

Sommaire

Chapitre I : Combustible Métallurgique.....	3
I-1 Définitions.....	3
I-2 Réfractaires et fondants.....	4
I-3 Combustible Métallurgique.....	4
I-3-1 Composants essentiels des combustibles.....	4
I-3-2 Pouvoir calorifique et coefficient pyrométrique des combustibles.....	5
I-3-3 Influence de la surface de contact des combustibles avec l’oxygène sur la vitesse de combustion et sur le coefficient pyrométrique.....	5
I-3-4 Combustibles solides.....	6
I-3-5 Exigences principales pour les combustibles solides dans le haut fourneau.....	7
I-3-6 Elaboration du coke, fours (cellules) de cokéfaction.....	8
I-3-7 Composition chimique du coke et du gaz de cokerie.....	9
I-3-8 Mise au mille ou dépense du coke pour la production de 1000 kg de fonte.....	9
I-3-9 Détermination de la solidité de coke obtenu.....	9
I-3-10 Produits dérivés de la cokéfaction et leurs domaines d’emploi.....	10
I-3-11 Combustibles liquides : Le pétrole.....	10
I-3-12 Coefficient d’excès de l’air et ses valeurs pour les différents types de combustibles.....	11
I-3-13 Calcul de la quantité de chaleur (PCS et PCI) que peut fournir la combustion des éléments actifs d’une unité de fioul.....	12
I-3-14 Combustibles gazeux : gaz naturel et du haut fourneau, composition moyenne et domaine d’emploi.....	13
Chapitre II : Matières réfractaires et fondants.....	14
II-1 Propriétés des réfractaires : réfractarité, stabilité chimique et thermique.....	14
Réfractarité.....	14
Stabilité chimique.....	14
Stabilité thermique.....	15
II-2 Propriétés, résistance mécanique et stabilité de forme et du volume des réfractaires.....	15
Conductibilité de la chaleur ou calorifique.....	15
II-3 réfractaires siliceux (dinas) et silico alumineux.....	16
II-4 Transformation polymorphique de la dinas et son domaines d’emploi.....	17
II-5 Elaboration des réfractaires silico-alumineux : chamotte et demi-acide, domaines d’emploi.....	17

II-6 Réfractaires à haute teneur en alumine.....	18
II-7 Réfractaires de magnésite, leurs domaines d'emploi.....	18
II-8 Réfractaires de dolomie et de chromito-magnésites.....	19
II-9 Réfractaires de carbure de silicium.....	19
II-10 Réfractaires de carbure (à graphite) et très résistants.....	20
Réfractaires très résistants	20
II-11 Isolants ou matières calorifuges de haute porosité.....	20
II-11 poudres réfractaires.....	21
II-12 Les fondants (ou flux) utilisés au cours de l'élaboration des alliages ferreux.....	21
II-13 Emploi des fondants pendant la fusion des métaux non ferreux et nobles (précieux).....	22
La Catalyse.....	22
Le Borax.....	23
La Silice.....	23
Le carbonate de sodium.....	23
Le nitrate de potassium.....	24
Le nitrate de sodium.....	24
La Litharge.....	24
La fluorine ou spath fluor.....	24
La Farine, le charbon de bois et autres agents réducteurs.....	24

COURS : Combustibles Métallurgiques, Matières réfractaires et Fondants

Chapitre I : Généralités sur les Combustibles, Réfractaires et Fondants

Pour beaucoup de procédés pyrométallurgies, les hautes températures sont atteintes à l'aide de la combustion des différents combustibles ainsi que par l'énergie électrique.

I-1 Définitions

La combustion peut être définie comme la réaction chimique qui a lieu lors de la combinaison entre l'oxygène et une matière combustible. Cette réaction est globalement exothermique, c'est-à-dire qu'elle se produit avec un dégagement de chaleur.

Le combustible représente des composés d'hydrocarbures de différentes combinaisons et la principale source d'obtention de l'énergie thermique et calorifique. En métallurgie, le combustible occupe une grande importance et souvent sa dépense détermine le prix de revient d'un métal.

Les combustibles sont multiples (gaz naturel, pétrole, bois, charbon...).

La composition des combustibles peut être représentée par la formule générique : $C H_Y O_X$; soit pour un atome de carbone (C), on trouve en moyenne "y" atomes d'hydrogène (H) et "x" atomes d'oxygène (O).

Deux produits principaux résulteront d'une combustion correcte : du dioxyde de carbone (ou CO_2) et de l'eau (ou H_2O). En effet, si on considère la combustion "stœchiométrique" (c'est-à-dire contenant la quantité d'oxygène exacte pour faire réagir le combustible de manière parfaite), on obtient, $CH_Y O_X + (1 + y/4 - x/2) O_2 \longrightarrow CO_2 + y/2 H_2O$

Par exemple, on obtient pour le méthane : $CH_4 + 2 O_2 \longrightarrow CO_2 + 2 H_2O$

C'est le CO_2 dont on parle au niveau de la pollution atmosphérique et de la problématique du réchauffement de la planète qu'il entraîne. Il est principalement lié à l'utilisation des combustibles fossiles, elle-même liée à l'activité économique.

Production de CO_2 lors de la combustion de (on peut estimer grossièrement qu'au niveau de la valeur énergétique, 1 m³ de gaz = 1 litre de fuel).

$$1 \text{ m}^3 \text{ de gaz} = 2 \text{ kg } CO_2 / \text{m}^3$$

$$1 \text{ litre de fuel} = 2,7 \text{ kg } CO_2 / \text{litre}$$

Mais l'oxygène provient de l'air atmosphérique et celui-ci contient également de l'azote (N), qui théoriquement reste neutre dans la réaction de combustion et devrait être rejeté comme tel dans les fumées. Cependant, sous certaines conditions de combustion, cela n'est pas le cas. En effet, l'azote se combine avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote NO , NO_2 , N_2O , ... rassemblés sous la dénomination NO_x . Ceux-ci sont en partie responsables des pluies acides. Les combustibles contiennent également des traces d'autres éléments dont la combustion est nocive pour l'environnement. Le principal est le soufre dont l'oxydation fournira du SO_2 et du SO_3 . Ce dernier formera de l'acide sulfurique par combinaison avec de l'eau (par exemple, lors du contact entre les fumées et les nuages). C'est ce qui entraîne aussi la formation de pluie acide. Si le gaz naturel ne contient pratiquement pas de soufre, le mazout et le charbon sont à ce niveau assez polluants et la réglementation vise à abaisser la teneur en soufre maximale autorisée. En résumé, les produits de la combustion sont principalement constitués de CO_2 , d' H_2O , de NO_x et de SO_x .

Lorsqu'une combustion se fait avec une arrivée insuffisante d'oxygène, on parle de combustion incomplète. Celle-ci se traduit par la production d'imbrûlés (suies qui encrassent la chaudière) ou d'éléments partiellement oxydés, pouvant encore brûler, comme le monoxyde de carbone (CO).

Le CO est un gaz très dangereux : il est inodore, il passe dans le sang, se fixe sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène et empêche le transport de celui-ci jusqu'aux cellules. Une teneur de 0,2 % de CO dans l'air entraîne la mort en moins d'une demi- heure.

I-2 Réfractaires et fondants

Les réfractaires sont une industrie à haute intensité qui nécessite l'utilisation de matériaux très stables. Ces matériaux doivent pouvoir résister aux conditions requises pour la fabrication et la transformation des produits réfractaires. L'industrie métallurgique offre plusieurs minéraux broyés qui donnent des résultats favorables dans la fabrication de briques réfractaires, de sables de buses, de fondants, de revêtements, etc.

Les matériaux sont donc appelés réfractaires, parce qu'ils peuvent soutenir des actions mécaniques et physico-chimiques d'un métal liquide ou fondiez, du laitier, de poussière et de gaz à la haute température (plus de 1580-1600 °C).

Pour la production des réfractaires à titre de matière première, servent des oxydes, des silicates, des carbures et d'autres composés qui ne fondent et ne se décomposent jusqu'à la température suivante :

SiO₂ – 1713 °C, **Al₂O₃**- 2040 °C, **CaO**- 2580 °C, **MgO** – 2800 °C, **Cr₂O₃**- 2275 °C, **ZrO₂**- 2700 °C et d'autres compris des nitrures **W₂N**, **AlN** et des siliciures des métaux (par exemple : **MoSi₂**) on peut l'utiliser dans une atmosphère oxydante allant jusqu'à 1700 °C ; le **TaSiO₂** jusqu'à 2200 °C ainsi que le carbone au graphite.

Un fondant est un produit permettant d'abaisser la température de fusion d'un ou plusieurs éléments ou composés chimiques. ... Parmi les fondants utilisés, on rencontre la potasse (pour la fabrication du verre et de la céramique), ou encore le feldspath. En métallurgie, on utilise la cryolithe ou la fluorine.

Les matériaux ou agents chimiques facilitant la formation des laitiers ou scorie et régularisant la composition des laitiers ainsi que protégeant la surface des métaux fondus de l'oxydation sont appelés fondants ou flux. Ils jouent en particulier, le rôle de liage du stérile de minerai ou de produit de désoxydation des métaux.

I-3 Combustible Métallurgique

D'après l'état physique ou agrégation, les combustibles peuvent être solides, liquides et gazeux. Chacun de ces types de combustible se subdivisent en naturel utiliser tels qu'ils se trouvent dans la nature et artificiel. Les combustibles naturels sont entre autres ; la houille, le pétrole, le bois, le gaz naturel et le coke, le charbon de bois, le fuel, l'essence ainsi que les gaz de cokerie de haut fourneau sont des combustibles artificiels.

I-3-1 Composants essentiels des combustibles : Généralement, les composants principaux des combustibles sont : le carbone (sa teneur peut atteindre 85 à 90 %) et l'hydrogène qui se trouve sous forme de différents composés.

En outre dans la composition du combustible, on a entre autres, l'oxygène (O₂), l'azote (N), le soufre (S), les inclusions minérales formant la cendre incombustible et l'humidité (H₂O). La cendre, l'azote (N) ainsi que l'oxygène lié avec l'hydrogène (humidité "H₂O" ou vapeur d'eau) sont des ballasts ou lest, plus ils sont beaucoup plus la qualité est mauvaise. Le soufre peut se trouver dans le combustible en trois variétés :

- 1- Organique (S_{OR}) lié avec les éléments combustibles des carburants ;
- 2- Sous forme de pyrite "FeS₂" (S_P) ;
- 3- Sulfate (S_S) sous forme de sel de l'acide sulfurique ; exemple : le sel ou sulfate de fer ou le gypse (CaSO₄.2H₂).

Lors de l'analyse, la teneur totale de ces trois variétés de soufre désigné par (S_T), les deux premières variétés de soufre prennent part au processus de combustion avec dégagement de chaleur et on les appelle soufre volatil.

Dans les conditions solides on distingue : l'humidité ou l'eau libre ou extérieur éliminé pendant le séchage naturel sans chauffage considérable au combustible et l'humidité hygroscopique ou intérieur dont est éliminé lors du chauffage plus de 100°C , le combustible ne contenant que l'humidité hygroscopique est appelée aérosec.

Dans la composition de la cendre sont entés des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3) et des sulfates des métaux FeSO_4 ; par fois dans la cendre de quelques houilles on rencontre des éléments rares par exemple : le vanadium (V), le germanium (Ge). Quel que soit la composition de la cendre, elle diminue du combustible ; par exemple : la cendre surtout si elle est fusible enveloppe les particules combustibles et empêche leur combustion complète.

I-3-2 Pouvoir calorifique et coefficient pyrométrique des combustibles

La quantité de chaleur (Q) obtenue au cours de la combustion d'un (1kg) de combustible solide ou liquide ou 1m^3 de gaz est appelée le pouvoir calorifique du combustible. Les données arrondies caractérisant certains types de combustibles sont représentées dans ce tableau.

Combustibles	Cendre (en %)	Pouvoir Calorifique (en kj/kg)
Houille	Jusqu'à (10-15)	21000-29000
Tourbe	Jusqu'à (10-15)	23400
Bois	0,7-2,0	18.800
Pétrole	0,2-0,3	41800-46000
Gaz naturel	-	35800-39600 Kj/m ³

La quantité d'air nécessaire pour brûler 1m^3 ou 1 litre de combustible dépendra des caractéristiques de celui-ci. Mais il est bon d'avoir en tête un ordre de grandeur.

La combustion d' 1m^3 de gaz naturel ou d'1 litre de fuel requiert environ 10m^3 d'air à 15°C .

I-3-3 Influence de la surface de contact des combustibles avec l'oxygène sur la vitesse de combustion et sur le coefficient pyrométrique

À cette quantité "stœchiométrique", c'est-à-dire requise par l'équation chimique de la combustion, s'ajoute un léger excès d'air pour s'assurer que toutes les molécules de combustible soient bien en contact avec l'oxygène. En effet, il faut prévoir que certaines molécules d'oxygène vont traverser le foyer sans se lier au combustible. Dit autrement, il faut éviter d'avoir des zones, des poches, où le processus de combustion viendrait à manquer localement d'oxygène. On travaille donc avec un excès d'air comburant qui s'élève par exemple pour la combustion du fuel à environ 20 %. Il faut donc prévoir 12m^3 d'air pour brûler 1 litre de fuel.

Souvent on emploie la notion de combustible moyen avec 269 260 ou 29 310 J, nécessaire pour la comparaison des différents de types combustibles et leur dépense ; par exemple, pour 1kg de pétrole avec un pouvoir calorifique 41800 kj/ kg, a une dépense équivalente à 1,43 de combustible moyen.

Les conditions de combustion d'un combustible, sont à la base de l'obtention d'une température que l'on peut obtenir lors de sa combustion.

Cela est possible si dans un espace fermé, toute la chaleur dégagée est dépensée seulement pour le chauffage des gaz de cheminée. C'est-à-dire ne se perd pas à travers les parois dans le milieu ambiant, en ce moment on atteint la température maximale de combustion.

La création de telle condition est difficile car elle fait partie de la chaleur qui se perd et ainsi, la température réelle de combustion (T_r) est plus basse de celle théorique (T_h). Le rapport de ses deux grandeurs est appelé le coefficient pyrométrique. Il est toujours inférieur à l'unité, une partie considérable de la chaleur est emportée par les gaz de cheminées, la sortie des quelles dépend de l'excès d'air qui est à amener lors du brûlement pour une combustion rapide et complète.

Une quantité suffisante d'Oxygène est nécessaire à cet effet selon la stœchiométrie dans les réactions. Mais avec l'Oxygène on introduit aussi l'Azote, il est non seulement un produit inutile (lest), mais aussi il emporte la chaleur, les pertes de chaleur à travers des parois de l'espace du four sont proportionnelles au temps.

C'est pour quoi avec l'augmentation de la vitesse de combustion, elles sont diminuées et le coefficient η croît. Les limites ordinaires de changement de coefficient pyrométrique sont de l'ordre de 0,62-0,82. La vitesse de combustion d'un combustible solide et liquide augmente selon la croissance de la surface de contact ; donc leurs particules avec l'oxygène.

Pour la combustion rapide d'un combustible gazeux, son bon entremêlement avec l'air provoquant ainsi un mouvement tourbillonnaire est nécessaire. L'utilisation efficace de la chaleur et le coefficient pyrométrique peuvent augmenter en brûlant le combustible dans un mélange d'air et d'oxygène pur (ou industriel de 95-99,5 % d'oxygène).

Dans le même espace de four où sont traités les minerais, les combustibles sont souvent brûlés. Pour une bonne utilisation des fours, il est nécessaire de modérer le volume et la dépense du combustible. Pour la métallurgie, on utilise les combustibles à haut pouvoir calorifique avec peu de cendre.

I-3-4 Combustibles solides

Les meilleurs types de combustible sont : gaz naturel, fuel ou mazout, coke et la houille à haut pouvoir calorifique.

La houille

La houille est une roche sédimentaire carbonée qui est une qualité spécifique de charbon. De couleur noirâtre, elle fait le pont entre le lignite et l'antracite (soit 80 à 90 % de carbone). Elle provient de la carbonisation d'organismes végétaux et peut donc servir de combustible fossile. Ce combustible est utilisé depuis le XI^e siècle et son extraction dans les mines a rendu possible la révolution industrielle au XIX^e siècle. Depuis, la houille constitue une des principales sources d'énergie des pays industrialisés.

Il existe plusieurs variétés de la houille qui se distinguent l'une de l'autre par leur contenu du carbone libre, des hydrocarbures, de la cendre et des substances ressemblant à la résine dites bitumes. Lors du chauffage sans accès d'air, les hydrocarbures sont volatilisés. Mais dans le cas contraire, ils brûlent en formant de la flamme. Les charbons minéraux ayant une teneur élevée en hydrocarbure (jusqu'à 45% de volatile) forment une longue flamme lors de leur combustion ; ils portent le nom de (houilles grasses). En cas de leur bas contenu, ils appartiennent aux houilles maigres.

Dans les conditions de hautes températures, la houille de préférence à longue flamme est brûlée à l'état pulvérisé. Elle est concassée et broyée jusqu'à la taille de 0,05 mm, puis séchée et insufflée par l'air comprimé dans le four à travers des brûleurs accordés à ce but. Les fines particules du charbon brûlent rapidement, au volume seulement de la flamme le pouvoir calorifique de la houille pulvérisée doit être non

moins faible 25140 Kj/Kg. La teneur en cendre au plus de 15%, mais il est désirable que le contenu en volatiles soit plus de 25%.

Les gaz manufacturés sont remplacés, pour l'éclairage urbain par l'électricité à partir de 1880, et pour ses différents usages domestiques et industriels, notamment le chauffage et la cuisson, par le gaz naturel, surtout à partir de la crise de 1929, plus largement à partir de la fin de Seconde Guerre mondiale. La transformation du charbon en gaz suscite un regain d'intérêt avec la découverte en 1926 du procédé Fischer-Tropsch (permettant de générer un carburant liquide synthétique appelé *synfuel*).



Fig 1 : Houille avant cokéfaction

La houille est surtout utilisée actuellement :

- Dans les centrales thermiques utilisées pour la production d'électricité ou le chauffage urbain ;
- dans la sidérurgie, essentiellement pour la fabrication du coke utilisé dans les hauts-fourneaux ; entre 600 et 950 kg de charbon sont nécessaires pour produire une tonne d'acier ;
- le chauffage individuel au charbon est en recul par rapport à d'autres sources d'énergie.

Par ailleurs, des millions de tonnes de charbon ont alimenté des milliers de centrales thermiques de par le monde, devenant source de nuisances : pollution de l'air, gaz à effet de serre, accumulation de cendres et mâchefer.

Le coke

Le **coke** est un combustible qui à l'absence de l'air, est obtenu par pyrolyse de la houille dans les fours à coke ou cellules ou chambres de cokéfaction; ces fours sont regroupés en batteries dans une usine appelée cokerie. Pour certains fours métallurgiques, il est nécessaire d'utiliser un combustible solide en morceau, résistant mais poreux pour une combustion rapide. La houille est assez résistante, mais lors du chauffage elle éclate, en outre elle est dense et en morceau brûle lentement. Le combustible utilisé pour la fusion dans le haut fourneau sert non seulement pour le chauffage de la charge et de sa fusion, mais aussi comme principal agent chimique pour les processus de réduction dans le four et la carburation de fer.

Il convient aussi de prendre en considération que le combustible solide occupe un volume considérable du haut fourneau et sa majeure partie doit se maintenir faible en morceau et résistante jusqu'au bas du four. C'est-à-dire pour le procédé au haut fourneau, il est nécessaire d'utiliser un combustible dur, solide et non agglomérant.

I-3-5 Exigences principales pour les combustibles solides dans le haut fourneau

- Haut pouvoir calorifique ou chaleur de combustion.
- Suffisante résistance et thermo stabilité pour que lors du chauffage et passage à travers du four, il ne se forme pas beaucoup de fines braises.
- Manque d'agglomération (frittage) dans les conditions du processus de haut fourneau.
- Suffisante dureté d'après les contenus des impuretés nuisibles (soufre et phosphore)

La thermo stabilité et l'agglomération des combustibles naturels font qu'ils ne répondent pas aux exigences citées.

C'est pourquoi qu'il faut spécialement préparer le combustible solide (le coke ou charbon de bois) pour la fusion au haut fourneau. Cependant, le charbon de bois a déjà perdu son importance et dans les hauts fourneaux, on ne l'emploie guère par ce qu'il est peu solide.

I-3-6 Elaboration du coke, fours (cellules) de cokéfaction

La qualité du coke est déterminée en grande partie par celles des houilles ; par exemple plus la teneur en impureté (S, P, Cendre) est grande, plus la qualité du coke est mauvaise et dans le cas contraire le coke obtenu est d'une bonne qualité donc résistante. La charge carbonieuse est concassée avant l'agglomération, il est donc nécessaire de que dans cette charge, la diminution de la taille des houilles au-dessous de 5 à 3 mm soit non moins de 92-94% pour éviter l'obtention des cokes avec fissures. En suite elle est enrichie pour diminuer la teneur en cendre.

Pour les cokes utilisés dans la sidérurgie, la pâte est enfournée dans des fours dits à chambre verticale ou cellules ayant pour largeur allant de 0,4 à 0,8m et pour longueur 15m, une hauteur plus ou moins 5m. Le volume utile d'une telle chambre constitue 30 m³ et plus lorsque la masse du lit d'agglomération est environ 22 tonnes.

Les fours à coke sont assemblés en batterie, chaque batterie a dans sa composition de 40 à 70 fours. La capacité de production d'une batterie peut atteindre 1500 t /j et plus. Les cellules de cokéfaction sont disposées en rangé ou en ligne dans les parties supérieures de la batterie. Entre les cellules il y a des entre-deux (des espaces) de chauffage dans lesquels des produits de combustion de gaz pour leur passage de l'un entre-deux à l'autre, il y a des carneaux de passage. Les régénérateurs destinés pour le chauffage du gaz et de l'air sont disposés dans la partie inférieure des batteries. L'enfournement de la charge est fait du haut et la température de maçonnerie en briques des entre-deux de chauffage est variée dans les limites de 1350-1420 °C.

La première machine à intervenir dans le processus de fabrication du coke est l'enfourneuse qui, par l'intermédiaire de trémies, va enfourner une certaine quantité de houille (souvent autour de 40 tonnes) à travers des bouches (appelées tampons) situées à la cime des fours.

Pendant le chauffage, la pâte à coke passe par divers stades. La première étape jusqu'à 150 °C est le séchage. Elle se caractérise par l'évaporation de l'eau. Vers 350 °C, la pâte se ramollit et sa viscosité diminue. Elle aura une valeur minimale aux environs de 450 °C. Ces phénomènes s'accompagnent d'un fort gonflement de la pâte. Ensuite sa viscosité augmente et elle se solidifie vers 550 °C. Au-dessus de cette température vers 1000 °C, on passe à la phase de carbonisation du semi-coke. La pâte se contracte et il y a émission de matières volatiles qui sont récupérées. La période de cokéfaction dure 14 à 20 heures.

La défourneuse pousse avec un béliet et par l'intermédiaire d'une crémaillère de plus de 10 mètres le coke chaud (environ 1 000 °C) vers le couloir du guide-coke. Ce guide-coke sert, par l'intermédiaire d'un couloir, à faire passer le pain de coke, pour tomber dans le wagon du coal-car (également appelé loco).



Fig 2 : Coke après sa sortie du four ou défournement.

Le coal-car va ensuite dans une tour d'extinction dans laquelle le coke sera refroidi par aspersion d'eau. Ce refroidissement s'accompagne d'un fort dégagement de vapeur d'eau puisque ce sont environ 80 m³ d'eau (2 m³ d'eau sont nécessaires pour éteindre 1 tonne de coke à 1 000 °C) qui sont déversés en 1 à 2 minutes, le tiers environ s'échappe en vapeur.

Un autre rôle de cette extinction à l'eau est de retirer du soufre du coke, qui est un élément particulièrement gênant en métallurgie, lorsque le coke est utilisé dans les hauts fourneaux.

Le refroidissement s'accompagne d'une fragmentation en morceaux de diverses tailles. Avant son utilisation, il est criblé afin de trier les morceaux en fonction de leur taille. La qualité de coke obtenu est plus haute (peu de fissure) et les dégagements nocifs sont éliminés dans l'atmosphère.

I-3-7 Composition chimique du coke et du gaz de cokerie

Au cours de la cokéfaction de la houille, les substances volatiles sont amenées dans les réfrigérants où de ces substances, sont condensés des produits chimiques de valeur : benzène (C₆H₆), naphtalène (C₁₀H₈), sulfate d'ammonium (NH₄)₂SO₄, méthyle de benzène ou toluène C₆H₅-CH₃, goudron de houille ou phénol (C₆H₅OH).

I-3-8 Mise au mille ou dépense du coke pour la production de 1000 kg de fonte

La consommation de combustible lors de la fabrication de la fonte brute est une caractéristique essentielle de l'exploitation du haut-fourneau.

En termes de charge, on obtient 750-800 kg de coke et 320-330 kg de gaz de cokerie ; ce dernier comprend : 55-58 % d'hydrogène, 2-20% de méthane (CH₄) ainsi qu'environ 8% d'azote (N₂).

Le pouvoir calorifique du gaz de cokerie constitue de 17,5 à 18,5 MJ/m³ et peut servir comme un bon combustible. Les cokes obtenus renferment 88% de carbone (dans certains cokes plus de 92%), de 8 à 12% de cendre, de 2 à 5% d'humidité, de 0,5 à 1,8% de soufre et de 0,02 à 0,2% de phosphore. Le soufre est une impureté nocive et pour l'éliminer dans le processus de haut fourneau, il convient d'augmenter la dépense des fondants ce qui mène à l'altération des indices de fusion.

I-3-9 Détermination de la solidité de coke obtenu

Le coke est de couleur gris argentin et en cas de la percussion ou choc d'un morceau à l'autre, il émet le son. La composition granulométrique a une grande importance dans le processus du haut fourneau. D'après sa granulométrie, le coke doit être uniforme, autrement dit, avoir l'homogénéité dimensionnelle. Les dimensions désirables des morceaux de coke varient entre 25 et 60 mm Une dimension de coke moins de 20 mm est inadmissible de charger dans le four car avec cela, la perméabilité aux gaz de la charge est altérée.

La résistance mécanique du coke doit être grande. Pour déterminer cette résistance et la tenue à l'usure par frottement du coke, on utilise un tambour sur la surface intérieur duquel 4 cornières sont soudées sur toute sa longueur. Pour essayer, on met 50 kg de coke dans le tambour qui tourne avec une fréquence de 25 Tr/mn pendant 4 mn et en suite le coke est tamisé.

Comme principaux indices de solidité ou résistance servent de grandeurs de sortie de classe plus de 40 mm (dit indice 40 mm) et moins de 10 mm (indice 10 mm) exprimé en %. L'indice 40 mm doit constituer de 72-82 % alors que l'indice 10 mm entre 8,5-10 %.

Plus l'indice 40 mm est haut et l'indice 10 mm bas, plus la qualité ou résistance du coke est haute. Le plus bas pouvoir calorifique du coke est environ 29 MJ/ kg.



Fig 2 : Blocs de coke après refroidissement.

I-3-10 Produits dérivés de la cokéfaction et leurs domaines d'emploi

Lors de la fusion au haut fourneau, une partie du coke peut être remplacé par des combustibles gazeux (gaz naturel, gaz de cokerie), liquide (fuel ou mazout ; un liquide sombre épais et visqueux de densité environ 900-1000 kg/m³)

Les types de combustibles indiqués constituent une source de gaz réducteur favorisant l'amélioration des processus de réduction des oxydes de fer, ce qui amène à l'économie sensible du coke.

Le coke est principalement utilisé en sidérurgie pour réduire le minerai de fer dans un haut fourneau afin d'obtenir la fonte qui est ensuite transformée en acier. Il est également utilisé pour l'élaboration de la fonte en cubilot, la fabrication de ferroalliages et dans certains fours à chaux.

Constitué de blocs de taille homogène capables de résister à de fortes pressions, c'est un combustible présentant un pouvoir calorifique élevé, permettant le traitement de minerais ou de charges métalliques dans des fours verticaux de plus ou moins grandes dimensions. Son apport dans le processus comprend à la fois la réduction des oxydes, l'obtention de températures élevées et un apport en carbone.

Le rôle du coke dans le haut fourneau est de :

- Fournir la chaleur nécessaire pour la marche du processus du haut fourneau
- Réduction du fer et des oligo-éléments de leurs liaisons dans le minerai et en même temps carburation du fer.
- Ameubler la charge dans le haut fourneau afin d'avoir une bonne perméabilité aux gaz, grâce à sa grande résistance à l'écrasement.

I-3-11 Combustibles liquides : Le pétrole

Obtention du mazout (du fioul), sa composition chimique et son pouvoir calorifique

Le pétrole peut servir non seulement comme un carburant, mais aussi une matière brute de valeur pour l'industrie chimique. Il est composé d'un mélange de différents hydrocarbures.

Le pétrole est distillé dans les usines chimiques pour extraire les substances qui bouillent ou distillent à basse température : essence ou benzine (30-205 °C), kérosène (200-300°C), gasoil (250-400°C) etc...

Le mazout est le résidu lourd de la distillation du pétrole, il renferme environ 84-90 % de carbone, de 2 -10 % d'hydrogène, de 0,3-0,5 % d'oxygène, de 0,5-3 % de soufre etc... c'est un excellent combustible liquide avec un pouvoir calorifique de 41800 KJ/kg et une matière brute pour l'obtention de l'huile de graissage, du goudron de pétrole.

Le mazout est chauffé jusqu'à 100°C pour diminuer la viscosité et assurer une bonne pulvérisation. A travers le soufflet, l'air comprimé est introduit dans le four pour pulvériser le mazout. A l'aide des pulvérisateurs, ces fines gouttes sont brûlées en formant de la flamme. Dans certains types de fuel, la teneur en soufre est considérable (environ 4 %), le soufre est nuisible et inutile dans les fours de raffinage.

I-3-12 Coefficient d'excès de l'air et ses valeurs pour les différents types de combustibles

L'air primaire, avec quoi on souffle le mazout est souvent insuffisant pour une combustion complète, l'air secondaire est donc amené pour l'obtention d'une quantité suffisante d'air. D'après les calculs, la quantité minimale d'air indispensable pour le brûlement complet d'une unité de combustible est appelée dépense théorique de l'air.

En pratique, pour le brûlement complet d'1 kg de combustible, il est nécessaire d'amener de l'air en quantité dépassant l'indispensable théorique parce qu'il est difficile d'obtenir un brassage parfait de l'air avec le combustible.

Autrement dit, on parlera de « combustion en excès d'air » chaque fois que l'on détectera la présence d'oxygène dans les produits de combustion. L'excès d'air peut résulter soit d'un réglage du volet d'air au niveau du brûleur (brûleur à air soufflé), soit d'une impossibilité à régler l'arrivée d'air (brûleur atmosphérique). Cet excès d'air est indispensable pour une combustion complète.

L'air en excès impliquera :

- Une augmentation des pertes par les fumées.
- Une diminution du rendement de la chaudière ou le four.

Ainsi cette augmentation entraînera un accroissement des dépenses énergétiques sur une saison de chauffe (consommation de combustible plus importante), qui restent non négligeables même pour de petites puissances de chaudières ou de fours.

C'est pourquoi lors de la combustion du carburant il est nécessaire d'observer la proportion correcte entre la quantité de combustible et de l'air entrant pour la combustion dans le four en assurant aussi leur bon mélange.

On caractérise l'air en excès par le **facteur d'air F_a** ou **taux d'aération n** en utilisant la relation suivante :

$$n = \frac{\text{Volume d'air réellement admis au brûleur}}{\text{Volume d'air théorique}} \quad \text{Soit} \quad n = \frac{V_a + V_{EA}}{V_a}$$

Avec : V_a : Pouvoir comburivore [$\text{m}^3_{(n)}$ d'air / unité de combustible]
 V_{EA} : Volume d'air en excès [$\text{m}^3_{(n)}$ d'air en excès / unité de combustible]

Ce rapport (n) est aussi appelé coefficient d'excès d'air et désigné par α

NB : Généralement « n » est fourni par les relevés réalisés sur site à l'aide d'analyseurs de fumées.

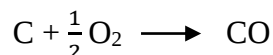
$$V_{EA} = V_a \times (n - 1)$$

Pourcentage d'excès d'air $EA\%$: $EA\% = (n-1)*100$

Valeur d' α pour certains types de combustible

Dénomination	α
Houille	1,2 - 1,5
Combustible pulvérisant	1,0 - 1,25
Fuel	1,02 - 1,1
Combustible gazeux	1,05 - 1,1

Dans le cas où les conditions technologiques nécessitent une combustion incomplète du carburant, alors le coefficient α peut être petit que l'unité ; Ex : 0,8-0,9 (pour obtenir le noir de carbone ou la suie). Ainsi en cas de manque d'oxygène, la combustion est incomplète et se forme le monoxyde de carbone.



Les particules incandescentes de carbone non brûlé forment une flamme en dégageant activement le noir de carbone, ces particules et le monoxyde de carbone sont amenés avec des gaz de cheminée (fumée).

I-3-13 Calcul de la quantité de chaleur (PCS et PCI) que peut fournir la combustion des éléments actifs d'une unité de fioul

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous la pression atmosphérique normale, de l'unité de combustible, celui-ci ainsi que les produits de combustion étant à 0 °C.

Dans le milieu scientifique, on l'exprime souvent comme suit :

→ Notation : **PC**

→ Unité : **[kJ/kg(n) de combustible]** ou **[kJ/m³(n) de combustible]**

→ Remarque : **(n)** signifie que toutes les réactions se produisent dans les conditions normales de température et de pression.

Néanmoins, suivant le domaine d'application, on peut l'exprimer dans d'autres unités plus pratiques, par exemple, en kWh/m³ pour le gaz ou kWh/litre pour le fuel. Dans les produits de la combustion, il y a de la vapeur d'eau, issue de la réaction de l'hydrogène du combustible. Dans certains appareils de combustion, l'eau reste à l'état de vapeur et s'échappe dans cet état vers la cheminée.

La chaleur nécessaire pour vaporiser l'eau est donc perdue. Au contraire, certains appareils permettent de condenser l'eau et de récupérer l'énergie dégagée par l'eau pendant son changement de phase. On pense typiquement aux chaudières dites à condensation qui utilisent ce procédé pour augmenter leur rendement. Sur base de cette distinction, on définit deux pouvoirs calorifiques :

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI ou H_I), mesuré en conservant l'eau à l'état vapeur, Le pouvoir calorifique supérieur (PCS ou H_S), mesuré après avoir récupéré la chaleur de condensation de l'eau.

$\text{PCS} - \text{PCI} = m \text{ H}_2\text{O} \cdot L_v$

$$L_v = 2500 \text{ kJ/kg aux CNTP}$$

Masse d'eau contenue dans les fumées

Elle dépend de la quantité d'hydrogène présente dans le combustible

Exemple : m (H₂O) = 1,6 kg dans les fumées pour la combustion de 1 m³(n) de gaz naturel

Quelques PCI/PCS

Gaz naturel : PCI et PCS d'environ 10.2 kWh / m³(n) et 11.3 kWh / m³(n)

Fioul domestique : PCI et PCS d'environ 10 kWh / l(n) et 11 kWh / l(n)

Cas des combustibles “purs” exemples : Le gaz “riche” présente un PCI d’environ 36 MJ/m³ et un PCS d’environ 40 MJ/m³. Le fuel présente un PCI d’environ 36 MJ/litre et un PCS d’environ 39 MJ/litre.

Le pouvoir calorifique de quelques combustibles est mentionné dans le tableau ci-dessous.

PCI du combustible				
Vecteur	Unité	(en MJ)	(en kWh)	(en Wh)
Gaz naturel pauvre	m ³	32,97	9,16	9160
Électricité	KWh	3,6	1	1000
Gaz butane	Kg	45,56	12,66	12 660
Gaz naturel riche	m ³	36,43	10,12	10 120
Houille	Kg	29,3	8,14	8 140
Anthracite	Kg	31,4	8,72	8 720
Coke	Kg	28,5	7,92	7 920
Propane	L	23,72	6,59	6 590
Gasoil chauffage	L	5,87	9,96	9 960
Fuel léger	L	36,37	10,10	10 100
Fuel moyen	L	37,68	10,47	10 470
Fuel lourd	L	38,16	10,60	10 600
Fuel extra lourd	L	38,58	10,72	10 720

On peut déduire le PCI par unité de masse d’un combustible pur caractérisé par la composition CH_Y O_X par la formule expérimentale suivante exprimée en MJ/kg :

PCI = enthalpie de réaction / masse molaire

$$= [(393.6 + 102.2 Y - (110.6 + 204.4 Y) x) / (1 + Y)] / [12 + Y + 16 X] \text{ en [MJ/kg]}$$

Cette formule est d’application pour tous les combustibles, qu’ils soient fossiles ou issus de la biomasse. Néanmoins, il donne l’énergie pour un combustible pur (c’est-à-dire non dilué par un agent supplémentaire comme de l’eau).

I-3-14 Combustibles gazeux : gaz naturel et du haut fourneau, composition moyenne et domaine d’emploi

Les avantages principaux du gaz naturel en comparaison du charbon et du pétrole sont :

- Facilité d’extraction et l’acheminement par les gazoducs
- Possibilité de combustion sans traitement préalable
- Absence de la cendre

Si la dépense moyenne pour l’extraction et le transport du charbon est égale à l’unité, les grandeurs correspondantes aux pétroles et aux gaz naturels seront égales à 0,25 et 0,1.

La composition moyenne du gaz naturel est la suivante en %.

Dénomination	Méthane	Ethane	Propane	Butane	Pentane	Dioxyde de carbone	Azote
Formule	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂
Contenu (en %)	88-98,7	0-6,4	0-2	0-3	0-1,6	0-0,6	0,13-0,8(1,00)

Sa densité varie de $0,62 - 0,85 \text{ kg/m}^3$, le pouvoir calorifique de $35800 \text{ à } 39600 \text{ kJ/m}^3$. D'après la simplicité de livraison et d'utilisation ainsi que d'après la possibilité d'atteindre des hautes températures avec le gaz naturel peut concurrencer seulement l'énergie électrique.

Cependant, elle coûte presque dix fois plus chère. Le gaz naturel est souvent utilisé en métallurgie des métaux non ferreux ; par exemple : dans les fours à cuivre, dans les fours de fusion ou à réverbère, tandis qu'en sidérurgie sont utilisés les gaz artificiels, de cokerie, gaz de haut fourneau etc...

Combustion des gaz : Seuls les gaz brûlent, que ce soient des gaz de distillation provenant de corps chauffés à l'état solide ou de vapeurs de liquides inflammables. En pratique, c'est le mélange « gaz-combustible - oxygène de l'air » qui est inflammable, à 2 conditions : - que l'énergie d'activation soit suffisamment élevée ; - que la concentration du mélange soit comprise entre certaines limites.

Concentration stœchiométrique : concentration qui correspond à la réaction chimique complète et qui donne la température la plus élevée.

Point d'ignition (ou point d'inflammation) : C'est la température minimale à laquelle un mélange combustible de gaz et d'air s'enflamme en présence d'une flamme avec persistance de flammes. Ce point varie avec la pression du mélange gazeux.

Point auto-ignition (ou point d'auto inflammation ou d'auto combustion) : Il s'agit de la température à laquelle un mélange gazeux combustible peut s'enflammer spontanément sans la présence de flamme ou d'étincelle.

Point éclair : Le point éclair d'un liquide combustible est la température minimale à laquelle il émet suffisamment de vapeurs pour former, avec l'air ambiant une atmosphère inflammable. Cette grandeur physique est en principe propre aux liquides dits inflammables.

Chapitre II : Matières réfractaires et fondants

II-1 Propriétés des réfractaires : réfractarité, stabilité chimique et thermique

Les matières réfractaires sont subdivisées selon le degré de réfractarité comme suit :

- Réfractaires ordinaires : $1580-1770 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- De haute réfractarité : $1770-2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Réfractaires très résistants : 2000 et plus

L'importance des réfractaires en métallurgie est très grande parce que dans la plupart des cas, les métaux et leurs alliages sont élaborés à la haute température.

Les propriétés essentielles sont entre autres :

Réfractarité

C'est la propriété du matériau à résister à l'action des hautes températures. Elle correspond à la température de ramollissement du matériau sous l'action de sa propre masse.

Pour définir la possibilité de l'emploi des articles réfractaires pour la maçonnerie d'éléments du four, on a adopté à déterminer celle par la température du début de la déformation sous la charge de 196 kpa . Cette charge ne dépasse pas les charges réelles dans les fours métallurgiques par exemple : les articles de chamotte ayant la réfractarité non moins de $1580-1770 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et la température de déformation de $1200-1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sous la charge de 196 kpa sont employés dans les fours où la température ne dépasse pas $1100-1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. En cas de produit en silice (dinas) ayant la réfractarité non moins de $1700 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mais plus hautes températures de déformation sous la charge de 196 kpa ($1640-1650 \text{ }^{\circ}\text{C}$) sont employés dans les fours avec la température d'exploitation jusqu'à $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Stabilité chimique

C'est l'aptitude d'un réfractaire de résister à l'action chimique des produits qui se forment dans les fours : Laitier, Matta, métaux en fusion, poussière, vapeur et gaz. Par rapport à l'action des laitiers les réfractaires sont : acides, basiques et neutre.

Aux réfractaires acides sont rapportés des briques de silice, de quartz. Les articles de dinas sont assez stables envers des laitiers acides, mais ils sont rapidement attaqués (rongés) par des laitiers brique contenant une qualité considérable de CaO et de MgO.

Aux réfractaires basiques sont rapportés les briques de dolomie et de magnésie, ces réfractaires sont stables à l'action des laitiers basiques mais ils sont rongés par des laitiers acides.

En dépendance du milieu, les réfractaires amphotères ; Al_2O_3 et C_2O_3 peuvent manifestés des propriétés de réfractaires acides ou basiques.

Les réfractaires neutres peuvent être employés dans les fours métallurgiques en cas de laitiers acides ou basiques. Aux réfractaires neutres sont rapportés la chamotte, la chromite (FeOC_2O_3) contenant à titre de composant principal FeOC_2O_3 ou FeOC_2O_4 ainsi que les matériaux contenant du carbone. Ces derniers, en s'oxydant avec l'une ou l'autre vitesse sous l'action de l'oxygène sont consommés peu à peu.

Stabilité thermique

C'est l'aptitude des réfractaires à résister au changement brusque de la température, il importe surtout pour les réfractaires dans les fours à chauffage et refroidissement discontinu. Elle est déterminée par la qualité d'alternance de chauffage jusqu'à 850 °C et le refroidissement (par l'eau courante à 20 °C jusqu'à la perte de 20 % de la masse du réfractaire à la suite de sa fissuration. Les pièces de dinas et de magnésie ont la moindre stabilité thermique d'un ou deux changements thermiques tandis que la stabilité thermique des articles de magnésie et de chromite est assez grande 12 à 15 changements thermiques.

II-2 Propriétés, résistance mécanique et stabilité de forme et du volume des réfractaires

Conductibilité de la chaleur ou calorifique

C'est la propriété des réfractaires de transmettre la chaleur, plus la conductibilité calorifique des réfractaires est haute, plus la chaleur sera perdue à travers de la maçonnerie du four.

Résistance mécanique

C'est l'aptitude des réfractaires à maintenir les charges mécaniques dans l'ordinaire condition thermique, plus la résistance à la compression ou à l'écrasement est haute, plus la qualité des réfractaires est mieux. A la température ordinaire, la résistance à la compression constitue de 7,8-9,8 Mpa, mais avec l'élévation de la température, elle diminue considérablement. Dans les fours métallurgiques, les pièces réfractaires sont soumises à la compression sous l'action de la masse propre de la maçonnerie réfractaire dont l'habitude ne dépasse pas 0,2 Mpa et dans les cas rares, elle peut atteindre 0,3-0,4 Mpa.

Porosité

La porosité, est le nombre de petits canaux présents dans la majeure partie d'un matériau qui peuvent permettre aux liquides ou aux gaz de passer. Les matériaux très poreux sont prisés dans de nombreux domaines industriels, notamment en catalyse où les zéolithes hautement poreuses sont considérées comme l'un des catalyseurs les plus productifs, mais où la porosité a également un rôle précieux à jouer dans la conception et la mise en œuvre du matériau réfractaire. En règle générale, plus le niveau de porosité d'un matériau est élevé, moins il est dense et plus il est pauvre en conducteur thermique.

Ces deux phénomènes s'expliquent par les trous dans le matériau en vrac remplis d'air (ou d'un autre gaz - les gaz sont de mauvais conducteurs de chaleur). Il va donc de soi que plus de trous signifie plus d'air, ce qui signifie une conductivité thermique plus faible. Ceci, lorsqu'il est combiné avec un matériau qui a déjà une tolérance très élevée à la température, en fait un excellent matériau réfractaire. Un autre avantage des

matériaux plus poreux est que les coûts de transport sont réduits, en raison de leur poids inférieur par unité de volume donnée. Les revêtements Tundish sont d'excellents exemples de cas où la porosité est importante, où souvent les structures surélevées doivent ne pas être si lourdes qu'elles peuvent s'effondrer sous la charge.

Les réfractaires chromés de magnésie courants sont utilisés ici pour cette raison, entre autres raisons. Leurs structures poreuses aident à la purification du métal fondu, empêchant l'oxydation et absorbant les impuretés non métalliques lors du passage du métal fondu. La porosité est également un facteur important pour le plâtre réfractaire, qui ne peut pas être lourd ou très dense, sinon il ne fonctionnera tout simplement pas bien comme une « colle » pour lier ensemble les briques réfractaires ou réparer les réfractaires fissurées.

En outre, dans le cas des pièces moulées au sable vert, la porosité du matériau réfractaire de chrome est cruciale pour permettre aux gaz accumulés de s'échapper ne pas y parvenir à base pourrait entraîner des défauts de surface ou un mouillage. La porosité, comme mentionné, contribue à l'isolation thermique, car l'air est un conducteur à mauvaise température. De plus, il est largement reconnu que la porosité est directement liée à la perméabilité. La perméabilité est l'un des principaux facteurs déterminants de la longévité des matériaux réfractaires. Pour résumer, un réseau de pores uniformes, petits et uniformément répartis est avantageux et offre la conductivité thermique la plus faible.

La porosité de la plupart des réfractaires varie entre 15-22 % (28 %). Celle des réfractaires légers peut constituer de 50-80 %. Dans les pièces réfractaires, en grande partie les pores sont communiqués entre eux même, de tel pore est appelé "ouvert ou communicant". Tandis que l'autre partie est isolée et on la considère comme "fermé" (non communicant). On distingue donc la porosité totale ou vraie composée de pores ouverts et fermés et celles apparentes ou ouvertes n'est constituées que des pores ouverts. La vraie porosité apparente est définie par le rapport du volume des pores communicants sur le volume total du produit. La vraie porosité comme celle apparente est exprimé en %. En règle générale, plus la porosité est grande, plus la stabilité des réfractaires envers des laitiers est petite.

Constance ou stabilité de forme et de volume

C'est l'une des exigences importantes des réfractaires ; par exemple : si au cours du chauffage le volume des briques est considérablement changé, alors on ne peut pas compter sur le maintien de stabilité de la maçonnerie des murs et de la voûte du four. Alors la pièce carbonée possède la plus grande permanence tandis que les dinas, la moindre. D'autres, lors du chauffage, les produits de chamotte sont resserrés (contractés) alors que les articles de dinas sont élargies. Les signes extérieurs déterminent la forme régulière des réfractaires ainsi que l'absence des fissures de l'incurvation des traces de fusion des casses d'angle et de bord. La qualité des réfractaires caractérisée par l'homogénéité de la composition et de l'absence de la ségrégation par exemple : l'amas des inclusions.

Pour le maçonnage des fours métallurgiques, les articles réfractaires sont fermés sous l'aspect comme les briques de forme droite et en coin de bague de bouchon de poudres... les briques droites sont de petites dimensions par exemple :

230 x 113(115) x 65(75) mm et de grandes 250 x 125 x 65 mm ; 300 x 150 x 75 mm ; 460 x 150 x 75 mm ; 520 x 150 x 75 mm Ainsi lors du choix des réfractaires, il est nécessaire de tenir compte de leur résistance mécanique, de l'état de fonctionnement la thermo stabilité, de la dilatation volumique, de la porosité, de l'inertie chimique à l'oxygène, au gaz carbonique CO₂, de l'action des laitiers liquides...

II-3 réfractaires siliceux (dinas) et silico alumineux

Les articles réfractaires en dinas sont fabriqués en quartzite de 93-98 % de silice (SiO₂) avec l'addition du lait de chaux Ca(OH)₂ qui joue le rôle de liant. La quantité de monoxyde de calcium CaO oscille entre 1,5-2,5 %. Le mélange obtenu à l'humidité de 5 à 9 % est pressé dans les moules convenables. Après pré

séchage, il est soumis à la cuisson pendant quelques jours (2-4) en élevant la température environ 1480°C et en diminuant lentement. La particularité de la dinas est que, la silice de la dinas est essentiellement opposée à plusieurs modifications cristallines. Le quartz (densité 2,65t/m³), le tridymite (densité 2,23) et le cristobalite (densité 2,29) sont différents par leur denté et par le coefficient de dilatation volumique au cours du chauffage.

II-4 Transformation polymorphique de la dinas et son domaine d'emploi

La résistance nécessaire des articles en dinas est atteinte par la transformation polymorphe du quartz en tridymite entre 1200-1450°C et en cristobalite au-dessus de 1460°C, ainsi que par la formation de silicate de calcium (CaSiO₂). Lorsqu'on constate une petite quantité jusqu'à 1,5 % de FeO dans le quartz en Tridymite, les produits en dinas sont rependus dans la métallurgie des métaux non ferreux. Les voutes, soles et murs des fours travaillant avec des laitiers acides sont en dinas.

Certaines propriétés des produits en dinas sont représentés dans le tableau ci-dessous

Indices	Grandeurs
Teneur en SiO ₂ , (en %)	93-98
Réfractarité (en °C)	1700-1710
Température du début de déformation sous la charge de 196 Kpa, (en °C)	1640-1650
Porosité apparente (ouverte), (en %)	20-23
Résistance à la compression, (en Mpa)	17,5-22,5
Densité, (en t/m ³)	2,38-2,44

Ainsi les produits en dinas sont solides jusqu'à 1700°C et résistant à l'état de fonctionnement, mais leur stabilité thermique est relativement basse. Pour augmenter cette dernière, on introduit dans la charge jusqu'à 30% de chromite (FeOC₂O₃) en obtenant la dinas chromite ou le carbone de silicium (SiC) ou carborundum ou réfractaire dinas-carborundum.

Les réfractaires de silice sont gardés dans les locaux couverts parce que sous l'action des précipitations leur qualité s'empire sensiblement.

II-5 Elaboration des réfractaires silico-alumineux : chamotte et demi-acide, domaines d'emploi

Les argiles réfractaires silico-alumineux (28-45%) d'alumine Al₂O₃ cuite dont la principale composante est la kaolinite (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O) sont appelés chamottes. Pour fabriquer les articles de chamotte, l'argile est cuite à 1400°C à la suite de laquelle elle perd de l'eau et se transforme en chamotte (3Al₂O₃.2SiO₂). Par cette perte d'humidité, cette dernière ne deviendra plus plastique. Pour servir de liant, elle est broyée et mélangée avec de l'eau et de l'argile brut. La pâte demi-sèche ainsi obtenue est pressée dans les moules en suite elle est séchée et calcinée pour éviter les fissures à la température graduellement élevée jusqu'à 1300-1450°C et de la même manière elle est basse. Les pièces de forme complexe sont formées de la masse plastique contenant de l'argile brute. En outre de l'alumine, la chamotte renferme de la silice, c'est pourquoi étant une combinaison de la silice avec de l'alumine, elle est neutre.

Certaines propriétés sont mentionnées dans le tableau suivant :

Indices	Grandeurs
Réfractarité (en °C)	1580-1730
Teneur en Al_2O_3 , (en %)	28
Contraction (retrait) consécutive de 1250-1400 °C (en %)	0,7
Température de déformation sous la charge de 196 Kpa, (en %)	1300-1400

La chamotte est relativement thermo stable et bon marché et est lentement détruite par les laitiers acides comme les basiques. Les articles de chamotte comme relativement moins réfractaires sont employés pour le maçonnerie des fours à calcination d'ouvrage des voutes des fours à griller les minerais.

D'après les conditions de résistance mécaniques, on ne recommande pas d'employé la chamotte pour la maçonnerie des parties de four fonctionnant à plus de 1500°C.

Les réfractaires silico-alumineux contenant pas plus de 25-27% d'alumine et non moins de 65% de silice sont rapportés aux réfractaires demi-acides. La particularité de la réfractarité des articles fabriqués de ces derniers dans les limites de 1610-1700°C, c'est la constance de volume au cours de la calcination obtenue à la suite de la croissance des grains quartzeux compensant du retrait d'argile. Les propriétés des réfractaires demi-acides sont comme les mêmes que pour la chamotte.

II-6 Réfractaires à haute teneur en alumine : disthène (cyanite), andalousite et sillimanite, leur subdivision d'après la teneur en alumine et la réfractarité

Aux réfractaires à haute teneur en alumine sont référés des articles contenant de 45 à 85 (90%) d'alumine. Les réfractaires riches en alumine sont obtenus d'autres silicates naturels d'alumine ; cyanite signifiant un bleu foncé, synonyme (disthène), andalousite (de l'Andalousie province d'Espagne où a été trouvé) et sillimanite (nommé à l'honneur d'un chimiste américain) dont la formule chimique (Al_2SiO_5 ou $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{O}$) en dépendance de la teneur en alumine, les produits sont subdivisés en trois classes.

A - de 45 à 62% à 1750°C d'alumine

B - de 62 à 72% à 1800°C d'alumine

C - de 72 à 85% (90%) à plus de 1800°C jusqu'à 1850°C

Les pièces riches en alumine possèdent de bonne résistance à l'action des laitiers acides et plus encore à l'action des laitiers basiques. On les utilise dans la maçonnerie des murs et des voûtes des fours électriques.

II-7 Réfractaires de magnésite, leurs domaines d'emploi

Les réfractaires de magnésite sont des articles qui contiennent non moins de 85% de MgO ou périclase (minéral) dont dans la nature se forme rarement. Artificiellement on obtient de la matière brute magnésienne pas plus de 4% de CaO. Pour sa fabrication, comme matière première, la matière minérale naturelle magnésite (MgCO_3) est cuite et se décompose entre 1600 et 1700°C ; $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$

Cette matière cuite (magnésite) est composée de 85-92% de périclase.

On l'emploi pour la fabrication des briques de garnissage des murs et des soles des fours. Lors de la fabrication des briques à oxyde de magnésium dont les particules ont une taille de 0,5-2mm est parfois ajoutée un peu magnésite caustique $\text{Mg}(\text{OH})_2$, de l'oxyde de ferrique Fe_2O_3 , du rutile TiO_2 ou bien du tale (silicate de magnésium de composition $\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$), de l'alumine pour la liaison puis le mélange est pressé et cuit.

La température maximale de la cuisson est environ 1600°C et on l'atteint graduellement pendant plusieurs jours.

Les briques de magnésite sont stables aux laitiers basiques. Elles ont une autre réfractarité jusqu'à 2000°C. Toute fois la température de fusion du composant principale (oxyde de magnésium) étant égale à 2800°C, mais la présence des cristaux mixtes d'autres composés dans les articles diminuent la température de fusion jusqu'à 1950-2000°C.

Les réfractaires de magnésite sont résistants, denses mais peu thermostable (de 1 à 2 changements thermiques). La température de début de déformation sous la charge de 196 Kpa est plus faible environ 1500-1550°C.

II-8 Réfractaires de dolomie et de chromito-magnésites

Les articles ainsi que les poudres de dolomie sont obtenus de la roche sédimentaire carbonatée dite dolomie (par le nom du géologue Français Dolomieu) constituée essentiellement de dolomite : carbonate de calcium et de magnésium ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$) ou $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Cette dernière et la pyrite à 1600-1700°C sont utilisées à fin d'éliminer l'oxyde de carbone. L'addition du quartzite ou bien du tripoli (roche contenant de 75 à 90% de la silice amorphe $\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$) joue un rôle de diluant, qui lors de la cuisson à la température environ 1500°C lit l'oxyde de calcium dans les silicates (CaSiO_4 ou Ca_3SiO_5).

L'emploi de dolomie est semblable à la magnésite, mais elle est meilleur marché. Les réfractaires de chromo-magnésite après le maçonnerie (briques) et la cuisson à 1650°C contiennent de 42 à 75% de MgO et de 15 à 22% de Cr_2O_3 .

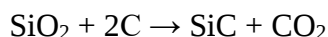
Les propriétés essentielles de ces réfractaires sont entre autres :

- Réfractarité plus de 1920°C
- Température du début de déformation sous la charge de 196 Kpa 1450°C
- Stabilité thermique de 3 à 5 changements thermiques
- Porosité n'apparente pas plus de 24%
- Les réfractaires chromo-magnésite sont caractérisés par une bonne stabilité aux laitiers

On emploie les réfractaires chromo-magnésite pour le garnissage des convertisseurs ainsi que les ouvrages de voûtes de différents fours.

II-9 Réfractaires de carbure de silicium

Selon la propriété de haute réfractarité, parmi les carbures, le carbure de silicium ou carborundum obtenu a une large propagation. Il est artificiel et l'on obtient dans les fours électriques d'un mélange de sable quartzueux pur avec le coke ou l'anthracite d'après la réaction :



A cet effet, à l'aide du courant, on chauffe la charge jusqu'à 2800°C. Le carbure de silicium (SiC) obtenu est très dur. Selon la dureté, il cède seulement la place au diamant, au carbure de bore (B_4C) et est utilisé encore comme abrasif. Sa réfractarité peut atteindre 2000°C, il est neutre mais peu stable dans le milieu oxydant. Pour obtenir des articles réfractaires, le carbure de silicium, on les presse sans ou avec l'ajout jusqu'à 10% de l'argile ; par exemple : le kaolin humidifié qui joue le rôle de liant. Ils sont cuits à 1500°C dans les boîtes à réfractaire comblées de sable de coke ou de graphite.

Les produits sans liant sont fabriqués de carborundum finement cristallisé. Pendant la cuisson à 2300°C, la température de déformation sous la charge dépendra de la quantité du liant, par exemple : Si le contenu du SiC dans le mélange est environ 90%, le début de ramollissement des articles commence à 1750°C. Ils résistent aux actions des laitiers siliceux. Comme domaine d'application, les articles réfractaires sont utilisés

pour le bariolage des fours électriques. L'une des particularités du SiC est qu'il a une conductibilité thermique très considérable allant jusqu'à 150 changements thermiques.

II-10 Réfractaires de carbure (à graphite) et très résistants

Parmi tous les éléments, le carbone est infusible, il a la plus haute température de fusion (3500°C). A cette température, il s'évapore en passant de l'état solide à l'état gazeux. On utilise les réfractaires à graphite sous forme de briques, de plaques ou de blocs. On distingue les articles de carbone non seulement par leur réfractarité, mais aussi par leur haute stabilité thermique.

Ils ont une grande constance de volume et ne sont pas mouillés par le laitier, de ce fait ils ne se détériorent pas. L'unique imperfection des articles de carbone, c'est leur combustibilité. On emploie les blocs, les briques de carbone pour les fours ayant une hauteur de 4-5m aussi que pour le garnissage des murs de creuset du haut fourneau. Ils sont aussi suffisamment employés dans la construction d'électrolyseur, au bord de la cuve, on place des plaques à carbone isolés électriquement de l'enveloppe par les briques de chamotte.

La réfractarité des produits à graphite est environ 2000°C ; leur stabilité thermique atteint 25 changements thermiques.

Réfractaires très résistants

Il est nécessaire d'avoir des articles de réfractarité très grande (plus de 2000°C) pour obtenir certains métaux rares et réfractaires comme : Ti (1660°C), Zr (1852°C), Ta (2985°C).

On utilise aussi pour leur obtention certains oxydes et borures comme :

BeO (2570°C), ThO₂ (3050°C), ZrB₂ (3040°C), ils sont traités par les méthodes de la métallurgie des poudres.

II-11 Isolants ou matières calorifuges de haute porosité

Hormis les matériaux réfractaires cités plus haut, il est nécessaire de s'intéresser aussi des matières calorifuges ou isolants calorifuges qui sont beaucoup utilisés dans la métallurgie. Ce sont des réfractaires qui sont fabriqués de la même manière que les réfractaires ordinaires, mais ayant une porosité élevée (petite densité) et un faible coefficient de conductibilité thermique. On les utilise pour l'isolation thermique des fours métallurgiques. Leur emploi diminue les pertes de chaleur à travers les parois des fours, cela favorise l'économie des matières combustibles. Les produits de chamotte ayant une réfractarité allant jusqu'à 60% de porosité, correspond à une température allant de 1650-1710°C. Ils sont utilisés à des températures pas plus de 1200-1350°C.

La porosité des réfractaires de silice (dinas) atteint 50% lors que leur réfractarité est environ de 1680-1710°C. Ils employés à la température pas plus de 1400°C. On les utilise pour le garnissage des murs et des voûtes des fours.

Les réfractaires naturels qui sont obtenus par le sciage des gros blocs sont des tripolis. On les distingue par leur grande porosité et leur réfractarité atteint jusqu'à 1570°C, mais ils sont employés à la température pas plus de 900°C.

L'asbeste ou l'amiante constitue essentiellement de silicates hydratés de magnésium Mg, de calcium (Ca) à une réfractarité allant jusqu'à 1570°C. il est employé comme isolant thermique sous forme de miettes, de cordes, de cartons pour l'isolation de four. Cependant il est une matière cancérigène. La fabrication et la vente de produit contenant de l'amiante sont interdites dans certains pays comme la France.

II-12 poudres réfractaires

Les poudres de matériaux réfractaires sont utilisées pour la préparation de solution fluide que l'on fait des coulis réfractaires. Elles sont employées en conformité avec les produits réfractaires comme la poudre de magnésite avec les réfractaires de magnésite, les poudres de quartz avec les réfractaires de silice (dinas)...

Les poudres et les coulis réfractaires sont employés pour les le remplissage et l'enduit des points entre les briques séparées et pour donner du maçonnerage du monolithisme.

On utilise la poudre réfractaire pour le maçonnerage des murs du four entre le garnissage et l'enveloppe en tôle. Cette dernière diminue la conductibilité thermique.

II-13 Les fondants (ou flux) utilisés au cours de l'élaboration des alliages ferreux

En métallurgie, un **flux** (dérivé du latin *fluxus* signifiant « flux ») est un agent de nettoyage chimique, un agent d'écoulement ou un agent de purification. Les flux peuvent avoir plus d'une fonction à la fois. Ils sont utilisés à la fois dans la métallurgie extractive et dans l'assemblage des métaux. Autrement dit, un fondant est un produit permettant d'abaisser la température de fusion d'un ou plusieurs éléments ou composés chimiques. La présence et la nature d'un fondant a un impact notable sur le produit final obtenu et ses propriétés tant physiques que chimiques.

Certains des premiers fondants connus étaient le carbonate de sodium (Na_2CO_3), carbonate de potassium (K_2CO_3), la potasse (KOH) pour la fabrication du verre et de la céramique), le charbon de bois, le coke, le borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), chaux (CaO), le sulfure de plomb et certains minéraux contenant du phosphore. Le minerai de fer était également utilisé comme fondant dans la fusion du cuivre.

Ces agents remplissaient diverses fonctions, la plus simple étant un agent réducteur, qui empêchait la formation d'oxydes à la surface du métal fondu, tandis que d'autres absorbaient des impuretés dans le laitier, qui pouvaient être grattées sur le métal fondu.

Les fondants sont également utilisés dans les fonderies pour éliminer les impuretés des métaux non ferreux fondus tels que l'aluminium, ou pour ajouter des oligo-éléments souhaitables tels que le titane.

Dans le processus de fusion, les chlorures inorganiques, les fluorures (Na_3AlF_6), le calcaire et d'autres matériaux sont appelés "fondants" lorsqu'ils sont ajoutés au contenu d'un four de fusion ou d'une coupole dans le but de purger le métal des impuretés chimiques telles que le phosphore., et de rendre le laitier plus liquide à la température de fusion.

Le laitier est un mélange liquide de cendres, de fondant et d'autres impuretés ou scories. Cette diminution de la viscosité du laitier avec la température, augmentant le flux de laitier en fusion, est à l'origine du mot *flux* en métallurgie.

En sidérurgie, ce mélange est composé essentiellement de silicates, d'aluminates et de chaux, avec divers oxydes métalliques, à l'exception des oxydes de fer. Ses rôles dans la métallurgie des métaux ferreux en fusion sont multiples :

- Former la scorie.
- Régler la composition chimique.
- Refroidir le bain métallique etc ...

Le flux ou fondant le plus couramment utilisé dans les fours de fer et d'acier est le calcaire (CaCO_3) et très rarement la dolomite ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$), qui est chargé dans les proportions appropriées avec le fer et le combustible.

Les fondants sont utilisés dans la charge du haut fourneau pour réduire la température de fusion de la gangue, pour la scarification de la soudure du coke et enfin pour l'obtention du laitier fluide ayant une bonne

capacité d'absorption du soufre et du phosphore, ces deux derniers éléments sont indésirables dans la composition de la fonte.

Le laitier est un important coproduit des hauts fourneaux, apprécié comme remblai ou comme matière première dans la fabrication du ciment. Quant aux laitiers d'aciérie, si les scories Thomas étaient également un débouché essentiel de la sidérurgie au XX^e siècle, la valorisation des laitiers modernes passe après l'optimisation des procédés métallurgiques de la sidérurgie.

II-14 Emploi des fondants pendant la fusion des métaux non ferreux et nobles (précieux)

Traditionnellement, la fusion d'un minerai est effectuée entre 1050 et 1500 °C pendant environ 2 heures. Ce temps est nécessaire pour les minerais ou déchet fort chargé en impureté, lors de fonte de métaux précieux de récupération, le temps est nettement plus court.

Après cela, l'alliage d'or et d'argent se dépose au fond car il est plus lourd tandis que le laitier avec les impuretés flotte et est enlevé.

Malgré ces conditions extrêmes, il reste cependant difficile de séparer certaines impuretés de l'or et des lingots.

Il arrive souvent qu'une partie de l'or soit piégée dans le laitier qui flotte.

À l'inverse, certaines des impuretés et des éléments associés peuvent également adhérer au métal pur et couler avec lui. Ces deux anomalies conduiront certainement à des situations dans lesquelles des lingots impurs sont produits. Ils peuvent également conduire à la perte d'or avec le laitier.

C'est pourquoi le flux de fusion d'or est important.

Le flux de fusion d'or est essentiellement une substance chimique ou un mélange de substances chimiques qui sont ajoutés en quantités réglementées à la charge de minerai de métal précieux.

Il permet de lutter contre tous les problèmes évoqués précédemment et de s'assurer que les lingots sont aussi purs que possible. Voici quelques-unes des façons dont l'utilisation du flux de fusion d'or rend le processus de fusion plus efficace :

Le flux de fusion de l'or abaisse le point de fusion : si le minerai dont l'or doit être séparé contient des éléments et des impuretés avec un point de fusion élevé.

Le processus devient très énergivore car des températures élevées sont nécessaires pour faire fondre le mélange.

L'ajout de flux fournit une solution très adaptée à ce problème. La réaction des produits chimiques qui constituent le fondant de fusion d'or aide à abaisser la température du point de fusion du minerai.

La Catalyse

Puisque le fondant de fusion d'or est composé de substances chimiques, elles peuvent servir de catalyseurs pour accélérer le processus d'oxydation sélective. Cela accélère la séparation des scories et des métaux précieux.

Sans l'utilisation de flux de fusion d'or, le flux de métal précieux fondu vers le fond est lent. Cette lenteur peut conduire au mélange, rendant difficile la séparation du laitier.

La réaction sélective

C'est un fait connu que l'or est fondamentalement un élément non réactif. Le flux de fusion de l'or nous aide à tirer parti de ce fait dans le processus de fusion. Le flux ne peut réagir qu'avec les métaux impurs, ce qui les amène à former des nitrates qui peuvent se séparer proprement.

Là encore, le flux de fusion rend les oxydes métalliques faciles à éliminer, éliminant ainsi une autre source importante d'impuretés.

Cela contribue grandement à rendre le processus de fusion plus efficace et à ce que le métal précieux qui se sépare et le lingot produit soit aussi pure que possible, même si c'est un mélange et alliage de différents métaux précieux.

Le flux peut réduire le point de fusion ; densité et viscosité ; fluidité ; oxydes métalliques facilement éliminés ; les pertes de métaux précieux sont réduites et éliminées facilement.

Types de fondants et leurs utilisations dans la fusion de l'or

Il existe différents types de flux de fusion d'or disponibles sur le marché.

Au-delà de la simple fusion de l'or, le flux est également utilisé dans d'autres domaines de la métallurgie et de l'assemblage des métaux.

Voici quelques types de flux généralement utilisés : le Borax, la Silice, l'acide chlorhydrique, le Chlorure d'ammonium, le Nitrate de sodium, le carbonate de sodium, le Chlorure de zinc.

Tous ces produits chimiques remplissent diverses fonctions dans la fusion de l'or.

Chacun d'eux apporte son propre quota spécifique pour s'assurer que le lingot d'or résultant est pur. Voici quelques-uns des rôles uniques joués par chaque type de fondant.

Le Borax

Un mélange cristallin blanc qui se présente sous forme de poudre à température ambiante. Le borax aide à abaisser la température du point de fusion du minerai.

Cela signifie que des températures plus basses que la fusion se produiront rapidement et permettront au métal précieux de se déposer. En outre, Borax est très efficace pour capturer les oxydes métalliques.

Cela est nécessaire car la plupart des autres métaux qui constituent des impuretés sont des métaux hautement réactifs. Ils formeront donc facilement des oxydes en présence de borax.

L'or en revanche est majoritairement un élément inerte, il ne participera pas au processus d'oxydation. L'or coulera donc facilement sous sa forme fondue.

Les impuretés oxydées (aidées par Borax) flotteront sous forme de laitier et seront collectées.

Par conséquent, l'efficacité du processus de fusion est fortement augmentée et la séparation est améliorée.

L'avantage de ceci est qu'un lingot plus pur sera obtenu. En outre, il y a une perte réduite de métal précieux le long du laitier.

La Silice

La silice est assez similaire au borax dans ses propriétés de flux de fusion d'or. Il est sélectivement soluble avec l'or et l'argent et permet de manière similaire de séparer facilement le métal pur du laitier. En formant des silicates avec des oxydes métalliques, la silice assure la stabilité, l'homogénéité et la faible viscosité du laitier.

De plus, certains minerais contiennent déjà de la silice en raison de l'utilisation de terre de diatomées pendant le processus d'extraction. De la silice supplémentaire comme fondant doit donc être ajoutée avec précaution. La silice a également pour effet d'augmenter la viscosité et la fluidité de la charge, permettant à l'or fondu de s'écouler facilement.

Le carbonate de sodium

Il s'agit d'un flux alcalin qui a la capacité de réagir avec et d'éliminer les sulfures de l'or pur. Le carbonate de sodium peut également être utilisé en synergie avec un autre flux. La silice, par exemple lorsqu'elle est mélangée avec du carbonate de sodium, conduit à la formation de silicate de sodium qui peut également former des oxydes avec des métaux impurs et les éliminer.

Il convient de noter que l'ajout de carbonate de sodium comme fondant en quantités excessives peut devenir contre-productif. En effet, cela peut conduire à la formation de scories collantes qui ne s'écouleront pas

facilement. Il faut donc prendre soin de déterminer la quantité optimale de carbonate de sodium utilisée comme fondant dans tout processus de fusion.

Le nitrate de potassium

Ce produit chimique aide principalement à abaisser la température du point de fusion de la charge. Il est souvent associé au carbonate de sodium (mentionné précédemment). Combinant ainsi les effets de flux des deux substances et donnant une performance améliorée.

Le nitrate de sodium

Certains types de flux sont bons pour oxyder des métaux spécifiques. Le nitrate de sodium appartient à cette classe d'éléments de flux. Le nitrate de sodium oxyde les métaux comme le fer, le cuivre et le zinc en libérant de l'oxygène à une température d'environ 500 ° C.

La Litharge

La litharge est essentiellement un monoxyde de plomb (souvent de couleur jaune) qui est utilisé comme fondant pour la fusion de l'or.

Tout comme le carbonate de sodium, la litharge est également utile pour éliminer les sulfures du métal pur et le faire s'écouler avec le laitier.

La fluorine ou spath fluor

Le spath fluor n'est ni acide ni basique ; un flux neutre hautement applicable notamment pour réduire la perte de métal précieux dans les minerais réfractaires.

D'une manière similaire à la silice, le spath fluor augmente la viscosité et permet la libre circulation de l'or fondu pur et du laitier.

Il facilite également la décomposition ; permettant ainsi plus de fluidité et contribuant à nouveau à l'écoulement global de laitier et de métal pur.

Malgré les avantages énumérés ci-dessus, il y a une note d'avertissement à émettre lors de l'utilisation du spath fluor.

Il peut commencer à réagir et à corroder le creuset lorsqu'il est ajouté dans des proportions incontrôlées. Le spath fluor a également tendance à interférer avec la propriété de formation d'oxyde du borax lorsqu'il est utilisé avec lui.

La Farine, le charbon de bois et autres agents réducteurs

Ces substances sont souvent utiles pour aider à décomposer la Litharge, extrayant ainsi le plomb métallique. Une fois le plomb libéré, les molécules d'oxygène sont libérées pour réagir avec les métaux impurs.

Cela facilite la formation d'oxydes métalliques grâce à un processus d'oxydation assisté par le borax, la silice, le salpêtre et d'autres flux et fondant.

Il convient de noter ici que le mercure était à l'époque romaine et encore de nos jours dans l'orpaillage illégal. Il est utilisé comme fondant pour la fusion de l'or.

Cependant, en raison des dangers pour l'environnement et des préoccupations croissantes concernant la protection de l'environnement et le changement climatique, il est devenu obsolète et interdit. Le mercure a également des effets néfastes sur la santé des travailleurs qui y sont exposés.

Référence bibliographique

- Monnot G. la combustion dans les fours et les chaudières. Paris 1978.
- Bernard J. et al. Métallurgie générale. Paris, born.1991.
- Dominique Meier, Toute la physique chimie. Paris, 2004.
- Bortnikov A. Minéralogie. II. Guide des minéraux. Conakry.1977.
- Voskoboynikov V.G. et al. Métallurgie générale. Moscou, 2005(en russe).
- Emilian Koller. Génie chimique. Aide-mémoire. Paris.2001.
- Kistiakovsky B.B., Goudima N.V. Elaboration des métaux non ferreux. Moscou 1978(en russe)
- Accary, A. (1984) 'Les nouvelles poudres non ferreuses pour frittage-Méthodes de production—Propriétés—Intérêt économique—Tendances d'application', *Matériaux & Techniques*, 72(10–11), pp. 375–380.
- Bensaada, S. (no date) 'ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS)', p. 188.
- Blondeau, J. (2004) *Minerais et fondants*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Boas, E.A. (1978) *L'industrie Siderurgique en Amerique Latine*. Duncker & Humblot.
- Montagnier, J. (1961) 'Les réfractaires pour empilages de four Martin', *Revue de Métallurgie*, 58(3), pp. 249–256. doi:10.1051/metal/196158030249.
- Poirier, J. (2011) 'Les céramiques réfractaires de l'élaboration aux propriétés d'emploi'.
- Presles, M.P. (1923) 'Variation de la mise au mille de coke et détermination du prix des matières premières dans les hauts-fourneaux en fonte Thomas', *Revue de Métallurgie*, 20(7), pp. 457–468.