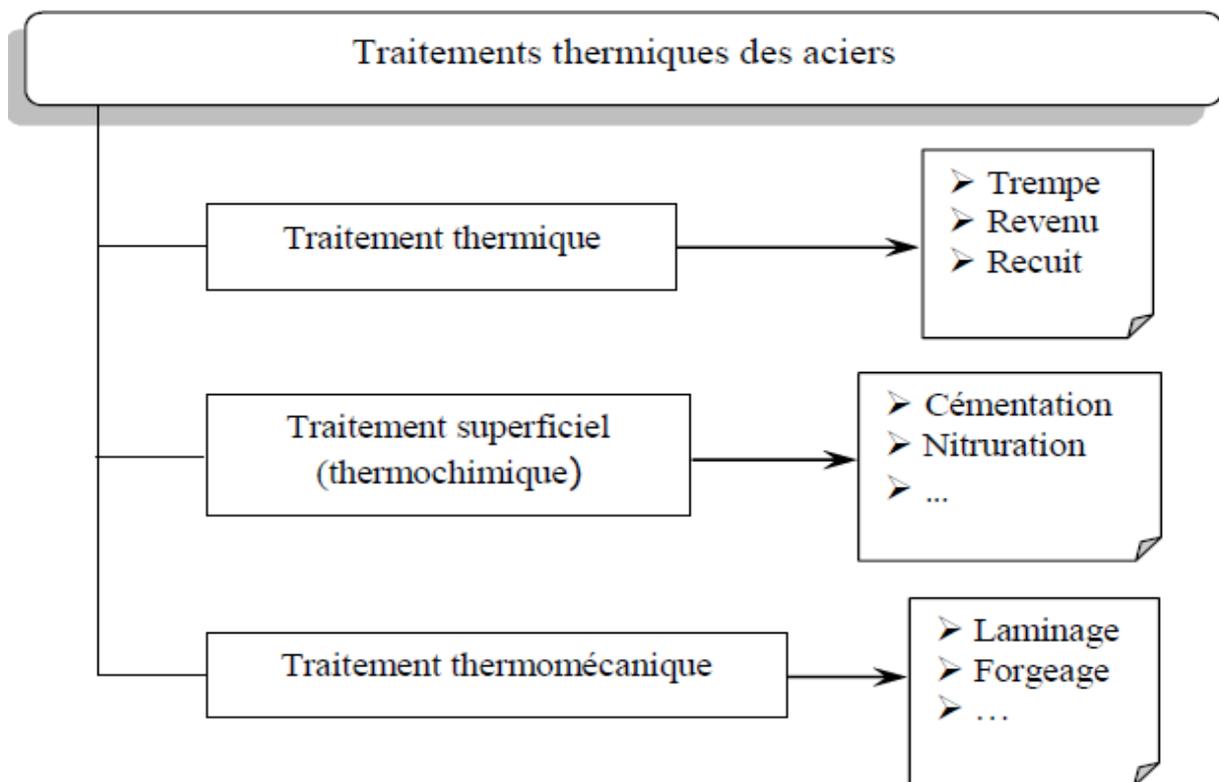


Figure IV.1. Différent types de traitements des métaux et alliages

IV.1. Traitements thermiques

La définition maintenue par la norme NF EN 10052 pour le traitement thermique est une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure.

Les traitements thermiques des métaux et alliages conduisent à des transformations structurales issues de transformations de phases, cristallisation et diffusion.

Le but final des traitements thermiques est de faire varier les propriétés mécaniques des alliages traités, c'est-à-dire l'obtention d'une répartition optimale des précipités dans la matrice par un durcissement structural grâce à une série de chauffages et de refroidissements contrôlés. Dans ce cas le métal ou alliage est porté à une température plus ou moins élevée et ensuite refroidi lentement ou rapidement selon l'objectif visé. Les propriétés mécaniques des alliages traités dépendent de la répartition des précipités, de leur taille et de leur distance moyenne.

IV.1. 1. Buts des Traitements thermiques

Les traitements thermiques ont pour but de :

a. Améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmenter la résistance à la rupture et la limite élastique R_m , R_e et $A\%$ en donnant une meilleure tenue de la pièce.

- Augmenter la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

b. Régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c. Supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subis une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). La figure IV.2 résume le but final des traitements thermiques (amélioration des propriétés mécaniques d'une pièce métallique).

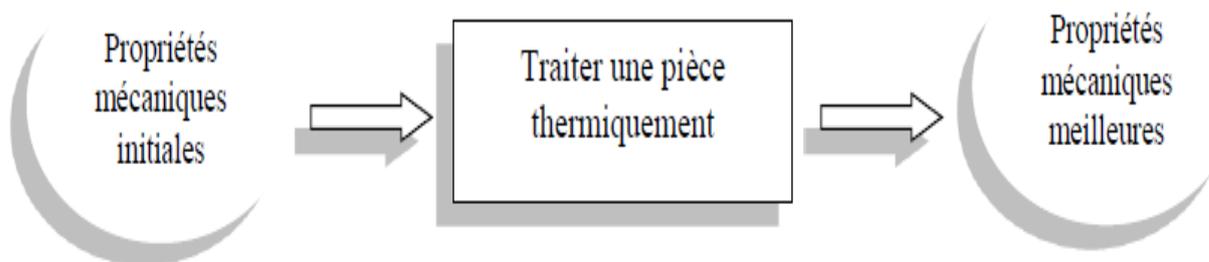


Figure IV. 2. But final des traitements thermiques d'une pièce métallique

IV.1. 2. Procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Ce traitement consiste, donc, à jouer sur trois éléments : la température, le temps et le milieu de séjour durant le maintien en température (neutre ou réactif) lors de trois périodes différentes à savoir la montée en température, le maintien à température et le refroidissement.

En général, cette dernière période est essentielle et critique. La vitesse convenable pour obtenir les propriétés attendues exige le choix d'un milieu de refroidissement convenable comme l'air, l'eau, l'huile, bain de sel, gaz ou mélanges gazeux sous pression en fonction de la trempabilité et des dimensions des pièces à traiter. Le procédé du traitement thermique se compose de cycle suivant (figure IV. 3).

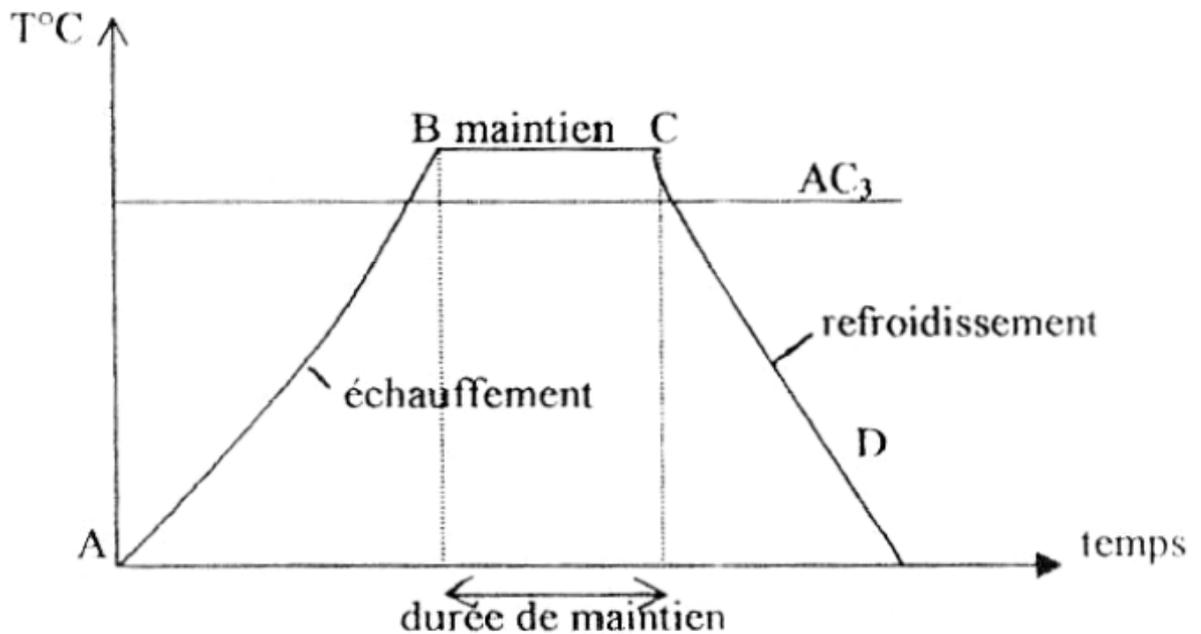


Figure IV. 3. Cycle de traitement thermique

Où :

AB : Echauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3) ;

BC : Maintien à une température définie ;

CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- ✓ lente (dans le four, à l'air) ;
- ✓ Assez rapide (dans l'huile) ;
- ✓ Très rapide (dans l'eau, azote liquide).

IV.1. 3. Constituants métallographiques issus de traitements thermiques

En plus des constituants microstructuraux d'équilibre du fer montré dans le chapitre III, divers constituants métastables sont observés après les traitements thermiques lors du refroidissement des métaux dans des conditions s'écartant de l'équilibre thermodynamique, notamment la martensite. Ces transformations s'expliquent facilement par des diagrammes TTT (Température-Temps-Transformation) et TRC (Transformation en Refroidissement Continu) (figure IV. 4). Pour les aciers hypoeutectoïdes, la transformation perlitique est précédée par l'apparition de ferrite, pour les aciers hypereutectoïdes, elle est précédée par l'apparition de cémentite secondaire.

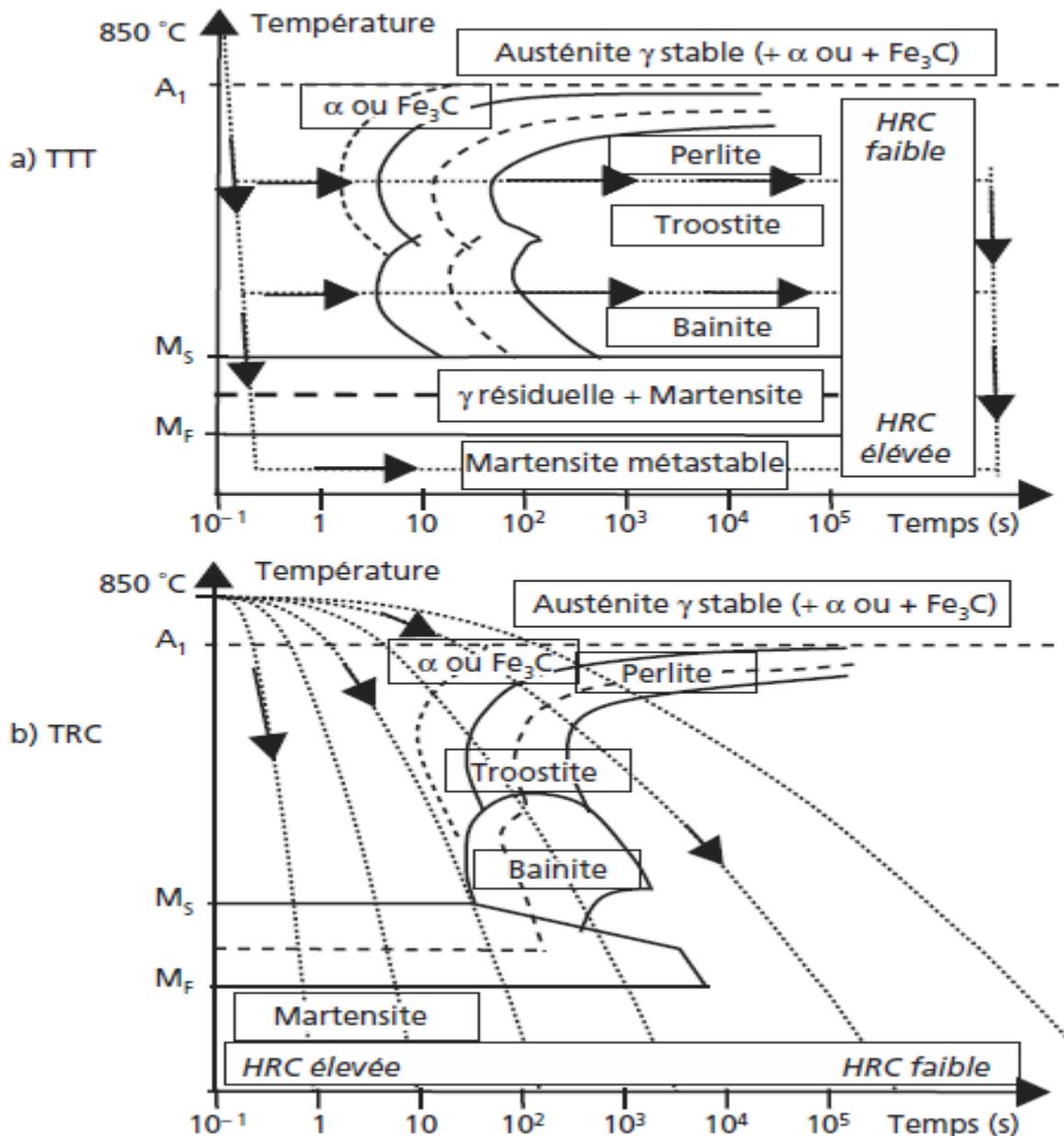


Figure IV.4. Schéma typique des diagrammes TTT et TRC d'un acier au carbone

Les produits de transformations issus d'un traitement thermique peuvent être :

➤ **Martensite**

C'est une solution solide de fer sursaturée en carbone. C'est un constituant de trempe produit au cours de la décomposition de l'austénite. La structure se présente sous la forme d'aiguilles obtenue uniquement si la vitesse de refroidissement est supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. La martensite est une ferrite au réseau distordu sursaturé en carbone. Elle est de 500-650 HB selon la teneur en carbone, ferromagnétique, et difficilement usinable.

➤ **Bainite**

C'est un constituant de trempe intermédiaire. La structure a un aspect voisin de celui de la martensite. C'est un agrégat de ferrite et de carbure (cémentite). Elle présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite), mais de structure vraiment fine, souvent en aiguilles ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle accompagne souvent la martensite dans les aciers trempés. Elle est moins dure, moins fragile que la martensite et facile à usiner. En fonction de la température du traitement, on rencontre la bainite inférieure et la bainite supérieure

➤ **Troostite**

C'est un agrégat lamellaire analogue à la perlite, constituée de très fines lamelles de ferrite et cémentite (fer α et Fe_3C), obtenue par un refroidissement rapide, elle se précipite lors d'une trempe douce au cours de la décomposition de l'austénite. Fréquemment, elle est associée à la bainite et à la martensite dans les aciers trempés. Sa dureté est supérieure à 400 HB.

➤ **Sorbite**

C'est un constituant extrêmement fin qui se forme au cours du réchauffage des aciers trempés et revenus. Elle a une structure spécifique issue de la décomposition de la martensite et de l'austénite résiduelle. Sa structure est constituée par de fins carbures de fer (Fe_3C : cémentite) dans une matrice ferritique. La sorbite possède une bonne résilience et une dureté de 250-400 HB.

IV.1. 4. Effet de la température d'austénitisation, de la teneur en carbone et des éléments d'alliage sur le processus des traitements thermiques

Effet de la température d'austénitisation

L'élévation de la température d'austénitisation produit rapidement une austénite homogène. Cette action conduit à une augmentation des temps d'incubation, et donc à une diminution des vitesses critiques de transformation (décalage vers la droite des domaines d'apparition de la perlite et de la

bainite dans les diagrammes TTT et TRC. Mais il peut aussi provoquer un grossissement du grain austénitique, donc l'obtention après transformation d'une microstructure plus grossière, défavorable aux propriétés mécaniques.

Effet de la teneur en carbone

Il provient de deux mécanismes contradictoires :

- ✓ La martensite obtenue après trempe est d'autant plus dure qu'elle emprisonne plus de carbone en sursaturation. De plus, l'augmentation de teneur en carbone augmente légèrement les temps d'incubation améliorant ainsi la trempabilité ;
- ✓ L'augmentation de teneur en carbone abaisse les points MS (début de martensite) et MF (fin de martensite), voir figure IV.4. MF devient inférieure à 20 °C à partir d'environ 0,7 %C. Pour une température finale de trempe de 20 °C, il en résulte donc une diminution de la teneur en martensite du mélange (martensite + austénite résiduelle) d'où une diminution de dureté.

Effet des éléments d'alliage

Dans l'ensemble, comme le carbone, ils augmentent les temps d'incubation, repoussent les domaines de transformation perlitique et bainitique vers les temps longs et améliorent la trempabilité.

IV.1. 5. Classification des traitements thermiques

En général, les traitements thermiques sont classés en deux familles (figure IV.5). On distingue les traitements sans changement structural (structure initiale) appliqués surtout pour les alliages (alliage d'aluminium, alliage de cuivre...) et les traitements avec changement allotropique de la matrice remarqués dans les traitements des aciers.

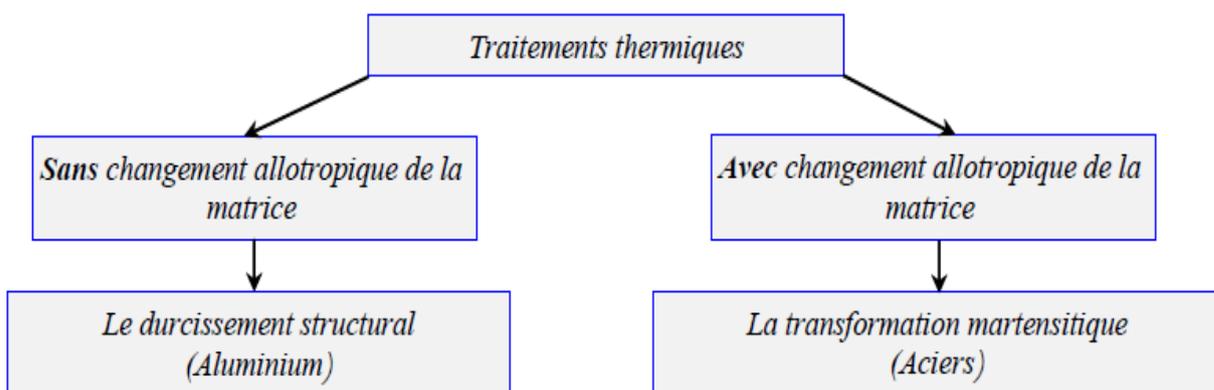


Figure IV. 5. Classification générale des traitements thermiques des matériaux métalliques

IV.1.5.1. Recuit

Le recuit est un traitement thermique qui permet d'annuler les effets néfastes de traitements thermiques ou mécaniques précédents notamment de la ségrégation, de l'écrouissage et des contraintes de soudage etc, c'est-à-dire, de se débarrasser de certains états hors équilibre. D'une manière générale, le recuit a comme conséquence le retour à un équilibre physico-chimique et/ou mécanique plus ou moins complet, lié éventuellement à une tendance vers l'équilibre structural qui peut être :

- Equilibre physique : équilibre des phases ;
- Equilibre chimique : composition chimique ;
- Equilibre mécanique : contraintes internes ;
- Equilibre structural : taille des grains, défaut de structure etc...

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture).

Buts de recuit

Le recuit a pour but de :

- ✓ Diminuer la dureté d'un acier trempé ;
- ✓ Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques;
- ✓ Régénérer un métal écroui ou surchauffé ;
- ✓ Homogénéiser les textures hétérogènes ;
- ✓ Réduire les contraintes internes.

Le cycle thermique du recuit comprend :

- ✓ Chauffage de la pièce à une température déterminée dite température de recuit (le choix de la température dépend des objectifs visés, et peut aller de 450 et 1100°C) ;
- ✓ Maintien de cette pièce à cette température pendant un temps donné ;
- ✓ Refroidissement à la vitesse adéquate jusqu'à température ambiante.

Les différents types de recuit sont :

- ✓ **Recuit d'homogénéisation (ou de diffusion)**

Il s'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique de l'austénite. Il sert à limiter ces hétérogénéités chimiques qui se trouvent dans le solide. Le recuit a lieu de 950 à 1200°C puis est suivi par un refroidissement de

20 à 60°C par heure. Ce recuit permet de diminuer les hétérogénéités chimiques, de réaliser un refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe (pour éviter la transformation martensitique) et se fait à une température supérieure à A_3 .

✓ **Recuit de recristallisation**

Il sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et de lui redonner sa capacité de déformation. Ce recuit permet de régénérer une structure nouvelle à partir d'une structure écrouie, de refroidir lentement et se réalise à une température inférieure à A_1 .

✓ **Recuit de détente (ou de stabilisation ou de relaxation)**

Le recuit de détente permet d'éliminer les contraintes physico-chimiques internes qui se trouvent dans le solide produites par le soudage ou la mise en forme. Il s'effectue entre 600 et 650°C suivi d'un refroidissement lent. Ce recuit permet de réaliser l'équilibre mécanique, se pratique en dessous de A_1 avec un refroidissement lent pour ne pas reproduire des contraintes internes.

✓ **Recuit d'adoucissement**

Il détruit les effets des traitements thermiques antérieurs. Cela permet d'abaisser la dureté du matériau. Il est utile pour la mise en œuvre à froid. Ce recuit permet de faciliter l'usinage des pièces et se fait au-dessus de A_3 avec un refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe.

✓ **Recuit de normalisation (ou régénération)**

Il affine les grains du métal et s'applique aux pièces forgées. Le but est d'avoir une structure avec de très fins grains bien répartis dans tout le matériau qui a subi un maintien à haute température (moulage, forgeage...). Ce recuit permet de diminuer la taille des grains due à une surchauffe au cours d'une soudure ou d'un forgeage (à chaud) et se fait au-dessus de A_3 avec un refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe.

IV.1.5.2. Trempe et revenu

➤ La trempe

Contrairement au recuit d'adoucissement, le but de la trempe est d'augmenter la dureté du matériau. Il est utilisé pour les aciers dont la teneur en carbone dépasse 0.3%.

Les trois facteurs influençant la trempe sont :

- La teneur en carbone qui conditionne l'augmentation possible de la dureté ;
- La température de trempe. Elle doit permettre la formation d'austénite (la température doit être supérieure de 50°C par rapport au seuil de formation de l'austénite) ;
- La vitesse de trempe et le refroidissement doivent être suffisamment rapides pour permettre l'augmentation de dureté.

On peut classer par ordre de vitesse croissante les constituants formés grâce à la trempe :

Perlite < Troostite < Bainite < Martensite

La trempe est souvent suivie d'un revenu car il permet de détruire le reste d'austénite résiduelle restante contenue dans le matériau (figure IV.6).

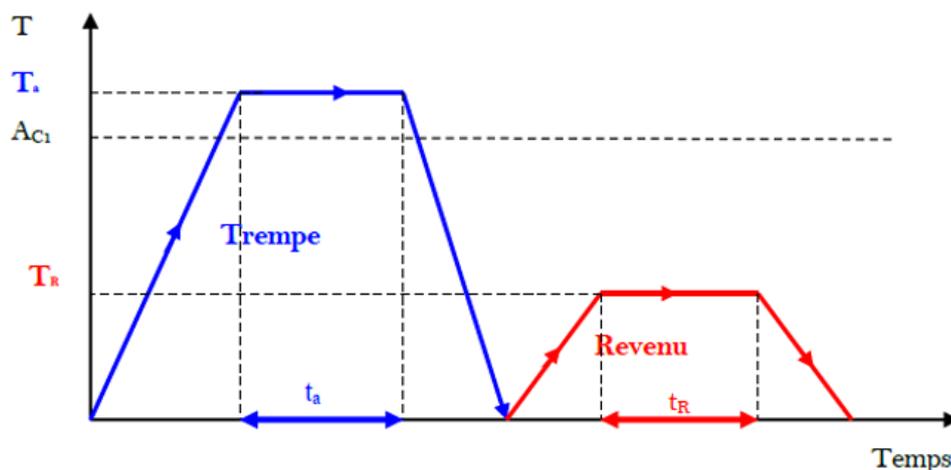


Figure IV. 6. Cycle complet du traitement thermique (trempe et revenu)

Buts de trempe

Une trempe a pour objet de durcir le métal. Elle permet d'obtenir des aciers très durs mais dans la plupart des cas peu ductiles. Elle permet en général augmenter la résistance à la traction (R_m), la limite élastique (R_e), la dureté HB et de diminuer l'allongement ($A\%$), la striction ($Z\%$) et la résilience (K).

Le cycle thermique de trempe comprend :

1. Un chauffage lent de la pièce à une température appropriée (austénitisation ou mise en solution), dépendant du type d'acier à traiter ;

2. Un temps de maintien à la température pour que les transformations soient complètes ;
3. Un refroidissement effectué à partir de la température dite température de trempe jusqu'à une température plus basse pouvant différer de la température ambiante, en plongeant la pièce par exemple dans de l'eau (trempe à l'eau) ou de l'huile (trempe à l'huile) ou par insufflation d'un gaz tel que l'air. On peut évoquer également les émulsions eau-polymères ainsi que certains sels (nitrates, nitrites) comme milieux de trempe.

Les défauts engendrés par la trempe sont :

- Décarburation superficielle due à l'atmosphère (du four) ;
- Corrosion en cas de maintien prolongé à haute température ;
- Contraintes internes qui résultent des vitesses de refroidissement différentes (ou de chauffage) entre les diverses parties de la pièce et de la transformation martensitique dans le cas de la trempe des aciers.

➤ Revenu

Le revenu est un traitement thermique qui suit la trempe. On effectue un revenu immédiatement après la trempe sur les pièces complètement refroidies. En effet la structure martensitique créée lors de la trempe donne une certaine fragilité à la pièce.

Une pièce d'acier est très rarement utilisée à l'état simplement trempé car elle est souvent plus dure. De plus, elle est très fragile, car elle est le siège de contraintes mécaniques importantes...

Buts de revenu

D'une manière générale, le revenu permet de diminuer les effets néfastes de la trempe (corriger les défauts causés par la trempe) : fragilité de la pièce et les contraintes internes en rendant la pièce plus ductile et plus tenace. Il peut dans certains cas particuliers permettre un durcissement secondaire. Le but du revenu est donc :

- D'abaisser la résistance à la traction (R_m), la dureté (HB, HRC) ;
- D'élever la résilience (K), la ductilité (A%).

Le cycle thermique de revenu comprend :

- Un chauffage de la pièce à une température déterminée (inférieure à la température de début de transformation de phase γ de l'acier ($\sim 700^\circ\text{C}$) ;
- Un maintien de la pièce à cette température pendant un temps donné ;
- Un refroidissement approprié.

Remarque

Le revenu fait chuter considérablement la dureté d'une pièce. Pour limiter ce phénomène il faut maintenir la température à environ une heure.

On peut aussi effectuer un revenu de détente qui a pour but d'éliminer les contraintes dues à la trempe. Il s'effectue à une température comprise entre 100 et 200°C.

IV. 2. Traitements thermochimiques de diffusion

Le traitement thermochimique (trempe superficielle) est la saturation superficielle de métal (acier) en tel ou tel élément (par exemple : carbone, azote, aluminium, chrome etc.), par sa diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée. C'est-à-dire, on utilise les traitements thermochimiques, dans le cas où l'on aura besoin d'une dureté plus élevée à la surface et une ductilité plus grande au cœur de la pièce. Tous les traitements thermiques envisagés se déroulent sans changement de composition chimique. Tandis que les traitements thermochimiques s'effectuent avec changement de la composition chimique.

Pour effectuer cette trempe superficielle il faut chauffer localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à température d'austénitisation, puis on refroidit avec une vitesse suffisante pour obtenir une trempe (apparition de martensite).

IV. 1. Cémentation

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier (c'est-à-dire l'enrichissement d'une couche superficielle de (1 à 2 mm) de la pièce par le carbone) afin d'obtenir après trempe une bonne résistance à l'usure et à la fatigue. La température de cémentation est de 920°C pour que la structure soit austénitique.

Pour effectuer une cémentation il faut :

- Effectuer au préalable un recuit ;
- Effectuer une trempe juste après ;
- Effectuer un revenu après la trempe.

Seules les pièces à cœur ductile, soit un pourcentage de carbone inférieur à 0.3%, peuvent être cémentées car il faut que l'élévation de la dureté et de la résistance des couches superficielles qui entraînent une fragilité importante soit compensées.

Par exemple les aciers non alliés (C10- C20), les aciers au CrMo (18CrMo4) ou les aciers au NiCr (20NiCr6).

Le schéma d'une d'une cémentation est schématisé comme suit :

Recuit \longrightarrow Cémentation \longrightarrow Trempe \longrightarrow Revenu

Les agents de cémentation peuvent être solides, liquides ou gazeux.

a. Cémentation en caisse

Les ciments solides sont des mélanges à base de matières carbonées aptes à former les gaz ou les espèces carburantes (CO). La cémentation se fait en vase clos pour éviter que les gaz ne s'échappent, d'où le nom de cémentation en caisse donné à ce procédé qui est peu utilisé actuellement. Il est réservé au traitement de grosses pièces ou de séries limitées de petites pièces.

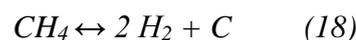
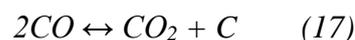
b. Cémentation liquide

Les ciments liquides sont à base de cyanure ou de Ferro-cyanures fondus. Les pièces sont immergées dans le bain de sel fondu à une température donnée pour la réaction chimique et la diffusion.

c. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par instillation et décomposition à chaud de liquides organiques tels que le méthanol, l'éthanol utilisés purs ou dilués, ou par combustion d'hydrocarbures.

Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libre libéré s'insère dans le réseau cubique à faces centrées du fer.



IV. 2. 2. Nitruration

La nitruration est un traitement thermochimique de diffusion de l'azote atomique dans le Fer α . C'est un procédé de durcissement superficiel appliqué à l'acier permettant d'obtenir des duretés plus élevées que celles obtenues par cémentation.

La nitruration consiste à saturer en azote, la surface de l'acier dans le milieu ammoniacque.

Elle permet :

- D'augmenter la dureté de la couche superficielle (en surface) ;
- D'augmenter la résistance à l'usure et au grippage ;
- D'augmenter la limite de fatigue ;
- D'augmenter la résistance à la corrosion dans des milieux comme l'atmosphère, l'eau, la vapeur etc...

Elle a lieu à environ 500°C, sur une profondeur allant de quelques dizaines de microns où la microdureté peut aller jusqu'à 1300 HV et à quelques dixièmes de millimètres (de 400 HV à 900 HV). Les différentes nitrurations sont :

a. Nitruration gazeuse :

la dureté est obtenue par formation de nitrure d'aluminium et de chrome sur la pièce ;

b. Nitruration liquide :

La dureté est obtenue par formation de nitrure d'aluminium et de chrome sur la pièce ;

c. Nitruration ionique :

La dureté est obtenue par formation de nitrure de fer et par diffusion de l'azote.

Les aciers de nitruration gazeuse ou liquide doivent contenir de l'aluminium ou du chrome (30CrMo12- 30CrAlMo6-12), par contre pour la nitruration ionique tous les aciers sont compatibles.

Le schéma de la nitruration est schématisée par :

Recuit → Trempe → Revenu → Nitruration

IV. 2. 3. Carbonitruration

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse ($\text{CO} + \text{N}_2 + \text{C}_3\text{H}_8$), autrement dit, à cémenter simultanément l'acier par du carbone et de l'azote. Elle est essentiellement une cémentation et non une nitruration. Elle permet au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. L'azote permet de réduire la température de la cémentation (par la diminution de la température de formation de l'austénite) donc économiser de l'énergie. Ainsi elle a lieu entre 600 et 880°C. Le durcissement de la couche carbonitrurée (0.1 mm) est obtenu par une trempe directe (on effectue la trempe directement à partir de la température de carbonitruration), ainsi la dureté atteint 850 HV.

Ce traitement est suivi d'une trempe. Ce procédé est donc un compromis entre la cémentation et la nitruration. Le durcissement provient surtout de la cémentation par carburation de la couche superficielle des pièces. Elle est pratiquée pour des pièces d'articulations, les engrenages, les arbres etc...

Le schéma de la carbonitruration est schématisée par :

Recuit → Carbonitruration → Trempe → Revenu

V. Références bibliographiques

1. Sylvie Pommier, Science des Matériaux, Université pierre et marie curie, GNS CACHAN 2005-2006.
2. Aneflous Latifa, cristallographie, Faculté des sciences Agadir, 15/12/2011.
3. Jean-louis fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles, Nathan, 2001.
4. Abbas Belfar, Cours et exercices de Cristallographie, Université de sciences et de technologie ORON (USTO), 2014/2015.
5. Hakima Yahi, Cristallographie, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2017.
6. Michel Dupeux, Aide-mémoire science des matériaux, Dunod, Paris, 2004, 2008
7. David R. H. Jones, matériaux propriétés, applications et conception, Dunod, Paris, 2013.
8. Christine Brassine, Connaissance des Matériaux Métalliques, Université de Liège, Métallurgie et Science des Matériaux, 04/366.91.10.
9. Fabienne Delaunois, Science Des Matériaux 1-2^{ème} Partie : Connaissance Des Matériaux Métalliques, Faculté Polytechnique De Mons Service De Métallurgie, 2007-2008.
10. Saïd Benmokhtar, Cours De Diagramme De Phases, Université Hassan 2 Mohammedia, 2013.
11. C. Saury, Chapitre T7 : Les équilibres de phases dans les mélanges binaires solide-liquide, Document de cours Math Spé PC 2013-2014.
12. P. Millet, Diagrammes de Phases, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009-2010.
13. Gilles OLIVE, Chimie des Matériaux, Ecole Industrielle et commerciale de NAMUR, 3^{ème} Edition 07/01/2005.
14. Saïd Bensaada (université de Biskra), Sciences des matériaux tome1 et 2 OPU, 2012.
15. Arfaoui Ali, Chaker Med Amir, Matériaux Métalliques, chapitre 5 : Diagramme D'équilibre des alliages Fer-Carbone, ISET Kasserine 2009-2010.
16. Hidouri Abdelmoumen, Cours De Matériaux Métalliques, ISET Gafsa, 2016-2017.
17. Messaoui Mosbah, Support De Cours Matériaux Métalliques, ISET de Gafsa 2014-2015.
18. Karl-Heinrich Grote Erik K. Antonsson : Springer Handbook of Mechanical Engineering, (Materials Science and Engineering), Springer Berlin Heidelberg, Germany 2009.
19. Dmitri kopeliovich : Effect of alloying elements on steel properties, Substances and Technologies 2009.
20. Francois Cardarelli : Materials Handbook (Ferrous Metals and Their Alloys), Chemistry and Materials Science, Springer London 2008.
21. W. Callister ; Science et génie des matériaux ; Dunod. 2003.

22. F. Ashby ; Matériaux : T1 Propriétés, applications et conception, Collection : Sciences Sup, Dunod. 2013.
23. F. Ashby ; Matériaux : T2 Microstructures, mise en œuvre et conception, Collection : Sciences Sup, Dunod, 2014.
24. J.M. Dorlot ; Des matériaux, Presses internationales Polytechnique, 2002.
25. J. Gordon ; Structures et matériaux : L'explication mécanique des formes, 1994.
26. Benjamin Martin, Résumé de cours « Matériaux » Publié sur <http://www.ifrance.com/espace-prepa/>.