

Chapitre 1 : Introduction générale

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 minéral.

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;

- **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.

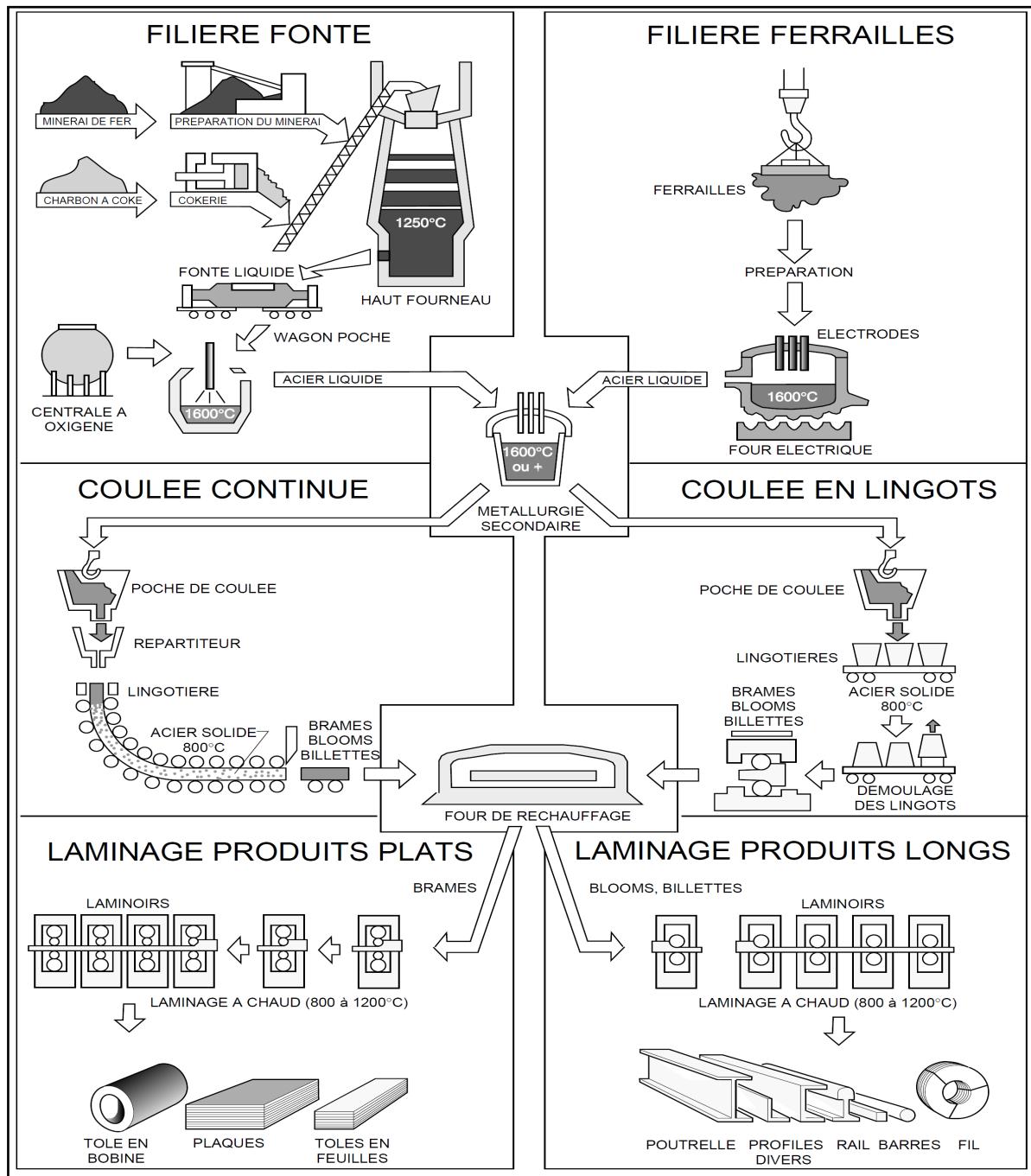


Figure 1-1 : Élaboration et fabrication de demi-produits en acier : Filières-Étapes-Opérations [1]

1.1 Histoire de la métallurgie secondaire

Avant 1950, après la fabrication de l'acier dans des fours tels que des fours Martin, des convertisseurs et des fours électriques, son traitement en poche était limité et consistait en une désoxydation, une carburation par ajout de coke ou de ferro-coke selon les besoins, et quelques petits alliages. Cependant, des exigences plus strictes sur la qualité de l'acier et la cohérence de ses propriétés nécessitent des contrôles qui dépassent les capacités des fours de fabrication d'acier. Cela est particulièrement vrai pour la production des aciers de qualité supérieure par des techniques sophistiquées. Cette exigence a conduit au développement de divers types de traitements de l'acier liquide en poche, en plus de la désoxydation. Ceux-ci ont connu un grand développement et, par conséquent, sont devenus connus sous plusieurs noms : métallurgie secondaire de l'acier, métallurgie en poche, traitement secondaire de l'acier liquide ou raffinage secondaire de l'acier liquide [3].

La métallurgie secondaire est devenue partie intégrante des aciéries modernes. L'apparition du procédé de coulée continue, qui nécessite un contrôle qualité plus strict, est une raison supplémentaire du développement de la métallurgie secondaire. La sidérurgie dans des fours classiques, également renommée maintenant métallurgie primaire, est donc de plus en plus utilisée uniquement pour la fusion rapide de la ferraille et le raffinage brut, laissant le raffinage et le contrôle supplémentaires à la métallurgie secondaire. Il existe des procédés, tels que l'affinage à l'arc sous vide (VAR vacuum arc refining) et la refusion sous laitier électrique (ESR electro-slag remelting), qui effectuent également un raffinage secondaire. Cependant, ils commencent avec de l'acier solidifié et le refondent. Ainsi, par convention, ceux-ci ne sont pas inclus dans la métallurgie secondaire [3].

Les impuretés nocives dans l'acier sont le soufre, le phosphore, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. Ils occupent des sites interstitiels dans un réseau de fer. Les principaux effets de ces impuretés dans l'acier sont la perte de ductilité, la résistance aux chocs et la résistance à la corrosion. Lorsqu'il s'agit d'un examen détaillé, chaque élément a sa propre influence caractéristique sur les propriétés de l'acier. L'oxygène et le soufre sont également des constituants des particules non métalliques de l'acier, appelées inclusions. Ces particules sont également nocives pour les propriétés de l'acier et doivent être éliminées autant que possible. Le carbone est également présent comme élément interstitiel dans le réseau de fer. Cependant, contrairement aux autres éléments interstitiels, il n'est généralement pas considéré comme une impureté nocive et doit être présent dans l'acier selon la spécification. Mais, aujourd'hui, il existe des nuances d'acier dans lesquelles le carbone doit également être le plus bas possible.

Historiquement, le procédé Perrin, inventé en 1933, est le précurseur de la métallurgie secondaire moderne. Le traitement de l'acier fondu avec du laitier synthétique était l'approche. Les processus de dégazage sous vide (VD vacuum degassing) sont apparus dans la décennie 1950-1960. L'objectif initial était d'abaisser la teneur en hydrogène de l'acier liquide pour éviter les fissures dans les grands lingots destinés au forgeage. Plus tard, son objectif a également inclus l'abaissement des teneurs en azote et en oxygène. L'épuration au gaz inerte (Ar) en poche est venue plus tard. Son objectif principal était l'agitation, avec l'homogénéisation de la température et de la composition de la masse fondue. Il offrait l'avantage supplémentaire de sortir plus rapidement des particules non métalliques. Il a également été constaté qu'il est possible d'abaisser le carbone à une très faible valeur dans l'acier inoxydable par traitement de la masse fondue avec de l'oxygène sous vide ou avec un flux d'argon. Cela a conduit au développement de la décarburation sous vide-oxygène (VOD vacuum-oxygen decarburization) et de la décarburation argon-oxygène (AOD argon-oxygen decarburization) [3].

Les procédés de traitement des laitiers synthétiques et d'injection de poudre d'acier en fusion dans une poche ont été lancés à la fin des années 1960 et au début des années 1970 dans le but d'abaisser la teneur en soufre de l'acier au niveau très bas pour répondre aux besoins de nombreuses applications.

Le développement de la métallurgie secondaire est intimement lié à celui de la coulée continue de l'acier. Jusqu'à la décennie des années 1960, la coulée en lingots était dominante. Aujourd'hui, la majeure partie de l'acier mondial est coulée via la voie de coulée continue. Les niveaux de tolérance des impuretés interstitielles et des inclusions sont plus faibles en coulée continue qu'en coulée en lingots, ce qui a rendu le raffinage secondaire plus important. Pour un acier fini de bonne qualité, une macrostructure appropriée de la pièce moulée est également importante, en plus du niveau d'impureté. Cela nécessite un contrôle étroit de la température de l'acier en fusion avant passer à la coulée continue [3].

Dans la pratique traditionnelle, sans opérations métallurgiques en poche, la chute de température de l'acier en fusion du four à la lingotière est d'environ 20 à 40 °C. Une chute de température supplémentaire d'environ 30 à 50 °C se produit pendant la métallurgie secondaire. La coulée continue utilise la coulée à travers un répartiteur, provoquant une baisse supplémentaire de 10 à 15 °C. Par conséquent, des dispositions relatives du chauffage et de l'ajustement de la température pendant la métallurgie secondaire sont très souhaitables. Cela a

conduit au développement de fours spéciaux tels que le dégazeur à arc sous vide (VAD vacuum arc degasser), le four poche (LF ladle furnace) et le four poche ASEA-SKF. Ce sont des unités très polyvalentes, capables d'effectuer diverses opérations. Il y a eu récemment d'autres développements dans ce sens. Des efforts sont déployés pour n'installer qu'une seule unité et même alors réaliser un programme de fabrication flexible [3].

Le tableau 1.1 résume les caractéristiques des divers processus [4]. Il montre les capacités de chacun. Cependant, il faut garder à l'esprit que certaines unités polyvalentes d'aujourd'hui sont en réalité des combinaisons de plusieurs processus. Par exemple, certains dégazeurs à vide modernes ont la capacité de soufflage d'oxygène et d'injection de poudre. Par conséquent, une bonne désulfuration et décarburation peuvent également être obtenues en eux. Il est à noter ici qu'une fraction importante du soufre dans les hauts fourneaux est éliminée par prétraitement en poche lors du transfert vers l'atelier de sidérurgie. De même, le phosphore est éliminé principalement dans un convertisseur à l'oxygène pur (procédé LD ou procédé Linz-Donowitz).

Tableau 1-1: Divers procédés de métallurgie secondaire et leurs capacités [3]

Item	Processes						
	VD	VOD	IGP	IM	VAD	LF	ASEA-SKF
Desulfurization	minor	minor	minor	yes	yes	yes	yes
Deoxidation	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Decarburization	minor	yes	no	no	no	no	yes
Heating	no/ yes	yes	no	no	yes	yes	yes
Alloying	minor	yes	minor	minor	yes	yes	yes
Degassing	yes	yes	no	no	yes		yes
Homogenization	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Achieving more cleanliness (i.e., less inclusions)	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Inclusion modification	no	no	minor	yes	yes	yes	yes

1.2 Tendances des exigences de qualité de l'acier

Au fil du temps, les clients exigent des aciers de meilleure qualité, ce qui signifie :

- 1) Moins d'impuretés
- 2) Plus de propreté (c'est-à-dire moins d'inclusions)
- 3) Contrôle de qualité plus strict, c'est-à-dire moins de variations d'un moulage à l'autre
- 4) Microalliage pour conférer de meilleures propriétés (pour les aciers simples au carbone et faiblement alliés)
- 5) Meilleure qualité de surface et homogénéité

Chapitre 1 : Introduction générale

Les exigences ci-dessus, combinées à d'autres exigences telles que (a) la nécessité de réduire les coûts face à la concurrence des polymères, etc., (b) le contrôle de la pollution de l'environnement et (c) un marché mondial de l'acier relativement stagnant, posent un énorme défi à la communauté sidérurgique. Actuellement, avant tout traitement de la métallurgie secondaire, les niveaux d'impuretés les plus bas pouvant être atteints seraient approximativement les suivants [3]:

Sulfure: 100 ppm ; Phosphore: 20 ppm, Azote : 40 ppm, Hydrogène: 5 ppm, Carbone: 400 ppm, Oxygène: variable.

Après une désoxydation traditionnelle en poche, l'oxygène peut être ramené à moins de 30 ppm. Ainsi, le total minimal de $S + O + P + N$ serait d'environ 200 ppm, et incluant le carbone d'environ 600 ppm.

Les exigences de qualité peuvent être illustrées par l'exemple de l'acier de canalisation pour le gaz de la mer du Nord.

Tableau 1-2 : exigences de qualité de l'acier de canalisation (gaz) de la mer du Nord [3]

Année	ppm maximum dans l'acier					
	C	S	P	H	N	O
1983	400-600	20	150	-	100	-
1990		10	15	-	35	20
long terme	$S + O + P + N = 45 \text{ ppm}$					

La Figure 1-2 montre les tendances des éléments résiduels obtenues par les aciéries japonaises. Une mention particulière peut être faite d'une poussée récente de la demande d'acier à très faible teneur en carbone ($C < 30 \text{ ppm}$ environ) pour la fabrication de tôles minces par laminage à froid avec recuit continu pour l'industrie automobiles. Ces aciers ont non seulement un très faible teneur en carbone, mais ont également un très faible teneur en éléments résiduels, par exemple, $N < 15 \text{ ppm}$, $S < 10 \text{ ppm}$, $P < 15 \text{ ppm}$, $H < 2 \text{ ppm}$. De plus, les teneurs en inclusions sont également considérablement inférieures à celles des aciers ordinaires.

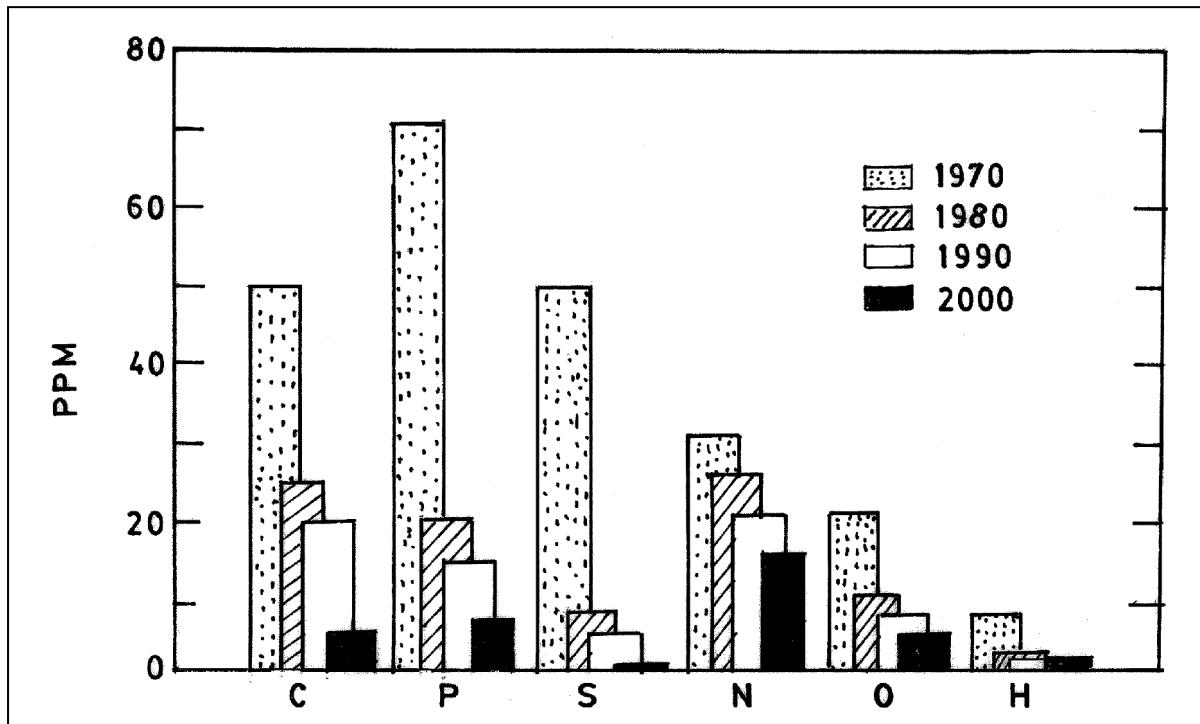


Figure 1-2 : Taux minimal des éléments résiduels dans l'acier au Japon [3]

Comme le montre le tableau 1-1, toutes sortes d'opérations de la métallurgie secondaire sont capables de produire des aciers plus propres. Les inclusions sont généralement néfastes pour les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion des aciers. Le choix d'effectuer une désoxydation associée à une bonne agitation est l'une des solutions pour éliminer les inclusions.

La conscience de la propreté inclusionnaire a augmenté à un point tel que des essais sont en cours pour filtrer l'acier fondu à travers des filtres en céramique pour éliminer les inclusions non métalliques. La technique est encore au stade expérimental. La modification des inclusions est l'une des techniques permettant de rendre les inclusions moins nocives pour les propriétés de l'acier. L'injection de calcium dans la masse fondu est effectuée à cet effet. Parfois, des terres rares sont également employées. Une autre façon de réduire les effets néfastes des grosses inclusions est en modifiant la composition chimique des inclusions, par les processus de la métallurgie secondaire dans un four poche par exemple, 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 fragmentés 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 » [5].

1.3 Fondamentaux scientifiques

L'application des fondements scientifiques est un facteur important qui contribue au progrès de la technologie de la métallurgie secondaire. Cela a été possible grâce à la croissance des sciences appliquées, y compris les sciences métallurgiques, et leur application.

Les lois de la thermodynamique étaient bien établies au tournant du XIXe siècle. Cependant, leur application aux systèmes à haute température a dû attendre en raison d'un manque de données thermochimiques. La collecte de ces données avait commencé à une échelle modeste au début de ce siècle. Le rythme s'est accéléré au fil des années, et il a commencé à une échelle vraiment massive après les années 1940. Vers 1970, des données assez fiables étaient disponibles sur la plupart des systèmes et réactions d'intérêt pour la pyrométaux.

Les calculs de processus d'équilibre nécessitent des données expérimentales sur les relations activité/composition dans les liquides qui peuvent être largement regroupées en solutions métalliques, solutions de scories à base de SiO₂, etc. La plupart de ces solutions sont à plusieurs composants. Le développement de la thermodynamique métallurgique a appelé à de nouvelles techniques pour les gérer. La participation de physico-chimistes renommés autres que les métallurgistes a rendues ça possibles.

La cinétique est venue plus tard par rapport à la thermodynamique des réactions pyrométallurgiques. Les recherches scientifiques ont commencé après 1950. Cependant, elles ont rapidement repris et, au cours des trois dernières décennies, le domaine a été poursuivi avec vigueur. En conséquence, la cinétique des réactions et des processus pyrométallurgiques est un sujet de science de l'ingénieur à part entière. Les connaissances déjà disponibles en génie chimique ont contribué à son développement.

Il a été reconnu, plusieurs décennies en arrière, que le manque de mélange approprié dans le bain liquide affecte négativement l'efficacité des processus de fabrication de l'acier. De nombreuses recherches ont été menées sur le mélange, notamment au cours des deux dernières décennies. Encore une fois, le mélange, le transfert de masse et les dispersions de phases dépendent du débit de fluide dans le bain. Un tel écoulement est turbulent dans les

procédés de fabrication de l'acier. La turbulence est un phénomène très complexe. Les scientifiques et les ingénieurs de diverses disciplines s'intéressent à la solution de problèmes impliquant un écoulement turbulent.

Les études expérimentales sur l'écoulement et le mélange des fluides aux températures de fabrication de l'acier sont difficiles. À cet égard, la modélisation de l'eau (c'est-à-dire la modélisation à froid ou la modélisation physique) a contribué de manière significative à notre compréhension de ces aspects. Ici, l'eau simule généralement le métal liquide. Des récipients en plexiglas ou en verre transparents permettent la visualisation du flux.

Une approche quantitative dans le domaine de l'écoulement des fluides, du mélange et du transfert de masse est basée sur la mécanique des fluides, en particulier en ce qui concerne l'écoulement turbulent. De tels calculs font appel à des méthodes numériques. Des progrès considérables ont été réalisés dans cette direction, à tel point qu'ils sont utilisés pour l'interprétation des résultats, la conception et la prévision des processus.

1.4 Contrôle de processus

Une variété de mesures de contrôle des procédés doivent être adoptées si on veut obtenir des avantages souhaitables de la métallurgie secondaire. Il n'est ni possible ni nécessaire de les énumérer tous. Seuls quelques-uns seront brièvement mentionnés ci-dessous en raison de leur importance particulière.

1.4.1 Capteur d'oxygène à immersion

L'oxygène dissous dans l'acier fondu est un paramètre scientifique et qualitatif clé dans la métallurgie secondaire. Sa mesure a été possible grâce au développement du capteur d'oxygène à immersion au cours environ des deux dernières décennies. Il s'agit en fait d'une cellule de concentration en oxygène avec un électrolyte solide (typiquement $ZrO_2 + MgO$ ou $ZrO_2 + CaO$).

La force électromotrice de la cellule permet d'estimer la teneur en oxygène dissous par des relations thermodynamiques. Étant donné que le signal est électrique et obtenu dans les 15 secondes suivant l'immersion, il est largement utilisé pour mesurer et contrôler l'oxygène dans l'acier en fusion. Grâce aux relations thermodynamiques, il nous permet également de connaître la teneur en aluminium soluble de l'acier, ce qui est encore une autre information précieuse que les sidérurgistes souhaitent [3].

Un capteur d'oxygène à immersion a également été largement utilisé dans une variété d'études scientifiques et technologiques liées aux réactions de désoxydation et au comportement de l'oxygène à différentes étapes de la fabrication de l'acier. La contribution pionnière de Kiukkola et Wagner (1956), qui ont les premiers mis en place une telle cellule pour des mesures thermodynamiques en laboratoire, est d'être reconnue. Iwase et McLean ont examiné les capteurs pour la fabrication de l'acier. On peut noter que des capteurs électrochimiques à immersion pour d'autres éléments, tels que le silicium et le phosphore, sont en cours de développement mais, ils sont essentiellement basés sur des capteurs d'oxygène.

1.4.2 Quelques autres mesures de contrôle des processus

Des gaz tels que l'oxygène et l'azote sont capturé de l'air environnant lors de l'agitation et de la coulée. Cela peut augmenter considérablement la teneur en gaz de l'acier liquide. À moins que cela ne soit empêché, la plupart des opérations de la métallurgie secondaire ne fourniront aucun avantage. Pour la coulée continue, l'utilisation d'une busette immergée est la solution. Pour la coulée en lingots, c'est difficile à pratiquer ; dans ce cas, la gestion du flux de coulée est la stratégie [3].

Pour des procédés efficaces de désoxydation, de traitement des scories synthétiques et d'injection, il est essentiel d'éviter beaucoup la scorie provenant des fours de la métallurgie primaire (Exemple : acheminement des scories de haut fourneau à la poche de coulée). Ainsi, grâce à des efforts considérables, des progrès significatifs ont été réalisés dans les techniques de l'exploitation avec une très faible quantité de laitier. Il est ensuite modifié par des ajouts appropriés pour un traitement ultérieur.

La méthode traditionnelle d'addition d'aluminium à l'acier liquide sous forme de lingots ou de grenailles rend l'efficacité de la désoxydation de l'aluminium médiocre et non reproductible, ce qui entraîne de sérieux problèmes de contrôle. La technologie d'alimentation mécanisée du fil d'aluminium est une amélioration significative à ce sujet. Aujourd'hui, de nombreuses usines disposent d'installations pour l'alimentation de fils constitués de poudres de Ca ou de CaSi également revêtues d'acier. Il s'agit d'une alternative à l'injection de ces poudres dans le bain par des techniques de métallurgie par injection.

Un bon contrôle des procédés n'est pas possible sans des techniques d'analyse chimique rapides et fiables. Il y a eu des avancées considérables dans ce sens. L'accent est également mis sur l'analyse *in situ* sans qu'il soit nécessaire de transférer les échantillons vers

Chapitre 1 : Introduction générale

une unité d'analyse distincte. Ces avancées sont utilisées non seulement dans la métallurgie secondaire, mais aussi dans d'autres domaines

L'agitation est une partie intégrante de la métallurgie secondaire. Elle se fait principalement par l'injection de gaz. Cependant, l'agitation électromagnétique est une alternative. L'agitation électromagnétique pendant la fusion de l'acier au four à induction est connue depuis le début du 20^{ème} siècle. Une application importante de l'agitation électromagnétique à partir des années 1970 était dans la coulée continue. Les dispositifs de l'agitation électromagnétique sont également de plus en plus utilisés ces dernières années dans le domaine de la métallurgie secondaire, non seulement pour l'agitation, mais aussi pour le contrôle du débit, le contrôle des scories, etc. Cela offre de nombreux avantages, notamment une flexibilité dans la forme et l'intensité du mouvement du fluide [3].

Références

- [1] Jean Philibert, Alain Vignes, Yves Bréchet, Pierre Combrade, Métallurgie: Du minerai au matériau. 2013: Dunod.
- [2] Jeanne Mager Stellman, Encyclopédie de sécurité et de santé au travail. 2000: Bureau international du travail.
- [3] Ahindra Ghosh, Secondary Steelmaking: Principles and Applications. 2000: CRC Press.
- [4] Srinivasan. C.R, Tata Steel and Ind. in National Seminar on Secondary Steelmaking. 1989. Jamshedpur: Inst. Metals.
- [5] Yogeshwar Sahai, Toshihiko Emi, Tundish Technology for Clean Steel Production. 2008: World Scientific.