

Métallurgie extractive

À partir des **minerais**, contenant un composé métallique compris dans une **gangue**, que l'on **réduit** dans un **haut-fourneau**, après une étape de **grillage** dans le cas des sulfures, on obtient le **corps pur élémentaire** ou un **alliage**.

On distingue les **métaux de base**, utilisés tels quels comme *le Titane, le Fer, le Nickel, le Cuivre et le Zinc*, des **métaux d'addition** que l'on utilise plutôt comme éléments d'alliage, qui sont *le Vanadium, le Chrome, le Manganèse et le Cobalt*.

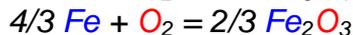
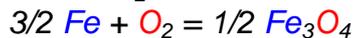
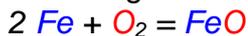
I. Élaboration de la fonte et des aciers

On appelle aussi la métallurgie du Fer, la **sidérurgie**. Le principe est de **réduire le Fer par le coke**, pour **obtenir de la fonte** liquide, séparées de **stériles** provenant de la gangue, présents dans les **laitiers**.

A. Analyse théorique des diagrammes d'Ellingham

1) Diagramme du Fer

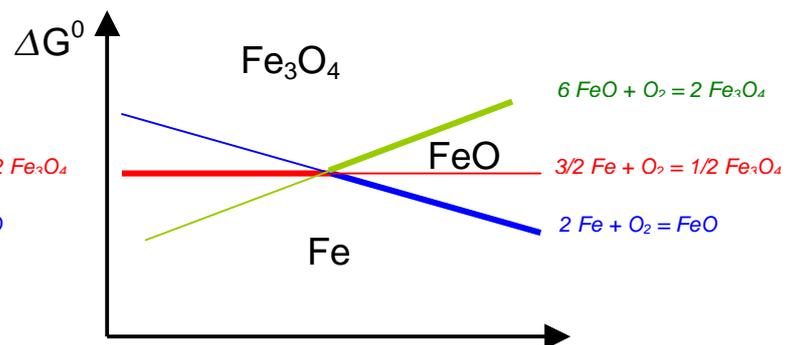
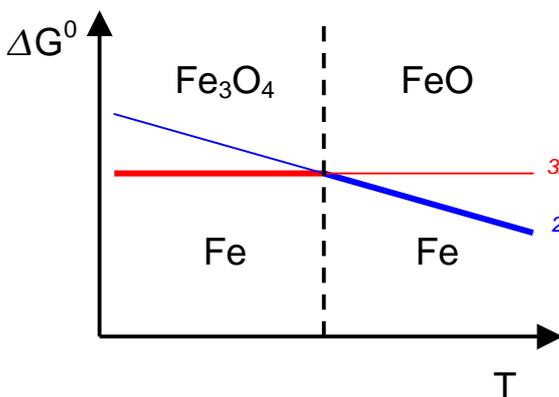
Sur le diagramme d'Ellingham, on a trois courbes relatives aux oxydes de Fer :



On ne conserve que les réactions qui ont effectivement lieu dans le milieu. Prenons par exemple la droite de formation de la wustite et celle de la magnétite.

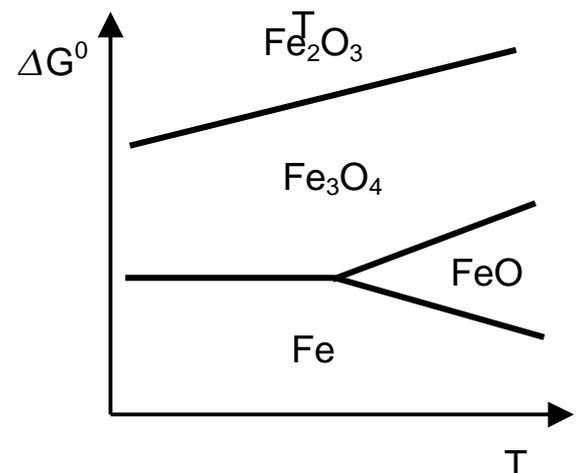
Celles-ci se croisent en un **point triple**. L'oxydation du Fer conduisant à la formation de Fe_3O_4 est plus favorable avant le point triple (ΔG^0 plus faible) et celle conduisant à la formation de FeO après le point triple.

On doit alors faire correspondre un équilibre entre les deux oxydes, Fe_3O_4 et FeO , en conservant les conventions (une mole d' O_2).



On trace de cette manière le diagramme général du Fer :

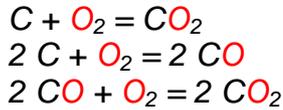
On observe que l'équilibre entre Fe_2O_3 et Fe_3O_4 existe à toutes températures.



De plus, en dessous d'une certaine température, FeO subit une dismutation pour se transformer en Fe₃O₄ et Fe.

2) Diagramme du Carbone

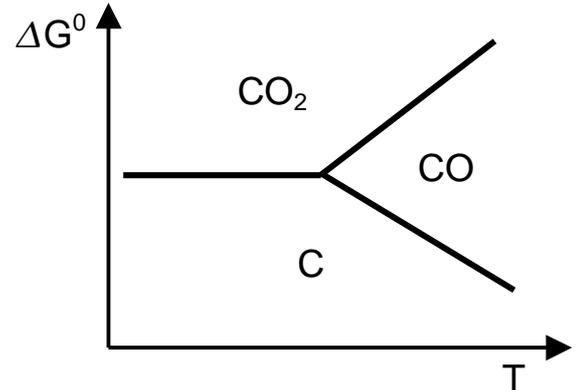
Sur le diagramme d'Ellingham, on a trois courbes relatives aux oxydes de Carbone :



De la même manière que le Fer, on trouve le diagramme général du Carbone.

On observe l'existence d'un **point triple**. En dessous d'une certaine température, CO subit une dismutation pour se transformer en C et CO₂.

Cependant, bien que cette réaction soit thermodynamiquement favorable, elle est cinétiquement très lente ; en fait CO est stable en dessous de cette température.



B. Diagramme de Chaudron

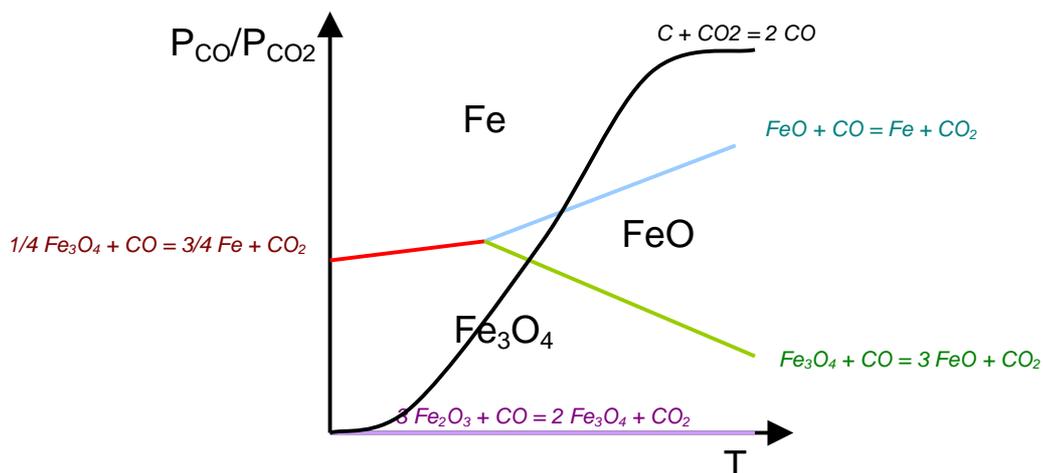
La superposition des diagrammes du Carbone et du Fer montre que C et CO peuvent réduire les oxydes de Fer jusqu'à obtention du Fer métallique.

Le Carbone solide est toutefois limité aux très hautes températures ; en effet, c'est un solide, contrairement à CO, la réaction est donc beaucoup trop lente avec C. On ne s'intéresse qu'à la courbe d'équilibre entre CO et CO₂.

On peut alors écrire les réactions de réduction des oxydes de Fer par le monoxyde de Carbone. Ce sont les équilibres de **Chaudron**. On les rapporte à une mole de CO.

Fe₂O₃ est totalement et instantanément réduit en Fe₃O₄. Ainsi d'après les équilibres de Chaudron, faisant intervenir les réductions des oxydes de Fer par le monoxyde de Carbone, on trouve qu'en dessous de 590 K la réduction ne s'effectue qu'en une seule étape, et en deux étapes au dessus de 590 K.

Diagramme de Chaudron

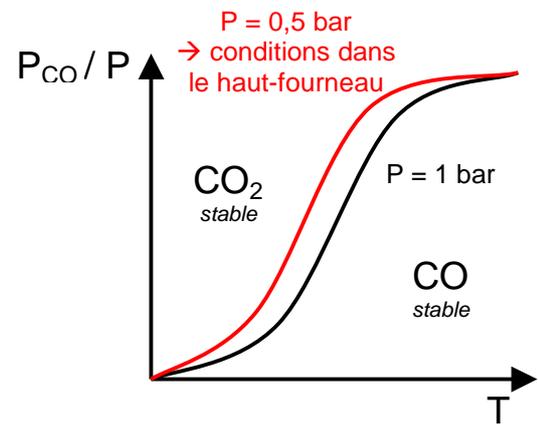


C. Équilibres de Boudouard

Dans un haut-fourneau, on a l'équilibre de Boudouard : $C + CO_2 = 2 CO$

Cette réaction est fortement déplacée dans le sens de la production de CO car le Carbone (le coke) se trouve en excès. De plus, elle est plus favorable à haute température.

On écrit alors la pression de CO présente dans le haut-fourneau, en fonction de la température.



Pour que les équilibres de Boudouard soient déplacés dans le sens de la réduction, il faut que la pression de CO dans le haut-fourneau soit supérieure à la pression d'équilibre en CO.

Ainsi on observe, après superposition des équilibres de Chaudron et de Boudouard :

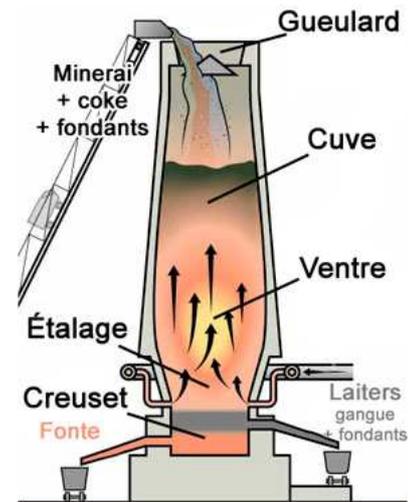
- _ en dessous de 980 K, $P_{CO} < P_{CO}^{eq}$, il n'y a pas de réduction
- _ à partir de 980 K, $P_{CO} > P_{CO}^{eq}$, il y a réduction

II Le haut-fourneau

A. Description et principe de fonctionnement

Le haut-fourneau est la structure permettant la réduction des oxydes de Fer en fonte. C'est une cuve d'à peu près 15 mètres de diamètre sur 20 mètres de hauteur. On peut y produire 3000 tonnes de fonte par jour.

Pour produire une tonne de fonte, on consomme 1650 kg de minerai, 450 kg de coke et 40 m³ de dioxygène.



1) Matières premières

On introduit par le gueulard les réactifs nécessaires à la réduction des oxydes de Fer :

- _ le minerai de Fer évidemment ... principalement de l'**hématite** (Fe_2O_3)
- _ la **gangue**, inséparable du minerai, qui contient des substances indésirables pour la fonte (des **silicates d'Aluminium et de Magnésium** $[(Al,Mg)SiO_4]$, de l'**apatite** $Ca_3(PO_4)_2$)
- _ le **coke métallurgique**, qui forme le réducteur (CO), le combustible que l'on va brûler pour fabriquer de la chaleur, et qui va aussi permettre la carburation de la fonte, encore appelée **cémentation** (on forme de la cémentite Fe_3C)

2) Transformations

La température du haut-fourneau augmente du haut vers la base. Ainsi, il s'effectue plusieurs réductions successives des oxydes de Fer, jusqu'à la réduction totale en fonte à la base du haut-fourneau.

La pression réelle en monoxyde de Carbone à l'intérieur du haut fourneau est en fait plus élevée car les gaz mettent un peu de temps avant de s'échapper. On est en fait toujours dans des conditions de réduction, c'est-à-dire que $P_{CO} > P_{CO}^{eq}$.

Mais alors ... Pourquoi on se fait chier avec Boudouard ??

Remarque : on appelle **réduction indirecte** la réduction par le *monoxyde de Carbone*, et **réduction directe** la réduction par le *Carbone*.

3) Produits de la transformation

On récupère à la base du haut-fourneau deux phases liquides qui sont la **fonte ordinaire** et les **laitiers**.

La fonte est un alliage de Fer et de Carbone. Il compose entre **1,7 % (limite de solubilité dans le Fer- γ)** et **6,7 % (limite de solubilité dans Fe₃C)** en masse de la fonte.

Les laitiers contiennent tous les oxydes indésirables provenant de la gangue. Ils sont insolubles dans la fonte. On retrouve la silice SiO₂, l'alumine Al₂O₃, l'oxyde de Magnésium MgO et de la chaux CaO.

On trouve aussi des éléments solubles dans la fonte, le Phosphore et le Soufre. Ces éléments doivent être éliminés car ils tuent les propriétés mécaniques de la fonte.

Le Soufre est éliminé et récupéré dans les laitiers grâce au traitement de désulfuration de la fonte, grâce à la chaux (faisant partie des fondants).



Les laitiers ne sont pas jetés, ils peuvent servir dans la construction, notamment pour les soubassements des routes et des chemins de fer. Ils sont moulés en parpaings Muhahahaha ! Dommage pour vous si vous ne comprenez pas ! ☹ et en briques.

Ils servent aussi à fabriquer de la laine de verre pour l'isolation thermique des immeubles. Enfin, l'apatite présente dans les laitiers sert d'engrais ; on les appelle les **scories**.

B. Les différentes fontes obtenues

On récupère du haut-fourneau des fontes blanches ou grises. Ces fontes possèdent des structures et des compositions différentes, et donc des propriétés différentes.

On laisse lentement refroidir la fonte de manière à obtenir le solide thermodynamiquement le plus stable. En fonction des constituants que l'on ajoute à la fonte liquide, le Carbone sera soit incorporé avec le Fer pour former un composé défini de **cémentite**, soit il formera du graphite.

Lorsqu'on ajoute du **Silicium**, on forme des **fontes grises**, parce qu'elles contiennent du graphite. On dit que c'est un élément graphitisant. Cette fonte contient de la ferrite (Fe- α) et du graphite. Ce sont des fontes très fluides à l'état fondu ; on les utilise pour les moulages.

Lorsqu'on ajoute du **Manganèse**, on forme des **fontes blanches**, qui ont un aspect métallique. Le Carbone forme alors avec le Fer de la cémentite (Fe₃C). On dit que c'est un élément carburigène. Cette fonte contient de la perlite et de la cémentite. Ce sont des fontes avec un point de fusion élevé, qui restent pâteuses ; on les affine pour former des aciers.

C. Aciérie et affinage des fontes blanches

Un **acier** est un alliage de Fer et de Carbone, où la teneur en Carbone est inférieure à 1,6 % (limite de solubilité dans le Fer- γ), avec d'autres éléments comme le Silicium et le Manganèse.

On utilise aussi souvent des **aciers alliés**, auxquels on ajoute d'autres métaux de transition, le plus souvent le Nickel, le Chrome, le Vanadium et le Molybdène. Ils sont beaucoup moins oxydables et plus résistants aux contraintes mécaniques.

La fonte subit premièrement un traitement dans un **convertisseur**, où elle est chauffée en présence de dioxygène pour éliminer certains éléments. On élimine ainsi le Silicium (en SiO_2), le Carbone (en CO_2) et le Soufre (en SO_2), ainsi que d'autres éléments qui une fois oxydés se retrouvent dans les laitiers (P_2O_5 et MnO), et récupérés dans les laitiers.

III Techniques métallurgiques

La transformation du minerai de Fer en acier s'effectue en trois étapes : **l'élaboration**, la **coulée** puis la **mise en forme**.



Premièrement, on mélange le minerai sous forme d'agglomérats avec le coke, que l'on transforme dans le haut-fourneau. Dans certaines usines, on traite des ferrailles en les fondant dans un **four à arc électrique**.

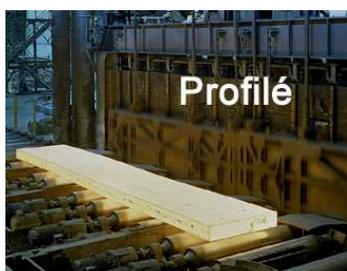
On récupère la fonte liquide dans une **poche**, et on la laisse lentement refroidir pour obtenir le type de fonte voulu, en ajoutant d'autres matériaux à celle-ci (élément graphitisant ou carburigène).



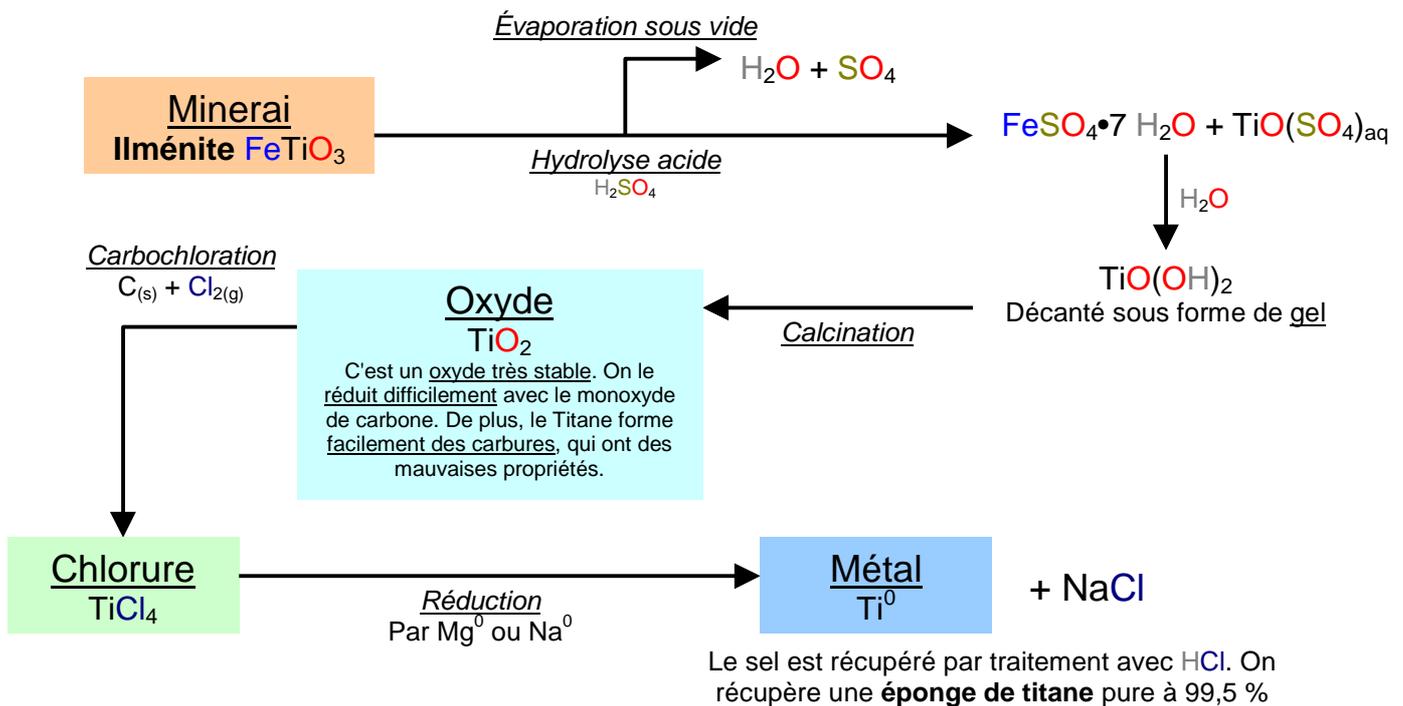
La fonte blanche est ensuite refondue dans une **station d'affinage** où on retire ses impuretés pour former de l'acier, à l'intérieur d'un **convertisseur**.

On peut distinguer l'impureté en train d'être brûlée en fonction des gaz d'échappements : *Période d'étincelles* (SiO_2), *période des flammes* (CO_2) puis *période des fumées* (SO_2).

Le métal est ensuite récupéré sous la forme d'une longue barre incandescente, tirée par un **train à fil continu**. On met en forme l'acier nouvellement formé soit en **profilés** (barres), soit en rouleaux de feuilles.



IV_ Élaboration du Titane



V_ Élaboration

Minerai principal : CuFeS_2

Pyrolyse $\rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + \text{SO}_2 + \text{FeS}$ (matte)

$\text{Cu}_2\text{S} \rightarrow$ grillage partiel $\rightarrow 2 \text{Cu} + \text{SO}_2$

$\text{FeS} \rightarrow$ Oxydation avec $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{FeO}, \text{SiO}_2$ (scorie) récupéré dans les laitiers