

Chapitre III:**Le laitier de haut fourneau****III-1 L'histoire des ciments aux laitiers :**

Vers 1818, L. Vicat avait déjà mentionné la possibilité d'utiliser du laitier en cimenterie. Mais il faut attendre 1862 pour que Emil Langen démontre qu'un mélange de laitier broyé et de chaux donnait naissance à un liant hydraulique. La fabrication industrielle du ciment de laitier commença en Allemagne en 1882, grâce à G. Prussing, ce n'est que beaucoup plus tard et vers 1928 que ces ciments apparaissent en France. Cependant, bien avant cette date, les ciments portlands additionnés de laitier et les ciments de laitiers à la chaux furent employés. Comme par exemple en 1900 pour la construction du métro à paris. (Venuat , 1984). Actuellement, un très grand nombre de cimenteries fabriquent des liants hydrauliques contenant des teneurs variées en laitier (ciments normalisés où des ciments spéciaux). Le tableau 2.1 présente une classification des principaux types de ciment selon la norme européenne (E.N.V 197-1) : 1992, incluant les ciments au laitier. (Neville, 2000) [7].

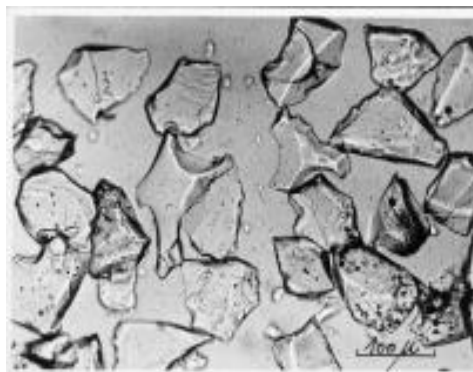


Figure2-1 Laitier.

III-2 Définition :

Les laitiers de haut fourneau sont un sous-produit de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. La production des laitiers est liée à celle des fontes à partir desquelles seront élaborés les aciers.

Pour chaque tonne de fonte la quantité de laitier produite dépend principalement de la masse des oxydes non réductibles enfournés, et est donc en raison inverse de la teneur en fer du minerai de fer.

L'utilisation majeure des laitiers des hauts-fourneaux est surtout dans le domaine de construction comme liant ou aussi comme granulats pour béton et travaux routiers, ainsi que pour la fabrication de vitrocéramiques, pierres artificielles, etc...

Les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants (1 800 MJ/t

de laitier soit 3,5 % du bilan énergétique du haut-fourneau) et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte [5].

III-3 Caractéristiques des laitiers :

a-Activité de laitier : Pour apprécier la qualité du laitier comme adjuvant minérale actifs des liants, on se sert de plusieurs modules .d'abord, on distingue deux catégories de laitier. Laitier acide et basique.

b-Laitier acide : C'est un laitier qui contient en majeure partie la silice fondue de 50 à 60%, avec peu d'alumine en présence de 25 à 30% de chaux.

Ce type de laitier subit un refroidissement lent. Le rapport pondéral (Silice / chaux) $\leq 1,10$.

c-Laitier basique : Il est très hydraulique pour certaines teneurs en chaux, silice et alumine. Il est obtenu par un refroidissement brusque. Ce type de laitier a un rapport pondéral.

$\text{CaO/SiO}_2 \geq 1,3$ il a une composition chimique proche de $\text{CaO} = 40 \text{ à } 55 \%$; $\text{SiO}_2 = 25 \text{ à } 35 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12 \text{ à } 25 \%$; MgO , SO_3 , Fe_2O_3 ; FeO ; soufre, Ces laitiers sont caractérisés par un module de basicité qui répond à la formule : $M_b = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$

Si $M_b > 1$ Le laitier est acide.

Il y a aussi le module d'activité $M_a = (\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3)$.

Si $M_a = 0,017 \text{ à } 0,25$, le laitier est basique, et si $M_a = 0,33 \text{ à } 0,40$ le laitier est acide. Notons que l'activité hydraulique du laitier croît avec l'augmentation de ces deux modules c'est-à-dire. Plus le module d'activité est grand, plus la vitesse de durcissement du laitier broyé est rapide. Pour synthétiser les qualités que doivent avoir les laitiers on peut dire que.

- Il faut que le laitier soit à la limite de vérification.
- Il faut qu'il contienne le maximum de chaux et d'alumine.

Il faut que la proportion de chaux, de silice et d'alumine doit composer au moins 90%, et le reste composé d'autres corps tels que l'oxyde de fer, l'anhydride sulfurique et magnésie La qualité de laitier de haut fourneau peut être déterminée par le coefficient de qualité, qui varie d'un pays à un autre.

- En USA. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{ Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 2/3 \text{ Al}_2\text{O}_3)$
- En URSS. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2) \cdot 1,2$

III-4 Effet du laitier de haut fourneau :

En général, le laitier s'hydrate de la même manière que les cendres volantes de la classe C. Cependant, son effet sur la résistance commence à se faire sentir à partir de 7 jours, tandis que les cendres de la classe F ne développent des résistances qu'à partir de 4 semaines. Les particules de laitier $< 10 \mu\text{m}$ contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et $45 \mu\text{m}$ contribuent au développement des résistances ultérieures.

Les particules $> 45 \mu\text{m}$ ont de la difficulté à s'hydrater.

- En RFA. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2) \cdot 1,6$
- En JAPON. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2) \cdot 1,4$.

III-5 Composition chimique :

La composition du laitier peut varier dans de grandes limites, suivant la nature du minerai. Généralement.

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	P.F
laitier	42,58	35,54	12,27	0,94	8,06	1,91	0,15	0,13	0,11	0

Tableau 3-1 La composition chimique moyenne du laitier.

III-6 Composition minéralogique :

Si le refroidissement des laitiers est lent, une partie sensible de laitier réussit à se cristalliser sous forme de minéraux stables.

- L'anorthite $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- Diopside $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Gehlenite $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- Akermanite $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Merwinite $3 \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Silicate bi calcique sous forme α , α' & β .
- Tri aluminate penta calcique « C_5A_3 »
- Wollastonite $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- Rankinite $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Spénelite $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique (tableau 3.1), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Oxydes	Laitier français	Laitier Nord U .S .A	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Tableau 3-2 Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [11].

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- ▲ Broyage poussé.
- ▲ Chaleur (étuvage, autoclavage).
- ▲ Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, Le sulfate de calcium (gypse).

III-7 Les différentes formes de laitiers :

Les laitiers peuvent se présenter sous différentes formes et avec une granulométrie s'étend de 0 à 300 mm, selon les méthodes de refroidissement de ces derniers :

III-7-1 Laitier rocheux (ou cristallisé):

Le laitier rocheux s'obtient en déversant le laitier liquide dans une fosse et en l'y laissant refroidir le plus lentement possible. Dans d'autres cas, le laitier est d'abord versé dans des cuves en acier coulé placées sur des chariots circulant sur voie ferrée. Les fosses sont alors installées à distance du haut-fourneau, et le laitier y est déversé par basculement des cuves. Après refroidissement, souvent avec arrosage, le laitier est extrait de la fosse par des moyens classiques en travaux publics : pelles sur chenilles et camions de chantier.

III-7-2 Laitier bouleté :

Le bouletage consiste à refroidir le laitier dans des conditions telles qu'il se forme des boulettes quasi sphériques, dont l'intérieur est creux. Ce traitement se pratique dans une installation qui comprend :

-un déversoir, qui forme une lame de laitier liquide d'épaisseur constante ;

- **un couloir d'alimentation** incliné, sur lequel coule un film d'eau, et qui est soumis à des vibrations pour éviter le collage du laitier ; à ce moment, le laitier commence à se refroidir, devient donc plus visqueux (ce qui lui permet de retenir les gaz inclus) et subit un commencement d'expansion ;

- **un tambour**, muni d'ailettes, refroidi par un courant d'eau intérieur et tournant à environ 300 tours par minute, qui disperse le laitier ; la plupart des morceaux projetés par le tambour, pas encore solidifiés, sont expansés et prennent une forme sphérique sous l'effet de la tension superficielle ; les autres morceaux éclatent pour donner du laitier granulé ; le tambour projette le laitier sur l'aire de réception où il se refroidit et s'égoutte ;

-**des injections d'eau** (environ 1 m³/t de laitier) [5].

III-7-3 Laitier expansé :

C'est un laitier cristallisé dans lequel, pendant le refroidissement, on a provoqué la formation d'alvéoles. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour favoriser l'expansion, elles comprennent toujours une injection d'eau (environ 1 m³/t de laitier), complétée éventuellement par une injection d'air et de vapeur d'eau [5].

Il a une structure scoriacée alvéolaire ; de teinte grise, après criblage il se de. Silice= 25 à 40%, chaux= 38 à 50%, alumine=10a 20%, soufre =01%. Il s'obtient par une puissante injection d'eau, en dessus du laitier en fusion, l'eau vaporise et on obtient des éléments alvéolaires légers.

III-7-4 Laine de laitier et laine de roche :

La laine de laitier et la laine de roche sont fabriquées par filage d'un matériau liquide ; le filage nécessite 1000 à 5000 m³ d'air par tonne de laitier.

La laine de laitier provient du laitier sortant de la halle de coulée du haut-fourneau ; c'est une méthode peu employée, car les conditions pour un bon filage [liquide de viscosité faible et régulière, ayant donc une température suffisamment élevée et une composition bien déterminée] sont plus facilement remplies quand on opère la refusions du laitier rocheux dans un four à cuve analogue au cubilot : on peut y ajuster le lit de fusion, qui comprend alors au maximum 80 % en masse de laitier, le complément étant du silex, du basalte, voire du minerai de fer[5] .

III-7-5 Laitier granulé:

C'est un sable vérifie, très poreux, jusqu'à 60%, il a une couleur grise jaunâtre, de granulométrie jusqu'à 2 mm, et de composition chimique. Silice =29 a38 %, chaux = 38 a48%, alumine = 13 a20 %, magnésie = 06 %. Pour avoir ce type de laitier, la coulée doit être refroidie brusquement dans courant d'air ou d'eau. On obtient un sable sec et finement moulu, qui constitue la base du ciment de laitier. Cette opération a pour but d'empêcher la cristallisation, et de maintenir le laitier à l'état vitreux.

III-8 Emploi du laitier en cimenterie:**Ciment au laitier**

Après les travaux de L. Vicat vers 1818 et d E. Langen en 1862, vins les travaux de G. Prussing qui ont permis le lancement de la première fabrication industrielle du ciment au laitier en Allemagne en 1882. En 1900 le ciment au laitier fut utilisé pour la construction du métro à paris.

Actuellement, l'introduction du laitier dans le cycle de fabrication du ciment par des teneurs variables, permet une réduction considérable du coût énergétique de la fabrication des ciments (réduction des combustibles de 30 à 40 %), ainsi que l'obtention des ciments présentant des caractéristiques physico-chimiques intéressantes telles que la résistance aux milieux agressives, et le faible retrait.

Cette utilisation du laitier se fait :

- Soit, en mélange avec le clinker, avant le broyage pour la fabrication des ciments Portland au laitier ;
- Soit, en mélange avec du calcaire comme matière première pour la préparation du clinker par voie sèche, qui et souvent mélangé à son tour avec du laitier (d'après les travaux de Neville, 2000) ;
- Soit, par broyage du laitier à une finesse appropriée pour être utilisé seul comme liant, en présence d'un catalyseur à base d'alcalis ou de sulfate [7].