

Comment fabrique-t-on l'Acier ?



Fédération Française de l'Acier

Fer ? Fonte ? Acier ? Ferraille ?

Le Fer est un élément chimique, un corps pur. Il est assez difficile d'obtenir du fer très pur, mais ce n'est pas gênant car les propriétés d'emploi du fer deviennent bien plus intéressantes et variées lorsqu'on lui ajoute des éléments d'alliage judicieusement choisis et dosés. Le fer a une propriété rare parmi les corps purs : il est ferromagnétique, ce qui signifie qu'il est attiré par un aimant, propriété extrêmement utile pour isoler le fer au milieu d'un monceau de déchets. Parmi les autres métaux courants, seuls le nickel et le cobalt sont ferromagnétiques.

La Fonte est un alliage fer-carbone contenant plus de 2 % de carbone, et d'autres éléments. Elle peut être utilisée directement, le plus souvent par moulage. Mais la plupart de la fonte liquide produite est utilisée pour l'élaboration de l'acier. Pourquoi passer par l'étape fonte ? Dans la croûte terrestre, le fer se trouve sous forme d'oxydes. Pour les débarrasser de leur oxygène, il faut utiliser un élément «réducteur» capable d'arracher les atomes d'oxygène. Le plus économique est généralement d'utiliser du carbone sous forme de charbon, mais il est possible d'utiliser d'autres réducteurs tels que des gaz excédentaires de l'extraction du pétrole par exemple, en attendant une future production d'hydrogène à bon marché, ou d'autres procédés plus révolutionnaires. En utilisant du carbone, la réaction chimique conduit à un alliage liquide saturé en carbone, autour de 4,5 %, ce qui est beaucoup trop élevé pour la majorité des applications.

L' Acier est un alliage fer-carbone contenant moins de 2 % de carbone, et d'autres éléments. Le fer contenu dans l'acier provient soit de minerai, soit du recyclage. L'acier produit en France, comme dans les autres pays développés, contient en moyenne un peu plus de la moitié de fer recyclé. Dans les pays émergents tels que le Brésil ou la Chine, l'acier est produit majoritairement à partir de minerai puisqu'il n'y a pas encore suffisamment de recyclage. Pour transformer la fonte en acier, il suffit de la débarrasser de son carbone excédentaire en le brûlant avec de l'oxygène. La composition chimique de l'acier liquide obtenu à partir de la fonte ou par fusion de fer recyclé doit ensuite être ajustée en fonction des propriétés de mise en œuvre et d'utilisation souhaitées. L'acier liquide est ensuite solidifié, généralement sous une forme assez massive, puis mis en forme habituellement par laminage à chaud et éventuellement par laminage à froid pour les tôles les plus minces. Les tôles minces

peuvent être revêtues d'une couche très fine d'un autre métal, par exemple d'étain pour le fer-blanc ou de zinc pour les tôles galvanisées, voire enduites d'un revêtement organique (vernis, peinture...) avant d'être livrées.

Le mot **Ferraille** n'a aucune connotation péjorative en sidérurgie. C'est une matière première constituée des déchets de la fabrication de l'acier ou de sa mise en œuvre chez les clients, de la déconstruction de bâtiments, ouvrages d'art et installations ainsi que de la récupération de l'acier dans les biens en fin de vie tels qu'automobiles, boîtes de conserve, électroménager... C'est ainsi que si beaucoup de matériaux sont recyclables, l'acier est lui recyclé ! L'atome de fer est identique dans un minerai et dans une ferraille. Seule la composition chimique de certaines ferrailles peut limiter économiquement leur utilisation pour des applications particulières. Des aciers aussi différents que les ronds à béton, les poutrelles, les aciers pour échangeurs thermiques de centrales électriques, les ressorts, les aciers inoxydables et bien d'autres peuvent être produits à partir de 100 % de ferrailles.



D'où vient le fer ?

Dans le nuage de gaz qui est à l'origine de notre système solaire, les réactions nucléaires ont donné naissance entre autres à de nombreux métaux dont le fer et le nickel, mais aussi le magnésium, le silicium et l'aluminium pour ne citer que les plus répandus. Lors de la formation des planètes, les éléments les plus lourds, dont le fer, sont restés à proximité du soleil alors que les éléments plus légers ont pu s'en éloigner. C'est ainsi que les quatre planètes les plus proches du soleil Mercure, Vénus, la Terre et Mars sont constituées d'une importante proportion de fer. Notre Terre elle-même possède un noyau de fer et de nickel, et ses couches superficielles contiennent des quantités notables de fer. Au contraire des éléments fossiles comme le charbon ou le pétrole, il n'y a donc aucun risque de pénurie de fer sur Terre, d'autant que contrairement aux combustibles, le fer est recyclé.



Le fer et le nickel sont les constituants de certaines météorites qui ont été les premières sources de fer utilisées par l'humanité. La tombe de Toutankhamon contenait un magnifique poignard dont la lame est en fer-nickel météoritique. Les civilisations précolombiennes d'Amérique par exemple et encore très récemment les Esquimaux du Groenland exploitaient des météorites pour fabriquer des armes de guerre ou de chasse alors qu'ils ne disposaient d'aucun savoir-faire sidérurgique.

Bien qu'impropre, le mot Fer est passé dans le langage courant pour désigner des objets en acier : chemin de fer, fer à repasser, fer à cheval, ou pour indiquer une notion de robustesse : santé de fer (mais moral d'acier !), robustesse parfois teintée de rigidité comme la poigne de fer de la Dame de fer.

Cette utilisation du fer météoritique est à l'origine d'une légende selon laquelle le mot «sidérurgie» aurait la même origine que l'adjectif «sidéral» parce que le premier fer utilisé venait des étoiles. En fait, «sidérurgie» vient d'un mot grec signifiant «atelier du forgeron» alors que «sidéral» vient d'un mot latin signifiant «astral». Dommage !

Il n'y a pas un acier, mais des aciers

Selon que l'acier est destiné à être utilisé dans le bâtiment, l'électronique, la construction automobile, l'emballage, l'énergie etc., il devra présenter des caractéristiques adaptées. On pense souvent aux propriétés physiques mais elles peuvent aussi être par exemple esthétiques pour le bâtiment ou l'électroménager...

Ces propriétés sont obtenues :

- au premier ordre par ajustement de la teneur en carbone : moins il y a de carbone, plus l'acier est déformable ; plus il y en a, plus l'acier est dur et résistant,
- par l'application d'une métallurgie subtile combinant maîtrise de la composition chimique à l'aciérie et des traitements thermomécaniques au laminage,
- par un éventuel revêtement métallique ou organique mince final.

L'amélioration permanente des propriétés d'usage de l'acier est au cœur de la R&D sidérurgique. C'est ainsi que 40 % des nuances d'acier utilisées aujourd'hui n'existaient pas il y a 5 ans.

Les aciers sont répartis en 3 classes en fonction de leur composition chimique :

- les aciers non alliés pour lesquels la teneur en quelque 25 éléments chimiques ne dépasse pas une valeur limite fixée par une norme européenne,
- les aciers inoxydables qui contiennent au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone,
- les autres aciers alliés qui ne sont pas des aciers inoxydables et pour lesquels au moins une des limites mentionnées pour les aciers non alliés est dépassée.



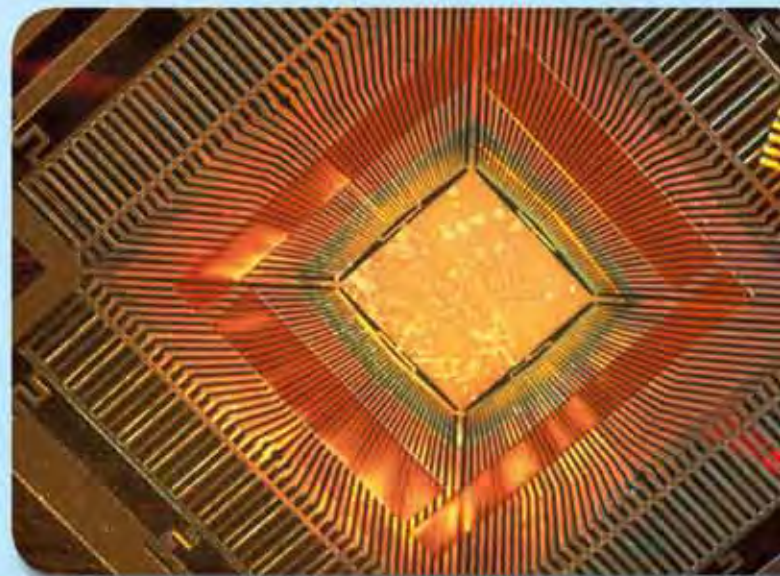
Fabrication de l'acier

La sidérurgie du début du 21^{ème} siècle est très différente de ce qu'elle était il y a encore 40 ans grâce à un effort constant de recherche et d'innovation. Seul point commun : les principes métallurgiques de base.

En revanche, d'importants sauts technologiques (par exemple, la coulée continue) ont radicalement transformé les procédés de fabrication ; le développement considérable de l'informatique a permis de généraliser les équipements d'automatisation et de contrôle.

Résultats :

- de meilleurs produits, de qualité mieux maîtrisée,
- de nouvelles qualifications, de nouveaux métiers dans les usines : l'effort physique disparaît, tandis que se multiplient les tâches d'opérateurs aux compétences techniques élevées, placés aux commandes d'ensembles automatisés complexes,
- une meilleure gestion des flux de produits et des stocks pour livrer les clients juste à temps,
- une empreinte environnementale en constante diminution.



Support de circuit intégré

Comment fabrique-t-on l'acier ?

1

■ des matières premières à l'acier liquide :

ajuster la composition chimique de l'acier

deux procédés :

filière «fonte» et filière «ferrailles»

.....

2

■ de l'acier liquide aux demi-produits :

solidification de l'acier et ébauches de formes

deux procédés :

coulée continue principalement,
mais aussi coulée en lingots

.....

3

■ des demi-produits aux produits finis :

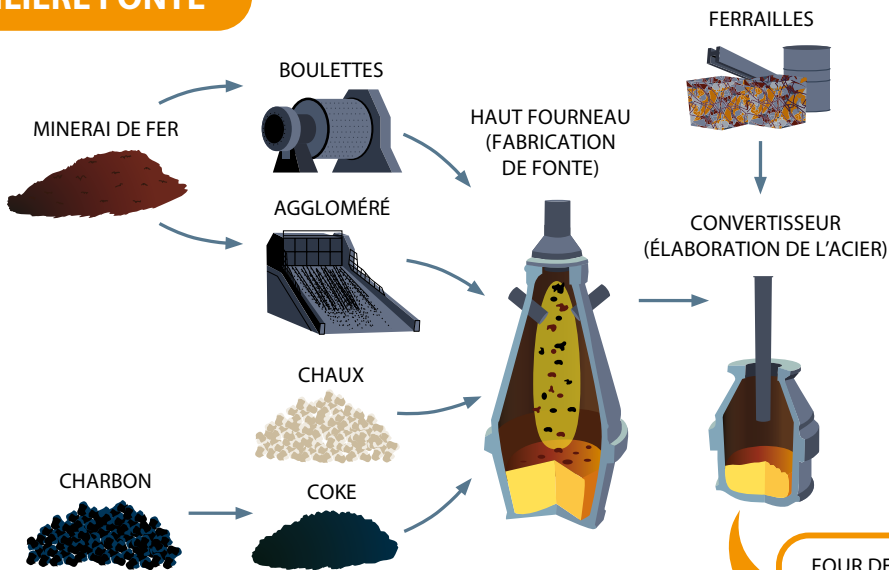
mise en forme et mise à dimensions par
laminage, finitions diverses avant la livraison

deux familles de produits :

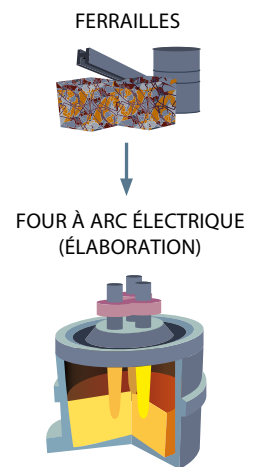
- les produits plats : tôles fortes, tôles minces laminées à chaud, tôles laminées à froid
- les produits longs : barres, fils machine, ronds à tubes, profilés moyens et lourds, rails.

Tous les aciers ne sont pas mis en forme par laminage. Ils peuvent également être moulés, forgés, compactés à partir de poudre...

FILIÈRE FONTE



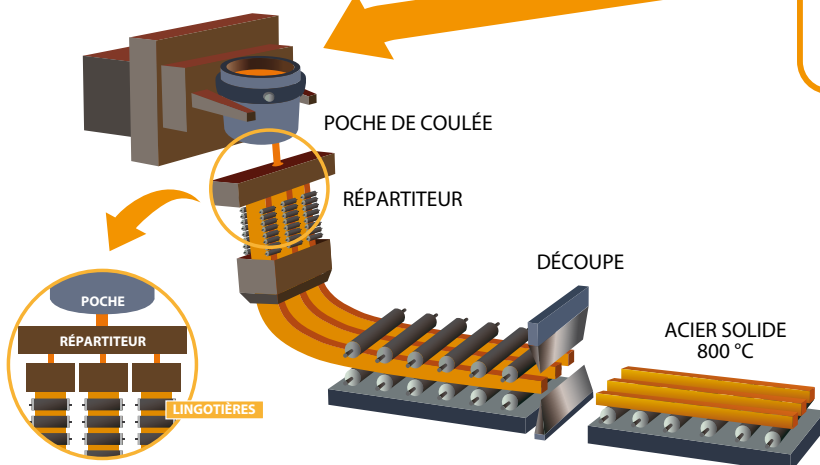
FILIÈRE FERRAILLES



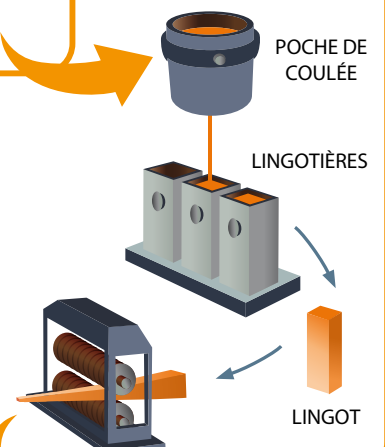
FOUR DE MÉTALLURGIE SECONDAIRE



COULÉE CONTINUE

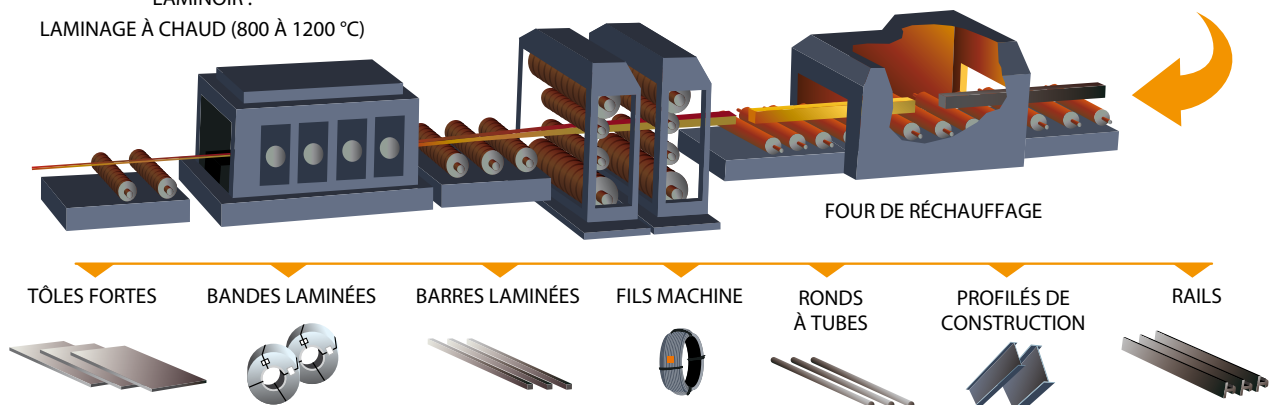


COULÉE EN LINGOTS



LAMINAGE

LAMINOIR :
LAMINAGE À CHAUD (800 À 1200 °C)





DES MATIÈRES PREMIÈRES À L'ACIER LIQUIDE

Cette première étape vise à combiner, selon des dosages précis, les composants chimiques de l'acier : fer et carbone (composants de base) et éventuels additifs qui vont différencier les qualités de l'acier en fonction de son utilisation future.

2 PROCÉDÉS

1. Filière fonte et aciérie à l'oxygène

Une succession d'opérations visant à :

Rendre le minerai assimilable par le haut-fourneau

Le **minerai brut** est homogénéisé avant d'être chargé sur la **chaîne d'agglomération** avec des additions (chaux, castine) et du combustible (poussier de coke, anthracite). Après combustion, il prend la consistance d'un mâchefer poreux : c'est le **minerai aggloméré**.

Extraire le fer de son minerai pour obtenir un mélange liquide à base de fer : la fonte

L'aggloméré comme le minerai d'origine, est un mélange d'oxydes de fer et de gangue.

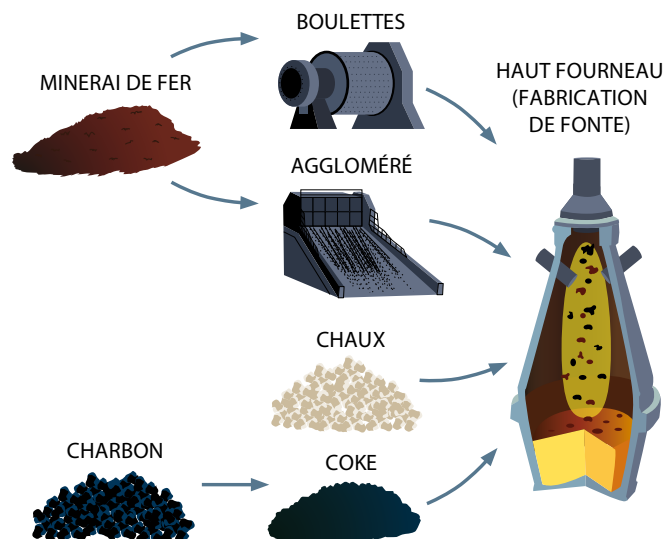
Il est versé dans le **haut-fourneau** en couches alternées avec du coke. De l'air chaud (jusqu'à 1250 °C) est injecté par des **tuyères** en partie basse, ce qui active la réduction des oxydes de fer par le carbone de coke. Dans la partie basse, appelée **creuset**, on obtient la **fonte liquide** qui contient :

- 94 à 96 % de fer,
- 3 à 5 % de carbone (reste de coke non brûlé)
- 1 à 2 % d'éléments non ferreux (soufre, silicium, phosphore, etc.) contenus dans les matières enfournées.

Une partie du coke peut être remplacée par du charbon pulvérisé injecté au niveau des tuyères du haut-fourneau.

La gangue liquide se sépare de la fonte, en raison de sa moindre densité, et constitue un co-produit valorisé : le laitier de haut-fourneau. La fonte liquide, récupérée en bas du haut-fourneau est acheminée vers l'aciérie au moyen de wagons-poches.

FILIÈRE FONTE



Éliminer les éléments indésirables de la fonte afin d'obtenir l'acier à l'état liquide

La conversion de la fonte en acier s'effectue dans une cornue géante, le **convertisseur**.

La fonte liquide est versée dans le convertisseur, sur une charge de chaux et de ferrailles.

On insuffle de l'oxygène, qui brûle presque totalement les éléments indésirables (carbone, silicium, phosphore, ...). Les oxydes ainsi formés sont fixés par la chaux et forment un laitier qui est évacué pour être valorisé.

Reste le fer presque pur.

Cette combustion provoque une élévation de la température du bain qui passe de 1250 °C (fonte liquide) à plus de 1600 °C (acier liquide).

Ajuster la composition chimique de l'acier pour lui donner sa pureté optimale

Outil de ces ultimes opérations : le four de métallurgie secondaire.

Les réactions chimiques ont lieu sous vide ou sous atmosphère contrôlée, pour tout ou partie des opérations :

- addition des éléments d'alliage;
- divers traitements visant à améliorer la pureté et la qualité du métal (dégazage, homogénéisation, etc.).

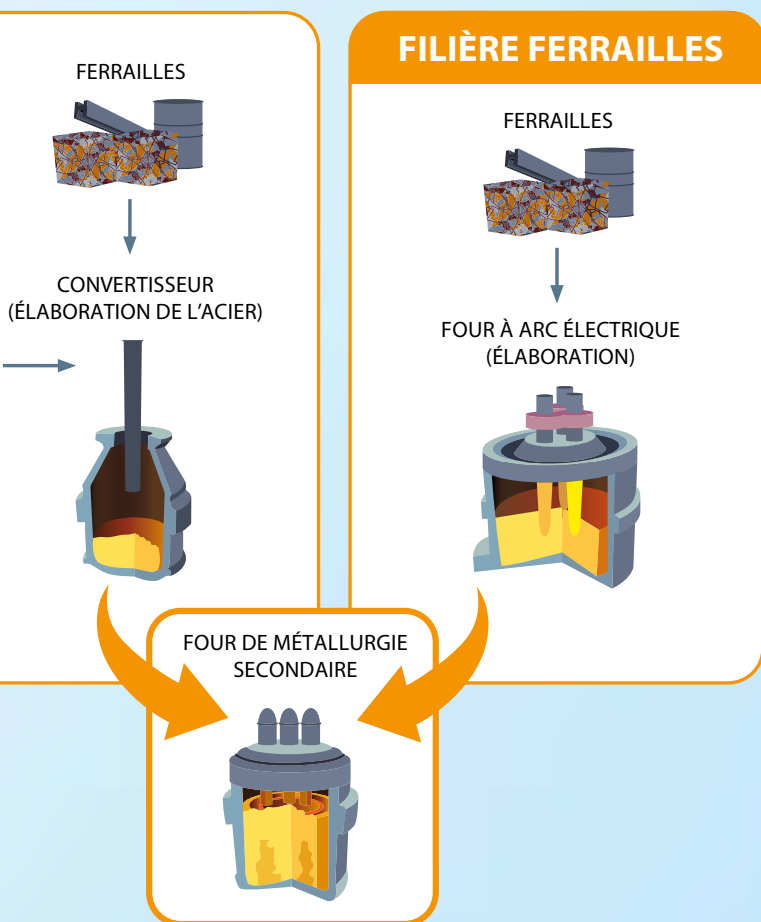
POUR EN SAVOIR PLUS

Minerai de fer

Matière première minérale constituée de combinaisons métalliques (essentiellement des oxydes de fer : fer + oxygène) et de roches stériles appelées gangue. Les minerais utilisés ont une teneur en fer comprise entre 55 et 65 % et une faible teneur en phosphore et en soufre.

Coke

Combustible obtenu par distillation (gazéification des composants indésirables) de la houille dans le four de la cokerie. Le coke est du carbone presque pur, sous une structure poreuse et résistante à l'écrasement. En brûlant dans le haut-fourneau, le coke apporte la chaleur requise pour la fusion du minerai et les gaz nécessaires à sa réduction.



2. Filière ferrailles et four électrique

Matière première : l'acier.

Produit fini : l'acier...

Un processus court qui consiste à :

Préparer les ferrailles : tri, calibrage, broyage...

D'où viennent ces ferrailles ?

- du recyclage sélectif de l'acier contenu dans les biens en fin de vie (véhicules, bâtiments...) et les déchets ménagers.
- des chutes d'acier ou de fonte récupérées chez les sidérurgistes ou les transformateurs.

Fondre la matière première.

Des ferrailles de choix et des additions de métaux divers sont fondues dans un four par des arcs électriques puissants qui jaillissent entre des électrodes (3 en général).

Ajuster la composition chimique de l'acier pour lui donner sa pureté optimale.

La «matière première» a déjà une composition très élaborée, mais il faut le plus souvent modifier celle-ci pour adapter l'acier à sa nouvelle destination.

Les opérations se déroulent selon les mêmes modalités que pour les aciers élaborés à l'oxygène.

Il est techniquement possible de charger un convertisseur à 100 % de ferrailles et un four électrique à 100 % de fonte liquide. En pratique, la charge du convertisseur contient habituellement 10 à 20 % de ferrailles et celle du four électrique 100 % de solide.

Il existe une troisième filière de production d'acier liquide qui consiste à réduire le minerai de fer au moyen d'un agent de réduction généralement dérivé du gaz naturel. Le produit ainsi obtenu, à haute teneur en fer et faible teneur en carbone, est ensuite utilisé en substitution partielle ou totale de la ferraille au four électrique.

Cette filière, quasi inexistante en Europe, s'est développée surtout dans les pays producteurs de pétrole qui disposent d'excédents de gaz naturel.



Four électrique

A l'origine, ce procédé était bien adapté aux petits tonnages et a d'abord servi à la production des aciers alliés et inoxydables. Les progrès technologiques ont ensuite permis d'élargir l'utilisation du procédé à la fabrication des aciers non alliés. En France, les fours électriques sidérurgiques ont un diamètre de 3,5 à 7,2 mètres pour une puissance de 17 à 110 Mégawatts et un poids de coulée compris entre 35 et 155 tonnes.



Salle de contrôle de haut-fourneau

Le haut-fourneau mérite bien son nom : sa hauteur utile est généralement de l'ordre de 25 mètres, mais les superstructures nécessaires à l'alimentation en matières et à l'évacuation des gaz peuvent dépasser 70 mètres de hauteur.



Convertisseur à oxygène

Grande cornue en acier revêtue intérieurement de réfractaires. Ses dimensions peuvent atteindre 8 m de diamètre et 10 m de hauteur et sa capacité plus de 300 tonnes. L'oxygène est insufflé pour brûler les impuretés soit par une lance émergée comme sur le schéma, soit plus rarement au travers du fond.

2

■ DE L'ACIER LIQUIDE AUX DEMI-PRODUITS

A la fin de l'opération d'élaboration de l'acier (acier «à l'oxygène» ou acier «électrique»), celui-ci est recueilli à l'état liquide dans une poche métallique garnie de réfractaires et transporté ainsi jusqu'au lieu de coulée.

2 PROCÉDÉS

- l'un en régression, mais qui reste irremplaçable pour certaines applications : la coulée en lingots,
- l'autre prédominant : la coulée continue.

1. La coulée en lingots

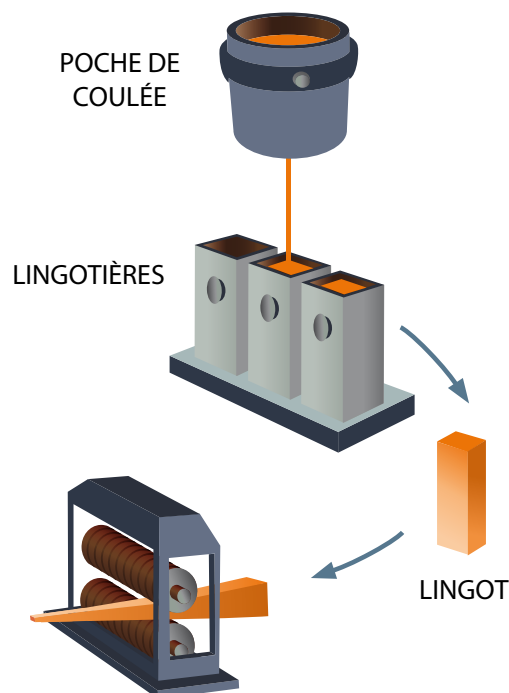
L'acier est coulé et solidifié dans des moules en fonte : les lingotières. Une fois la solidification terminée, les lingots sont démoulés.

Après un réchauffage à 1200 °C, ils sont écrasés dans un gros laminoir pour être transformés en

- brames, ébauches de produits plats (slabbing) ;
- blooms, futurs produits longs (blooming).

Ils peuvent aussi être directement livrés au client, forgeron par exemple.

COULÉE EN LINGOTS



Lingots

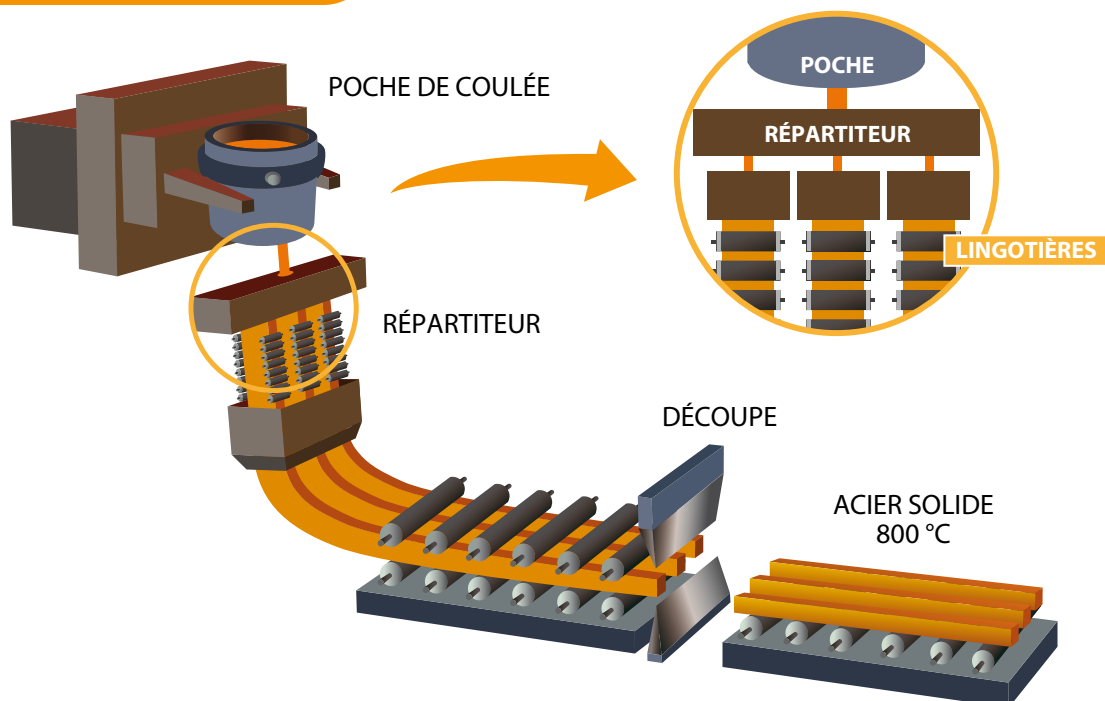
Masse : en général, entre 3 et 40 tonnes. Mais elle peut descendre, pour certaines pièces, jusqu'à 400 ou 500 kg, ou au contraire monter jusqu'à plusieurs centaines de tonnes (grosses pièces de forge).

Longueur : environ 2 mètres.



Contrôles non destructifs sur pièces de Générateur de Vapeur 900 MW fabriquées à partir de lingots - P1000886
Tubulure circuit primaire EPR™ (acier inoxydable)

COULÉE CONTINUE



2. La coulée continue

Ce procédé permet d'obtenir directement les demi-produits sans l'étape de laminage, blooming ou slabbing, qui suit la coulée en lingots.

La coulée continue a supplanté la coulée classique en lingots en raison des gains de matière et de productivité générés.

En 2011, 95 % de l'acier brut produit dans le monde a été coulé en continu.

Principe

L'acier liquide est coulé dans une lingotière en cuivre de section carrée, ronde ou rectangulaire selon le demi-produit fabriqué.

Le métal commence à former une peau solide dans la lingotière énergiquement refroidie à l'eau. Tiré vers le bas par un jeu de rouleaux, le produit achève de se solidifier.

A la base de l'installation, on extrait une barre solide, qui est découpée en tronçons à la longueur désirée.

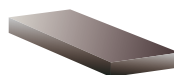
Les demi-produits sont réchauffés dans des fours avant de passer à l'étape suivante (laminage).



Une installation de coulée continue comporte en général plusieurs «lignes» de coulée parallèles, 1 ou 2 pour les brames et jusqu'à 8 pour des billettes

Il est tout à fait possible de donner une section quelconque à la lingotière et donc au demi-produit : angles arrondis, octogone et même ébauches de poutrelles aussi appelées «os de chien».

BRAME



BILLETTE



BLOOM



3

■ DES DEMI-PRODUITS AUX PRODUITS FINIS

Cette transformation consiste principalement à laminer les demi-produits, c'est-à-dire à étirer et écraser le métal pour lui donner les dimensions et formes souhaitées.

2 GRANDES FAMILLES DE PRODUITS FINIS

1. Les produits plats

- **Les plaques**, d'épaisseur généralement supérieure à 10 mm. Elles sont utilisées pour la fabrication de biens d'équipement, par exemple navires, plateformes de forage off shore, tubes pour oléoducs, mâts d'éoliennes. Leur largeur varie habituellement entre 2,5 et 5 mètres ; leur épaisseur courante se situe entre 15 et 25 mm
- **Les tôles à chaud**, en feuilles ou en bobines d'épaisseur comprise entre 1 et 25 mm. Elles servent surtout à la fabrication de biens d'équipement (chaudronnerie, énergie), mais aussi de biens de consommation comme les jantes de roues ou des parties de châssis d'automobiles, les bouteilles de gaz domestiques, les boules de pétanque...
- **Les produits plats laminés à froid** (épaisseur inférieure à 3 mm), éventuellement revêtus, disponibles sous la forme de feuilles ou de bobines. Ils ont de très nombreuses utilisations, particulièrement pour la fabrication de biens de consommation comme l'automobile, le bâtiment, l'électroménager, les emballages métalliques...

2. Les produits longs

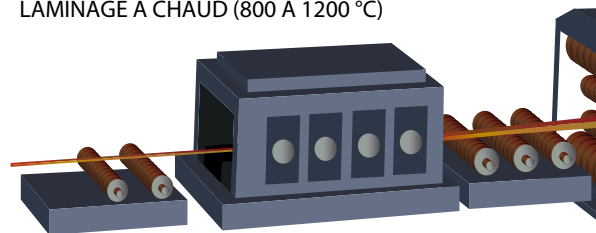
On rencontre une grande diversité de produits longs :

rails, poutrelles, palplanches, fils machine, ronds à béton, laminés marchands. Ces derniers comprennent une large variété de produits de petite section : barres de section ronde, carrée, hexagonale ; barres plates; profilés en «T», en «U», cornières, etc.

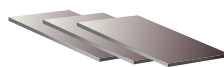
Les produits longs sont utilisés dans tous les secteurs industriels, mais particulièrement dans la construction métallique et dans l'industrie mécanique.

LAMINAGE

LAMINOIR :
LAMINAGE À CHAUD (800 À 1200 °C)



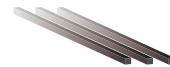
TÔLES FORTES



BANDES LAMINÉES



BARRES LAMINÉES



Plaques



Feuillards



Tôles laminées à froid

Le laminage

Le laminage s'effectue d'abord à chaud, entre 800 et 1200 °C. Certains produits plats subissent ensuite un amincissement complémentaire, effectué par laminage à froid.

• Laminage à chaud

Un principe simple : entraîner et écraser le métal chaud (lingot, demi-produit laminé ou issu de coulée continue) entre deux cylindres tournant en sens inverse l'un de l'autre. Cylindres lisses pour les produits plats, à cannelures pour les produits longs.

En répétant plusieurs fois l'opération on obtient un produit de plus en plus mince (ou de section de plus en plus faible) et de plus en plus long, à la forme souhaitée.

Exemple : à partir d'une brame de 10 m de long, 25 cm d'épaisseur et 2 m de large, on obtient une bobine de tôle de plus d'1 km de long et de 2 mm d'épaisseur.

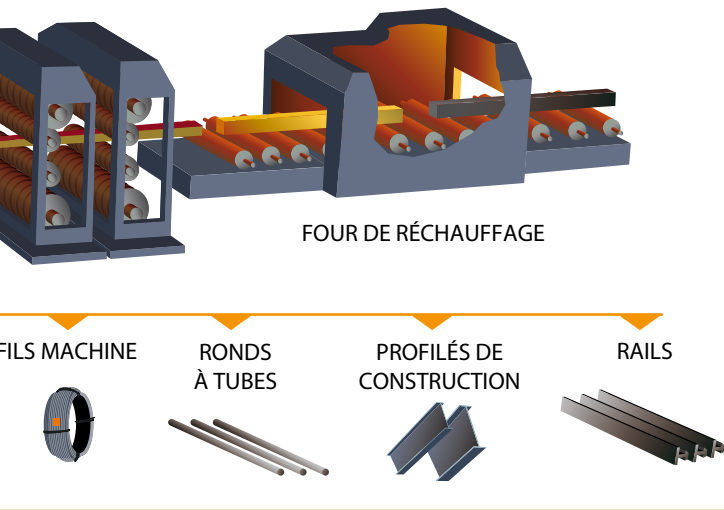
Après le laminage à chaud, les produits peuvent faire l'objet d'un parachèvement comme: traitement thermique (afin d'homogénéiser leurs caractéristiques mécaniques), planage, dressage, découpage, conditionnement, etc.

• Laminage à froid

Plus de la moitié des tôles laminées à chaud sont ensuite laminées à froid pour en réduire encore l'épaisseur.

Transformation finale

- Une opération de recuit pour donner au métal les propriétés d'emploi désirées (notamment l'emboutissabilité).
- Un éventuel revêtement pour protéger le métal contre l'oxydation : zinc (tôle galvanisée) ou étain (fer blanc). Ces tôles revêtues peuvent en outre être laquées ou plastifiées.



Laminage à chaud de bande (au sol, cylindres en attente d'utilisation)



Poutrelles et fil



Rail



Barres

Un train plus rapide que le TGV

Dans le jargon sidérurgique, le mot «train» est utilisé à la place du mot laminoir : train à chaud, train à fil... Les produits sortent d'un train à chaud continu à des vitesses pouvant dépasser 90 km/h pour la tôle et 360 km/h pour le fil.



Plantation d'eucalyptus pour la production écologique de charbon sidérurgique

Et demain ?

L'évolution des procédés sidérurgiques va toujours dans la même direction : s'adapter aux exigences économiques, mais aussi environnementales et sociétales, pour continuer à offrir à la société d'aujourd'hui des aciers toujours renouvelés, comme la sidérurgie le fait depuis des siècles.

Un moteur de changement technique important est la réduction des prix de revient, qui s'est traduite au 20^{ème} siècle par le raccourcissement des filières et la réduction du nombre d'opérations et d'outils. La coulée continue a été la grande révolution technique des années 60 et 70 et cette technologie est maintenant utilisée dans le monde entier de façon très majoritaire (voir page 9).

La technique de coulée de brames minces, qui simplifie les étapes de laminage, a aussi connu un développement important à partir des années 90 là où de nouvelles usines devaient être construites comme aux Etats Unis ou en Chine. La recherche continue à travailler sur un procédé encore plus radical qui produirait directement des bandes de quelques millimètres d'épaisseur par solidification et réduction en ligne.

D'autres défis majeurs attendent la société et ses industriels dans la première moitié du 21^{ème} siècle en liaison avec le réchauffement global et la nécessité de réduire les émissions de CO₂ de façon drastique. Tous les émetteurs de gaz à effet de serre (GES) seront appelés à contribution. Dans le cas de la sidérurgie, qui a réduit ses consommations énergétiques spécifiques de plus de 60 % dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le défi technique est énorme car les procédés actuels tels que le haut-fourneau fonctionnent aussi près des limites de la thermodynamique que possible : on ne peut plus réduire les émissions de CO₂ en améliorant la performance énergétique, comme cela reste possible dans des activités moins optimisées. Il faut donc rechercher des solutions de procédés en

rupture, qui mettent en jeu des paradigmes techniques entièrement nouveaux.

Un programme européen très ambitieux est en cours pour identifier et développer des procédés de production d'acier à partir de minerai de fer qui réduisent les émissions de GES de façon très importante. Le programme ULCOS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking) regroupe les compétences de la plupart des opérateurs de hauts-fourneaux européens sous la coordination d'ArcelorMittal.

Il vise à identifier deux ou trois pistes sérieuses qui seraient ensuite construites à une échelle de pilote industriel afin de valider les choix ainsi faits et d'être en mesure de les proposer à l'horizon d'une vingtaine d'années pour remplacer la technologie actuelle du haut-fourneau.

Une gamme importante de solutions est au centre de ce vaste programme de recherche. On regarde par exemple comment modifier le haut-fourneau de façon à pouvoir capturer le CO₂ qu'il émet pour le stocker dans des réservoirs géologiques souterrains (CCS : CO₂ capture and storage). On regarde aussi si l'utilisation directe de charbon dans des procédés de fusion-réduction ne permettrait pas d'être encore plus performant que le haut-fourneau tout en mettant en œuvre le CCS. On s'intéresse également à l'utilisation d'un carbone « neutre » produit de façon durable à partir de biomasse (plantations d'eucalyptus). Et, comme l'horizon temporel est lointain et que le paysage énergétique va beaucoup changer par l'épuisement inéluctable des gisements d'hydrocarbures et la contrainte carbone, on s'intéresse enfin à l'hydrogène (pré-réduction) et à l'électricité (électrolyse).

La sidérurgie se prépare ainsi à accompagner l'humanité dans les siècles à venir et à relever avec elle les grands défis qui lui sont lancés.

Le présent document a une vocation purement didactique. C'est pourquoi la clarté et la simplicité ont délibérément pris le pas sur la précision et l'exhaustivité.

La Fédération Française de l'Acier

- ne garantit pas l'exactitude des informations contenues dans ce document
- se dégage de toute responsabilité quant aux conséquences de l'utilisation de ces informations.