



OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

**Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail
Direction Recherche et Ingénierie de la Formation**

**RÉSUMÉ THÉORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

MODULE N° : 06	MATERIAUX ET METALLURGIE
---------------------------	-------------------------------------

Secteur : CONSTRUCTION METALLIQUE

Spécialité : TSBECM

Niveau : TECHNICIEN Spécialisé

Document élaboré par :

L'équipe du CDC Génie Mécanique

DRIF

Révision linguistique

-
-
-

Validation

-
-
-

MODULE 6 : MATERIAUX ET METALLURGIE

CODE :	THEORIE :	40 %	22 H
DUREE : 55 HEURES	TRAVAUX PRATIQUES :	55 %	30 H
RESPONSABILITE : D'ETABLISSEMENT	ÉVALUATION :	5 %	3 H

OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT

COMPÉTENCE

- Mettre en œuvre ses connaissances des matériaux et de la métallurgie

PRÉSENTATION

Le module «exploitation des connaissances des matériaux de construction» est étudié au cours de la première année de formation. Ce module de compétence générale est préalable à tous les modules de compétence particulière.

DESCRIPTION

L'objectif de ce module est de rendre le stagiaire apte à identifier un matériau de construction métallique ferreux et non ferreux, d'indiquer sa composition chimique, ses caractéristiques mécaniques et métallurgiques et de justifier le choix du dit matériau.

CONTEXTE D'ENSEIGNEMENT

- L'apprentissage de ce module devra débuter dès la deuxième semaine de cours..
- L'évaluation sera individuelle.
- Des échantillons de différents matériaux ferreux et non ferreux devraient être présentés aux stagiaires lors de la visite d'entreprises et de chantiers

CONDITIONS D'ÉVALUATION

- Travail individuel.
- À partir :
 - De questions posées par le formateur ;
 - De plans et croquis ;
- À l'aide :
 - De règles et normes;
 - Des documents et catalogues ;

OBJECTIFS	ÉLÉMENTS DE CONTENU
<p>1. Connaître les principaux procédés d'élaboration des matériaux de construction</p> <p>2. Interpréter le diagramme Fer-Carbone</p> <p>3. Indiquer les différents types d'aciers, de fontes et des alliages des matériaux de construction</p> <p>4. Utiliser la désignation normalisée des matériaux de construction métallique (ferreux ou non ferreux) et donner sa composition et ses caractéristiques physiques, mécaniques et métallurgiques</p> <p>A. Identifier des matériaux de construction métallique ferreux et non ferreux et indiquer sa composition chimique et ses caractéristiques physique, mécanique et métallurgique</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Connaître les procédés : - Elaboration des matériaux ferreux : <ul style="list-style-type: none"> - Fonte, - Acier, - Elaboration des matériaux non ferreux : <ul style="list-style-type: none"> - Aluminium, - Cuivre, - Bronze, - Etude des différentes phases : <ul style="list-style-type: none"> - Liquide - Solide <ul style="list-style-type: none"> Perlite Ferrite Austénite Cémentite Eutectoïde Hypoeutectoïde.... - Aciers doux - Aciers durs - Aciers mi-doux - Fontes <ul style="list-style-type: none"> - Blanches - Grises - truitées - Alliages de cuivre - Alliages d'aluminium - Aciers inoxydables... - Connaître les désignations normalisées des différents matériaux métalliques - Savoir comment sortir à partir de la désignation normalisée la composition chimique et les caractéristiques physiques, mécaniques et métallurgiques - A partir de sa désignation normalisée: <ul style="list-style-type: none"> - Identifier les matériaux de construction - Indiquer : <ul style="list-style-type: none"> La composition chimique Les caractéristiques physiques, mécaniques et métallurgiques

OBJECTIFS	ÉLÉMENTS DE CONTENU
<p>5. Énoncer les critères de choix des matériaux de construction ferreux et non ferreux</p> <p>6. Énoncer les principaux essais et préciser les caractéristiques qu'ils permettent de contrôler</p> <p>7. Énoncer les principaux traitements thermiques et thermochimiques permettant d'améliorer les performances mécaniques des matériaux de construction métalliques</p> <p>8. Connaître l'influence de la température sur les caractéristiques physiques, mécaniques et métallurgiques des matériaux de construction métalliques ferreux</p> <p>B. Interpréter et justifier le choix d'un matériau</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques : <ul style="list-style-type: none"> - Physique, - Mécanique, - Métallurgique, - Coût ... - Essais de : <ul style="list-style-type: none"> - Traction : limites d'élasticité et de rupture, module de Young et allongement - Cisaillement - Résilience - Dureté... - Trempe : augmentation de la dureté - Revenu : diminution des effets néfastes de la trempe - Recuit : - Cémentation : augmentation de la dureté superficielle.... - Changement des propriétés mécaniques - Modification de la structure granulaire - Argumenter le choix d'un matériau

SOMMAIRE

ELABORATION DE L'ACIER

- 1. PRINCIPES GENERAUX**
- 2. ACIER A L'OXYGENE**
- 3. ACIER ELECTRIQUE**
- 4. COULEE DE L'ACIER**

APPLICATION DE NOTION DE METALLURGIE

- 1. TENEUR EN CARBONNE DE CERTAINS METAUX FERREUX**
- 2. MÉTAUX NON FERREUX**
- 3. COMPARAISON ENTRE LES METAUX FERREUX ET LES METAUX NON FERREUX**

DESIGNATION DES ACIERS

LES PROPRIETES PHYSIQUES DES METAUX

- 1. PROPRIETES PHYSIQUES DES METAUX**

ESSAIS MECANIQUES

- 1. ESSAI D'EMBOUTISSAGE**

2. ESSAIS D'ENDURANCE

3. ESSAI DE FLUAGE

4. ESSAI DE RESILIENCE ET DE FLEXION PAR CHOC

5. ESSAI DE TRACTION

6. ESSAI DE DURETE

NOTIONS DE TRAITEMENTS THERMIQUES

1. LA TREMPE

2. LE REVENU DES ACIERS

3. LE RECUIT

EXERCICES

ELABORATION DE L'ACIER

1. PRINCIPES GENERAUX

2. ACIER A L'OXYGENE

3. ACIER ELECTRIQUE

4. COULEE DE L'ACIER

1. PRINCIPES GENERAUX

L'élaboration de l'acier se fait:

- Soit à partir de la fonte liquide (fonte d'affinage): convertisseurs à l'oxygène
- Soit à partir de ferrailles par refusions au four électrique.

Afin de constituer un stock tampon entre les H.F. et l'aciérie dont les cadences de coulée sont très différentes on peut utiliser soit un mélangeur, soit un nombre suffisant de poches tonneaux. Le mélangeur homogénéise la composition de la fonte provenant des diverses coulées et conduit à une certaine désulfuration de la fonte. Cette désulfuration se fait par déplacement de l'équilibre:



(1) [] dissous dans la fonte, () dissous dans le laitier.

Le sulfure de manganèse s'élimine soit par combustion soit par mise en solution dans la scorie.

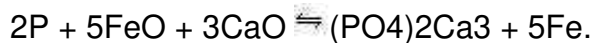
La désulfuration peut être améliorée par les techniques de la métallurgie en poche: introduction de carbonate de sodium, de chaux vive (CaO) avec brassage, ou plus récemment de magnésium (procédé USIRMAG).

Le passage de la fonte liquide à l'acier nécessite une diminution des teneurs de pratiquement tous les éléments comme le montre la comparaison ci-dessous:

	% C	% Si	% Mn	% P	% S
Fontes:	3-4	0,5 à 2,5	1 à 2	2 à 0,1	0,05
Aciers:	0,05-1,5	0 à 0,5	0,3 à 1,5	< 0,05	< 0,05

Modes d'élimination des divers éléments

- Carbone: il s'élimine à l'état de CO₂ et surtout de CO; l'élimination de ces gaz est facile.
- Silicium: son oxydation conduit au dioxyde de silicium SiO₂: cet oxyde acide se combine avec les oxydes basiques présents MnO, FeO et éventuellement CaO en donnant une scorie liquide qui monte à la surface du bain.
- Manganèse: son oxydation conduit à l'oxyde basique MnO qui se combine avec SiO₂.
- Phosphore: son oxyde P₂O₅ est réductible par le carbone aux températures élevées réalisées. Cependant le phosphate de calcium est moins réductible par C que le pentoxyde. En présence de CaO et si on admet que FeO est le vecteur d'oxygène, la réaction s'écrit:



Le phosphate de calcium s'élimine dans la scorie. Donc une déphosphoration poussée exige un milieu très oxydant et très basique.

- Soufre: l'oxydation des sulfures MnS ou FeS étant très endothermique elle est peu probable aux températures élevées de conversion. L'élimination du soufre aura lieu selon:



(1) [] dissous dans la fonte, () dissous dans le laitier.

Elle sera favorisée par un milieu très réducteur (élimination de FeO) et très basique. Une élévation de température la favorisera également et fluidisera la scorie. Dans ces conditions on a intérêt à introduire une fonte de teneur en soufre aussi faible que possible: intérêt de la désulfuration en poche.

L'élaboration comprend en général deux phases distinctes:

- Phase d'oxydation: élimination de C, Si, Mn et du P avec action simultanée de CaO pour ce dernier;
- Phase de réduction: la phase précédente conduit à un métal très oxydé (riche en FeO) qu'il faudra réduire. En présence de CaO, il y aura simultanément désulfuration.

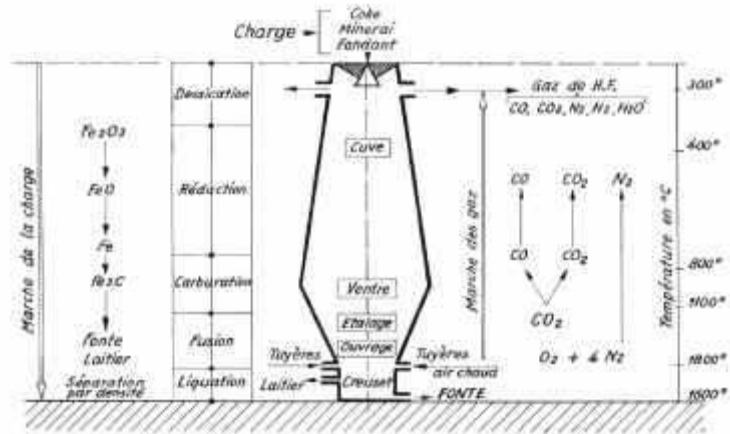


Fig. 94.
Principes transformation de la charge dans le haut fourneau.

2. ACIER A L'OXYGENE

2.1. PRINCIPES ET CLASSIFICATION

Ce procédé, actuellement le plus répandu, est basé sur l'insufflation d'oxygène pur dans un bain de fonte liquide. On peut ainsi transformer celle-ci en acier liquide, en assurant simultanément l'élimination de C, Si, Mn, P et S et l'élévation de température nécessaire pour passer de la fonte liquide (1250 °C en moyenne) à l'acier liquide (1600 °C en moyenne). Le réglage de la température finale se fait par introduction de ferrailles à refondre.

Les appareils (convertisseurs) sont des cornues, garnies de réfractaires, atteignant 8 m de diamètre et jusqu'à 10 m de haut. Les convertisseurs sont en général immobiles au cours du soufflage et les divers procédés se distinguent par le mode d'insufflation de l'oxygène:



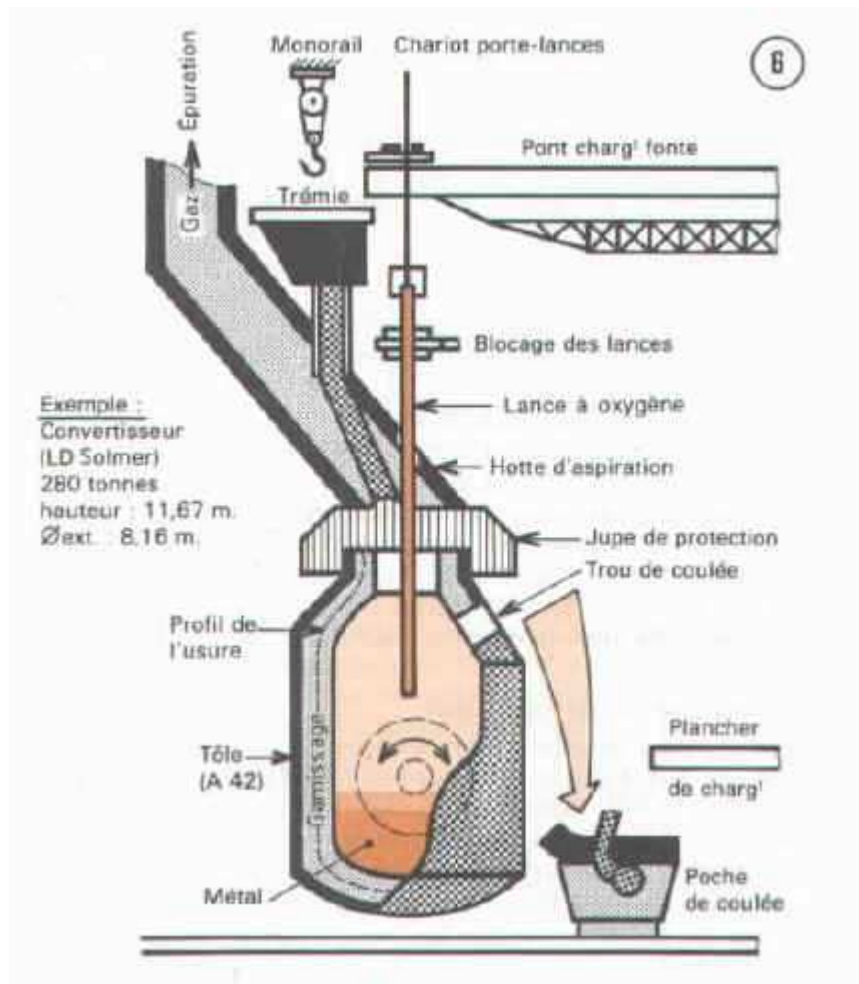
- Insufflation par des tuyères réfractaires placées dans le fond du convertisseur: procédés OBM (Oxygen Boden Maxhütte) et LWS (Loire-Wendel-Sidélor).
- Insufflation par le bec de la cornue à l'aide d'une lance métallique refroidie à l'eau: procédés LD (Linz-Donawitz) et son dérivé le procédé OLP (oxygène-lance-poudre) dans lequel de la poudre de chaux est introduite simultanément pour traiter les fontes très phosphoreuses.

Remarque :

Une amélioration des procédés à lance consiste à brasser le bain par insufflation de gaz (CO₂, O₂, Ar, N₂) par le fond: procédé LBE (lance-brassage-équilibre), procédé STB (Sumimoto Top and Bottom blowing process).

2.2. DEROULEMENT D'UNE OPERATION

Le procédé LD est adapté au traitement des fontes peu phosphoreuses ou hématites, le procédé OLP est adapté au traitement des fontes phosphoreuses.



- **Procédé LD**

La charge est constituée de fonte liquide et de ferrailles et d'une partie du CaO nécessaire.

Le soufflage d'oxygène au cours duquel le silicium s'élimine en premier dure environ 15 min. La décarburation et la déphosphoration ainsi qu'une partie de la désulfuration s'opèrent ensuite, le reste de la chaux étant progressivement ajouté en cours de soufflage. Le débit d'oxygène va de 500 à 1000 m³ • min⁻¹.

Un modèle mis au point par l'IRSID (CALDYN) permet le contrôle dynamique du soufflage en fin d'affinage et permet l'arrêt automatique de celui-ci lorsque la teneur en carbone du bain visée est atteinte: en effet une relation existe entre la vitesse de décarburation du bain et sa teneur en carbone. L'application de ce modèle exige la connaissance du débit des fumées (par venturi) et de leurs teneurs en CO et CO₂ (analyseurs).

Après l'arrêt du soufflage un échantillon est analysé ce qui permet de prévoir les additions à introduire pour atteindre une composition chimique déterminée. Ces additions ont lieu au convertisseur ou en poche lors de la coulée. Outre l'ajustement de composition ces additions ont pour but de désoxyder le bain, riche en FeO.

En effet la présence de FeO donne un produit inforgeable et un dégagement gazeux important de CO (réduction de FeO par C): aciers effervescents.

La désoxydation du bain se fait essentiellement par le manganèse introduit surtout sous forme de ferro-manganèse et selon:



L'oxyde de manganèse est insoluble dans l'acier, l'oxygène n'est en fait pas éliminé du bain, mais il est sous forme d'inclusions de MnO beaucoup moins nocives que FeO.

L'emploi de ferro-silicium ou l'addition d'aluminium à la coulée conduit à des aciers calmés. En particulier l'addition d'Al remplace MnO par Al_2O_3 parfaitement non réductible par le carbone: il ne peut donc y avoir dégagement gazeux lors du refroidissement.

- **Procédé OLP**

Il permet d'affiner des fontes contenant jusqu'à 2 % de P en insufflant de la chaux mélangée à l'oxygène. L'opération consiste en un premier soufflage, suivi d'un décrassage (élimination de la scorie riche en phosphore), puis un second soufflage pour parfaire déphosphoration et désulfuration. L'analyse du bain est suivie par l'addition finale et la coulée. La durée de coulée à coulée varie de 40 min à 60 min.

- **Procédés OBM et LWS**

Utilisant la même technique que l'ancien procédé Thomas on insuffle de l'oxygène pur par des tuyères réparties dans le fond du convertisseur. Afin d'éviter la détérioration du fond on injecte en même temps un hydrocarbure dont le craquage endothermique provoque un refroidissement suffisant (fluide modérateur) à la sortie même des tuyères, protégeant le fond d'une forte élévation de température.

Les procédés à l'oxygène permettent d'élaborer les nuances les plus variées d'aciers non alliés et peu alliés. Ils ont de faibles teneurs en P, S et surtout en azote (meilleures ductilité et résistance au vieillissement).

3. ACIER ELECTRIQUE

3.1. CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES

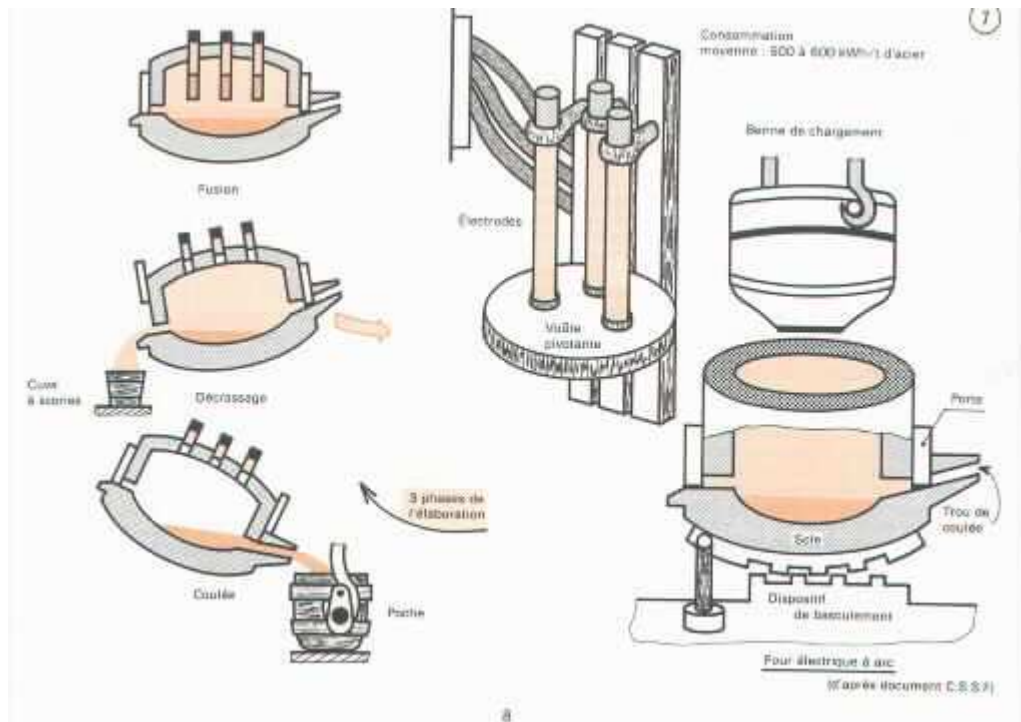
La filière de la refusion des ferrailles utilise un four à sole réfractaire sur laquelle sont placées les matières à refondre. L'énergie thermique est fournie par production d'arcs électriques entre trois électrodes et la charge. Naguère réservé à l'élaboration d'aciers spéciaux, le procédé électrique assure actuellement une part importante du tonnage des aciers courants. Il a, dans ce domaine, définitivement remplacé l'élaboration sur sole au four Martin. Le procédé électrique basique est le plus répandu, il est caractérisé par:



- Une haute température du bain ($> 1800^{\circ}\text{C}$) facilement réglable, ce qui facilite la fusion des laitiers très réfractaires et la réduction des oxydes.
- La non-intervention de l'atmosphère du four qui est neutre. Les réactions ont uniquement lieu entre le bain et les additions à l'aide desquelles on peut réaliser un milieu oxydant ou réducteur. On peut en outre réaliser la fusion d'éléments oxydables comme le Cr sans perte par formation d'oxydes.

3.2. MARCHE D'UNE OPERATION

Les fours d'une capacité de 5 à 250 tonnes sont alimentés sous des tensions de 100 à 200 V, l'intensité pouvant atteindre 50000 A par électrode. La sole et les parois latérales sont garnies de revêtements de dolomie (basique) qu'on réfectionne périodiquement. L'utilisation des parois refroidies à l'eau se généralise et permet, entre autres, d'augmenter la durée du revêtement et de réduire la consommation des électrodes. La marche comprend trois étapes:



- Fusion:** après chargement la fusion commence et dure quelques heures. Au cours de cette étape on ajoute la chaux qui sera nécessaire à la formation du laitier de déphosphoration. En fin de fusion on introduit du minerai de fer.
- Oxydations et décrassage:** l'oxyde de fer sert de vecteur oxygène pour l'élimination de si, Mn, C. La déphosphoration peut être très poussée, des laitiers très calcaires pouvant être fondus. En fin d'opération le fer commence à s'oxyder. L'alimentation du four est arrêtée et on procède à un décrassage.
- Réductions et additions.** L'alimentation étant rétablie, on crée un laitier désoxydant et désulfurant par ajout de ferro-silicium, de chaux et de spath-fluor. On peut réaliser des laitiers Carbures (carbure de calcium) très réducteurs. Au four électrique désulfuration et désoxydation sont très poussées ($S > 0,008\%$, $O > 0,003\%$). Les additions finales sont ajoutées avant coulée.

Remarque: Le four électrique permet l'élaboration sous vide (four à induction sous vide, fours à électrodes consommables en acier). on obtient ainsi des aciers à teneurs minimales en N_2 , O_2 , H_2 et de propreté très poussée (faible densité inclusionnaire). Ces aciers de très haute qualité sont caractérisés par une meilleure limite d'endurance, une valeur élevée de la résidence et une tenue au fluage améliorée. Leur coût est évidemment plus élevé que pour les aciers élaborés classiquement.

- Dans le cas d'élaboration des aciers inoxydables, on peut injecter de l'oxygène conduisant à une décarburation poussée nécessaire pour ces nuances.

4. COULEE DE L'ACIER

La coulée de l'acier liquide, si on excepte les aciers moulés, s'opère selon deux techniques différentes.

- Coulée en lingotières qui reste prépondérante dans les pays de technologie sidérurgique peu développée (U.S.A., U.R.S.S.).
- Coulée continue qui est devenue prépondérante dans les pays de technologie sidérurgique développée (Japon, Allemagne [R.F.A.], Italie). La France est en position moyenne après ces derniers.

4.1. LA COULEE EN LINGOTIERE

L'acier élaboré selon les procédés précédents est recueilli à l'état liquide dans des poches. Il est ensuite coulé et solidifié après un séjour dans la poche de 5 à 10 min (décantation).

Les lingotières sont en général en fonte. Leur forme préfigure celle des produits laminés à produire: lingots à section carrée pour les produits longs, à section méplate pour les produits plats.

La coulée se fait selon deux procédés:

- Coulée en chute: le métal est versé directement dans la lingotière.
- Coulée en source: le métal arrive par un canal en réfractaire par le bas de la lingotière. Cette technique donne des aciers de meilleure qualité mais est plus onéreuse.

Lorsque la solidification est suffisamment avancée le démoulage a lieu et les lingots sont acheminés dans des fours « pits » où la solidification s'achève; la température étant maintenue à 1250 °C, valeur optimale pour le laminage qui va suivre.

Les défauts principaux des lingots sont:

- L'hétérogénéité chimique inhérente au processus de solidification entraînant l'existence du phénomène de ségrégation majeure (à l'échelle du lingot) et qui concerne C, S, P, O. Le forgeage suivi ou non d'un recuit d'homogénéisation remédie partiellement à ce défaut.
- La retassure due au retrait de l'acier au cours du refroidissement. Ce phénomène concerne essentiellement les aciers calmés, alors que les aciers effervescents en sont exempts. On peut y remédier en chutant la partie supérieure où est localisée la poche

de retassure, ou par masselottage, ou par compression. . Les soufflures: propres aux aciers effervescents, elles sont dues à des dégagements gazeux CO, H₂, N₂. Elles sont aplaties par le forgeage mais leurs parois peuvent ne pas se souder.

L'emploi d'aciers semi-calmés permet de profiter des avantages des deux catégories (0,05 à 0,15 % Si).

- Les criques superficielles et les tapures internes dues à des anisotropies de retrait pouvant entraîner des dépassements locaux de la charge de rupture.

Remarque:

La coulée sous vide s'adapte parfaitement à la coulée en lingotière et permet d'abaisser les teneurs en H₂, N₂, une forte désoxydation des effervescents par élimination de

CO ($\text{FeO} + \text{C} > \text{CO} + \text{Fe}$) ainsi qu'une diminution de la densité inclusionnaire.

4.2. LA COULEE CONTINUE

La poche de coulée alimente directement un répartiteur qui alimente à son tour plusieurs lignes de coulée. Des systèmes divers (tourniquets) permettent de ne pas interrompre l'opération au changement de poche. Deux configurations sont utilisées comme le montre la figure 8 qui donne en même temps les divers organes successifs:

- Machines verticales
- Machines courbes avec cintrage à l'état solide ou partiellement solidifié.

Les machines verticales sont plus onéreuses et plus encombrantes. Cependant pour certains produits l'extraction sur cœur liquide peut conduire à des criques et des ségrégations. En outre sur machines courbes il y a décantation des inclusions à la partie supérieure des produits. Les machines verticales seront donc préférées pour les aciers de haute qualité.

La coulée continue conduit à une augmentation des cadences de coulée, à l'absence du phénomène de retassure. De plus elle supprime la première étape du laminage en donnant directement des billettes, des blooms ou des brames. L'automatisation est concevable pour ces installations.

Les aciéries françaises utilisent presque exclusivement pour leur production la coulée continue sur machines courbes, la voie lingots étant totalement supprimée

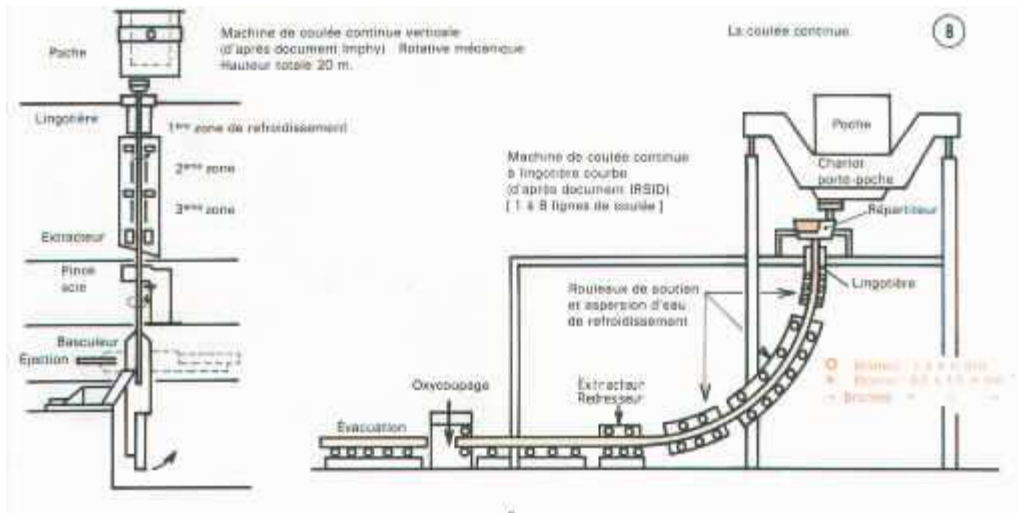


DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER/CARBONE

SOMMAIRE

1. DIAGRAMME FER CARBONE

2. PROPRIETES DU FER (STRUCTURES CRISTALLINES ET POINT DE TRANSFORMATION)

3. ALLIAGES FERREUX

4. SOLUTION DE CARBONE DANS LE FER

5. LES PHASES

6. REMARQUES

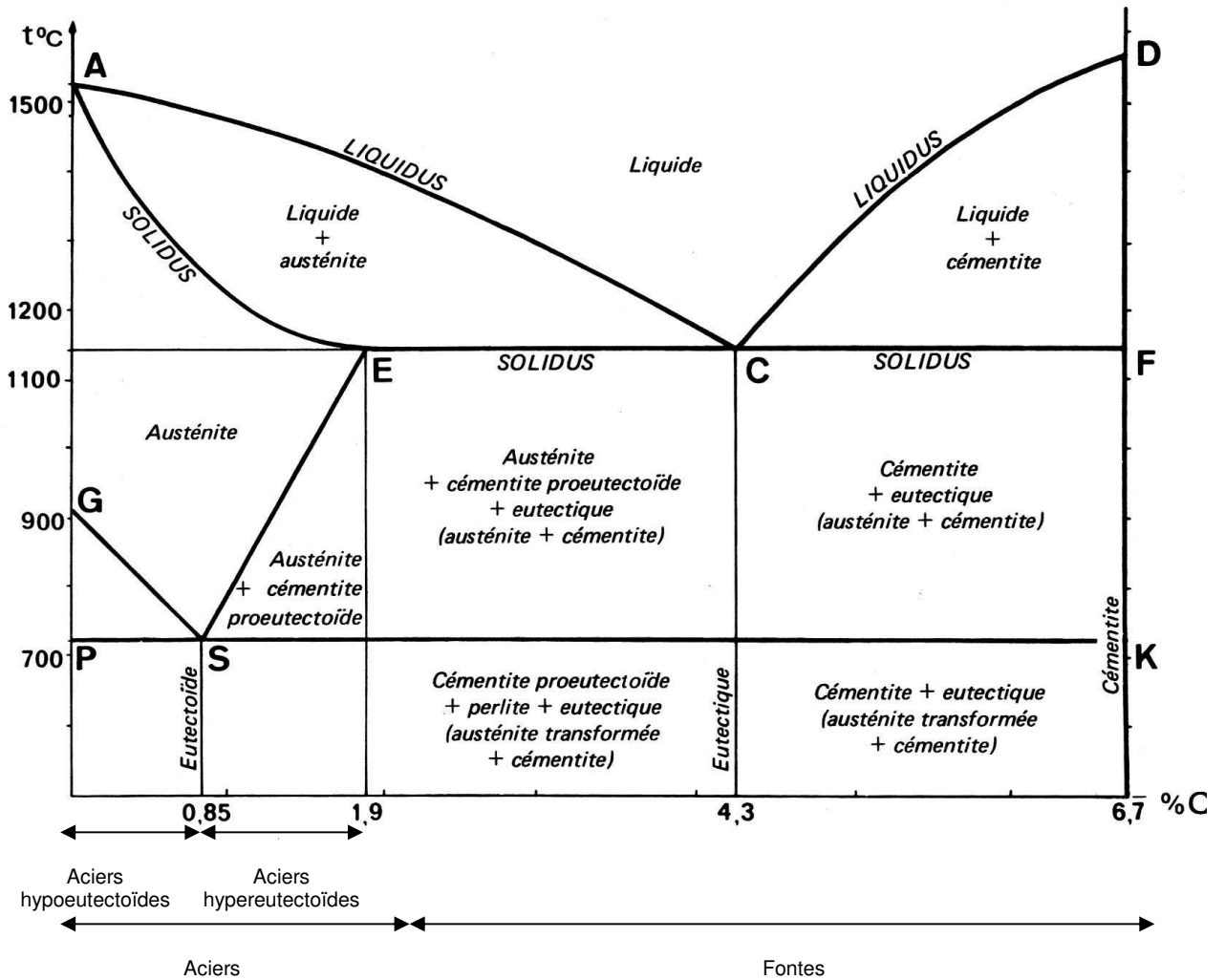
7. INFLUENCE DES POINTS TRANSFORMATION SUR LA MICROSTRUCTURE

5. DIAGRAMME FER CARBONE

5.1. REPRESENTATION DU DIAGRAMME

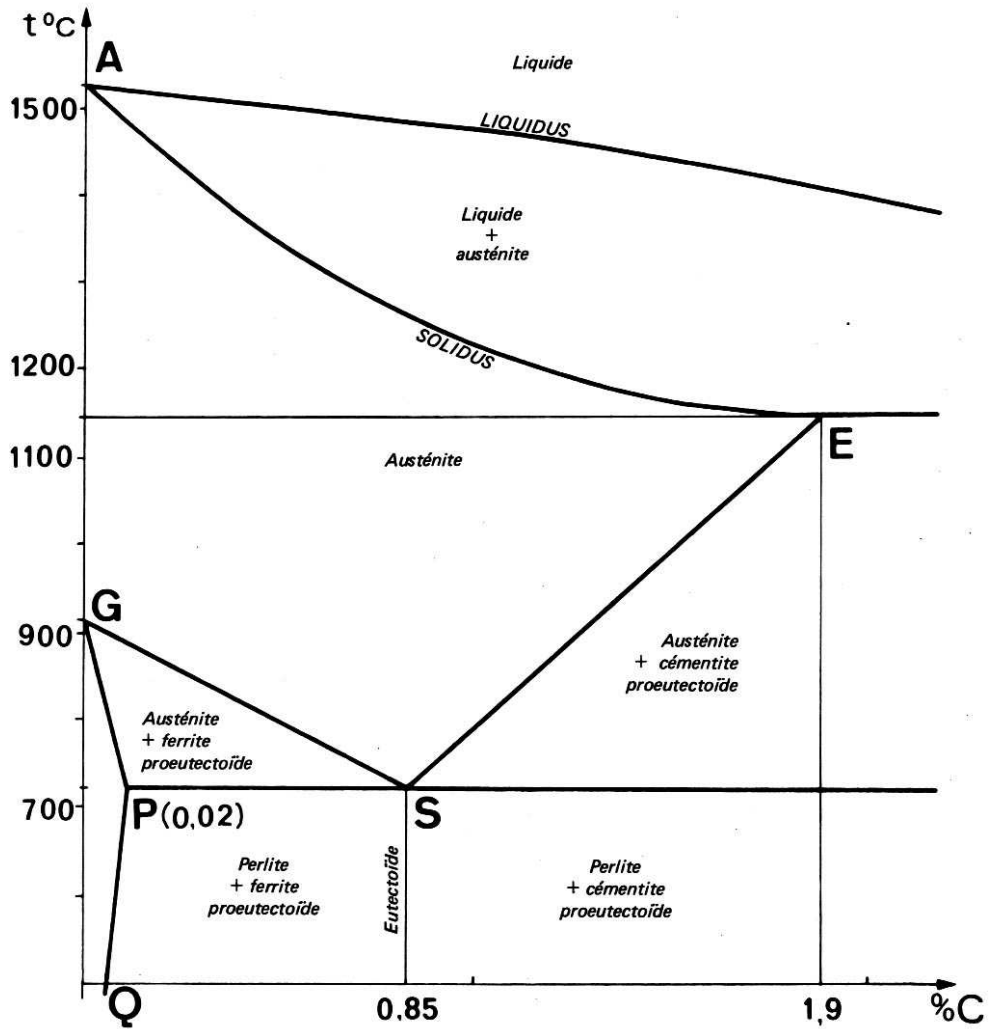
Le diagramme fer - carbone se présente comme le montre la fig. 3 Les lettres repères sont conventionnelles.

Le liquidus est toujours représenté par la ligne A C D, le solidus par la ligne A E C F D, l'eutectique par le point C. Les autres points seront explicités plus loin.



5.2. DOMAINE DES ACIERS

La partie du diagramme correspondant au domaine des aciers est située à gauche du point E.



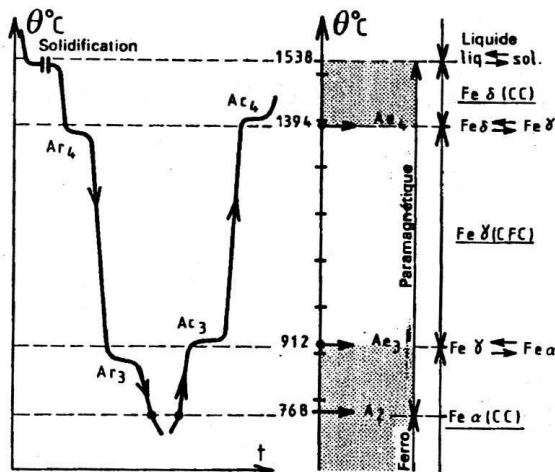
DOMAINE DES ACIERS

6. PROPRIETES DU FER (STRUCTURES CRISTALLINES ET POINT DE TRANSFORMATION)

Le schéma ci-dessous montre les différents points de transformation et la courbe d'analyse thermique correspondante. Mise à part la fusion, le fer présente deux changements de structure cristalline qui sont des transformations isothermes par germination et croissance. Les températures correspondantes sont désignées par A₃ et A₄.

A₃ 912° C Fe α ← Fe
CC ← CFC

A₄ 1 394° C Fe ← Fe δ
→
CFC CC



Points de transformation du fer. Courbes $\theta(t)$

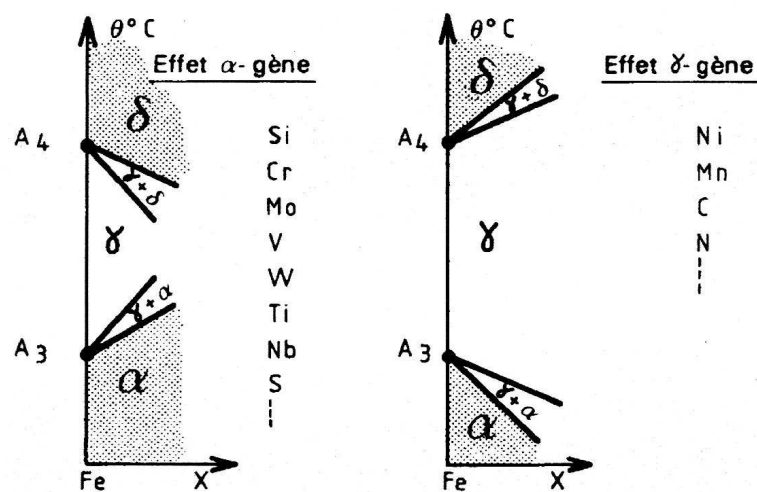
Remarque le point A₂ (point de CURIE) ne correspond pas à un changement de phase, mais au passage de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique.

7. ALLIAGES FERREUX

Le fer forme des alliages avec un grand nombre d'éléments. La mise en solution solide d'éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points A_3 et A_4 . Cette modification est particulièrement importante et on a classé les éléments en considérant leur influence sur la position de ces points.

On appelle alphasagène tout élément qui stabilise la phase CC. Il élève la température du point A_3 et abaisse celle du point A_4 .

On appelle gammagène tout élément qui stabilise la phase CFC. Il abaisse la température du point A_3 et élève celle du point A_4 .



Il est à noter que

Les solutions solides dans le Fe γ sont appelées AUSTENITES. On les désigne par γ , elles sont CFC.

Les solutions solides dans le Fe α ou Fe δ sont appelées FERRITES. On les désigne par α ou δ elles sont CC.

7.1. LE SYSTEME BINAIRE FE. C

Le carbone est un élément fortement gammagène. De ce fait, et parce qu'il permet la formation de carbures, le carbone joue un rôle particulier dans les alliages ferreux. Il y est en effet toujours présent à cause de leur mode d'élaboration.

Bien que des alliages industriels, aciers et fontes, même non alliés contiennent toujours d'autres éléments, il est nécessaire d'étudier le système binaire Fer + Carbone, il sert de référence à l'étude de tous les alliages ferreux.

8. SOLUTION DE CARBONE DANS LE FER

8.1. ETAT LIQUIDE

A l'état liquide, l'acier est une solution de carbone dans le fer. Les atomes de carbone se trouvent répartis, d'une manière homogène, au sein des atomes de fer, en proportion définie par la teneur en carbone de l'acier.

8.2. SOLUTION SOLIDE

A l'état solide, les atomes de fer qui constituent la très grande majorité des atomes de l'ensemble, occupent, comme dans le fer pur, les positions qui leur sont dévolues aux noeuds du réseau cristallin. Par contre, les atomes de carbone, dont les dimensions sont inférieures à celles des atomes de fer, trouvent place dans les espaces vacants du réseau.

L'ensemble constitue une solution solide de carbone dans le fer : dans l'acier, il s'agit d'une **solution d'insertion**.

9. LES PHASES

9.1. FERRITE

A la température ordinaire, le fer ne peut normalement contenir, en solution, qu'une quantité infime de carbone, de l'ordre de 0,006 %, pratiquement négligeable en comparaison de la teneur de 1,9 % susceptible de trouver place dans l'acier et même de celles, inférieures à 0,25 %, des aciers destinés aux constructions soudées. Le fer tenant en solution une quantité infime de carbone porte le nom de ferrite. La ferrite est caractérisée par une faible résistance à la traction associée à une faible dureté (80 H Brinell).

9.2. CARBONE LIBRE

Le carbone de l'acier, en excès par rapport à la capacité d'absorption du réseau cristallin du fer, devra prendre place en dehors des mailles de ce dernier.

On peut imaginer le voir se séparer et constituer des amas de carbone libre venant s'insérer entre les structures cristallines.

C'est ce que l'on constate dans le cas des fontes grises à graphite "lamellaire" ou "nodulaire", ainsi que dans certains aciers, d'un type particulier, où le carbone se trouve présent sous forme de graphite.

Les aciers de construction peuvent, dans certaines conditions exceptionnelles, être affectés par un phénomène de séparation du carbone sous forme de graphite qui constitue alors une manifestation indésirable, susceptible de provoquer des accidents en cours de service.

Ces exceptions mises à part, le carbone en excès se trouve, pratiquement, toujours associé au fer sous forme de cémentite.

9.3. CEMENTITE

La combinaison d'un atome de carbone et de trois atomes de fer constitue le carbure de fer qui porte le nom de cémentite ($Fe_3 C$).

Ce carbure, très dur et cassant, contient, en poids, environ 6,7 % de carbone. Sa dureté est environ 700 H Brinell.

Les aciers non alliés et les fontes, si l'on excepte les fontes graphitées, se trouvent ainsi normalement constitués de cristaux juxtaposés :

- de ferrite, contenant en solution une quantité infime de carbone,
- de cémentite, contenant 6,7 % de carbone.

La ferrite et la cémentite sont les deux constituants de base de l'acier.

La dureté de la cémentite permet de conférer au métal une résistance nettement supérieure à celle du fer pur, sans provoquer de fragilité, quand elle se trouve intégrée à un agrégat formé de lamelles alternées de ferrite et de cémentite étroitement associées. Cet agrégat porte le nom de PERLITE.

9.4. PERLITE

La PERLITE, agrégat lamellaire de ferrite et de cémentite, présente une teneur en carbone de 0,85 % C, constante et indépendante de celle de l'acier (fig. 4). Sa dureté est environ 200 H Brinell et son allongement faible.

La perlite se trouve normalement présente, sous forme de plages juxtaposées aux cristaux de ferrite, dans tous les aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 0,85 %. Ces aciers sont précisément ceux qui nous intéressent.

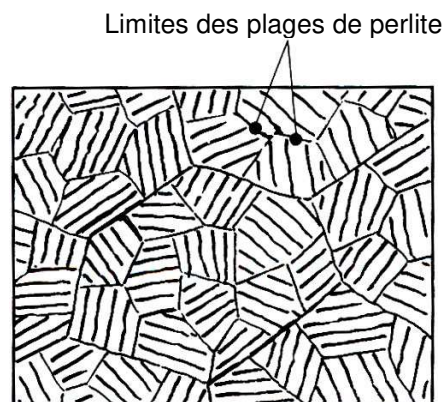


Fig. 4 AGREGAT DE FERRITE ET DE CEMENTITE

Acier à 0,85 % de carbone, à structure entièrement perlitique
Cette figure schématise les lamelles de ferrite et de cémentite.
La dimension des plages est de l'ordre du dixième de millimètre.

9.5. ASSOCIATION FERRITE - PERLITE

Dans les aciers dont la teneur est comprise entre 0 et 0,85 % C, la perlite, qui contient la quasi totalité du carbone, va donc se trouver en proportion variable. De 0 % dans le fer pur ou la ferrite (fig. 4.1 (a)) elle atteint 100 % dans l'acier à 0,85 % C (fig. 4.1 (c)).

Les aciers de construction, dont la teneur en carbone ne dépasse pas 0,6 %, et reste même inférieure à 0,25 % dans le cas des nuances soumises aux exigences de la construction soudée, vont ainsi présenter une structure composée de plages juxtaposées de ferrite et de perlite (fig. 4.1 (b)).

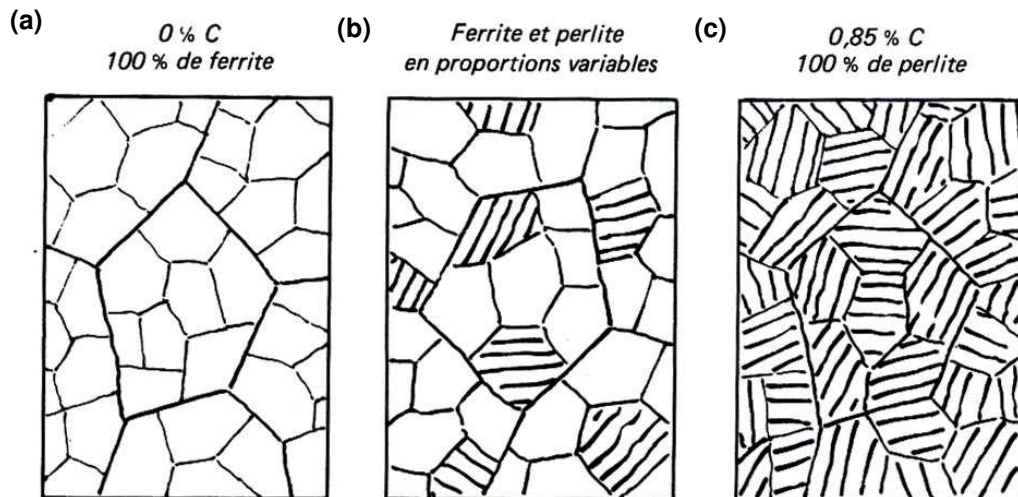


Fig. 4.1 ASSOCIATION FERRITE-PERLITE ILLUSTRANT L'INFLUENCE DE LA TENEUR EN CARBONE

La capacité de déformation de la ferrite est pratiquement équivalente à celle du fer pur. La perlite, beaucoup plus dure et peu déformable, agit à la manière d'une armature en gênant, par un effet de bridage, la déformation de la ferrite sous l'action d'un effort appliqué. Il en résulte une modification du processus de déformation conduisant à la rupture : celle-ci intervient sous une charge d'autant plus élevée que la proportion de perlite est, elle-même, plus grande.

Bien entendu, la déformation atteinte par le métal au moment de la rupture varie en raison inverse de la teneur en perlite, dont la capacité de déformation est très inférieure à celle de la ferrite.

La capacité de déformation de l'acier (allongement de rupture A %, tenue au pliage et aux chocs) varie, pour cette raison, en sens inverse de sa résistance à la traction.

Ainsi, par le biais de la quantité de perlite qu'il contribue à former, le carbone constitue le facteur essentiel déterminant les propriétés de l'acier.

10. REMARQUES

10.1. INCONVENIENT D'UNE TENEUR EN CARBONE TROP ELEVEE. CEMENTITE LIBRE

Si la teneur en carbone de l'acier dépasse 0,85 %, la cémentite en excès n'a plus la possibilité de s'associer à la ferrite pour constituer de la perlite.

Cette teneur de 0,85 % marque ainsi le seuil au-delà duquel la cémentite en excès va se présenter sous la forme de liserés continus situés aux joints des grains (fig. 4.2).

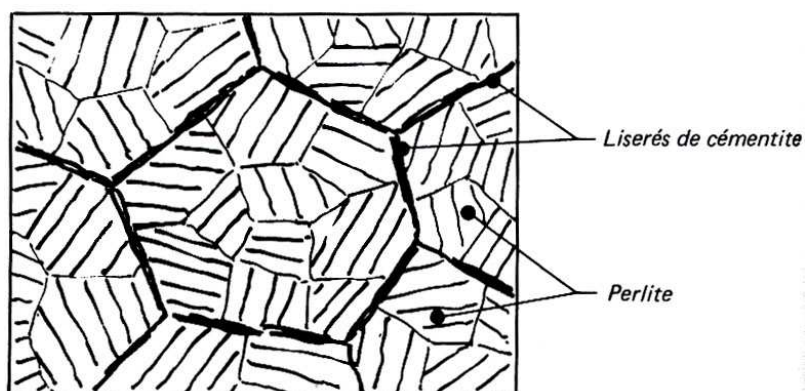
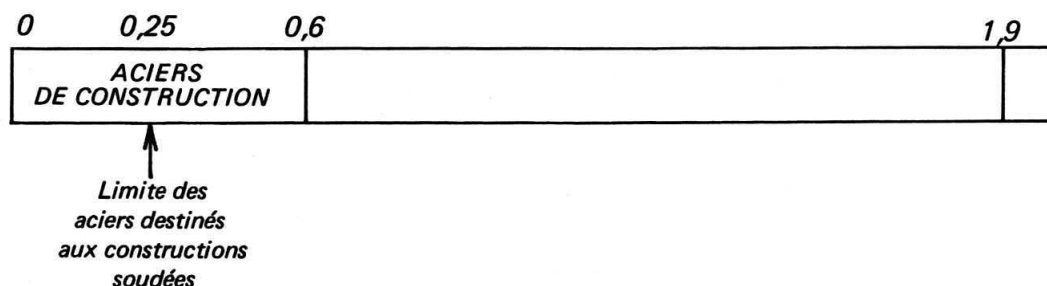


Fig. 4.2 STRUCTURE DES ACIERS A TENEUR EN CARBONE SUPERIEURE A 0,85 %

10.2. POSITION DES ACIERS DE CONSTRUCTION EN FONCTION DE LEUR TENEUR EN CARBONE

Ces aciers dont la teneur en carbone est comprise entre 0,05 et 0,6 % n'occupent, en définitive, qu'une bande relativement étroite dans la plage des teneurs en carbone des aciers qui s'étend de 0 à 1,9 %.



POSITION DES ACIERS DE CONSTRUCTION DE GRANDE CONSOMMATION EN FONCTION DE LEUR TENEUR EN CARBONE

L'ensemble des alliages binaires fer-carbone présentent les phases suivantes :

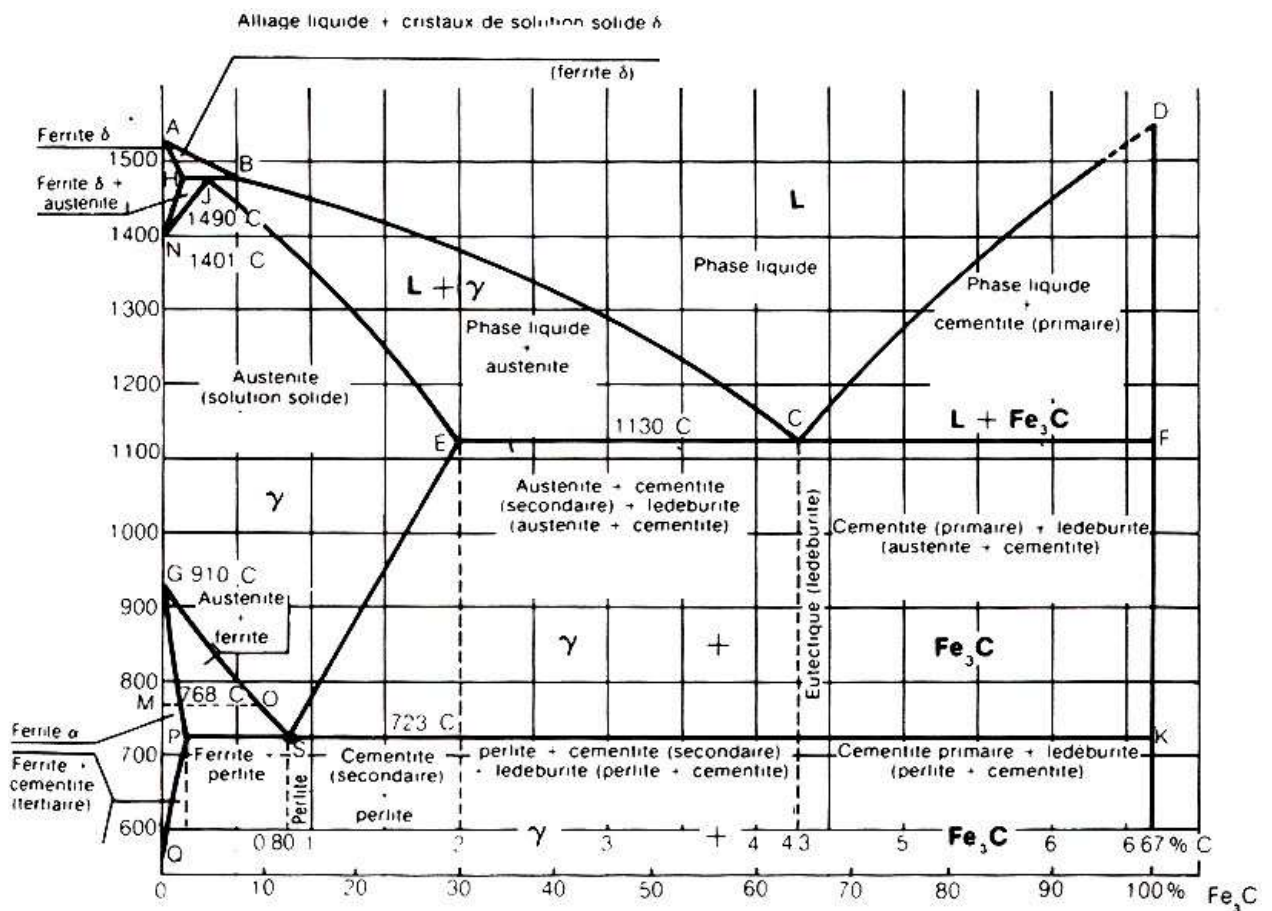
FERRITE α : solution solide d'insertion de carbone dans le fer α (solubilité maxi 0,02 % à 727° C) la ferrite a est CC.

FERRITE δ : solution solide d'insertion de carbone dans le fer δ (solubilité maxi 0,1 % à 1 487° C) La ferrite à est CC.

AUSTENITE γ : solution solide d'insertion de carbone dans le fer,

CEMENTITE ou carbure de fer, Fe_3C : sa composition correspond à une teneur de 6,67 % de carbone.

CARBONE PUR (graphite) : la solubilité du fer dans le carbone est nulle.



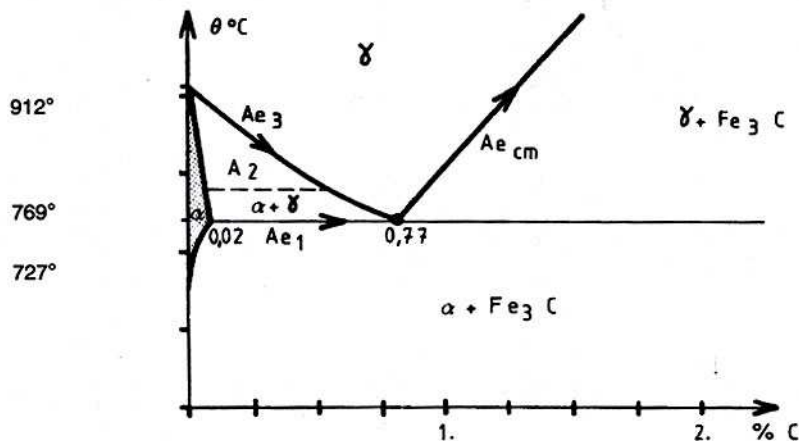
11. INFLUENCE DES POINTS TRANSFORMATION SUR LA MICROSTRUCTURE

L'exploitation du diagramme Fe. C permet d'étudier la constitution des aciers non alliés dans les conditions d'équilibre thermodynamique. Dès que les conditions de refroidissement ne sont plus suffisamment lentes, le facteur temps va jouer un rôle important.

L'étude complète de la cinématique des transformations sera entreprise lors de la présentation des courbes TTT et TRC.

Dans ce paragraphe, nous n'envisagerons que le cas où les vitesses de refroidissement ne sont pas suffisantes pour entraîner l'apparition de constituants de nature différente de ceux donnés par le diagramme d'équilibre.

11.1. POINTS DE TRANSFORMATION



Ae₁ : Température d'équilibre définissant la limite inférieure d'existence de l'austénite. Température de la transformation eutectoïde

Ae₃ : Température d'équilibre définissant la limite supérieure d'existence de la ferrite

Ae_{cm} : Température d'équilibre définissant la limite supérieure d'existence de la cémentite dans un acier hypereutectoïde

Ae₄ : Température d'équilibre définissant la limite entre le domaine d'existence de l'austénite et de la ferrite δ . Ce point n'a d'importance que pour certains cas particuliers (soudage). Il n'est pas indiqué sur le schéma.

A₂ : Point relativement moins important pour les applications courantes point de CURIE

11.2. MICROSTRUCTURES DES ACIERS

Le diagramme de phase permet de déterminer la nature des constituants susceptibles de se former : il ne permet en aucun cas de prévoir la morphologie qui définit la microstructure du métal. Cette microstructure qui dépend des conditions de germination et de croissance des diverses phases est essentiellement fixée par les conditions de refroidissement.

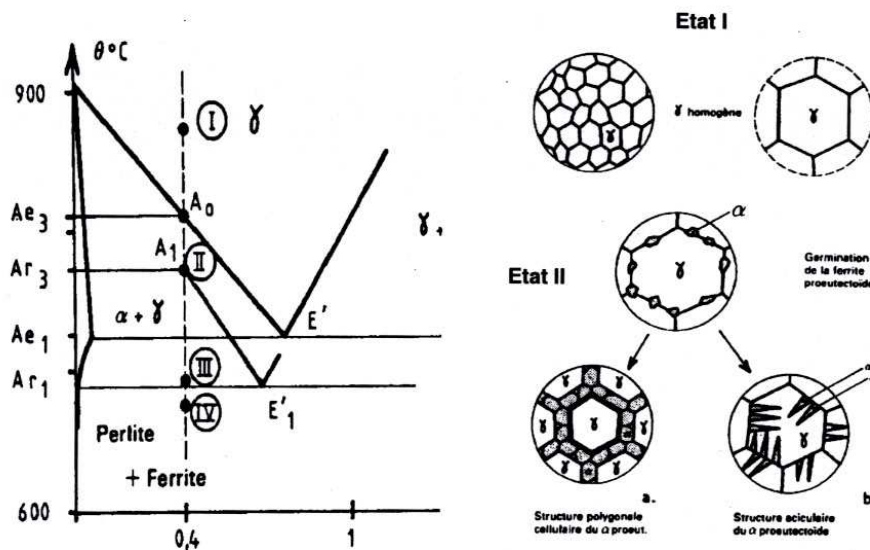
Nous nous contentons de commenter un exemple particulier afin de dégager quelques faits généraux.

En 1 dans le domaine austénitique la structure est caractérisée par une grosseur de grain γ déterminée par des conditions d'austénitisation données.

En 2 lorsque la température atteint AR_3 ($< AE_3$) caractéristique de la vitesse de refroidissement utilisée, la germination de la phase ferritique α commence. Cette germination a lieu en général aux joints de grains austénitiques.

La croissance des cristaux de ferrite dépend de la vitesse de transfert de l'énergie thermique produite par la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ et de la vitesse de diffusion du carbone, en excès par rapport à la limite de solubilité dans la ferrite.

CAS D'UN ACIER A 0,4 % : ACIER HYPOEUTECTOIDE



Pour des vitesses de refroidissement faibles, et des grains austénitiques petits, les cristaux ferritiques pourront prendre la forme polygonale normale et conduire à une **répartition cellulaire** de la ferrite en a.

Pour des vitesses de refroidissement élevées et des grains austénitiques grossiers, les cristaux ferritiques se développent sous forme de plaquettes, donnant naissance à une **répartition aciculaire** ou de **Widmanstätten** en b. Les structures aciculaires sont caractéristiques des zones surchauffées, au voisinage des joints soudés et dans les aciers moulés bruts de moulage.

APPLICATION DE NOTION DE METALLURGIE

SOMMAIRE

- 1. TENEUR EN CARBONNE DE CERTAINS METAUX FERREUX**
- 2. MÉTAUX NON FERREUX**
- 3. COMPARAISON ENTRE LES METAUX FERREUX ET LES METAUX
NON FERREUX**

12. TENEUR EN CARBONNE DE CERTAINS METAUX FERREUX

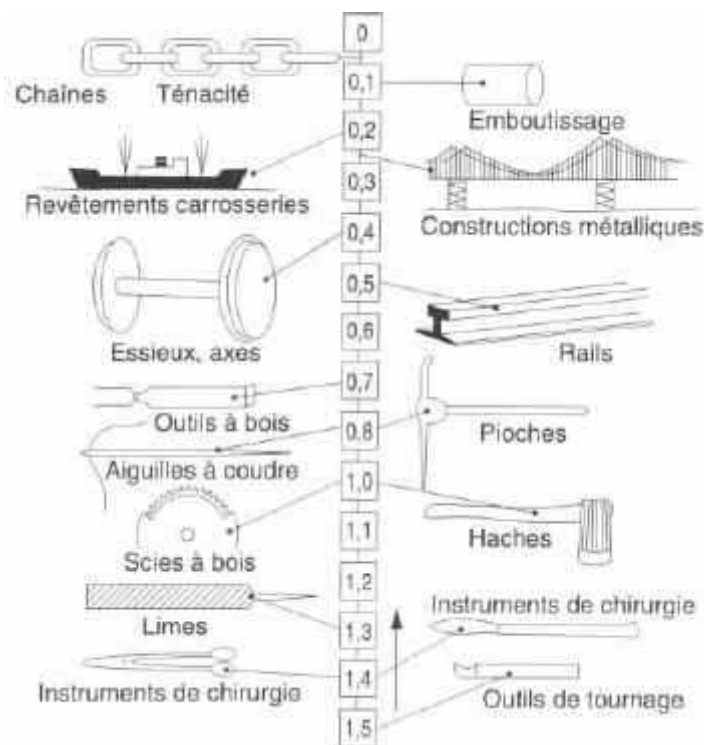
Métaux	Teneur en carbone (%)	Teneur en carbone
Fer	Moins de 0,06	La différence essentielle entre chaque type d'acier réside dans la proportion de carbone qu'il contient si le fer et le carbone sont alliés, dans la mesure où la teneur en carbone ne dépasse pas 1,5%, on obtient les aciers. Par contre, si l'alliage contient plus de 1,5% de carbone, on entre dans le groupe des fontes. Le carbone détermine la dureté et la ténacité des aciers. Plus un acier en contient, plus il est résistant. Cependant, il faut également tenir compte des procédés de production, des autres éléments d'alliage et de la nature du traitement thermique, lesquels contribuent à modifier certaines propriétés physiques des matériaux.
Acier doux	Entre 0,06 et 0,2	
Acier semi-dur	Entre 0,2 et 0,5	
Acier dur (acier outils)	Entre 0,5 et 1,5	
Fonte	Plus de 2	

12.1. ACIERS DOUX ET SEMI-DURS

Les aciers doux (à faible teneur en carbone) possèdent entre 0,06 et 0,2 % de carbone. Les aciers semi-durs (à moyenne teneur en carbone) en possèdent entre 0,2 et 0,5 %. D'autres éléments, tels que le silicium, le soufre, le manganèse et le phosphore, sont aussi présents dans l'acier en faible quantité. Voici leurs teneurs limites:

- silicium: 0,06 %;
- manganèse: 1,2 %;
- soufre: 0,06 %
- phosphore: 0,06 %.

Applications des aciers au carbone selon leur teneur en carbone



12.1.1.Aciers doux

L'acier doux est le métal le plus courant et le plus largement utilisé dans l'industrie de la transformation des métaux. Il sert à la fabrication d'une multitude de pièces, telles que les boulons, écrous, les rondelle, les articles en tôle. Il constitue environ 85% de la production de l'acier. Il est surtout choisi pour sa malléabilité à froid.

À cause de leur faible teneur en carbone, les aciers doux ne peuvent être trempés par traitement thermique. En revanche, ils peuvent être cémentés dans le but d'augmenter leur quantité en carbone en surface. C'est pour cette raison que l'acier doux est parfois appelé acier de cémentation. L'épaisseur de la couche cémentée est habituellement inférieure à 1,2 mm. Après la cémentation, les pièces peuvent être trempées afin de provoquer un durcissement structural en surface. Seule la surface pénétrée de carbone subira cette transformation. Cette formule est utilisée lorsque l'on désire une surface à la fois dure et résistante à l'usure et un noyau tenace.

12.1.2.Aciers semi-durs

Les aciers semi-durs se trempent par traitement thermique, mais dans certains cas, on a recours à la cémentation. Ces aciers offrent une meilleure résistance à la traction. On s'en sert largement comme aciers d'usage général: estampage de clés, marteaux, tournevis, éléments préfabriqués, ressorts, pièces forgées, etc.

12.1.3. Aciers alliés

La trempe d'un métal est souvent exécutée par chauffage puis refroidissement à l'eau. Avec des pièces minces ou de petites dimensions, cela ne pose aucun problème, car les aciers au carbone sont appropriés pour ce genre de traitement. Par contre, avec les pièces de plus grandes dimensions ou plus épaisses, le noyau se refroidit plus lentement que la périphérie lors du refroidissement de la pièce. La dureté est alors répartie de façon inégale. De plus, des variations dimensionnelles inégales sont à l'origine de tensions à l'intérieur des aciers au carbone. C'est pour éliminer ces inconvénients que l'on a développé les aciers alliés.

Composition

Les propriétés particulières des aciers d'alliage sont déterminées par la quantité et les types d'éléments d'alliage qu'ils contiennent. Il faut préciser que le carbone n'est pas considéré comme un élément d'alliage. Les aciers au carbone n'entrent donc pas dans la catégorie des aciers alliés.

Par aciers alliés, on entend des aciers à teneur modérée en éléments d'alliage et qui exigent un traitement thermique pour acquérir les propriétés correspondant à l'usage auquel ils sont destinés. Les alliages sont habituellement employés dans le but d'obtenir des propriétés supérieures. Par exemple, les éléments d'alliage permettent d'obtenir:

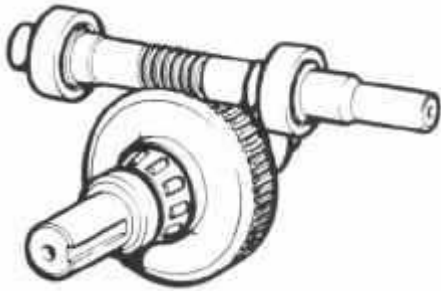
- Une meilleure élasticité;
- Une dureté accrue;
- Une meilleure ténacité;
- Une température critique modifiée (température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés);
- Une résistance accrue à l'usure;
- Une meilleure aptitude à la trempe;
- Une meilleure résistance à l'oxydation.

Les principaux types d'aciers alliés sont les suivants:

- Acier au nickel;
- Acier au chrome;
- Acier au nickel-chrome;
- Acier au nickel-chrome-molybdène;
- Acier au chrome-molybdène;
- Acier au manganèse-molybdène;
- Acier de nitruration (durcissement de la surface par absorption d'azote).

Le phosphore, le tungstène, le cobalt, le silicium, le vanadium et le soufre entrent parfois dans la composition des aciers alliés.

12.2. UTILISATION D'ACIERS ALLIES TREMPANT A CŒUR (SANDVICK)



Utilisations

L'utilisation des aciers alliés est reliée à leur degré de trempabilité et aussi à leur type, trempant à cœur ou de cémentation. Ces derniers, qui ne requièrent qu'une surface dure pour l'usage auquel ils sont destinés, servent à réaliser des pièces telles que des engrenages, des arbres, des ressorts et des essieux.

Les aciers de nitruration, qui entrent dans la catégorie des aciers de cémentation, sont utilisés pour la fabrication de pièces d'outils, de matrices, de moules, de boulons et de différentes pièces devant présenter une surface très dure, mais n'étant pas soumises à des efforts excessifs.

Les aciers trempant à cœur connaissent de très larges applications, mais on les choisit souvent lorsque la profondeur de trempé ou les propriétés mécaniques sont essentielles. Par exemple, on les utilise pour les pièces d'automobiles et d'avions et les dispositifs de fixation soumis à de durs efforts.

12.3. ACIERS ALLIES ET APPLICATION

Catégories d'aciers	Applications
Aciers au nickel nickel 3,50 % nickel 5,00 %	Vilebrequins, bielles, essieux
Aciers au nickel-chrome nickel 0,70 % chrome 0,70 % nickel 1,25 % chrome 0,60 % nickel 1,75 % chrome 1,00 % nickel 3,50 % chrome 1,50 %	Roues d'engrenages, chaînes, goujons, vis, arbres
Aciers au molybdène chrome-molybdène nickel-chrome-molybdène nickel 1,65 % molybdène 0,25 % nickel 3,25 % molybdène 0,25 %	Essieux, cames, pièces forgées
Aciers au chrome à faible teneur à moyenne teneur	Roulements à billes, bielles, ressorts

12.3.1.Alliages

Voici une description des effets de quelques éléments d'alliage sur les aciers.

12.3.2.Carbone

Même si le carbone n'est pas considéré comme un élément d'alliage, il n'en constitue pas moins l'élément le plus important dans la composition d'un acier, puisque c'est lui qui en influence la dureté, l'aptitude à la trempe, la ténacité et la résistance à l'usure. Plus on approche de 0,85 % de carbone, plus l'acier est dur et présente une résistance à la traction élevée; par contre, sa ductilité et sa soudabilité sont amoindries. Au-delà de 0,85 % de carbone, l'ajout de carbone ne modifie pas sensiblement la dureté de l'acier, mais cela lui confère une meilleure résistance à l'usure.

12.3.3.Manganèse

Quelle que soit la teneur en carbone de l'alliage, le manganèse en améliore la qualité et le fini de surface. De plus, il augmente la résistance et la ténacité de l'acier, tout en améliorant son aptitude à la trempe et sa résistance aux chocs. L'ajout de manganèse aux aciers servant à la cémentation les rend très résistants à l'usure.

12.3.4.Chrome

Le chrome augmente la dureté, la résistance à la corrosion et à l'oxydation ainsi que la résistance aux chocs. En contrepartie, il diminue un peu la ductilité de l'acier. Le chrome est l'élément essentiel des aciers inoxydables.

12.3.5.Nickel

Le nickel améliore la résistance à la traction et la ductilité de l'acier. Il résiste aux effets de la chaleur et de la corrosion.

12.3.6.Phosphore

On trouve le phosphore en grande quantité dans les aciers d'usinage à décolletage (tournage) rapide ou à faible teneur en carbone, car il améliore les qualités d'usinage. Plus la proportion de phosphore augmente, moins l'alliage est résistant aux chocs. Par le fait même, sa ductilité s'en trouve réduite d'autant.

12.3.7.Soufre

On ajoute du soufre pour améliorer l'usinabilité de l'alliage d'acier. Cependant, plus l'alliage contient de soufre, moins il est facile à souder. .

12.3.8.Silicium

La principale qualité du silicium est de servir de désoxydant lors de la fabrication des alliages d'acier. Il accroît la résistance à la dureté, mais à un moindre degré que le manganèse.

12.3.9.Cuivre

Le cuivre réduit l'usinabilité par forgeage mais n'influence pas le soudage réalisé à l'arc électrique ou par procédé oxyacétylénique. Il améliore la résistance à la corrosion atmosphérique lorsqu'il est présent dans l'alliage dans une proportion supérieure à 0,15 %.

12.3.10.Plomb

Le plomb améliore l'usinabilité de l'alliage dans lequel on le trouve.

12.3.11.Éléments utilisés dans la fabrication des aciers

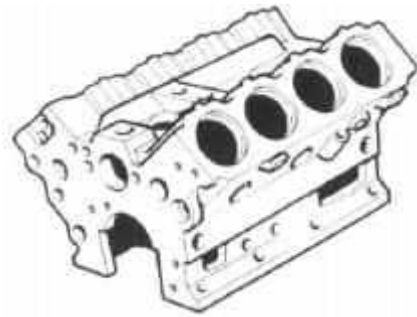
Éléments	Symbole chimique	Effets	Utilisations
Aluminium	Al	Décapant pour éliminer les impuretés et améliorer la grosseur du grain; limite le grossissement du grain.	Fabrication des aciers
Carbone	C	Augmente la dureté.	Aciers moulés à basse, moyenne ou haute teneur en carbone et aciers de construction.
Chrome	Cr	Augmente la dureté et améliore la résistance à l'usure sans fragilité; augmente la ténacité et la résistance à la corrosion.	Aciers inoxydables, outils, turbines aciers de construction pièces de machines, récipients sous pression.
Cobalt	Co	Maintient la dureté du métal porté au rouge.	Fabrication de fourneaux, outils de coupe.
Cuivre	Cu	Augmente la résistance à la corrosion atmosphérique; abaisse la température critique.	Profilés.
Étain	Sn	Utilisé comme revêtement et pour empêcher la corrosion.	Industrie de mise en conserve.
Manganèse	Mn	Affine la structure; augmente la ténacité et la ductilité.	Rails, essieux, barilletts d'armes à feu.
Molybdène	Mo	Durcit et augmente la ténacité des aciers.	Récipients sous pression, moulage pour applications sous pression, pièces de machines, outils.
Nickel	Ni	Résiste aux effets de la chaleur et à la corrosion; améliore la résistance à la traction.	Turbines forgeage industriel pour charpentes à haute résistance, aciers inoxydables, récipients sous pression, résistance à la corrosion.
Phosphore	P	Augmente la limite apparente d'élasticité et la trempabilité.	Aciers faiblement alliés.
Plomb	Pb	Améliore l'usinabilité ajouté à l'étain, il est utilisé pour empêcher la corrosion.	Dans un milieu corrosif.

Éléments	Symbole chimique	Effets	Utilisations
Silicium	Si	Utilisé pour améliorer la résistance à la traction; agit comme désoxydant en général.	Moulage de précision aciers à aimants et pour équipement électrique.
Soufre	S	Améliore l'usinabilité.	Pièces usinées.
Titane	Ti	Agent nettoyant prévient la précipitation du carbone dans les aciers inoxydables.	Aciers inoxydables, aciers faiblement alliés.
Tungstène	W	Augmente la ténacité, la dureté ainsi que la résistance à l'usure à des températures élevées.	Aciers pour outils à coupe rapide, aimants.
Vanadium	V	Donne de la ténacité et de la résistance à la traction résiste à l'adoucissement lors de la trempe, retarde le grossissement du grain à la température critique.	Revêtement de l'acier (galvanisation).
Zinc	Zn	Résiste à la corrosion.	Fabrication des aciers, outils, pièces de machines.
Zirconium	Zr	Utilisé comme désoxydant élimine l'oxygène l'azote et les inclusions d'éléments non métalliques lorsque l'acier est en fusion; structure à grain fin.	Tubes de charpente.

12.4. FONTES

En principe, la fonte est un alliage de fer et de carbone dont les propriétés peuvent être modifiées par l'ajout de petites quantités de silicium, de manganèse, de phosphore et de soufre. La fonte est présente sous toutes les formes de lingots, mais elle est principalement utilisée en fonderie, pour la fabrication de pièces moulées.

Bloc-cylindres (Sandvik)



Grâce à sa teneur élevée en carbone (de 2 à 4 %), la fonte est particulièrement fluide à haute température et peut donc être coulée dans des moules. Toutefois, les alliages ferreux ayant une teneur en carbone comprise entre 1,8 et 2,5 % ne sont pas couramment utilisés. La fonte sert à fabriquer des pièces moulées telles que des pièces d'automobiles, de locomotives et d'équipement agricole.

La fonte résiste nettement mieux à la compression qu'à la traction. Par ailleurs, elle est relativement cassante. Les pièces en fonte comportent ordinairement des surfaces d'ajustage qui sont généralement les seules à nécessiter un usinage.

Les procédés de transformation permettent de raffiner la fonte brute en fonte grise, en fonte blanche, en fonte malléable, en fonte nodulaire et en fonte alliée.

12.4.1.Fonte brute

La fonte brute n'a aucune utilisation pratique en raison de sa teneur élevée en carbone. Elle sert surtout à fabriquer d'autres types de fontes et des aciers.

12.4.2.Fonte grise

On appelle fonte grise la fonte faite d'un mélange de fonte brute et de rebuts d'acier. Dans les entreprises, la fonte grise est la plus utilisée pour fabriquer des pièces coulées d'usage général lorsque les considérations de coût sont primordiales. Les surfaces exposées ont une coloration gris sombre à cause de la présence de graphite (carbone cristallisé). Parmi les caractéristiques essentielles de la fonte grise, on note son aptitude à amortir les vibrations, grâce à sa teneur élevée en graphite, ainsi que sa résistance à l'usure. À l'aide d'un traitement thermique, on peut tremper la fonte grise afin d'augmenter sa dureté.

12.4.3.Fonte blanche

La fonte blanche provient de la solidification de la fonte dans des moules en métal, un procédé communément appelé moulage en coquille. Avec cette technique, le refroidissement rapide de la fonte en surface confère aux pièces une surface extrêmement dure. La fonte blanche est donc très résistante à l'usure; cependant, elle est très cassante et fragile.

La fonte blanche n'est pas très utilisée, car il est difficile de la couler et de l'usiner. On l'emploie quand même dans des applications où sa dureté et sa résistance à l'abrasion peuvent être exploitées, par exemple pour la fabrication de broyeurs, de cylindres, de dents de godets d'excavatrices, etc.

La fonte blanche peut être adoucie par recuit (chauffage suivi d'un refroidissement lent).

12.4.4.Fonte malleable

La fonte malléable est habituellement de la fonte blanche recuite. Cette fonte est malléable comparativement à la fonte grise. Toutefois, son degré de malléabilité est loin d'atteindre celui du plomb. Cette fonte présente tout de même une certaine ténacité.

La fonte malléable est utilisée pour des applications requérant de la résistance mécanique, de la ductilité, de la résistance aux chocs et de l'usinabilité. Il existe plusieurs types de fontes malléables, dont les propriétés sont assez différentes. La fonte malléable est utilisée couramment pour fabriquer des pièces telles que des engrenages, des bâtis, des joints de tuyauterie, etc. Certains types de fontes malléables ont des propriétés assez proches de celles de l'acier pour être utilisés dans les situations qui exigent un surcroît de résistance à l'usure.

12.4.5.Fonte nodulaire

Dans la fonte nodulaire, aussi appelée fonte GS (graphite sphéroïdal), le graphite est présent sous forme de petites sphères (nodules), formées par l'addition de magnésium à la fonte avant la coulée. Cela améliore la résistance mécanique, la ténacité et la résistance aux chocs. La fonte nodulaire peut être soumise à des contraintes élevées. Elle peut également être soudée, ce qui la rend comparable à l'acier. Elle est supérieure à la fonte grise à de nombreux égards, sauf en ce qui concerne sa capacité d'amortissement et sa conductibilité thermique. Elle peut être adoucie par recuit ou trempée, partiellement ou intégralement, en coquille ou à l'eau.

Parmi les utilisations typiques de la fonte nodulaire, on trouve les vilebrequins, les bâtis de machines, les pistons, etc.

12.4.6.Fonte alliée

La fonte alliée contient des éléments d'alliage tels que le nickel, le chrome, le molybdène, le cuivre ou le manganèse en quantité suffisante pour améliorer certaines propriétés physiques. Habituellement, la teneur en alliage est de 3 % ou plus. Cette addition d'alliage peut améliorer:

- La résistance mécanique;
- La résistance à l'usure;
- La résistance à la corrosion;
- La résistance à la chaleur;
- La capacité d'amortissement des vibrations.

La plupart de ces propriétés sont radicalement différentes de celles des autres fontes. Aussi, la fonte alliée est-elle normalement produite par des fonderies spécialisées.

La fonte alliée est largement utilisée dans l'industrie automobile pour fabriquer des pièces telles que les cylindres, les pistons, les carters et les tambours. On s'en sert aussi pour diverses pièces de machines et divers outils ou d'autres éléments exposés à l'action d'agents abrasifs.

12.5. RESUME

- Le Carbone joue un rôle essentiel dans les métaux ferreux. Il détermine la résistance mécanique et la dureté.
- Le fer possède moins de 0,06 et 0,2% de carbone, avec possibilité de cémentation.
- L'acier semi-dur possède entre 0,2 et 0,5% de carbone, avec possibilité de cémentation ou de trempe.
- L'acier à outils possède entre 0,5 et 1,5% de carbone et est trempable par traitement thermique.
- L'acier inoxydable possède plus de 12% de chrome.
- La fonte possède plus de 2% de carbone.
- Presque aucun alliage ferreux dont la teneur en carbone est comprise entre 1,8 et 2,5 % n'est couramment utilisé.
- Les aciers doux et semi-durs sont de loin les plus utilisés.
- Plus un acier est allié, meilleure est sa qualité.

13. MÉTAUX NON FERREUX

Les deux métaux non ferreux les plus abondants dans le monde sont l'aluminium (si l'on considère l'écorce terrestre) et le magnésium (si l'on tient compte à la fois de l'écorce terrestre et des océans). Il existe un grand nombre de métaux dont l'élément principal n'est pas le fer, mais seulement quelques-uns sont employés dans des applications techniques. Les métaux non ferreux ont les propriétés communes de ne pas être attirés par un aimant et de résister à la corrosion.

13.1. CARACTERISTIQUES DES METAUX NON FERREUX USUELS

Métal	Couleur	Densité	Point de fusion (°C)	Principales propriétés
Aluminium (Al)	Blanc brillant	2,7	660	Léger Ductile Malléable Bon conducteur Forme une couche d'oxyde d'aluminium
Argent (Ag)	Blanc brillant	10,5	950	Malléable Ductile Très bon conducteur
Cuivre (Cu)	Rouge brun	8,9	1083	Malléable Ductile Conducteur Forme une couche de vert-de-gris lorsqu'il est exposé à l'humidité
Étain (Sn)	Blanc	7,3	232	Malléable Ductile Très mou Faible résistance mécanique N'est pas touché par l'eau ou l'air
Plomb (Pb)	Gris bleuâtre	11,3	327	Malléable Ductile Mou Résiste à la corrosion Mauvais conducteur
Magnésium (Mg)	Blanc argenté	1,7	650	Malléable Ductile Résiste à la corrosion Peut brûler Faible résistance mécanique
Nickel (Ni)	Blanc grisâtre	8,9	1455	Malléable Ductile

				Résiste à la corrosion
Zinc (Zn)	Blanc bleuâtre	7,2	419	Cassant (à la température ambiante) Malléable (200 °C) Résiste à la corrosion
Manganèse (Mn)	Grisâtre	7,2	1245	Cassant Très dur Résistant S'oxyde facilement

13.2. ALUMINIUM

Procédé de transformation

La transformation de l'aluminium s'effectue en deux étapes principales:

- Fabrication de l'alumine;
- Transformation de l'aluminium par électrolyse.

La fabrication de l'alumine se fait à partir d'un minerai appelé bauxite. On concasse le minerai et on le sèche à 700 °C, puis on additionne de la soude caustique et on mélange le tout. Plusieurs réactions chimiques ont lieu avant et après la décantation et la dilution du mélange. On procède ensuite à la filtration, au lavage, puis à la calcination à 1300 °C, ce qui, par réaction chimique, donne l'alumine.

La transformation de l'alumine se compare à celle des aciers dans le four à arcs électriques. L'alumine fondue à haute température (1000 °C) par le courant des électrodes est décomposée en aluminium et en oxygène. L'oxygène est consommé par les anodes et dégage du monoxyde de carbone (CO). Finalement, on recueille l'aluminium périodiquement pour en faire des lingots ou des pièces directement moulées.

Saviez-vous que...

Identification et propriétés

L'aluminium est un métal trop réactif avec l'oxygène pour exister à l'état libre. Ce sont ses composés qui sont les plus répandus. Les plus connus sont le mica et l'argile. On trouve aussi de l'oxyde d'aluminium dans la nature sous forme de rubis, d'émeraudes, de saphirs et de topazes. Ces pierres précieuses contiennent de petites quantités d'oxyde de chrome, de titane, de manganèse et de fer qui leur donnent leurs couleurs particulières. On fabrique des rubis artificiels en ajoutant de l'oxyde de chrome à de l'oxyde d'aluminium en fusion, tandis que l'ajout d'oxyde de cobalt donne des saphirs bleus. Ces pierres artificielles sont souvent mieux formées que les pierres naturelles.

L'aluminium est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, dont on obtient facilement un beau fini poli. Il est aussi léger (trois fois plus que le fer) et très malléable. Il conduit la chaleur trois fois mieux que l'acier, mais sa conductivité décroît plus rapidement lorsque la température augmente.

L'aluminium vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner, souvent économique et il résiste à la corrosion. tout comme l'acier inoxydable, dès l'instant où l'aluminium est exposé à l'air, sa surface se recouvre d'une

pellicule transparente qui le protège contre toute forme de corrosion. L'aluminium n'est pas magnétique, il est bon conducteur de chaleur et d'électricité.

13.3. ALLIAGES

L'usage de l'aluminium pur n'est pas aussi répandu que celui des ses alliages. Les utilisations de l'aluminium pur sont très spécialisées et limitées à certaines industries: emballage et conditionnement des aliments, fabrication de réflecteurs de chaleur ou de lumière, etc. De plus, il ne se coule pas aussi bien à l'état pur que lorsqu'il est allié, et son usinage pose quelques problèmes en raison de sa malléabilité.

Les alliages d'aluminium offrent une résistance très variée. Leur limite d'élasticité peut varier entre 5000 et 7000 lb/po² selon l'alliage.

13.3.1.Magnésium

Les alliages d'aluminium-magnésium peuvent être forgés ou coulés, mais ils ne peuvent subir de traitement thermique, à moins qu'ils ne s'agisse d'alliages coulés et qu'ils contiennent plus de 10 % de magnésium. Modérément tenaces et résistants à la corrosion, les alliages forgés sont utilisés dans la construction navale, pour les tubes d'usage général, les pièces de tôlerie, les structures soudées, etc. Les alliages coulés sont utilisés pour fabriquer des réservoirs et des récipients, des composants d'avions et de bateaux ainsi que des pièces d'architecture.

13.3.2.Duralumin

Le duralumin est un alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, de manganèse, de silicium et de fer. Très léger, il durcit par vieillissement (durcissement graduel à la température ambiante). Comme il résiste bien à la corrosion, le duralumin est idéal dans les domaines de l'aviation et de l'automobile.

13.3.3.Manganèse

Les alliages d'aluminium-manganèse peuvent être durcis uniquement par travail à froid (forgeage). La plupart de ces alliages se prêtent bien au formage et au soudage. On utilise ce type d'alliages essentiellement pour les ouvrages structuraux, les tôles, les récipients, etc.

13.3.4.Zinc

Les alliages d'aluminium-zinc contiennent, en plus du zinc, d'autres éléments comme le cuivre et le magnésium. On obtient ainsi certains alliages d'aluminium parmi les plus robustes. Le durcissement se fait par vieillissement. Ces alliages sont principalement employés dans l'industrie aérospatiale pour les structures d'avions et pour des pièces soumises à des contraintes élevées.

13.3.5.Silicium



Les alliages d'aluminium-silicium sont très faciles à couper, ce qui permet de réaliser des formes complexes et des pièces à parois minces. On les trouve surtout dans l'industrie automobile: corps de carburateurs, pistons de moteurs, blocs-cylindres, etc. De plus en plus de pièces sont coulées à partir d'alliages d'aluminium en raison de la légèreté de ce métal.

13.3.6.Silicium-magnésium

Les alliages d'aluminium-silicium-magnésium peuvent être soumis à un traitement thermique et ont une extrême résistance à la corrosion. Certains alliages sont employés en général pour la fabrication de boîtes, de petites embarcations, de garde-fous de ponts, de carters, etc.

13.3.7.Magnésium

Le magnésium est produit en grande quantité à partir de l'eau de mer. Il s'agit d'un métal blanc argenté très léger qui ressemble à l'aluminium. Cependant, il s'oxyde facilement et sa surface se couvre alors d'une pellicule grisâtre. Il est modérément résistant aux produits chimiques tels que les acides, l'alcool, le phénol, les hydrocarbures, les huiles, etc. Il risque de s'enflammer lorsqu'il est chauffé à l'air libre. Il n'est donc pas facilement soudable, sauf s'il est allié à du manganèse ou de l'aluminium.

Le magnésium est employé comme désoxydant pour le laiton, le bronze, le nickel et l'argent. En raison de sa légèreté, on l'utilise pour fabriquer des pièces d'avions. Les alliages de magnésium se retrouvent, par exemple, dans les machines à coudre et les machines à écrire.

13.3.8.Cuivre

Le cuivre est vendu sous les mêmes formes que les aciers. Très ductile et malléable, on peut aussi l'obtenir sous forme de fils, de tôles, de tubes, de forgeages et de pièces moulées.

Identification et propriétés

Le cuivre est un métal brun tirant légèrement sur le rouge. Il permet d'obtenir facilement un beau fini poli. Il est assez léger.

Le cuivre vient au troisième rang des métaux les plus utilisés après l'acier et l'aluminium. C'est le premier métal à avoir été utilisé par l'être humain. Ses propriétés sont multiples, mais il se distingue surtout par sa bonne conductibilité électrique. Le cuivre est facile à mettre en forme. Il possède une grande résistance aux intempéries et de bonnes caractéristiques mécaniques. Le cuivre ternit mais ne rouille pas. Il possède néanmoins une faible résistance à certains acides. Une pellicule adhérente se forme sur les alliages de cuivre, les protégeant ainsi contre la corrosion. Tout comme l'aluminium, les alliages sont plus résistants que le métal pur.

Le cuivre à l'état pur est utilisé pour fabriquer des fils électriques, de l'appareillage de communication, de la tuyauterie, des toitures, etc. Lorsqu'il est à l'état pur, il se couvre d'une couche d'hydrocarbonate (vert-de-gris) au contact de l'air humide chargé de gaz carbonique.

13.3.9.Laitons

Identification et propriétés

On reconnaît facilement le laiton à sa couleur passant du rouge cuivré, pour les alliages riches en cuivre, jusqu'au jaune pour les alliages qui contiennent un peu plus de 36 % de zinc, comme c'est le cas des alliages les plus souvent utilisés dans les ateliers d'usinage. On peut facilement obtenir un beau fini lisse.

Le laiton est un alliage de cuivre et de zinc dont la teneur en zinc peut excéder 50 %. Chaque type de laiton présente des caractéristiques particulières. On apporte d'importantes modifications à ces alliages en ajoutant, en faible quantité, des éléments comme le plomb, l'aluminium, l'étain, le fer, le manganèse, le nickel et le silicium. Le laiton possède une bonne résistance à la corrosion et aux contraintes mécaniques, ainsi qu'une ductilité et une malléabilité assez élevées, mais moindres que celles du cuivre et de l'aluminium purs.

Les qualités du laiton font en sorte qu'il peut servir à la fabrication d'accessoires électriques, de raccords, de rivets, de tuyaux, de pièces embouties, de tubes et de tôles. On choisit le laiton à grande ténacité pour les pièces de structures nécessitant une grande résistance.

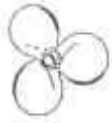
Le laiton jaune est utilisé dans la fabrication de conduits (radiateurs, systèmes de climatisation, bornes d'accumulateurs, etc.) et de différentes petites pièces coulées. Cet alliage est utilisé lorsqu'on doit obtenir des pièces qui s'usinent bien à faible coût.

Le laiton rouge est utilisé dans la fabrication de couronnes mobiles et de pompes centrifuges, d'accessoires sur les conduites à essence et de transport d'huile, de petits coussinets, etc. Ce laiton est classé dans la catégorie des laitons à décolletage rapide. Il possède d'excellentes propriétés au regard du moulage et de la qualité du fini de surface.

13.4. BRONZE

Il y a quelques années, seuls les alliages de cuivre-étain étaient considérés comme du bronze. Avec le temps et l'exigence d'autres propriétés, la définition du bronze s'est un peu élargie. Les bronzes contiennent d'autres éléments d'addition principaux comme l'aluminium, le plomb, le nickel, le manganèse, etc., et ce terme s'applique aujourd'hui à n'importe quel alliage de cuivre autre que l'alliage de cuivre-zinc (laiton). La couleur des bronzes varie du rouge au jaune, suivant la composition des alliages. Les bronzes sont identifiés selon l'élément principal ajouté au cuivre.

13.5. ALLIAGES



Cuivre-étain

Très peu utilisés, ces alliages sont souvent remplacés par d'autres alliages plus performants. Les bronzes de ce type sont surtout utilisés là où la résistance à la corrosion est importante, comme pour l'équipement marin et les corps de pompes .

13.5.1.Aluminium

Aussi appelés cupro-aluminiums, ces alliages ont généralement une teneur en aluminium inférieure à 10 %, mais ils contiennent souvent d'autres éléments tels que

- Le fer (résistance);
- Le nickel (dureté et résistance);
- Le manganèse (robustesse);
- Le plomb (usinabilité).

Les caractéristiques de ces bronzes, comme la dureté et la résistance, sont excellentes et nettement supérieures à celles du laiton. Leur résistance à la corrosion est également excellente. On emploie ces bronzes dans des applications telles que les engrenages, les outils, les éléments de fixation, les aubes de turbines ainsi que les coussinets dans le cas des alliages contenant du plomb, puisqu'ils ont la propriété d'être autolubrifiants.

13.5.2.Nickel

Ces bronzes ont une teneur en nickel qui varie entre 10 et 30 %. Ils contiennent aussi d'autres éléments d'addition. Le nickel améliore la résistance, la dureté, ainsi que les caractéristiques de résistance à l'usure et à la corrosion. Les alliages de ce type ont des applications diverses, notamment les tubes, les arbres, les paliers et les roulements, les corps de valves, etc.

13.5.3.Silicium

Ces alliages peuvent aussi contenir d'autres éléments d'addition en faible quantité. Ils possèdent une résistance exceptionnelle à la corrosion et représentent un excellent compromis entre la robustesse, la dureté, la résistance et la coulabilité. Ces bronzes sont très utiles dans les industries chimique, pétrolière et marine. On en fait des réservoirs, de la tuyauterie, des paliers, des pignons, des engrenages, etc.

13.5.4.Béryllium

Ces bronzes peuvent contenir jusqu'à 2 % de béryllium en plus d'autres éléments d'addition. Ils sont trempables, de sorte qu'ils peuvent acquérir d'excellentes qualités au regard de la traction et de la fatigue. On s'en sert dans la fabrication des ressorts, des matrices, des filières, des tubes et des appareils à contacts à haute résistance.

13.5.5.Titane

Le titane est un métal blanc et brillant. Le titane et ses alliages se distinguent par les caractéristiques suivantes:

- Très bonne résistance à la corrosion;
- Charge à la rupture élevée;
- Bonnes propriétés mécaniques à haute température.
-

Le titane est aussi résistant que l'acier, tout en étant deux fois plus léger. On l'utilise dans les industries aéronautique et chimique. De plus en plus, on trouve le titane et ses alliages dans différents secteurs industriels.

13.5.6.Nickel

Le nickel est un métal blanc grisâtre présentant une bonne dureté. Il est malléable et ductile. À l'état pur, le nickel est meilleur conducteur que les aciers. toutefois, lorsqu'il est allié avec du cuivre, du chrome, du fer ou du molybdène, il est moins conducteur.

On utilise le nickel comme élément d'alliage pour augmenter la ductilité, la dureté et la résistance tant des métaux ferreux que non ferreux. De plus, il permet d'augmenter la ténacité à basse température, la trempabilité et la résistance à faible traction. On utilise les alliages de nickel pour produire des pièces devant supporter des températures élevées: résistances électriques d'appareils de chauffage, évaporateurs et échangeurs pour l'industrie chimique, accessoires de décorations lumineuses. L'Inconel et le Monel sont des alliages de nickel couramment utilisés.

L'acier inoxydable est un alliage de nickel, de chrome et de fer.

14. COMPARAISON ENTRE LES METAUX FERREUX ET LES METAUX NON FERREUX

En raison de leurs nombreuses propriétés, les métaux non ferreux rivalisent de plus en plus avec les métaux ferreux et tendent à les remplacer dans bon nombre d'applications.

14.1. RESISTANCE A LA CORROSION

Les métaux non ferreux résistent mieux à la corrosion que les métaux ferreux. Ces derniers, à l'exception des aciers inoxydables, sont grandement attaqués par la corrosion. Chaque année, la corrosion dégrade plusieurs centaines de milliers de tonnes d'acier.

14.2. CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

La conductivité électrique des métaux non ferreux est largement supérieure à celle des métaux ferreux.

14.3. CONDUCTIVITE THERMIQUE

En général, la conductivité thermique des métaux ferreux est inférieure à celle des métaux non ferreux.

14.4. FERROMAGNETISME

Tous les métaux ferreux, à l'exception de l'acier inoxydable austénitique, sont attirés par un aimant. Quant aux métaux non ferreux, ils ne le sont pas, à l'exception du nickel et du cobalt.

14.5. DENSITE

L'aluminium, le zinc et l'étain sont plus légers que le fer, tandis que le nickel, le cuivre, l'argent, le plomb et l'or sont plus lourds que le fer.

14.6. COMPORTEMENTS A BASSE TEMPERATURE

Les métaux ferreux (à l'exception des aciers à haute limite élastique, des aciers inoxydables austénitiques et des aciers au nickel) deviennent fragiles et cassants à basse température. Les métaux non ferreux gardent leur résistance mécanique à basse température.

14.7. RESISTANCE MECANIQUE

La résistance mécanique des métaux ferreux est supérieure à celle des métaux non ferreux.

14.8. COUT

En général, le coût des métaux non ferreux est supérieur à celui des métaux ferreux.

14.9. RESUME

Les deux métaux les plus abondants dans le monde sont l'aluminium et le magnésium.

Les métaux non ferreux résistent généralement bien à la corrosion et ne sont pas magnétiques.

L'aluminium est trois fois plus léger et conducteur que le fer. ses alliages sont plus résistants que le métal pur.

En raison de la facilité avec laquelle on peut le couper, l'alliage d'aluminium-silicium permet de réaliser des pièces complexes.

L'alliage d'aluminium-silicium-magnésium a une très grande résistance à la corrosion.

Le cuivre se distingue par sa grande conductibilité électrique. Il ternit mais ne rouille pas. ses alliages sont plus résistants que le métal pur

Le laiton est un alliage de cuivre et de zinc. Il est moins malléable que le cuivre et l'aluminium purs.

Le terme « bronze » s'applique aujourd'hui à n'importe quel alliage de cuivre autre que le laiton (cuivre-zinc).

Les principaux éléments ajoutés au cuivre pour produire différents bronzes sont l'étain (équipement marin, corps de pompes), l'aluminium (engrenages, outils, éléments de fixation), le nickel (tubes, paliers, corps de valves), le silicium (réservoirs, tuyauterie, engrenages).

Le nickel est ajouté aux métaux ferreux et non ferreux pour augmenter leur ductilité et leur résistance ainsi que pour abaisser leur température critique.

Le magnésium ressemble à l'aluminium mais il s'oxyde facilement. En soudage, on utilise surtout les alliages de magnésium, car lorsqu'il est pur, ce métal tend à s'enflammer lorsqu'il est chauffé.

DESIGNATION DES ACIERS

SOMMAIRE

1. HISTORIQUES DES DESIGNATIONS
2. SYMBOLIQUE NF EN 10027.1
3. DESIGNATION NUMERIQUE NF EN 10027.2
4. DESIGNATION NORMALISEE

15. HISTORIQUES DES DESIGNATIONS

15.1. HISTORIQUE DES DESIGNATIONS

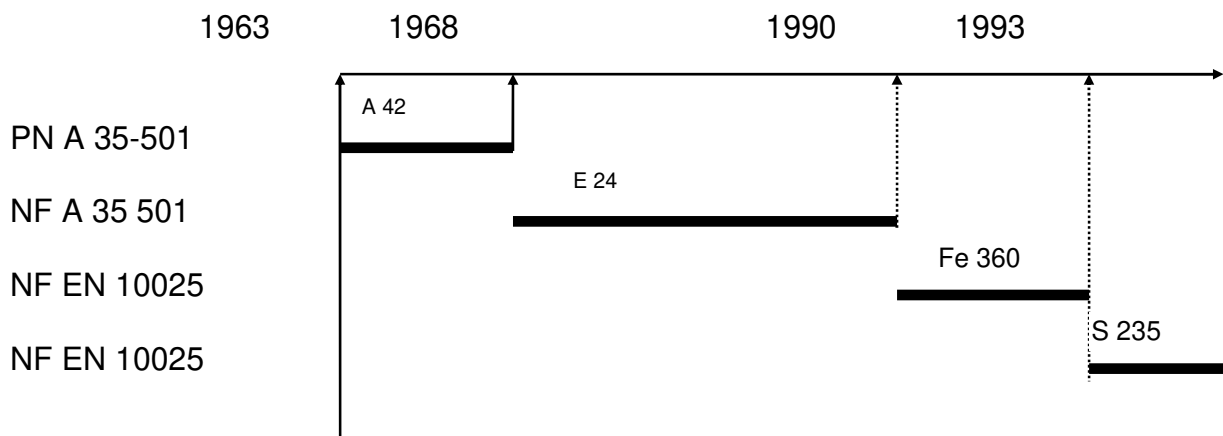
1945 : Apparition des normes AFNOR (NFA)

1965 : Apparition des Euronormes (EU)

1986 : Apparition des premières normes européennes (EN)

1993 : Apparition de la norme européenne de désignation des aciers (EN 10027)

Exemple d'évolution



15.2. REFERENCES NORMALISEES

- EN 10020 - Définition et classification des nuances d'acier
- EN 10027 - Systèmes de classification des aciers
 - EN 10027.1 - Désignation symbolique
 - EN 10027.2 - Désignation numérique
- EN 10079 - Définition des produits en acier