

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMMED KHIDER – BISKRA
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° d'ordre :
Série :

ETUDE DES BETONS BASIQUES
A BASE DES DIFFERENTS GRANULATS

Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences
en génie civil

OPTION : Matériaux de construction

Par : ZEGHICHI Leila

Sous la direction de Mr : MEZGHICHE Bouzidi.

Devant le jury composé de :

Dr HOUARI Hacene	Prof.	Université de Constantine	Président
Dr MEZGHICHE Bouzidi	MC.	Université de Biskra	Rapporteur
Dr CHABIL Hocine	Prof.	Université de Constantine	Examineur
Dr GUETTELA A. hamid	MC.	Université de Biskra	Examineur
Dr CHEBILI Rachid	MC.	Université de Biskra	Examineur

INTRODUCTION GENERALE

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂ (la moitié vient de la calcination du CaCO₃ et l'autre moitié du combustible). Il est responsable d'environ 5 % des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine (en 1997, selon CEM BUREAU la production du ciment a été de 1,6 billion tonnes, c'est-à-dire de 1m³ de béton par habitant où de 2,5tonnes de béton par habitant si on utilise 250 Kg de ciment pour 1m³ de béton).(Aitcin, 1999). Cette demande va rester en hausse pendant les prochaines années. (la demande de ciment en Algérie est estimée à 14 millions de tonnes annuellement, tandis que la production ne couvre que 10 à 11 millions de tonnes).

Face à cette demande, il est donc primordial de trouver différentes façons de baisser l'émission de CO₂.

L'industrie cimentière est un grand consommateur d'énergie ce qui également devient un sérieux problème. Elle a réussi avec différentes améliorations du procédé à abaisser la consommation d'énergie de 7GJ en 1970 à 5,5 GJ en 1991 par tonne de ciment. (Cahn et al, 1997).

Le recours aux ajouts minéraux est certainement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable à l'industrie du béton.

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du ciment est très importante car en plus des économies d'énergie et de la diminution de l'émission de CO₂, les ajouts minéraux améliorent les propriétés du béton frais et durci.

Le laitier du haut fourneau est l'ajout le plus connu et le plus fiable pour sa qualité. C'est un sous produit dans la production du fer dans les hauts fourneaux, présentant des caractéristiques et des propriétés que l'on a appris à connaître de mieux en mieux, et la voie a été ouverte à d'assez nombreuses utilisations.

Dans le monde, on dispose d'a peu près de 250 millions de tonnes par an de laitier du haut fourneau, cependant l'utilisation des ajouts minéraux n'est que d'environ 90 millions de tonnes (Bucchi, 1986), en Algérie la production du laitier par les hauts fourneaux d'Annaba

avoisine un demi million de tonnes (avec un taux de granulation de 50 %), le reste est refroidi lentement à l'air en se cristallisant.

En Algérie, l'utilisation du laitier granulé en cimenterie comme ajout ne dépasse pas 20 % (en remplacement du ciment portland). Le reste du laitier s'entasse en crassier, occupant des surfaces immenses de terres fertiles, sans considérables applications ; une telle production du laitier (granulé ou cristallisé) reflète d'immenses possibilités de son utilisation dans le domaine des matériaux de construction et des travaux routiers (comme ciment, granulats fins ou granulats grossiers), afin de protéger l'environnement des stocks grandissants des résidus industriels, et de ne pas épuiser les sources naturelles (matières premières pour la fabrication des ciments et les réserves des granulats). Et enfin de réaliser le rêve de plus de la moitié de la population.

L'étude suivante s'inscrit dans le cadre de la valorisation du laitier d'El-hadjar de Annaba (le laitier granulé, et le laitier cristallisé) afin d'assurer un bon avenir des ciments et des bétons au laitier, dans ce but les sujets suivants sont étudiés :

1. L'utilisation du laitier granulé finement broyé, en guise de ciment sans clinker avec des accélérateurs de durcissement de laitier (les activants) pour la confection des bétons. Certains alcalis tels que les silicates de sodium et de potassium soluble ayant la forme chimique (R_2O m SiO_2) sont avantageux, de même les alcalis caustiques de la forme (R-OH) et leurs sels sont efficaces, et présentant des coûts réduits.

2. L'utilisation du laitier cristallisé, concassé et classé suivant les mêmes classes granulaires que les granulats traditionnels en tant que squelette granulaire pour pouvoir établir des paramètres fonctionnels et de déterminer les propriétés physico-mécaniques correspondantes afin de choisir des compositions convenables pour les bétons lourds et ordinaires et améliorer certains critères de durabilité.

3. L'association du ciment au laitier activé à un squelette granulaire en laitier cristallisé, pour étudier la compatibilité entre ces deux composants en laitier du fait que les granulats ne sont pas réellement inertes, et leurs propriétés physiques, thermiques et dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton.

En général, les sables et les graviers naturels alluvionnaires obtenus par criblage, ou parfois par concassage sont satisfaisants, de même les roches éruptives ou sédimentaires concassées.

Le recours à des granulats artificiels tel que le laitier cristallisé concassé, permet d'élargir la gamme des matériaux de construction, de formuler des bétons de densité réduite, présentant des propriétés mécaniques et physiques intéressantes.

Cette thèse est structurée en six chapitres.

La première partie (chapitre 1,2 et 3) est consacrée à une synthèse bibliographique. Dans le premier chapitre on a évoqué le problème des déchets industriels, en donnant des stratégies pour les traiter ; la valorisation des déchets présente la solution la plus convenable. Dans ce même chapitre, on a présenté les sous produits : laitier granulé et laitier cristallisé, nous exposons les conditions de leur formation, et nous décrivons les différents processus industriels de refroidissement des coulées du laitier. Et pour finir nous donnons leurs plusieurs utilisations dans les différents domaines (génie civil, travaux publics, ...).

Le deuxième chapitre traite le ciment au laitier activé : tout d'abord le laitier finement broyé comme ajout cimentaire utilisé pour la première fois en 1882 en Allemagne, et méritant aujourd'hui une place équivalente au ciment portland. Nous exposons ensuite, sa composition chimique, sa réactivité et les facteurs qui l'influence passant ensuite à l'activation du laitier, de la plus classique à la récente (activation alcaline).

L'hydratation du laitier est suivi sous différents angles : (chimique, physique et mécanique). Vers la fin de ce chapitre, l'étude du béton à base du laitier activé (béton basique) s'avère très importante. Ces propriétés, et les aspects de sa durabilité sont étudiés soigneusement.

Nous présentons ensuite dans le troisième chapitre le squelette granulaire qui constitue le squelette du béton, en représentant les trois quarts de son volume, conditionnant à la fois ses caractéristiques et son coût, nous exposons les différentes classes de granulats, leurs composition minéralogique et leurs propriétés essentielles.

La deuxième partie (chapitre 4, 5 et 6) est une partie expérimentale consacrée au travail effectué.

Les principales caractéristiques chimiques et minéralogiques des divers matériaux que nous avons utilisés et les traitements que nous leurs avons fait subir sont présentés dans le détail dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre traite l'activation alcaline du ciment au laitier (sans clinker), à partir de l'étude des propriétés physiques de la pâte durcissante et ses propriétés mécaniques, l'étude du mortier normalisé complète ce chapitre.

Enfin, dans le sixième chapitre nous avons présenté l'influence des différents types de granulats (naturels et artificiels) sur le comportement du béton basique à l'état frais et durci notamment sa résistance et sa durabilité.

CHAPITRE 1

VALORISATION DES DECHETS INDUSTRIELS

1.1 INTRODUCTION

Toute activité de production où de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et a de multiples risques pour la santé humaine.

L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais.

Certes, l'industrie de production reste un moteur essentiel de la croissance économique et de la compétitivité, mais il est également reconnu qu'une réduction de la pollution et l'utilisation rationnelle des ressources et de l'énergie, constituent des impératifs de développement durable et rendent fréquemment les coûts unitaires des produits moins élevés.

Les nuisances de l'industrie sur l'environnement sont :

- Emission de vaste quantité de polluants dans l'atmosphère (l'industrie du ciment en Algérie est le plus grand producteur de poussière 10 % environ de la quantité de ciment produite était rejetée dans l'atmosphère sous forme de poussière générant une pollution d'environ 600.000 tonnes/an de poussière de ciment).
- Production des déchets solides industriels (la production de la fonte dans les hauts fourneaux est accompagné par une production parallèle d'un sous produit solide (laitier du haut fourneau). Pour 1m³ du métal en fusion environ 280 à 340 kg de laitier est produit. (Malhotra, 1987)
- Déversement dans les eaux des déchets toxiques et autres déchets organiques ainsi libérés dans la nature :
 - o Annuellement plus de 220 millions de m³ d'eau usées chargés de : (plus de 55.000 tonnes de DB05, plus de 134.000 tonnes de matières en suspension et 8000 tonnes de matières azotées).

N'oublions pas les nuisances de l'industrie sur les ressources :

- L'exploitation des ressources naturelles telle que pratiquée actuellement n'est pas sans effets négatifs sur l'environnement :
 - o Cicatrices dans le paysage (carrières et mines).
 - o Destruction du patrimoine forestier.
 - o Sur exploitation des ressources (extraction abusive des sables de mer).

Face aux nuisances causées par l'industrie sur l'environnement, l'inquiétude ne cesse de grandir ; et notre domaine le génie civil est appelé à jouer un rôle important dans la protection de la nature et l'environnement par l'utilisation des déchets solides dans la fabrication des matériaux de construction (liants et bétons) et dans la réalisation des structures (remblais et les assises de chaussées, ...) afin de limiter l'exploitation excessive des ressources naturelles et de diminuer la pollution atmosphérique (en remplacement du ciment portland par les ajouts).

Il faut signaler ici que notre pays, depuis la première conférence mondiale sur l'environnement organisée à Stockholm en 1972 à pris progressivement conscience de la nécessité à intégrer la dimension environnementale dans la démarche de planification du développement et d'utilisation durable des ressources naturelles du pays. (Akli, 2000).

1.2 STRATEGIES DE TRAITEMENT DES DECHETS

Malgré les quantités importantes des déchets dans notre pays qui atteignent actuellement 4.892.000 tonnes/an (dont 184.000 tonnes sont considérés dangereux et toxiques) une gestion des déchets solides n'est pas à l'heure actuelle développée. Quelquefois la récupération de certaines matières valorisables est pratiquée, mais la qualité reste très insuffisante.

La stratégie d'une bonne gestion des déchets s'appuie sur deux grands principes :

- Il faut prendre en compte simultanément les notions de matière, d'énergie, d'environnement et d'économie.
- Des lorsque ces stratégies ont pour objectif le retour des déchets dans le milieu naturel, il y a lieu de s'inspirer des lois qui régissent le fonctionnement de ce milieu.

Ces lois existent à travers les cycles bio-géochimiques qui régissent la circulation des éléments chimiques. (Boutemour et al,2002)

La gestion des déchets passe par cinq stratégies possibles qui sont représentés à la figure 1.1

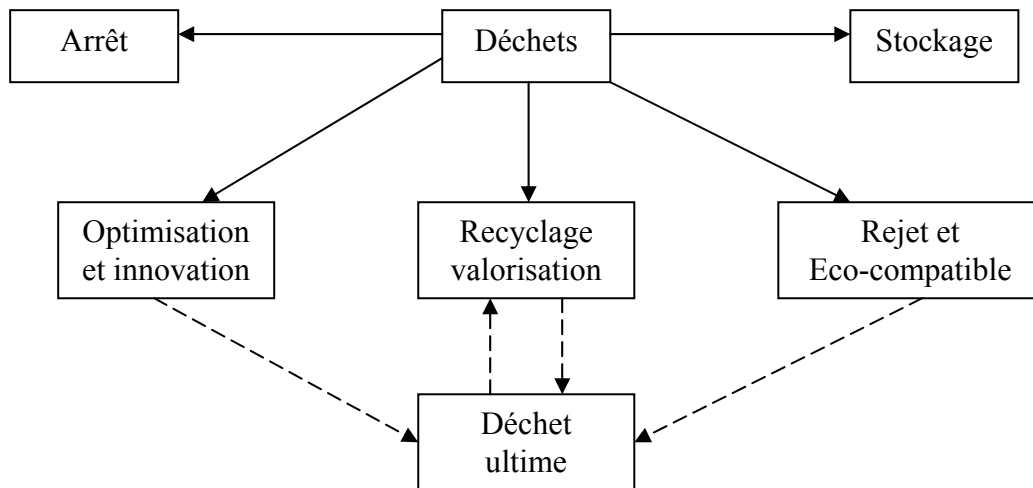


Figure 1.1 : Stratégies de traitement des déchets. (Boutemeur et al, 2002)

Seules les stratégies de valorisation, de rejet éco-compatible et de stockage concernant directement la gestion des déchets. (Michel, 1981).

Leur mise en œuvre concrète passe par un certain nombre de filières techniques, elles articulent autour des objectifs généraux suivants :

- Valorisation énergétique.
- Valorisation en matière première organique et minérale.
- Valorisation en science des matériaux.
- Valorisation en agriculture.
- Valorisation en technique de l'environnement.
- Technique dite d'élimination.

Ces objectifs sont représentés à la figure 1.2.

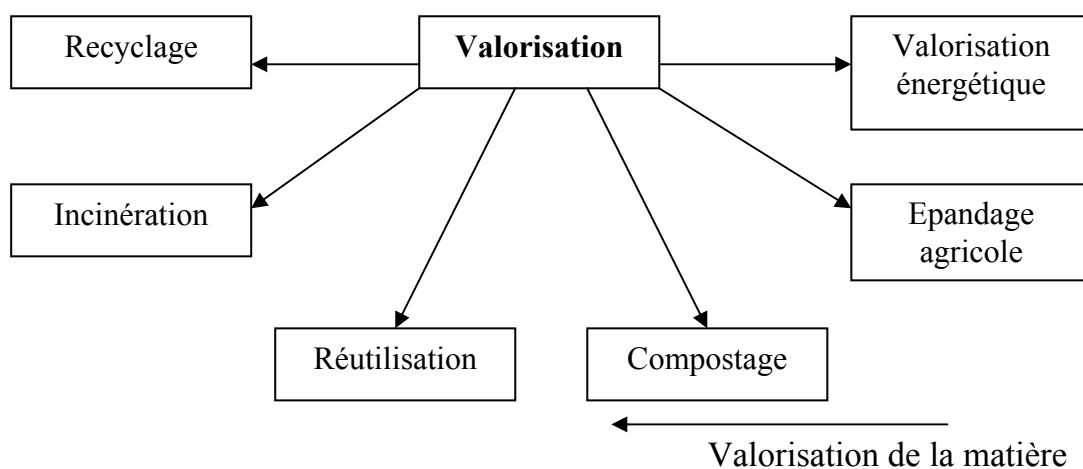


Figure 1.2 : Valorisation des déchets (Clastres, 2004).

I.3 DEFINITIONS

On entend par :

I.3.1 Déchet : tout résidu d'une production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné.

I.3.2 Récupération : séparation de certains produits ou matériaux des déchets à des fins de réemploi de réutilisation et de recyclage.

I.3.3 Recyclage : réintroduction d'un matériau récupéré dans le cycle de production dont il est issu (même circuit de fabrication).

I.3.4 Compostage : Le procédé de traitement biologique de déchets et la transformation des constituants organiques d'un déchet en un produit stabilisé (compost).

I.3.5 Incinération : C'est un procédé thermique qui consiste à la destruction complète du déchet et sa transformation en éléments simples et inertes sous l'action d'une forte chaleur et de l'oxygène de l'air.

Il faut noter que les résidus solides de combustion (cendres, mâchefers...) représentent 25 % à 30 % du poids des déchets, ils sont valorisés entant qu'ajouts cimentaires.

I.3.6 Valorisation : tout traitement ou utilisation des déchets qui permet de leur trouver un débouché ayant une valeur économique positive. Le terme général valorisation englobe réemploi recyclage et réutilisation.

I.4 POURQUOI VALORISER ?

L'intérêt qui est porté de plus en plus à la valorisation des déchets et des sous produits industriels est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement. Les arguments peuvent être résumés en :

- Augmentation de la production.
- Le coût de stockage ou de traitement est de plus en plus élevé.
- Une législation de plus en plus sévère.
- Une meilleure gestion de la recherche.

I.5 METHODOLOGIE D'ETUDE

Lorsqu'on souhaite inventorier toutes les possibilités de traitement qui peuvent être utilisées pour un déchet donné, on peut adopter la démarche (méthodologie d'étude) suivante :
Proposée par (Clastres, 2004).

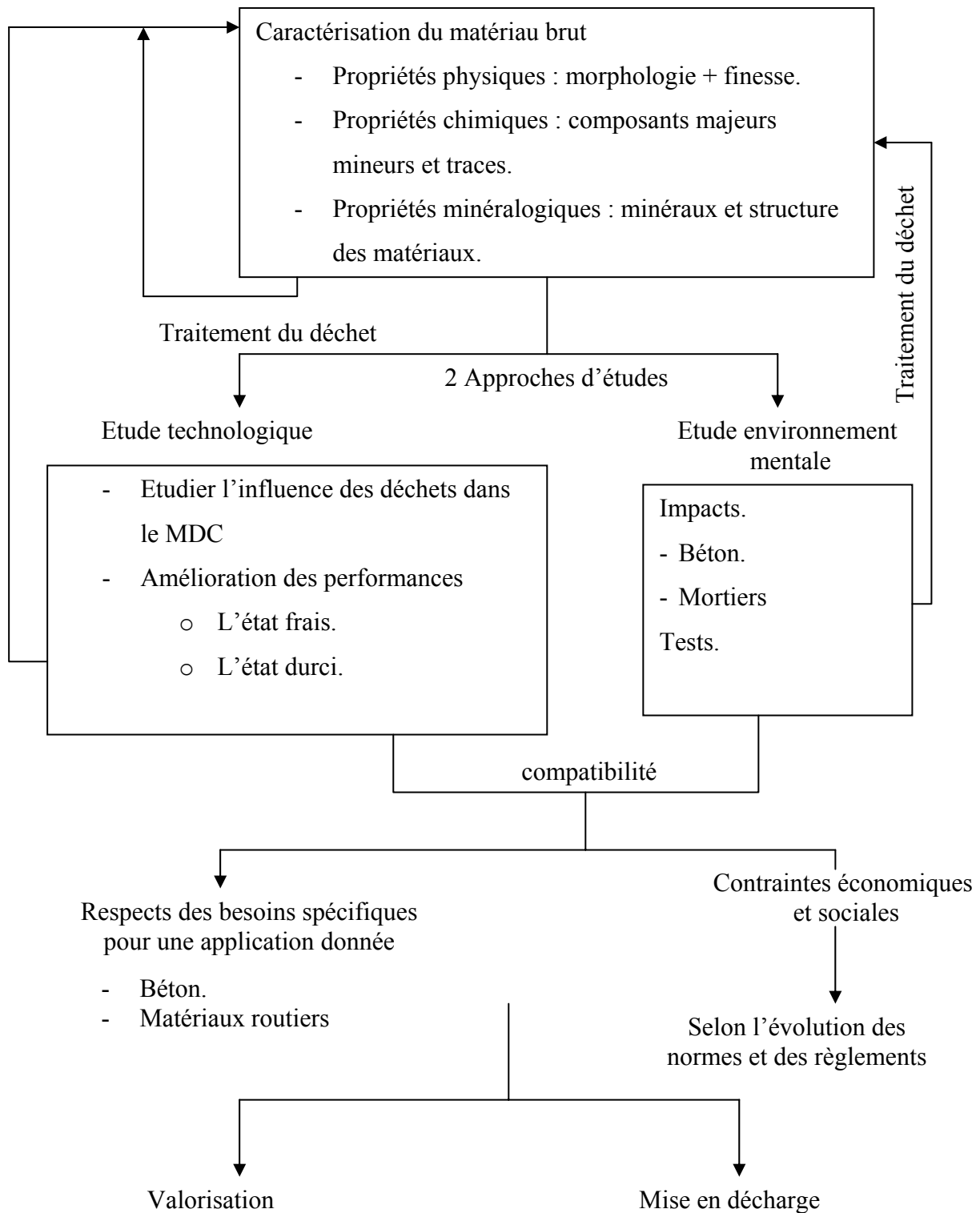


Figure 1.3 : Méthodologie d'étude (Clastres, 2004).

I.6 PRESENTATION DU SOUS PRODUIT : LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU

Les laitiers du haut fourneau sont des co-produits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques (la production des laitiers est liée à celle des fontes).

Ils sont formés par la majeure partie de la gangue du minerai de fer et par la majeure partie des impuretés du coke et des fondants ajoutés, ce qui est illustré à la figure 1.4 :

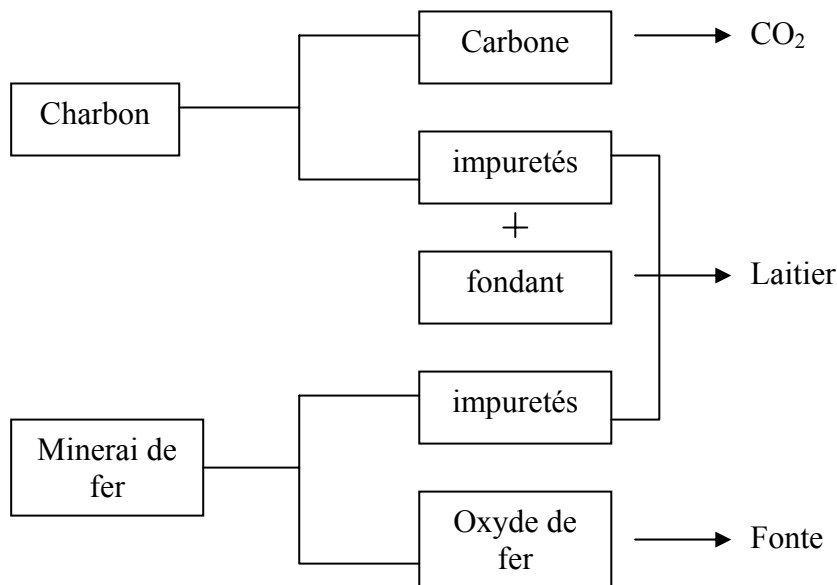


Figure 1.4 : représentation schématique de la production de laitier du haut fourneau.

(Aitcin,2001)

Les minerais de fer sont des roches sédimentaires qui contiennent une forte proportion d'oxyde de fer, mélangés à d'autres éléments minéralogiques extrêmement divers, mais dans lesquels dominent toujours où bien des roches siliceuses, où bien des roches calcaires, en outre très fréquemment de l'alumine où de la manganèse, sous forme diverses, sont associées à la silice et à la chaux dans la gangue des minerais, d'où le laitier obtenu est composé de silicates et aluminates de chaux et d'autres bases.

En fusion, (vers 1500°C) la partie inférieure du haut fourneau, recueille deux liquides :

- La fonte plus lourde (densité : 7).
- Le laitier, plus léger surnageant la fonte (densité 2,7 à 2,8).

A la sortie du haut fourneau, le laitier peut être traité de différentes façons :

1.6.1 Refroidissent rapide à l'eau

C'est la granulation du laitier : qui consiste à mettre brusquement le laitier liquide, en contact avec l'eau, afin de conserver le laitier à l'état vitreux (la cristallisation des laitier commence en effet vers 800 – 850°C).

On fait tomber le courant du laitier sortant du haut fourneau sur une forte arrivée d'eau, la masse du laitier se divise en grains d'un diamètre allant jusqu'à 5 mm environ et qui se solidifient aussitôt (il faut 3 à 10 m³ d'eau pour granulé une tonne de laitier). Le laitier perd une partie de son eau (qui peut atteindre 30 %) dans les bassins à fonts filtrants, puis il est repris pour être stocké.

Le laitier granulé se présente donc sous la forme de petits grains arrondis assez légers (densité apparente s'échelonne de 0,7 à 1,4) poreux de couleur terne (grisâtre ou jaunâtre selon les laitiers). Il est une sorte de verre (la teneur de verre dépasse les 90 % et atteint parfois 100 %), se qui est illustré à la figure 1.5.

La granulation à l'eau de mer est possible (mais les laitiers contiennent alors un peu de sel). (Venuat, 1984) et (Venuat, 1989)



Figure 1.5 : Le laitier granulé.

1.6.2 Refroidissement rapide à l'air et à l'eau

C'est le bouletage : qui consiste à cisailer une nappe de laitier par des jets d'eau et à projeter le mélange obtenu dans l'air par centrifugation sur un tambour tournant (0,6 à 1 m³ d'eau par tonne de laitier).

Les grains obtenus ont une granulométrie qui s'échelonne de 1 à 25 mm. Les grains inférieurs à 3mm sont presque entièrement vitreux. Les gros grains, légers, ont un cœur plus au moins cristallisé.

Les masses volumiques apparentes varient suivant la granulométrie de 750 à 1000 kg/m³.

1.6.3 Refroidissement lent à l'air

Le laitier liquide contenu dans des poches de 8 à 10 m³ est déversé en couches parallèles de 5 à 10 cm d'épaisseur (hauteur de 2 à 3 m), il se refroidi lentement et se

crystallise formant des blocs prêts au concassage à la granulométrie voulue. Une fois concassé, il constitue un granulat artificiel dont les caractéristiques sont importantes.

Un tel laitier est représenté à la figure 1.6.



Figure 1.6 : Le laitier cristallisé . (a : roche) et (b : concassée).

I.7 VALORISATION DU LAITIER DU HAUT FOURNEAU

La composition et la structure physique du laitier du haut fourneau varient énormément en fonction des procédés et des méthodes de refroidissement appliqués au laitier ; selon ces procédés on obtient le laitier granulé, bouleté et cristallisé.

Chaque variété trouve des débouchés intéressants.

I.7.1 En cimenterie

L'emploi du laitier granulé en cimenterie est doublement important, car il permet à la fois des économies considérables d'énergie (réduction du combustible de 30 à 40 %), et permet d'obtenir des ciments présentant des propriétés variées.

Le laitier peut produire un liant hydraulique de plusieurs façons. Premièrement, il peut être mélangé à du calcaire et être utilisé comme matière première pour produire du ciment Portland par le procédé à sec. Le clinker obtenu à partir de ces matériaux est souvent utilisé avec le laitier dans la fabrication du ciment portland au laitier.

Cette utilisation du laitier est économique (car la chaux est présentée sous forme de CaO de sorte que l'on n'a plus à fournir l'énergie nécessaire pour la décarbonatation. (Neville, 2000).

Deuxièmement, dans la plupart des pays, le laitier granulé et broyé est utilisé dans le ciment portland comme ajout pour fabriquer des ciments portland au laitier.

Troisièmement, le laitier du haut fourneau granulé broyé à une finesse appropriée peut être utilisé seul comme liant mais en présence d'un catalyseur à base d'alcalis¹.

I.7.2 Pour la confection des bétons

Dans un béton, le squelette granulaire (sable et granulats naturels peuvent être remplacé par le laitier vitreux et le laitier cristallisé concassé respectivement). le laitier concassé forme d'excellent granulats pour le béton.

De même le laitier granulé entre dans la confection des bétons légers (bétons cellulaires), et les briques de laitiers. (Venuat, 1989).

I.7.3 Pour les travaux routiers

Les utilisations concernent la construction des chaussées, des routes, autoroutes et les assises où on peut utiliser soit le laitier granulé ou le laitier concassé.

I.8 Valorisation du laitier en Algérie

L'utilisation des produits de laitier en Algérie est limitée à quelques rares applications malgré sa production progressante (500.000 tonnes/an). (Behim, 2003)

En cimenterie, il entre comme un ajout secondaire ne dépassant pas 20 % (cette substitution est faite seulement dans quelques cimenteries). (Nacéri, 2005)

Et en travaux routiers : A titre d'exemple, le laitier granulé a trouvé une utilisation dans la réalisation de la liaison autoroutière Annaba – Berrahal, où la couche de fondation été réalisée par une grave laitier tout laitier.

Des études intéressantes et récentes ont montré la possibilité d'utiliser les laitiers Algériens (d'El-hadjar) pour :

- La fabrication des briques silico calcaires à base du laitier. (Arabi, 1996)
- La fabrication du béton cellulaire autoclavé. (Belouettar, 2003)
- La fabrication d'un ciment de laitier activé sans clinker. (Mezghiche, 1989)

1.9 Conclusion

La voie reste ouverte, à d'autres utilisations et possibilités, permettant ainsi d'élargir la gamme des matériaux de construction, de réduire les déchets à la source et de développer l'utilisation des matériaux recyclés dans les chantiers.

¹ ce point sera détaillé dans le chapitre 2.

CHAPITRE 2

LE CIMENT DE LAITIER ACTIVE : LIANT PROMETTEUR

2.1 INTRODUCTION

Les ajouts minéraux proviennent principalement de l'industrie, en tant que sous produits.

Les cendres de combustion du charbon dans les centrales thermiques (cendres volantes), la silice émanant de certain procédés métallurgiques (fumée de silice) et le laitier de haut fourneau sont les principaux sous produits de l'industrie qui peuvent être utilisés comme ajouts au béton.

Ces poudres minérales où fines complémentaires sont de granulométrie voisine de celle de ciment, voire plus fines, elles peuvent avoir un caractère hydraulique latent, soit avoir un caractère pouzzolanique, soit être inertes chimiquement. Dans tous les cas, du fait de leur finesse, ces fines vont jouer un rôle actif vis-à-vis à la compacité du squelette, c'est le rôle de remplissage, ainsi ces ajouts modifient la micro structure du béton en terme caractéristiques physiques et chimiques, conduisent à la segmentation de larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui permettent de réduire les dimensions de cristaux de chaux.

Le laitier du haut fourneau est le matériau hydraulique latent, le plus utilisé dans la fabrication des ciments avec ajouts, partout dans le monde, vu ses propriétés stables, comparées à celles des autres sous produits industriels.

Aussi, en tant qu'ajout cimentaire, il présente des caractéristiques intéressantes, notamment du point de vue de la constance de sa composition chimique parce que celle-ci doit se situer dans une zone bien définie du diagramme de phases $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. (Neville, 2000)

2.2 L'HISTOIRE DES CIMENTS AU 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)

Tableau 2.1 : Classification des principaux types de ciment.

Type *	Désignation	Masse (% de la masse de la matière cimentaire**)			
		Clinker de ciment portland	Pouzzolane*** ou cendre volante	Fumée de silice	Laitier
CPA-CEM I	Portland	95 – 100	-	-	-
CPJ-CEM II/A	Portland au laitier	80 – 94	-	-	6 – 20
CPJ-CEM II/B		65 – 79	-	-	21 – 35
CPJ-CEM II/A	Portland aux pouzzolanes, portland aux cendres volantes	80 – 94	6 – 20	-	-
CPJ-CEM II/B		65 – 79	21 – 35	-	-
CPJ-CEM II/A	Portland à la fumée de silice	90 – 94	-	6 – 10	-
CPJ-CEM II/A	Portland composé	80 – 94	6 – 20		
CPJ-CEM II/B		65 – 79	21 – 35		
CHF-CEM III/A	Laitier du haut fourneau	35 – 64	-	-	36 – 65
CHF-CEM III/B		20 – 34	-	-	66 – 80
CHF-CEM III/C		5 – 19	-	-	81 – 95
CPz-CEM IV/A	Pouzzolane	65 – 89	11 – 35		-
CPz-CEM IV/B		45 – 64	36 – 65		-
CLc-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 – 64	18 – 30	-	18 – 30
CLc-CEM V/B		20 – 39	31 – 50	-	31 – 50

* une deuxième lettre décrit la nature du second matériau.
 ** sauf pour le filler qui peut atteindre 5 %.
 *** autres produits que cendre volante ou fumée de silice.

- Le ciment sulfaté est un liant spécial, fabriqué en broyant ensemble un mélange de 80 à 85 % de laitier de haut fourneau granulé, de 10 à 15 % de sulfate de calcium et jusqu'à 5 % de clinker de ciment portland. Une finesse de 400 à 500 m²/kg est habituelle. Il est très utilisé en Belgique, il n'est plus fabriqué en France, et il est

fabriqué occasionnellement dans le royaume unis en raison de difficultés de sa fabrication. (Brahma, 1992) et (Venuat, 1984).

- Le ciment de laitier activé par les alcalis à connu plusieurs applications en URSS (Mezghiche, 1989) et récemment au Japon.

Les laitiers ont des propriétés très différentes suivant la composition chimique, et l'état plus au moins cristallisé, où plus au moins vitreux (teneur en verre) résultant du traitement effectué, et suivant la vitesse de refroidissement les laitiers de haut fourneau acquièrent des propriétés très différentes.

2.3 COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER

Le laitier du haut fourneau est un co-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke se trouvent dans le laitier de haut fourneau. On ajoute des agents fondants dans la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans une zone particulièrement bien définie du diagramme $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. Zone où la température de fusion de ces trois oxydes est parmi les plus basses.

Les laitiers sont des silico aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (à 90 % et plus) par quatre oxydes ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$) et contenant en quantité insignifiante les oxydes : $\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{FeO}$ et les sulfures : CaS , MnS et FeS (Mezghiche, 1996).

La composition chimique du laitier du haut fourneau varie largement suivant la nature du minéral, du métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement.

Cette composition chimique est susceptible de se changer au cours des années selon le type du minéral, avec l'épuisement des sources.

Ces variations touchent directement les quatre majeurs constituants (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO) puis les composés en petites quantités (souffre et MnO et FeO).

En général, le contenu en CaO varie entre 30 et 50 %, le contenu en SiO_2 entre 28 et 38 %, et Al_2O_3 entre 8 à 24 %, le MgO entre 1 à 18 %, le soufre (S) de 1 à 2,5 %, Fe_2O_3 et MnO de 1 à 3 %. (Léa, 1971)

Dans le procédé de fabrication la majeure partie des oxydes de fer passe dans la fonte avec une quantité du combustible (coke) tandis que les autres éléments : (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) se combinent pour former le laitier du haut fourneau.

Le tableau 2.2 présente la variation de la teneur des oxydes majeurs et mineurs dans le laitier suivant ses types. (Behim, 2003) et (Aïrcin, 2001)

Tableau 2.2 : Composition chimique des différents types des laitiers de haut fourneau .

Constituants	Laitier français	Laitier nord américain	Laitier Algérien	
			1995	2000
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	39.30	40.07
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	08.20	6.00
CaO	40 à 43	36 à 45	39.40	42.15
Fe ₂ O ₃	< 4 %	0,3 à 20	00.00	2.03
MgO	< 6 %	3 à 12	6.00	4.68
S	< 1,5 %	-	0.07	0.15
TiO ₂	-	-	2.35	2.64
MnO	-	-	-	1.07
K ₂ O	-	-	-	1.16

La composition du laitier est présentée sur le même diagramme ternaire utilisé pour définir la composition du ciment portland et autres ajouts cimentaires indiquée à la figure 2.1 .

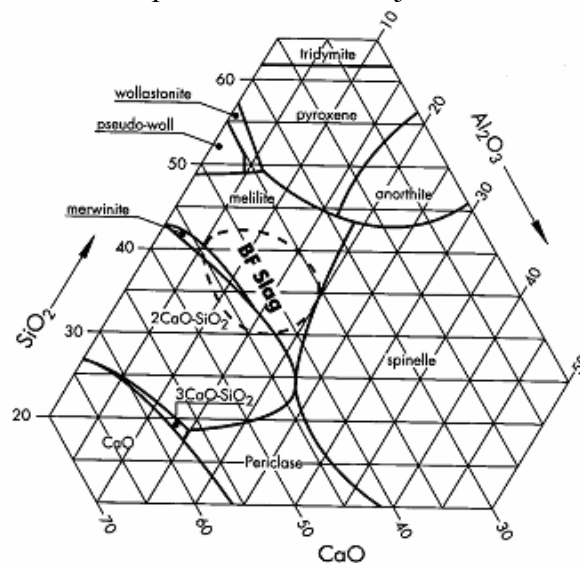


Figure 2.1 : représentation des principaux ajouts cimentaires dans un diagramme ternaire

SiO₂ – CaO – Al₂O₃. (Bijen, 1996).

2.3.1 Composition minéralogique du laitier granulé

Le laitier granulé est un verre (la teneur en verre dépasse 90 %), il est considéré comme un liquide rapidement refroidi (super cooled liquids) . La rapidité du refroidissement est une caractéristique des silicates fondus pour acquérir la forme des verres.

Le passage de l'état liquide à l'état solide est accompagné par un arrangement des molécules, qui prennent une orientation bien définie dans les cristaux. (Léa, 1971)

Si le refroidissement du laitier est rapide, les groupes moléculaires conservent en majorité leurs disposition irrégulière (arrangement irrégulier), et la viscosité augmente rapidement au fur et à mesure que la température baisse, et le laitier passe de l'état liquide à un autre solide mais sans développement de la structure cristalline.

Les verres sont instables et ont tendance à passer à une forme cristalline, cette tendance est due à la haute viscosité des verres qui réduit la mobilité des molécules.

Examinée au microscope la poudre du laitier granulé présente des grains transparents clairs isotropiques désignant le verre et une zone noire (pour un laitier mal granulé) qui présente le début de la cristallisation. Cet aspect est illustré à la figure 2.2 et 2.3.

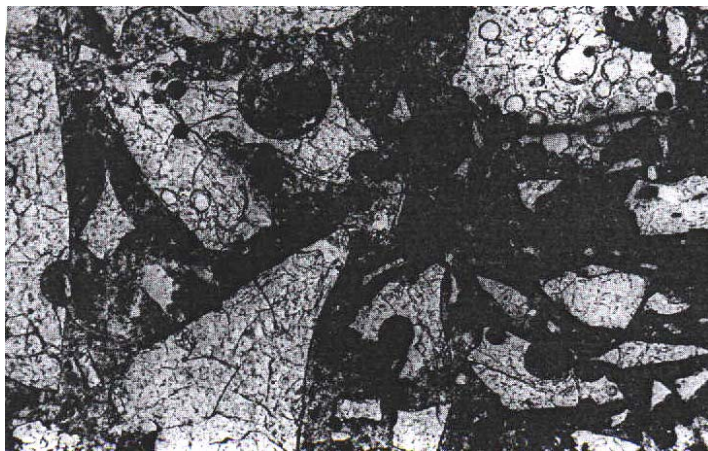


Figure 2.2 : Les particules vitreuses de laitier en blanc. (Aïtcin, 2001)

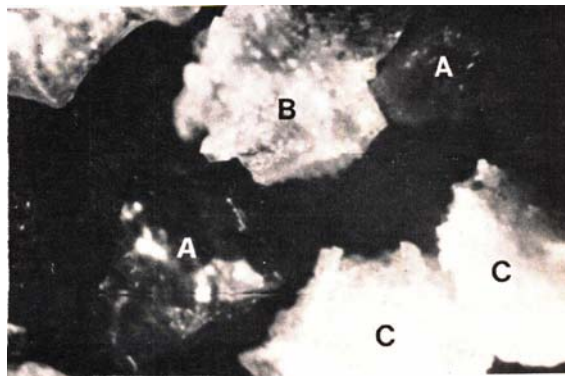


Figure 2.3 : Les grains du laitier. (Aïtcin, 1966)

La forme angulaire des particules de laitier et leur aspect poreux est dû à une immersion dans l'eau.

Les particules de laitier totalement vitreuses indiquent que la température de ce laitier était élevée au moment de sa trempe (laitier chaud). Par contre si la température du laitier

fondu n'est pas trop élevée, certains cristaux ont déjà pu se former dans la phase liquide et après sa trempe, ce laitier sera moins réactif (laitier froid) que le laitier chaud qui est plus vitreux. Un tel laitier est présenté à la figure 2.4.

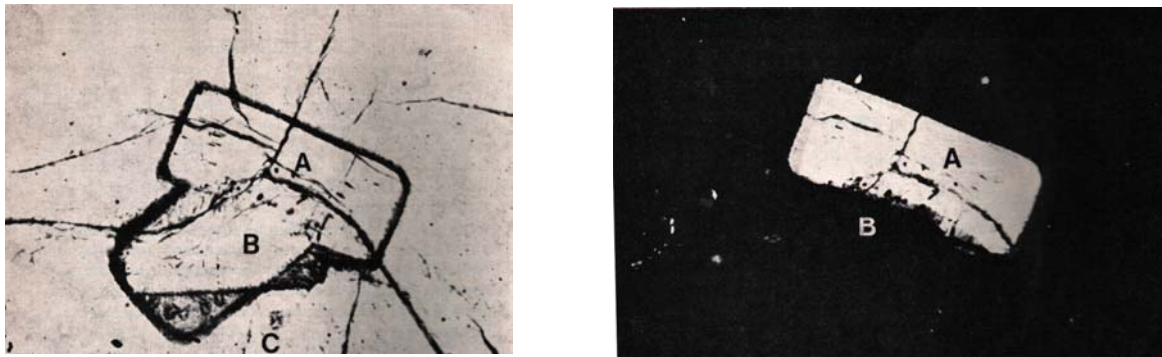


Figure 2.4 : des cristaux de mélilite dans une particule vitreuse du laitier. (Aïtcin, 1966)

Les grains du laitier bien trempés ont une couleur beige ou grise, tandis que les laitiers plutôt froids ont une couleur beaucoup plus sombre qui peut varier du gris foncé au brun foncé.

A l'aide d'un diffractogramme aux rayons X, on peut facilement vérifier si la trempe du laitier est faite convenablement où non. En l'absence de cristallites, le diagramme présente un halo centré en règle générale à la hauteur du pic principal de la mélilite.

2.3.2 Composition minéralogique du laitier cristallisé

Lorsqu'on laisse refroidir le laitier très lentement les quatre oxydes SiO_2 , Al_2O_3 , CaO et MgO entrent en combinaison pour former différentes espèces minéralogiques cristallisées bien connues, se sont essentiellement des minéraux de la famille de la mélilite, série mixte allant de la gehlenite à l'akermanite, le groupe (Si, Mg) pouvant se substituer isomorphiquement à (2Al).

Les assemblages probables des minéraux formés par les quatre constituants principaux $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ dans les limites des proportions caractéristiques des laitiers ne peuvent être prédits avec certitude d'après les diagrammes d'équilibre des phases, parce que le système quaternaire n'a pas encore été étudié complètement.

Les laitiers contenant relativement moins de MgO (plus de 5 %) contiennent toujours la melilite le principal constituant, ce nom est donné à une série isomorphe des solutions solides contenant la gehlenite ($2\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$) et l'Akermanite ($2\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2$).

Par contre dans d'autres laitiers la solution solide est représentée seulement par l'Akermanite (C_2MS_2).

Les autres minéraux qui auront lieu dans d'autres laitiers sont : la bredigite (α_2C_2S), la barnite (β_2C_2S), pseudowollastonite (γC_2S), et la wollastonite (CS), rankinite (C_3S_2), la merwinite (C_3MS_2), spinelle (MA), diopside (CMS_2), monticellite (CMS), amorphite (CAS_2) et la fosterite (M_2S). (Léa, 1971)

Le minéral qui peut être activé est seulement le silicate bicalcique dans la forme α ou β , tandis que (γC_2S) est inerte. (le MgO est observé dans le laitier à forte teneur en MgO (MgO > 16 %)).

Le tableau 2.3 représente les assemblages possibles des minéraux cités précédemment dans la composition du laitier (CaO, Al_2O_3 , SiO_2 , MgO).

Tableau 2.3 : Les assemblages possibles des minéraux à partir des oxydes (CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO) du laitier. (Léa, 1971)

Laitiers examinés (21types)	C_2AS/C_2MS_2 Solution solide	C_2MS_2	C_2S	CS	C_3S_2	C_3MS_2	MA	CMS_2	CMS	CAS_2	M_2S	MgO
5	X		X		X							
5	X			X						X		
4	X			X	X							
3	X					X	X					
2	X						X			X		
1		X					X			X	X	
1		X				X	X		X			
	X		X			X						
Autre assemblages non observés sur 21 types		X		X				X		X		
		X						X		X	X	
		X					X		X		X	
			X			X	X					X
						X	X		X			X

Plusieurs minéraux peuvent apparaître sous plusieurs formes par exemple C_2S . En haute températures les formes observés sont α et β , où α transformera pendant le refroidissement en forme γ et β .

Les laitiers basiques sont surtout constitués par les éléments cristallisés suivants :

- ménilite : qui est une solution solide de gehlenite (C_2AS) et l'akermanite (C_2MS_2).
- Merwenite : C_3MS_2 .
- Silicate bicalcique C_2S (βC_2S).

Pour les faibles teneurs en Al_2O_3 , le silicate bicalcique peut augmenter de volume de 10 % par passage de la forme β à la forme γ d'où le phénomène d'effusement. (Venuat, 1989) La figure 2.5 présente un laitier cristallisé, refroidi à l'air sous lumière polarisée dans un microscope optique où les cristaux blancs en formes de prismes sont des cristaux de méililite.

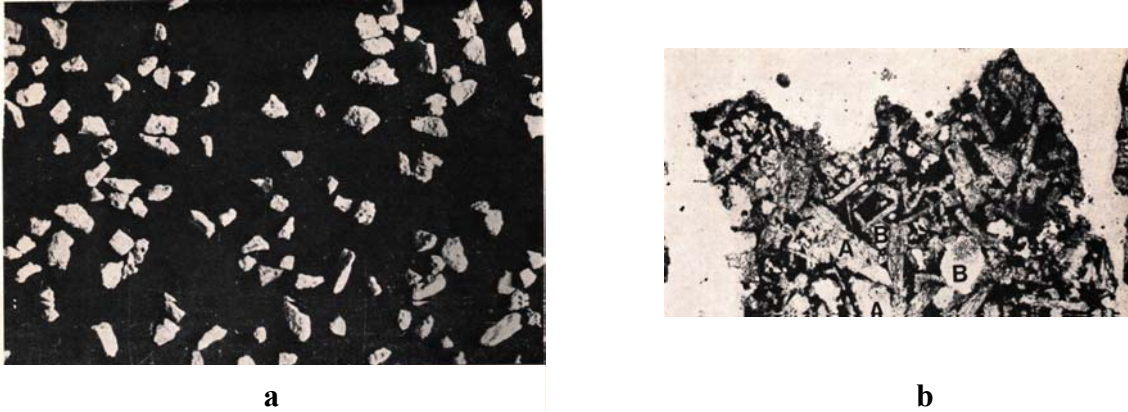


Figure 2.5 : Le laitier cristallisé (les cristaux blancs sont les cristaux de méililite (Aïtcin,1966)

a. grains de laitier cristallisé

b. lame mince de laitier cristallisé.

2.4 REACTIVITE DU LAITIER

La granulation du laitier du haut fourneau procure aux laitiers une activité complémentaire, l'état vitreux est une caractéristique essentielle liée aux propriétés hydrauliques du liant, ce qui traduit l'utilisation du laitier granulé finement broyé comme un ajout cimentaire.

La relation entre la composition chimique, la structure et l'activité hydraulique du laitier, fait l'objet de plusieurs études. Ces études ont montré que l'activité du laitier dépend essentiellement de sa structure, qui dépend elle aussi de la composition chimique et du traitement thermique effectué.

2.4.1 Influence de la composition chimique sur la réactivité du laitier

L'influence de la composition chimique du laitier sur la réactivité est très complexe :

- Les oxydes (Al_2O_3 et CaO) augmentent l'activité hydraulique de laitier tandis que la (SiO_2) la fait diminuer. (Mezghiche, 1996).
- L'hydraulicité augmente quand le rapport $\frac{CaO}{SiO_2}$ augmente, mais il faut signaler qu'une teneur élevée de CaO rend la granulation du laitier plus difficile.

- L'augmentation de MgO jusqu'à 18 % est favorable, il n'y a pas de risque de gonflement engendré par le MgO libre pendant l'hydratation, contrairement au ciment portland. (Bijen, 1996).
- La teneur élevée de (Al₂O₃) donne un développement de la résistance aux âges ultérieurs (une insuffisance de CaO est compensée par Al₂O₃) .
- La teneur en oxydes de titane, de protoxyde et de manganèse doit être limitée.
- La teneur en (FeO) est insignifiante, n'ayant pas d'effet considérable sur la qualité du laitier.
- Une faible quantité des sulfures de calcium allant jusqu'à 7 % accroît quelque peu l'activité du laitier.

Plusieurs formules sont développées, afin d'obtenir une composition favorable du laitier, à partir des essais effectués sur les mélanges du laitier granulé.

2.4.1.1 Le rapport de basicité

Dit aussi module de basicité qui présente le rapport entre la somme des oxydes basiques que contient le laitier à la somme des oxydes acides.

Suivant les auteurs (Aïtcin, 1968), (Venuat, 1989) et (Léa, 1971) et les pays, les conventions qui définissent cet indice de basicité sont très différentes, c'est la valeur d'un des rapports suivants :

$$M_{01} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2} \quad , \quad M_{02} = \frac{CaO}{SiO_2} \quad , \quad M_{03} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

la valeur idéale de l'indice M₀₃, celle permettra d'obtenir le meilleur laitier s'établit à (1,32 - 1,34) environ.

Le laitier qui à un indice M₀₃ inférieur à 1,3 à une température de fusion un peu plus élevée, ce qui entraîne une dépense supplémentaire de combustible.

Suivant le module de basicité, les laitiers peuvent être classés en 3 catégories :

- M₀₃ > 1 : les laitiers sont basiques.
- M₀₃ < 1 : les laitiers sont acides.
- M₀₃ = 1 : les laitiers sont neutres.

2.4.1.2 Le module d'activité

L'activité hydraulique du laitier croit avec l'augmentation du module de basicité et celui d'activité, qui est donné par :

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$$

Pour ($M_a = 0,33$ à $0,40$) le laitier est acide et pour ($M_a = 0,17$ à $0,25$) le laitier est basique.

En Allemagne, le module adopté est :

$$I = \frac{CaO + MgO + \frac{1}{3} Al_2O_3}{SiO_2 + \frac{2}{3} Al_2O_3} \geq 1 \quad \text{formule de Roque Joffre. (utilisée de 1917 à 1942).}$$

$$II = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1 \quad \text{(formule en vigueur chez certains auteurs allemands depuis 1942).}$$

$$III = \frac{CaO + CaS + \frac{1}{2} MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO} \geq 1,5 \quad \text{formule de Keil.}$$

Un excellent laitier est obtenu pour $III = 1,9$, ou plus entre ($1,5$ et $1,9$) le laitier obtenu est d'une meilleure qualité.

En France, Langavant a déterminé l'indice de qualité :

$$i = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0,5MgO - 2SiO_2$$

Cette formule est équivalente à celle de Keil.

Pour un indice : $i < 12$: on obtient un laitier présentant de faibles propriétés hydrauliques.

Pour un indice : $i > 16$: on obtient un laitier représentant de meilleures propriétés hydrauliques.

Enfin, les normes soviétiques (GOST 1376 – 74) estiment l'hydraulicité de laitier granulé du haut fourneau par le coefficient de qualité qui est défini comme étant le rapport des oxydes de calcium, d'aluminium et de magnésium et de bioxyde de silicium et de titane.

$$K' = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO_2} \quad \text{(Cette formule est valable pour une teneur de MgO } \leq 10 \text{ \%).$$

Pour les teneurs élevées ($MgO \geq 10 \%$) la formule deviendra :

$$K' = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO_2 + (MgO - 10)}$$

L'hydraulicité est élevée quand K est élevé (Mezghiche, 1989).

2.4.2 L'influence de la structure sur la réactivité du laitier

Seul le laitier suffisamment vitrifié est réactif (qui est obtenu par granulation du laitier), la structure vitreuse attribue au laitier la faculté de réagir, une fois broyé il possède des propriétés hydrauliques latentes qui ne peuvent être mobilisées que dans un milieu fortement basique.

Au contact avec une solution basique le verre, (qui est la partie active dans le laitier granulé) se dissout pour donner naissance au hydrates. (Bijen, 1996)

La structure vitreuse est une phase instable et désordonnée, c.à.d elle n'a pas d'arrangement atomique contrairement à la structure cristalline dont les réseaux présentent des caractéristiques constantes.

Cette structure vitreuse possède une énergie de cristallisation non dissipée de l'ordre de 200kj/kg. (Venuat, 1989)

Ainsi, la réactivité du laitier est liée au degré de vitrification (l'importance de la phase vitreuse par rapport à la phase cristalline) et à la température du laitier fondu lors de sa granulation (la température élevée confère au laitier granulé des propriétés hydrauliques importantes).

Un certain taux de cristallisation par exemple de 5 % peut être favorable.

Dans le système (CaO , MgO , Al₂O₃ , SiO₂) du verre dans les laitiers les cations qui forment le réseau sont la silice et l'alumine qui sont liés les uns aux autres, le calcium et le magnésium occupent les vides relativement importants dans le réseau de la structure, ils sont nommés les ions modificateurs du réseau. (Runzhang et Al, 1983).

2.4.3 Influence de la vitesse de refroidissement sur la réactivité

Le refroidissement lent du laitier conduit à une baisse sensible de l'activité de celui-ci, vu la formation des phases cristallines correspondant à une forme minéralogique stable.

Tandis que le refroidissement rapide du laitier fondu donne une structure vitreuse métastable (un tel système possède une réserve élevée d'énergie chimique interne) (voir 1.6 : Présentation du sous produit).

2.4.4 Influence de la finesse de mouture

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité d'un béton. Quand la finesse du liant est élevée, la surface de contact des grains de liant devient grande, ce qui

permet une forte réactivité chimique du liant, en donnant des résistances mécaniques élevées à long terme. (Smolczyk, 1980)

L'activité d'un liant au laitier remonte en augmentant la surface spécifique du laitier de 2000 cm²/g à 4800 cm²/g, le temps de prise du ciment de laitier présentant une finesse plus de 5300 cm²/g est le même qu'un ciment portland. De même sa résistance mécanique augmente en augmentant la finesse du laitier. (Behim, 1986)

Mais pour les conditions économiques il faut limiter cette finesse (pour obtenir ainsi un ciment performant et économique).

Il a été établi que le laitier trop broyé ne se prête pas à un stockage de longue durée, il demande des quantités accrues d'eau lors de la fabrication d'un liant à sa base, ce qui compromet les propriétés physico- mécaniques du béton, d'où l'utilité d'utiliser les laitiers broyés à une finesse de 2200 à 3000 cm²/g (qui est rentable du point de vue économique).

2.4.5 Influence du temps de stockage sur la réactivité du laitier

Si le laitier granulé est abandonné à l'air libre, et s'il subit seulement l'effet des intempéries atmosphériques, il peut se conserver très longtemps sans altération, d'où la possibilité de le stocker en tas sans précaution particulière. (Landry, 1971).

L'activité du laitier broyé, et son délai de prise dépend généralement du temps de stockage, il a été établi que après 1 à 2 mois de stockage du laitier finement broyé, il y a une augmentation du délai de prise du liant au laitier, son activité se baisse si la surface spécifique est plus grande. (Lienko, 1969).

2.4.6 Influence du traitement thermique effectué sur la réactivité

Les ciments au laitier supportent bien l'étuvage (accélération du durcissement), l'élévation de la température rend l'hydratation plus active et permet ainsi la formation des hydrates rapidement.

La figure 2.6 représente l'effet favorable de l'étuvage sur la résistance mécanique à la compression d'un ciment au laitier (contenant 80 % du laitier).

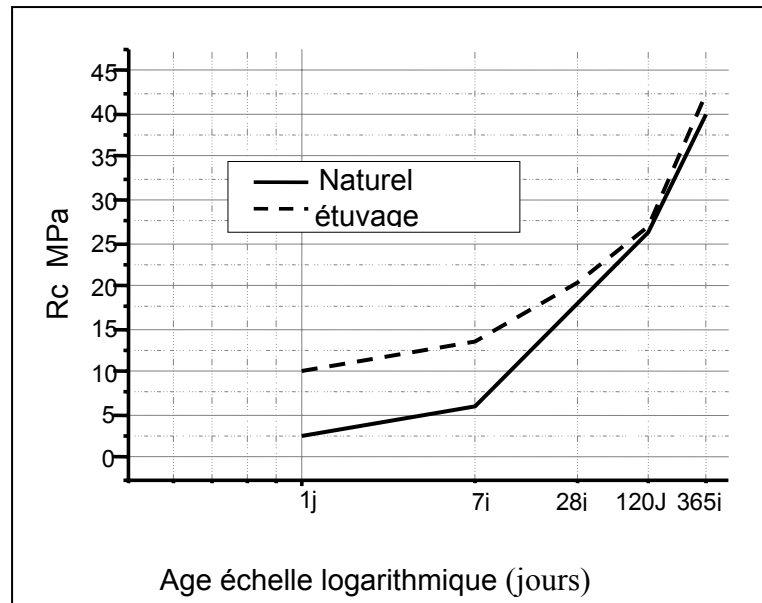


Figure 2.6 : Influence de l'étuvage sur la résistance mécanique du ciment au laitier. (Zeghichi, 1998a, 1998b)

2.4.7 Influence du milieu (basique- acide) sur la réactivité du laitier

Les composés chimiques sont des produits solubles dans l'eau et le plus souvent d'origine minérale, acides fortes, bases fortes et leurs sels. Ils agissent en modifiant sélectivement la solubilité et la vitesse d'hydratation des différents constituants anhydres des liants.

On sait que les liants hydrauliques comportent des constituants basiques (à forte teneur en chaux) et des constituants plus acides (silice et alumine). Les constituants basiques sont accélérés par les anions les plus forts (chlorures, nitrates, ...), les constituants acides sont accélérés par les cations les plus forts (soude, potasse, ammoniac).

Les ciments portland (forte teneur en clinker) renferment beaucoup des silicates de chaux dont la dissolution sera accélérée par les acides et leurs sels.

Les ciments à forte teneur en laitier, en cendres ou en pouzzolanes, qui renferment beaucoup des constituants silico- alumineux seront accélérés principalement par les bases et leurs sels. (Venuat, 1984).

Le laitier granulé finement broyé est un véritable ciment, car il suffit d'une petite quantité de catalyseur, où plutôt des réactifs (où adjuvants chimiques) pour amorcer la prise et le développement des résistances mécaniques.

Afin d'étudier l'effet des différents adjuvants chimiques sur l'activité du laitier (Runzhang, 1988) a préparé plusieurs solutions acides et d'autres basiques à partir du HCl,

CaCl₂, NaOH présentant des différents PH.

La figure (2.7) représente l'effet du milieu (PH) sur la solubilité des silicates du laitier, la figure (2.8) représente l'effet du PH sur le résistance mécanique en compression du ciment au laitier (contenant 50 % du laitier).

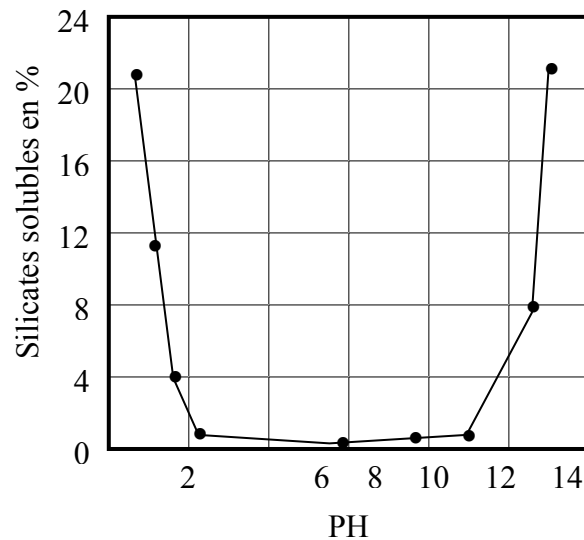


Figure 2.7 : Quantité des silicates du laitier solubles en fonction des valeurs du PH.
(Runzhang, 1988).

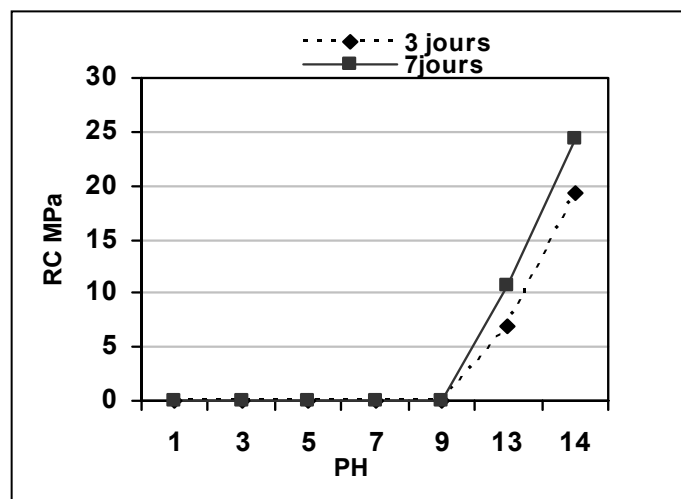


Figure 2.8 : Résistance en compression en fonction des valeurs de PH.
(Runzhang, 1988).

D'après (Runzhang, 1988) seulement les solutions possédant des PH supérieurs à 12 qui favorisent la solubilité des constituants du laitier, et par suite la formation des hydrates et ainsi le développement des résistances mécaniques.

Dans les solutions acides, où le PH est inférieur à 3 les hydrates sont instables, ne sont pas capables de former un réseau de structure, dont il est évident que la pâte de ciment au laitier ne possède pas de propriétés liantes.

Si les composés basiques du laitier sont dissous dans les solutions acides, le milieu acide peut se changer en milieu basique permettant la formation de quelques hydrates à partir de ces composés solubles.

Les propriétés hydrauliques du laitier sont latentes, ne peuvent être mobilisées que dans un milieu fortement basique, ce milieu est assuré soit par une activation calcique, sulfatique ou alcaline.

2.5 ACTIVATION DU CIMENT AU LAITIER

Le laitier granulé finement broyé ne possède pas par lui-même aucune vertu liante, mais en présence d'un milieu basique il réagit chimiquement pour former des composés possédant des valeurs liantes.

2.5.1 Définition

L'activation du laitier finement broyé consiste à assurer une composition chimique dans la solution, permettant aux molécules des composants du laitier de se dissoudre, et de former rapidement des hydrates stables, à partir de l'introduction de quelques agents basiques appelés activants (activants de prise).

Les activants agissent non seulement à titre de catalyseur d'attaque de verre dans le laitier, mais également en tant que réactif dans les réactions de formation des hydrates. (Voinovitch et Dron, 1976) et (Voinovitch et al, 1981).

L'activation classique du laitier est effectuée :

- A partir de la portlandite (Ca(OH)_2) produite lors de l'hydratation du clinker.
- A partir de l'ajout de CaO sous forme broyée au laitier finement broyé.
- A partir de la soude.

Suivant la nature de l'activant à introduire (Dron, 1973) distingue trois types d'activations :

2.5.2 Activation calcique

La chaux confère à la phase aqueuse un PH suffisant pour permettre le passage en solution de l'alumine et par voie de conséquence de la silice et de la chaux. Les réactions de formation d'hydrates consomment l'activant (la chaux).

Ce type d'activation donne des bétons présentant une faible chaleur d'hydratation (ce qui est bénéfique dans les ouvrages de masses).

2.5.3 Activation par le clinker du ciment portland

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_3S et du C_2S (30 % de la masse anhydre du ciment).

Cette chaux développe un PH égale à 12 (basicité de la solution sursaturée de la chaux) ce qui favorise la dissolution du verre du laitier. L'absence du réseau de SiO explique la facilité de l'activation du laitier, par contre le ciment portland aux cendres volantes (à une température de $20^{\circ}C$) a besoin d'un PH au moins égale à 13 afin que ces constituants se décomposent.

La réaction du laitier est immédiate, par contre celle des cendres volantes est lente (elle apparaisse après plusieurs semaines).

Selon (Guetteche et Houari, 2002), quand on mélange le laitier finement broyé avec l'eau, les ions dissous sont presque inexistant, on remarque une faible conductivité qui ne dépasse pas $0,6$ ms/cm pour une surface spécifique du laitier de 6000 cm^2/g .

Par contre avec l'ajout de 19 % du CPA et 5 % du gypse, la conductivité augmente considérablement. Selon les étapes suivantes :

- La dissolution des constituants du clinker et ceux du gypse.
- Les réactions continuent probablement pour former l'étringite et le CSH, ainsi la solution deviendra riche en Ca^{++} , la conductivité atteint 12 ms/cm.
- Le point de saturation en chaux est atteint, la portlandite se précipite, la conductivité se baisse après un pic de 12.5 ms/cm.
- La période finale est caractérisée par l'accélération des réactions et la précipitation de la portlandite, les ions sont consommés, la conductivité diminue lentement.

Ces étapes sont représentées aux figures 2.9 et 2.10 :

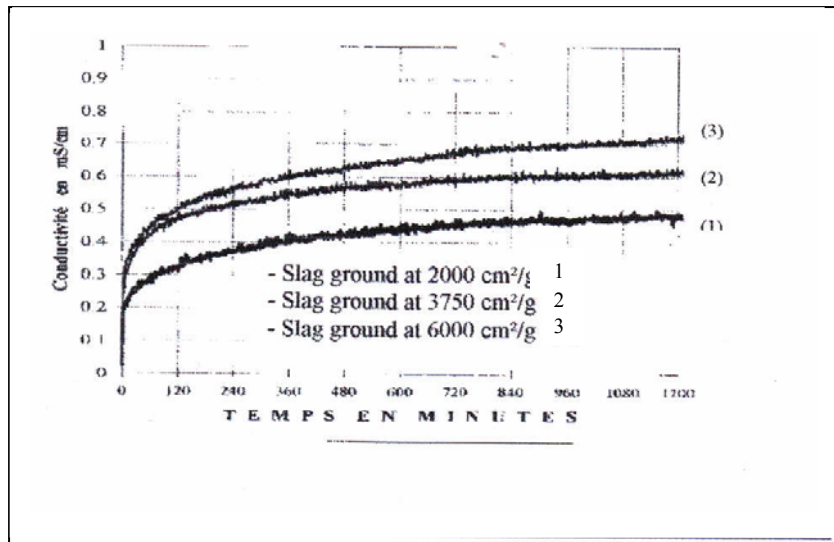


Figure 2.9 : Conductivité du ciment au laitier en fonction de la finesse (Guettache, 2002)

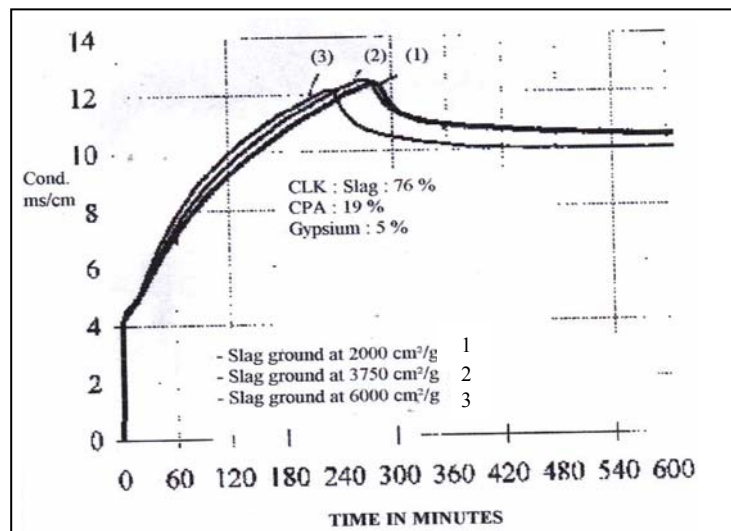


Figure 2.10 : Conductivité du ciment au laitier présentant 19 % du clinker. (Guettache, 2002)

La plupart des ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui formé durant l'hydratation du ciment portland.

On peut donc décrire une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :

Pouzzolane + eau + chaux \rightarrow silice de calcium hydraté.

Cette réaction est généralement lente, et peut se développer sur plusieurs semaines.

La figure 2.11 représente l'effet positif des ajouts sur la micro structure de la pâte de ciment.

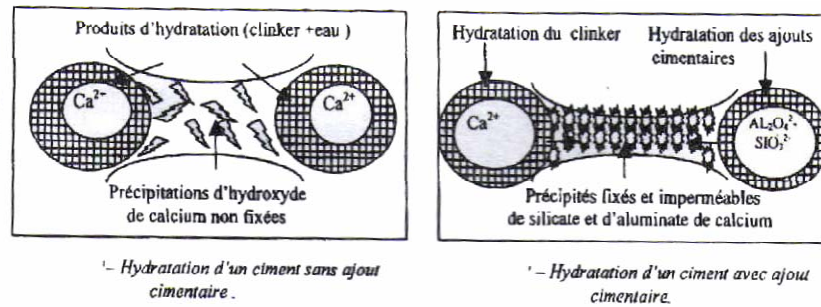


Figure 2.11 : comparaison de l'hydratation d'un ciment sans ajouts et un autre avec ajouts. (Bakker, 1983).

Pendant la décomposition des constituants du laitier, le SiO_2 , CaO et Al_2O_3 précipitent à l'extérieur du grain du laitier enrichi de magnésium pour former un aluminium riche en gel de CSH.

D'après (Guetteche et Houari, 2002) tout les types du clinker (de différentes compositions chimiques) réagissent avec le laitier finement broyé. Une légère différence apparaîtra dans la résistance obtenue (en particulier à moyen et à long terme).

Les résultats montrent qu'une meilleure résistance est obtenue dans un ciment portland au laitier dont le clinker est soit riche en C_3S ou en C_3A , un clinker riche en C_3S et pauvre en C_3A active le laitier.

Le clinker a une influence considérable sur le développement de la résistance des ciments au laitier. Non seulement le clinker active le laitier mais la situation peut être inversée et le laitier avec ces composants mineurs peut avoir une grande influence sur le développement de la résistance des constituants du clinker (Wthorm and al, 1980) et (Mantel, 1994).

2.5.4 L'activation sulfatique

Ce type d'activation a fait l'objet des études faites par (Runzhang, 1988).

Dans ce type d'activation, une véritable réaction produira entre les constituants du laitier et le sulfate de calcium, ce dernier ($CaSO_4$) qui se combine avec les composants du laitier dissous dans l'eau, pour donner naissance à l'étringite, la quantité de l'alumine qui reste, constitue l'hydroxyde d'aluminium et du silicate de calcium hydraté.

Dans le cas de l'activation sulfatique, la basicité du laitier n'est pas le seul critère à considérer, il faut tenir compte de la teneur d'alumine qui doit être modérée (Léa, 1971).

L'activation du laitier par le gypse améliore la résistance du ciment au sulfates, et développe rapidement ces résistances mécaniques. Par contre les autres aspects de la durabilité sont affectées.

Selon (Runzhang et al, 1988), le sulfate de calcium ne se considère pas comme un activant du laitier, il développe un PH de 10,6 seulement dans la solution, un tel PH ne permet pas la dissolution du verre de laitier (comme indiqué à la figure 2.7), et ne présente pas de propriétés liantes.

(La condition du PH n'est pas considérée, en classant les sulfates comme activateurs du laitier).

Par contre l'addition du gypse au laitier dans un milieu basique, accélère l'hydratation du laitier, du fait de la formation de l'étringite et la diminution de la concentration des ions de l'Alumine et de Calcium dans la solution, ce qui favorise la formation de la structure de la pâte du ciment au laitier et améliore nettement sa résistance.

2.5.5 L'activation alcaline

Ce type d'activation est développé à partir des années 70, et utilisé dans plusieurs applications en (URSS) et en Pologne. (Selon Anderson et Gram, 1987), l'activation alcaline se réfère principalement à l'activation par :

- Les alcalis caustiques (dont la formule chimique est R-OH).
- Les sels non siliceux provenant des acides faibles tels que : R_2CO_3 , R_2SO_3 , R_2S .
- Les sels siliceux du type $R_2O (m) SiO_2$.

Où R représente les ions des métaux alcalins (Na^+ , K^+ , Li^+).

2.5.5.1 L'activation par les alcalis caustiques (la soude)

D'une façon générale les bases solubles accélèrent la dissolution de la silice et de l'alumine. Les hydrates de sodium et de potassium NaOH et KOH sont courants et bien connus pour accélérer la prise et le durcissement aux premiers âges des ciments Portland et plus encore des ciments à fortes teneurs en laitier, il en serait de même les hydroxydes d'ammonium et de baryum. (Venuat, 1984).

La soude (NaOH) confère à la solution un PH supérieur à 12, favorable à la dissolution du verre du laitier, elle agit comme un catalyseur sur le laitier (catalyseur produit qui permet le déclenchement de la réaction, et qui n'est pas consommé par celle-ci) (Voinovitch et Dron, 1976).

L'activation par la soude améliore les résistances aux âges précoces.

La figure 2.11 présente l'évolution de la résistance mécanique en compression d'un liant contenant (80 % du laitier) non activé et un autre activé par la soude (dont la densité est de 1,15 g/cm³).

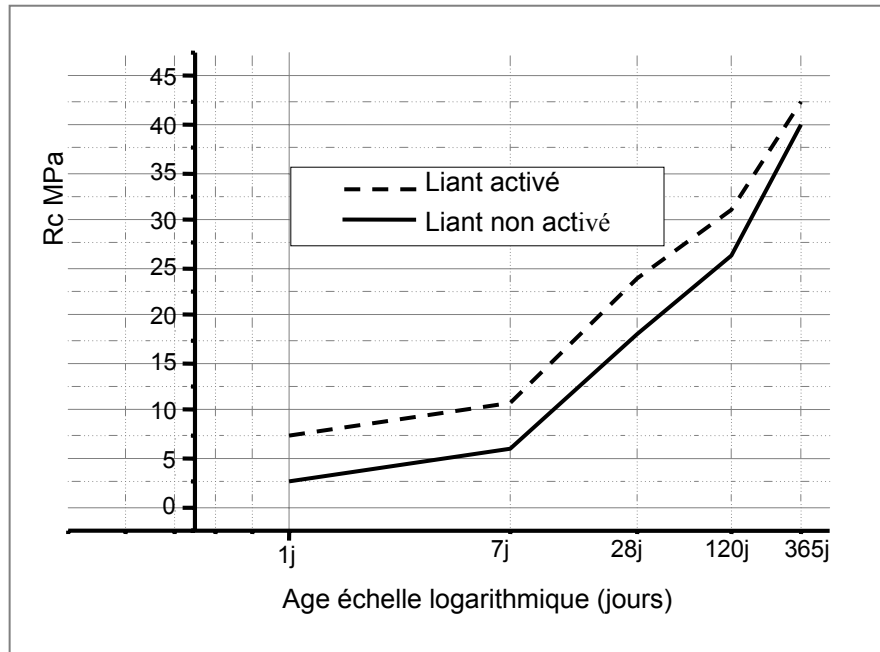


Figure 2.12 : L'effet de l'activation par la soude sur la résistance du ciment au laitier .
(Zeghichi, 2004a)

2.5.5.2 L'activation par les sels siliceux : (verre soluble)

Le verre soluble est une solution colloïdale du silicate de sodium ou de potassium ayant une densité qui varie de 1300 à 1500 kg/m³ pour une teneur en eau de 50 à 70 %. C'est un liquide visqueux constitué par un mélange de silicates alcalins ayant une composition variable :

$R_2O \cdot m \cdot SiO_2 + nH_2O$. (Mezghiche, 1989).

Où : m : est le module siliceux (module du verre soluble).

R : représente le sodium (Na) où le potassium (K).

Le module du verre à base du sodium est donné par :

$$M = \frac{SiO_2}{Na_2O} \cdot K \quad \text{où : } (K = 1,032).$$

Et le module du verre à base du potassium est donné par :

$$M = \frac{SiO_2}{K_2O} \cdot K \quad \text{où : } (K = 1,568).$$

Le module du verre soluble tout préparé varie généralement de 2,5 à 3.

La solubilité des silicates alcalins vitreux dépend de leur module silicique, de la température, et de la pression et de la quantité des impuretés et leur natures.

Les verres solubles présentent de vraies solutions aqueuses des silicates alcalins, où la silice est présentée dans une partie sous forme colloïdale, et dans une autre partie sous forme cristalline. Ils contiennent des mitasilicates et des disilicates .

Les solutions siliciques, où le module est inférieur à 2 sont un mélange du méta et du dissilicate avec l'hydroxyde sodique, tandis que celles présentant un module supérieur à 2 sont un mélange de ces silicates avec des agrégats siliciques hydratés colloïdaux .

(Mezghiche, 1996) considère que l'activation par le verre soluble est avantageuse, par rapport aux autres activateurs, elle donne des résistances en compression très élevées (3 fois de plus en utilisant d'autres activateurs). Elle permet d'élaborer des bétons à hautes résistances.

Mais il faut noter que la densité du verre liquide influe sur la résistance du ciment, en l'augmentant de (1150 kg/m^3 à 1300 kg/m^3), on remarque une augmentation importante de la résistance en compression à 28 jours de durcissement normal où par étuvage.

De même l'augmentation du module siliceux de (2 à 3) influe négativement sur la résistance mécanique en compression (pour les différentes densités).

La figure 2.13 représente la combinaison de l'effet de la densité et de module silicique du verre soluble sur la résistance mécanique en compression d'un liant de laitier après 28 jours de durcissement normal.

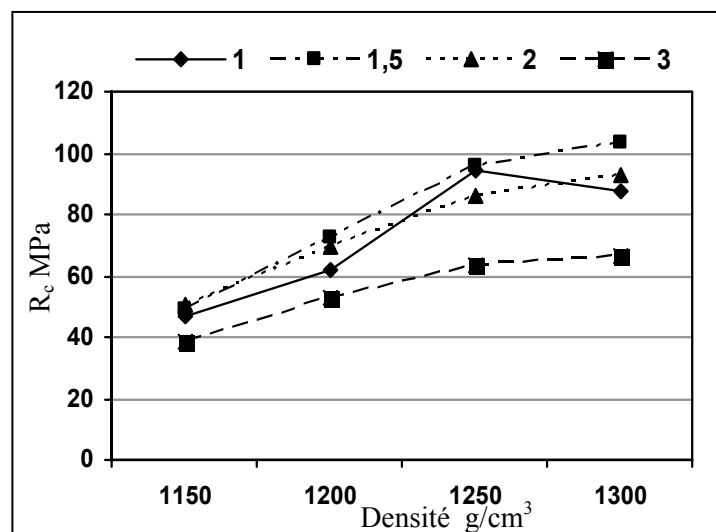


Figure 2.13 : l'effet de la densité de l'activant et son module silicique sur la résistance en compression d'un liant au laitier (Mezghiche, 1989).

Une valeur du module siliceux égale à 1,5 semble être favorable pour les différentes densités.

2.5.5.3 L'activation par les sels non siliceux (carbonate de sodium)

Le carbonate de sodium connu dans le commerce par la soude, sa formule est Na_2CO_3 , fabriqué en grande quantité à partir du chlorure de sodium, appelé par fois « cristaux de soude ». (ce type d'activation est traité dans la partie expérimentale de cette étude).

2.5.6 L'activation mixte (sodo –sulfatique)

Il s'agit d'une combinaison des deux activations précédentes soude + sulfate.

La soude réagit avec le sulfate de calcium pour donner de la chaux et du sulfate de sodium. La soude joue un rôle de catalyseur alors que le gypse et la chaux participent à la réaction d'hydratation pour former l'étringite et des silicates de calcium hydratés.

La combinaison du gypse chimique (phosphogypse) ou de gypse naturel broyé et de la soude avait donné naissance à un produit breveté, commercialisé sous le nom de gypsonat, la quantité de la soude ajoutée était par exemple de 7 à 8 % par rapport au gypse.

Il a été utilisé avec succès dans les techniques routières. (Venuat, 1984) et (Regourd, 1981).

2.5.7 Le rôle des activants

A partir des différents types d'activations, on peut déduire le rôle des activants :

- Ils accélèrent la solubilité des constituants du laitier (ils répondent à la condition du PH).
- Favorables à la formation de quelques hydrates stables.
- Favorables à la formation du réseau de la structure de la pâte du liant au laitier.

2.6 L'HYDRATATION DU CIMENT DE LAITIER

L'hydratation du ciment présente le passage de la pâte de l'état frais à l'état durci. Ce passage est suivi sous différents aspects :

- Aspect chimique : qui caractérise les réactions d'hydratation.
- Aspect physique : qui caractérise le développement de la micro structure, qui s'accompagne des phénomènes définissant l'état initial de la structure.
- Aspect mécanique : qui caractérise les performances acquises à court et à long terme.

2.6.1 Aspect chimique

L'hydratation des liants hydrauliques repose sur des mécanismes complexes qui agissent quasi simultanément, elle peut être simplifiée en :

- La dissolution des constituants.
- La formation d'une solution sursaturée.

- La précipitation des hydrates.

La notion de dissolution fait référence à la diffusion des ions qui se diffusent à partir des constituants du ciment en milieu aqueux. Il s'agit essentiellement des ions calcium, silicates et aluminates .

Lorsque les concentrations ioniques sont telles que les produits de solubilité des hydrates sont atteints, un processus de germination se déclenche.

Donc la vitesse de précipitation des hydrates dépend alors de leur solubilité, qui gouverne également le taux de sursaturation de la solution. Cette précipitation consomme des molécules d'eau et petit à petit les hydrates vont remplacer le volume occupé précédemment par l'eau et par les grains de ciment. (La précipitation s'effectue autour des grains). (Soroka, 1980), et (Chanvillard, 1999).

Avant d'aborder l'hydratation du ciment au laitier de façon globale, nous allons étudier isolement chaque constituant principal de laitier.

2.6.1.1 Hydratation des constituants minéraux du laitier

Les laitiers basiques sont surtout constitués par les minéraux suivants :

Gehlenite (C_2AS), L'akermanite (C_2MS_2) , la merwinite (C_3MS_2) et le silicate bicalcique (C_2S).

Selon (Butt, 1960) et (Budnikov, 1962) la gehlenite mélangée seulement avec l'eau ne développe aucune résistance, mais activée par la chaux elle développe des propriétés liantes.

- La gehlenite (C_2AS) en présence de $Ca(OH)_2$ s'hydrate pour former la gehlenite hydratée.
- L'akermanite (C_2MS_2) ne s'hydrate pratiquement pas à la température ambiante, mais en présence de chaux et de gypse elle se dissout.

L'hydratation du C_2S s'accompagne de la formation des silicates de calcium hydratés.

Les différents types d'activations du laitier conduisent à des produits d'hydratation distincts suivants la nature de l'activant utilisé.

2.6.1.2 L'hydratation du ciment portland au laitier

L'hydratation du ciment portland au laitier est très complexe par rapport à un ciment portland, parce que les deux composés (clinker et laitier) vont réagir avec l'eau.

On considère que le ciment portland s'hydrate de la même manière qu'un ciment portland artificiel seul:

- Le silicate tricalcique C_3S s'hydrate pour donner naissance aux deux composés : (silicate de calcium hydraté (CSH) et la chaux hydratée ($Ca(OH)_2$)).
- L'aluminate tricalcique (C_3A) et le gypse : dès le malaxage le C_3A et le gypse se dissolvent rapidement, et la solution devient saturée, les ions se combinent pour créer des cristaux d'étringite, en épuisant le gypse, l'étringite va se dissoudre pour former un nouveau composé (monosulfo – aluminate de calcium hydraté (MSA)).
- Le silicate bicalcique (C_2S) : donne les mêmes produits que C_3S , (mais la quantité de $Ca(OH)_2$ est plus faible).
- L'alumino – ferrite tétracalcique (C_4AF) : possède une séquence réactionnelle voisine de celle de C_3A .

Le laitier granulé finement broyé mélangé avec l'eau ne s'hydrate pas à cause de la formation d'une couche acide autour du grain du laitier empêchant le dernier de s'hydrater. La portlandite ($Ca(OH)_2$) libérée pendant l'hydratation du ciment portland va dissoudre cette couche acide, et entre ainsi en réaction avec les minéraux du laitier pour former les produits d'hydratation suivants :

- Un silicate de calcium hydraté (CSH ou tobermorite) dans la solution solide. cette phase contient probablement de l'alumine dans la solution solide (mais pas toute la quantité). et aussi elle peut contenir le magnésium dans la solution solide (puisque $Mg(OH)_2$ libre n'est pas détecté dans un ciment durci). (Léa, 1971).
- L'aluminate tétracalcique hydraté sous forme de cristaux hexagonaux.
 - L'étringite.
 - L'hydroxyde de calcium.

La formation du (MSA) dépend de la quantité de l'alumine et du gypse.

2.6.1.3 L'hydratation du ciment de laitier activé par la soude

Dans le cas de l'activation par la soude, le milieu développe un PH suffisant pour que les constituants de laitier se dissolvent, en formant des hydrates stables, sans que la soude soit consommée par cette réaction, les produits d'hydratation ainsi formés sont :

- Le silicate de calcium hydraté (CSH).
- L'aluminate tétracalcique (C_4AH_{13}) sous forme de cristaux lamillaires et hexagonaux, plus frêles et moins réguliers.
- La gehlenite hydratée (C_2ASH_8), sous forme de cristaux lamillaires et hexagonaux, formant des plaquettes à arrêtes rectilignes plus épaisses (Voinovitch et Dron, 1976).

2.6.1.4 L'hydratation du ciment de laitier activé par la chaux

Dans ce cas, les produits d'hydratation sont les suivants :

- La silicate de calcium hydraté (CSH).
- L'aluminate tetracalcique (C_4AH_{13}) riche en chaux (à cause de la consommation de l'activant).

Dans ce type d'activation, la gehlenite n'a pas lieu de former, elle est incompatible avec la phase chaux qui la décompose en CHS et C_4AH_{13} (Dron, 1973).

2.6.1.5 L'hydratation du ciment de laitier activé par le gypse

Le laitier est activé par les sulfates de calcium, la réaction est assez lente, il se forme les composés hydratés suivants :

- Le silicate de calcium hydraté (CSH).
- L'hydroxyde d'Alumine ($Al_2(OH)_2$).
- L'étringite sous forme des aiguilles fines en épis ($C_3A, 3SO_4Ca, 32H_2O$).

Dans le cas de la combinaison des deux activations précédentes (soude + sulfates), il se forme surtout :

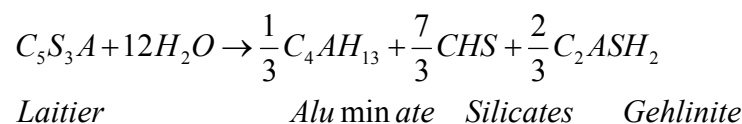
- Le silicate de calcium hydraté (CSH).
- L'étringite $C_3A, 3SO_4Ca, 32H_2O$.

Tous les produits d'hydratation obtenus à partir des différentes activations se résument dans les réactions chimiques suivantes :

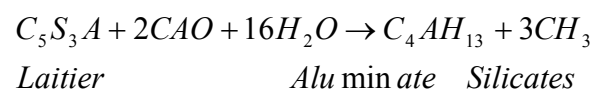
2.6.1.6 réactions d'hydratation du laitier

Selon (Voinovitch et Dron, 1976), La composition chimique du laitier est schématisée par la formule C_5S_3A reflétant la répartition courante des 3 oxydes :

Avec la soude l'équation d'hydratation ramenée à une mole s'écrit :



Avec la chaux :



Avec le gypse (sulfatique) :

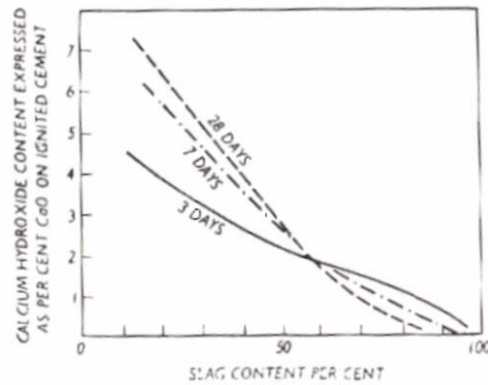


Figure 2.16 : Le contenu en hydroxyde de calcium dans un ciment au laitier durci (Léa, 1971)

2.6.2 Aspect physique

2.6.2.1 micro structure du ciment de laitier hydraté

Le silicate de calcium hydraté se présente sous la forme d'un gel, il constitue une matière de remplissage (il est principalement responsable de l'augmentation de la compacité).

Les ciments de laitier contiennent plus de CSH que les ciments portlands à cause de la consommation de la chaux dans les réactions d'hydratation (donc la chaux libre se présente seulement dans quelques points contrairement au ciment portland où la chaux libre représente plus 25 %), ce qui conduit à la réduction de la taille des pores dans la pâte du liant de laitier et la diminution relative de la porosité capillaire due à la précipitation des CSH, qui se reproduisent directement vers le grain de laitier, ce qui n'est pas le cas dans un CPA, où la précipitation des CSH est faite dans l'espace entre le grain de laitier et le grain de clinker. (Bijen, 1996) ce qui est illustré précédemment à la figure 2.12

La micro structure d'un ciment portland diffère de celle d'un ciment au laitier activé. Selon (Andersson et gram, 1987), l'étude des sections minces d'un mortier de CPA est un mortier de ciment au laitier activé par (Na_2CO_3) montre un grand nombre de micro fissures dans la pâte de ciment au laitier, cela est du probablement à la structure amorphe du laitier qui est sensible au changement d'humidité.

Les micro fissures sont également moins dans les pâtes de laitier présentant une grande surface spécifique.

2.6.2.2 La chaleur d'hydratation

Durant l'hydratation du ciment au laitier, le dégagement de la chaleur est relativement faible à une température de 25°C, cette chaleur varie suivant les ciments au laitier de 190 à 260 joule/g. (Venuat, 1989). Ce qui est bénéfique pour protéger le jeune béton de l'apparition des fissures thermiques.

La figure 2.17 présente l'évolution de la chaleur d'hydratation de trois types de liants (un CPA, un CPJ et un ciment au laitier).

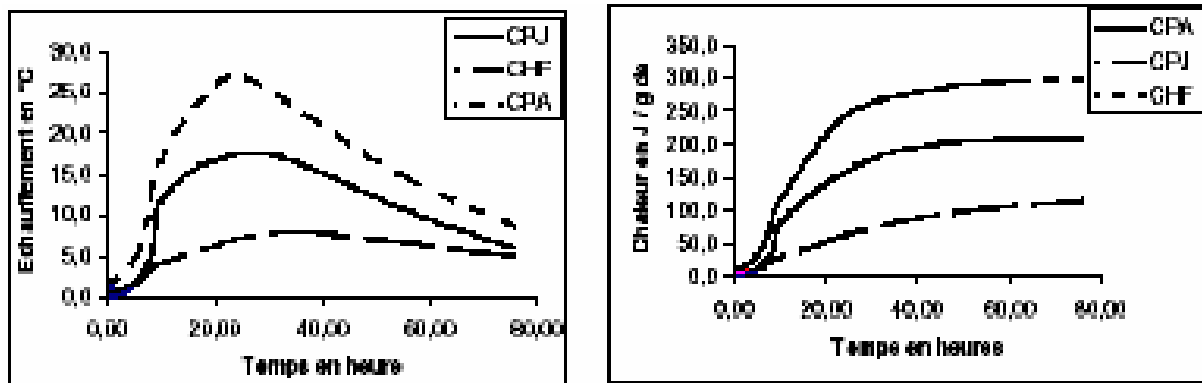


Figure 2.17 : échauffement et dégagement de chaleurs des mortiers de CPA, CPJ et CHF. (Behim et al, 2003).

L'hydratation du ciment de laitier activé se produit rapidement à une température de 60°C, donnant des courbes calorimétriques présentant 2 à 3 pics et une période dormante entre ces pics (le pic représente le développement des réactions).

L'évolution de ces courbes dépend fortement du type de l'activant utilisé. Le verre soluble est le meilleur activant, il accélère le processus de l'évolution de la chaleur, ce qui explique la rapidité de l'hydratation pendant les premières heures du traitement thermique par étuvage (la soude a un effet inférieur par rapport au verre liquide). Ce qui est indiqué à la figure 2.18.

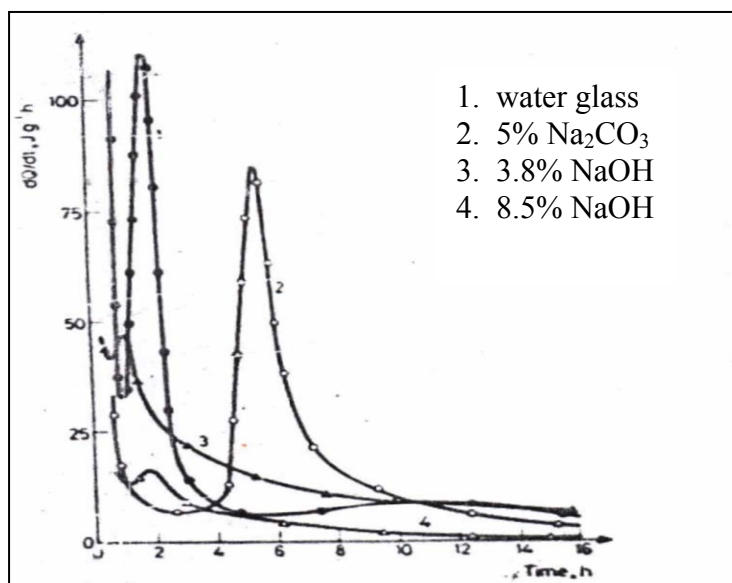


Figure 2.18 : Les courbes calorimétriques du laitier activé hydraté à 60°C (Malolespszy, 1988)

2.6.2.3 La prise de la pâte du ciment du laitier activé

La prise traduit la régidification du matériau lorsque les hydrates se connectent et forment un réseau continu.

Les ciments à forte teneur en laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les ciments portlands surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Ce temps de prise peut être raccourci par :

- L'ajout des activants.
- Une finesse de mouture plus grande.

L'ajout de l'activant réduit le délai de prise, selon sa nature et sa densité dans la solution, la finesse de mouture n'a pas d'influence considérable sur la prise du laitier.

Le début de prise d'un laitier activé (laitier basique) se situe dans une marge allant de 2 min à 1,5 heures, et la fin allant de 5 min à 2,5 heures.

Selon (Mezghiche, 1998), les délais de prise les plus courts (début 1 à 2 min et la fin 1,5 à 2,5 min) ont été constatés dans un liant activé par le verre soluble à une densité de 1150 kg/m³ et pour un module siliceux variant de 2,7 à 3.

Le délai court de prise caractérise aussi les liants au laitier à haute basicité ayant une phase vitreuse importante.

La soude et ses sels sont des accélérateurs de prise, également des rigidifiants (où raidisseurs) puissants, pour un liant de laitier le pourcentage de la soude influe considérablement sur le délai de prise.

Les résultats obtenus pour un mortier (1 : 3) avec un ciment de laitier activé par 1 % et 5 % de soude respectivement sont représentés au tableau 2.4.

Tableau 2.4 : délai de prise en fonction de la finesse du laitier et le pourcentage de soude ajoutée (selon Venuat, 1984).

Finesse de laitier cm ² /g	% de soude	Prise (h, min)	
		Début de prise	Fin de prise
1500	1	6.30	9.16
	5	0.45	3.15
2500	1	3.40	6.40
	5	0.40	1.50
3500	1	2.50	6.10
	5	0.30	1.45
5000	1	2.00	5.30
	5	0.20	1.30

Le défaut majeur du liant à laitier basique (activé par le verre soluble) réside dans son délai de prise bref, ce qui limite le domaine de son utilisation, pour y remédier on fait recours à l'ajout des additifs de toute sorte.

2.6.2.4 Le gonflement de la pâte du laitier basique

Les ciments de laitier sont connus pour leur remarquable stabilité volumique, aussi bien à chaud qu'à froid, ils jouent dans certain cas d'addition des produits gonflants le rôle de stabilisateurs.

La présence de l'activant n'a pas d'effet sur le gonflement du ciment au laitier basique.

2.6.2.5 Le retrait

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise de la pâte de ciment. le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait.

L'activation du ciment au laitier diminue sensiblement le retrait pour les différents pourcentages de laitier, en immersion totale ce retrait s'annule pour les pourcentages élevés du laitier activé.

L'ajout des activants (les bases) augmente le retrait après prise, mais au bout de plusieurs semaines, il diminue sans doute parce que la concentration en alcalis de la phase liquide augmente avec le temps du fait du départ d'une partie d'eau dans l'atmosphère sèche (ainsi se trouve confirmée l'hypothèse du rôle des alcalis sur les retraits à long terme). (Venuat, 1984).

2.6.3 Aspect mécanique

Les mécanismes d'hydratation du ciment transforment un milieu fluide en un matériau solide, par le développement de la micro structure.

La densité de cette micro structure va directement gouverner les performances mécaniques du béton.

2.6.3.1 Porosité de la pâte du ciment au laitier basique

Dans la pâte du ciment durcie, un grand volume des pores est inerte dans la structure. La porosité est principalement une dérivée de la présence d'une quantité d'eau. le reste de l'espace occupé par l'eau dans la pâte de ciment fraîche devient des pores dans la pâte du ciment durcie, ces pores sont divisés en :

- Pores capillaires qui dépendent de E/C et du degré de l'hydratation.

- Pores de gel (produits de l'hydratation). (Mellas, 2003).

Les ciments de laitier ont une forte compacité du aux hydrates formés pendant l'hydratation du laitier, d'où la dimension moyenne des pores est plus petite.

Les essais effectués par (Anderson et Gram, 1987) sur les pâtes des ciments au laitier activé par NaOH, Na₂CO₃, Na₂SiO₃ à l'aide du porosimètre à mercure montrent l'augmentation de la porosité des pâtes conservées à l'air par rapport à ceux conservées dans l'eau. la figure (2.19) illustre ces résultats.

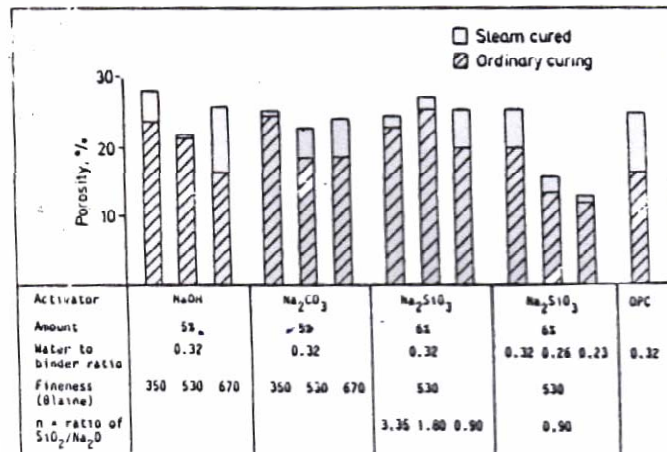


Figure 2.19 : porosité des pâtes en fonction de la finesse du laitier et le type d'activant. (Anderson et al, 1987).

2.6.3.2 Influence de la teneur en laitier sur la résistance mécanique du liant

Les résistances des ciments au laitier aux premiers jours sont moins élevées que celles des ciments portlands, mais les ciments de laitier les rattrapent souvent au bout de sept jours à 20°C) (plus tard, à une température plus basse mais plutôt à une température plus élevée).

Les ciments de laitier conservés humides présentent de très fortes résistances finales (la diminution de la résistances est plus importante à 7 jours et à 28 jours).

En augmentant la teneur en laitier , la résistance mécanique en compression diminue aux différents âges de durcissement. (cette diminution de résistance est liée au phénomène de l'hydratation, la quantité Ca(OH)₂ émise pendant l'hydratation du clinker diminue en diminuant le pourcentage du CPA, ce qui influe sur la solubilité du laitier et par suite la formation des hydrates.

2.6.3.3 Influence de la finesse du laitier sur la résistance

Selon (Behim, 1986) et (Nacéri, 2005), L'augmentation de la finesse du mouture du laitier influe positivement sur la résistance, ce qui peut s'expliquer par la rapidité des

réactions de l'hydratation. la figure 2.20 a et b illustre cette influence.

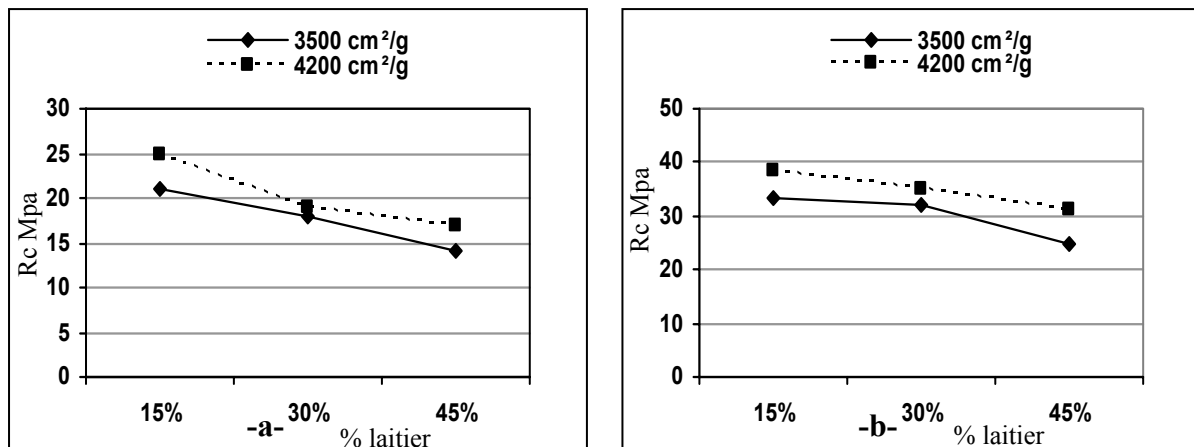


Figure 2.20 : résistance en compression en fonction du % du laitier et sa finesse.

(Nacéri, 2005)

a : après 7 jours de durcissement. b : après 28 jours de durcissement.

2.6.3.4 L'influence de l'activation sur la résistance du ciment au laitier

L'effet des activateurs sur la résistance diffère des uns aux autres, ceux de type R-OH (NaOH, KOH) présentent une légère augmentation de la résistance par rapport au liant non activé. Ceux du type R-CO₃ augmentent la résistance et les R₂O (m) SiO₂ augmentent significativement la résistance (3 fois de plus). (Zeghichi et al, 2005).

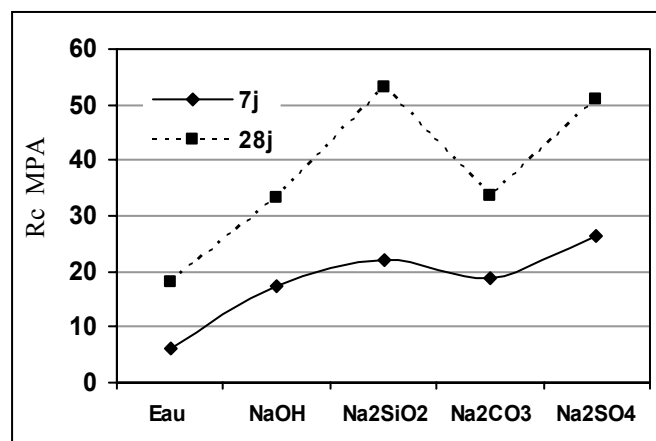


Figure 2.21 : l'influence des activateurs sur la résistance en compression.

(Zeghichi et al, 2005).

2.6.3.5 L'effet de la concentration de l'activant sur la résistance

L'augmentation de la densité des activateurs de (1.15 , 1.20 , 1.25 , 1.30) influe positivement sur la résistance à la compression, à la flexion et à la traction par flexion. (Zeghichi et al, 2003).

2.6.3.6 L'influence du traitement thermique effectué sur la résistance

Les ciments de laitier supportent bien l'étuvage (accélération du durcissement) surtout dans le cas des cycles moyens ou longs.

La combinaison de l'activation et l'étuvage améliore nettement la résistance mécanique. (Zeghichi , 2004).

2.7 L'ACTION DU MILIEU AGRESSIF

La chaux émise lors de l'hydratation d'un ciment portland est de l'ordre de 30 % (par rapport aux autres produits d'hydratation).

Elle contribue peu à la résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité, puisqu'elle peut être facilement lessivée par l'eau. ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment, et facilite ainsi la pénétration des agents agressifs.

2.7.1 L'action du milieu agressif sur les ciments de laitier activé

Les ciments de laitier résistent bien à l'action des eaux agressives surtout en immersion complète. La bonne résistance chimique est liée à la faible teneur en chaux et à la forte compacité des hydrates (les pores sont plus petits).

Pour cette même raison, ces ciments offrent une bonne résistance à la diffusion des alcalis et des ions de chlore. (Bijen, 1996).

2.8 L'ACTION DU GEL DEGEL SUR LES CIMENTS DU LAITIER

Les ciments de laitier résistent mieux au cycle de gel dégel, ceci grâce à l'absence de la chaux libre dans ces derniers.

La chaux libre faciliterait la désagrégation sous les modifications de volume dues à la présence d'eau alternativement congelée et liquide.

2.9 BETON A BASE DU LAITIER ACTIVE (BETON BASIQUE)

Les bétons basiques, où les bétons au laitier basique représentent un mélange de deux composantes :

La composante silico alumineuse est représentée par le laitier granulé finement broyé, et la composante alcaline (basique) par les composés des métaux basiques donnant la réaction alcaline dans l'eau, le squelette granulaire dans le béton basique est représenté soit par des granulats naturels où artificiels, d'une manière identique aux bétons ordinaires.

La préparation des mélanges de béton basique, la fabrication des structures, ne diffère pas sur le fond des techniques traditionnelles utilisables pour les bétons à portland.

Les paramètres principaux de la structure du béton sont le rapport Eau/Ciment, la quantité du liant, la quantité et la qualité des granulats. Les facteurs définissant la résistance et la déformabilité du béton basique sont le rapport composant alcalin / laitier, la densité du composant alcalin, la durée de vibration, les conditions de durcissement et la durée de traitement thermique.

L'utilisation des bétons basiques pour la fabrication des structures dans l'industrie, dans le génie civil et rural, dans la construction routière et celle d'ouvrages d'irrigation a montré leur fiabilité :

- Plus de 7 milles mètres cubes d'articles pour canaux d'irrigation ont été fabriqués en 1962 par l'usine d'éléments en béton armé (d'Izmail, (Dounaï vodstroï, URSS) d'une longueur de 20 Km, et qui sont à l'heure actuelle en bon état (Gloukhovski, 1967).
- Dès 1967 a été mise en série la fabrication de blocs muraux à base de liant de laitier à carbonate de sodium à l'usine de matériaux de construction (Ukraine).
- Depuis 1974, l'usine JBI du truat (Spetsbtroï, URSS) fabrique des dalles routières et des pierres préfabriquées en une quantité de 6 mille mètres cubes par an (Stepanets, 1974).
- A partir de 1974, l'usine de (Donestsk, URSS) fabrique 80.000 m³ de blocs muraux par an. Le long d'une durée de 10 ans, la résistance du béton a augmenté de 2 à 2,5 fois, l'imperméabilité et la résistance au gel ont également augmenté (Gloukhovski, 1967).

On utilise en guise des granulats, dans le béton basique des sables, sables argileux, limons sableux, gravier de quartz, laitiers granulés, laitiers de remblai, pierres de basalte et du calcaire concassé (Gloukhovski, 1959 et 1974).

Pour préparer les bétons basiques, il est possible d'utiliser en même temps des gros granulats et des granulats fins, où seulement des granulats fins.

2.10 PROPRIETES DU BETON BASIQUE

La formation de la structure du matériau durci dépend de la technique de préparation des liants de laitier basique et des bétons.

L'étude des propriétés rhéologiques des pâtes de laitier basique et les mélanges de bétons a montré que les stades de la formation de la structure du béton portland caractérise aussi le processus de durcissement des bétons basiques.

Cependant, les liants du laitier basique et les bétons qui en contiennent, ont des délais brefs de maniabilité (la viabilité du béton frais n'est pas suffisante).

Des tentatives ont été faites pour prolonger les délais de prise, et d'améliorer la maniabilité du béton frais par l'ajout de quelques adjuvants et par la modification du procédé de la fabrication de tels bétons.

La méthode proposée par (Mezghiche, 1989) consiste à modifier l'ordre de malaxage des composants : granulat, laitier, composant alcalin de forte concentration d'une densité de 1,35 à 1,45 g/cm³ sont mélangés pendant 2 minutes, le mélange est laissé au repos pendant 5 à 15 minutes, on introduit ensuite une quantité complémentaire d'eau, et on opère le malaxage définitif.

En suivant ce procédé de préparation, la viabilité des mélanges augmente de 3 à 10 fois par rapport au procédé de préparation connu.

Les ciments au laitier sont plus vulnérables aux cures médiocres que les ciments portlands, à cause de l'hydratation lente du laitier. Ce phénomène peut être diminuer en augmentant le taux de l'hydratation par un rapport Eau/Liant inférieur et par l'augmentation de la finesse du laitier. (Bijen, 1996).

Les bétons de laitier conservées humides présentent de très fortes résistances finales (à long terme).

La caractéristique la plus spécifique du béton au laitier est sa couleur bleue durant les premiers jours, exposé à l'air cette couleur est intense et tend vers le noir. Dans un béton de bonne qualité, le fond peut maintenir cette couleur bleue durant sa vie en service.

2.11 ASPECTS DE LA DURABILITE DU BETON BASIQUE

2.11.1 La résistance mécanique

Les bétons basiques se distinguent par une forte résistance mécanique, ils se situent au dessus des bétons ordinaires à portland.

La résistance à la compression varie de 40 à 140 MPa, leurs résistances à la traction et à la flexion est inférieure de 8 à 10 fois et de 7 à 10 fois respectivement que celle à la compression.

La figure 2.22 présente l'évolution de la résistance mécanique en compression à 28 jours de durcissement normal d'un béton ordinaire et un autre basique activé par (le verre liquide, la soude) en fonction de la densité de l'activant.

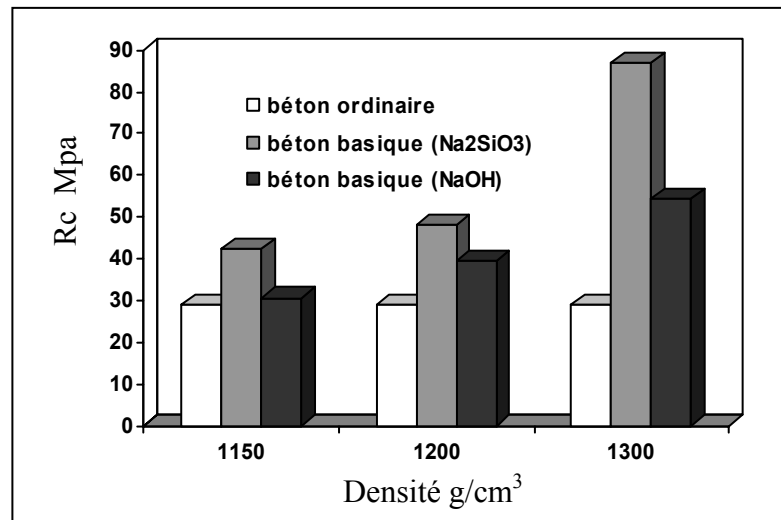


Figure 2.22 : la résistance mécanique en compression d'un béton basique en fonction de la densité de l'activant. (Mezghiche, 1995).

Il faut noter ici que les bétons basiques ont la capacité de durcir à des températures négatives (la formation de la structure se ralentit).

2.11.2 La perméabilité du béton

La pénétration des substances agressives, au sein du béton dépend de sa perméabilité, par conséquent par approximation sur sa porosité. Des résultats d'études effectuées sur les pâtes permettant de mettre en évidence les propriétés des additions :

- La substitution partielle du ciment par du laitier au moins (50 % par poids de ciment) et pour un même rapport Eau/Liant, on observe après 28 jours une réduction de la perméabilité et de la diffusivité par un facteur de l'ordre de 10 en comparaison avec un ciment portland ordinaire.

Les bétons basiques se caractérisent par une perméabilité moindre à l'eau par rapport au béton ordinaire.

2.11.3 La résistance au gel dégel

Quand la température du béton descend au dessus de 0°C, l'eau contenue dans les pores capillaires de la pâte de ciment gèle. Puisque le volume de la glace est plus grand que celui de l'eau, les pores capillaires d'eau sont soumis à une pression, et le béton a tendance à

se gonfler. Si les contraintes ainsi engendrées ne peuvent être absorbées par la résistance à la traction, le béton se fissure.

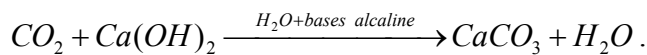
Les ciments de laitier résistent au cycle de gel et de dégel, ceci grâce à l'absence de la chaux libre, laquelle faciliterait la désagrégation sous les modifications de volume dues à la présence d'eau alternativement congelée et liquide.

Les bétons basiques résistent à l'action de gel et dégel. Cette résistance au gel atteint 1100 cycles (Chtchelotchnye et al, 1979).

2.11.4 La carbonatation

L'air contient de dioxyde de carbone à un taux moyen de 0,03 % en volume.

La carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air réduit le PH de la solution interstitielle. Le dioxyde de carbone réagit avec les différents hydrates et principalement la portlandite (Ca(OH)₂).



Les autres hydrates (aluminates et silicates) donnent également du carbonate de calcium.

La capacité de fixation du dioxyde de carbone dépend directement de la quantité d'alcalins présentant dans le ciment (Kobayaski et Uno, 1990).

Les ajouts de laitier accroissent de façon significative la carbonatation par rapport au béton portland (Litvan et Meyer, 1986).

L'effet d'une cure humide prolongée est particulièrement bénéfique lorsque les ciments contiennent un pourcentage élevé en laitier supérieur à 50 %.

Le béton de laitier présente un taux élevé de carbonatation par rapport au béton portland, ce qui est lié d'abord à la faible teneur du ciment de laitier en chaux qui diminue rapidement, et ensuite à la chaux libre (Ca(OH)₂) qui se carbonate pour donner un carbonate de calcium volumineux qui remplit partiellement les pores du ciment au laitier, par contre dans le ciment portland, la (Ca(OH)₂) se trouve en grande quantité, donc après la carbonatation, les pores se trouvent remplis par le carbonate de calcium, ce qui réduit la porosité du béton portland. (Bijen et al, 1989)

La figure (2.23) présente la profondeur de la carbonatation dans un béton à portland et un béton au laitier (E/C = 0,53).

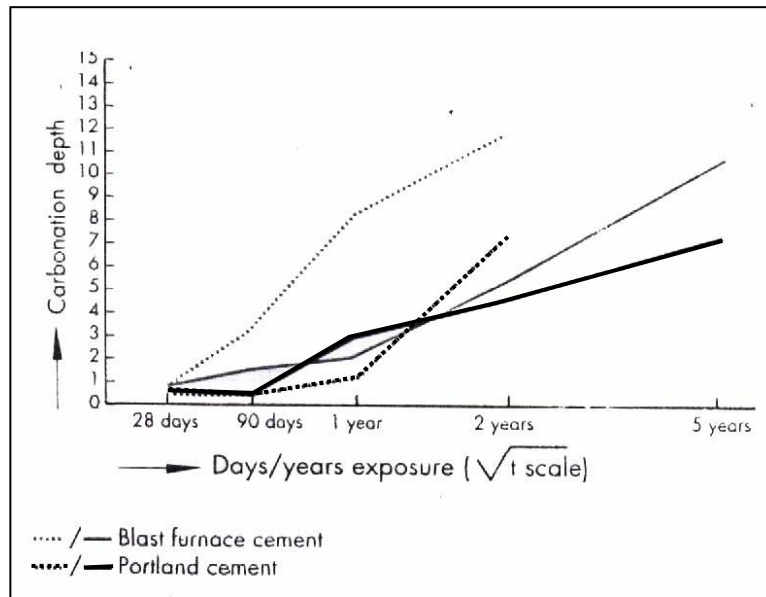


Figure 2.23 : La profondeur de carbonatation en fonction de l'âge des bétons l'un de laitier et l'autre ordinaire. (Bijen, 1966).

2.11.5 La corrosion

L'une des causes principales de la dégradation des ouvrages en béton armé est la corrosion des armatures, cette dernière est sensiblement aggravée par la présence d'agents agressifs tels que les chlorures, les sulfates, ... la destruction de la couche passive et l'attaque du métal s'effectue par la création de piles électro-chimiques sur l'armature, conduisant progressivement à la dissolution du métal et la formation des ions ferreux, l'hydrolyse de ces derniers entraîne l'acidification du milieu, et la formation d'hydroxydes ferreux instables dont l'évolution provoque la rouille. (Komar, 1980)

Quelque soit le ciment utilisé, il se forme une couche passive d'oxyde à la surface de l'acier qui maintient le métal dans un état stable.

Le laitier du haut fourneau consomme d'avantage les alcalins, mais le PH est encore suffisant pour assurer la stabilité de la couche passive (Longuet et al, 1973)

L'alcalinité offerte par le laitier protège l'acier, de même la diffusion généralement lente des chlorures dans le béton au laitier présente des avantages.

Le tableau 2.5 présente la diffusion des chlorures dans la pâte, mortier et béton de laitier, et ceux à portland. (Bijen, 1996)

Tableau 2.5 : la diffusion des chlorures dans les ciments portland et ciments au laitier :

Matériau	E/C	Pourcentage du laitier	Ciment au laitier D.10 ⁻¹² m ² /s	Ciment Portland D.10 ⁻¹² m ² /s
Pâte	0.50	65 %	0.4	4.5
Béton	0.49	50 %	0.5	7.5
Béton	0.50	70 %	0.02	2.4
Pâte	0.60	80 %	0.06	6.2
Mortier	0.50	75 %	0.04	3.0

La diffusion des chlorures dans les mortiers et bétons au laitier est très lente par rapport au béton ordinaire, ce qui est lié à l'imperméabilité très élevée des aluminates tricalciques (C₃A) dans le ciment au laitier, les ions de chlorures réagissent avec les C₃A même à l'état solide, en formant des ions non disponibles pour la corrosion.

Plusieurs études ont traité la corrosion des aciers dans les bétons au laitier, (Efes, 1980) et (Mather, 1957) ont trouvé que les barres d'aciers enrobées dans un ciment au laitier présentent une corrosion moindre par rapport au béton ordinaire, ils ont expliqué que le taux de diffusion bas des chlorures dans le ciment au laitier était la cause.

Par contre (Hope et Alan, 1986) ont montré que la corrosion augmente dans le béton au laitier frais cette corrosion augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier accompagnée par un taux bas de diffusion des chlorures, et que la corrosion dans le béton au laitier est influencée par les conditions ambiantes en comparaison avec le béton portland.

Le béton basique se distingue par une résistance contre la corrosion, du fait que les activants (les composés alcalins) présentent l'avantage de ne pas entraîner la corrosion des armatures d'aciers (Venuat, 1984) et (Mezghiche, 1989).

2.11.6 La résistance aux milieux agressifs

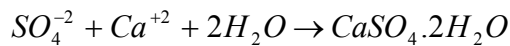
Le béton est d'autant plus résistant que le ciment libère moins de portlandite. Les bétons du ciment portland riches en chaux sont plus sensibles à l'altération que les bétons du ciment au laitier. (Hermann, 1995).

2.11.6.1 Eaux contenant des sulfates

Les ciments au laitier ont généralement un bon comportement dans les eaux sulfatées ce qui peut être expliqué par :

- La réduction de la teneur en chaux et en C₃A dans le ciment au laitier. (Bakker, 1980).

- Le taux de la pénétration des sulfates dans le béton du laitier est moins élevé par rapport au béton portland.
- L'accroissement de la compacité des hydrates accompagné avec une diminution du volume poreux pouvant atteindre 25 % dans le cas des fortes additions en laitier.
- La formation d'une quantité moindre de l'étringite, avec un développement très lent, selon la réaction suivante :



- Le mode de la cristallisation de l'étringite :

La zone interfaciale autour des granulats est très mince dans le béton au laitier, d'où l'espace de la cristallisation de l'étringite autour des granulats est limité. (Léa, 1971)

2.11.6.2 Eaux contenant des chlorures

Les alcalis passant en solution des bétons à base du laitier s'opposent à la pénétration d'ions de chlorures, contrairement au ciment portland. Du fait que le laitier est capable d'immobiliser (dans les silicates et les aluminates) une quantité de chlorures (Cl⁻) plus grande que celle dans le ciment portland. Ainsi que la diffusion des Cl⁻ est ralentie dans le cas des bétons au laitier. (Bijen, 1996).

Les bétons basiques résistent aux milieux d'attaques. L'immersion des éprouvettes dans des solutions agressives contenant respectivement :

0,1 % HCl - 5 % Na₂SO₄ - 3 % MgSO₄ - 5 % CaSO₄ et un milieu acide présentant un PH =3. N'ont pas pratiquement d'effet sur le béton basique (Gontcharov et al, 1973).

2.11.7 Alkali silice réaction

Le ciment au laitier est recommandé dans le cas des granulats présentant une alcali - réaction.

Le laitier est un stabilisateur d'expansion dans le cas des granulats siliceux réactifs. Les essais ont montré qu'un ciment à 70 % du laitier pouvait contenir 2 % d'alcalis solubles sans risque sérieux, alors que la limite est de 0,6 % dans le cas du ciment portland. (Venuat, 1984)

Les facteurs suivants contribuent au favorable comportement du ciment au laitier face à l'alcali - réaction :

- En général l'alcalinité (OH⁻) des pores interstitiels est inférieure.

- La mobilité des ions est très réduite.
- La petite quantité de la chaux disponible : la chaux libre est considérée comme un facteur essentiel pour l'expansion due à l'alcali réaction des alcalis passant en solution.

2.12 CONCLUSION

selon (Nkinamubanzi et Aitcin, 1999). Les bénéfices qui pourraient être tirés en utilisant les ciments de laitiers sont nombreux :

- Ecologiques et environnementaux (utilisation d'un sous produit, diminution de l'émission de CO₂).
- Economiques (coût du laitier sont les coûts de transport et de manipulation, économie des coûts de combustible pour la production de la même quantité du ciment).
- Amélioration des propriétés du béton frais et durci (moins de chaleur dégagée : très important dans les bétons de masse pour empêcher les contraintes thermiques qui peuvent provoquer la formation des fissures).
- Durabilité largement améliorée (des résistances élevées et une perméabilité plus faible).

CHAPITRE 3

SQUELETTE GRANULAIRE

3.1 INTRODUCTION

Les matériaux utilisés pour la confection des bétons (granulats, liant, adjuvants) doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

L'ensemble des matériaux tels que le sable, les graviers, les gravillons et les pierres concassées qui constituent le squelette du béton sont dénommés les granulats.

Ces granulats étant d'origine diverse (naturel, artificiel) où provenant de sous produits industriels. Il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais au laboratoire.

Certaines propriétés des granulats sont directement liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales (masse volumique réelle, degré d'absorption, la résistance à la fragmentation). D'autres caractéristiques dérivent du mode de l'élaboration des granulats (extraction et concassage). Il s'agit ici des paramètres liés à la distribution dimensionnelle des grains (granulométrie). A ces paramètres s'ajoutent des caractéristiques liées à l'angularité et à la forme du grain, sa propreté et sa réactivité chimique.

Pour les granulats destinés aux bétons, seuls ces caractéristiques sont recherchées :

- A la mise en œuvre : granulométrie, angularité et la teneur en eau.
- En service : l'affinité au ciments, la résistance mécanique, la gélivité, l'alcali réaction et la teneur en chlorures et en sulfates.

Généralement les granulats utilisés pour la réalisation des mortiers et des bétons se subdivisent en deux classes :

- Les granulats denses (lourds).
- Les granulats légers.

3.2 LES GRANULATS DENSES

Se sont les granulats utilisés pour obtenir des bétons de masse volumique de l'ordre de 2500 kg/m^3 . cette classe inclue les granulats naturels (le sable, le gravier, la pierre concassée) et les granulats artificiels (laitier cristallisé et briques concassées).

3.2.1 Sables et graviers naturels

Les sables et les graviers naturels sont des matériaux provenant de l'érosion des roches où de leur concassage, composés de minéraux résistants.

La plupart des sables et graviers naturels destinés à être incorporés dans les mortiers et les bétons sont obtenus des bords des rivières (se sont généralement des granulats roulés), le sable broyé provenant du broyage des roches éruptives et métamorphiques non altérées, doit avoir des grains à peu près cubiques, et la teneur en fines doit être limitée, les autres sources du sable sont :

- La mer (se sable doit être bien lavé afin d'éliminer les sels y contenu).
- Les dunes : cette variété de sable et d'une qualité médiocre du fait des éléments très fins qu'il contient.

La composition granulométrique du sable et sa teneur en impuretés poussiéreuses, vaseuses, argileuses et organiques influencent beaucoup la qualité du béton.

La quantité des ces impuretés ne doit pas dépasser 3 % dans les sables naturels et 5 % dans les sables broyés.

L'argile est l'impureté la plus nuisible dans le sable naturel, elle enrobe les grains, se qui empêche leur adhésion à la pierre de ciment en abaissant ainsi la résistance du béton.

3.2.1.1 Composition minéralogique

a. Le sable

Le sable est une masse pulvérulente de grains minéraux de (0,14 à 5 mm) de dimension. Les particules sont généralement composées d'un seul minéral : le quartz, d'autres minéraux existent mais avec de faibles quantités (les feldspaths, les micas, et les grains de minerai de fer). (Komar,1980)

Les sables de quartz sont les plus utilisés pour la confection des bétons lourds.

b. Le gravier

Le gravier est une accumulation meuble de fragments de roches inégalement roulées dont les dimensions vont de 5 à 70 mm. Composé d'une variété de minéraux (hétérogène) tels que : le quartz, quartzite, granite qui sont les constituants communs des graviers.

3.2.2 Les granulats concassés

Se sont un mélange de fragments anguleux de pierres de dimensions allant de 5 à 70 mm obtenus par le broyage de différentes roches :

- Les roches sédimentaires (siliceuses où calcaires).
- Les roches métamorphiques (quartzites, marbres, ...)
- Les roches éruptives (granites, basaltes et porphyres ...).

On utilise fréquemment les granulats de nature minéralogique suivante : siliceuse, calcaire et granitique.

3.2.3 Le laitier cristallisé

Le terme laitier du haut fourneau est limité seulement aux laitiers formés par la production du fer, et ne couvre pas les laitiers formés lors de la production des métaux non ferreux.

L'utilisation du laitier cristallisé comme granulats de béton est conditionné principalement par sa stabilité, il doit être en outre dense et doit avoir une texture cristalline plutôt que vitreuse.

Ces caractéristiques dépendent fortement de la composition chimique du laitier et de son mode de refroidissement.

La coulée de laitier, encore liquide est directement déversée dans des fosses adjacentes au haut fourneau, où encore transportée par wagons dans les aires de refroidissement spécialement aménagées au dehors de l'usine.

Le laitier se refroidit lentement à l'air libre par couches d'une dizaine de centimètres d'épaisseur . lorsque la solidification en masse est réalisée (température de 400°C à 500°C) on arrose la fosse avec de l'eau froide pour abaisser la température du laitier à 150°C environ. Cet arrosage présente deux avantages :

1. Il permet de réduire quelque peu le séjour des matériaux dans les fosses en accélérant leur refroidissement.
2. Il provoque de nombreuses fissures dans la masse du laitier, ce qui facilite son extraction ultérieure.

Toute fois, il ne convient pas de faire descendre la température du laitier au dessus de 90°C lors de l'arrosage, afin que le laitier soit assez sec pour se prêter commodément à des opérations de broyage et de tamisage (Aïtcin, 1966).

Selon (P. Huttemani, 1955) les laitiers dont la température T de coulée est relativement basse $1350^{\circ}\text{C} < T < 1425^{\circ}\text{C}$ et dont l'indice de basicité est compris entre 1.2 et 1.3 se prêtent particulièrement bien à ce type de refroidissement.

Le laitier cristallisé obtenu, présente une forte densité apparente et une bonne résistance au choc et à l'usure.

Les laitiers coulés à plus basse température, une fois solidifiés, sont souvent poreux, car leur grande viscosité empêche les gaz dissous de se dégager au cours du refroidissement.

3.2.3.1 Composition minéralogique du laitier cristallisé

La majorité des laitiers sont stables, mais dans certaines conditions où le laitier est à faible teneur en Al_2O_3 , il est considéré instable. Ceci est dû au passage des silicates bicalciques ($2CaO.SiO_2$) de la forme β à la forme γ accompagné par une augmentation du volume, se qui provoque une autodestruction du laitier (c'est le phénomène d'effusement). (Léa,1971) et (Venuat, 1989).

Afin d'utiliser le laitier cristallisé en guise de granulats il faut respecter les deux conditions suivantes :

$$(a): CaO + 0,8MgO \leq 1,28SiO_2 + 0,4Al_2O_3 + 1,75S.$$

$$(b): CaO \leq 0,9SiO_2 + 0,6Al_2O_3 + 1,75S.$$

Selon F. Hubbard la teneur en soufre qui peut atteindre 3 % ne réagit pas chimiquement avec les fers à béton.

3.2.4 Les briques concassées

L'incorporation des briques concassées dans le béton en tant que granulats, donne naissance à des bétons un peu légers (2080 kg/m^3 à 2240 kg/m^3). Selon La porosité des granulats de briques. Dans le cas des poids réduits, la résistance mécanique sera affectée.

L'utilisation des briques concassées et conditionnée par leurs teneur en SO_3 qu'elle ne doit pas dépasser 1 %.

3.3 LES GRANULATS LEGERS

Se sont les granulats utilisés pour obtenir des bétons de masse volumique ne dépassant pas 1600 kg/m^3 (sans affecter la résistance). Au cas où cette masse atteindra 640 kg/m^3 le béton ainsi réalisé est destiné à la réalisation des éléments non chargés.

Ce type de granulats se subdivise en : granulats naturels légers et granulats artificiels légers.

3.3.1 Les granulats naturels légers

Ce groupe contient seulement, la pierre ponce qui est une pierre d'origine volcanique, formée des laves fondues. C'est une matière vitreuse présentant des cavités ; sa couleur varie du blanc au jaune.

Le béton réalisé à partir de la pierre ponce présente une masse volumique de l'ordre de (640 kg/m^3 à 1280 kg/m^3).

3.3.2.2 Les granulats artificiels légers

Il s'agit ici, principalement des granulats d'argile, de schiste et du laitier expansé. La pâte constituant la matière première est homogénéisée avec une teneur bien déterminée d'eau.

Les nodules fabriquées à partir de cette pâte sont portées rapidement à haute température (environ 1300°C) pour former des grains durs, à l'intérieur desquels une quantité importante de bulles de gaz sont enfermées. Leur granularité est souvent peu étalée et la forme des grains est plus arrondie que celles des granulats naturels.

Leurs masse volumique est de l'ordre de 1000 kg/m^3 à l'état sec (rappelons que la masse volumique des granulats naturels est environ de 2600 kg/m^3 environ).

3.4 PROPRIETES ESSENTIELLES DES GRANULATS NATURELS :

Les granulats sont soit obtenus directement par criblage, où les grains se présentent alors sous une forme arrondie, soit issus d'un concassage, où les grains ainsi obtenus présentent des arrêtes.

Le choix des granulats est indispensable parce qu'il représente 75 % du volume de béton, d'où la qualité dépend fortement de la qualité des granulats, leurs propriétés jouent un rôle majeur dans les caractéristiques du béton soit :

- au niveau de sa mise en œuvre :
la granulométrie, l'angularité et la teneur en eau.
- au niveau du comportement mécanique et les performances à long terme :
l'affinité au ciment, résistance mécanique, gelivité, alcali réaction potentielle et la teneur en chlorures (Chanvillard, 1999).

3.4.1 La granulométrie des granulats fins et grossiers

La dimension des granulats utilisés dans le béton passe de plusieurs dizaines de millimètres à moins d'un dixième de millimètre. Pour tous les bétons, on mélange des éléments de diverses grosseurs, la distribution de la grosseur des éléments s'appelle granulométrie.

Il existe six classes granulaires principales caractérisés par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés :

- Les fillers 0/D avec $D < 2$ mm et les passants à $0,063$ mm ≥ 70 %.
- Les sables 0/D avec $D < 6,3$ mm ($D < 4$ pour les sables à béton).
- Gravillons d/D avec $d > 1$ mm et $D < 31,5$ mm.
- Graves 0/D avec $6,3 < D < 80$ mm.
- Ballast $d > 25$ et $D > 50$ mm.

Les passants à d et les refus à D doivent lors de l'analyse granulométrique respecter des limites, qui sont présentées dans plusieurs ouvrages.

3.4.2 La finesse des sables

Il existe une grande variabilité entre les différents sables, qui affecte de façon majeure les performances du béton. Pour juger globalement la granulométrie d'un sable, on calcule un paramètre à partir de l'analyse granulométrique appelé : module de finesse du sable.

(Popovics, 1967) a montré que le module de finesse correspond à la moyenne logarithmique de la distribution granulométrique.

Le module de finesse ne peut pas être utilisé seul pour décrire la granulométrie d'un granulat, mais il est valable pour indiquer des petites variations dans le cas de granulats élaborés à partir d'une même source. (Neville, 2000).

Le module de finesse élevé caractérise un sable grossier et à l'inverse un module faible caractérise un sable fin.

3.4.3 Texture et forme des granulats

Outre les caractéristiques pétrographiques des granulats, les caractéristiques d'aspect sont également importantes plus particulièrement la forme des grains et la texture de leurs surface.

La tableau 3.1 présente les différentes formes de granulats selon la norme BS812.

Tableau 3.1 : différentes formes de granulats (Neville, 2000).

Classification	Description	Exemples
Arrondie	Complètement usée par l'eau ou par l'attrition	Gravier de rivière ou de plage, sable de désert ou de dune.
Irrégulière	Naturellement irrégulière ou partiellement usée avec des angles arrondis	Autres graviers : Silex
Plate	Matériau dont l'épaisseur est faible par rapport au deux autres dimensions.	Roche laminée.
Angulaire	Bords très bien définis aux intersections de surfaces planes rugueuses.	Roches concassées de tout type, laitier concassé
Allongée	Matériau habituellement angulaire dont la longueur est beaucoup plus importante que les deux autres dimensions.	-
Plate et allongée	Matériau beaucoup plus long que large et plus large qu'épais.	-

En ce qui concerne les gros granulats, il est préférable de rechercher une forme régulière des éléments. Les granulats plats exercent une influence défavorable sur la durabilité des bétons.

La texture de la surface de granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment, et influence aussi la demande en eau du mélange (en particulier dans le cas des granulats fins).

La texture de la surface dépend de la dureté, de la dimension des grains et de la caractéristique des pores de la roche mère, autant que les forces agissant sur la roche pour produire les surfaces lisses ou rugueuses du granulat.

Le tableau 3.2 résume la texture des surfaces des granulats :

Tableau 3.2 : différentes textures des surfaces des granulats. (Neville, 2000).

Texture de la surface	Caractéristiques	Exemples
Vitreuse lisse	Fracture conchoïdale.	Silex noir, laitier vitreux
Lisse	Roche usée par l'eau où adoucie par la fracture où le laminage, où roche micro grenue.	– gravier – ardoise-marbre – certain cryolites.
Granuleuse	Fracture montrant des grains arrondis plus au moins uniformes.	Grés, oolithe
Rugueuse	Fracture grossière d'une roche à grains fins où moyens, ne contenant pas de particules cristallines visibles.	Basalte – felsite – calcaire – porphyre .
Cristalline	Contenant très visiblement des particules cristallines.	Granite – gabro gneiss
Alvéolaire	Avec des pores et des cavités visibles.	Brique – pierre ponce – laitier expansé – clinker – argile expansée.

La forme et la texture de surface des granulats influencent considérablement la résistance des bétons, la résistance à la flexion est plus affectée que la résistance à la compression et l'incidence de la forme et de la texture est particulièrement significative dans le cas des bétons à haute résistance. (Kaplan, 1958)

Une texture plus rugueuse entraînera peut être une forte adhérence, plus grande entre le granulat et la matrice de ciment.

En général, la texture et la forme des gros granulats, ont un effet appréciable sur la maniabilité des bétons.

3.4.4 Liaison des granulats

la liaison entre les granulats et la pâte de ciment est un facteur important dans la résistance des bétons. en particulier la résistance à la flexion.

La liaison est engendrée en partie par l'imbrication des granulats et de la pâte de ciment hydratée due à la rugosité de la surface des granulats.

Une surface plus rugueuse, comme celle des granulats concassées génère une meilleure liaison, de même les granulats moins durs, plus poreux et ayant une minéralogie hétérogène présentent eux aussi une meilleure liaison

Les liaisons chimiques peuvent être existés dans le cas des calcaires et des dolomies et éventuellement des granulats siliceux. (Penkala et Krzywoblacka, 1972).

3.4.5 La résistance des granulats

La résistance inadéquate des granulats limite leur utilisation, puisque leurs propriétés physiques influent sur la résistance des bétons.

Il est possible que l'influence des granulats sur la résistance des bétons ne soit seulement due à leur résistances mécaniques, mais aussi, à un certain degré à leurs absorption et à leurs caractéristiques de liaison.

En général, la résistance et l'élasticité des granulats dépendent de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure. (Neville, 2000).

3.4.6 La propreté des granulats

les granulats peuvent contenir en quantité limitée (inférieur à 0,1 %) des déchets de bois, débris végétaux ...etc. Par contre il ne doivent pas contenir d'hydrocarbures où de matière organique. Une attention particulière est prise dans le cas du sable, il s'agit de sa teneur en fines, essentiellement argileuses.

3.4.7 La densité des granulats

Dans la plus part des bétons, les granulats incorporés sont du type calcaire, silico calcaire où des silex ; ils représentent alors des densités de l'ordre de 2,5 à 2,7 selon leur niveau de porosité.

Dans le cas des granulats légers, la densité est de l'ordre de 0,9 à 1 pour les argiles expansées et de 0,7 à 1.0 pour les schistes expansés.

3.4.8 Porosité et absorption des granulats

La porosité des granulats, leur imperméabilité et leur absorption influencent certaines de leurs propriétés ; leur liaison avec la pâte de ciment hydratée, leur stabilité chimique et la résistance du béton au gel et dégel.

La taille des pores des granulats est très variable, certains pores sont complètement à l'intérieur du granulat, d'autres débouchent à la surface.

L'absorption de l'eau par les granulats est déterminée en mesurant l'augmentation de la masse d'un échantillon sec après avoir été immergé dans l'eau .

Le gravier généralement une absorption plus élevée que la roche concassée de même type pétrographique. Parce que sa surface est plus poreuse et absorbante en raison de son altération. (Neville, 2000).

Les pores à la surface des granulats affectent leur liaison avec la pâte de ciment ce qui influence la résistance du béton.

3.4.9 la réaction alcali – granulats

Depuis quelques années, un nombre croissant de réactions chimiques nocives entre les granulats et la pâte de ciment hydratée ont été observées. Il s'agit en particulier :

Des réactions alcali silice, et des réactions alcali carbonate.

3.4.9.1 Réaction alcali silice

La réaction la plus commune est la réaction entre les phases siliceuses réactives des granulats et les alcalis du ciment. Les formes réactives de la silice sont l'opale (amorphe), la calcédoine, et la tridynite (cristalline).

De façon simplifiée, l'évolution de la réaction alcali silice est détaillée par (Merz, 2002) et (Sprumget, 1998) comme suit :

- Concentration des alcalis dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- Les ions OH^- , Na^+ , K^+ migrent de l'eau interstitielle vers l'acide silicique (SiO_2) réactif des granulats.
- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de se gonfler.
- Augmentation de la pression intérieure due à la poursuite de la réaction et l'absorption de l'eau.
- Fissuration, lorsque la résistance à la traction des granulats est dépassée et faible formation de gel.
- Désagrégation des granulats depuis l'intérieur et forte formation de gel.

3.4.9.2 Réaction alcali carbonate

Ces réactions sont observées principalement dans les granulats composés de dolomite ainsi que de calcaire à grains fins avec inclusions de minéraux argileux. D'une façon simplifiée les réactions peuvent être formulées comme suit :

- (1) dolomite + hydroxyde alcalin \rightarrow calcite + brucite (oxyde de magnésium) +
carbonate alcalin.
- (2) carbonate alcalin + hydroxyde de calcium \rightarrow carbonate alcalin + hydroxyde
alcalin.

Il s'agit d'une dedolomitisation, liée à une diminution du volume. Des gonflements se produisent parce que lors de la transformation de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) où $\text{Mg}(\text{OH})_2$, la porosité augmente. De l'humidité peut ainsi arriver jusqu'aux inclusions d'argiles lesquelles gonflent.

Ces carbonates alcalins (Na_2CO_3 , K_2CO_3) libérés réagissent avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du ciment, ce qui libère des hydroxydes alcalins (NaOH , KOH).

3.4.9.3 Facteurs d'influence pour les réactions alcali granulats (RAG)

De nombreux facteurs exercent de manière très diverse une influence sur les (RAG) :

- la teneur en granulats réactifs (ainsi que le type et la taille de ces granulats).
- La teneur en alcalins du béton et la composition de solution interstitielle.
- Les propriétés du béton.
- Un taux d'humidité élevé en béton.
- Une hausse température.
- Les charges alcalines externes (dues aux eaux souterraines, aux eaux sulfatées, ...).

Remarque :

Les cendres volantes et les laitiers sont certes alcalins mais en comparaison avec les ciments portland ils fixent proportionnellement d'avantage d'alcalis dans les produits d'hydratation.

3.5. PROPRIETES ESSENTIELLES DES GRANULATS ARTIFICIELS

le laitier du haut fourneau cristallisé par refroidissement lent, puis concassé est un granulats artificiel de couleur grise foncée, tirant parfois sur le vert (couleur qui dénote en général une teneur en soufre supérieure à 3 %) est un agrégat dur qui a été homologué par L'AFNOR (P18.302, septembre, 1960).

3.5.1 Densité du laitier cristallisé

le laitier cristallisé se présente sous forme d'une roche grisâtre, micro poreuse. Sa masse volumique absolue va de 2.85 à 3.10 g/cm³ (couramment 2.9 g/cm³). La masse volumique propre du matériau varie de 1.8 à 2.80 g/cm³ (en moyenne 2.25 g/cm³). En vrac, après concassage la masse volumique oscille entre 1.2 et 1.4 g/cm³.

3.5.2 Propriétés physiques du laitier cristallisé

Le laitier cristallisé se situe au dessus de la moyenne des granulats naturels (du point de vue caractéristiques chimiques et physiques) :

- Les conditions d'élaboration à hautes températures (1300°C à 1500°C) du laitier cristallisé, en font un matériau propre et d'une excellente tenue aux températures élevées.
- Un pouvoir élevé d'isolation thermique et phonique double que celui des granulats naturels.
- Une insensibilité au gel quasi-totale, ses micro pores sont du type fermés, donc n'absorbent pas l'eau par capillarité.
- Une rugosité de surface élevée, qui se conserve même en cas d'une usure de cette surface.

3.5.3 Propriétés mécaniques du laitier cristallisé

Le laitier cristallisé se situe dans la bonne moyenne des granulats naturels du point de vue caractéristiques mécaniques :

- Une fois concassé, son angle de frottement interne est important, parce qu'il est de bonne angularité.
- Un coefficient d'usure – choc (coefficient los Angeles) varie de 20 à 30.
- Un coefficient de polissage accéléré va de 0,50 à 0,55.

(a titre comparatif, pour les roches naturels, le coefficient de polissage accéléré va de 0,40 à 0,60).

3.5.4 l'influence des granulats du laitier cristallisé sur le béton

Grâce aux caractéristiques physico –chimiques du laitier cristallisé, son angularité, sa propreté, le granulat du laitier assure aux bétons et aux couches de chaussées des résistances en traction élevées et une très bonne tenue en fatigue aux sollicitations alternées.

Les propriétés du laitier assurent en outre aux bétons d'intéressants coefficients d'isolation thermique et acoustique.

La présence des sulfluides de calcium dans le laitier frais, ne présente pas de risque sur le béton si le contenu en sulfure ne dépasse pas 2 %.(Léa, 1971).

3.5.5 Utilisations industrielles du laitier cristallisé

L'utilisation du laitier cristallisé est très répandue dans la construction des soubassements, des routes et aéroports ainsi que dans la construction des voies de chemin de fer où il est utilisé comme ballast. Son emploi en tant qu'agrégat à béton est assez peu répandu en France .

Il n'en est pas de même au USA et dans certains pays européens : Allemagne, Belgique, Angleterre où de nombreux ouvrages d'art ont été réalisés en béton de laitier concassé. (Hubbard, 1955) et (Manche, 1955).

3.6 INFLUENCE DES PROPRIETES DES GROS GRANULATS SUR LA RESISTANCE DU BETON

La fissuration verticale qui se produit dans une éprouvette soumise à une contrainte uni axiale de compression apparaît lorsque la charge appliquée atteint 50 à 75 % de la charge de rupture. la contrainte à partir de laquelle se développent les fissures dépend en grande partie des propriétés du gros granulat, elle est plus faible lorsque les granulats présentent une surface lisse contrairement à ce que l'on obtient avec des granulats concassés de forme angulaire et de surface rugueuse , sans doute parce que l'adhérence est influencée par les propriétés de surface . (Jones et Kaplan, 1957).

L'influence du type de gros granulat sur la résistance du béton est en fonction du rapport eau/ciment, cette influence diminue avec l'augmentation de rapport eau/ciment. Au delà de 0.65, on ne remarque aucune différence de résistance d'un béton à granulat concassé où roulé.

La figure 3.1 représente la relation entre la résistance à la compression et l'âge des bétons confectionnés avec différents granulats avec $E/C=0,50$.

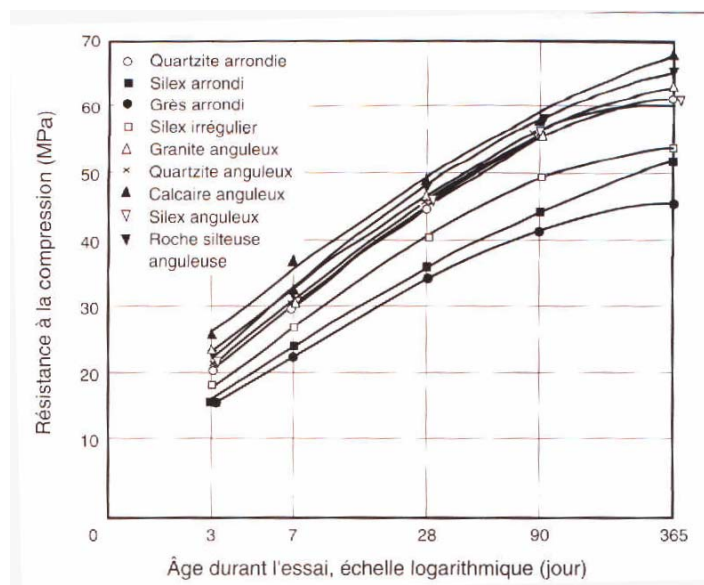


Figure 3.1 : la relation entre la résistance en compression et l'âge des bétons à base de différents granulats. (Neville, 2000).

3.7 ORIENTATION DE L'ETUDE

Le béton est un matériau très en demande et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Aujourd'hui des milliers de chercheurs travaillent sans relâche dans tous les pays du monde, afin d'étudier ces matériaux pour mieux les connaître et pour les améliorer encore.

Toutefois la fabrication du ciment et du béton consomme une quantité considérable d'énergie, engendre l'émission d'importantes quantités de gaz à effet de serre et contribue à l'épuisement progressif des ressources naturelles.

Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton, ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et sociales.

Dans cette optique, l'étude suivante propose à produire un béton à grande durabilité, à un coût compétitif et avec un impact environnemental minimum, elle consiste à optimiser l'utilisation des ajouts cimentaires dont l'effet est très bénéfique et d'utiliser les résidus industriels afin de remplacer d'une part le ciment, et les granulats d'une autre part pour la confection des bétons.

Cette étude a pour objectifs :

- D'étudier le laitier granulé et cristallisé du haut fourneau du combinat métallurgique d'El Hadjar (Les propriétés chimiques et physiques).

- D'élaborer un liant au laitier sans clinker, en utilisant des activants de différents natures (activation alcaline).
- De proposer des méthodes efficaces pour améliorer certaines propriétés mécaniques du liant, afin d'élargir les domaines de leur applications.
- De mettre en valeur l'influence de la nature des granulats à incorporer dans le béton (naturels ou artificiels) sur le comportement du béton au laitier activé (béton basique).
- D'encourager les utilisateurs de matériaux à utiliser les granulats artificiels (le laitier cristallisé) pour la confection des bétons ordinaires.

CHAPITRE 4

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

4.1 INTRODUCTION

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques pour permettre de faire un choix répondant à leur destination.

4.2 LES LIANTS

4.2.1 laitier granulé

Le laitier utilisé dans cette étude provient de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar de Annaba.

C'est un laitier granulé, obtenu à partir d'un refroidissement rapide du laitier fondu dans les bassins d'eau, ce qui conduit à la formation d'une grande quantité de la phase vitreuse.

Le tableau 4.1 présente l'analyse chimique du laitier granulé :

Tableau 4.1 : Analyse chimique du laitier granulé.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
40.8	5.2	0.53	43.01	6.4	0.80	3.02	0.01	0.007

4.2.1.1 Module de basicité

A partir de la composition chimique du laitier granulé, on peut calculer le module « M₀ » module de basicité, on appliquant les formules utilisées dans les références :

$$M_{01} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} = 1,05 \quad M_{01} > 1$$

$$M_{02} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2} = 1,21 \quad M_{02} < 1,5$$

$$M_{03} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} = 1,074 \quad M_{03} > 1$$

A partir des résultats obtenus, le laitier utilisé est un laitier basique.

4.2.1.2 Module d'activité

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} = 0,127$$

4.2.1.3 Diffractogramme du laitier

Le laitier granulé se présente sous forme de sable de couleur claire, de granulométrie 0 à 5 mm.

Le diffractogramme du laitier granulé du haut fourneau d'Annaba présenté à la figure (4.1) est typique de laitier amorphe qui présente cependant deux pics caractéristiques correspondant à la calcite et au fer.

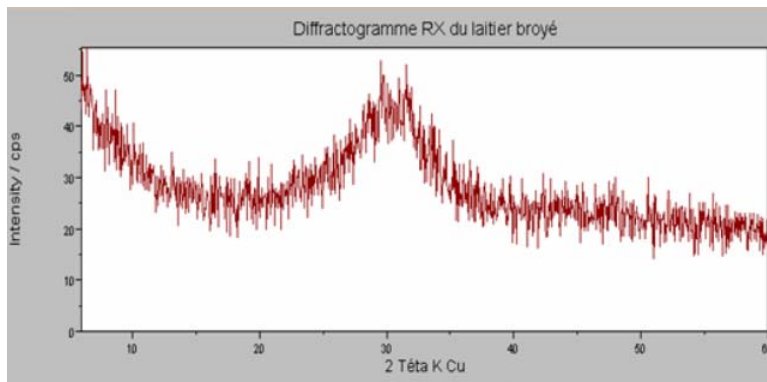


Figure 4.1: Diagramme de diffraction des rayons X du laitier granulé.

4.2.2 Ciment portland

Nous avons utilisé deux types de ciment portland l'un est un ciment portland artificiel CPA et l'autre est un ciment composé CPJ CEM II/A.

Le ciment portland artificiel résulte du broyage du clinker avec environ 5 % du gypse, le clinker utilisé provient de la cimenterie de Ain-Touta (Batna).

Le ciment portland composé provient de la cimenterie de Hammam Dalâa de Msila.

La composition chimique des ciments est donnée au tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Composition chimique des clinkers .

Teneur %									
Types	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Chaux libre
CPA	21.14	5.46	3.67	64.2	1.3	-	-	-	-
CPJ	20.70	4.75	3.75	62.92	1.53	1.98	0.39	0.09	0

La composition minéralogique des deux types de clinker est donnée au tableau 4.3.

Tableau 4.3 : composition minéralogique des clinkers.

Types	Teneur %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ Af
CPA	65.90	8.43	9.04	9.4
CPJ	55.83	17.53	6.25	11.42

Il faut noter ici que le ciment portland est utilisé pour étudier la pâte de ciment, tandis que le ciment composé est utilisé pour la confection du béton.

4.4.3 Propriétés physiques des liants

Les propriétés physiques des liants (laitier, CPA, CPJ) sont représentées au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Propriétés physiques des liants.

Propriétés	Ciment composé	Laitier granulé	Ciment portland
Surface spécifique, cm ² /g	3400	3200	3200
Masse volumique absolue, kg/m ³	3110	2940	3100
Masse volumique apparente à l'état lâche, kg/m ³	1080	1040	1125.3
Masse volumique apparente à l'état compact, kg/m ³	1290	1210	1250

4.3. LES GRANULATS

4.3.1 Les sables

4.3.1.1 *Sable naturel*

Le sable utilisé, est un sable très fin d'origine siliceux, provenant de la région de (Boussaâda, Msila) , dont la composition chimique est présentée au tableau 4.5 :

Tableau 4.5 : composition chimique du sable naturel.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
89.67	0.90	0.91	5.96	0.2	0.05	0.3	0.01	0.019

a. Diffractogramme du sable naturel

L'analyse par diffraction aux rayons X (DRX) montre que le sable est constitué de SiO₂ cristallisé sous forme de quartz α comme il est représenté à la figure 4.2.

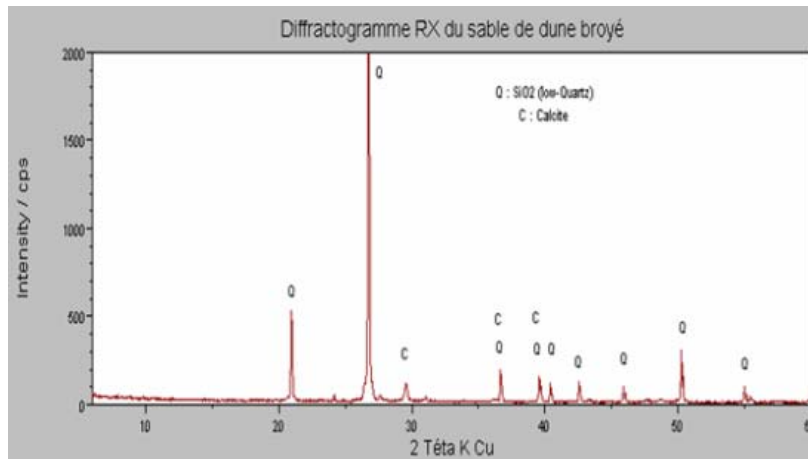


Figure 4.2 : Diffractogramme du sable.

4.3.1.2 Sable de laitier granulé

Nous avons utilisé également le sable de laitier granulé en guise de granulats fins (afin d'étudier l'influence du remplacement du sable naturel par du sable de laitier granulé sur quelques propriétés du béton).

La composition chimique du laitier granulé est déjà présentée au tableau 4.1.

4.3.1.3 Caractéristiques physiques des sables

Les caractéristiques physiques des sables (laitier granulé, sable naturel) sont récapitulées au tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Propriétés physiques des sables (naturel, laitier).

Propriétés	Sable (0/3)	Laitier granulé (0/5)
Masse volumique absolue, kg/m ³ .	2540	1900
Masse volumique apparente :		
- l'état lâche, kg/m ³ .	1540	920
- l'état compact, kg/m ³ .	1750	1015
Porosité, (%).	39.37	-
Teneur en eau, (%).	0.50	2
Coefficient d'absorption, (%).	2.30	12
Propreté ESV – ES (équivalent de sable), (%).	75 73	En général ≥ 80

4.3.1.4 Analyse granulométrique des sables

La consistance de la courbe granulaire des granulats est nécessaire pour déterminer la composition optimale du béton.

La granulométrie du sable est indispensable pour l'étude d'un béton de qualité. Se sont les éléments les plus fins qui influencent le plus le dosage en eau, la maniabilité, la compacité et l'aspect du béton.

L'analyse granulométrique du sable naturel et du laitier granulé est donné au tableau 4.7 et 4.8 respectivement.

Tableau 4.7 : Analyse granulométrique du sable naturel .

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât
		(g)	(%)	
5	10	10	1	99
2.5	40	50	5	95
1.25	25	75	7.5	92.5
0.63	35	110	11	89
0.315	240	350	35	65
0.125	640	960	96	4
0.08	35	995	99.5	0.5
le fond	5	1000	100	0

Tableau 4.8 : Analyse granulométrique du laitier granulé :

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
5	60	60	6	94
2.5	45	105	10.5	89.5
1.25	505	610	61	39
0.63	280	890	89	11
0.315	75	965	96.5	3.5
0.125	20	985	98.5	1.5
0.08	10	995	99.5	0.5
Le fond	5	1000	100	0

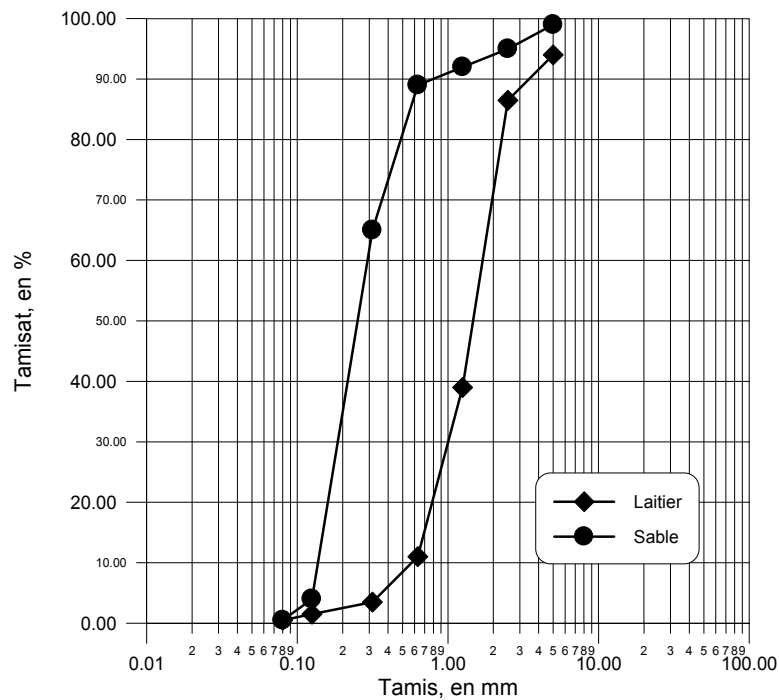


Figure 4.3 : Analyse granulométrique du sable et du laitier.

A partir de la courbe granulométrie du sable et au laitier on détermine le module de finesse :

- Module de finesse du sable MF=1,55 % (sable très fin).
- Module de finesse du laitier MF=3,54 % (sable grossier).

4.3.2 Les pierres concassées

4.3.2.1 Les pierres concassées naturelles

Il s'agit ici de pierres concassées de nature silico – calcaire provenant d'une carrière implantée dans les calcaires de la route de (M'sila- Bord Bou Arreridj).

Trois fractions sont retenues pour la confection du béton : 3/8 , 8/16 et 16/25.

La composition chimique des pierres concassées naturelles est représentée au tableau 4.9 :

Tableau 4.9 : composition chimique des pierres concassées naturelles.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
40.65	8.87	3.25	40.56	3.65	0.79	0.65	0.01	0.008

4.3.2.2 Le laitier cristallisé concassé

Il s'agit ici des granulats obtenus par concassage du laitier cristallisé refroidi lentement à l'air, il proviennent de l'usine métallurgique d'El-Hadjar de Annaba, sous forme de roches grisâtres, et micro poreuses, dont la dimension est de 75 mm.

Afin d'obtenir la granulométrie choisie (3/8, 8/16 et 16/25), les roches sont concassées et criblées de telle façon à obtenir la même granulométrie que celles des pierres concassées naturelles.

La composition chimique du laitier cristallisé concassé est représenté au tableau 4.8.

Tableau 4.10 : Composition chimique du laitier cristallisé.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
40.26	8.98	2.98	40.89	3.40	0.59	0.6	0.01	0.01

Selon (Lea, 1971) le laitier cristallisé servant comme granulats de béton, doit respecter les deux conditions :

1. $CaO + 0,8 MgO \leq 1,28 SiO_2 + 0,4 Al_2O_3 + 1,75 S.$
2. $CaO \leq 0,9 SiO_2 + 0,6 Al_2O_3 + 1,75 S.$

La première condition donne : $43,61 < 56,15.$

La deuxième donne : $40,89 < 42,65.$

Donc les deux conditions sont remplies.

4.3.2.3 Les propriétés physiques des pierres concassées (naturelles et artificielles)

Les propriétés physiques des pierres concassées naturelles et artificielles sont représentées au tableau 4.9 :

Tableau 4.11 : propriétés physiques des granulats.

Propriétés	Pierres concassées			Laitier cristallisé (0/5)		
	3/8	8/16	16/25	3/8	8/16	16/25
Classe granulaire						
Masse volumique absolue, kg/m ³ .	2540	2560	2600	2550	2500	2500
Masse volumique apparente :						
- l'état lâche, kg/m ³ .	1380	1370	1390	1270	1150	1170
- l'état compact, kg/m ³ .	1500	1500	1490	1049	1280	1270
Porosité, (%).	47	46.48	46.50	50.2	46	46.8
Teneur en eau, (%).	0.13	0.10	0.10	0.40	0.30	0.25
Coefficient d'absorption, (%).	0.20	0.50	0.50	1.50	1.38	1.38
Coefficient volumétrique CV	-	-	0.25	-	-	0.34
Coefficient de Los Angeles, (%).	-	-	22.78	-	-	28.55
Forme	Angulaire			Angulaire		
Texture	Lisse			Micro – alluvioilaire		

4.3.2.4 L'analyse granulométrique des pierres concassées

Trois fractions sont choisi pour confectionner le béton : (3/8, 8/16, 16/25).

L'analyse granulométrique des trois fractions est représenté au tableau 4.10 , 4.11 et 4.12 respectivement.

Il faut noter ici que ces mêmes courbes sont adoptées aux granulats artificielles (laitier cristallisé).

a. Analyse granulométrique du 16/25

Tableau 4.12 : Analyse granulométrique des pierres concassées 16/25.

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
25	0	0	0	100
20	1425	1425	47.5	52.5
16	1425	2850	95	5
Le fond	150	3000	100	0

b. Analyse granulométrique du 8/16

Tableau 4.13 : Analyse granulométrique des pierres concassées 8/16 :

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
16	0	0	0	100
12.5	1425	1425	47.5	52.5
10	900	2325	77.5	22.5
8	525	2850	95	5
6.3	90	2940	98	2
Le fond	60	3000	100	0

c. Analyse granulométrique du 3/8

Tableau 4.14 : Analyse granulométrique des pierres concassées 3/8

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
8	0	0	0	100
6.3	320	320	20	80
5	426.66	746.66	46.66	53.33
4	226.66	1013.33	63.33	36.66
3.15	320	1333.33	83.33	16.66
2.5	160	1493.33	93.33	6.66
Le fond	106	1600	100	0

Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 4.4

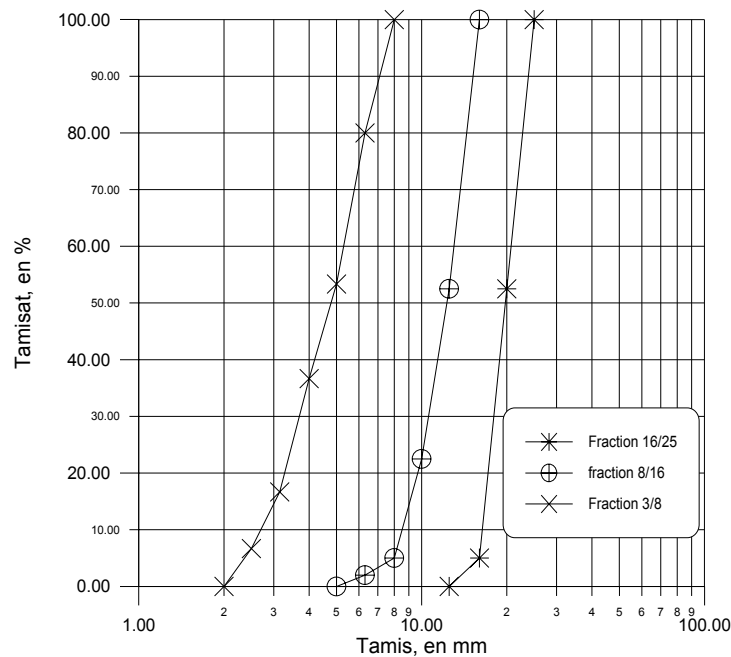


Figure 4.3 : courbes granulométriques des granulats grossiers.

4.4 LES ACTIVANTS

Les activants chimiques sont des produits solubles dans l'eau, et le plus souvent d'origine minérale (les bases fortes et leurs sels). Ils agissent en modifiant la solubilité et la vitesse d'hydratation des différents constituants anhydres des liants.

L'activant sélectionné pour effectuer les essais est un sel de base alcaline « le carbonate de sodium » (Na_2CO_3) vu sa disponibilité et son coût raisonnable.

Il provient de l'usine de « GRANITEX : nouveaux produits » de Boussaâda (M'sila), sous forme d'une poudre blanche, diluée dans l'eau afin d'obtenir les densités voulues.

La densité désirée dans cette partie expérimentale est de $1,25 \text{ g/cm}^3$.

La composition chimique du carbonate de soude anhydre est représentée au tableau 4.15

Tableau 4.15: Composition chimique du carbonate de soude.

Teneur %			
Na_2O	K_2O	CO	H_2O
46.6	0.02	34.7	17.73

Dans certains essais on a utilisé également de la soude caustique (NaOH) afin d'estimer l'effet des différents activants sur le comportement physique et mécanique de la pâte de ciment au laitier.

CHAPITRE 4

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

4.1 INTRODUCTION

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques pour permettre de faire un choix répondant à leur destination.

4.2 LES LIANTS

4.2.1 laitier granulé

Le laitier utilisé dans cette étude provient de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar de Annaba.

C'est un laitier granulé, obtenu à partir d'un refroidissement rapide du laitier fondu dans les bassins d'eau, ce qui conduit à la formation d'une grande quantité de la phase vitreuse.

Le tableau 4.1 présente l'analyse chimique du laitier granulé :

Tableau 4.1 : Analyse chimique du laitier granulé.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
40.8	5.2	0.53	43.01	6.4	0.80	3.02	0.01	0.007

4.2.1.1 Module de basicité

A partir de la composition chimique du laitier granulé, on peut calculer le module « M₀ » module de basicité, on appliquant les formules utilisées dans les références :

$$M_{01} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} = 1,05 \quad M_{01} > 1$$

$$M_{02} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2} = 1,21 \quad M_{02} < 1,5$$

$$M_{03} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} = 1,074 \quad M_{03} > 1$$

A partir des résultats obtenus, le laitier utilisé est un laitier basique.

4.2.1.2 Module d'activité

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} = 0,127$$

4.2.1.3 Diffractogramme du laitier

Le laitier granulé se présente sous forme de sable de couleur claire, de granulométrie 0 à 5 mm.

Le diffractogramme du laitier granulé du haut fourneau d'Annaba présenté à la figure (4.1) est typique de laitier amorphe qui présente cependant deux pics caractéristiques correspondant à la calcite et au fer.

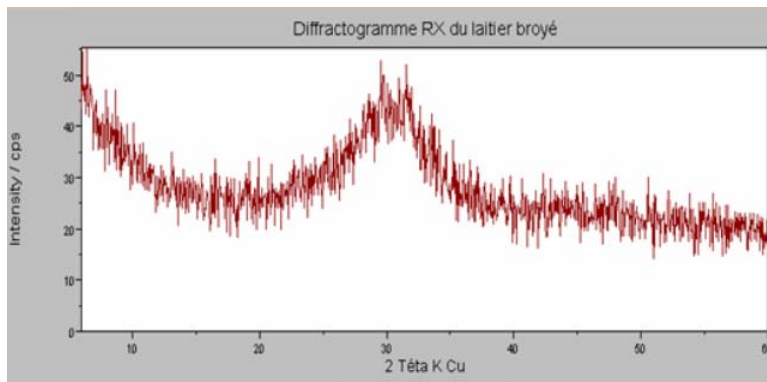


Figure 4.1: Diagramme de diffraction des rayons X du laitier granulé.

4.2.2 Ciment portland

Nous avons utilisé deux types de ciment portland l'un est un ciment portland artificiel CPA et l'autre est un ciment composé CPJ CEM II/A.

Le ciment portland artificiel résulte du broyage du clinker avec environ 5 % du gypse, le clinker utilisé provient de la cimenterie de Ain-Touta (Batna).

Le ciment portland composé provient de la cimenterie de Hammam Dalâa de Msila.

La composition chimique des ciments est donnée au tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Composition chimique des clinkers .

Teneur %									
Types	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Chaux libre
CPA	21.14	5.46	3.67	64.2	1.3	-	-	-	-
CPJ	20.70	4.75	3.75	62.92	1.53	1.98	0.39	0.09	0

La composition minéralogique des deux types de clinker est donnée au tableau 4.3.

Tableau 4.3 : composition minéralogique des clinkers.

Types	Teneur %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ Af
CPA	65.90	8.43	9.04	9.4
CPJ	55.83	17.53	6.25	11.42

Il faut noter ici que le ciment portland est utilisé pour étudier la pâte de ciment, tandis que le ciment composé est utilisé pour la confection du béton.

4.4.3 Propriétés physiques des liants

Les propriétés physiques des liants (laitier, CPA, CPJ) sont représentées au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Propriétés physiques des liants.

Propriétés	Ciment composé	Laitier granulé	Ciment portland
Surface spécifique, cm ² /g	3400	3200	3200
Masse volumique absolue, kg/m ³	3110	2940	3100
Masse volumique apparente à l'état lâche, kg/m ³	1080	1040	1125.3
Masse volumique apparente à l'état compact, kg/m ³	1290	1210	1250

4.3. LES GRANULATS

4.3.1 Les sables

4.3.1.1 Sable naturel

Le sable utilisé, est un sable très fin d'origine siliceux, provenant de la région de (Boussaâda, Msila) , dont la composition chimique est présentée au tableau 4.5 :

Tableau 4.5 : composition chimique du sable naturel.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
89.67	0.90	0.91	5.96	0.2	0.05	0.3	0.01	0.019

a. Diffractogramme du sable naturel

L'analyse par diffraction aux rayons X (DRX) montre que le sable est constitué de SiO₂ cristallisé sous forme de quartz α comme il est représenté à la figure 4.2.

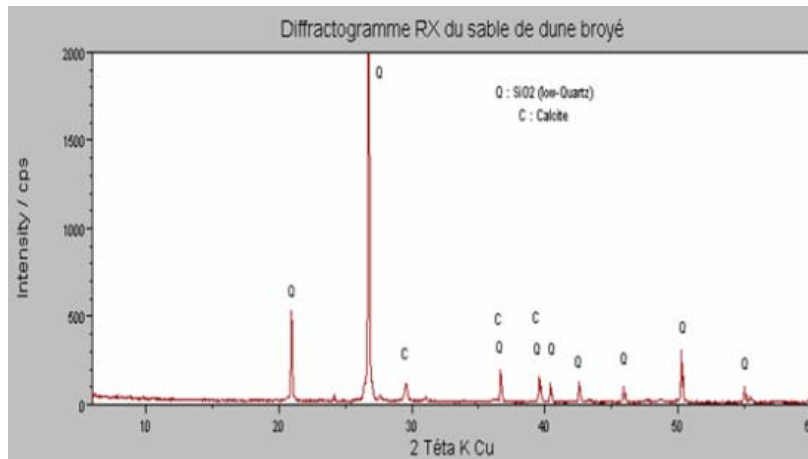


Figure 4.2 : Diffractogramme du sable.

4.3.1.2 Sable de laitier granulé

Nous avons utilisé également le sable de laitier granulé en guise de granulats fins (afin d'étudier l'influence du remplacement du sable naturel par du sable de laitier granulé sur quelques propriétés du béton).

La composition chimique du laitier granulé est déjà présentée au tableau 4.1.

4.3.1.3 Caractéristiques physiques des sables

Les caractéristiques physiques des sables (laitier granulé, sable naturel) sont récapitulées au tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Propriétés physiques des sables (naturel, laitier).

Propriétés	Sable (0/3)	Laitier granulé (0/5)
Masse volumique absolue, kg/m ³ .	2540	1900
Masse volumique apparente :		
- l'état lâche, kg/m ³ .	1540	920
- l'état compact, kg/m ³ .	1750	1015
Porosité, (%).	39.37	-
Teneur en eau, (%).	0.50	2
Coefficient d'absorption, (%).	2.30	12
Propreté ESV – ES (équivalent de sable), (%).	75 73	En général ≥ 80

4.3.1.4 Analyse granulométrique des sables

La consistance de la courbe granulaire des granulats est nécessaire pour déterminer la composition optimale du béton.

La granulométrie du sable est indispensable pour l'étude d'un béton de qualité. Se sont les éléments les plus fins qui influencent le plus le dosage en eau, la maniabilité, la compacité et l'aspect du béton.

L'analyse granulométrique du sable naturel et du laitier granulé est donné au tableau 4.7 et 4.8 respectivement.

Tableau 4.7 : Analyse granulométrique du sable naturel .

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât
		(g)	(%)	
5	10	10	1	99
2.5	40	50	5	95
1.25	25	75	7.5	92.5
0.63	35	110	11	89
0.315	240	350	35	65
0.125	640	960	96	4
0.08	35	995	99.5	0.5
le fond	5	1000	100	0

Tableau 4.8 : Analyse granulométrique du laitier granulé :

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
5	60	60	6	94
2.5	45	105	10.5	89.5
1.25	505	610	61	39
0.63	280	890	89	11
0.315	75	965	96.5	3.5
0.125	20	985	98.5	1.5
0.08	10	995	99.5	0.5
Le fond	5	1000	100	0

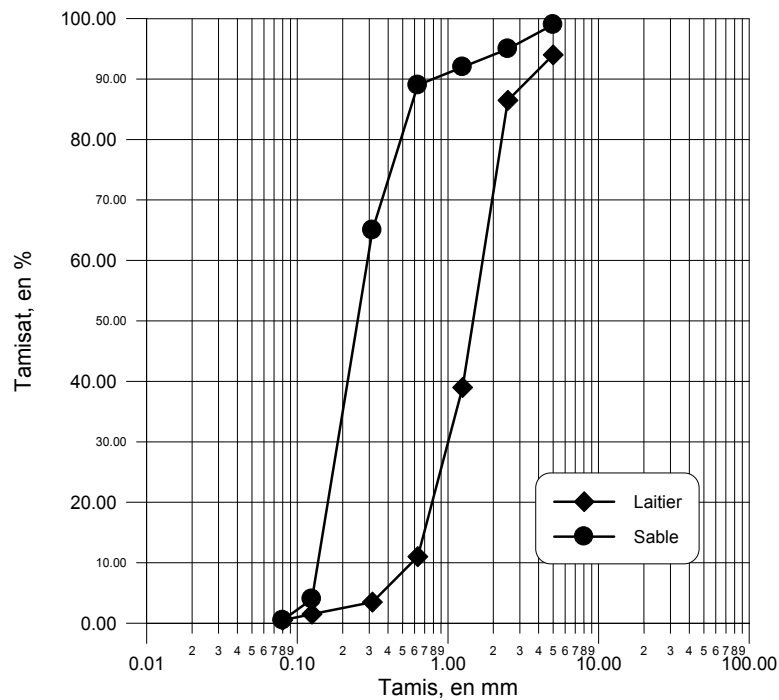


Figure 4.3 : Analyse granulométrique du sable et du laitier.

A partir de la courbe granulométrie du sable et au laitier on détermine le module de finesse :

- Module de finesse du sable MF=1,55 % (sable très fin).
- Module de finesse du laitier MF=3,54 % (sable grossier).

4.3.2 Les pierres concassées

4.3.2.1 Les pierres concassées naturelles

Il s'agit ici de pierres concassées de nature silico – calcaire provenant d'une carrière implantée dans les calcaires de la route de (M'sila- Bord Bou Arreridj).

Trois fractions sont retenues pour la confection du béton : 3/8 , 8/16 et 16/25.

La composition chimique des pierres concassées naturelles est représentée au tableau 4.9 :

Tableau 4.9 : composition chimique des pierres concassées naturelles.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
40.65	8.87	3.25	40.56	3.65	0.79	0.65	0.01	0.008

4.3.2.2 Le laitier cristallisé concassé

Il s'agit ici des granulats obtenus par concassage du laitier cristallisé refroidi lentement à l'air, il proviennent de l'usine métallurgique d'El-Hadjar de Annaba, sous forme de roches grisâtres, et micro poreuses, dont la dimension est de 75 mm.

Afin d'obtenir la granulométrie choisie (3/8, 8/16 et 16/25), les roches sont concassées et criblées de telle façon à obtenir la même granulométrie que celles des pierres concassées naturelles.

La composition chimique du laitier cristallisé concassé est représenté au tableau 4.8.

Tableau 4.10 : Composition chimique du laitier cristallisé.

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
40.26	8.98	2.98	40.89	3.40	0.59	0.6	0.01	0.01

Selon (Lea, 1971) le laitier cristallisé servant comme granulats de béton, doit respecter les deux conditions :

1. $CaO + 0,8 MgO \leq 1,28 SiO_2 + 0,4 Al_2O_3 + 1,75 S.$
2. $CaO \leq 0,9 SiO_2 + 0,6 Al_2O_3 + 1,75 S.$

La première condition donne : $43,61 < 56,15.$

La deuxième donne : $40,89 < 42,65.$

Donc les deux conditions sont remplies.

4.3.2.3 Les propriétés physiques des pierres concassées (naturelles et artificielles)

Les propriétés physiques des pierres concassées naturelles et artificielles sont représentées au tableau 4.9 :

Tableau 4.11 : propriétés physiques des granulats.

Propriétés	Pierres concassées			Laitier cristallisé (0/5)		
	3/8	8/16	16/25	3/8	8/16	16/25
Classe granulaire						
Masse volumique absolue, kg/m ³ .	2540	2560	2600	2550	2500	2500
Masse volumique apparente :						
- l'état lâche, kg/m ³ .	1380	1370	1390	1270	1150	1170
- l'état compact, kg/m ³ .	1500	1500	1490	1049	1280	1270
Porosité, (%).	47	46.48	46.50	50.2	46	46.8
Teneur en eau, (%).	0.13	0.10	0.10	0.40	0.30	0.25
Coefficient d'absorption, (%).	0.20	0.50	0.50	1.50	1.38	1.38
Coefficient volumétrique CV	-	-	0.25	-	-	0.34
Coefficient de Los Angeles, (%).	-	-	22.78	-	-	28.55
Forme	Angulaire			Angulaire		
Texture	Lisse			Micro – alluvioilaire		

4.3.2.4 L'analyse granulométrique des pierres concassées

Trois fractions sont choisi pour confectionner le béton : (3/8, 8/16, 16/25).

L'analyse granulométrique des trois fractions est représenté au tableau 4.10 , 4.11 et 4.12 respectivement.

Il faut noter ici que ces mêmes courbes sont adoptées aux granulats artificielles (laitier cristallisé).

a. Analyse granulométrique du 16/25

Tableau 4.12 : Analyse granulométrique des pierres concassées 16/25.

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
25	0	0	0	100
20	1425	1425	47.5	52.5
16	1425	2850	95	5
Le fond	150	3000	100	0

b. Analyse granulométrique du 8/16

Tableau 4.13 : Analyse granulométrique des pierres concassées 8/16 :

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
16	0	0	0	100
12.5	1425	1425	47.5	52.5
10	900	2325	77.5	22.5
8	525	2850	95	5
6.3	90	2940	98	2
Le fond	60	3000	100	0

c. Analyse granulométrique du 3/8

Tableau 4.14 : Analyse granulométrique des pierres concassées 3/8

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât, (%)
		(g)	(%)	
8	0	0	0	100
6.3	320	320	20	80
5	426.66	746.66	46.66	53.33
4	226.66	1013.33	63.33	36.66
3.15	320	1333.33	83.33	16.66
2.5	160	1493.33	93.33	6.66
Le fond	106	1600	100	0

Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 4.4

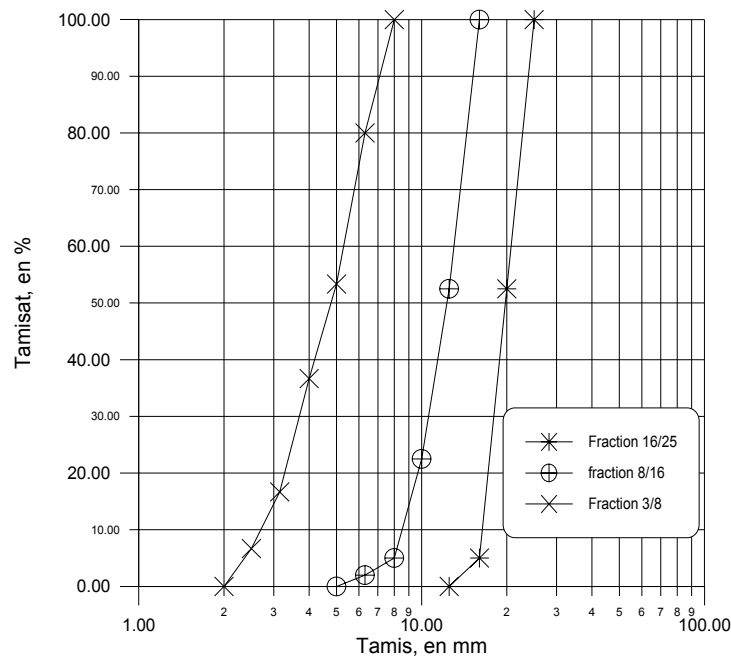


Figure 4.3 : courbes granulométriques des granulats grossiers.

4.4 LES ACTIVANTS

Les activants chimiques sont des produits solubles dans l'eau, et le plus souvent d'origine minérale (les bases fortes et leurs sels). Ils agissent en modifiant la solubilité et la vitesse d'hydratation des différents constituants anhydres des liants.

L'activant sélectionné pour effectuer les essais est un sel de base alcaline « le carbonate de sodium » (Na_2CO_3) vu sa disponibilité et son coût raisonnable.

Il provient de l'usine de « GRANITEX : nouveaux produits » de Boussaâda (M'sila), sous forme d'une poudre blanche, diluée dans l'eau afin d'obtenir les densités voulues.

La densité désirée dans cette partie expérimentale est de $1,25 \text{ g/cm}^3$.

La composition chimique du carbonate de soude anhydre est représentée au tableau 4.15

Tableau 4.15: Composition chimique du carbonate de soude.

Teneur %			
Na_2O	K_2O	CO	H_2O
46.6	0.02	34.7	17.73

Dans certains essais on a utilisé également de la soude caustique (NaOH) afin d'estimer l'effet des différents activants sur le comportement physique et mécanique de la pâte de ciment au laitier.

CHAPITRE 5

L'ETUDE DU LIANT DE LAITIER ACTIVE

5.1 INTRODUCTION

Les liants de laitier basique (activé) représentent des substances hydrauliques obtenues en broyant finement du laitier granulé en compagnie de composés hydrophiles de métaux alcalins (Sodium et Potassium) où bien en gâchant du laitier granulé par des solutions de ces composés (Mezghiche, 1989).

Le laitier granulé du haut fourneau d'El-Hadjar de Annaba convient à la fabrication des ciments, suite à plusieurs études et publications faites sur ce sujet (travaux de Mezghiche, 1989, Behim, 2003 et Guettache, 2002).

Dans cette étude, on a utilisé en guise de composé alcalin une solution aqueuse de carbonate de soude de différentes densité de 1,15 à 1,25 g/cm³, et une solution de la soude caustique de même densité.

Les échantillons du liant de laitier basique ont été confectionnés conformément aux normes en vigueur (malaxage, mise en œuvre, conservation, ...)

L'activation alcaline ne fait pas seulement l'objet de cette partie, mais on a traité également l'activation (par le clinker) et l'activation mixte (soude et clinker), pour comparer les résultats obtenus.

5.2 ESSAIS SUR LA PATE DURCISSANTE

5.2.1 Propriétés physiques

Dès que le laitier finement broyé a été mélangé avec la solution basique, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps.

Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus au moins malléable. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange se raidit, donc il fait prise.

5.2.1.1 : Essai de consistance (détermination de la pâte normale)

La consistance caractérise la plus au moins grande fluidité de la pâte.

a. Cas d'une activation par le clinker

L'ajout du laitier granulé finement broyé au ciment portland est fait de 30 % et de 80 % du poids de ciment.

La consistance normale est évaluée pour ces deux teneurs variantes de laitier (30 % et 80 %). (on a représenté la dimension d présentant la distance entre la sonde et la plaque en verre)

L'ajout d'une quantité allant à 30 % du laitier améliore la plasticité du liant, pour un $E/C=0,26$, pour les autres rapports elle est équivalente à celle d'un ciment portland, au-delà de 30 % d'addition la plasticité n'est pas considérablement affectée, ce qui est représentée à la figure 5.1

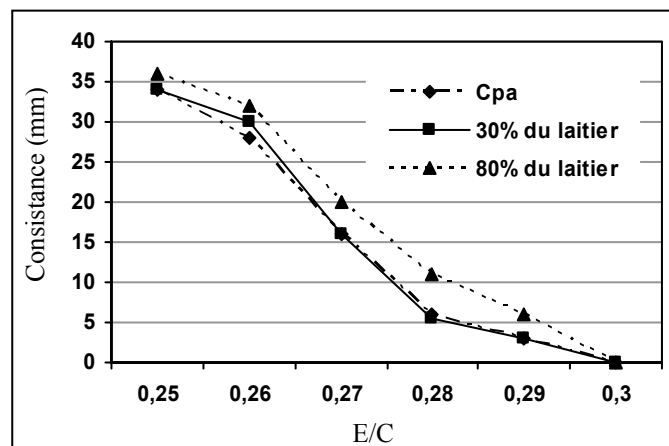


Figure 5.1 : Evolution de la consistance d'un ciment portland au laitier.

La consistance normale s'obtient pour un rapport $E/C = 0,29$, pour les différents types de liant.

b. Cas d'une activation alcaline

La variation de la consistance Vicat en fonction du rapport E/C est évolué pour deux pâtes : l'une d'un ciment portland et l'autre d'un ciment de laitier activé.

L'activant utilisé est le carbonate de soude de deux densités différentes $1,20 \text{ g/cm}^3$ et $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 5.2.

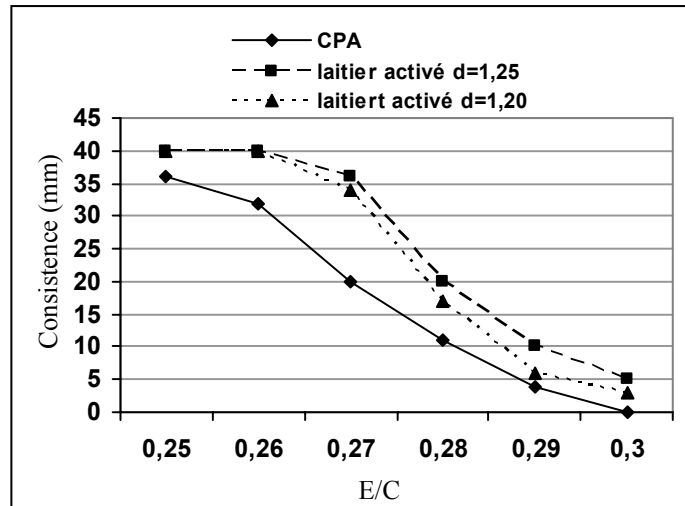


Figure 5.2 : Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C et la densité de l'activant.

La consistance normale s'obtient pour un rapport E/C=0,29 pour un ciment portland, par contre dans le cas du ciment au laitier activé, elle s'obtient avec un rapport E/C=0,3.

Le carbonate de sodium est un accélérateur de prise, il est également un rigidifiant (où raidisseur puissant). Donc la plasticité diminue en augmentant la teneur de carbonate de soude (sa densité).

5.2.1.2 Essai de prise

a. Activation par le clinker

Les ciments de laitier au clinker ont des délais de prise longs par rapport au ciments portland, ce qui est lié à l'hydratation faible des composants du laitier.

Le tableau 5.2 représente l'évolution du temps de prise selon les pourcentages du laitier ajoutés au liant.

Tableau 5.1 : temps de prise en fonction des pourcentages de laitier.

Type de liant		Début de prise	Fin de prise
% du laitier	% du CPA		
0	100	2 h 03 min	5 h 11 min
30	70	2 h 20 min	5 h 20 min
50	50	2 h 30 min	5 h 35 min
80	20	2 h 50 min	5 h 45 min

b. Activation alcaline

L'activation du laitier diminue considérablement le début de prise (de quelques heures

à quelques minutes) de même la fin de prise, le tableau 5.2 présente le début et la fin de prise des liants au laitier activés par (la soude caustique et le carbonate de soude en fixant la densité de l'activant à $1,20 \text{ g/m}^3$).

Tableau 5.2 : délai de la prise selon le type de l'activant utilisé.

Type de liant	Composé alcalin	Densité du composé alcalin	Début de prise	Fin de prise
%du laitier				
100	Soude caustique	$1,20 \text{ g/cm}^3$	0 h. 50 min	1 h.15 min
100	Carbonate de soude	$1,20 \text{ g/cm}^3$	0 h. 55 min	1 h.25 min

Les composés alcalins sont des raidisseurs qui épaissent les interstices aqueux en accroissant le seuil de cisaillement de la pâte de ciment ce qui nous donne dès les premières minutes une formation de gel de silice.

Parmi les deux types d'activants utilisés, on remarque une légère différence entre leur effet sur le délai de prise.

b.1 L'influence de la densité du composant alcalin sur la prise

Le temps de prise diminue en augmentant la concentration de l'activant.

Pour étudier l'effet de la densité (concentration) de l'activant sur la prise du liant au laitier, quatre densités sont choisies : 1,10 , 1,15 , 1,20 et $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Les deux activants utilisés sont : NaOH et Na_2CO_3 .

Le tableau 5.3 récapitule les résultats obtenus.

Tableau 5.3 : influence de la densité des activants sur la prise du laitier.

Composé alcalin	Densité g/cm^3	Début de prise	Fin de prise
Solution de soude caustique (NaOH)	1.1	1 h. 50 min	3 h. 45 min
	1.15	1 h. 10 min	1 h. 50 min
	1.20	0 h. 50 min	1 h. 15 min
	1.25	0 h. 40 min	1 h. 35 min
Solution de carbonate de soude (Na_2CO_3)	1.1	2 h. 30 min	4 h. 45 min
	1.15	1 h. 45 min	2 h. 15 min
	1.20	0 h. 55 min	1 h. 25 min
	1.25	0 h. 45 min	1 h. 15 min

La solution de la soude caustique, active considérablement le laitier en comparaison avec le carbonate de soude, à une concentration faible de l'ordre 1.10 le début de prise est largement diminué.

A une concentration égale à $1,25 \text{ g/m}^3$, l'effet des deux activants est comparable.

b.2 L'influence du rapport (solution/liant) sur la prise

Plusieurs facteurs influencent la durée de prise, nous avons tout d'abord la finesse du liant, en second lieu le rapport E/C. Nous allons étudier ce point en variant le rapport E/C de 0.28 à 0.30.

Le tableau 5.4 montre que plus le rapport solution basique / liant (S/L) augmente et plus le temps du début de prise et de fin de prise sont un peu écartés.

Le composé alcalin utilisé est le Na_2CO_3 avec une densité de $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Tableau 5.4 : variation du temps de prise en fonction du rapport (S/L)

S/L	0.28	0.30
Début de prise	0 h. 40 min	0 h. 45 min
Fin de prise	1 h. 35 min	1 h. 45 min

Le rapport E/C influence la cinétique de prise, plus ce rapport est faible, plus les grains de ciment sont rapprochés, ce qui rend la prise plus rapide.

c. Cas d'une activation mixte

La teneur croissante du laitier dans le ciment portland affecte négativement son délai de prise, pour y remédier, tout en gardant un pourcentage élevé en laitier, on a recours à l'activation mixte (clinker et soude).

Le tableau 5.5 représente le délai d'un liant présentant 80 % du laitier et activé par la soude.

Tableau 5.5 : le délai de prise selon le type d'activant utilisé :

Type de liant		Composé alcalin	Densité du composé alcalin	Début de prise	Fin de prise
% laitier	% clinker	Soude caustique	1.20 g/cm^3	0 h. 20 min	1 h. 50 min
80	20				

A partir des résultats obtenus, nous remarquons l'effet positif de la combinaison de l'activation calcique avec l'activation alcaline sur le début de prise en comparaison avec l'effet de chacune des deux activations agissant séparément.

5.2.1.3 Essai de l'expansion (gonflement)

Le gonflement est engendré par l'expansion de certains éléments provoquant à long terme des anomalies de résistance et présentant après la prise des fissures dans la masse du liant.

Le tableau 5.6 représente les valeurs du gonflement obtenues pour une pâte normalisée du ciment au laitier suivant les différents types d'activation :

- alcaline.
- Par le clinker.
- Mixte.

Tableau 5.6 : Le gonflement en fonction des types d'activations.

Type d'activation	% laitier	% clinker	Composant alcalin	Gonflement mm
Alcaline	100 %	0	Soude caustique	0
	100 %	0	Carbonate de soude	0
Clinker	0	100 %	-	1.25
	50 %	50 %	-	0.75
	80 %	20 %	-	0.50
Mixte	80 %	20 %	Soude caustique	0.50

On remarque la bonne stabilité des ciments au laitier activé où non activé (sans ajout de composant alcalin).

En général, les éléments nuisibles (MgO, CaO) dans le laitier se trouvent à l'état vitreux dont l'effet néfaste est empêché, par contre si le MgO est sous la forme cristalline (périclase), il est donc réactif de façon nuisible (Neville, 2000).

5.2.2 Propriétés mécaniques

Pour étudier l'effet de l'activation du laitier sur les propriétés mécaniques de la pâte du ciment durcie, on a confectionné des éprouvettes cubiques 2x2x2 cm.

- On a fixé le rapport Solution/ciment à 0,30.
- Les éprouvettes sont conservées dans un milieu humide ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$) subissant ainsi un durcissement naturel.
- D'autres éprouvettes ont subi une accélération de durcissement par étuvage (2 h+12 h+2 h) à une température de 80°C et d'une humidité relative de 90 %.

La résistance en compression des pâtes pures du liant est déterminée au différents âges de durcissement (1 j – 7 j – 28 j – 120 j – 365 j).

5.2.2.1 Cas d'une activation par le clinker

Il s'agit ici des ciments portland au laitier, où l'augmentation de la teneur en laitier au-delà de 50 % affecte considérablement la résistance mécanique.

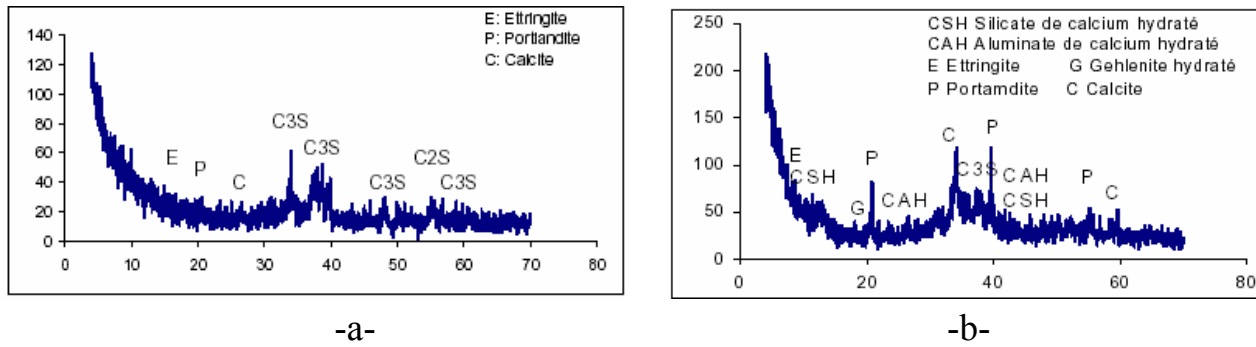


Figure 5.5 : Diffractogrammes d'un liant hydraté présentant 50 % du laitier.
 a : après 2 jours de durcissement.
 b : après un an de durcissement.

A titre de comparaison nous présentons le diffractogramme d'un ciment portland hydraté après un an de durcissement.

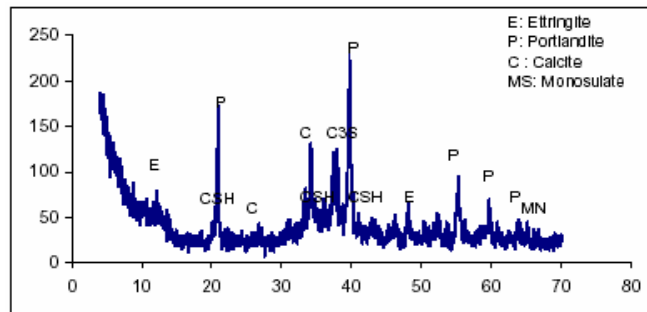


Figure 5.6 : diffractogramme du CPA hydraté.

A partir des diffractogrammes obtenus, nous remarquons que pour des petites teneurs en laitier les produits d'hydratation ne sont pas les mêmes pour les grandes teneurs. Pour une teneur en laitier de 20 % les mêmes produits d'hydratation sont détectés comme dans un ciment portland hydraté (étringite et portlandite).

Par contre pour une teneur en laitier de 50 %, et après un an de durcissement, de nouveaux produits d'hydratation apparaissent :

Les silicates de calcium hydratés (CSH) et l'aluminate de calcium hydraté, également les hydrates du laitier tel que la gehlenite hydraté.

Il faut noter ici que la mise en évidence des silicates de calcium hydratés par les rayons X dans la pâte de ciment portland hydratée après un an de durcissement est difficile à cause de leur structure mal cristallisée (même après une année de durcissement) (Behim et al, 2003).

Les mêmes échantillons sont observés à partir d'un microscope électronique à balayage (MEB) après un an de durcissement. (agrandissement x 20.000)

Les images obtenues sont représentées aux figures suivantes 5.7, 5.8 et 5.9 :

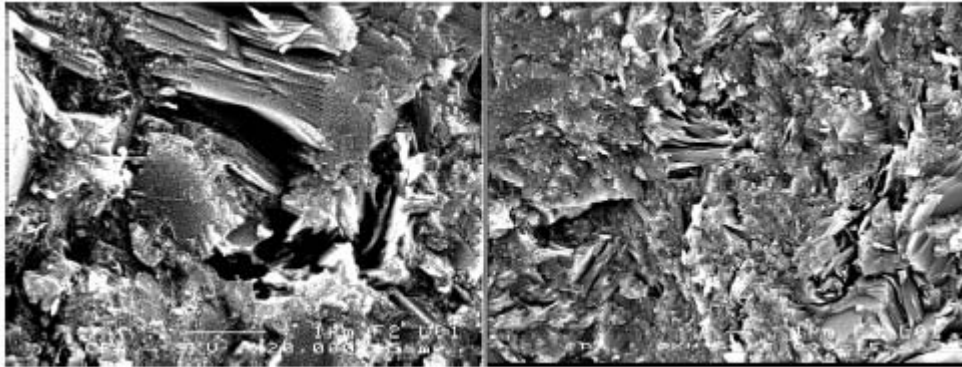


Figure 5.7 : Observation au MEB du CPA hydraté à 365 jours de durcissement.



Figure 5.8 : Observation au MEB du CPJ (20 % du laitier) hydraté à 365 jours.

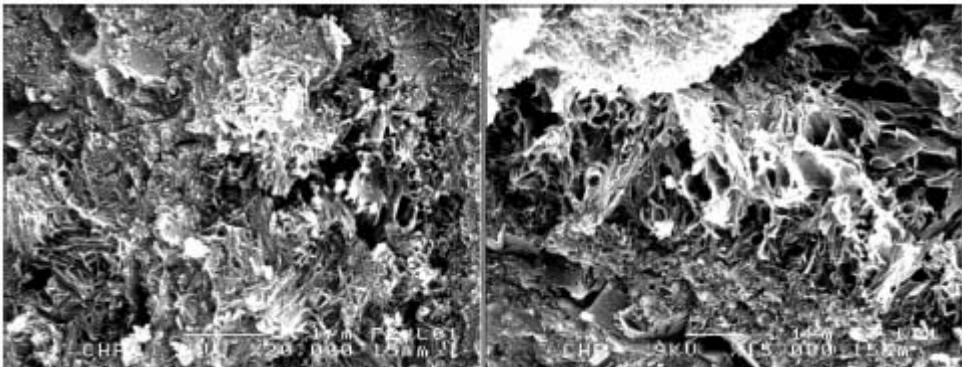


Figure 5.9 : Observation au MEB du CHF (50 % du laitier) hydraté à 365 jours.

Les observations au microscope électronique à balayage réalisées sur les trois types de ciment précédents, (CPA, 20 % du laitier, 50 % du laitier), ont montrés la formation de l'étringite (forme d'aiguilles) de la portlandite (forme de plaques) et des silicates de calcium hydratés (CSH) (Fig. 5.9) d'une structure différente de celle observée dans un CPA, dans ce

dernier (Fig.5.7) on a pu observer la formation de la tobermorite, de la portlandite et peu d'étringite. Et enfin dans le liant présentant 20 % du laitier (fig.5.8) , on peut observer la présence de la portlandite, des CSH et beaucoup d'étringite.

5.2.2.2 Cas d'une activation mixte

Il s'agit d'une activation mixte, la soude ajoutée sous forme d'une solution de densité de $1,15 \text{ g/cm}^3$ et la chaux libérée pendant l'hydratation du clinker (Ca(OH)_2).

Les figures 5.10 et 5.11 présentent l'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage du laitier et le type d'activant utilisé après 1 jour, 7 jours, 28 jours, 120 jours et 365 jours de durcissement naturel.

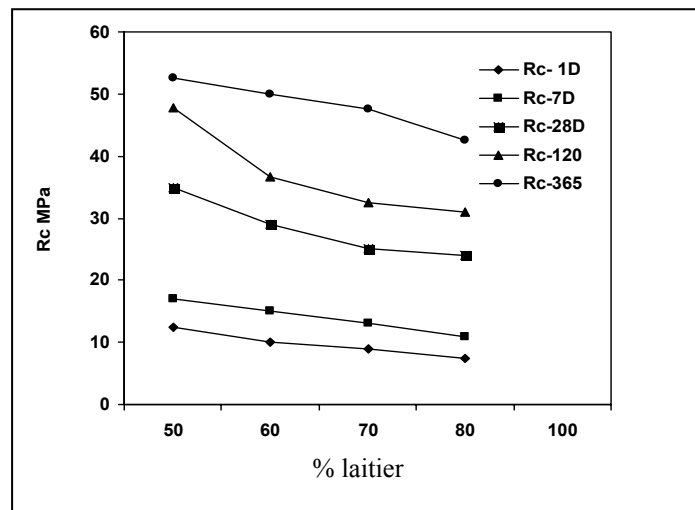


Figure 5.10 : Evolution de la résistance du liant activé par NaOH en fonction du % laitier.

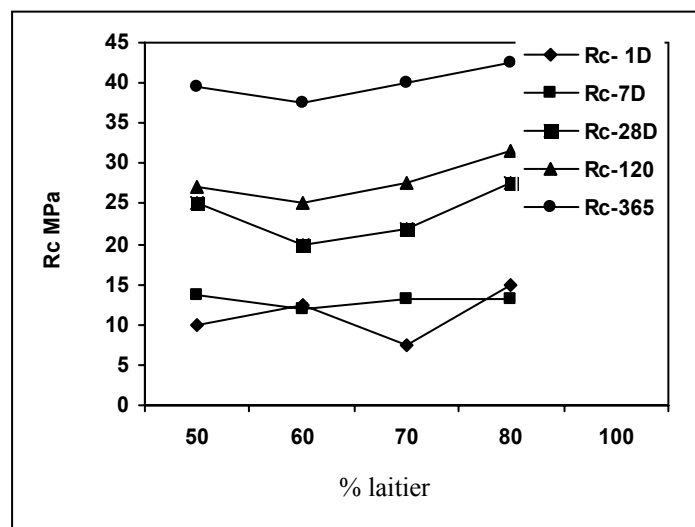


Figure 5.11: Evolution de la résistance du liant activé par Na_2CO_3 en fonction du % du laitier.

A titre de comparaison, nous présentons à la figure 5.11, l'évolution de la résistance mécanique en compression d'un liant activé seulement par le clinker .

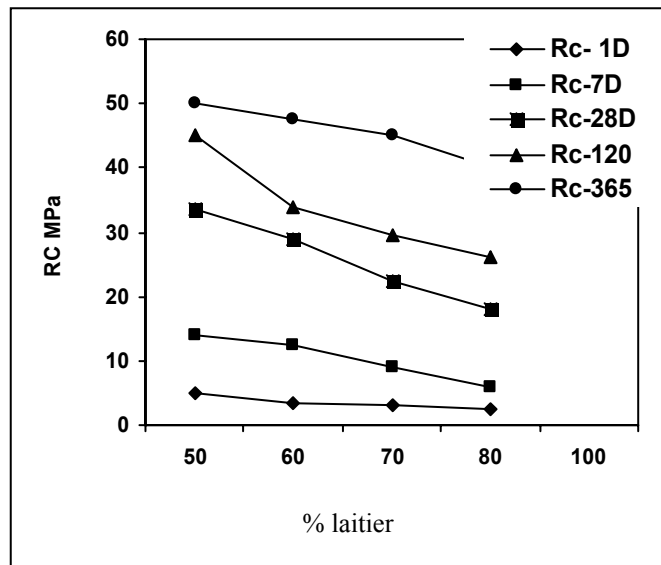


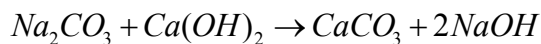
Figure 5.12 : évolution de la résistance du liant activé par le clinker.

Par comparaison, les figures 5.10, 5.11 et 5.12, on remarque l'amélioration de la résistance en compression par l'ajout des activateurs pour les teneurs élevées de laitier.

D'une façon générale, les bases solubles (NaOH , Na₂CO₃) accélèrent la dissolution de la silice et de l'alumine du laitier et facilite leur réaction avec l'hydroxyde de calcium, pour former les CSH.

L'ajout du carbonate de soude s'explique de la façon suivante :

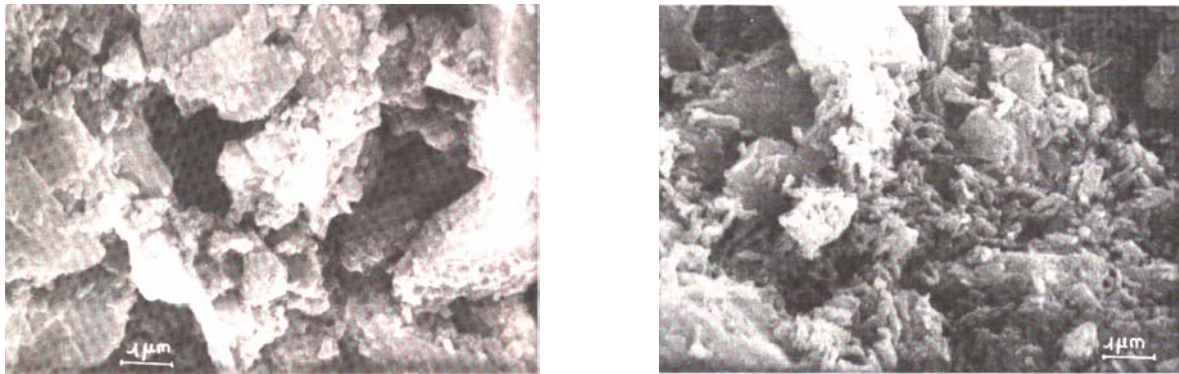
Il réagit avec l'hydroxyde de chaux libérée dès le départ (par l'hydratation des grains de ciment) suivant la réaction suivante :



Il en résulte une double action :

- La formation par précipitation de fines aiguilles de carbonate de calcium augmentant le seuil de cisaillement.
- La formation de soude accélérant le début et la fin de prise du ciment.

La figure (5.13) montre le changement de la structure dans le cas de l'ajout de 5 % du Na₂CO₃, au ciment.



- a -

- b -

Figure 5.13 : Changement de structure d'un mortier en CPA activé par Na_2CO_3 .

a : Mortier Témoin.

b : Mortier Activé. (Venuat, 1984)

5.2.2.3 Cas d'une activation alcaline

Dans cette partie, le pourcentage du laitier est fixé à 100 % (liant de laitier sans clinker), le composant alcalin utilisé est le NaOH et Na_2CO_3 dont la densité varie de 1,15 à $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Selon (Tchernogov, 1965), le processus de durcissement du mélange laitier et solution alcaline se divise en trois étapes :

- Absorption des silicates de la solution alcaline à la surface du laitier.
- Coagulation de la silice.
- La déshydratation du liant et l'interaction chimique de la silice avec l'hydroxyde de calcium.

On considère que le processus de durcissement caractérise ainsi bien le laitier activé par n'importe quelle solution alcaline (soude caustique, carbonate de soude ou verre soluble).

5.2.2.3.1 L'influence de la densité du composant alcalin sur la résistance

L'augmentation de la densité de l'activant influe positivement sur la résistance en compression.

La figure 5.14 présente l'évolution de la résistance (à 28 jours) en fonction l'augmentation de la densité.

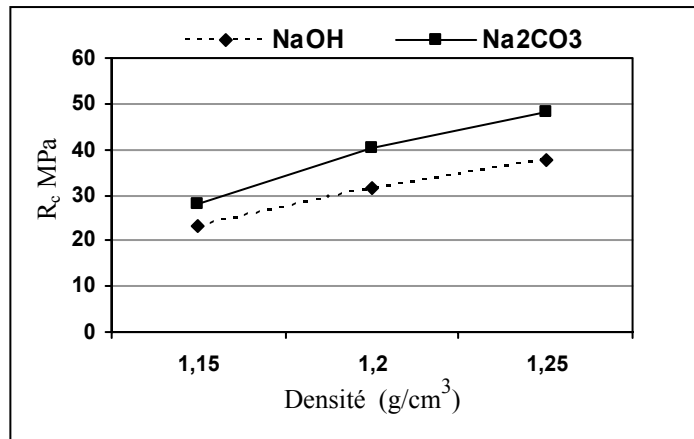


Figure 5.14 : L'évolution de la résistance en compression en fonction de la densité de l'activant à 28 jours de durcissement.

Le développement de la résistance en compression aux différents âges de durcissement est représenté sur les figures 5.15 et 5.16 en utilisant les deux activants NaOH et Na₂CO₃ respectivement.

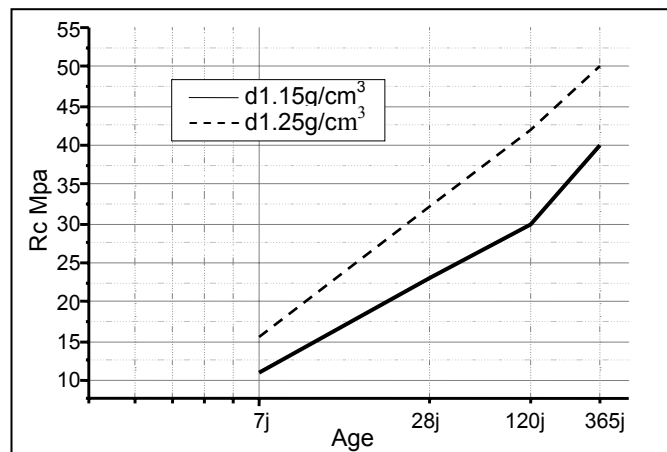


Figure 5.15 : l'évolution de la résistance aux différents âges d'une pâte activée par NaOH.

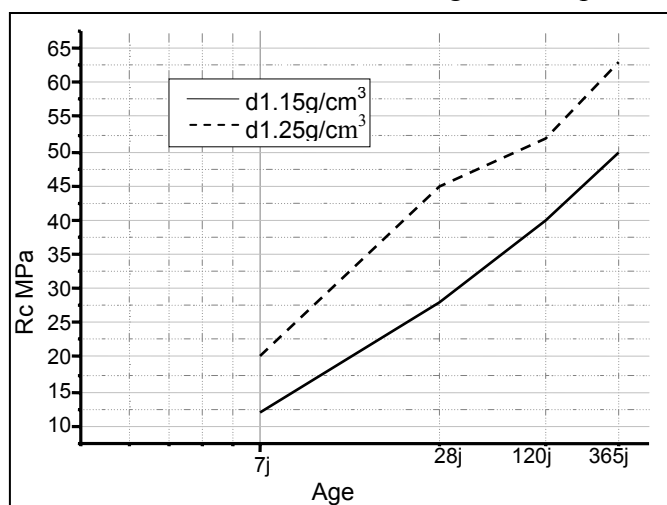


Figure 5.16 : L'évolution de la résistance aux différents âges d'une pâte activée par Na₂CO₃.

A partir des résultats obtenus, nous remarquons l'efficacité du composant alcalin Na_2CO_3 par rapport à l' NaOH au moyen terme où à long terme, cette augmentation de résistance est estimée à 10 % par rapport au liant non activé.

5.2..2.3.2 L'influence de l'accélération du durcissement sur la résistance

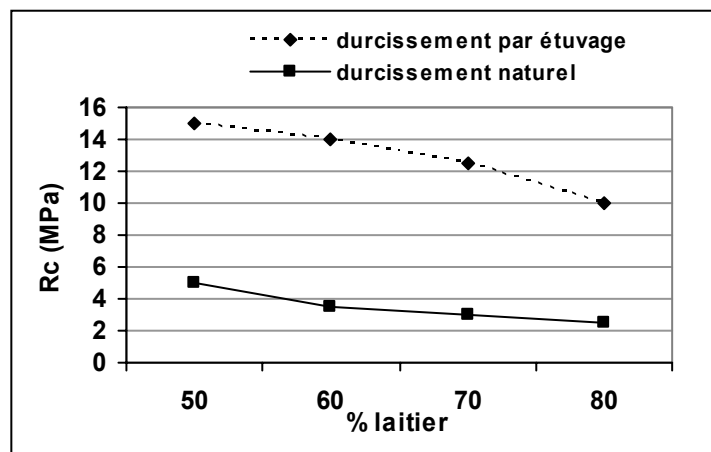
Les ciments de laitier supportent bien l'étuvage. La combinaison de l'activation et l'étuvage améliore nettement les résistances mécaniques, en particulier aux âges précoces.

Les trois types d'activation seront étudiées :

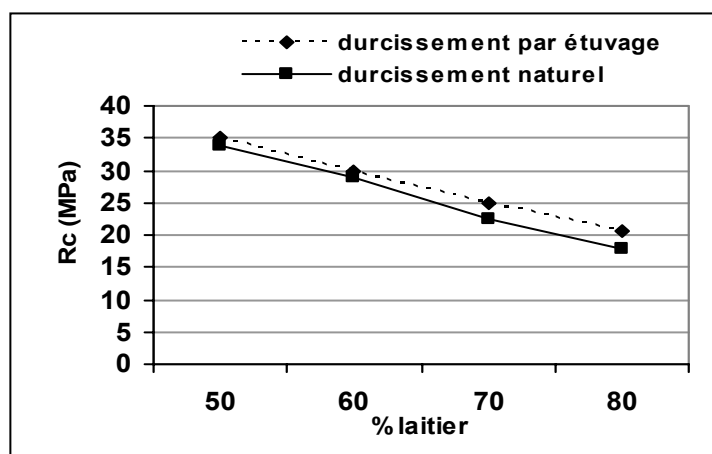
a. Cas de l'activation par le clinker

On considère des pourcentages élevés en laitier (50 %, 60 %, 70 % et 80 %) et le reste est représenté par le clinker.

La résistance mécanique en compression est appréciée après 1 jour (figure 5.17.a) et après 28 jours (figure 5.17.b) de durcissement par étuvage (les éprouvettes sont étuvées pendant un jour, démoulées et ensuite elles sont gardées humides jusqu'à 28 jours), elle est illustrée à la figure 5.17.



-a-



-b-

Figure 5.17 : l'évolution de la résistance en compression en fonction du % du laitier.

a : après 1 jour d'étuvage. b : après 28 jours d'étuvage.

L'étuvage améliore les résistances mécaniques des ciments de laitier au clinker, surtout à court terme de durcissement.

b. Cas d'une activation mixte

En gardant les mêmes pourcentages de laitier, et en fixant la densité du composant alcalin (NaOH) à 1.15 g/cm^3 , la résistance mécanique est déterminée après 1 jour et après 28 jours de durcissement par étuvage.

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.18.

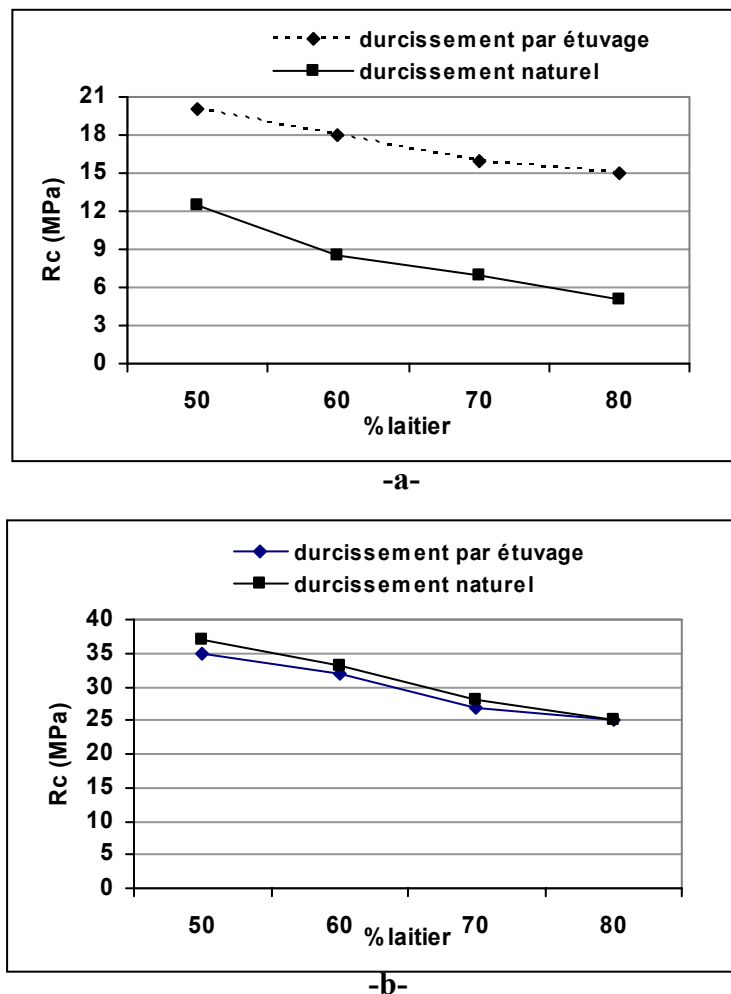


Figure 5.18: L'influence de l'étuvage sur la résistance en compression du liant activé par NaOH
 a : après 1 jour .
 b : après 28 jours.

L'activation mixte (clinker + soude) influe positivement sur la résistance en compression.

La combinaison de ce type d'activation avec l'étuvage est très bénéfique. L'augmentation de la résistance après un jour de durcissement par étuvage est considérable

même pour les pourcentages élevés en laitier, en comparaison avec l'activation classique (par le clinker).

Cette augmentation de résistance est remarquée aussi après 28 jours de durcissement.

c. Cas d'une activation alcaline

En augmentant le pourcentage du laitier à 100 %, et en choisissant deux composants alcalins NaOH et Na₂CO₃ d'une densité identique 1.15 g/cm³, on représente graphiquement l'évolution de la résistance en compression après 1 jour et après 28 jours de durcissement par étuvage sur la figure 5.19.

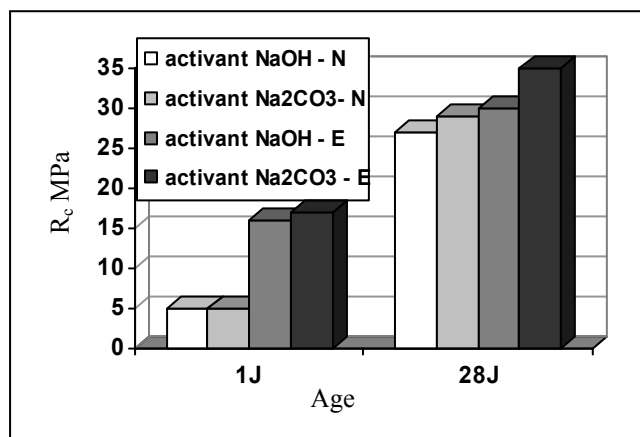


Figure 5.19 : l'influence de l'étuvage sur la résistance en compression d'un liant (sans clinker) activé. (N : durcissement normal , E : durcissement par étuvage).

Les activateurs du laitier augmentent considérablement la résistance des liants au laitier (sans clinker), une légère différence des effets des activateurs sur la résistance est remarquée à moyen terme. Et pour mieux estimer l'influence de l'étuvage et l'activation, la solution de Na₂CO₃ est utilisée pour activer le laitier suivant les différentes densités (1.15, 1.20 , 1.25) g/cm³.

La figure 5.20 représente l'effet de l'étuvage et la densité de l'activateur sur la résistance en compression de pâte de ciment au laitier.



Figure 5.20 : L'influence de la densité de l'activant et l'étuvage sur la résistance en Compression après 1 jour d'étuvage.

L'augmentation de la densité influe positivement sur l'évolution de la résistance des liants au laitier étuvés.

5.2.3 Action des milieux agressifs

Les ciments à forte teneur en laitier conviennent bien aux ouvrages maritimes, l'eau de mer contient des sels qui exercent une action considérable sur les ciments portland par rapport au ciments de laitier, du fait de l'absence de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et l'aluminate tetracalcique dans ces derniers.

Afin d'estimer la qualité des ciments au laitier activé, les éprouvettes cubiques (2x2x2 cm) confectionnées à base d'un ciment de laitier activé par Na_2CO_3 , d'une densité de $1,25 \text{ g/cm}^3$ sont immergées pendant une durée de 6 mois dans deux solutions agressives : HCl (0,1 %) et MgSO_4 (3 %). Du fait que les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (surtout les sulfates).

Le coefficient de qualité représente le rapport entre les résistances en compression des éprouvettes immergées dans les solutions agressives au autres immergées dans l'eau potable, plus ce coefficient est élevé plus le ciment est durable.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 5.21.

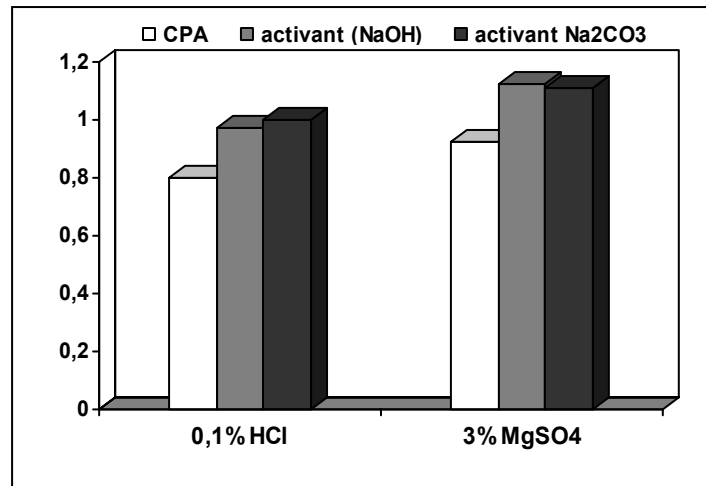


Figure 5.21 : Coefficient de qualité d'une pâte activée immergée dans les Solutions (HCl, MgSO₄).

Les ciments du laitier (activé par les solutions basiques où à partir du clinker) montrent une meilleure résistance dans le milieu nocif, ce comportement est principalement attribué à leur faible teneur en chaux (Ca(OH)₂) qui est souvent responsable des dégâts dans les bétons. de même la forte imperméabilité des pâtes des liants de laitier durcies et la formation supplémentaire des hydrates CSH précipitant dans les pores en diminuant ainsi la porosité et jouant un rôle dans leur résistance aux milieux agressifs.

En comparant l'effet des milieux agressifs, on remarque que les chlorures affectent en plus les ciments de laitier que les sulfates.

5.3 ESSAI SUR LES MORTIERS

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance.

5.3.1 Mesures des résistances à la compression et à la traction

Dans cette partie on va traiter seulement l'effet de l'activation alcaline sur le liant de laitier sans clinker tout en étudiant :

- L'influence de la densité de l'activant sur les résistances à la compression et à la traction.
- L'influence de l'accélération du durcissement sur ces résistances.

A cet effet deux types d'activants sont utilisés (NaOH) et (Na₂CO₃) avec des densités qui varient de 1,20 g/cm³ à 1,25 g/cm³ et un rapport solution/ciment = 0,40.

Les éprouvettes confectionnées sont prismatiques de dimensions (4x4x16 cm), conservées dans un milieu humide à 20°C, d'autres ont subi une accélération de durcissement par étuvage (T = 60°C, HR = 95 %) après un jour d'étuvage, elles sont démoulées, puis conservées dans l'eau.

5.3.1.1 L'effet de la densité de l'activant sur les résistances à la compression et à la traction

Les résistances mécaniques en compression et en traction sont estimées après 28 jours et 60 jours de durcissement normal.

Les résultats obtenus sont représentés aux figures (5.22, 5.23 et 5.24) respectivement

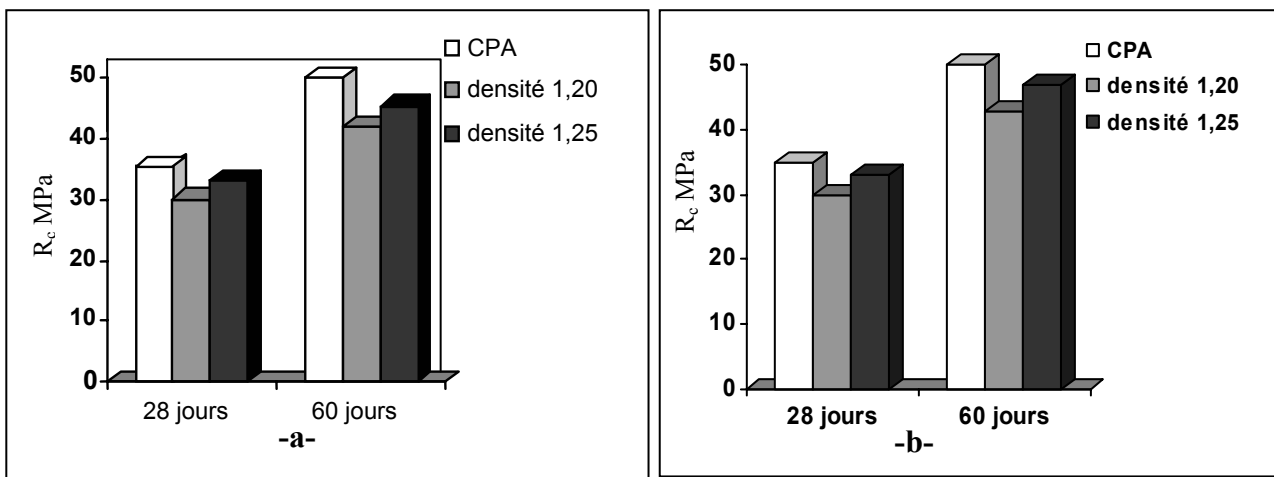


Figure 5.22 : La résistance en compression en fonction de la densité de l'activant utilisé.

a : NaOH, b : Na_2CO_3

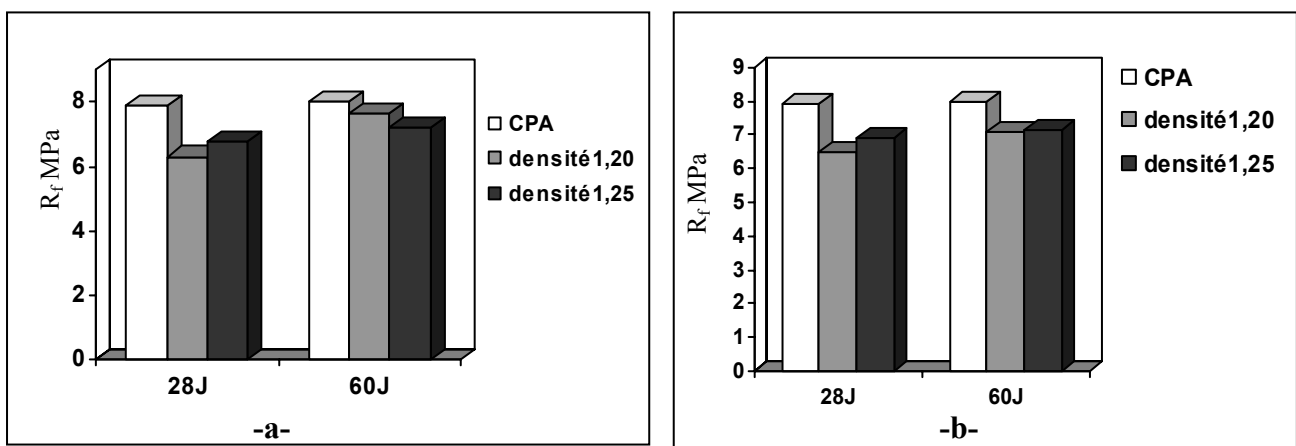


Figure 5.23 : La résistance en flexion en fonction de la densité de l'activant utilisé.

a : NaOH, b : Na_2CO_3

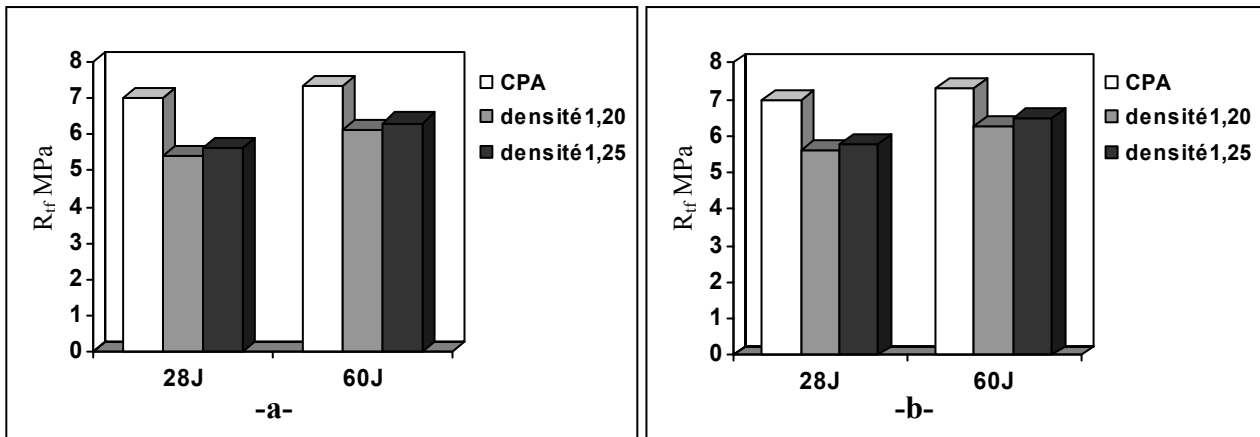


Figure 5.24 : La résistance en traction par flexion en fonction de la densité de l'activant utilisé.(a : NaOH, b : Na₂CO₃).

L'augmentation de la densité de l'activant, joue un rôle positif dans l'amélioration des résistances mécaniques (compression, flexion, traction).

Cette augmentation est légère en traction et en flexion par rapport à la compression.

En comparant ces résultats avec le mortier de référence (ciment portland), on remarque que ces résistances sont toutes presque du même ordre.

5.3.1.2 L'effet de l'accélération de durcissement sur la résistance

Les résistances mécaniques sont estimées après 28 jours de durcissement par étuvage.

La densité des activants est fixée à 1,25 g/cm³.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 5.25:

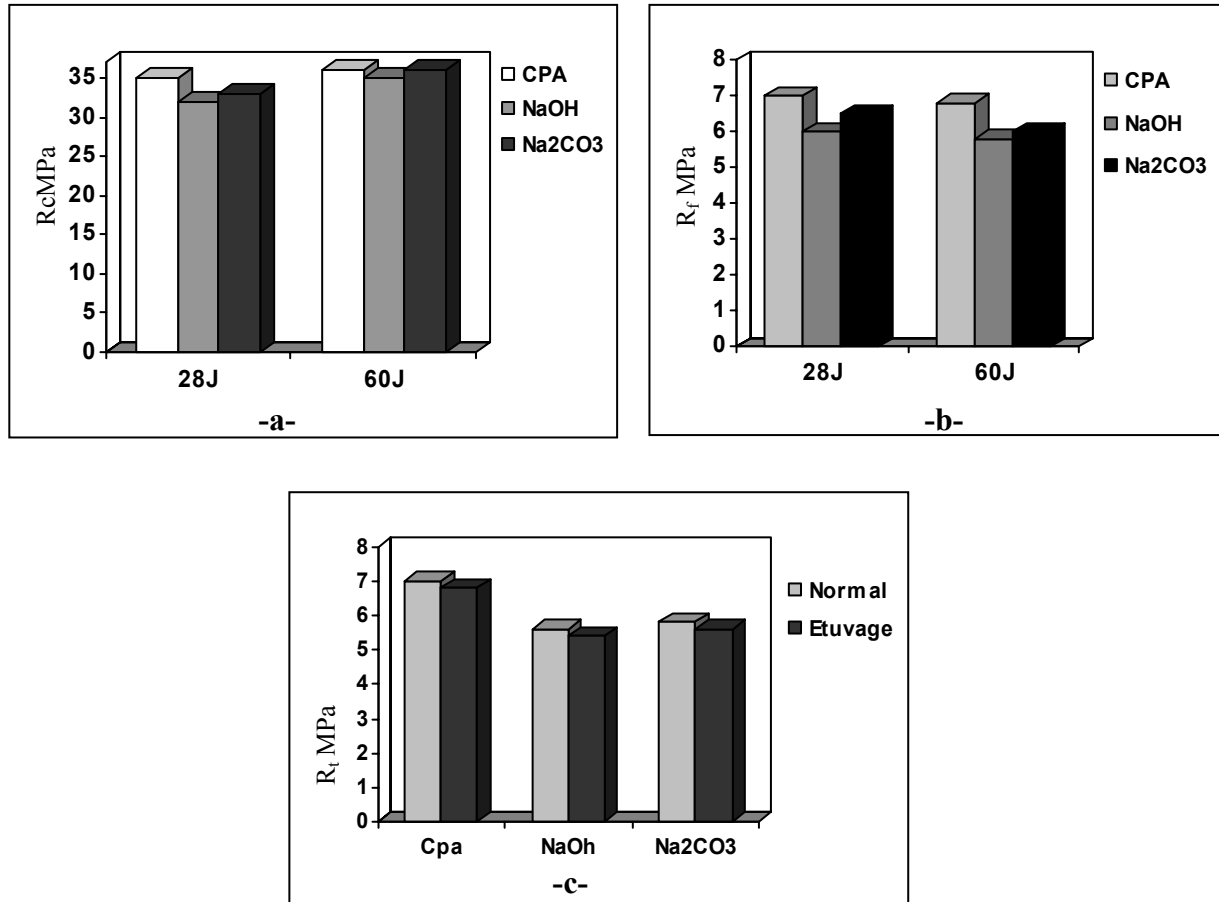


Figure 5.25 : Les résistances mécaniques après étuvage :
a : résistance en compression (28 jours et 60 jours).
b : résistance en flexion (28 jours et 60 jours).
c : résistance en traction (28 jours).

L'étuvage améliore peu les résistances en compression, les résistances en flexion et en traction sont affectées (l'efficacité de l'étuvage apparaîtra généralement après un jour).

5.3.2 Mesure du retrait et du gonflement

Le retrait est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment à cause du départ de l'eau, soit par hydratation où par évaporation.

Par contre, le gonflement est dû à l'absorption d'eau par les produits d'hydratation (le gel), en créant ainsi une pression de gonflement.

On compare dans cet essai la variation de la longueur et de la masse des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm) par rapport à la longueur et la masse initiales.

La figure 5.26 présente les variations linéaires des mortiers en fonction du temps et du type d'activation utilisée.

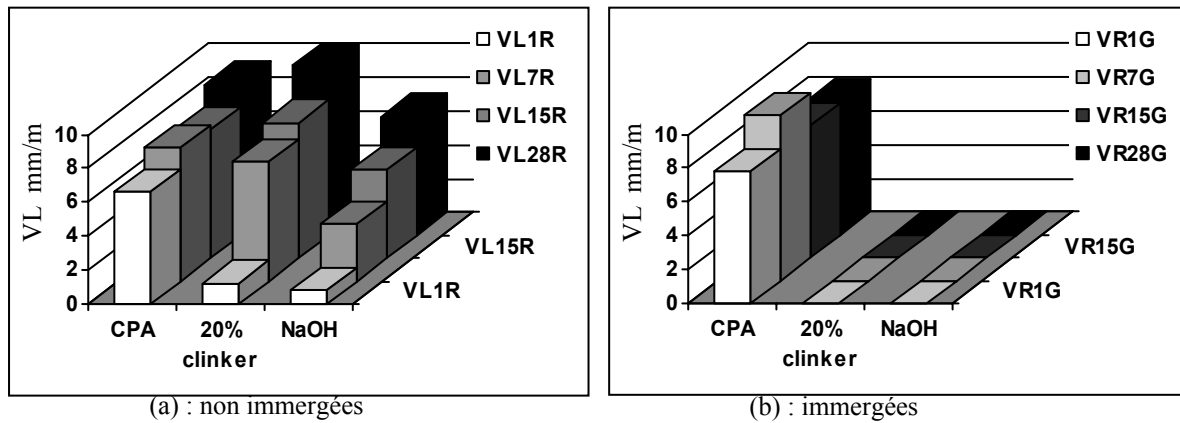


Figure 5.26: variations linéaires des mortiers en fonction du temps et type d'activant.

La figure 5.27 présente les variations massiques des mortiers en fonction du temps et type d'activant.

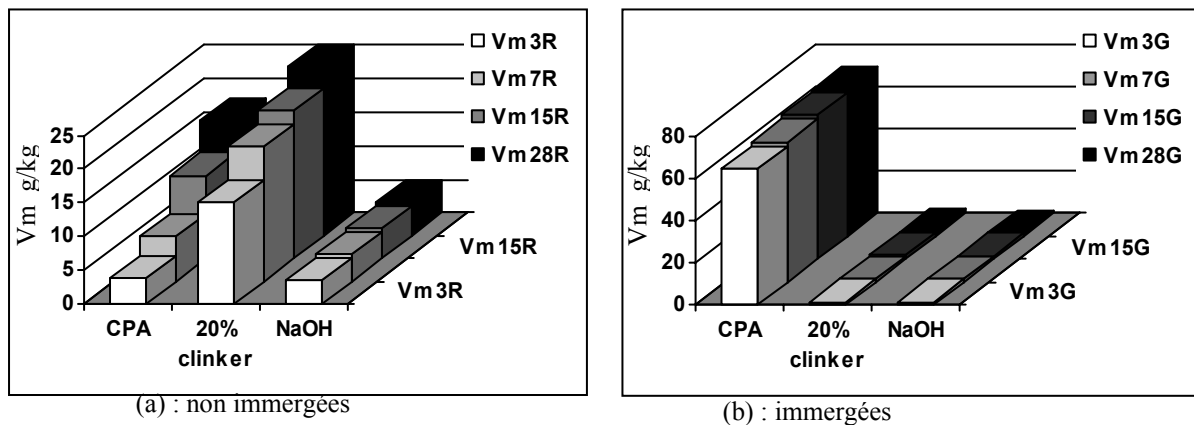


Figure 5.27 : variations massiques des mortiers en fonction du temps et type d'activant.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les variations linéaires d'un ciment de laitier sont inférieurs à celles d'un ciment portland (retrait et gonflement).

Le gonflement dans les ciments au laitier activé est nul du fait que :

L'activation du laitier améliore nettement ces variations et en particulier le retrait.

L'ajout de la base (NaOH) augmente le retrait après prise, mais au bout de plusieurs semaines, il diminue sans doute parce que la concentration en alcalis de la phase liquide augmente avec le temps du fait du départ d'une partie d'eau dans l'atmosphère sèche (ainsi se trouve confirmée l'hypothèse du rôle des alcalis sur les retraits à long terme (Venuat, 1984).

La variation massique en milieu naturel augmente dans le cas de l'activation par le clinker, tandis qu'elle diminue par l'activation par le NaOH en comparaison avec un ciment portland.

Ces variations diminuent fortement dans le milieu humide par rapport à un ciment portland ce qui est lié aux deux facteurs suivants :

- dans le cas de l'activation par le clinker, le Ca(OH)_2 qui provoque le gonflement est consommé pendant l'hydratation du laitier.
- Dans le cas de l'activation par le soude, l'absence du composé Ca(OH)_2 .

5.4 CONCLUSION

Cette partie d'étude nous a permis de mettre en valeur l'influence des différentes activations sur le comportement physique et mécanique de la pâte de ciment au laitier, ainsi que celui du mortier.

Certes, l'activation par le clinker est classique, elle a fait l'objet de pas mal d'études soit en Algérie où à l'étranger, et si nous exposons dans cette étude ce type d'activation c'est seulement pour faire des comparaisons et en tirer des conclusions.

A des teneurs inférieures à 50 % de la masse de ciment , le laitier du haut fourneau finement broyé, peut être additionné au ciment portland sans qu'il affecte considérablement les propriétés mécaniques (notant que le délai de prise sera prolongé). Mais au-delà de cette limite, la chute de résistance est nettement remarquée d'où le recours à l'activation mixte.

L'activation mixte (clinker et soude) (où n'importe quelle autre solution basique) récompense l'effet négatif des teneurs élevées en laitier :

- pour des teneurs en laitier allant à 80 % du poids du liant un composant alcalin d'une densité moyenne de (1.15 g/cm^3) peut donner des résistances acceptables à 28 jours (comparables à celles d'un liant de ciment portland composé), à long terme (après 1 an de durcissement) ces résistances s'améliorent significativement.
- Pour une teneur extrême du laitier de 80 %, le début de prise est largement raccourci par l'utilisation de NaOH comme activant : de 2 h. 50 min pour un liant non activé à 20 min, de même la fin de prise.
- La plasticité est un peu affectée par ce type d'activation (l'activant est un raidisseur puissant).

Augmentant la teneur en laitier à 100 % l'activation alcaline du laitier est une méthode très efficace, il suffit d'augmenter seulement la densité du composé alcalin utilisé à 1.20 g/cm^3 où à 1.25 g/cm^3 .

- L'augmentation de la densité du composant alcalin influence les propriétés physiques du liant au laitier notamment son délai de prise de quelques heures à quelques minutes seulement, elle influence aussi ces propriétés mécaniques (résistance mécanique en compression, en flexion et en traction par flexion).
- L'hydratation du ciment au laitier est très lente aux premiers âges, même après son activation alcaline, (il faut noter qu'il existe des composants alcalins assez puissants tel que le verre soluble dont l'utilisation favorise l'hydratation des composants du laitier, et le développement des résistances initiales).

A cet effet, on propose dans le cas de l'activation par la soude et ses sels de procéder à un durcissement par étuvage.

La combinaison de l'activation et l'étuvage est bénéfique, l'augmentation de la résistance est estimée de 3 fois de plus après un jour d'étuvage que celle d'un liant non étuvé. Après 28 jours de durcissement une légère différence est signalée entre le durcissement normal et celui par étuvage. Donc, dans le cas de la préfabrication des éléments structuraux, on propose d'utiliser un ciment de laitier sans clinker activé par la soude où à partir de ses sels, durcissant par étuvage.

Il reste à noter que :

- Les ciments au laitier (activé par le clinker où partir des solutions basiques) présentent un retrait inférieur à celui noté dans un ciment portland et un gonflement nul.
- Les ciments au laitier activé résistent mieux que le ciment portland aux milieux agressifs.

Et enfin notons les améliorations portées sur le côté économique et écologique :

- Réduction du prix du liant.
- Réduction des émissions de CO₂ polluant l'atmosphère.
- Assurer un développement durable à l'industrie du ciment.

CONCLUSION GENERALE

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, il fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces performances, sa souplesse d'emploi ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects.

Le béton est un matériau très en demande et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton.

Cette approche consiste à optimiser l'utilisation des ajouts cimentaires des résidus industriels, afin de remplacer le ciment dans le béton, et d'utiliser les matériaux recyclés pour la réalisation des bétons, ce qui permettra d'augmenter la production de ce dernier à un coût compétitif, et protéger la nature des stocks grandissants des résidus industriels.

L'objectif principal de cette thèse rentre dans ce contexte, il s'inscrit dans le thème très général de la recherche de l'amélioration des caractéristiques des matériaux locaux et la valorisation des déchets et sous produits industriels, tout en étudiant et en élaborant un liant hydraulique à base d'un sous produit industriel (le laitier granulé) sans clinker (liant basique), et de déterminer l'influence de l'utilisation des granulats du laitier cristallisé sur le comportement du béton ordinaire et du béton basique. Alors nous cherchons à améliorer quelques aspects de la durabilité des bétons, en proposant des traitements simples et rentables et enfin d'expliquer les comportements observés.

La méthodologie adoptée pour ce travail est la suivante : recherche bibliographique (partie A), expérimentation en laboratoire, et interprétation des résultats (partie B). en final des recommandations et conclusions récapitulatives ont été présentées.

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS : PARTIE A

Le but essentiel de toute recherche bibliographique est de fournir un contexte scientifique et technique pour n'importe quel travail de recherche. La partie A de notre travail est composée de trois chapitres à savoir : le premier chapitre évoque le problème des déchets industriels présentant des atteintes à l'environnement, et propose des solutions a adopté.

Le laitier granulé et le laitier cristallisé de l'usine d'El Hadjar est un exemple de déchets industriels qu'il faut s'en débarrasser, à partir de leur valorisation pour la confection des liants et la réalisation des bétons.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du ciment au laitier activé où nous avons mis l'accent sur les différents facteurs qui influencent sa réactivité notamment : la phase vitreuse, la composition chimique, la finesse et le traitement effectué durant son durcissement.

Les propriétés hydrauliques du laitier sont latentes, ne peuvent être mobilisées que dans un milieu fortement basique, il a été recommandé d'assurer un PH égal à 12 pour favoriser la dissolution des composants du laitier à partir de son activation : calcique, sulfatique où alcaline. L'activation alcaline est une méthode récente datée des années 1970, elle est très efficace.

Il a été recommandé également d'utiliser le verre soluble comme activant du laitier du fait qu'il améliore les résistances mécaniques du ciment au laitier trois fois de plus qu'un ciment ordinaire, et raccourci largement son délai de prise. La densité de l'activant joue un rôle majeur dans les performances mécaniques du liant de laitier.

On a également étudié dans ce chapitre le béton à base du laitier activé (béton basique), ses propriétés et les différents aspects de sa durabilité.

Le seul inconvénient du béton basique réside dans ses délais brefs de maniabilité, plusieurs tentatives ont été faites pour y remédier. Il a été recommandé de modifier l'ordre de malaxage des composants du béton, et d'ajouter le composant alcalin sous la forme concentrée, ensuite après quelques minutes introduire la quantité complémentaire d'eau.

Le chapitre trois a mis le point sur le squelette granulaire du béton (granulats naturels et ceux du laitier cristallisé) en exposant leurs propriétés essentielles.

Il a été recommandé d'utiliser le laitier cristallisé comme granulats grossiers dans la réalisation des bétons.

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS : PARTIE B

Dans le quatrième chapitre nous définissons les principales caractéristiques chimiques et minéralogiques des divers matériaux que nous avons utilisés à savoir : (le laitier granulé, les ciments, le sable, pierres concassées, laitier cristallisé et les activants).

Les laitiers provenant de l'usine d'El Hadjar (wilaya de Annaba), deux types de ciments sont utilisés, l'un est un CPA fabriqué à la cimenterie de Aïn touta (wilaya de Batna) l'autre est un CPJ fabriqué à la cimenterie de Hamam Dalâa (wilaya de M'sila).

Le sable utilisé est un sable très fin, de la région de M'sila, ainsi que les pierres concassées. L'activant utilisé est Na_2CO_3 commercialisé par Granitex nouveaux produits de la filière de Boussaâda (M'sila).

Le chapitre quatre a pour objectif d'étudier les propriétés physiques et mécaniques du ciment au laitier (sans clinker) activé par la soude et le carbonate de soude (ajoutés à des densités croissantes). Une activation par le clinker à titre de comparaison a été étudiée.

L'étude de la pâte de ciment au laitier activé, ainsi que l'étude du mortier nous a permis de préciser un certain nombre de points :

1. A des teneurs inférieurs à 50 % de la masse de ciment, le laitier du haut fourneau finement broyé, peut être additionné au ciment portland sans qu'il affecte considérablement les propriétés mécaniques (notant que le délai de prise sera prolongé). Mais au-delà de cette limite, la chute de résistance est nettement remarquée d'où le recours à l'activation mixte.
2. L'activation mixte (clinker et soude) (où n'importe quelle autre solution basique) récompense l'effet négatif des teneurs élevées en laitier :
 - a. pour des teneurs en laitier allant à 80 % du poids du liant un composant alcalin d'une densité moyenne de (1.15 g/cm^3) peut donner des résistances acceptables à 28 jours (comparables à celles d'un liant de ciment portland composé). A long terme (après 1 an de durcissement) ces résistances s'améliorent significativement.
 - b. Pour une teneur extrême du laitier de 80 %, le début de prise est largement raccourci par l'utilisation de NaOH comme activant : de 2 h. 50 min pour un liant non activé à 20 min, de même la fin de prise.
 - c. La plasticité est un peu affectée pour ce type d'activation (l'activant est un raidisseur puissant).
3. Augmentant la teneur en laitier à 100 % l'activation alcaline du laitier est une méthode très efficace, il suffit d'augmenter seulement la densité du composé alcalin utilisé à 1.20 g/cm^3 à 1.25 g/cm^3 .
 - a. L'augmentation de la densité du composant alcalin influence les propriétés physiques du liant au laitier notamment son délai de prise de quelques heures à quelques minutes seulement, aussi elle influence ces propriétés mécaniques (résistance mécanique en compression, en flexion et en traction par flexion).
4. L'hydratation du ciment au laitier est très lente aux premiers âges, même après son activation alcaline, (il faut noter qu'il existe des composants alcalins assez puissants tel que le verre soluble dont l'utilisation favorise l'hydratation des composants du laitier, et le développement des résistances initiales).
 - a. A cet effet, on propose dans le cas de l'activation par la soude et ses sels de procéder à un durcissement par étuvage.

b. La combinaison de l'activation et l'étuvage est bénéfique, l'augmentation de la résistance est estimée à 3 fois de plus après un jour d'étuvage que celle d'un liant non étuvé. Après 28 jours de durcissement une légère différence est signalée entre le durcissement normal et celui par étuvage. Donc, dans le cas de la préfabrication des éléments structuraux, on propose d'utiliser un ciment de laitier sans clinker activé par la soude où à partir de ses sels, durcissant par étuvage.

5. Il reste à noter que :

Les ciments au laitier (activé par le clinker où partir des solutions basiques) présentent un retrait inférieur à celui noté dans un ciment portland et un gonflement nul.

Les ciments au laitier activé résistent mieux que le ciment portland aux milieux agressifs.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de l'influence des granulats du laitier cristallisé sur le comportement rhéologique et mécanique du béton ordinaire et celui du béton basique.

Nous avons tout d'abord substituer dans le béton le sable naturel par du laitier granulé, nous avons constaté que cette substitution entraînait d'une part une baisse de la plasticité du béton d'autre part des pertes en résistance (dans le cas la substitution totale).

Nous avons ensuite utilisé le laitier cristallisé au remplacement des pierres concassées, des améliorations de la résistance en compression sont notées.

Enfin nous avons remplacé le squelette granulaire (sable et pierres concassées) par les produits du laitier, nous avons remarqué que cette substitution est à éviter (résistance, et ouvrabilité très faibles).

Nous avons montré qu'on a un intérêt à utiliser le laitier cristallisé au remplacement des granulats naturels grossiers que de remplacer les granulats fins par du laitier granulé.

L'influence des granulats du laitier cristallisé sur les propriétés du béton ordinaire peut se résumer en :

1. La plasticité des bétons était diminuée par l'introduction du laitier cristallisé.
2. Les résistances à la traction étaient d'autant plus élevées que celles du béton contenant les granulats naturels.
3. Un module d'élasticité comparable à celui d'un béton ordinaire (BOGN), et un module de déformabilité assez élevé dans l'intervalle des contraintes croissantes (0.3 – 0.9) par rapport à celui du béton ordinaire (BOGN). Et des déformations élasto – instantanées longitudinales et transversales un peu inférieures à celles déterminées dans un béton ordinaire (BOGN).

4. Une porosité et une imperméabilité meilleures en comparaison avec celles du béton ordinaire, estimée à 8 %.
5. Un peu plus d'influence du milieu agressif est remarquée sur la résistance des bétons ordinaires à base du laitier cristallisé en comparaison avec ceux à granulats naturels.
6. Une résistance considérable vis-à-vis des hautes températures (600°C à 900°C) en comparaison avec le béton ordinaire.

Pour formuler le béton basique, nous avons proposé la méthode simplifiée dite méthode de Dreux Gorisse modifiée, en gardant toutes les données concernant la formulation du béton ordinaire (sauf que l'activité de ciment n'étant pas la même).

L'influence des granulats du laitier cristallisé sur le comportement rhéologique et mécanique du béton basique est évidente d'une manière assez comparable à leur effet sur le béton ordinaire, la basicité du laitier cristallisé se combine à l'activation alcaline du laitier granulé pour améliorer certains propriétés du béton basique notamment :

1. La résistance mécanique en compression à court terme en comparaison avec un béton basique à granulats naturels (BBGN) et la résistance mécanique en traction.
2. La résistance mécanique en compression, dans le cas de l'accélération du durcissement par étuvage après un jour et 28 jours de durcissement. (efficacité du traitement thermique par étuvage).
3. Le module d'élasticité assez élevé en comparaison avec les autres types de bétons (BOGN, BOGL et BBGN) il présente une augmentation de 10% par rapport au béton basique à granulats naturels et de 6.30% par rapport du béton ordinaire, le module de déformabilité présente des valeurs très élevés en comparaison avec les autres types de béton. Les déformations élasto – instantanées (longitudinales et transversales) restent du même ordre.
4. La porosité est nettement améliorée après un an de durcissement.
5. Une surface qui reste intacte, et un comportement ductile est remarqué face aux hautes températures en comparaison avec les autres types de bétons (BOGN, BOGL et BBGN).
6. Une structure qui diffère des autres types de béton caractérisée par la précipitation d'une silice brillante sur le granulat du laitier cristallisé.
7. Le laitier cristallisé joue un rôle actif dans le durcissement des bétons basique, et améliore ses propriétés élastiques, et sa durabilité.
8. Les opérations de vibration, compactage du béton basique sont celles du béton ordinaire, sauf la nécessité de maintenir l'humidité pour éviter la dessiccation.

9. Le laitier cristallisé de l'usine d'El Hadjar présente donc des caractéristiques nécessaires pour être un excellent granulats à mortier et béton (ordinaire et basique).
10. Le béton basique à base de granulats du laitier est recommandé :
 - Dans le cas de la préfabrication des éléments structuraux en procédant à un durcissement par étuvage.
 - Dans les éléments d'ouvrages exposés aux fortes températures.
11. Vu ses propriétés élastiques très importantes, il est recommandé aussi dans la réalisation des ouvrages d'art (les ponts).
12. le béton basique à base des granulats naturels est recommandé dans la réalisation des fondations et des ouvrages souterrains.