

# **Métaux pour le GC: cours 3**

## **mercredi 26 Avril 2024**

**Extraction, élaboration et mise en forme des  
acières et des alus**

**Alliages à base de fer**

révolution industrielle du 19<sup>ème</sup> siècle (dès 1760 en Angleterre)

**Alliages à base d'aluminium**

fin 19<sup>ème</sup> siècle, 1886, électrolyse découverte de manière indépendante  
par Paul Héroult en France et par Charles Martin Hall aux USA ...

Développement de l'aéronautique au 20<sup>ème</sup> siècle

# Importance des métaux dans l'essor des civilisations

- aube de l'humanité: âges lithiques ( $\lambda\imath\thetao\varsigma$  pierre) bois, os, silex tranchants ..
- 6'000 ans (**âge du Cuivre**, Κύπρος): pépites, minéraux, premières coulées .... techniques rudimentaires et artisanales (statuettes en cire perdue ...) Cu et Au non-alliés (décoration, monnaie), Chypre, Grèce, Chine, Incas...



Masque d'Agamemnon  
(feuille d'or natif)  
et Porte des Lions  
Mycène, Grèce



- 4'000 ans: **âge du Bronze** (Cu-Sn pour résistance mécanique ..) armes (airain ...) et outils agricoles, sculptures (bronze) de la tombe de Toutankhamon (cire perdue) en -1'300
- 2'000: **âge du fer** (encore + résistant), développement technique et social important, Achéens (Grèce archaïque), Celtes, Germains, La Tène (Ne, épées et parures)
- au 13<sup>ème</sup> siècle, la fonte (Fe-C): maîtrise des températures élevées 1300 à 1500°C
- au 18<sup>ème</sup> siècle, l'acier (1600°C), haut-fourneaux
- 1886: électrolyse de l' $Al_2O_3$  pour obtenir l'Al (Héroult en France et Hall aux USA)

# Les premières structures en fer: fin 18ème siècle



Ironbridge, UK, 1779



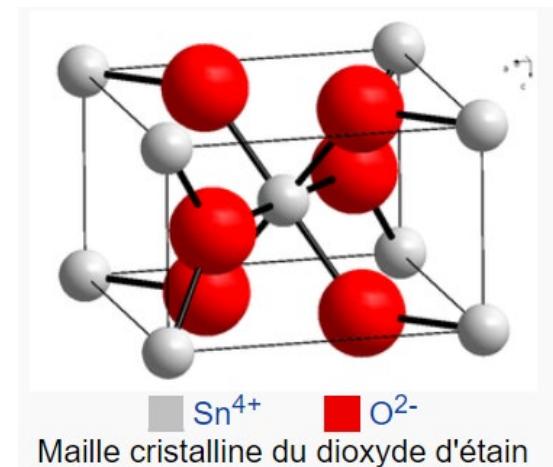
Coulée continue de 5 brames d'acier, Arcelor-Mittal

## Les oxydes métalliques

Les métaux sont extraits des minérais dans lesquels ils existent sous forme d'oxydes ( $\text{SnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HgO}$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{GaO}_2$ , ....). NB: similitude avec  $\text{H}_2\text{O}$  qui peut produire  $\text{H}_2$  et  $\text{O}_2$  ...

Un minéral est une roche contenant des éléments oxydés utiles et en proportion suffisamment intéressante pour en justifier l'exploitation.

L'extraction de cet ou ces éléments se fait par **métallurgie primaire** (pyrométallurgie, réduction des oxydes par le feu et hydrométallurgie).



Les oxydes ferriques sont utilisés comme pigments pour les émaux.

$\text{Sn}_2\text{O}_4$  (cassitérite) en tétragonal simple (autres oxydes  $\text{SnO}$ ,  $\text{Sn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{SnO}_2$ , ...)

## Les alliages base fer

Le fer et ses alliages forment une classe de matériaux extrêmement utilisés (**90% des métaux et alliages utilisés**) après les ciments du génie civil par poids et volume, et après le bois et les plastiques par volume.

**Raison principale: son faible coût.** Fe est un des métaux les plus abondants de la planète (5% dans la croûte terrestre, seuls O, Si et Al sont plus abondants, pas de problème d'approvisionnement ou de réserves avec ce métal).

Le fer est un métal au module élastique élevé (rigidité): à température ambiante, son **module d'Young est de 210 GPa**, soit trois fois celui de l'aluminium.

Sa densité est cependant aussi environ trois fois plus élevée que celle de l'aluminium, égale à 7'870 kg /m<sup>3</sup>.

Son module d'Young spécifique,  $E/\rho$ , est donc équivalent à celui de Al.

NB:  $1/\rho$  est le volume spécifique en m<sup>3</sup>/kg (volume de 1 kg de matière).



Treillis d'armature pour construction de GC

## Les alliages base fer

La stabilité des oxydes ferriques ( $\text{FeO}$  wustite,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hematite et  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnétite) est moindre que celle de l'aluminium.

L'extraction de Fe à partir de minerais riches en oxydes de fer requiert moins d'énergie:

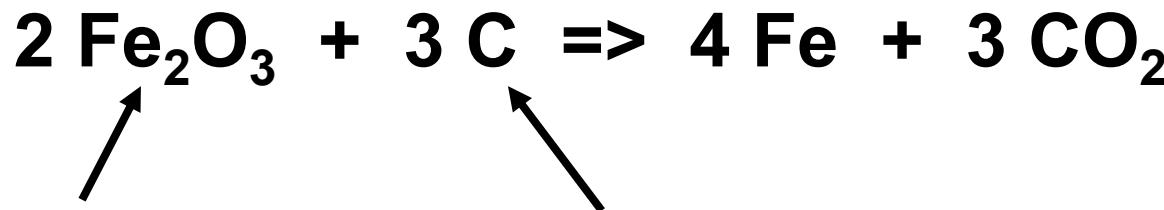
- 1 t d'Al nécessite 280 GJ pour être extraite de son oxyde  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- alors que 1 t de Fe ne nécessite que **55 GJ, soit 5 fois moins que Al.**

**Abondance et faible coût d'extraction** font donc de Fe un métal très **économique**.

Cependant, le fer est attaquable par les solutions aqueuses, surtout **acides**.

Il « **rouille** », il se couvre d'oxydes qui restent perméables et friables et permettent donc la continuation de l'oxydation. Sa résistance à la corrosion est ainsi bien moindre que celle de l'aluminium qui lui est protégé par son propre oxyde  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Production par réduction des oxydes de fer par le carbone dans le haut fourneau:  
(oxydoréduction: C est oxydé alors que Fe est réduit)



Mineraie de Fer

Coke (charbon de bonne pureté)

# Aspect environnemental de l'extraction du fer

## Exo 2a.

On a longtemps utilisé le charbon de bois (CO) pour produire la fonte puis l'acier. On suppose que le bois a une densité de 0.5 g/cm<sup>3</sup> et contient 50% de carbone (chiffres approximatifs mais proches de la réalité) et qu'on en perd peu pendant la conversion du bois en charbon de bois. Le fer (densité 7.87 g/cm<sup>3</sup>) est initialement sous forme d'oxyde Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Masses molaires: M<sub>Fe</sub> = 55.8 g/mole; M<sub>C</sub> = 12.0 g/mole et M<sub>O</sub> = 16 g/mole.

1. Combien de mètres cubes de bois faut-il pour réduire l'oxyde de façon à produire un mètre cube de fonte ou de fer ?

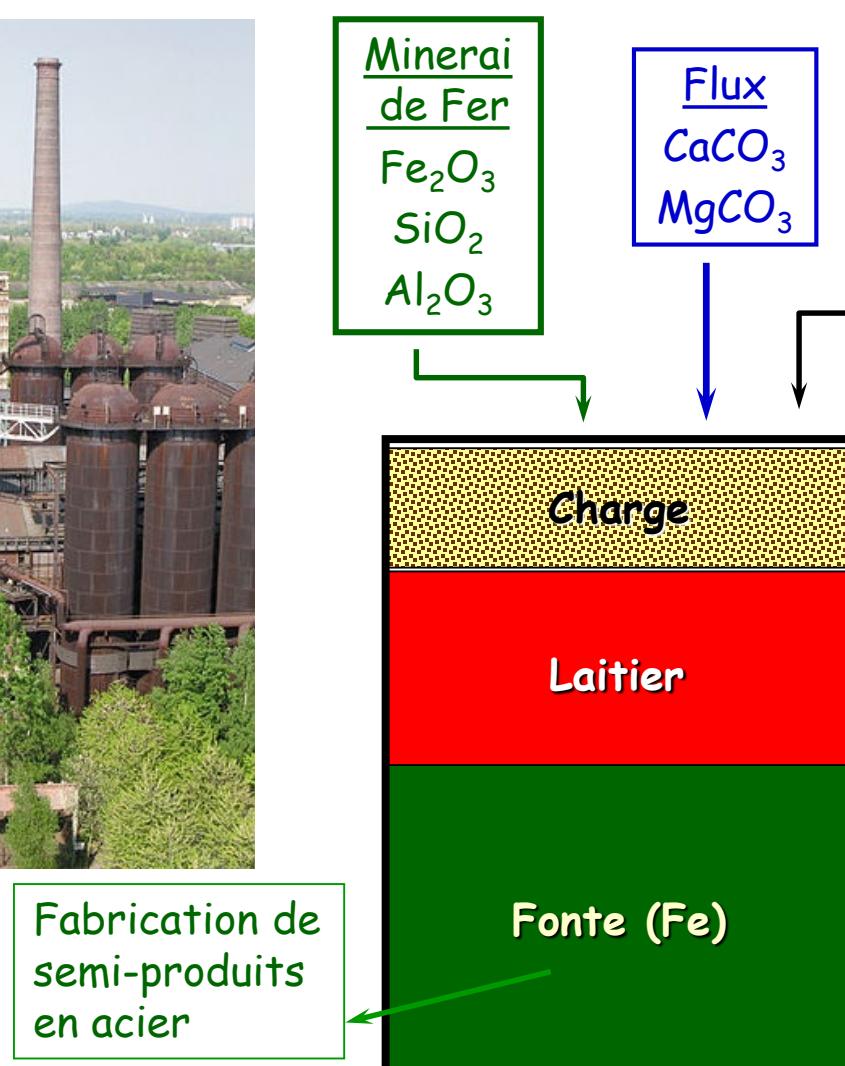
La réaction est Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnétite) plus CO (charbon de bois) donne CO<sub>2</sub> et Fer.

2. Approximons un arbre par un cylindre de 50 cm de diamètre et 10 m de haut. Combien d'arbres la production d'un m<sup>3</sup> de fer consomme-t-elle ?

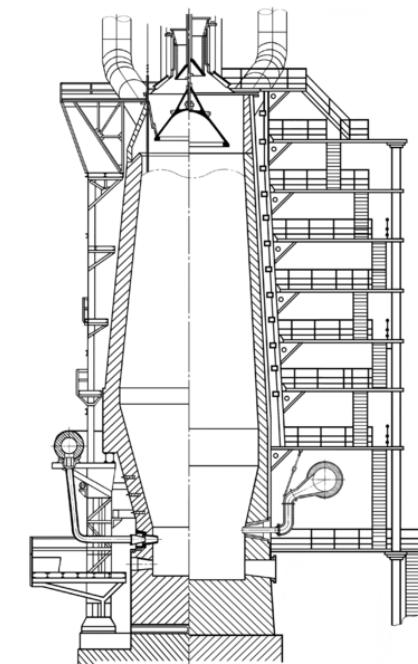
# Le haut fourneau : fonte (acier) de première fusion



Allemagne  
1972  
Diamètre 14 m  
Hauteur 36.7 m  
10'000 t/jour



Le laitier regroupe les scories qui sont formées en cours de fusion ou d'élaboration du métal par voie liquide. C'est un mélange composé de silicates, d'aluminates et de chaux, avec divers oxydes métalliques, à l'exception des oxydes de fer.



## Fabrication des aciers (C < 2%) à partir de la fonte

**Convertisseur Bessemer** en 1856, introduction d'air pour retirer plus de C:  $C + O_2 \Rightarrow CO_2$

Le procédé consiste à oxyder avec de l'air les éléments chimiques indésirables contenus dans la fonte pour en obtenir du fer ou de l'acier.

L'originalité du procédé consiste à exploiter **la chaleur dégagée par les réactions chimiques** pour maintenir la masse de métal en fusion.

Aujourd'hui, convertisseur avec insufflation d'oxygène pur pour un rendement beaucoup plus élevé.



Convertisseur Bessemer exposé au Kelham Island Museum à Sheffield, UK.

## Les deux filières de production

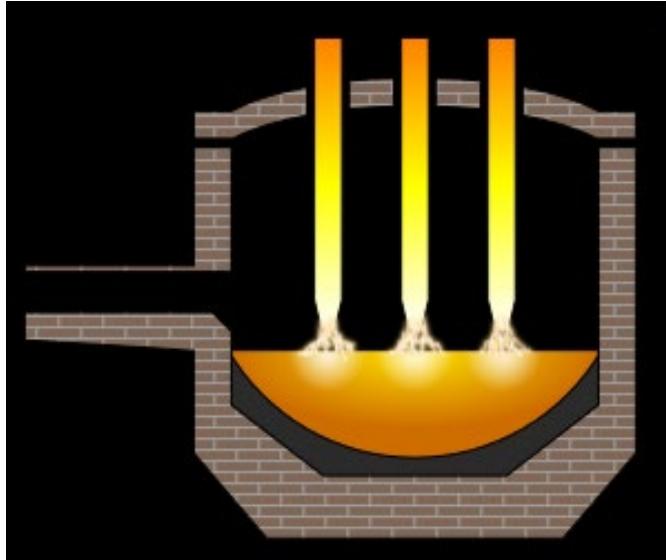
**Le recyclage du fer**, facilité par ses propriétés magnétiques qui font qu'on peut le séparer par simple attraction avec un électroaimant, des ordures ou d'autres déchets tels une voiture broyée, est mondialement de l'ordre de 46% et à la hausse. **Il avoisine maintenant les 50%**.

Deux voies sont donc utilisées pour produire l'acier :

1. soit on produit d'abord **de la fonte (fer riche en carbone) à partir du mineraï**, laquelle est ensuite convertie en acier,
2. soit **du fer recyclé est refondu** dans des fours électriques pour produire un nouvel acier.

La première voie s'appelle la « **filière fonte** », alors que la deuxième s'appelle la « **filière électrique** ».

**Filière électrique:** aciers de recyclage (ferraille) avec fusion dans des fours à arc. C'est une alternative économique au haut fourneau.

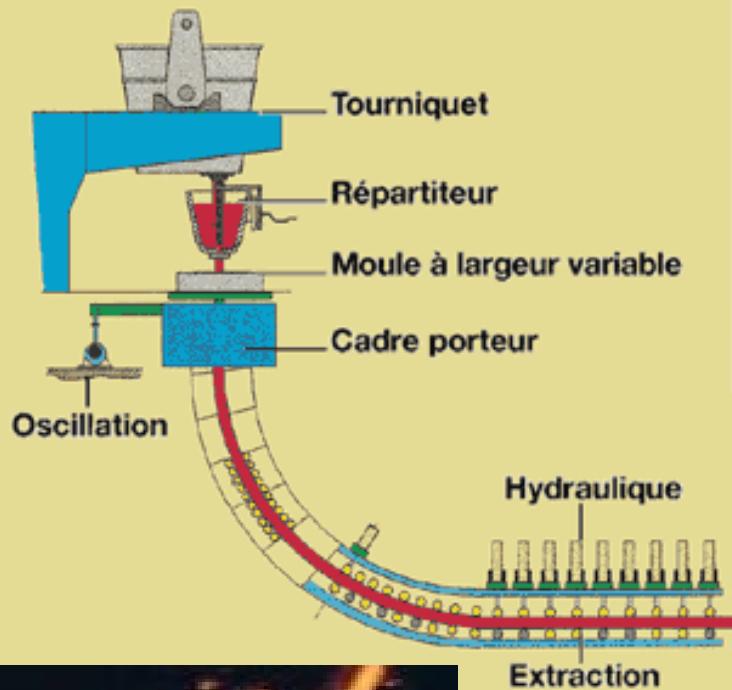
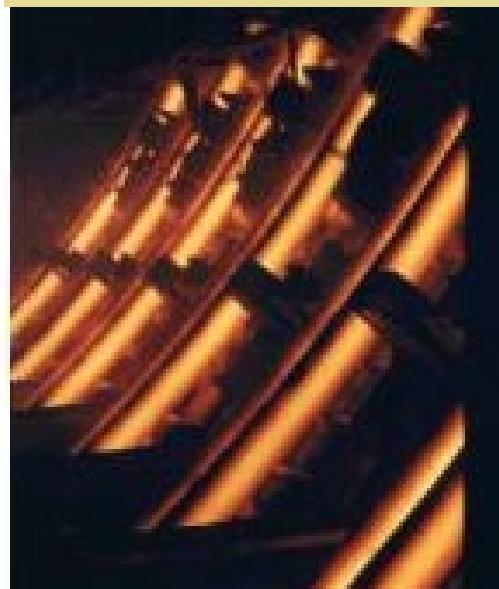


Four à arc électrique

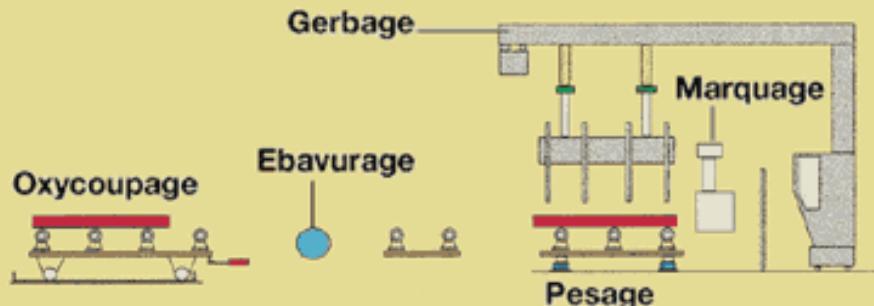
Four 110 t  
Danish steel



# Etape suivante: coulée continue de l'acier



L'acier en fusion ( $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ ) est d'abord versé dans un moule sans fond où il commence à baisser en température au contact des parois refroidies à l'eau. Guidé par un jeu de rouleaux, il descend ensuite tout en continuant à se solidifier et prend la forme de brames dont le poids moyen unitaire est de 30 t. Arrivées au poste d'oxycoupage, celles-ci sont coupées aux longueurs voulues puis stockées avant d'être acheminées au train continu à chaud pour être laminées.



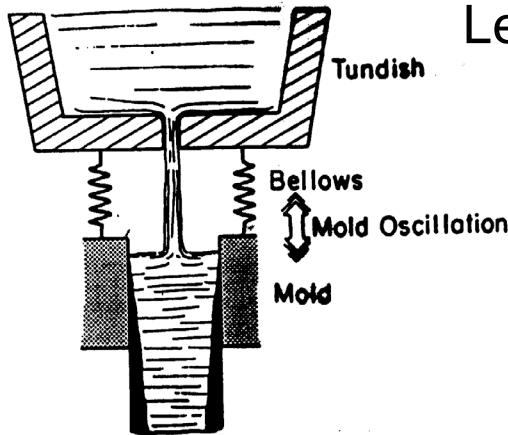
Le rayon de courbure de la barre en acier est de l'ordre de 10m.

<https://www.youtube.com/watch?v=d-72gc6I- E>

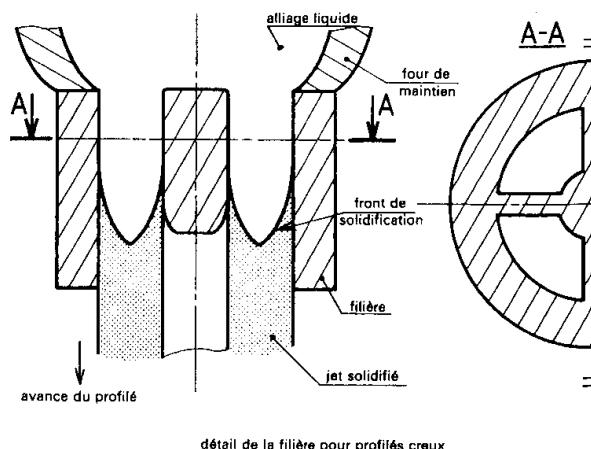
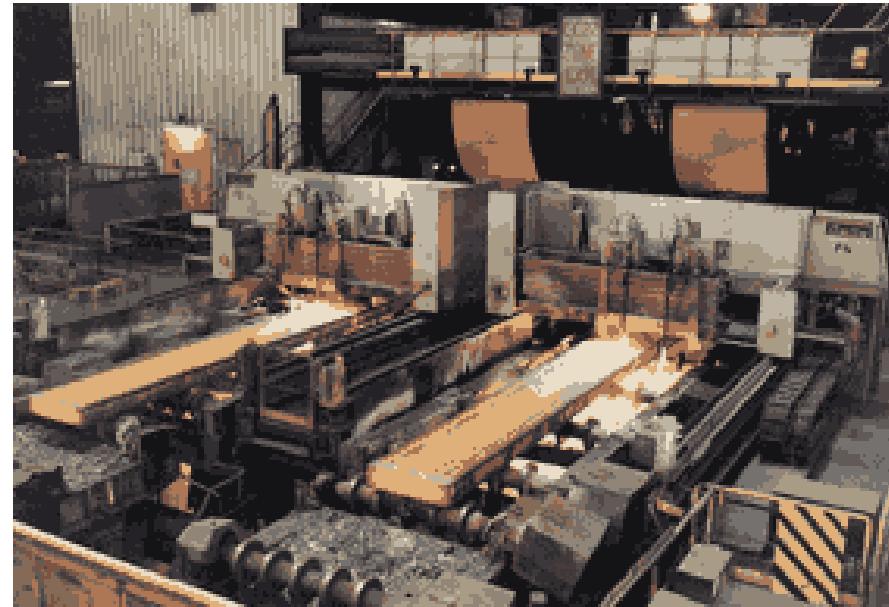
Brames et blooms: 0.5 à 1.5 m/min  
Billettes (ronds): 1 à 4 m/min

Fabrication de demi-produits (fromage indirecte)

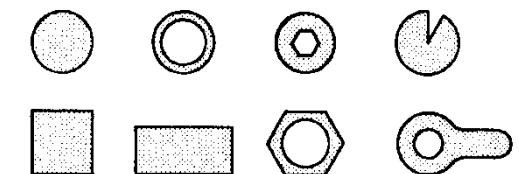
# Coulée continue acier: très grandes installations



Le moule oscille pour éviter que le métal s'y accroche.

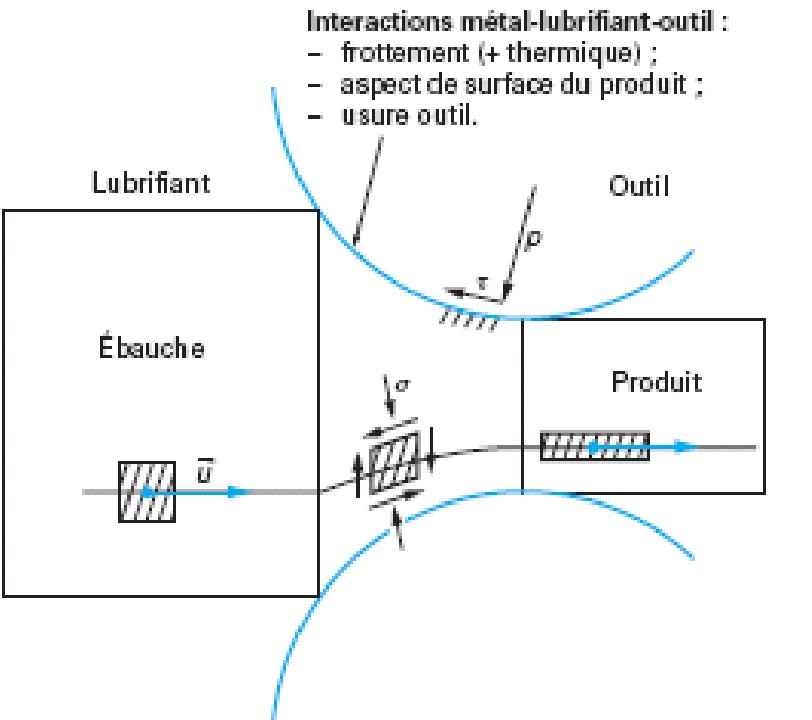


produits creux longs (profilés)



types de sections des profilés

# Mise en forme des aciers : laminage (déformation en compression)



Interactions métal-lubrifiant-outil :

- frottement (+ thermique) ;
- aspect de surface du produit ;
- usure outil.

Lubrifiant

Outil

Ébauche

Produit



→

Écoulement :

- métal ;
- chaleur.



Structure métallurgique :

- taille, forme grains ;
- répartition écrouissage ;
- textures (anisotropie).

Efforts :

- défauts internes (structures, hétérogénéités, fissures...) ;
- défauts sur surfaces libres (rugosité, fissures...).

Echauffement du métal:

- par friction (lubrification)
- par grande déformation

L'indentation des parois de l'outil déforme plastiquement le métal:

- à froid: écrouissage i.e. la contrainte augmente avec la déformation
- à chaud: le niveau de contrainte dépend uniquement de la vitesse de déformation



Film Sandvik

[https://www.youtube.com/watch?v=\\_qb1\\_bdMC5o&list=PLwRRwyhHsWDaqM0PqffkStljRsKC58O-L&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=_qb1_bdMC5o&list=PLwRRwyhHsWDaqM0PqffkStljRsKC58O-L&index=5)

# Mise en forme des aciers: laminage, tréfilage, forgeage, pliage, etc ...

## Kalyani Carpenter Special Steels Ltd

Rolling mill:



Poutrelles de différentes sections eg H, T, etc.

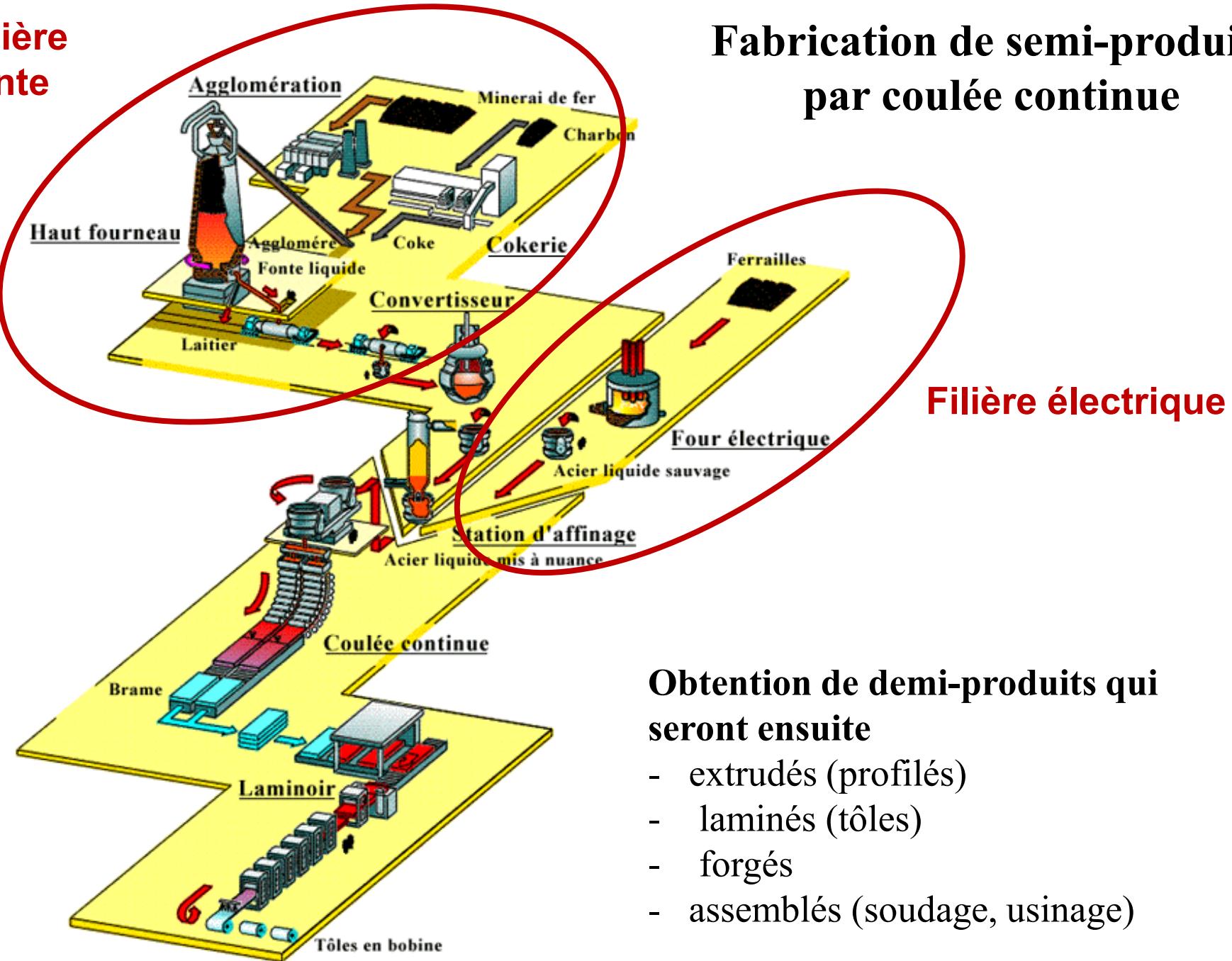


Cogging press:



## Filière fonte

## Fabrication de semi-produits par coulée continue



Obtention de demi-produits qui seront ensuite

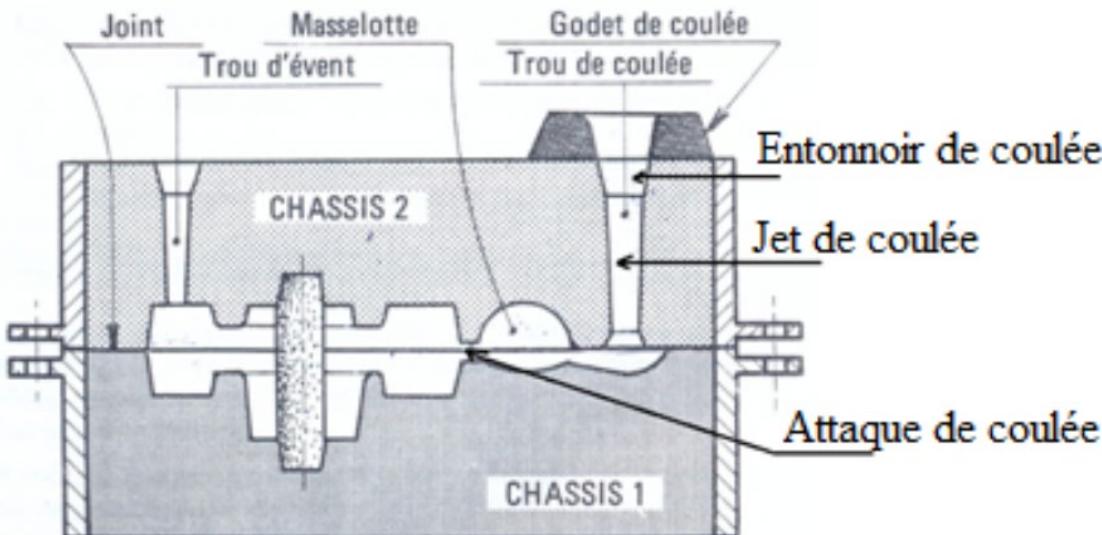
- extrudés (profilés)
- laminés (tôles)
- forgés
- assemblés (soudage, usinage)

## Les alliages Fe-C: aciers et les fontes

les **acières** ont C < 2% poids (typiquement C < 1.4 à 1.5 %) et sont **tjs alliés** (Mn, Ni, Cr, etc ...)

les **fontes** ont 3% < C < 4% poids. Elles sont mise en forme **par fonderie uniquement** (coulée dans moules en sable de bâtis de machine, blocs moteur diesel, couvercles pour égouts, etc ...). Elles ont:

- peu de ductilité donc corroyage (i.e. mise en forme par déformation) impossible.
- une température de fusion plus faible que celle des aciers (~1150°C vs. ~1500°C)
- et une mauvaise résistance à la traction et bonne résistance à la compression, à l'usure (carbure de fer =  $\text{Fe}_3\text{C}$  = cémentite) et aux vibrations (bâtis de machines).



Principe de coulée en sable avec deux châssis et un noyau.

# **Les alliages d'aluminium: production et mise en forme**

**lundi 29 Avril 2024**

- +  Coulée continue acier 
- +  Aciers Sandvik 
- +  Recyclage et coulée semi-continue Alu 
- +  Extrusion Aluminium 
- +  Coulée alu: principe 