

Chapitre 1 : Introduction

La fabrication de « demi-produits métalliques », c'est-à-dire de tôles, de plaques, de barres, de fils, de profilés divers, de tubes, de pièces de forge ou de fonderie, relève de l'industrie sidérurgique (pour l'acier) et métallurgique (pour les autres métaux). Cette fabrication comporte une succession *d'opérations de transformation, d'extraction ou de séparation des constituants de minerais ou de produits intermédiaires*, que l'on divise généralement en trois étapes (bien qu'il n'y ait pas toujours une frontière très nette entre ces étapes) [1].

- 1) **La métallurgie « primaire »** ou « **extractive** » ou « **de première transformation** » (*winning*). Cette étape comporte des opérations d'extraction ou de séparation des constituants du minerai.
- 2) **La métallurgie « secondaire » (refining)**
 - Affinage (purification),
 - la mise à la nuance (addition des éléments constitutifs de l'alliage),
 - la coulée,
- 3) **La mise en forme**
 - Transformations thermomécaniques,
 - Traitement thermique
 - Traitement de surface

Un ferroalliage est un alliage de fer et d'un élément autre que le carbone [2]. Exemple : FeCr, FeSi, FeMn, SiMn, FeTi, FeMo, FeV, FeB.

On peut schématiquement limiter à deux rôles principaux leur utilisation en sidérurgie [2]:

- **Addition d'alliages** : c'est-à-dire modification des propriétés des aciers par addition d'un ou plusieurs éléments permettant de donner aux aciers des propriétés spécifiques. Les principaux éléments d'addition sont : chrome, manganèse, nickel, silicium, molybdène, tungstène, vanadium, niobium, titane, aluminium, bore, cobalt, lanthanides, etc.
- **Traitement de l'acier liquide** : c'est-à-dire élimination ou neutralisation des éléments nuisibles contenus dans l'acier. Ces éléments nuisibles sont principalement des impuretés telles que l'oxygène, le soufre, l'azote et le phosphore. Les principaux traitements utilisés sont :
 - **La désoxydation** par les éléments manganèse, silicium, calcium, titane;

Chapitre 1 : Introduction

- **La désulfuration** par les éléments manganèse, magnésium, baryum, calcium, lanthanides;
- **La stabilisation de l'azote** par les éléments aluminium, titane, zirconium ;
- **La stabilisation du carbone** par le titane.

Exemple : la figure 1-1 présente la **filière fonte** et la **filière ferrailles** pour l'élaboration des aciers.

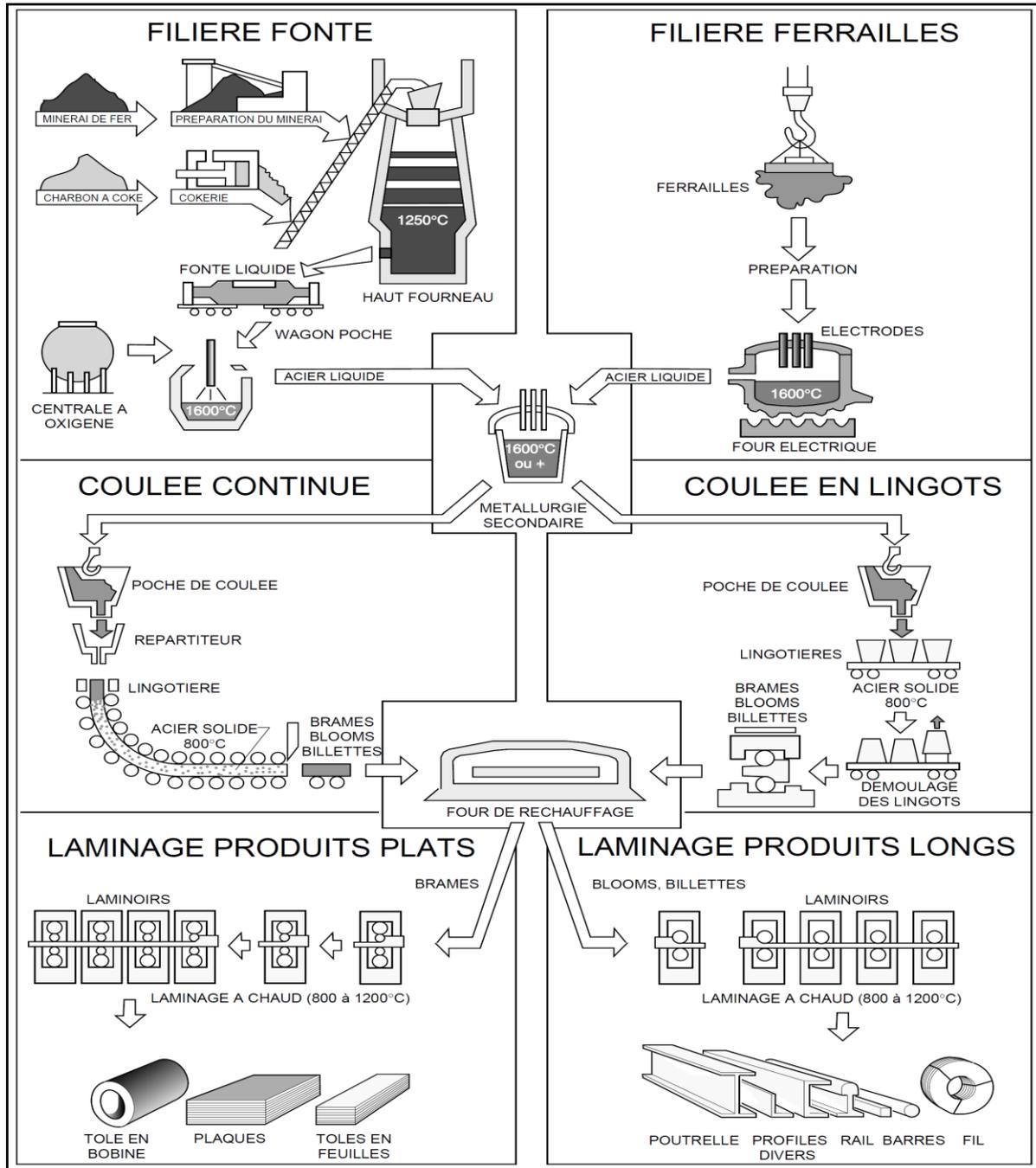


Figure 1-1 : Élaboration et fabrication de demi-produits en acier : Filières-Étapes-Opérations [1]

A. Classification des aciers

On appelle acier, un matériau contenant en masse plus de fer que tout autre élément, dont la teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et qui contient d'autres éléments [3].

NOTE : Un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte.

Sur la base de leur composition chimique, on distingue 3 classes d'aciers : les aciers non alliés et 2 catégories d'aciers alliés, les aciers inoxydables et les autres aciers alliés.

- 1) **Les aciers non alliés** sont des aciers pour lesquels les teneurs en un certain nombre d'éléments ne dépassent pas les valeurs limites fixées dans la norme NF EN 10020, pour l'analyse de coulée.
- 2) **Les aciers inoxydables** sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone.
- 3) **Les autres aciers alliés** sont des aciers ne répondant à aucune des deux définitions précédentes.

Les aciers spéciaux désignent les aciers non alliés et alliés. Ils possèdent en général *un degré de pureté plus élevé* et se caractérisent par des *teneurs assez faibles en phosphore et en soufre*. La pureté et l'homogénéité des aciers spéciaux ont une importance capitale. Par définition, tous les aciers à outils, rapides sont des aciers spéciaux.

La majeure partie des aciers spéciaux est élaborée au four à arc. Le four à induction conserve l'avantage de la souplesse, permettant d'élaborer de petites quantités.

B. Structure à l'état brut de coulée

Aussi longtemps que les sidérurgistes ont coulé en lingots, ils sont restés assez largement démunis pour agir sur la solidification du produit, ils devaient subir, sans pouvoir vraiment influencer (sauf par la surchauffe), les structures dites « brutes de coulée ». Le passage en coulée continue permettait pour la première fois non seulement d'agir avec une certaine efficacité sur ces processus en localisant dans l'espace les diverses étapes de la solidification (les phénomènes de germination et croissance principalement en lingotière, les phénomènes de ségrégation (Figure 1-2 et Figure 1-3) [4] principalement dans le refroidissement secondaire), mais en outre ce passage en coulée continue exigeait un pilotage précis de procédé pour que la qualité du produit coulé reste compatible avec la simplification des opérations de laminage en aval (suppression du laminoir dégrossisseur), ce qui avait pour conséquence une moindre atténuation des hétérogénéités compositionnelles et structurales issues du processus de solidification.

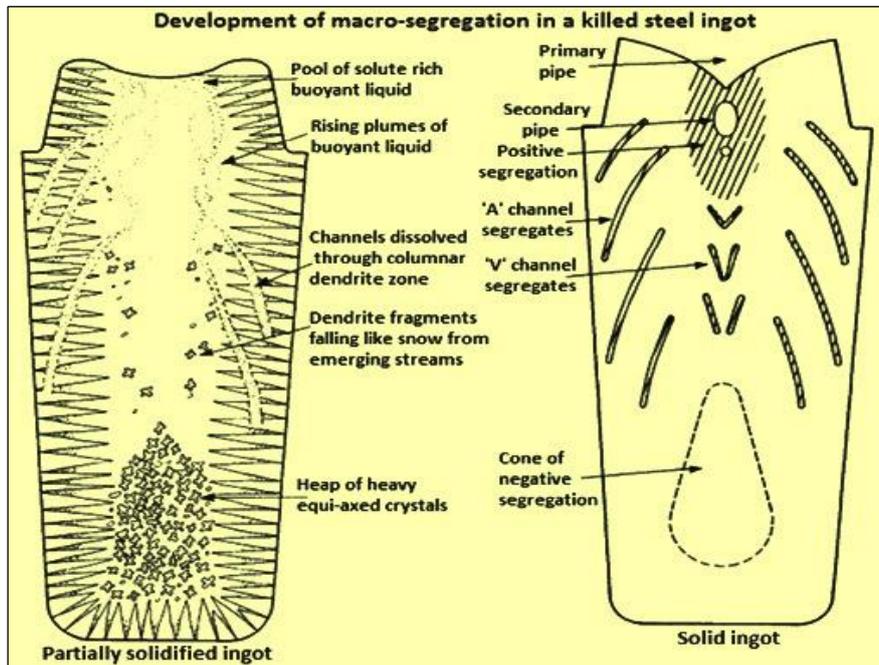


Figure 1-2 : Développement de la macro-ségrégation dans un lingot d'acier calmé [4]

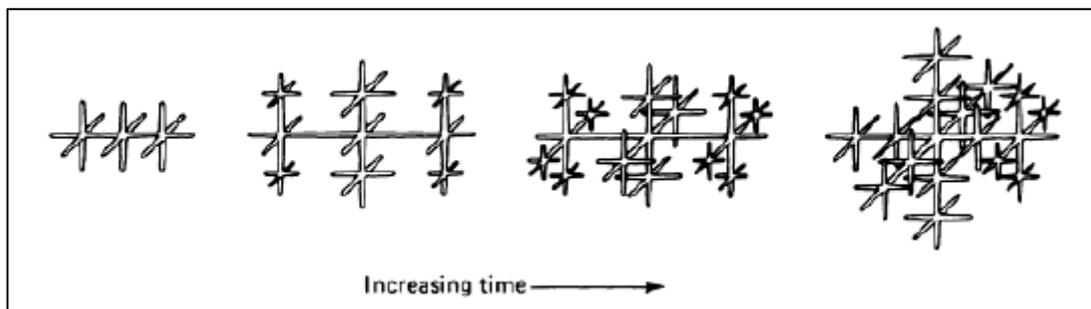


Figure 1-3 : Illustration schématique d'un cristal dendritique se formant dans un liquide [4]

C. Présentation du procédé de la coulée continue

La fabrication de l'acier implique un certain nombre d'étapes afin de passer du minerai de fer brut ou de ferraille de recyclage, à de l'acier prêt à être utilisé dans différents secteurs industriels (la construction de bâtiments, la fabrication de voitures, ...). Le procédé le plus répandu qui permet de passer de l'acier liquide à un bloc d'acier solide, que l'on pourra ensuite travailler pour obtenir des tôles ou des poutres, s'appelle la coulée continue.

La machine de coulée continue est composée d'un moule sans fond en cuivre appelé lingotière (en anglais Mold), comme montre la Figure 1-4 [5]. Elle sert à solidifier l'acier à son contact. Pour cela, elle est parcourue par un réseau de canaux dans lesquels circule de l'eau afin de la refroidir en permanence. L'acier liquide est injecté par le haut de la lingotière par la busette, (en anglais Shroud). Au contact de la paroi de la lingotière, la température de

Chapitre 1 : Introduction

l'acier liquide diminue ce qui entraîne sa solidification. Cette solidification se propage donc de la paroi de la lingotière vers le cœur du produit et l'épaisseur solide est proportionnelle au temps de séjour dans la lingotière. Par conséquent, comme l'acier avance dans la lingotière et que celle-ci est refroidie, l'épaisseur solidifiée est plus importante en bas qu'en haut de la lingotière. L'acier se trouvant au centre du produit reste liquide.

La partie d'acier solide qui enveloppe la partie liquide s'appelle la peau solide. Un ensemble de rouleaux dit "rouleaux extracteurs" (en anglais Roll support) situé juste en dessous de la lingotière permet de guider et de tirer sur le produit partiellement solidifié par le bas de la lingotière pour l'extraire en continu. Un refroidissement par pulvérisation d'eau sur la surface de l'acier permet de terminer la solidification. A l'extrémité de la machine, le produit est découpé en morceaux selon la taille voulue.

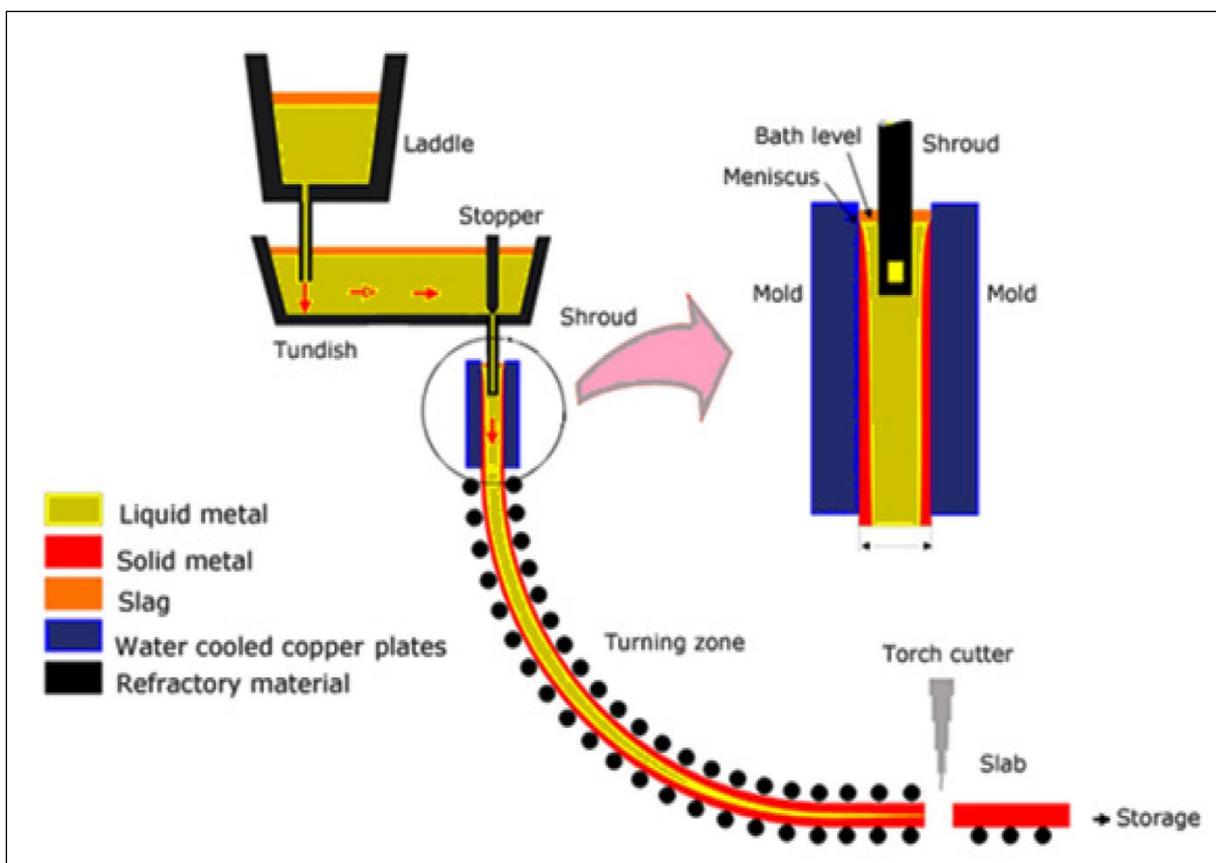


Figure 1-4 : Schéma de principe de la coulée continue [5]

Chapitre 2 : Qualité de l'acier

2.1. Notions de pureté de l'acier

Les exigences relatives aux propriétés mécaniques et à la composition chimique de l'acier augmentent constamment, et dans le même temps, le coût, l'énergie et les préoccupations environnementales dans la production d'acier deviennent également très importants. Ainsi, la résistance, la ductilité, la durabilité et la résistance à la corrosion de l'acier se sont améliorées au fil des ans pour répondre aux besoins. Ceci a été réalisé partiellement en rendant l'acier plus propre des inclusions non métalliques, qui détériorent la plupart des propriétés ci-dessus [6].

Les inclusions non métalliques dans l'acier sont de deux types et chacune a son mode de formation différent. Il s'agit d'inclusions d'oxydes endogènes qui se forment par désoxydation de l'acier fondu. La plupart de ces oxydes sont éliminés lors du raffinage et du dégazage de la masse fondue dans la poche, mais certaines inclusions d'oxydes non métalliques de petite taille restent en suspension dans la masse fondue. L'autre type est l'inclusion exogène, qui se forme par réoxydation de la masse fondue d'acier désoxydée par l'air ou par le laitier dans la masse fondue pendant le transfert de la masse fondue d'une poche à l'autre. Habituellement, les inclusions d'origine exogène sont beaucoup plus grandes que les inclusions endogènes et sont donc plus nocives [6].

La pureté industrielle actuelle peut s'exprimer par : $O + S + N + H < 50$ ppm, celle des élaborations SULC (Supra Ultra low Carbon) par : $C + N < 15$ ppm (aciers « extra deep drawing quality »), et pour les aciers magnétiques doux par $C + N + S < 50$ ppm. On peut donc fabriquer industriellement un métal à 99,99 % Fe, donc très ductile et non vieillissant [7].

Les inclusions posent des problèmes pendant les processus de coulée, de laminage et de traitement thermique et entraînent parfois une défaillance de l'acier pendant son application.

La taille critique et la composition des inclusions non métalliques qui dégradent les propriétés de l'acier ne sont pas uniques, mais dépendent de l'application. D'une manière générale, les aciers avec un traitement et des applications plus exigeants nécessitent des inclusions ont une petite taille et une faible densité. Le tableau 1.1 donne quelques exemples des tailles critiques d'inclusions et des teneurs en impuretés pour l'acier haut de gamme. La taille critique des inclusions diminue que les demandes deviennent plus strictes [6].

Une autre façon de réduire les effets néfastes des grosses inclusions est en modifiant la composition chimique des inclusions pour abaisser leur température de fusion et rendre les inclusions déformables lors du laminage à chaud. Ces grandes inclusions sont allongées dans la matrice d'acier sous forme de filaments fins le long de la direction de laminage. Plus tard, lorsque l'acier laminé à chaud est soumis à un laminage à froid, les filaments fins sont brisés en morceaux de petite taille car ils sont cassants à la température de laminage à froid. Lorsque la distance entre les morceaux fragmentées est augmentée à cause de la déformabilité, une grande inclusion indésirable pourrait être divisée en inclusions beaucoup plus petites et inoffensives. Cette technologie fait partie de «l'Inclusion Engineering » [6].

Les impuretés qui se dissolvent dans la masse fondue et forment des précipités pendant la solidification doivent également être minimisées. Des exemples typiques sont le phosphore et le soufre, qui forment des phosphures aux joints de grains d'austénite et des sulfures dans et autour des grains d'austénite. Puisqu'il est difficile d'éliminer ces impuretés dans la coulée, elles doivent être minimisées pendant l'élaboration de l'acier, le processus BOF (Basic Oxygen Furnace) et le traitement au four à poche avant d'amener la masse fondue à la station de coulée continue.

Tableau 2-1 : Tailles critiques des inclusions et teneurs en impuretés tolérables dans les aciers hautes performances [6]

Application	Key property	Critical Inclusion Size (μm)	Critical Impurity Content (ppm)
DI-can sheet	Flange crack	<20	
SEDDQ sheet	Average r >2.0		C<20, N<30
Shadow mask	Blur in etching	<5	Low S
Lead frame	Punch crack	<5	
Sour gas pipe	HIC	Shape control	S<5
LNG plate	Embrittlement		P<30, S<10
Lamellar tear	Z-crack	Shape control	<i>ibid</i>
Bearing, Race	Rolling-fatigue	<10	O<10, Ti<15
Case hardening	Fatigue crack	<15	O<15, Ti<50
Tire cord	Rupture	Shape control <20	Al<10
Spring wire	Fatigue crack	Shape control <20	<i>ibid</i>

Note – DI: Deep drawing & ironing; SEDDQ: Super extra deep drawing quality; HIC: Hydrogen induced cracking; Z-crack: Crack parallel to rolling direction.

2.2. Impuretés (S et P)

Parmi les éléments néfastes pouvant être détectés dans les métaux, on compte le soufre et le phosphore. Leur présence dans l'acier peut provenir de la composition du minerai ou peut résulter du mode d'élaboration. Ces deux éléments ont un effet négatif sur la qualité du soudage des aciers. C'est pourquoi, lors de la fabrication, un soin extrême est apporté pour limiter les impuretés à un maximum de 0,05% [8].

2.2.1. Soufre

Contrairement au phosphore, le soufre n'est pratiquement pas soluble dans l'acier, non seulement à température ambiante mais dans presque toutes les conditions. Le soufre précipite donc dès la solidification ou peu après. Dans le fer pur, le sulfure de fer est responsable, par son bas point de fusion, de phénomènes comme la brûlure ou le rouverin où il y a déchaussement des grains, les sulfures aux joints étant liquides ou sans résistance [9].

L'addition de manganèse transforme le sulfure de fer en sulfure de manganèse, ce qui permet d'éviter les chutes brutales de forgeabilité. Ces inclusions de sulfure de manganèse sont plastiques à chaud ; elles s'allongent donc sous l'effet du laminage et sont ainsi responsables de la directionnalité des propriétés de ductilité. En effet, ce sont les inclusions

qui servent d'amorces aux cupules qui se forment au moment de la rupture ductile. La forme des inclusions implique donc que les cavités sont très différentes suivant les trois axes de symétrie d'un produit laminé. Pour éviter cette anisotropie gênante pour certaines utilisations qui sollicitent le métal dans des directions perpendiculaires au sens de laminage, on est arrivé aux opérations suivantes [9]:

- Abaissement de la teneur en soufre, ce qui réduit la quantité de sulfures (figure 2-1) ;

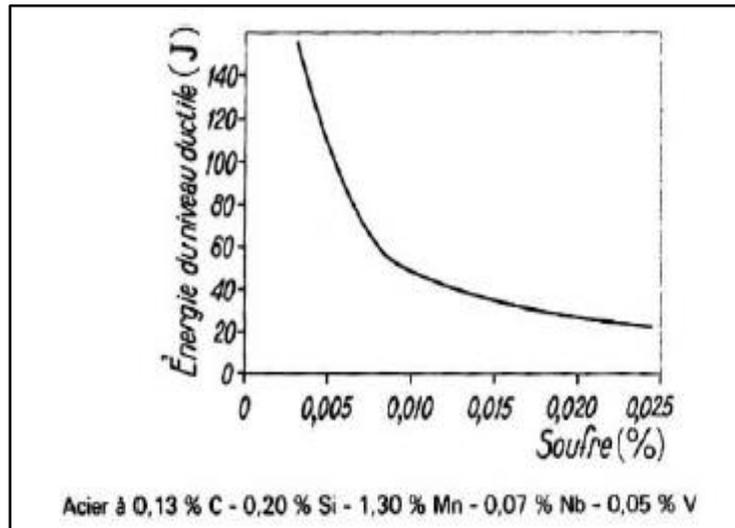


Figure 2-1 : Influence du soufre sur l'énergie ductile de la résilience [9]

- Substitution au manganèse, dans le cas de sulfure de manganèse (Figure 2-2 [10]), d'un autre élément fixant le soufre : zirconium, terres rares, calcium ou autres, et donnant des sulfures non plastiques ; ces sulfures se déforment peu ou pas du tout lors du corroyage et donnent une ductilité semblable dans toutes les directions;
- combinaison de ces deux techniques pour les aciers ayant une utilisation spéciale (tubes de gazoducs, offshore, etc.).

Il faut signaler également, à propos du soufre, son rôle bénéfique en usinabilité, ce qui en fait une addition de choix pour les aciers de décolletage (teneur de 0,27 à 0,44 % en soufre [11]) qui sont classés d'usage général, alors que les autres aciers à usinabilité améliorée sont classés avec les aciers de construction spéciaux pour traitements thermiques.

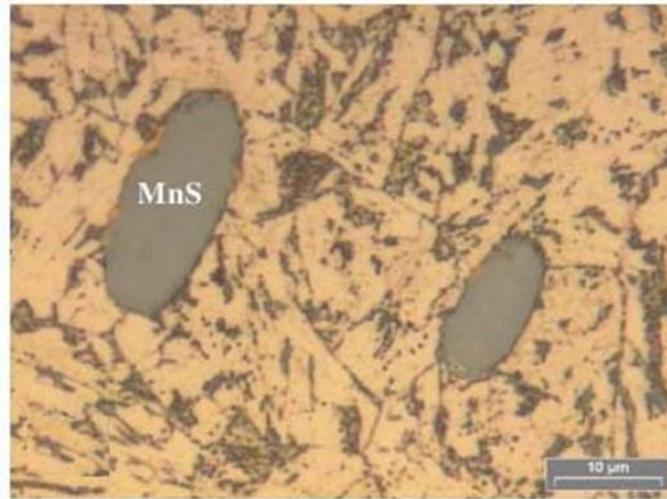


Figure 2-2 : Observation des inclusions de sulfure de manganèse dans l'acier 16MND5 [11]

2.2.2. Phosphore

Aux teneurs usuelles dans l'acier, le phosphore ne dépasse pas 0,05 % ; il se trouve en solution solide de substitution et a un effet durcissant et fragilisant. L'effet durcissant est indépendant de la matrice fer pur ou ferrite-perlite, en l'absence de ségrégations aux joints de grains qui résultent en général de cycles thermiques particuliers (gros lingots de forge, revenus prolongés). Le durcissement est linéaire sur Re et Rm au moins jusqu'à 0,1 % dans ces conditions et vaut (en N/mm²) de 500 à 1 000 fois la teneur massique (en %). L'effet fragilisant est moins bien chiffré et un ordre de grandeur de 40 °C de remontée de la température de transition pour 0,1 % de P est une estimation raisonnable quoique non généralisable. Pour les tôles fortes ayant une teneur en phosphore de l'ordre de 0,030 % et au-dessous, le décalage de la température de transition est de l'ordre de 10 °C (entre 0,010 et 0,020 %) et il est souvent non significatif. Par contre, certaines structures à gros grains sont davantage sensibles à la fragilisation par le phosphore et cet élément est particulièrement déterminant pour la fragilité de revenu. La recherche de très basses teneurs concerne donc certaines qualités d'acier soudables faiblement alliées, pour améliorer la ténacité des zones soudées. Le phosphore est aussi défavorable en corrosion par les acides en milieu aqueux, surtout les jus de fruits, d'où des teneurs limitées très basses pour certaines qualités de fer-blanc [9].

2.3. Propreté inclusionnaire

Bien que très connu, ce terme d'inclusions est difficile à définir. Historiquement, pour la plupart, il contient une notion péjorative de composé étranger au métal, donc une impureté, donc nocive et évitable. On a admis peu à peu que les inclusions sont inévitables puisque les

appareils d'observation ont permis d'observer des « matières étrangères » de plus en plus fines, de quelques millimètres à quelques nanomètres. [7].

Rappelons ici la définition proposée par René Castro, fondée sur un ensemble de caractères des inclusions : « Les inclusions sont des éléments de structure constitués par des combinaisons plus ou moins complexes entre un ou plusieurs métaux et un ou plusieurs métalloïdes, le plus souvent l'oxygène et le soufre, mais également l'azote, le phosphore, etc., et ayant dans le métal une solubilité nulle ou très faible à l'état solide. Elles sont le plus généralement colorées, visibles sans attaque sur une coupe micrographique, sous forme d'éléments isolés ou en association, de dimensions dépassant rarement une fraction de millimètre, et la densité de répartition est plus ou moins irrégulière et très inférieure à celle des éléments de structure usuels du métal » [7].

La propreté inclusionnaire du métal présenté à la coulée. Une propreté insuffisante peut conduire non seulement à une dégradation des propriétés d'emploi du métal mis en forme, mais encore à des perturbations du fonctionnement de la machine, par exemple par colmatage progressif des busettes de coulée par des dépôts inclusionnaires, avec impossibilité de respecter la consigne de vitesse de coulée et même blocage de l'alimentation de la ligne. En ce qui concerne la propreté inclusionnaire en sidérurgie, rappelons deux points concernant particulièrement les produits plats minces [12]:

- 1) La lutte contre un contenu inclusionnaire excessif doit être une préoccupation permanente non seulement pour éviter les contaminations tardives (réoxydations, entraînements du laitier de coulée), mais encore pour profiter de toutes les étapes du processus pour piéger les inclusions résiduelles (en particulier lors des circulations du métal en répartiteur et en lingotière). Cette démarche vers la haute propreté inclusionnaire fut grandement facilitée par les développements de la métallurgie secondaire en poche, entre le réacteur primaire (convertisseur ou four électrique) et la coulée, avec notamment les traitements en poche sous vide.
- 2) Le problème longtemps posé par les machines courbes (lorsqu'on coulait un métal à la propreté mal maîtrisée) dans lesquelles les inclusions décantaient au plafond de la brame.

2.4. Notions d'éléments d'alliages

2.4.1. Influence des éléments d'addition sur les propriétés des métaux liquides et solides

Les influences des éléments d'alliage susceptibles d'être introduits dans les aciers doivent être étudiées en fonction de divers paramètres [13]:

- Leur solubilité ;
- Leur action sur les structures d'équilibre ;
- Leur aptitude à former certains composés (nitrures, oxydes, sulfures et intermétalliques) ;
- Leur action sur les transformations hors équilibre.

2.4.1.1. Solubilité des éléments d'alliage

Sans être totalement déterminante, la solubilité d'un élément d'alliage dans le fer γ fournit une première information sur les quantités qui peuvent être incorporées dans un acier et solubilisées dans l'austénite. Bien entendu, au-delà de cette première estimation, il faut examiner les solubilités dans le fer α pour prévoir les tendances d'évolution au cours ou à la suite des transformations allotropiques et, par ailleurs, prendre en compte les composés qui peuvent se former et dont il est nécessaire de considérer la solubilité propre.

RAPPELLE « TRANSFORMATION ALLOTROPIQUE » : c'est la transformation au chauffage ou au refroidissement d'une variété cristalline d'un métal ou alliage en une autre variété cristalline. On peut avoir aussi des changements de forme cristalline en phase solide. Un métal à une structure donnée à basse température, et une autre à haute température, c'est le cas du fer pur (Fe) :

- en dessous de 912°C il est Cubique Centré (Fer alpha ou ferrite)
- entre 912° et 1394° il est Cubique à Face Centrées (Fer gamma ou austénite)
- entre 1394° et la fusion (1538°) il est à nouveau Cubique Centré (Fer Delta)

Le Tableau 2-2 rassemble un certain nombre d'informations relatives à ces différents points.

2.4.1.2. Influence des éléments d'alliage sur les structures d'équilibre

A des teneurs limitées, les éléments d'alliage changent le tracé du diagramme d'équilibre Fe /C en modifiant tout d'abord les domaines respectifs d'existence des phases α et γ . C'est ainsi que l'on distingue les éléments alphagènes, gammagènes et carburigènes:

Tableau 2-2 : Informations relatives aux éléments d'alliage [14]

Élément	Solubilité (% en masse) dans le fer				Composés formés avec			
	γ		α		Fe	C	N	O
	max.	effet C	max.	à 20 °C				
Al	0,625		12	<	+		+	+
B	0,021	↘	0,002	≪	+	+	+	+
Co	tot		77	<				
Cr	12,7	↘	tot	<	+	+	+	+
Cu	9,5		2,1	≪				
Mn	tot		3			+		
Mo	2	↘	32	<	+	+		
Ni	tot		7	<	+			
P	0,3		2,55	<	+			
S	0,065		0,020	≪	+			+
Si	2	↘	13,5	<	+			+
Ti	0,72	↘	9	<	+	+	+	+
V	1 à 1,4	↘	tot	<	+	+	+	
W	4	↘	35,5	<	+	+		

↘ la solubilité de l'élément diminue en présence de carbone.

- Les **éléments alphagènes** qui augmentent la surface du domaine dans lequel la phase α est stable et, de ce fait, diminuent la surface du domaine de stabilité de la phase γ comme l'illustre la Figure 2-3 en ce qui concerne le molybdène ; la liste des éléments alphagènes comprend presque tous les éléments habituels tels que **Si, Al, Cr, Mo, Ti, W** ;
- Les **éléments gammagènes** qui augmentent la surface du domaine d'existence dans lequel la phase γ est stable (Figure 2-4) ; la liste des éléments gammagènes est relativement courte : Ni, Mn et Cu (dont l'action est assez faible).
- Les **éléments carburigènes** : éléments qui ont pour le carbone une affinité plus grande que celle du fer : ce sont Mn, Cr, Mo, V, W, Nb, Ti. Il faut noter que ces éléments, à faibles teneurs, ont souvent tendance à participer à la formation de la cémentite en se substituant partiellement au fer, donnant ainsi des carbures répondant à la formule générale M_3C [13].

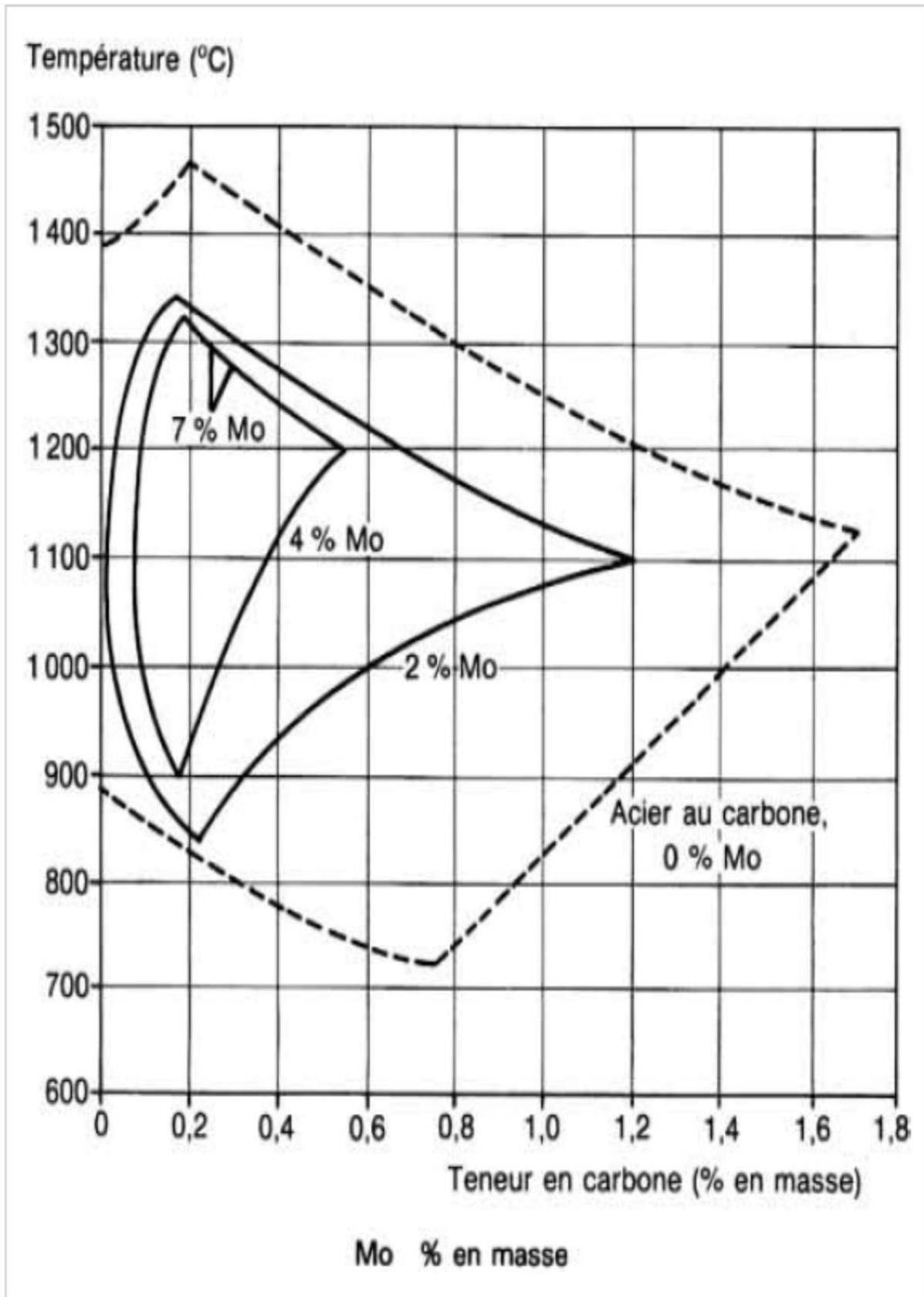


Figure 2-3 : Influence du molybdène sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase α dans le système fer-carbone-molybdène [13]

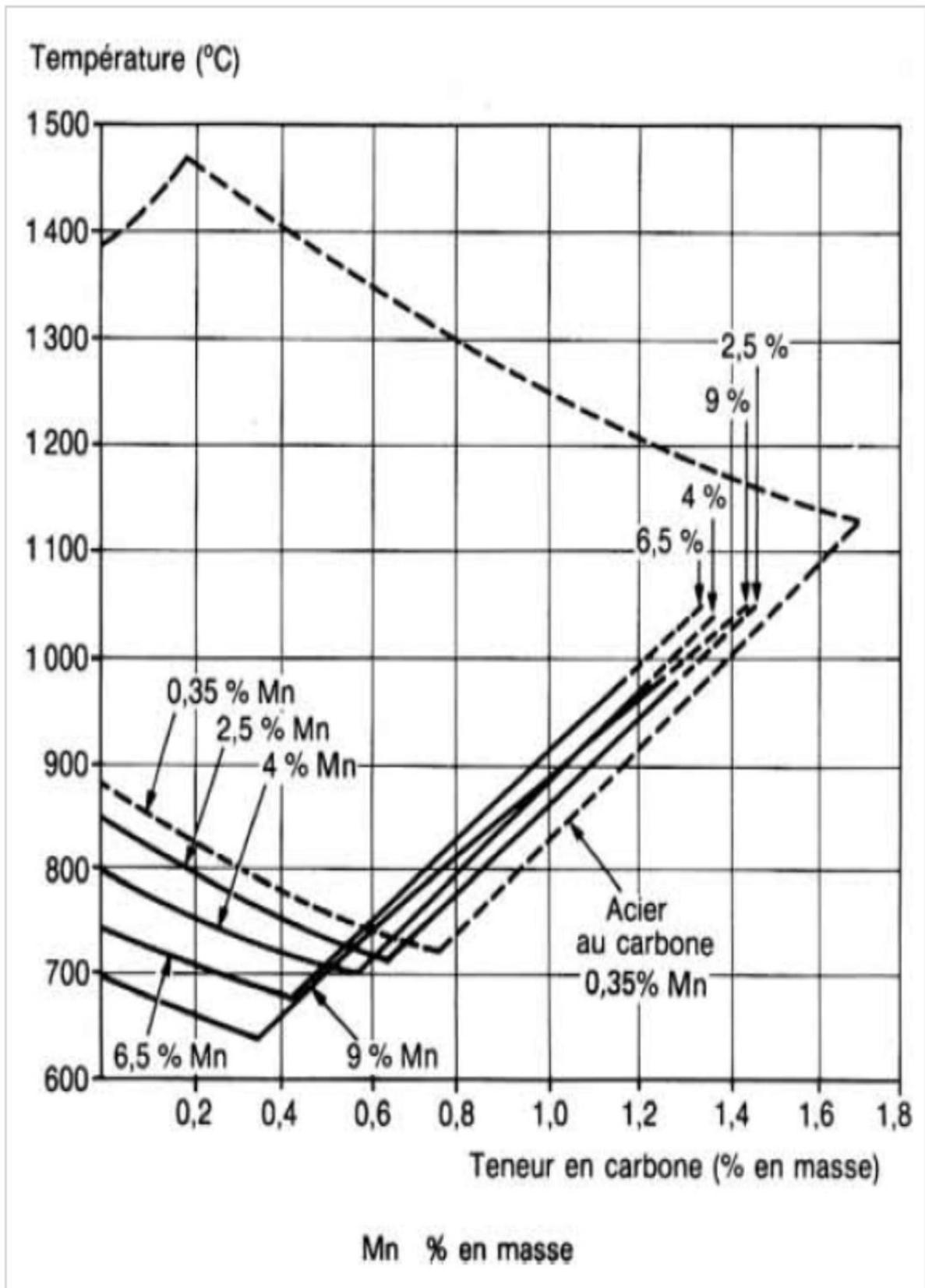


Figure 2-4 : Influence du manganèse sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase γ dans le système fer-carbone-manganèse [13]

2.4.1.3. Participation des éléments d'alliage à la formation de composés particuliers

On doit évoquer ici les éléments qui contribuent à la formation de composés tels que oxydes, sulfures, nitrures et intermétalliques.

- **Participation à la formation d'oxydes :**

L'oxygène est une impureté des aciers introduite au cours de l'élaboration. La désoxydation, qui a pour objet de l'éliminer, l'inclut dans des composés séparables du métal liquide (laitier). Les éléments d'addition (Mn, Si et Al) ont pour l'oxygène une affinité supérieure à celle du carbone et à celle de fer [13].

- **Participation à la formation de sulfures**

Le soufre est une impureté issue des matières premières. Sa présence peut provoquer la formation de sulfures ou d'oxysulfures de fer fusibles à relativement basses températures et susceptibles, de ce fait, d'engendrer des difficultés de mise en forme à chaud. L'aciériste élimine le plus possible de soufre lors de l'élaboration de l'acier et fixe les traces restantes à l'aide du manganèse, qui a pour cet élément une affinité plus grande que celle de fer et forme des sulfures non fusibles [13].

- **Participation à la formation de nitrures**

L'azote est généralement une impureté des aciers introduite lors de l'élaboration. La fixation de l'azote peut être aussi réalisée avec des éléments ayant pour lui une forte affinité tels que Ti, Nb [13].

- **Participation à la formation de composés intermétalliques**

Dans certains aciers très alliés il est possible de provoquer la précipitation de composés intermétalliques à base de fer tels FeTi, Fe₃Al, FeCr, Fe₂Mo ou formés à partir de deux éléments d'alliage tels Ni₃Al ou Ni₃Ti [13].

2.4.1.4. Influence des éléments d'alliage sur les transformations hors équilibre

Les conditions dans lesquelles la structure d'un acier se transforme au cours du retour à la température ambiante après un chauffage à haute température (passage à l'état austénitique avec mise en solution du carbone dans le fer γ) dépendent de la composition chimique de celui-ci. Ainsi, avec une pièce assez massive en acier hypoeutectoïde refroidie dans un milieu donné, on pourra parvenir, après retour à l'ambiante, à différentes situations [13]:

- Le métal est **totalemment martensitique** : il est donc susceptible, après un judicieux revenu, de présenter ses performances les plus élevées ; il est dit à **haute trempabilité** (d'autant plus faible que la pièce est plus massive et le refroidissement moins énergétique) ;
- Le métal est **totalemment ferrito-perlitique**.il est dit à **faible trempabilité** (d'autant plus faible que la pièce est de faible massivité et le refroidissement plus énergétique) ;
- Le métal est **martensitique (ou martensito-bainitique)** au voisinage de la peau et **ferrito-perlitique** à cœur: ses propriétés mécaniques sont alors très variables dans sa section ; il est dit à **trempabilité moyenne**.

La trempabilité d'un acier se définit donc en fonction des dimensions de la pièce et des conditions de refroidissement mais, elle dépend essentiellement de la composition chimique du métal ou plutôt de celle de l'austénite avant refroidissement.

Pratiquement, tous les éléments d'alliage introduits dans l'acier augmentent sa trempabilité à l'exception du cobalt qui la diminue. Mais leur action est modulée par leur éventuel caractère carburigène. En effet les éléments susceptibles de participer à la précipitation de carbures autres que M_3C modifient sensiblement les conditions de formation de la perlite alors qu'ils n'interviennent pas sur celles des bainites puisque celles-ci restent constituées de cémentite et de ferrite.

Les **éléments non carburigènes** retardent aussi bien la formation des structures ferrito-perlitiques que bainitiques ; leur efficacité peut être considérée comme : Forte pour Mn, moyenne pour Ni, faible pour Cu et Si.

Les **éléments carburigènes** ne regardent pas également la formation des structures ferrito-perlitiques et bainitiques :

Pour retarder la formation des structures ferrito-perlitiques, leur efficacité peut être considérée comme forte pour V (à faibles teneurs), Mo et Nb, et moyenne pour Cr et W. Pour retarder la formation des structures bainitiques, leur efficacité peut être considérée comme forte pour Cr, moyenne pour Mo, et faible pour Nb, V et W.

Par ailleurs, au cours du revenu des structures martensitiques et bainitiques, la présence d'éléments carburigènes induit une évolution particulière du durcissement : le durcissement dit « **secondaire** » (qui parfois ne se traduit que par un retard à l'adoucissement). À des températures supérieures à 500 °C, en effet, la cémentite, préalablement précipitée, disparaît

et les carbures des éléments carburigènes apparaissent plus fins et plus dispersés que Fe₃C et, de ce fait, plus durcissants [13].

Il faut noter qu'un élément non carburière, le silicium, agit sensiblement sur les processus du revenu de la martensite ; il retarde l'adoucissement en perturbant la formation de la cémentite (précipitation plus fine reportée à plus hautes températures).

2.4.1.5. Variation des propriétés physiques des métaux liquides et solides sous l'influence des éléments d'addition

S'ils sont présents en fortes proportions, les éléments d'alliage peuvent modifier les propriétés physiques des aciers. D'une manière générale on peut admettre les ordres de grandeur présentés dans le Tableau 2-3.

Tableau 2-3 : Ordres de grandeur de diverses caractéristiques physiques selon les types de nuances [14]

Type d'acier	ρ (kg/dm ³)	E (N/mm ²)	ν	$\bar{\alpha}_l$ (K ⁻¹)	c_p [J/(kg · K)]	λ [W/(m · K)]	ρ ($\mu\Omega \cdot m$)
Non allié.....	7,85	210 000	0,30	12×10^{-6}	482	49	0,19
Faiblement allié.....	7,85	210 000	0,30	12×10^{-6}	482	43	0,25
Allié (< 5 %).....	7,85	210 000	0,30	12×10^{-6}	482	43	0,25
Chrome \geq 10 %.....	7,70	207 000	0,14	10×10^{-6}	460	23	0,56
Austénitique.....	7,92	190 000	0,28	17×10^{-6}	482	15	0,72

ρ masse volumique à 20 °C	c_p capacité thermique massique moyenne de 0 à 100 °C
E module d'élasticité longitudinal	λ conductivité thermique à 20 °C
ν nombre de Poisson	ρ résistivité à 20 °C
$\bar{\alpha}_l$ coefficient de dilatation linéique moyen	

2.4.1.6. Influence des éléments d'alliage sur les propriétés chimiques des aciers

Nous n'évoquons ici, en matière de propriétés chimiques, que la résistance des aciers à l'agressivité chimique de leur environnement (corrosion). Dans ces conditions, il ne reste pratiquement à citer que le chrome qui est l'élément d'addition essentiel qui permet de conférer aux aciers un caractère d'inoxidabilité, c'est-à-dire une aptitude à s'auto protéger par formation d'une couche protectrice qui, après sa formation, arrête ou ralentit très fortement la progression de la corrosion. En corrosion aqueuse, cette couche dite *passive* a une composition très complexe qui dépend de celle de l'acier et de celle du milieu agressif ; elle contient généralement des ions hydroxydes, des cations des métaux oxydables contenus dans l'acier et des anions issus du milieu corrosif. En corrosion sèche à chaud, cette couche est essentiellement formée d'oxyde de chrome Cr₂O₃.

D'autres éléments peuvent, à des degrés moindres, augmenter la résistance des aciers aux agressions chimiques ; ce sont [13]:

- Le molybdène, le cuivre et le nickel en corrosion aqueuse ;
- Le silicium, l'aluminium et le nickel en milieux oxydants à chaud.