

Les matériaux métalliques

Dès le début du 19^{ème} siècle, au cours de la révolution industrielle, l'élaboration des métaux a connu un véritable essor en Europe et notamment en France. En effet, les métaux ouvraient de nouvelles perspectives, en particulier avec l'élaboration de l'acier. C'est un matériau aux propriétés mécaniques très intéressantes, il permet par exemple de concentrer d'énormes forces sur de toutes petites surfaces. Il a été utilisé pour l'élaboration de pièces mécaniques dans l'industrie automobile mais aussi a permis d'élaborer des grandes chaînes de production, il est donc à la base du monde moderne.

1. La matière première

Les éléments les plus abondants dans la croûte terrestre sont l'oxygène (46,6%), le silicium (27,7%) puis les métaux aluminium (8%) et fer (5%). Calcium, sodium, potassium viennent ensuite. Le zinc et le cuivre sont eux présents en toutes petites quantités. Les métaux sont toujours enfermés dans des roches appelées minerais :

Les minerais les plus riches en fer sont principalement des oxydes, la magnétite Fe_3O_4 et l'hématite Fe_2O_3 .

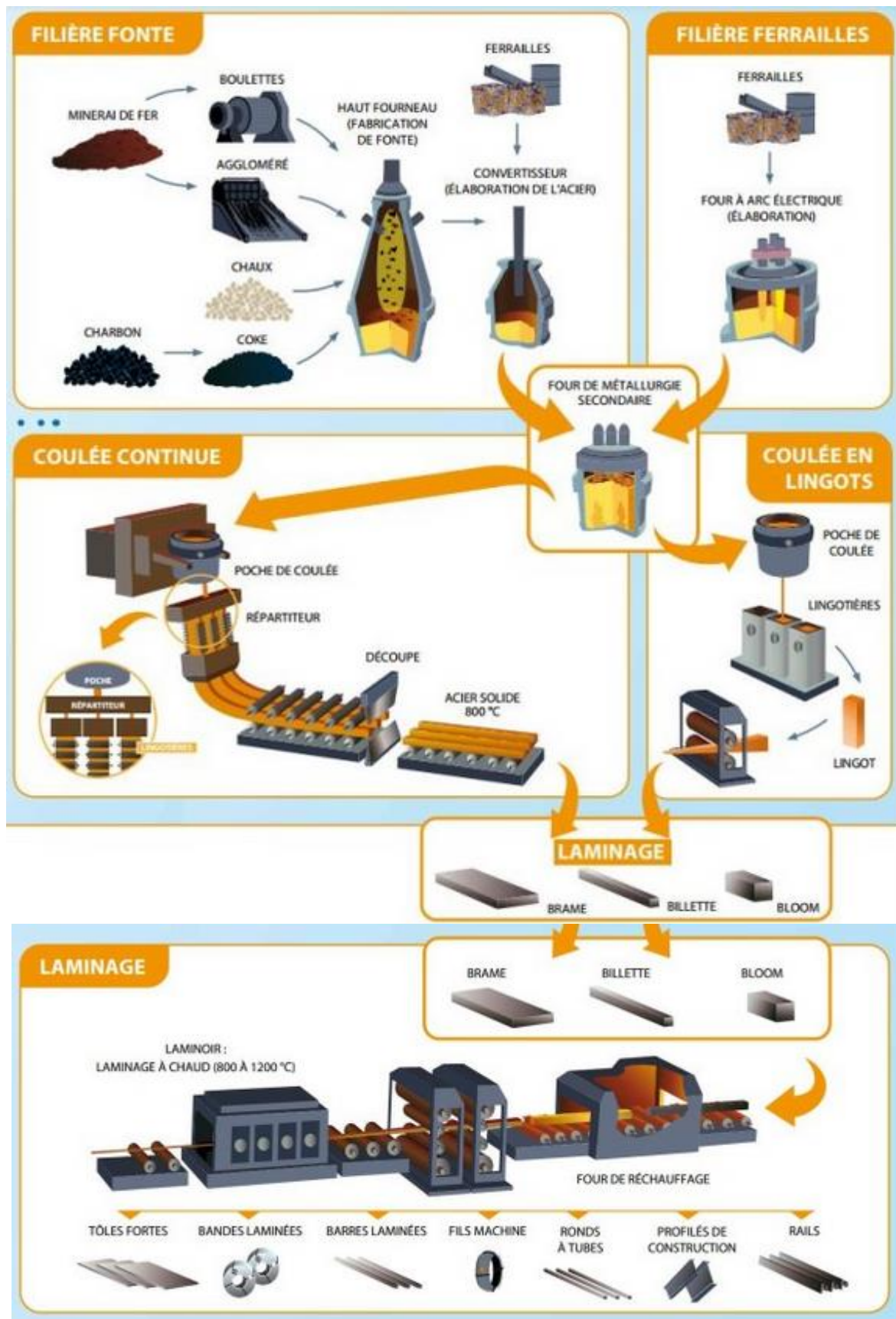
L'aluminium, quant à lui, est produit principalement à partir de bauxite riche en alumine Al_2O_3 .

Le zinc est produit à partir de sulfure de zinc appelé sphalérite ou blende de formule chimique ZnS .

Le cuivre est très peu présent dans l'écorce terrestre, cependant il existe à l'état natif et sous forme de minerai (chalcopyrite CuFeS_2), il est assez facile à extraire. Ainsi, sa métallurgie a précédé celle du fer de 2500 ans.

2. Exemple d'élaboration d'un métal : l'acier

La sidérurgie est le nom donné à l'industrie de la métallurgie permettant l'élaboration des alliages ferreux et leur mise en forme. On s'intéresse à l'acier car c'est le métal le plus utilisé dans un grand nombre de secteurs d'activités. Deux procédés d'élaboration coexistent aujourd'hui, la filière fonte et la filière ferrailles.



La filière fonte

Le fer se trouve piégé dans le minerai avec des atomes d'oxygène comme dans les molécules de Fe_3O_4 ou Fe_2O_3 . Afin d'obtenir des atomes de fer à l'état solide Fe(s) , il va falloir réduire les oxydes métalliques afin que le fer gagne des électrons et se retrouve à l'état métallique. Pour cela, on réalise une réduction à l'aide de carbone à haute température. Le carbone utilisé est du coke métallurgique issu d'un charbon très pur.

D'autre part, le minerai de fer est d'abord concassé de telle manière à obtenir un granulat grossier.

L'ensemble des matières premières, minerai concassé, coke ainsi que des fondants (tels que la chaux) permettant d'obtenir un produit débarrassé d'impuretés, sont introduites dans un haut fourneau de 3500 à 4500 m³.

De l'air chauffé à 1250°C est envoyé dans le haut fourneau ce qui provoque la combustion du coke, élève la température à 1550°C, fait fondre la charge et provoque la réduction du minerai. Au bout de 8 heures de réaction, on obtient de la fonte en fusion, mélange de fer et de 4% de carbone. A la surface se forme le laitier, il concentre la plupart des impuretés. Il est séparé du reste de la matière liquide et servira dans l'élaboration des ciments.

La fonte est alors envoyée vers un convertisseur dans lequel a été placé un lit de ferrailles (ce qui permet de réguler la température de la prochaine opération). On insuffle alors du dioxygène afin de le faire réagir avec le carbone présent dans la fonte, ce qui permet de diminuer sa teneur à moins de 2% et ainsi on obtient de l'acier. La température dans le convertisseur est d'environ 1700°C, l'acier est liquide. On ajuste alors sa composition en lui ajoutant certains composés afin de modifier ses propriétés mécaniques ultérieures. Une fois que la composition de l'acier est ajustée, on l'envoie vers la poche de coulée afin de former des brames, des billettes ou des blooms.

Les brames sont ensuite laminées à chaud à environ 1200°C de telle manière à réduire leur épaisseur entre 1,2 et 20 mm.

On peut encore réduire l'épaisseur de la tôle et aussi modifier ses propriétés mécaniques à l'aide d'un laminage à froid. On peut alors obtenir des feuilles de tôles qui pourront servir par exemple pour l'industrie automobile, la fabrication de futs ou de canettes, la fabrication de mobilier métallique etc...

Voir la vidéo suivante à partir de 2min 12s :

https://www.youtube.com/watch?v=ZRLzLgh1b_Q

La filière ferraille

Les aciers issus du recyclage sont placés dans un grand four électrique afin d'être fondus et de pouvoir être à nouveau utilisés. Cette filière de recyclage est loin d'être négligeable en termes de production. Les deux filières se rejoignent pour affiner l'acier sauvage et formuler différentes nuances d'alliages selon les besoins.

3. Caractéristiques des métaux

a. Produits sidérurgiques : Fer, acier, fonte

Afin de répondre aux exigences de l'industrie, de multiples alliages ont été élaborés. Ils sont constitués d'une matrice constituée d'atomes de fer dans laquelle est incorporée une certaine quantité de carbone mais aussi dans certains cas d'autres éléments chimiques.

Les propriétés des alliages fer-carbone dépendent essentiellement du pourcentage massique de carbone. On les classe ainsi : fer, acier, fonte.

- Les fers ont un pourcentage de carbone inférieur à 0.05. Ils sont très malléables.
- Les aciers ont un pourcentage de carbone entre 0.05 et 1.7. Ils sont moins malléables que les fers, mais ils supportent la trempe, c'est-à-dire qu'après chauffage à température suffisamment élevée et refroidissement brusque, leur dureté augmente notablement. Plus un acier a de carbone plus il est dur et plus sa soudabilité baisse.
Exemple : l'acier C35 est un acier composé essentiellement de 0.35% de carbone, le reste étant du fer.
- Les fontes avec un pourcentage de carbone compris entre 1.7 et 6.7. Les fontes industrielles ont un pourcentage de carbone qui est de 3% à 4%.

En ce qui concerne les aciers, on peut trouver plusieurs compositions en fonction de leur utilisation :

- Aciers non alliés d'usage général, destinés à la construction.
- Aciers non alliés au carbone pour traitements thermiques. C'est le pourcentage de carbone qui détermine la trempabilité.
- Aciers faiblement alliés ou fortement alliés (ajout d'un ou plusieurs éléments qui modifient les propriétés de l'acier ordinaire).
- Aciers inoxydables dont la composition vise à lutter contre la corrosion.

Ainsi, afin de pouvoir nommer la multitude d'alliages métalliques il existe des normes européennes. Les teneurs utilisées pour exprimer les compositions sont toujours les pourcentages massiques des différents constituants.

Exemple : X6CrMo17-1

Acier fortement allié, teneur en carbone 0.06%, en chrome 17% et molybdène 1%

b. Propriétés mécaniques des métaux

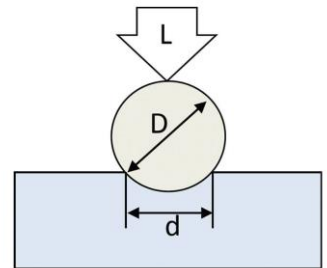
Aujourd'hui la fabrication des métaux est totalement maîtrisée. On connaît avec précision leur comportement en fonction de leur composition. Pour cela, on a réalisé des essais mécaniques afin de déterminer, entre autres :

- La résistance d'un métal aux efforts de pénétration (essai de dureté)
- Son élasticité (essai de traction)
- Sa résistance aux chocs (essai de résilience ou ténacité)

L'intérêt est d'obtenir des données chiffrées, des repères pour l'utilisation des métaux. Ces essais sont normalisés, c'est-à-dire toujours réalisés dans les mêmes conditions expérimentales.

Essai de dureté

L'essai consiste à appliquer une charge L connue sur une bille de diamètre D sur la surface d'un métal. On mesure ensuite le plus précisément possible le diamètre d de l'empreinte réalisée dans le métal. On en déduit alors la dureté Brinell à l'aide d'un calcul ou d'un abaque. Elle s'exprime en HB.

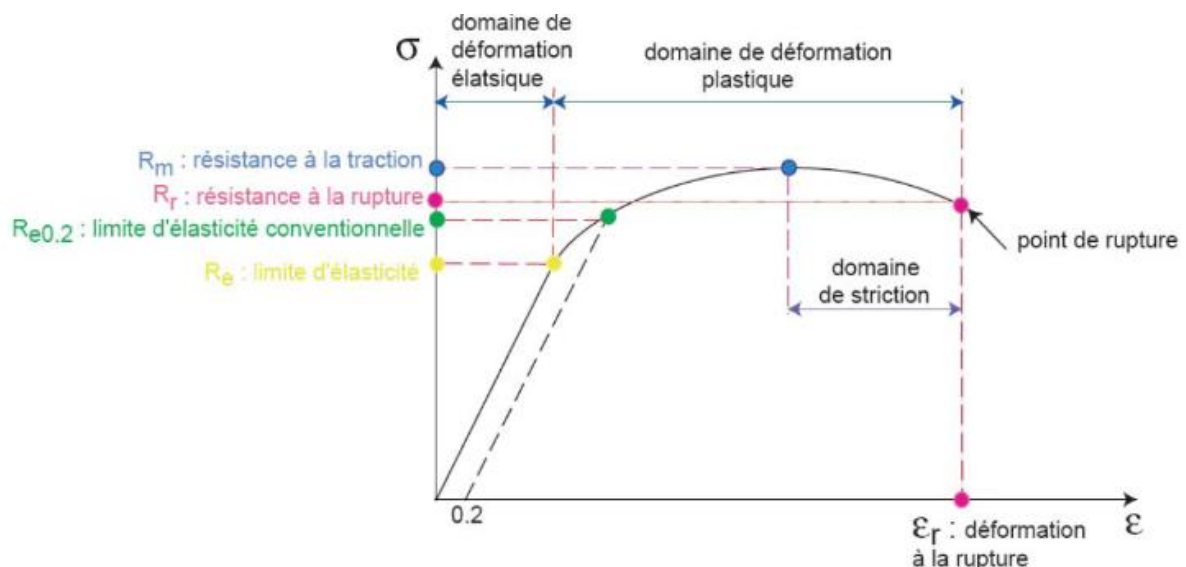


Voici quelques duretés Brinell de métaux ou alliages usuels :

laitons 52 à 90HB, bronze 80 à 117, aciers extra-doux 110, aciers mi-durs 170, durs 315HB.

Essai de traction (Rappel)

L'essai consiste à étirer une éprouvette et à tracer la courbe de la contrainte appliquée en fonction de la déformation relative mesurée.



Cet essai permet de mesurer :

- La ductilité du métal, qui correspond à ϵ_F sur le schéma. On la note souvent A dans les livres, elle s'exprime en %.
- La dureté est caractérisée par Re. Le métal mou si Re est faible, il est dur si Re est élevé.
- La rigidité, qui correspond à la pente du domaine élastique et s'appelle le module d'Young. Plus la pente est élevée plus le métal est rigide.

Voici un tableau récapitulant différentes caractéristiques pour quelques métaux :

Matière	Dureté exprimée en Brinell (HB)	Résistance à la rupture (Rm) exprimée en MPa	Résistance à la rupture (Rm) exprimée en KgF/mm²	Limite élastique (Re) exprimée en MPa	Allongement (A) exprimée en %
C22		410	40	210	25
C35		520	50	270	19
C40		580	60	305	16
35NCD16 recuit		800	80	600	9
42CD4T		900-1100	90	650	12
ETG 100	300	1000	100	870	12
30CND8T	350	1100-1300	110	900	10
TOLE HARDOX 400	400 (valeur indicative)	1300	130	1150	12
TOLE HARDOX 450	450 (valeur indicative)	1400	140	1200	10
CUSN12	90	270	30	150	5
Titane TA6V		900-1100	90	830	10

Questions

1. Que signifie matière C35 ?
2. Quel est le matériau le plus dur ?
3. Quel est le matériau le plus mou ?
4. Quel est le matériau le plus ductile ?
5. Peut-on savoir quel est le plus rigide ?

Essai de ténacité

L'essai Charpy consiste à mesurer la résistance à la rupture d'un matériau sous l'effet d'un choc. Cette expérience mesure l'énergie nécessaire pour casser un éprouvette suite à un choc. Cette énergie dépend du métal mais aussi de la température. La ténacité notée KV s'exprime en Joules (J) pour une éprouvette avec une entaille en V.

Vidéo de l'essai de ténacité : <https://www.youtube.com/watch?v=DEwJWoiIrCk>

Exemples à -40°C :

Hardox Hituf 350: KV= 95 J, utilisé pour des broyeurs de voitures, des dents de ripper...(350 caractérise la dureté)

Hardox 400: KV= 45 J, utilisé pour des fonds de bennes, des godets de curage, des lames de chargeuses...

Hardox 450: KV= 40J.

Dans ces exemples, plus la dureté augmente, plus la ténacité baisse. C'est donc un équilibre entre dureté/résilience qui est recherché en fonction de l'utilisation finale.

Essai de fatigue

Cet essai consiste à appliquer un très grand nombre de fois une contrainte plus petite que la contrainte maximale que peut supporter l'éprouvette. En effet, une pièce peut se briser après avoir subi un grand nombre de chocs dont l'intensité de chacun est insuffisante pour causer sa rupture. Il est donc important de connaître le comportement des métaux à la fatigue. Par exemple dans l'automobile, il existe de nombreuses pièces qui sont soumises à des contraintes répétées un très grand nombre de fois (roulements, pignons, arbres...).

c. Traitements thermiques et traitements de surface

Ces traitements ont pour but d'améliorer les propriétés mécaniques des métaux, notamment en augmentant la limite élastique c'est-à-dire la dureté ou en apportant une structure stable à grains fins. La réponse à ces traitements dépend de la composition des aciers.

Traitements thermiques

La trempe

Tremper un métal consiste à le chauffer puis à le refroidir. Pour le refroidir, on peut le plonger dans un bain d'eau froide, le refroidir à l'huile ou à l'air. La trempe vise à améliorer la résistance de l'acier (dureté, rigidité, limite élastique R_e). En parallèle, suite à une trempe on peut observer une diminution de l'allongement à la rupture et une diminution de ductilité.

Le revenu

Le revenu est pratiqué après l'opération de trempe. Cela consiste à réchauffer de nouveau le métal (souvent 550°C) après une trempe énergique pour augmenter son usinabilité en lui rendant de la ductilité. Comme l'opération de trempe, le réchauffement de l'acier provoque une modification de sa structure. L'effet le plus remarquable du revenu est la diminution notable des contraintes internes existant dans la pièce suite à la trempe en relâchant les tensions internes.

Le recuit

Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffe (temps de montée en température -de 500 à 900°-, temps de maintien) puis refroidissement lent ou très lent permettant de modifier les caractéristiques d'un métal. L'objectif d'un recuit est d'amener le métal vers un état d'équilibre pour faciliter son emploi (fraisage, perçage, tournage, emboutissage...). Il existe différents recuits : recuit de normalisation, d'homogénéisation, d'adoucissement, de détente...

4. Corrosion des métaux

Voir le cours sur l'oxydoréduction, puis le cours sur la force d'un couple et enfin le cours sur la corrosion. En introduction du cours sur le phénomène de corrosion, voir la vidéo « La corrosion des métaux » et répondre au questionnaire.