



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique
Université MHAMED BOUGARA BOUMERDES
Faculté des sciences de l'ingénieur



Mémoires fin d'études

En vue de l'obtention de diplôme de MASTER

Département: Génie Des Procédés

Spécialité: Matériaux pour le Génie Civil

Filière : Génie Civil

Thème

*Influence de l'activation de laitier sur
le comportement physico-mécanique
des mortiers*

Réalisé par :
BOUAMER Mustapha
GOUMETTRE Nour El Houda

promotrice :
M^{me} : RABEHI. B

Remerciements

Nous rendons grâce à Allah le tout puissant de nous avoir donné le savoir et la volonté surtout la patience pour réaliser ce modeste travail

Nous remercie nos parents qui trouveront dans ce document le produit des efforts qu'en tous temps ils nous aidé accomplir

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice M^{me} REBAHI, qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi théorique et pratique de notre projet de fin d'étude

Nous tenons à remercier sincèrement M^r DRISS et Laboratoire national de l'habitat et de construction L, N, H, C pour nous avoir acceptés d'effectuer le stage d'initiation au sein de cette société, qui n'a épargné aucun effort pour que notre stage se déroule dans de meilleures conditions, et la confiance qu'il nous a témoigné. Et bien sur son oublier toute l'équipe de laboratoire de recherche pour leurs aides.

Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance au chef de département et tous les enseignants pour leurs conseils et leurs orientations.

Enfin, nous tenons à remercier toutes personnes qui ont donné leurs aides de près ou de loin, directement ou indirectement pour la réussite de ce travail

DEDICACE

Je ne peux commencer sans évoquer le nom d'ALLAH le tout puissant qui ma donné la patience, la santé, le courage et la force tout le long de ma vie

Je dédie ce modeste travail :

*À la mémoire de **mon cher père** mon exemple dans ma vie, il est parti laisser derrière lui une profonde tristesse et un grand vide que Dieu le tout puissant l'accueillant en son vaste paradis.*

*À Celle qui n'a reculé jamais devant aucun obstacle pour assurer l'épanouissement et l'édification de ma personne,...**ma très chère mère** la bougie qui m'éclaire mon chemin, qui je ne pourrais rendre le mérite comme il se doit, qu'ALLAH la garde et la bénisse.*

À mes chers frères et sœurs que j'aime beaucoup, je pris ALLAH de le garder et de l'accorder leur santé et bonheur.

*À toutes **ma famille** que le dieu vous protègent.*

A tous les enseignants de l'F.S.I.

A mes amis Mustapha, Hocine, Walid, Hamza, Ahmed, Amine, Menouer, Lynda, Ilhem. Sarah, Ouidad, Ahlem, Rayhana.

A tous mes collègues et amis sans exception.

À tous ceux qui ont contribués à la réalisation de ce travail.

Mustapha



DEDICACE

*Je ne peux commencer sans évoquer le nom d'ALLAH
le tout puissant qui ma donnée la patience, la santé, le
courage et la force tout le long de ma vie*

Je dédie ce modeste travail :

*A mon cher père mon exemple dans la vie qui ne
recule jamais devant aucun obstacle*

*Ma très chère mère la bougie qui m'éclaire mon chemin,
qui je ne pourrais rendre le mérite comme il se doit,
qu'ALLAH la garde et la bénisse.*

*À ma chère sœur Rayane et mon frère Amine je pris
ALLAH de vous garder et de vous accorder la santé et
le bonheur.*

À Fares Massinissa Sidhoum

À ma tante Linda

À toutes ma famille que le dieu vous protègent.

À tous les enseignants de l'F.S.I.

À mes amis Lynda, Hadjer, Nadia, Ouidad, Ahlem, Zina

À tous mes collègues et amis sans exception.

*À tous ceux qui ont contribués à la réalisation de ce
travail.*

Nour El Houda



Présentation de laboratoire

Laboratoire national de l'habitat et de construction L, N, H, C crée par décret n°78 204 du 16 septembre 1978 le laboratoire national de construction à caractère économique sous tutelle du ministère de l'habitat et de l'urbanisme.

Ses attributions

Il a pour mission d'effectuer des études analyses se recherche se rapport

- Aux soles
- A la conception des fondations
- Aux matériaux utilisés dans la construction

Dans le cadre de plan national de développement de l'habit et de construction

Son champ d'intervention

Le laboratoire national de l'habitat et de la construction exerce se activités sur l'ensemble du territoire nationale sa clientèle est principalement composée :

- Des administrations de l'état
- Des collectivités
- D'organismes publics
- D'organismes privés

Ses objectifs

- Assurer de manière autonome la maîtrise technique et scientifique de toute étude à caractère géotechnique.
- Promouvoir une utilisation rationnelle des données relatives au milieu physique pour la mise en place des infrastructures.
- Conseiller efficacement la clientèle par la recherche de solutions techniques relatives à la conception des fondations et utilisations optimale des matériaux de construction.

Moyens techniques de reconnaissance et de contrôle

- Groupe de sondage (t'arrière, battage, rotation, carottage)
- Essais géotechnique in situ (pénétrromètre dynamique, statique, pressionnel).
- Laboratoire mobile pour contrôle de chantier.
- Essais au laboratoire (odomètre, tri axial, cisaillement, identification),

En sembles spécialisés

- Laboratoire d'essais géotechniques.
- Laboratoire d'essais des matériaux de construction.
- Equipment spécialisé pour essais et travaux sur le terrain

Les activités du laboratoire de l'habitat et de la construction

Les problèmes rencontrés dans la construction des bâtiments et des ouvrages de GENIE CIVIL deviennent de plus en plus complexes. Les raisons de cette évolution sont multiples :

- Adaptation au site et à l'environnement.
- Emploi de matériaux nouveaux.

Une part très importante de l'activité de L, N, H, C est consacrée à l'étude des problèmes spécifiques qui se posent au stade des projets ou à celui des travaux.

Grâce à une organisation judicieuse de ses différents équipements et des moyens importants dont il dispose, le L, N, H, C peut intervenir rapidement dans les domaines suivants :

- Reconnaissances, essais et l'étude des sols de fondation.
- Analyses chimiques ; essais de conformité des éléments des matériaux de la structure.

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

Il est courant d'utiliser dans l'industrie cimentière les abréviations suivantes :

Pour les minéraux du ciment C3S pour $3.CaO.SiO_2$ (Silicate tricalcique).

C2S pour $2.CaO. SiO_2$ (Silicate bi calcique).

C3A pour $3.CaO. Al_2O_3$ (Aluminate tricalcique).

C4AF pour $4.CaO. Al_2O_3.Fe_2O_3$ (Ferro aluminate tétra calcique)

Nous avons également utilisés d'autres abréviations

Par exemple :

SSB_1 pour surface spécifique de Blaine = $3643 \text{ cm}^2/\text{g}$.

SSB_2 pour surface spécifique de Blaine = $4322 \text{ cm}^2/\text{g}$.

SSB_3 pour surface spécifique de Blaine = $5413 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Sommaire

1. Introduction générale.....	1
-------------------------------	---

Chapitre I

I.1.Introduction.....	4
I.2.formation et traitement du laitier	5
I.2.1.Formation du laitier	5
I.2.2.Traitement du laitier	5
I.2.2.1. Laitier granulé	5
I.2.2.2 Laitier cristallisé	6
I.2.2.3 Laitier bouleté	6
I.3 laitier granulé	7
I.3.1.Caractéristiques	7
I.3.1.1 Composition chimique	7
I.3.1.2.Composition minéralogique potentielle du laitier	8
I.3.1.3.Granulométrie	9
I.3.1.4.Masses volumiques	9
I.3.1.5.Test à la soude	9
I.4 Hydratation et activation du laitier granulé	9
I.4.1.Activation chimique	11
I.4.1.1.Activation alcaline [sodique ou calcique) :	12
I.4.1.2.Activation sulfatique	12
I.4.1.3.Activation sulfo-calcique	13
I.4.1.4. Autres modes d'activation chimique	13
I.4.2. Activation mécanique	13
I.4.3 Activation thermique	13
2.5 Utilisation du laitier granulé.....	14
2.5.1. Dans les ciments	14
2.5.2 Dans le béton.....	14
2.5.3 Dans les briques de laitier	15
2.5.4 Dans la construction d'assises de chaussées	15
2.5.5 Dans divers autres domaines	16

Chapitre II

II.1 Introduction :	17
II.2 Objectif :	17
II.3 Le but du travail :	17
II.4 Matériaux utilisés	17
II.5 Elaboration de matériaux utilisés:	18
II.5.1 Le laitier granulé:	18
II.5.1.1 Calcul d'indice d'activité hydraulique.....	18
II.5.1.2 Composition chimique du laitier :	19
II.5.1.3 La composition minéralogique:	20
II.5.1.4 Masses volumiques.....	20
II.5.1.5 Granulométrie	20
II.5.1.6 L'analyse granulométrique par laser	21
II.5.2 Ciment :	23
II.5.2.1 Caractéristiques chimiques du ciment:	23
II.5.2.2 Caractéristiques minéralogiques :	23
II.5.2.3 Caractéristiques techniques :	24
II.5.2.4 Caractéristique physique :	24
II.5.2.5 L'analyse granulométrique	24
II.5.3 Sable	25

Chapitre III

III.1 Introduction	29
III.2 Objectif.....	29
III.3 Définition d'un mortier	30
III.4 Matériel utilise	30
III.5 Préparation et matériaux	30
III.6 Activation de laitier	32
III.6.1 Activation mécanique :	32
III.6.2 Activation thermique	33
III.6.3 Activation chimique	34

Chapitre IV

IV.1 Les résultats	36
IV.1.1 consistances et délai de prise.....	36
IV.1.1.2 activation mécanique.....	36
IV.1.1.3 Activation chimique.....	40
IV.1.2 Essais mécaniques.....	41
IV.1.2.1 Activation mécanique	41
IV.1.2.1.1 Résistances à la flexion	41
IV.1.2.1.2 Les Résistances à la compression	44
IV.1.2.2 l'activation thermique	48
IV.1.2.2.1 Les Résistances à la flexion.....	48
IV.1.2.2.2 Les résistances à la compression	48
IV.1.2.3 Activation chimique	49
IV.1.2.3.1 Résistances à la flexion	49
IV.1.2.3.2 Résistances à la compression	50
IV.2 Interprétations	50
IV.2.1 Activation mécanique	50
IV.2.2 activation thermique	51
IV.2.3 Activation chimique	51
IV.2.4 Résistance mécanique a la flexion	52
IV.2.5 Influence de la quantité du laitier sur les mortiers	52
IV.2.5.1 Influence de la quantité du laitier et sa finesse sur la consistance et la prise	52
IV.2.5.2 L'influence de la quantité du laitier et sa finesse sur les résistances mécaniques	52
IV.2.6 Influence du mode d'activation sur les propriétés physiques et mécaniques	53

Liste des figures :

Chapitre I

Figure 1 : Coupes schématiques du haut fourneau.....	5
Figure 2 : Laitier cristallisé et laitier granulé [vitrifié] de haut fourneau.....	6
Figure 3 : Schéma d'élaboration du laitier bouleté.....	7
Figure 4 : Prise du laitier vitrifié.....	10

Chapitre II

Figure 5 : Laitier granulé.....	18
Figure 6 : laitier granulé broyer.....	21
Figure 7 : diagramme d'analyse granulométrie Laser de Laitier a SSB1.....	21
Figure 8 : diagramme d'analyse granulométrie Laser de Laitier a SSB2.....	22
Figure 9 : diagramme d'analyse granulométrie Laser de Laitier a SSB3.....	22
Figure 10 : diagramme d'analyse granulométrie Laser (superposition des 3 Laitiers).....	22
Figure 11 : ciment CRS. CEM 1/42.5.....	23
Figure 12 : diagramme d'analyse granulométrie Laser du ciment.....	24
Figure 13 : sable de OUED SOUF.....	25
Figure 14 : analyse granulométrie de sable de OUED SOUF.....	27
Figure 15 : essai d'équivalent de sable.....	28

Chapitre III

Figure 16 : (a): balance, (b): Malaxeur de mortier. (c): moule prismatique (4x4x16).....	30
Figure 17 : les différentes étapes de préparation d'un mortier.....	31
Figure 18 : éprouvettes du mortier.....	32
Figure 19 : éprouvettes de mortier (Activation thermique)	33
Figure 20 : étuvage des éprouvettes.....	33
Figure 21 : (a): la soude (Naoh). (b): carbonate de sodium (Na ₂ CO ₃).....	34
Figure 22 : éprouvettes de mortier (Activation chimique).....	35

Chapitre IV

Figure 23: essai de délai de prise appareil de VICAT.....	36
Figure 24: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier pour SSB ₁	37
Figure 25: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour SSB ₁	37
Figure 26: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier pour SSB ₂	38
Figure 27: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour SSB ₂	38
Figure 28: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier pour SSB ₃	39
Figure 29: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour SSB ₃	39
Figure 30: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier des les 3 SSB.....	39
Figure 31: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour les 3SSB.....	40
Figure 32: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier.....	40
Figure 33: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier.....	41
Figure 34: essai de flexion.....	41
Figure 35: histogramme représentatif de R _f en fonction de % de laitier pour SSB ₁	42
Figure 36: histogramme représentatif de R _f en fonction de % de laitier pour SSB ₂	42
Figure 37: histogramme représentatif de R _f en fonction de % de laitier pour SSB ₃	43
Figure 38: histogramme représentatif de R _f en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.....	43
Figure 39: graphe représentatif de R _f en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.....	44
Figure 40 : essai de compression.....	44
Figure 41: histogramme représentatif de R _c en fonction de % de laitier pour SSB ₁	45
Figure 42: histogramme représentatif de R _f en fonction de % de laitier pour SSB ₂	46
Figure 43: histogramme représentatif de R _c en fonction de % de laitier pour SSB ₃	46
Figure 44: histogramme représentatif de R _c en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.....	47
Figure 45: graphe représentatif de R _c en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.....	47
Figure 46: graphe représentatif de R _f en fonction de l'âge pour les différents %.....	48
Figure 47: graphe représentatif de R _c en fonction de l'âge pour les différents %.....	49

Figure 48: graphe représentatif de R_f en fonction de l'âge pour les différents %.(activation chimique).....49

Figure 49: graphe représentatif de R_c en fonction de l'âge pour les différents %.(activation chimique).....50

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1 : Composition chimique du laitier Algérien en %.....	8
---	---

Chapitre II :

Tableau 2 : Indice d'Activité Hydraulique du Laitier Granulé.....	19
--	----

Tableau 3 : Composition chimique du laitier granulé d'EL HADJAR.....	20
---	----

Tableau 4 : Caractéristique chimique du ciment.....	23
--	----

Tableau 5 : Composition minéralogique du ciment.....	23
---	----

Tableau 6 : Caractéristiques techniques du ciment.....	24
---	----

Tableau 7 : Caractéristiques physiques.....	24
--	----

Tableau 8 : analyse granulométrie de sable d'OUED SOUF.....	26
--	----

Chapitre III

Tableau 9 : opération de malaxage de mortier.....	31
--	----

Tableau 10 : quantités des constituants du mortier a base de Laitier. (Activation mécanique).....	32
--	----

Tableau 11 : consistance et délai de prise pour Laitier de $SSB_1=3643 \text{ cm}^2/\text{g}$	33
--	----

Tableau 12 : consistance et délai de prise pour Laitier de $SSB_2=4322 \text{ cm}^2/\text{g}$	34
--	----

Tableau 13 : consistance et délai de prise pour Laitier de $SSB_3=5413 \text{ cm}^2/\text{g}$	35
--	----

Tableau 14 : quantités des constituants du mortier a base de Laitier. (Activation thermique).....	37
--	----

Tableau 15 : quantités des constituants du mortier a base de Laitier. (Activation chimique).....	38
---	----

Tableau 16 : consistance et délai de prise. (Activation chimique).....	38
---	----

Chapitre IV

Tableau 17 : Résistances à la flexion (laitier $SSB_1=3643\text{g}/\text{cm}^2$).....	41
---	----

Tableau 18 : Résistances à la flexion (laitier= $SSB_2=4322\text{g}/\text{cm}^2$).....	42
--	----

Tableau 19 : Résistances à la flexion (Laitier $SSB_3=5431 \text{ cm}^2/\text{g}$).....	43
---	----

Tableau 20 : résistances a la compression (Laitier $SSB_1=3643 \text{ cm}^2/\text{g}$).....	45
---	----

Tableau 21 : résistances à la compression. (Laitier $SSB_2=4322\text{cm}^2/\text{g}$).....	45
--	----

Tableau 22 : résistances à la compression. (Laitier $SSB_3=5413 \text{ cm}^2/\text{g}$).....	46
--	----

Tableau 23 : Résistances à la flexion. (Activation thermique).....	48
---	----

Tableau 24 : Résistances à la flexion. (Activation chimique).....	49
--	----

Tableau 25 : résistances à la compression. (Activation chimique).....	50
--	----

1. Introduction générale

Toute activité de production ou 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.

La demande sans cesse croissante en matière de matériaux de construction, Principalement le ciment, pour réaliser de différents projets aussi bien en Algérie qu'à travers Le monde, nécessitent des coûts importants qui ne sont pas toujours à la portée de certains pays En développement. En effet la fabrication du ciment portland nécessite des quantités Importantes de clinker dont la fabrication exige beaucoup de matières premières et de Combustible. Or certains matières premières dites de substitution peuvent remplacer Avantageusement le clinker pour diminuer substantiellement l'énergie de fabrication. Ces Matériaux de substitution sont composés chimiquement et minéralogiquement de la même Manière que le ciment portland : c'est le cas par exemple des cendres volantes, des fumées de Silice ou encore des laitiers de hauts fourneaux. Ces derniers constituent en effet des déchets Sidérurgiques qui occupent des grandes surfaces et polluent l'environnement

Le laitier granulé de haut fourneau s'obtient par refroidissement brusque par un courant d'eau (jet d'eau) ce qui permet de freiner le processus de cristallisation et d'obtenir ainsi, un matériau vitrifié et granulé(3). Ce mode de refroidissement transforme le laitier liquide en un granulat fin (procédé ou mode de granulation du laitier) à grains déchiquetés de dimensions inférieures à 5 mm, qui sera utilisé comme ajout au liant ou comme liant hydraulique. La composition chimique du laitier de haut fourneau (laitier granulé) est proche de celle de ciment portland artificiel (CEM I), ce qui permet d'envisager son emploi en qualité de liant comme ajout cimentaire (clinker + laitier). La Production des déchets solides industriels de la fonte dans les hauts fourneaux est accompagnée 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.

L'emploi des laitiers granulés a un double intérêt : Il remplace, après avoir été broyé à une finesse proche de celles des ciments, une quantité de clinker avec un moindre coût du produit final et il permet de libérer les grandes surfaces qu'il occupe et évitant ainsi la pollution de l'environnement. Les laitiers de haut-fourneau ont longtemps constitué un produit dont on cherchait à se débarrasser, et que l'on évacuait sur des lieux de stockage qui sont devenus des « crassiers historiques », de volumes très importants. Grâce aux progrès des techniques, ils sont passés de ce statut négatif, à celui d'un coproduit de la sidérurgie, dont l'éventail des propriétés est aujourd'hui apprécié et recherché.

L'intérêt est donc triple :

1. Emploi des matériaux locaux,
2. Diminution du coût du ciment composé
3. protection de l'environnement.

Avec un tel ciment économique, on peut réaliser des mortiers de moindre coût. Ces matériaux trouvent des usages très variés et très denses dans le domaine de la construction, et une économie dans la fabrication du ciment.

L'objectif de notre recherche est :

- Déterminer le taux de substitution de laitier qui conduit aux meilleures propriétés physiques et mécaniques.
- Savoir quel mode d'activation (mécanique, thermique, chimique) est le plus performant.

Pour répondre à ces questions, on propose en première phase trois modes d'activation de laitier granulé.

1. Une activation mécanique avec trois broyages différents de laitier afin d'avoir trois SSB différents
2. Une activation thermique on a procédé à un traitement par étuvage.
3. Activation chimique par l'ajout de la soude et le carbonate de sodium.

Des éprouvettes de mortier 4x4x16cm ont été confectionnées et à chaque fois on varie le pourcentage de laitier incorporé (20%, 40%, 60%, 80) dans le mortier et sa méthode d'activation (activation mécanique, chimique et thermique).

Le présent travail est reparti en 4 chapitres :

- Chapitre 1 le laitier de haut fourneau
- Chapitre 2 méthodologie de travail et caractérisation de matériaux
- Chapitre 3 formulations des mortiers de laitier
- Chapitre 4 résultats et interprétations

Ce travail est clôturé par une conclusion générale et recommandation.

Chapitre I :

Le Laitier De haut fourneau

I.1. Introduction

Le laitier est un sous produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, et donc composé essentiellement de chaux [CaO), magnésie [MgO), silice [SiO₂) et alumine [Al₂O₃). L'élaboration du laitier peut conduire, selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques [1].

- le laitier granulé [vitrifié)

Obtenu par refroidissement rapide par trempé.

- le laitier cristallisé

Obtenu par refroidissement lent.

Ces deux formes minéralogiques sont fondamentalement différentes du point de vue cristallographique et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier granulé présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente.

Au contraire, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste.

I.2.formation et traitement du laitier

I.2.1.Formation du laitier

Dans le haut fourneau [figure 1], en plus du minerai de fer et du coke, on introduit un fondant, généralement à base de chaux, pour abaisser le point de fusion de la gangue et permettre ainsi au minerai de s'extraire à une température de 1400 à 1500 [°C]. Les oxydes de la charge non transformés en métal constituent le laitier. Le laitier est évacué du haut fourneau à l'état liquide, à la température de fusion de la gangue, surnageant la fonte par différence de densité [figure 1].

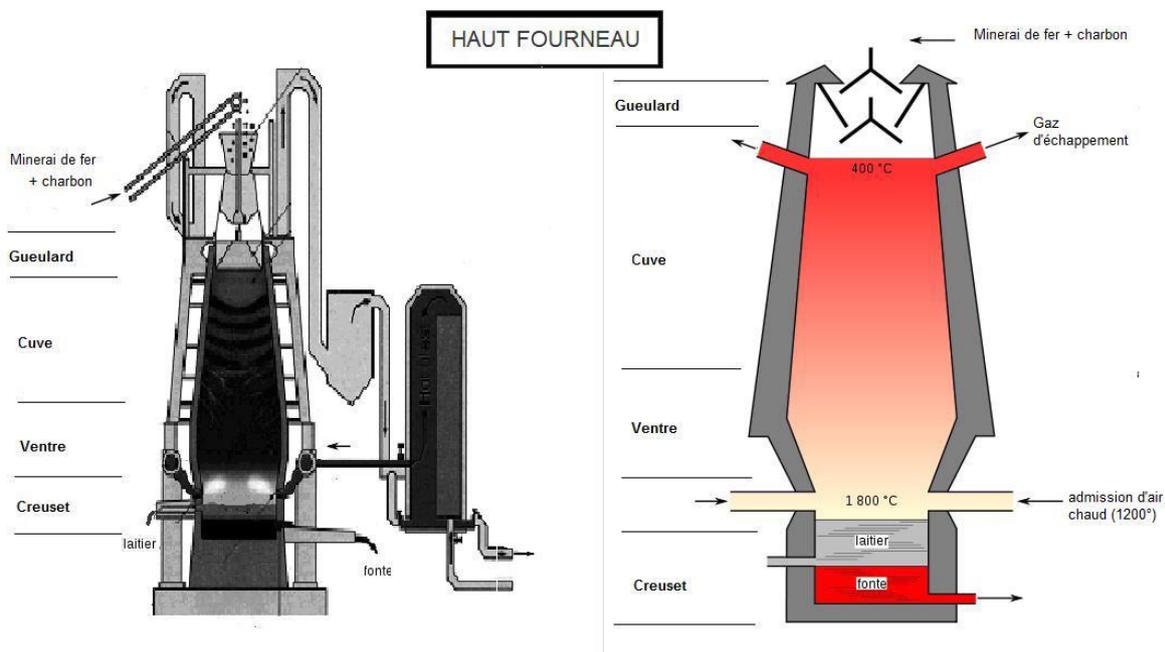


Figure 1 – Coupes schématiques du haut fourneau

I.2.2.Traitement du laitier

Selon le produit et surtout la structure qu'on désire obtenir à partir du laitier fondu, on utilise le procédé de refroidissement correspondant.

I.2.2.1. Laitier granulé

La granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation du laitier pour faciliter sa manutention. Elle se faisait très simplement en déversant le jet de laitier liquide dans un bassin rempli d'eau [2]. On s'avisait ultérieurement des propriétés hydrauliques latentes du laitier granulé [figure 2] ainsi obtenu [1].

1.2.2.2 Laitier cristallisé

Un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier. On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires. Le matériau constitue un granulats pour la construction routière et pour la confection des bétons [1].

Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé. Après solidification de la surface, on active le refroidissement avec un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier. Le laitier refroidi est repris ensuite à la pelle mécanique de la même manière qu'en carrière. Le laitier cristallisé résultant d'un refroidissement lent est une roche artificielle qui peut être utilisée en l'état : c'est le laitier tout-venant ou concassé et calibré.



Figure 2 – Laitier cristallisé et laitier granulé [vitrifié] de haut fourneau

1.2.2.3 Laitier bouleté

La fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air. Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses. C'est pendant cette trajectoire aérienne que la trempe a lieu. Le matériau s'égoutte ensuite naturellement.

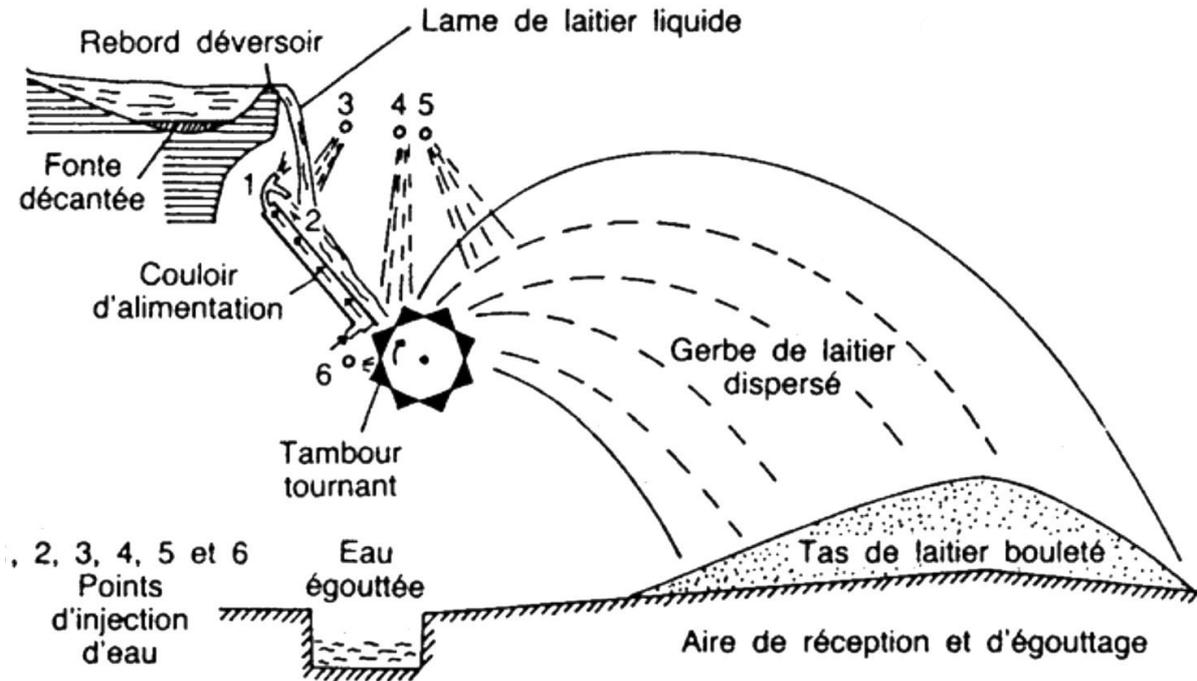


Figure 3 – Schéma d'élaboration du laitier bouleté

I.3 laitier granulé

I.3.1. Caractéristiques

I.3.1.1 Composition chimique

Le laitier de haut fourneau est avant tout un sous produit du processus d'élaboration de la fonte. Sa composition chimique est ajustée de façon à lui permettre :

- d'avoir une bonne fluidité à la température d'élaboration de la fonte.
- d'éliminer une bonne partie des éléments nuisibles à la marche du haut fourneau et à la qualité de la fonte.

La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la quantité des fondants, la nature du combustible et le procédé employé. Généralement les concentrations en oxydes varient pour la chaux [CaO] de 30 à 50 [%], la silice [SiO₂] de 28 à 38 [%], l'alumine [Al₂O] de 8 à 24 [%], le soufre [S] de 1 à 2.5 [%]. Le **tableau 1** récapitule les compositions chimiques du laitier dans quelques pays producteurs de fonte [1] [3] et [4].

La composition chimique est un paramètre déterminant de la réactivité des laitiers, qui induit d'ailleurs beaucoup d'autres paramètres. Ainsi le calcium, l'aluminium et le magnésium sont des éléments qui favorisent la vitrification des laitiers [5], et on sait que l'état vitreux est le plus actif chimiquement. D'autres travaux [6] et [7] ont montrés l'influence non négligeable des éléments mineurs tels que P_2O_5 , MnO , Na_2O et K_2O sur l'évaluation de l'activité hydraulique des laitiers.

Tableau 1 - Composition chimique du laitier Algérien en %

Oxydes	%
SiO₂	40.1
CaO	40.2
Al₂O₃	6.0
MgO	4.7
SO₃, S*	0.15*
FeO	2.0
MnO	2.64
Cr₂O₃	-
TiO₂	1.16
Na₂O	-
K₂O	0.70
Total	97.6

I.3.1.2. Composition minéralogique potentielle du laitier

La composition minéralogique potentielle des laitiers a été calculée [8] à partir des principaux oxydes [CaO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2] par analyse chimique.

Les phases cristallisées susceptibles d'apparaître au cours de la dévitrification sont la méililite qui est une solution solide de la gehlinité [C_2AS] et de l'akermanite [C_2MS_2], la pseudowollastonite [CS], la rankinite [C_3S_2], la merwinite [C_3MS_2], le silicate bicalcique [C_2S], le diopside [CMS_2], la montécéllite [CMS] et la forstérite [MS_2]. Les résultats des calculs chimiques conduisent à conclure que les laitiers de haut fourneau utilisés en cimenterie sont potentiellement constitués de [C_3S_2 , C_2AS et C_2MS_2] pour 95 % et de [CS ou C_3MS_2 ou C_2S] pour 5 % [8].

I.3.1.3. Granulométrie

Le laitier granulé se présente sous forme d'un gros sable de granulométrie 0 /5 et de module de finesse voisin de 3.

I.3.1.4. Masses volumiques

La masse volumique apparente du laitier granulé peut varier de 900 à 1000 kg / m³ et sa masse volumique absolue de 2800 à 3000 kg / m³.

I.3.1.5. Test à la soude

Cette méthode, non normalisée, consiste à préparer des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm en mortier normal, l'eau étant remplacée par une solution constituée de 200g de soude concentrée et la partie liante étant composée de laitier granulé moulu.

Le rapport solution / laitier étant égal à 0,5. Les éprouvettes sont démoulées et testées en compression après 6 et 24 heures de durcissement. Les résistances mécaniques doivent être comprises respectivement entre 7 à 8 MPa après 6 h de durcissement et 12 à 15 MPa après 24 h [9].

I.4 Hydratation et activation du laitier granulé

Contrairement au ciment, le laitier granulé ne développe pas de propriétés liantes dans l'eau à température ambiante, car la dissolution du laitier, même si elle est possible du point de vue thermodynamique, a une cinétique tellement lente que le système peut être considéré comme figé [10]. De ce fait peu d'études ont été consacrées à l'hydratation du laitier seul dans l'eau. On peut citer les travaux de DRON et BRIVOT [11], KONDO [12] et REGOURD et al [13].

En étudiant un composé amorphe de la composition de la géhlénite [C₂AS) en suspension liquide [Liquide/ Solide = 20), KONDO [12] montre que les concentrations en SiO₂ et Al₂O₃ sont nulles. Seul le calcium est détecté en solution le premier jour. Il en déduit que les grains de laitier sont recouverts d'un film de 0.2 μm d'épaisseur de composition proche de celle de ASH6. L'analyse de l'évolution de la composition à la surface par spectroscopie de photo électrons X (XPS) [13] d'un laitier immergé dans l'eau au cours des deux premières heures montre que dès les premières minutes qui suivent son immersion, le rapport Ca / Si atomique de la surface passe de 1.2 à 0.8 et se stabilise à 0.8, ce qui signifie que la surface contient encore du calcium. En outre, REGOURD [13] et

RICHARDSON [14] indiquent que la phase CSH dans les laitiers activés possède un rapport Ca / Si inférieur à celui observé dans les ciments portland.

De ces travaux on déduit que pratiquement seule la concentration en hydroxyde de calcium en solution augmente, ce qui diminue le rapport Ca / Si à la surface du laitier. Cependant, le pH de la solution reste inférieur à 9, ce qui ne permet pas la dissolution des silicates et aluminates du laitier. Dans ces conditions, on peut penser que les concentrations atteintes en solution correspondent à la solubilité du verre, ou au moins restent telles que la solution n'atteint pas la sursaturation nécessaire à la nucléation des hydrates [15].

L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution d'où résulte une précipitation des hydrates formés, conduisant à des résistances mécaniques se développant progressivement dans le temps au fur et à mesure que se poursuit le phénomène comme le montre la **figure n°6** [1].

Le laitier n'est soluble que dans une solution alcaline et a donc besoin pour faire prise d'un agent appelé ACTIVANT [10].

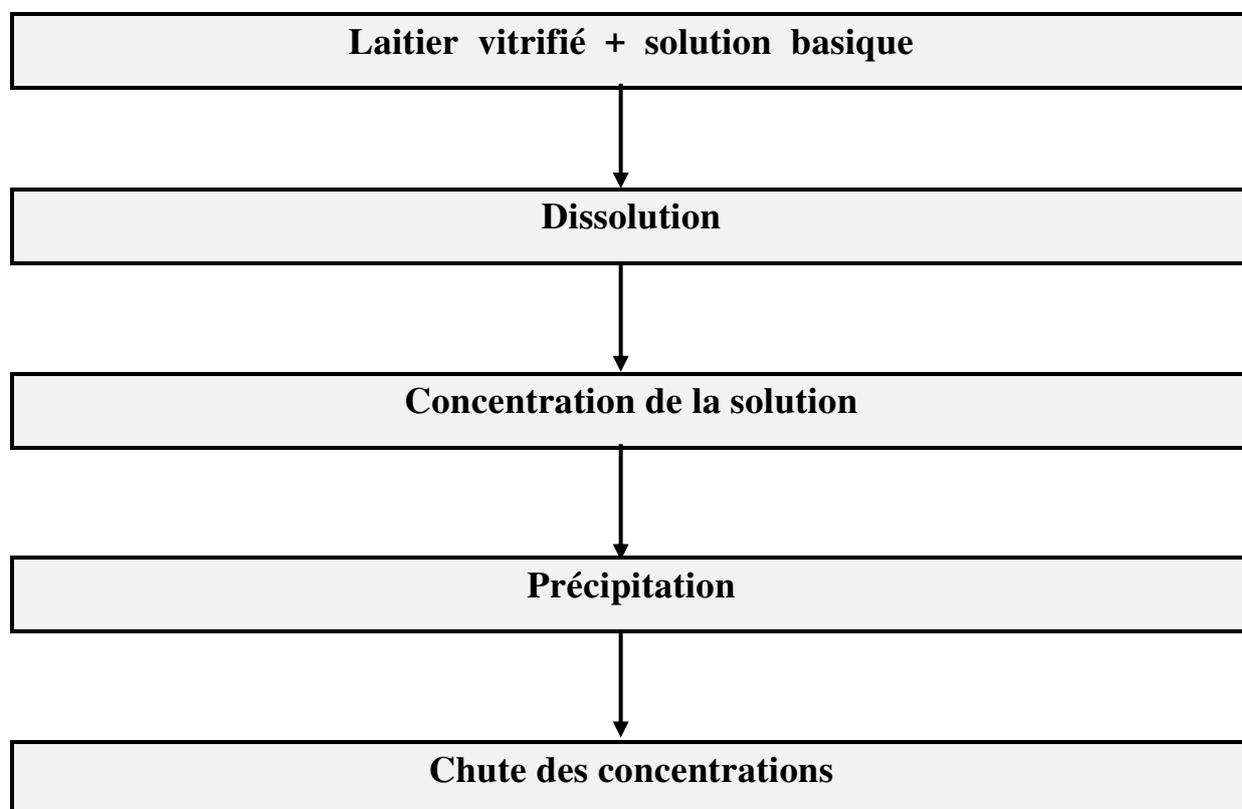


Figure 4 : Prise du laitier vitrifié

La nécessité d'un agent basique ou d'un activant pour déclencher la prise résulte selon DRON [16] du fait que l'hydratation est provoquée par la succession de deux phénomènes ou la chaux intervient:

- Le premier est le passage en solution dans l'eau interstitielle des éléments aluminium, silicium et calcium. Cette solubilisation intervient par les sites aluminium et l'attaque a lieu par les ions OH⁻ de la solution. Elle devient notable à partir de pH = 12 [pH >11.5).
- Le second est la cristallisation à partir de la phase aqueuse, de composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que ne l'est le laitier. Un apport en calcium est donc nécessaire [1].

L'activant à un double rôle, il doit:

Répondre à une condition de pH: apport de chaux, suffisant pour saturer la solution aqueuse et atteindre le pH correspondant, de 12 à 13 en général [17].

Contribuer à la formation d'hydrates: l'activant ne se limite pas à un seul rôle catalytique d'alcalinisation de l'eau interstitielle mais participe aux réactions de formation des hydrates par lesquelles il est consommé.

Les procédés d'activation sont pluriels : chimique, mécanique et thermique. Dans tous les cas le produit d'hydratation est le même : c'est le CSH

I.4.1.Activation chimique

L'activation chimique du laitier, c'est le maintien du laitier dans un milieu à pH suffisamment élevé par addition de substances permettant de répondre à cette condition en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la solution interstitielle en chaux pour atteindre un pH de 12 à 13 [3].

Les trois principaux modes d'activation sont selon [1]

- a. Activation alcaline [sodique ou calcique),
- b. Activation sulfatique.
- c. Activation sulfato-calcique.

I.4.1.1.Activation alcaline [sodique ou calcique) :

Lors d'une activation alcaline, il s'agit de créer une solution fortement basique [pH >12.6), afin de permettre le passage en solution des composants de laitier qui vont pouvoir par la suite former des produits d'hydratation [16].

D'après CHAPELLE [17], dans le cas d'une activation par la soude, l'activant n'est en fait qu'un catalyseur qui ne réagit pas avec les constituants du laitier. Il se forme dans ce cas trois hydrates : les silicates de calcium hydratés [CSH), les aluminates de calcium hydratés [C4AH13) et la géhlénite hydratée [C2ASH8) [1 et 18].

Dans le cas d'une activation du laitier par la chaux, il existe d'après DRON et CHAPELLE [16 et 17] une phase initiale où le pH de la solution est alors celui d'une solution saturée en chaux [environ 12.6]. C'est largement suffisant pour solubiliser la silice et l'alumine du laitier, favorisant ainsi la formation des CSH qui précipitent en premier. Au fur et à mesure que la silice est consommée, la concentration de l'alumine dans la solution augmente jusqu'à sa cristallisation. On retrouve finalement comme hydrates les silicates de calcium hydratés [CSH), les aluminates de calcium hydratés [C4AH13] et la portlandite.

I.4.1.2.Activation sulfatique

L'activation sulfatique s'écarte davantage de l'action strictement catalytique. Il s'agit d'un véritable réactif puisque le sulfate de calcium se combine avec les éléments du laitier solubilisés. Dans ce cas, les produits d'hydratation sont essentiellement les silicates de calcium hydratés [CSH), l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$, et l'ettringite $[3.CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32.H_2O)$ [19] et [20].

Pour que cette activation puisse avoir lieu, il est nécessaire de se retrouver à un pH de 11 – 11.5. Il y a alors formation d'ettringite primaire, et il faut éviter de se retrouver à un pH trop élevé sinon la réaction de cristallisation ne peut plus se produire suivant un processus normal : la cristallisation est trop rapide et il y a risque de formation d'ettringite secondaire. REGOURD [9] précise que cette activation est lente et qu'elle peut être obtenue avec les sulfates suivants : anhydrite, hemihydrate, gypse et phosphogypse.

I.4.1.3. Activation sulfo-calcique

Dans le cas d'une activation sulfo-calcique, la formation d'aluminate de calcium hydraté $[C_4AH_{13}]$ ou d'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ est remplacée par celle d'ettringite $[3.CaO.Al_2O_3.CaSO_{432}.H_2O]$ [1 et 9].

I.4.1.4. Autres modes d'activation chimique

L'activation du laitier peut être obtenue également par le silicate de soude $[SiO_2Na_2O]$, le carbonate de sodium, le sulfate de sodium Na_2SO_4 , et le chlorure de calcium $CaCl_2$ [21 et 22].

L'activation du laitier par le $CaCl_2$ à 2 % peut parfois donner de meilleurs résultats que 30 % de clinker [23].

Dans les ciments au laitier de type CPJ [normes algériennes] ou de type CEM II [normes européennes], l'activant principal est le clinker. Des recherches ont pu mettre en évidence les couplages chimiques entre le clinker et le laitier, qui se dissolvent simultanément mais à des vitesses différentes [24].

L'influence réciproque du laitier sur le clinker a été étudiée dans les ciments contenant 80 % de laitier. Le clinker active le laitier mais les résistances mécaniques à 1 jour sont davantage fonction de la qualité du laitier que de la nature du clinker. A 28 jours, la composition du clinker est prépondérante, et les meilleures performances sont obtenues avec les clinkers riches en C_3S et C_3A tétragone [5].

I.4.2. Activation mécanique

La finesse de broyage du laitier intervient dans son couplage avec le clinker [5] et joue un rôle très important dans l'évolution des résistances mécaniques, aussi bien à court terme qu'à long terme. Les ciments au laitier peuvent être activés mécano – chimiquement dans un broyeur à jet qui détruit le squelette du réseau silicaté et active les ions oxygènes [5].

I.4.3 Activation thermique

L'observation au MEB [microscope électronique à balayage) a mis en évidence des différences significatives des structures hydratées des ciments peu ou pas réactifs à 20 °C, lorsque ces mêmes ciments subissent un traitement thermique à 80 °C [25].

Il est ainsi possible de comprendre qu'un laitier peu réactif à la température ordinaire donne de bonnes résistances lorsqu'il est traité par la chaleur, car les hydrates formés ont un

aspect normal alors que ce même traitement à la température appliqué à des laitiers très actifs à la température ordinaire engendre une structure d'hydrates peu favorable à la cohésion du mortier avec des amas de mono - sulfo-aluminates [25- 26].

L'étuvage exerce un effet favorable sur la compacité des ciments au laitier ce qui leur confère une grande résistance au gel et rend possible l'emploi des adjuvants plastifiants et entraîneurs d'air [27]. Les ciments à haute teneur en laitier se caractérisent par des CSH de structure dense et homogène avec absence d'ettringite. Les sulfates sont piégés dans les gels de CSH sous forme de solution solide, lorsque ces ciments subissent un étuvage [28].

2.5 Utilisation du laitier granulé

2.5.1. Dans les ciments

Dés le début du siècle, VICAT [29] avait entrevu le pouvoir hydraulique du laitier et pensé à l'utiliser pour en faire du ciment. Aussi dès que la forme trempée exista, la sidérurgie allemande développa ses propres fabrications de liants hydrauliques constitués d'un mélange de chaux et de laitier granulé moulu, conformément à la découverte de LANGEN [30].

PRUSSING [31] introduit à partir de 1882 le laitier granulé en cimenterie non sidérurgique ; le laitier est mélangé au clinker en toutes proportions de 5 à 90 [%], donnant toute la gamme des ciments au laitier aujourd'hui normalisée.

C'est en 1890 que fut produit les premiers ciments au laitier en France. En Algérie, l'emploi du laitier en cimenterie est très récent et remonte aux années 1980, la fabrication de ciment type CPJ résultant d'un broyage simultané de clinker [70 à 80]%, de laitier granulé [15 à 25%] et de gypse naturel [5%] [1].

2.5.2 Dans le béton [1]

Le laitier granulé peut intervenir comme constituant dans la composition des bétons hydrauliques. Il peut être ainsi utilisé dans les bétons classiques comme sable actif de part son caractère hydraulique, soit à l'état brut, soit sous forme de laitier pré broyé. Il peut également être moulu et incorporé dans le béton comme filer actif. L'incorporation du laitier granulé brut dans un béton classique de granulats naturels, en remplacement de tout ou partie du sable, se traduit par une augmentation des résistances mécaniques [à dosage en ciment constant].

Le malaxage et la mise en œuvre provoquent l'attrition des fines hydrauliques dont l'action vient se cumuler avec celle de la liaison pâte de ciment – sable de laitier granulé [les deux produits sont hydrauliques et présentent une affinité réciproque]. Par contre, la rhéologie des mélanges peut se trouver affectée, le béton devenant rêche et perdant sa maniabilité, à dosage en eau constant.

Pour améliorer la rhéologie des mélanges, on introduit des ajouts, telles les cendres volantes qui non seulement améliorent la rhéologie de ces bétons mais ont de surcroît des propriétés pouzzolaniques. Elles lubrifient les mélanges et augmentent leur compacité par remplissage des vides. L'amélioration de la maniabilité peut aussi être assurée par une charge inerte telle qu'un filler naturel, le plus souvent du calcaire. Indépendamment de son action sur l'ouvrabilité [onctuosité du produit, plastifiant rétenteur d'eau], la chaux grasse jouera un rôle d'activation du laitier. L'emploi des adjuvants améliore la rhéologie des bétons de laitier granulé, mais peut répondre à d'autres critères [réduction du dosage en eau à maniabilité constante, soit une augmentation de la résistance mécanique à dosage en ciment constant].

2.5.3 Dans les briques de laitier

Le procédé mis en place par LURMANN [32] consistait à mélanger 85 % de laitier granulé avec 15 % de chaux éteinte et 20 % d'eau, et à mouler le mélange à la presse. Les briques étaient mises à durcir à l'air libre pendant 6 à 8 semaines.

Le durcissement à la vapeur constitue la dernière évolution de la fabrication des briques de laitier. Le procédé consistait à mélanger du laitier granulé et de la chaux éteinte, le mélange étant broyé avant d'être pressé et durcissant en autoclave à vapeur sous une pression de 0.8 à 1 MPa pendant 8 heures [1].

2.5.4 Dans la construction d'assises de chaussées

C'est vers 1958 que naquit l'idée d'utiliser en corps de chaussée les mélanges à trois constituants que l'on allait appeler grave - laitier à partir de 1965. Ces mélanges comportent des granulats de laitier cristallisé éventuellement liés par le sable de laitier granulé, dont la prise est accélérée par de faibles pourcentages d'activant basique [1].

2.5.5 Dans divers autres domaines

- Comme matière première dans la fabrication du verre.
- Soit comme matière première dans la fabrication de la céramique soit sous forme de matériau fondu à haute température puis refroidi et traité thermiquement pour donner naissance à de la vitro céramique.
- Comme dégraissant des argiles pour les terres cuites.

Chapitre II :

Méthodologie du travail et Caractérisation des matériaux

II.1 Introduction :

Les laitiers sont des matériaux minéraux artificielle produit par l'industrie de l'acier considéré comme un déchet sidérurgiques mais reconnue aujourd'hui comme une véritable ressource industriel pérenne et régulière qui permet de généré des produits de haut gamme L'industrie des matériaux de construction connaît un développement considérable et rapide en Algérie, La recherche actuelle se base sur le développement de nouveaux composites cimentaires, dans le but d'améliorer les performances mécaniques, physiques et la durabilité des matériaux cimentaires et bien sûr minimiser le cout des produits cimentaires [3].

II.2 Objectif :

Le présent travail se porte sur l'effet de l'incorporation de différentes quantités de laitier activé d'El-Hadjar sur les résistances mécaniques des ciments (ciment sans ajout cimentaire)

II.3 Le but du travail :

Étudier la variation des propriétés physiques et mécaniques selon le mode d'activation de laitier et sa teneur dans le mortier

II.4 Matériaux utilisés

La caractérisation de toutes les matières utilisés, été réalisée en premier lieu :

- Laitier granulé de haut fourneau.
- Le ciment CRS. CEM I/42.5.
- Sable de OUED SOUF.

II.5 Elaboration de matériaux utilisés:

II.5.1 Le laitier granulé:

C'est un coproduit issu de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau. Le minerai de fer utilisé provient du complexe sidérurgique d'EL HADJAR situés dans la wilaya de Annaba obtenu par refroidissement rapide par un jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de sable de couleur grise claire [3].



Figure 5 : Laitier granulé

I.5.1.1 Calcul d'indice d'activité hydraulique

Le laitier granulé de haut fourneau utilisé dans notre étude expérimentale est un silico-

Aluminate de calcium et de magnésium, il est constitué essentiellement de quatre oxydes qui

Sont :

(SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO).

Les indices de basicité «Mb» indiquent si un laitier est basique ou acide. Les indices les Plus utilisés sont les suivants :

$$mb1 = (\% CaO + \% MgO) / (\% SiO_2) = 1.14$$

$$mb2 = (\% CaO) / (\% SiO_2) = 1.04$$

$$mb3 = (\% CaO + \% MgO) / (\% SiO_2 + \% Al_2O_3) = 1.01$$

D'après l'indice de basicité du laitier (Mb > 1), le laitier est basique.

Il faut noter que les facteurs qui influent sur le pouvoir hydraulique du laitier granulé sont en général au nombre de trois :

- la composition chimique (elle nécessite des quantités suffisantes en chaux et en Alumine)

- le degré de vitrification (dissolution des produits amorphes),
- la surface spécifique (surface de contact eau-laitier).

L'indice hydraulique (taux ou degré de vitrification : richesse du laitier en éléments

Silicatés) sert d'indication de l'activité hydraulique du laitier de haut fourneau :

L'indice d'activité hydraulique (méthode de Keil) est calculé de la façon suivante :

$$\alpha = \frac{sp * F}{1000}$$

Avec :

Sp : surface spécifique de Blaine des fines du laitier

F : pourcentage des fines du laitier (Friabilité : < 80 μ dans notre cas : F = 17 %).

α : l'indice d'activité hydraulique du laitier granulé

(Le coefficient α varie en général entre 15 et 100) :

Tableau 2 : Indice d'Activité Hydraulique du Laitier Granulé

Classe	α	Type de laitier
1	$\alpha < 15$	Le laitier très pauvre
2	$15 < \alpha < 40$	Laitier pauvre
3	$40 < \alpha < 55$	Laitier acceptable
4	$55 < \alpha < 85$	Laitier bon
5	$85 < \alpha < 100$	Laitier très bon
6	$\alpha > 100$	Laitier excellent

Indice d'activité hydraulique de notre laitier:

SSB (30 minutes de broyage) = 61.93.

SSB (1 heure de broyage) = 73.47.

SSB (1heure et 30 minutes de broyage) = 92.02.

Nos laitiers sont dans la classe 4 et 5 ($55 < \alpha < 85$ et $85 < \alpha < 100$) donc sont des laitiers de bon et de très bon qualité.

II.5.1.2 Composition chimique du laitier :

D'après leur composition chimique, les laitiers de hauts fourneaux sont proches du Ciment portland. Ces laitiers se composent principalement de quatre oxydes : CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO. Il est noté que les compositions chimiques et minéralogiques des laitiers peuvent varier dans de larges limites aussi sa qualité peut être très variable d'une usine à l'autre.

Tableau 03: Composition chimique du laitier granulé d'EL HADJAR

Oxydes %	Teneur (%)
SiO ₂	38.52
CaO	40.20
Al ₂ O ₃	05.13
MgO	03.75
SO ₃ , S	00.15
FeO	02.00
MnO	02.64
Cr ₂ O ₃	-
TiO ₂	01.16
Na ₂ O	-
K ₂ O	00.40

II.5.1.3 La composition minéralogique:

La composition minéralogique potentielle des laitiers granulés a été calculée [8] à partir des principaux oxydes (CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂) par analyse chimique. Les phases cristallisées susceptibles d'apparaître au cours de la dévitrification sont la Mélilite qui est une solution solide de la Gehlinite (C₂AS) et de l'Akermanite (C₂MS₂), la Pseudowollastonite (CS), la Rankinite (C₃S₂), la Merwinite (C₃MS₂), le silicate Bicalcique (C₂S), le diopside (CMS₂), la Montécellite (CMS) et la Forstérite (MS₂). Les résultats des calculs chimiques conduisent à conclure que les laitiers de haut fourneau utilisés en cimenterie sont potentiellement constitués de (C₃S₂, C₂AS et C₂MS₂) pour 95 % et de (CS ou C₃MS₂ ou C₂S) pour 5 %.

II.5.1.4 Masses volumiques

La masse volumique apparente du laitier granulé est : 900 Kg/m^3 .

La masse volumique absolue du laitier granulé est : 3100 Kg/m^3

II.5.1.5 Granulométrie

Le laitier granulé se présente sous forme d'un gros sable poreux de granulométrie 0 / 5
On procède un broyage pour avoir 3 surfaces spécifiques différentes.

Le broyage se fait à l'aide d'un broyeur à boulet.

Les surfaces spécifiques obtenues sont :

- 30 minutes de broyageSSB₁=3640 cm²/g
- 1 heure de broyage SSB₂=4322 cm²/g
- 1 h 30 de broyage.....SSB₃=5303 cm²/g



Figure 06 : laitier granulé broyer

II.5.1.6 L'analyse granulométrique par laser

SSB₁ 30 min de broyage.

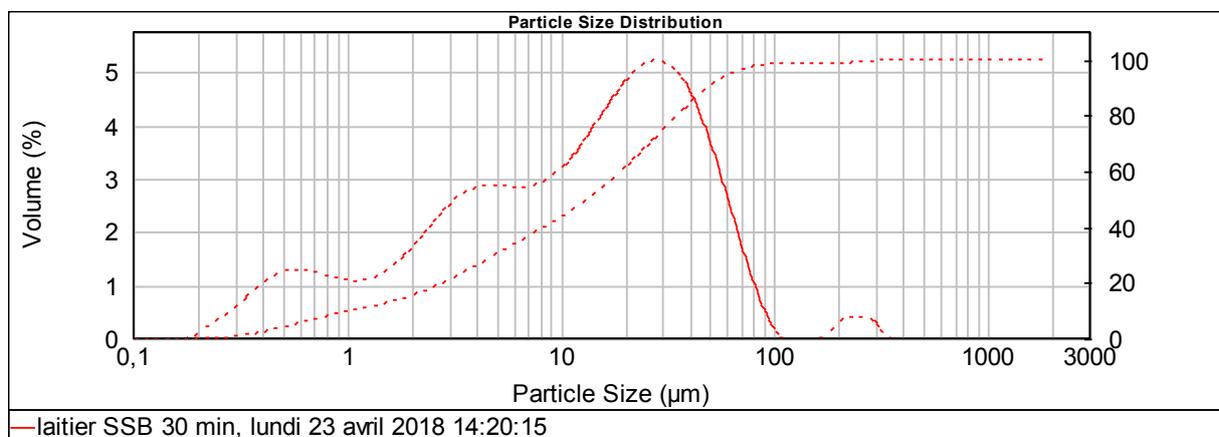


Figure 07: diagramme d'analyse granulométrique Laser de Laitier a SSB₁.

SSB₂ 1 heure de broyage.

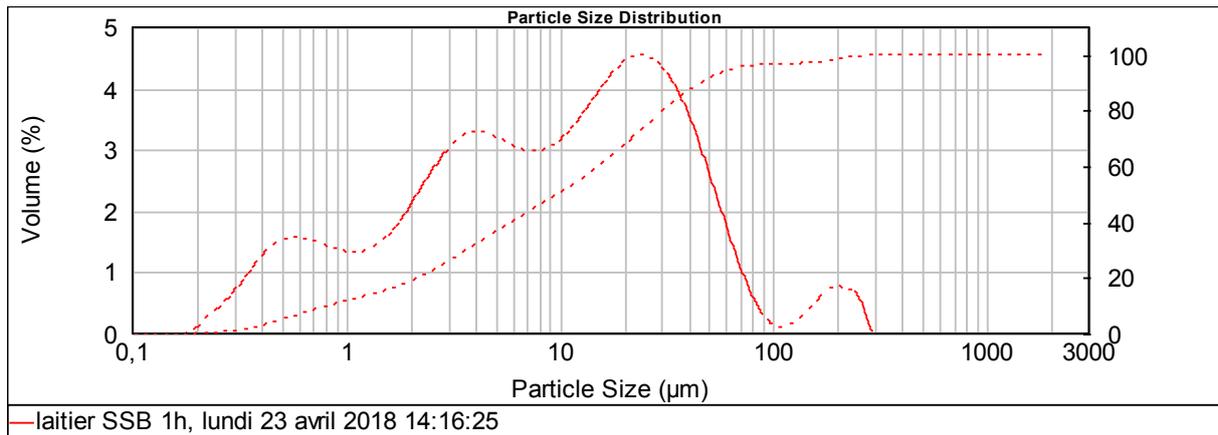


Figure 08: diagramme d’analyse granulométrie Laser de Laitier a SSB₂.

SSB₃ : 1 heure 30 min de broyage.

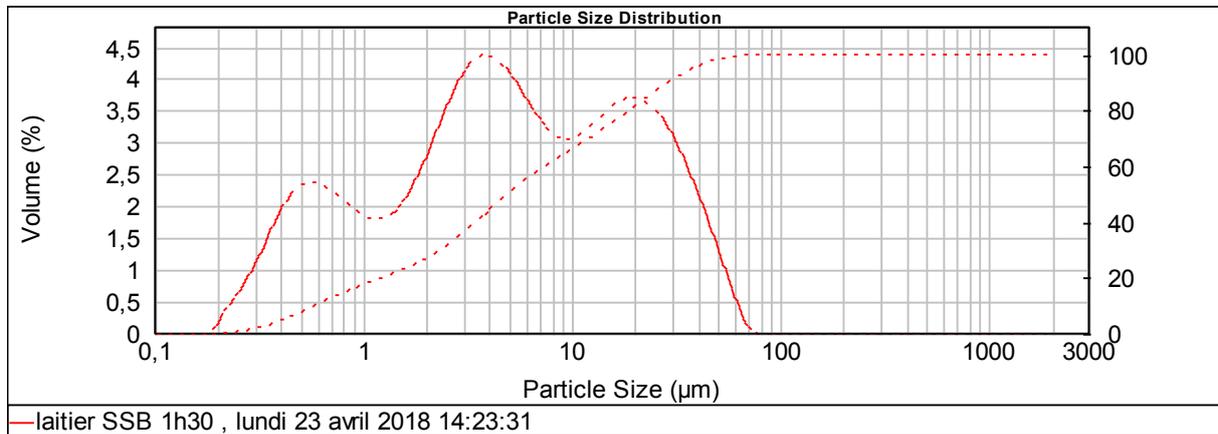


Figure 09: diagramme d’analyse granulométrie Laser de Laitier a SSB₃.

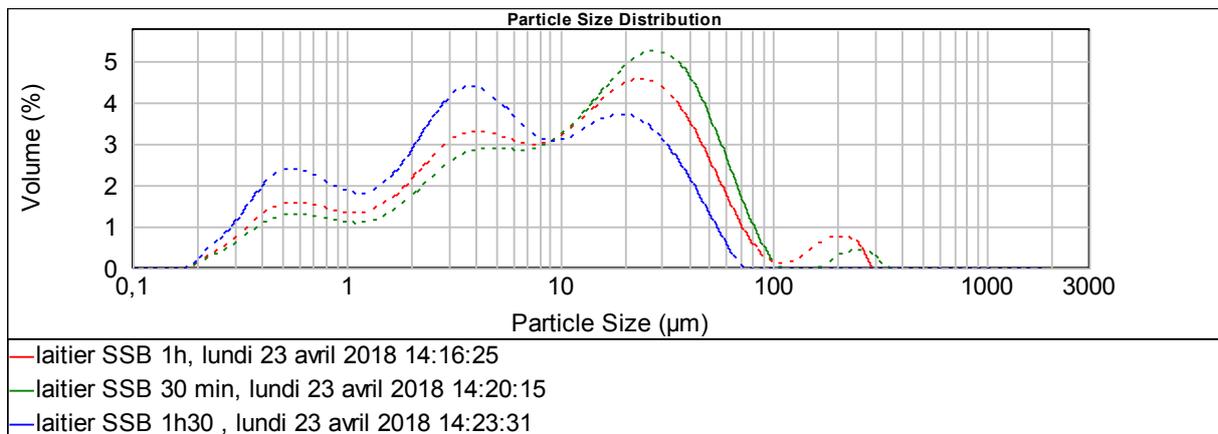


Figure 10: diagramme d’analyse granulométrie Laser (superposition des 3 Laitiers).

II.5.2 Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique (qui durcit sous l'action de l'eau).

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment résistant au sulfate (C.R.S) CEM1 MOKAOUM PLUS de Lafarge qui est un ciment de haute performance.

II.5.2.1 Caractéristiques chimiques du ciment:

Tableau 4 : Caractéristique chimique du ciment

Composition chimique	Teneur %
Teneur en sulfate SO ₃	1.8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.2 à 3
Teneur en chlorure	0.01 à 0.05
Perte au feu	0.5 à 3



Figure 11 : ciment CRS. CEM 1/42.5

II.5.2.2 Caractéristiques minéralogiques :

Tableau 05 : Composition minéralogique du ciment.

Minéraux	Teneur %
C ₂ S	08.83
C ₃ S	17.17
C ₃ A	57.23
C ₄ AF	09.52

II.5.2.3 Caractéristiques techniques :

Tableau 06: Caractéristiques techniques du ciment.

Classe de ciment	Début de prise	Fin de prise
42.5 MPa	> 60 min	200-400 min

II.5.2.4 Caractéristique physique :

Tableau 07: Caractéristiques physiques.

Consistance normal %	25 à 28
Finesse méthode Blain cm^2/g	3200 à 3800
Retrait $\mu\text{m}/\text{m}$	<1000
Expansion mm	< 2.0
Chaleur d'hydratation	< 270 J/g

II.5.2.5 L'analyse granulométrique

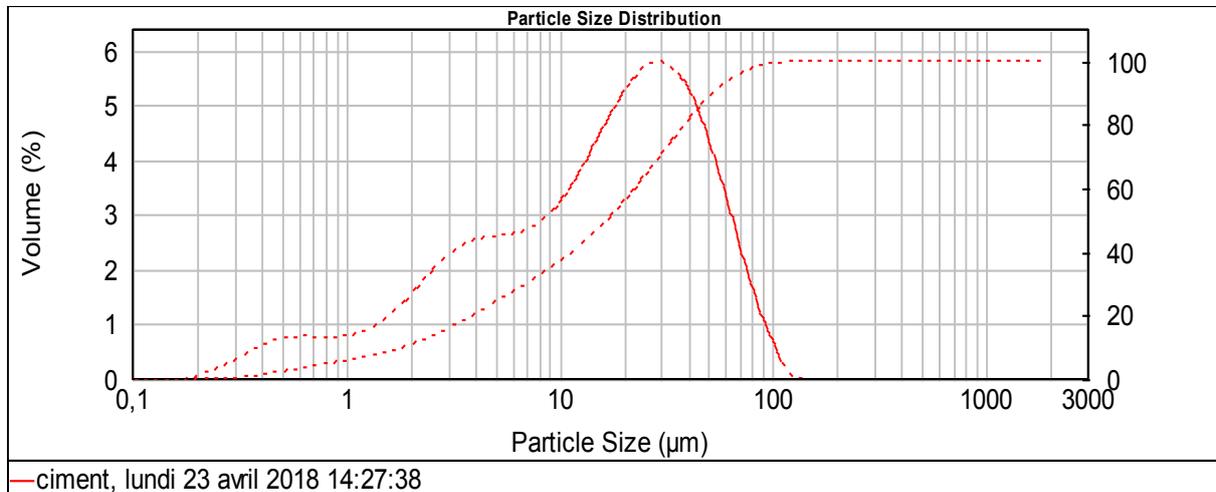


Figure 12: diagramme d'analyse granulométrique Laser du ciment.

II.5.3 Sable

Le sable utilisé dans notre travail est le sable de OUED SOUF.



Figure 13: sable de OUED SOUF.

II.5.3.1 Caractéristique granulométrique

D'après l'analyse selon la norme faite au laboratoire de LNHC on a obtenu les résultats.

Tableau 08: analyse granulométrie de sable d'OUED SOUF.

Sable d'OUED SOUF				
Tamis (mm)	Pois refus (g)	Refus (%)	Passant (%)	Observation
2.5	072.00	07.20	92.80	
1.25	157.60	15.76	84.24	
0.63	442.00	44.20	55.80	
0.3	872.50	87.25	12.75	Module de finesse =2.51
0.16	964.00	96.40	03.60	
0.08	995.30	99.53	00.47	
Fond de tamis	998.00	99.80	00.20	

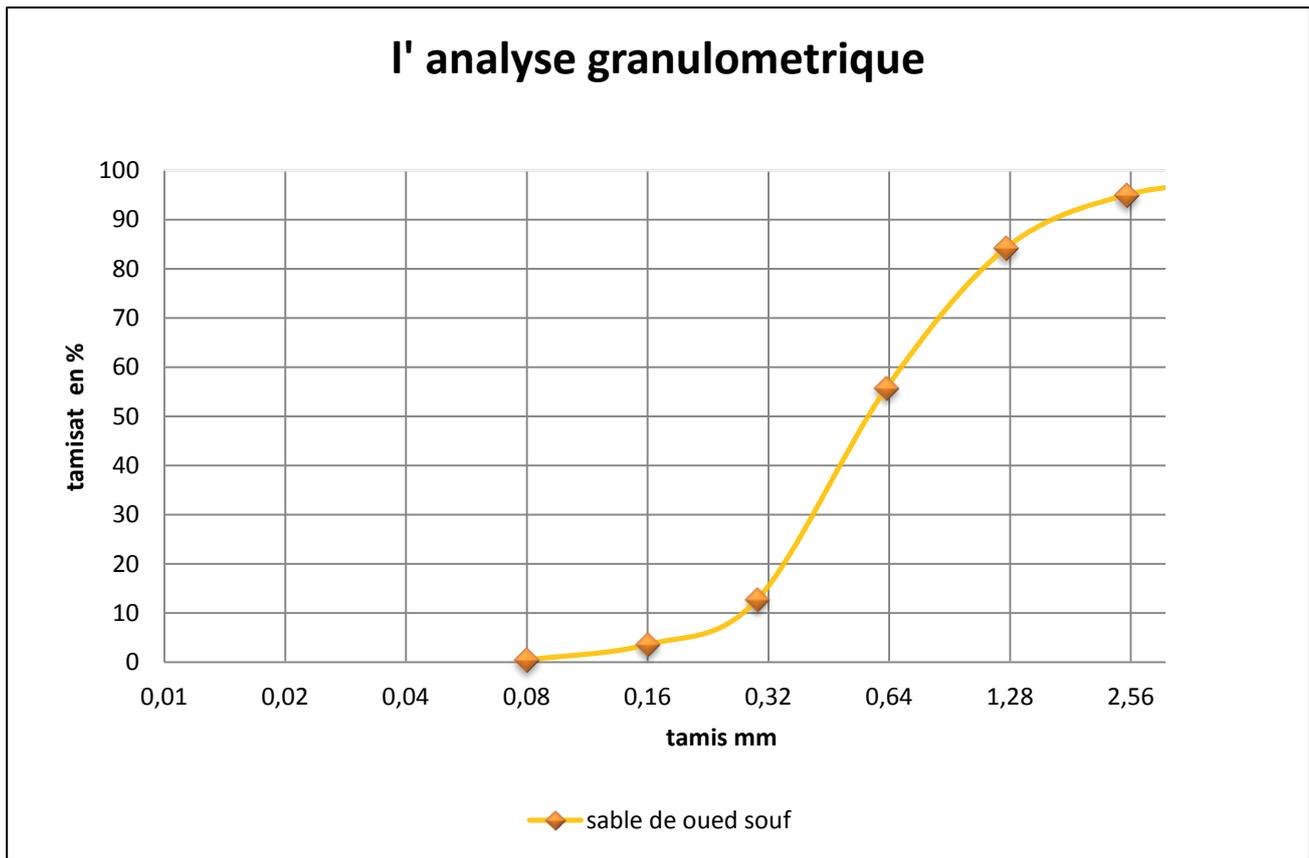


Figure 14: analyse granulométrie de sable de OUED SOUF.





Figure 15: essai d'équivalent de sable.

II.5.3.2 Caractéristique physique

- Masse volumique : $2.66 \text{ cm}^3/\text{g}$
- Equivalant de sable : 82.06

Selon l'analyse granulométrie, On constate que le sable de OUED SOUF présente une analyse granulométrique continue

Selon l'essai de l'équivalent de sable, On constate que notre sable est propre et de bonne qualité.

Chapitre III :

Formulation des mortiers

III.1 Introduction

L'addition du laitier de haut fourneau au ciment présente un intérêt économique dans l'industrie du ciment et un intérêt technique dans le domaine de la construction.

Dans cette étude expérimentale, on a cherché à savoir si la substitution pondérale d'une certaine quantité de ciment par le laitier granulé activé de haut fourneau permettrait d'obtenir des mortiers ayant des propriétés comparables ou plus performantes que celles des mortiers de base.

III.2 Objectif

L'objectif de notre recherche est :

- Déterminer le taux de substitution de laitier qui conduit aux meilleures propriétés physiques et mécaniques
- Savoir quel mode d'activation (mécanique, thermique, chimique) est le plus performant

On propose en première 3 mode d'activation de laitier granulé

1. Une activation mécanique avec 3 temps de broyage de notre laitier afin d'avoir 3 SSB différents.
2. Une activation thermique on a procédé un traitement par étuvage.
3. Activation chimique par l'ajout de la soude et la carbonate de sodium.

La deuxième étape confectionné des éprouvettes 4x4x16cm de mortier et à chaque fois on varie le pourcentage de laitier incorporé dans le mortier et sa méthode d'activation (activation mécanique, thermique et chimique).

III.3 Définition d'un mortier

Le mortier est un des matériaux de constructions c'est un mélange de ciment, sable, l'eau et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure. Les mortiers sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment la résistance à la compression. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1.

III.4 Matériel utilise

- Balance.
- Malaxeur à deux vitesses (rapides et lentes).
- Eprouvette prismatique 4x4x16.



(a)



(b)



(c)

Figure 16:(a): balance, (b): Malaxeur de mortier. (c): moule prismatique (4x4x16)

III.5 Préparation et matériaux

Consiste a préparé un mortier avec un rapport E/C = 0.5.

- eau 225 g.
- sable 1350 g.
- ciment 450 g.

- 1) mettre l'eau dans le malaxeur.
- 2) verse le ciment et mettre le malaxeur en marche vitesse lente pendant 30second.
- 3) introduire le sable régulièrement avec une vitesse lente pendant 30 secondes après change à la vitesse rapide 30second supplémentaire.

- 4) Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- 5) Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu.
- 6) reprendre le malaxage avec une vitesse rapide et pendant une minute
- 7) le mortier prêt pour le versé dans des éprouvettes 4x4x16.

Tableau 09 : opération de malaxage de mortier

Opérations	Introduire l'eau	Introduire le ciment	malaxage	Introduire le sable	Raclage de cuve	Repos	malaxage
Durée	/	/	30s	30s	15s	1min 15s	60s
Etat de malaxeur	Arrêté		Vitesse lente		Arrêté		Vitesse rapide



Figure 17: les différentes étapes de préparation d'un mortier.

III.6 Activation de laitier

III.6.1 Activation mécanique :

La finesse de broyage du laitier intervient dans son couplage avec le ciment et joue un rôle très important dans l'évolution des résistances mécaniques, à court et à long terme

On a utilisé 3 types de laitier.

- Laitier broyé pendant 30 minutes avec un SSB 3640 cm²/g
- Laitier broyé pendant 1 heure avec un SSB 4322 cm²/g
- Laitier broyé pendant 1h30 avec un SSB 5303 cm²/g

Tableau qui montre les différents dosages de matériaux rentrant dans la confection des éprouvettes.

Tableau 10: quantités des constituants du mortier a base de Laitier. (Activation mécanique).

Pourcentage de laitier	Laitier (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (ml)
0 % (témoin)	00	450	1350	225
20 %	90	360	1350	225
40%	180	270	1350	225
60%	270	180	1350	225
80%	360	90	1350	225



Figure 18: éprouvettes du mortier

Remarque: on reproduit le même mélange avec les 3 SSB de laitier.

III.6.2 Activation thermique

L'étuvage exerce un effet favorable sur la compacité des mortiers au laitier ce qui leur confère une grande résistance au gel

On Confectionne des éprouvettes de mortier on utilisant un laitier avec un SSB 3643 cm^2/g (broyage de 30min) qui est proche de celui du ciment (3200-3800) cm^2/g après les faire subir un étuvage de

- Température 80°C.
- Durée de séchage de 6 heures.

Tableau 11: quantités des constituants du mortier a base de Laitier. (Activation thermique)

Pourcentage	Laitier(g)	Ciment (g)	Sable(g)	Eau (ml)
Témoin	00	450	1350	225
20%	90	360	1350	225
40%	180	270	1350	225
60%	270	180	1350	225
80%	360	90	1350	225



Figure 19: éprouvettes de mortier (Activation thermique)



Figure 20: étuvage des éprouvettes

III.6.3 Activation chimique

L'activation chimique du laitier, c'est le maintien du laitier dans un milieu à pH suffisamment élevé par addition de substances permettant de répondre à cette condition en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la solution interstitielle en chaux pour atteindre un pH de 12 à 13 [3].

On a utilisé une activation mixte par l'ajout de 1.5 de la soude (Naoh) sous forme d'une poudre et la même quantité de carbonate de sodium (Na_2CO_3) en substitution de quantité de laitier [3].



(a)



(b)

Figure 21: (a): la soude (Naoh). (b): carbonate de sodium (Na_2CO_3)

Tableau 12: quantités des constituants du mortier a base de Laitier. (Activation chimique)

Teneur en laitier	Laitier (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (ml)
60%	261.9	90	1350	225
80%	349.2	180	1350	225
100%	436	00	1350	225



Figure 22: éprouvettes de mortier (Activation chimique).

Chapitre IV :

Résultats et Interprétations

IV.1 Les résultats

IV.1.1 consistances et délai de prise



Figure 23: essai de délai de prise appareil de VICAT

IV.1.1.2 activation mécanique

- Le cas de SSB 3643 cm²/g

Tableau 13: consistance et délai de prise pour Laitier de SSB₁=3643 cm²/g.

Pourcentage	Consistance (%)	Temps de prise (min)
témoin	24.20	095
20%	24.80	105
40%	25.30	120
60%	25.90	130
80%	26.50	140

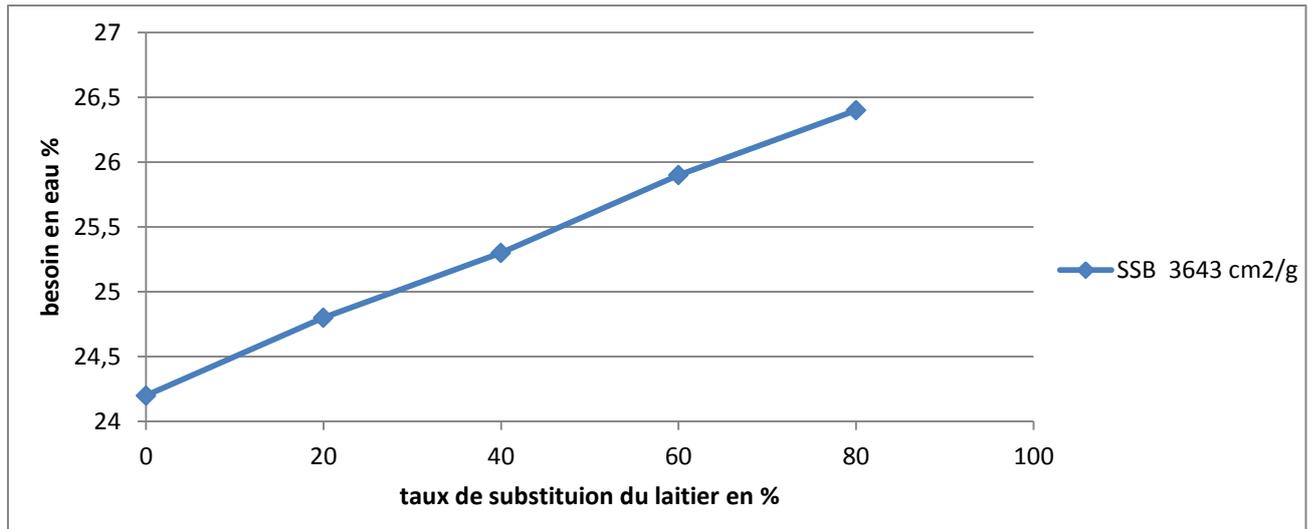


Figure 24: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier pour SSB₁.

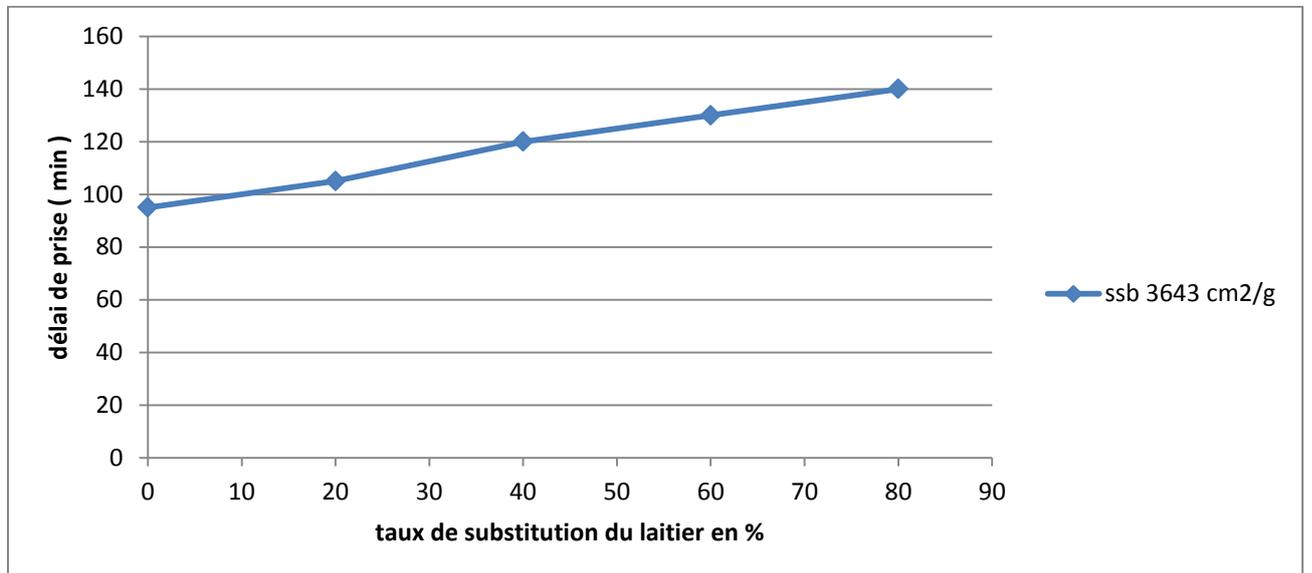


Figure 25: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour SSB₁.

➤ Le cas de SSB 4322g/cm²

Tableau 14: consistance et délai de prise pour Laitier de SSB₂=4322 cm²/g.

Pourcentage	Consistance (%)	Temps de prise (min)
témoin	24.20	095
20%	25.00	120
40%	25.70	140
60%	26.30	155
80%	26.80	165

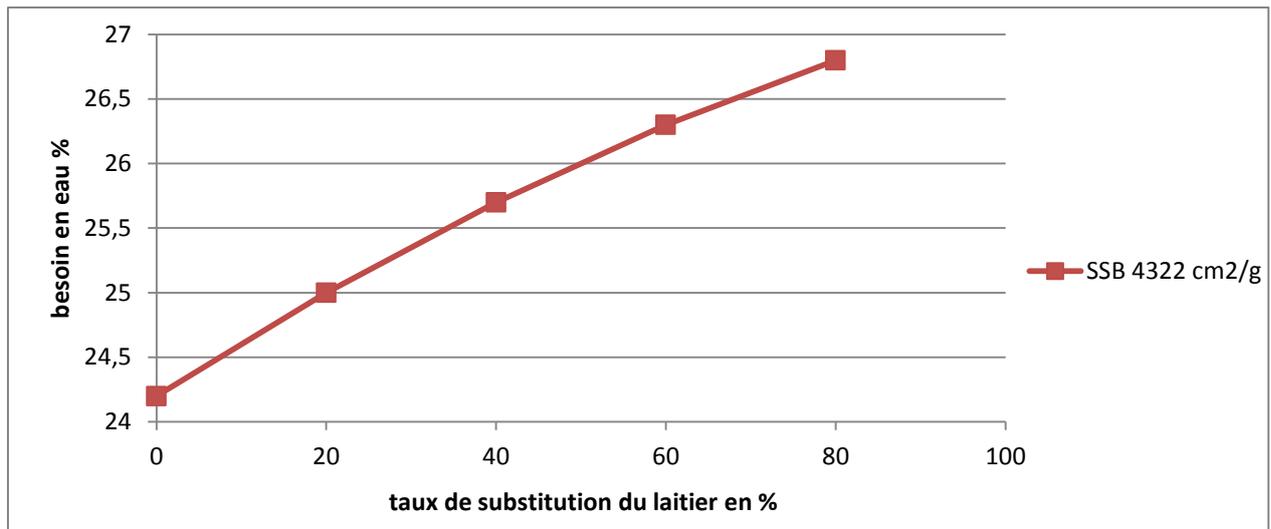


Figure 26: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier pour SSB₂.

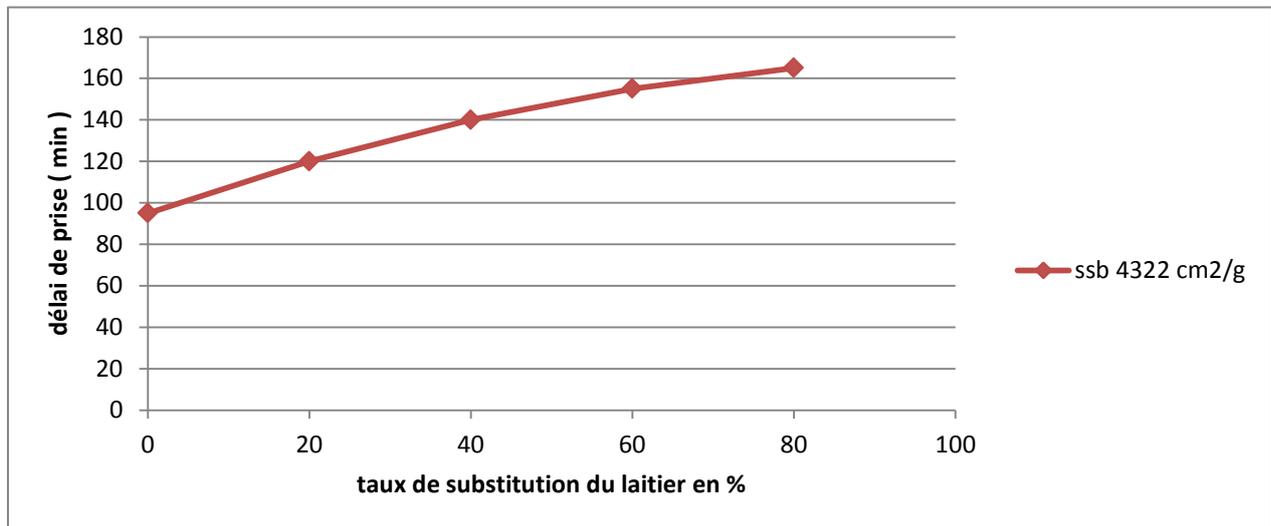


Figure 27: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour SSB₂.

➤ le cas de SSB₃= 5413 cm²/g

Tableau 15: consistance et délai de prise pour Laitier de SSB₃=5413 cm²/g.

Pourcentage	Consistance (%)	Temps de prise (min)
Témoin	24.20	095
20%	25.50	130
40%	26.40	155
60%	27.00	175
80%	27.70	180

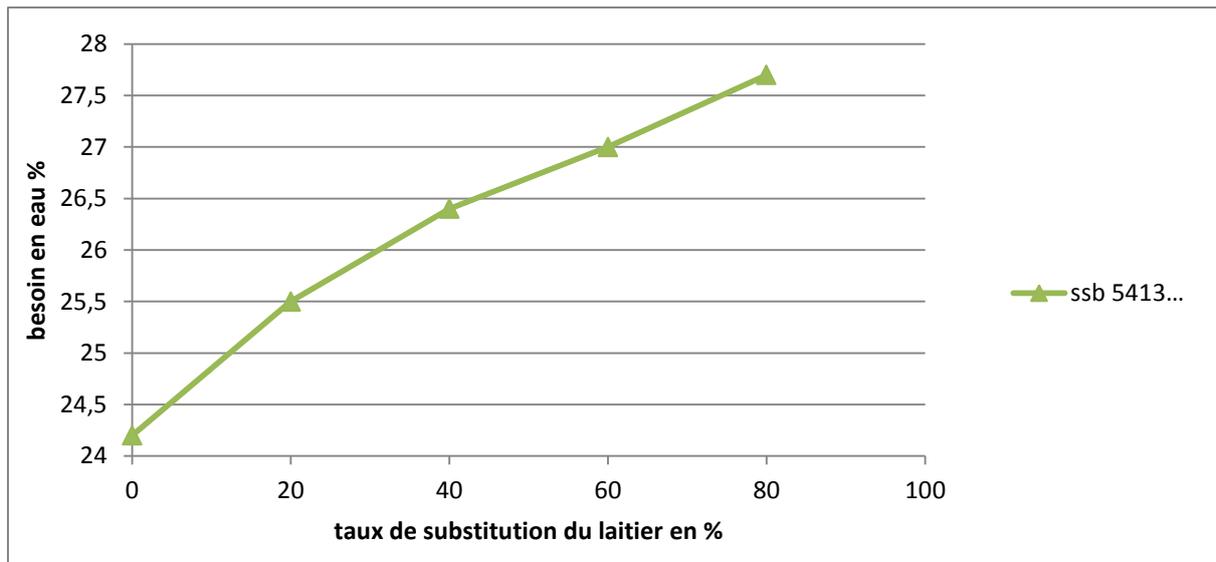


Figure 28: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier pour SSB₃.

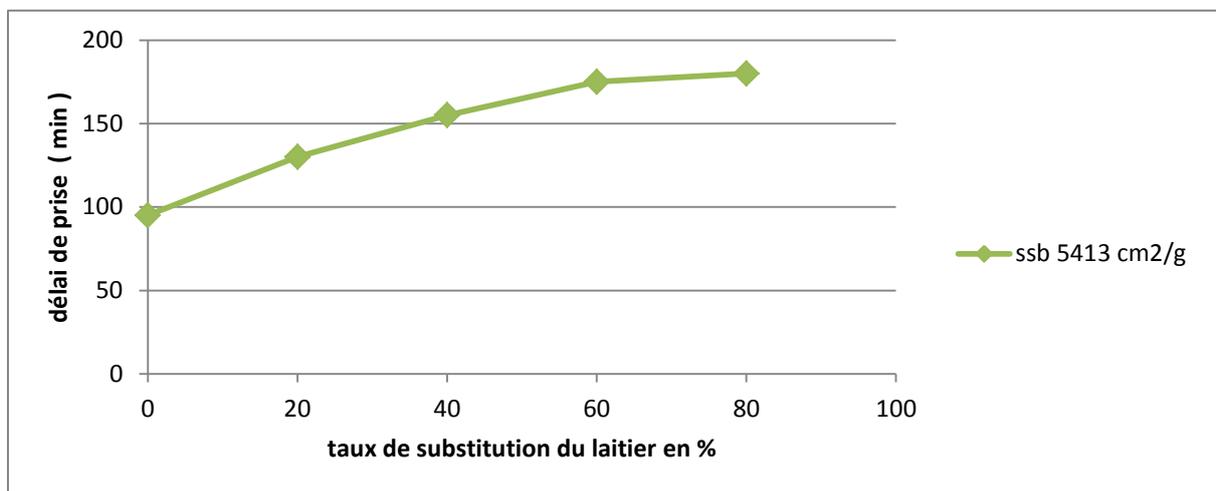


Figure 29: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour SSB₃.

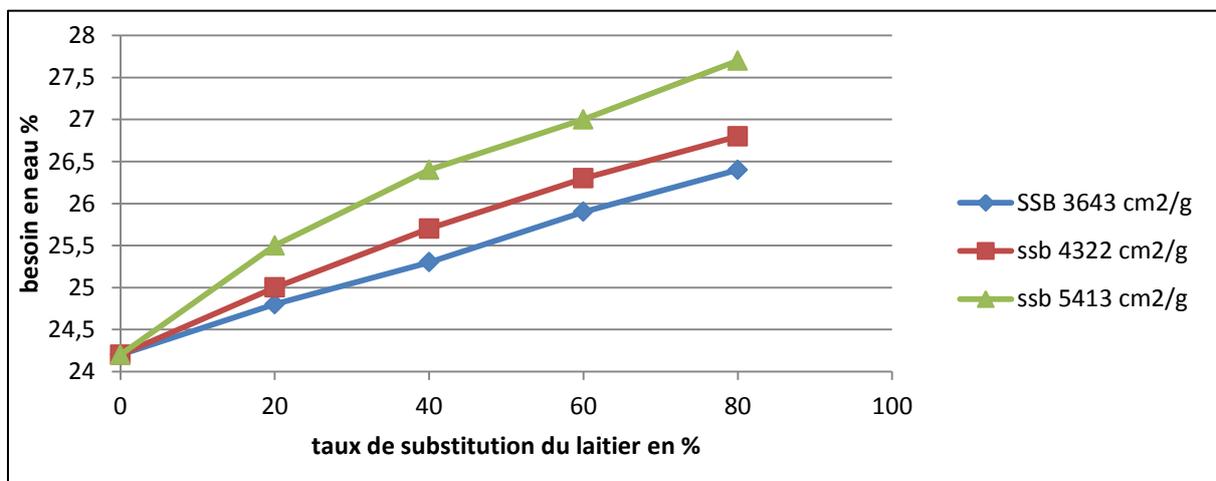


Figure 30: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier des les 3 SSB.

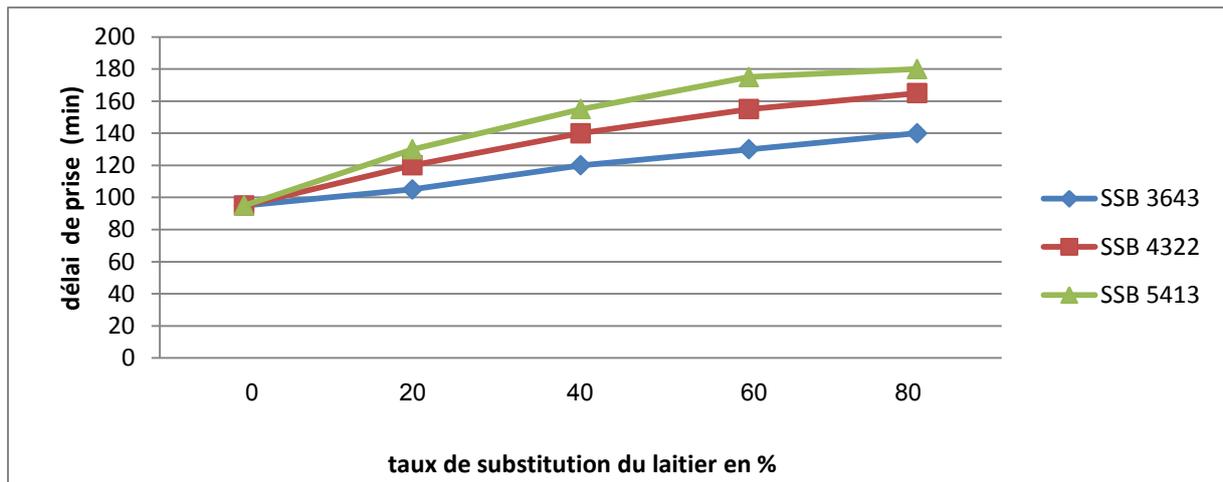


Figure 31: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.

Remarque : On remarque que l’addition progressive du laitier et la l’augmentation de la surface spécifique se traduit par une augmentation de besoin de la quantité d’eau.

IV.1.1.3 Activation chimique

Tableau 16: consistance et délai de prise. (Activation chimique).

Teneur en laitier	Consistance (%)	Délai de prise (min)
60%	26.30	140
80%	27.20	155
100%	28.50	195

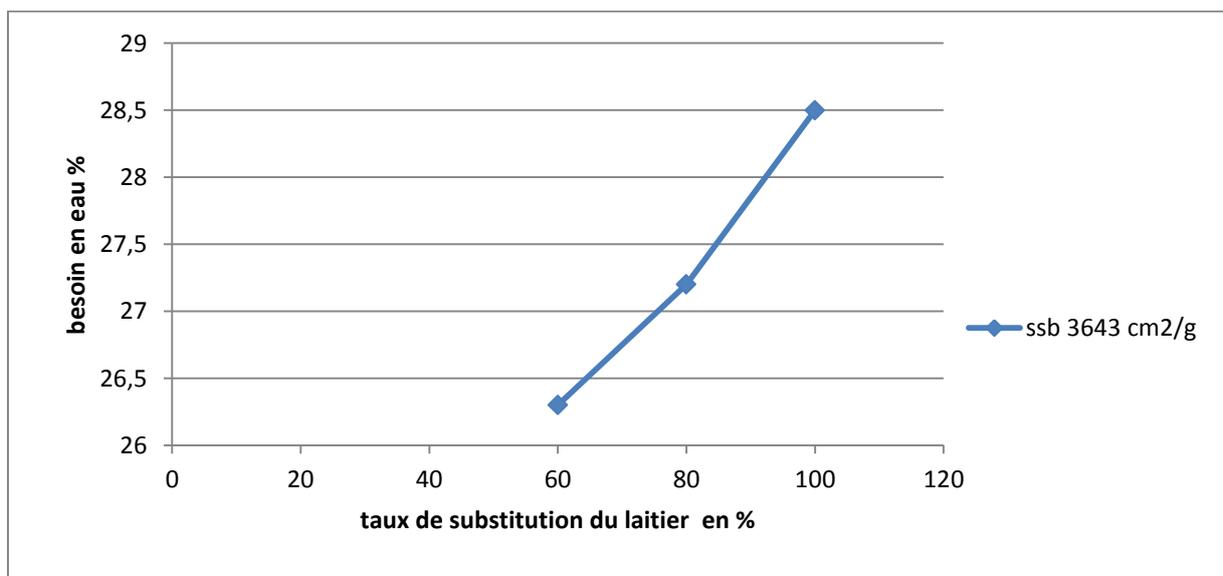


Figure 32: graphe représentatif de besoin en eau en fonction de % de laitier.

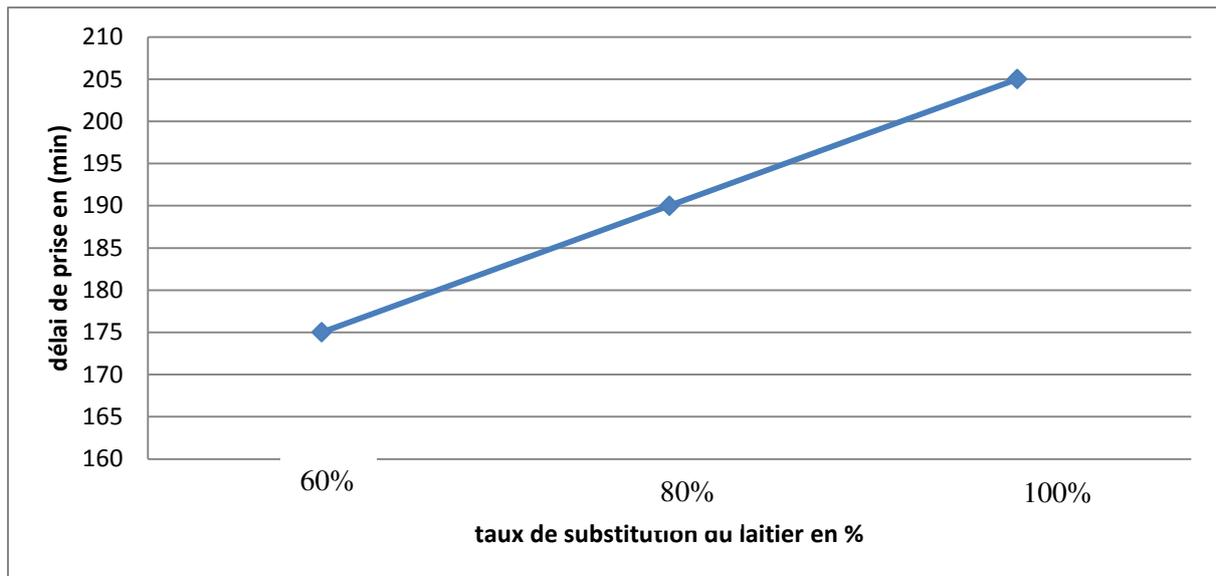


Figure 33: graphe représentatif de délai de prise en fonction de % de laitier.

IV.1.2 Essais mécaniques

On a obtenu Les résistances mécaniques suivantes :

IV.1.2.1 Activation mécanique

IV.1.2.1.1 Résistances à la flexion



Figure 34: essai de flexion

Tableau 17: Résistances à la flexion (laitier $SSB_1=3643g/cm^2$)

Pourcentage	Résistance à 28j (MPa)
témoin	4.25
20%	6.22
40%	4.80
60%	3.98
80%	3.25

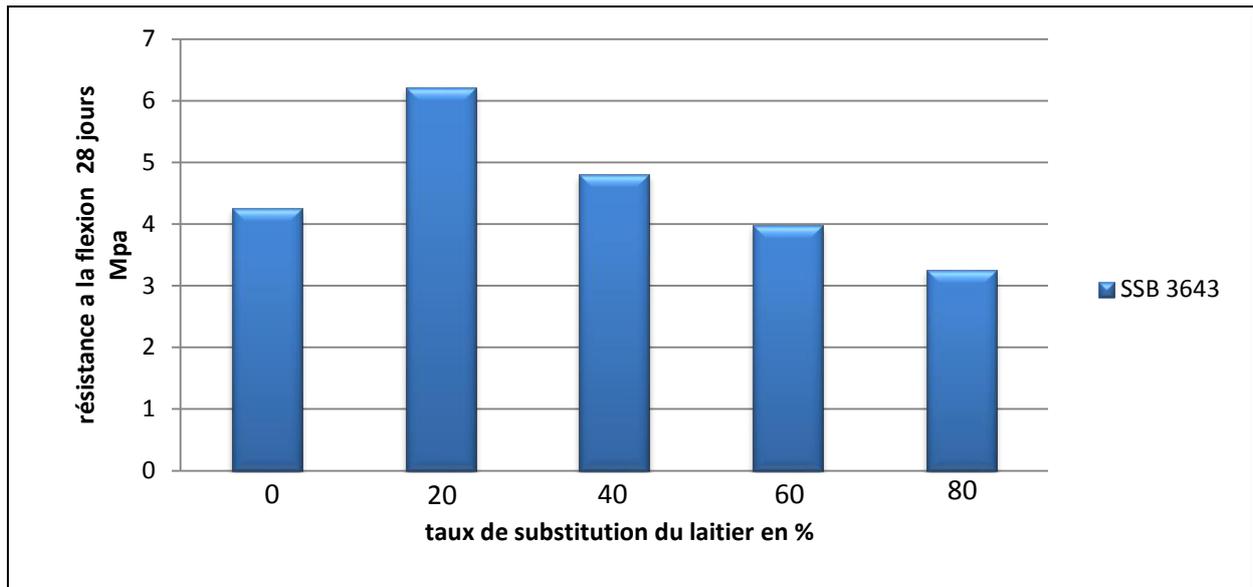


Figure 35: histogramme représentatif de R_f en fonction de % de laitier pour SSB₁.

Tableau 18: Résistances à la flexion (laitier=SSB₂=4322g/cm²)

Pourcentage	Résistance à 28j (MPa)
témoin	4.25
20%	5.22
40%	4.75
60%	4.20
80%	3.12

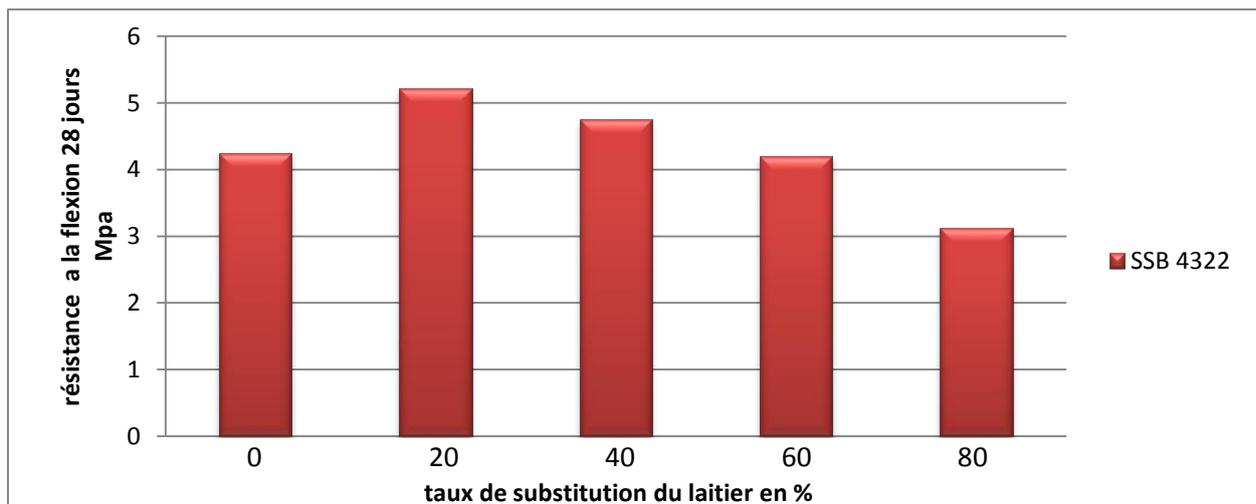


Figure 36: histogramme représentatif de R_f en fonction de % de laitier pour SSB₂.

Tableau 19: Résistances à la flexion (Laitier SSB₃=5431 cm²/g)

Pourcentage	Résistance à 28j (MPa)
témoin	4.25
20%	5.95
40%	6.20
60%	4.40
80%	3.90

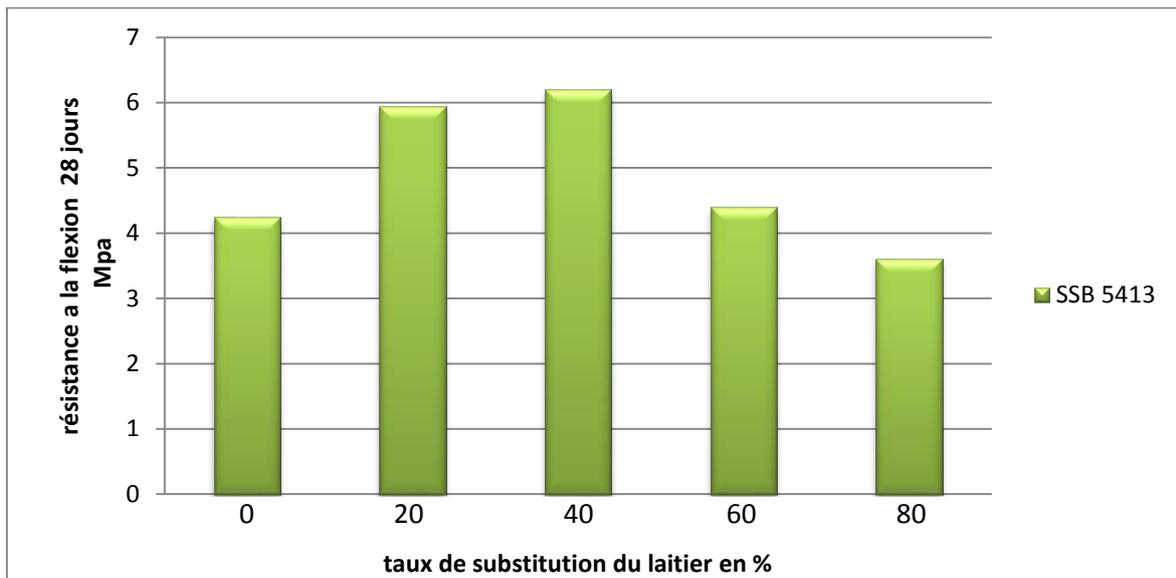


Figure 37: histogramme représentatif de R_f en fonction de % de laitier pour SSB₃.

Résultats des trois SSB pour la flexion

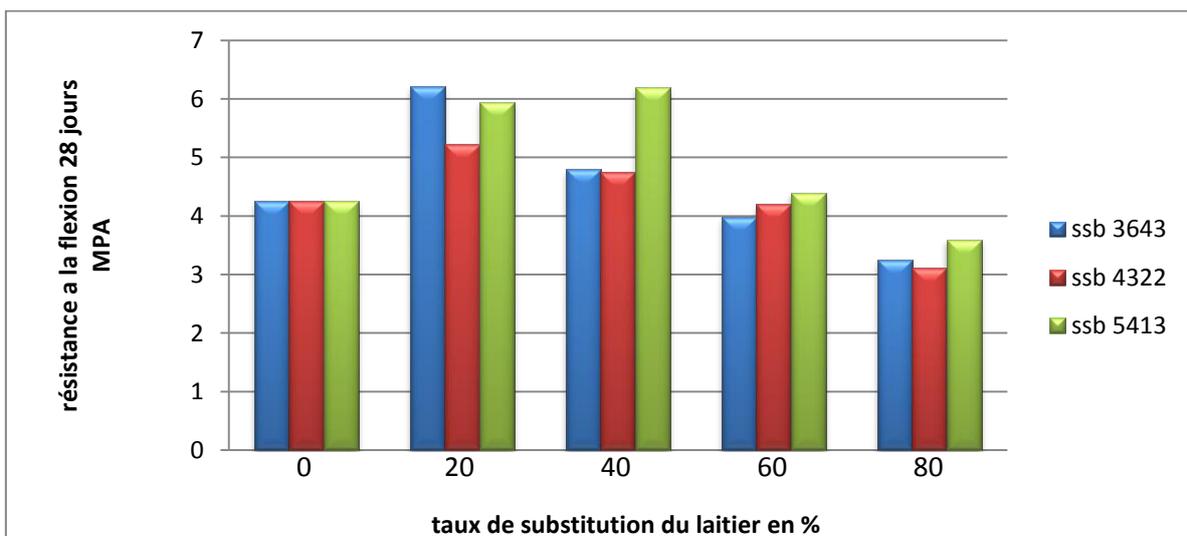


Figure 38: histogramme représentatif de R_f en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.

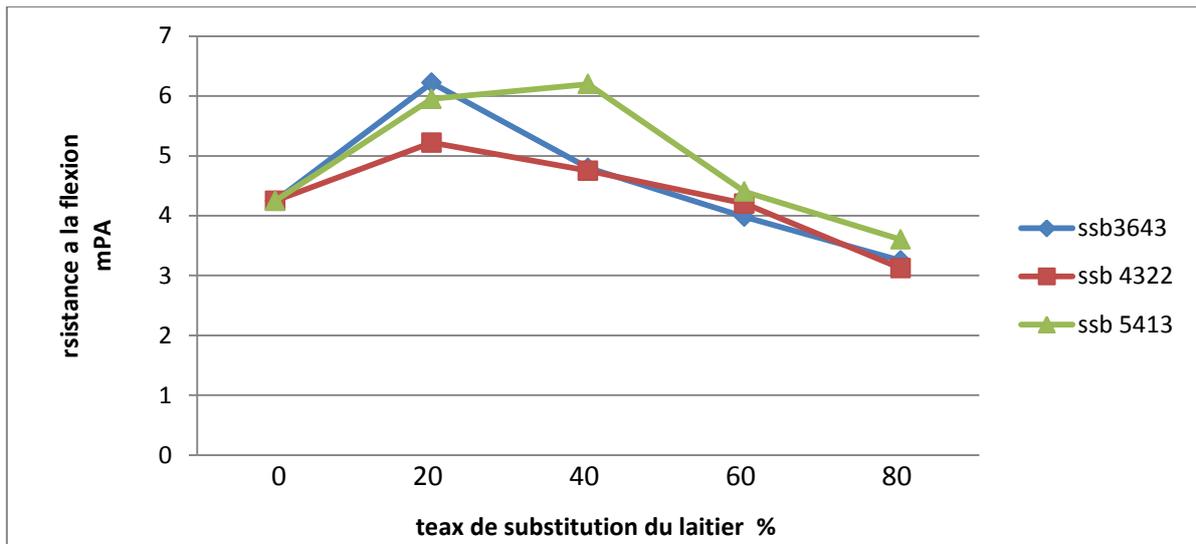


Figure 39: graphe représentatif de R_f en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.

IV.1.2.1.2 Les Résistances à la compression



Figure 40 : essai de compression.

Tableau 20:résistances a la compression (Laitier SSB₁=3643 cm²/g)

Pourcentage	Résistance à 28j (MPa)
Témoin	28.75
20%	34.58
40%	28.12
60%	21.87
80%	18.75

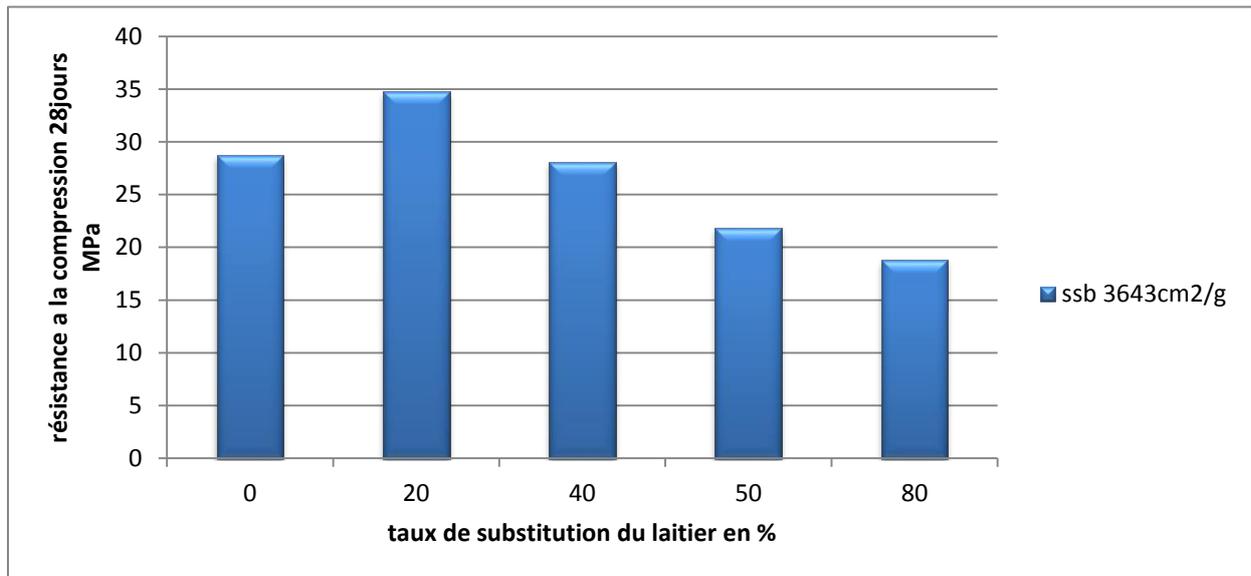


Figure 41: histogramme représentatif de R_c en fonction de % de laitier pour SSB₁.

Tableau 21: résistances à la compression. (Laitier SSB₂=4322cm²/g)

Pourcentage	Résistance à 28j (MPa)
témoin	28.75
20%	36.24
40%	30.20
60%	27.20
80%	19.59

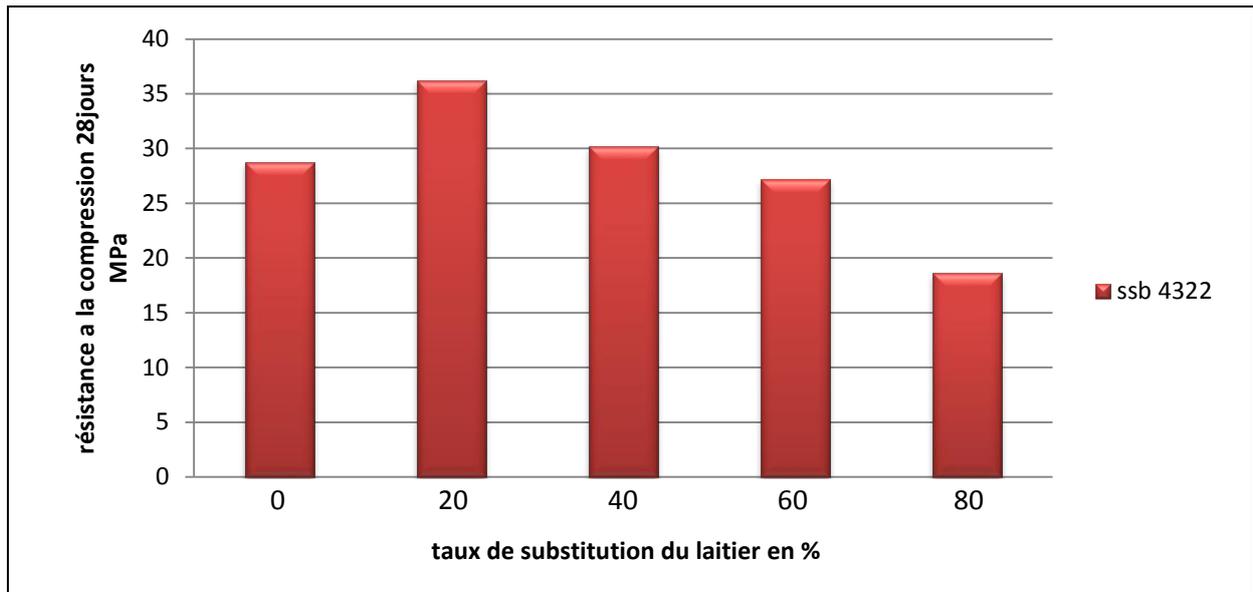


Figure 42: histogramme représentatif de R_f en fonction de % de laitier pour SSB₂.

Tableau 22: résistances à la compression. (Laitier SSB₃=5413 cm²/g)

Pourcentage	Résistance à 28j (MPa)
témoin	28.75
20%	40.60
40%	39.60
60%	30.62
80%	24.97

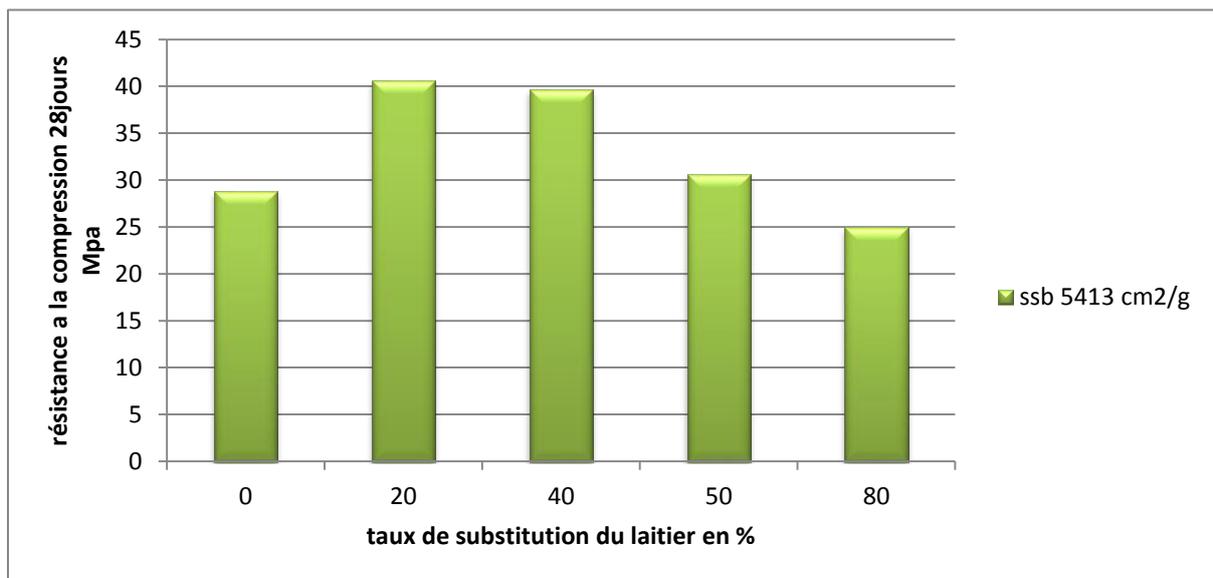


Figure 43: histogramme représentatif de R_c en fonction de % de laitier pour SSB₃.

Résultats des trois SSB pour la compression

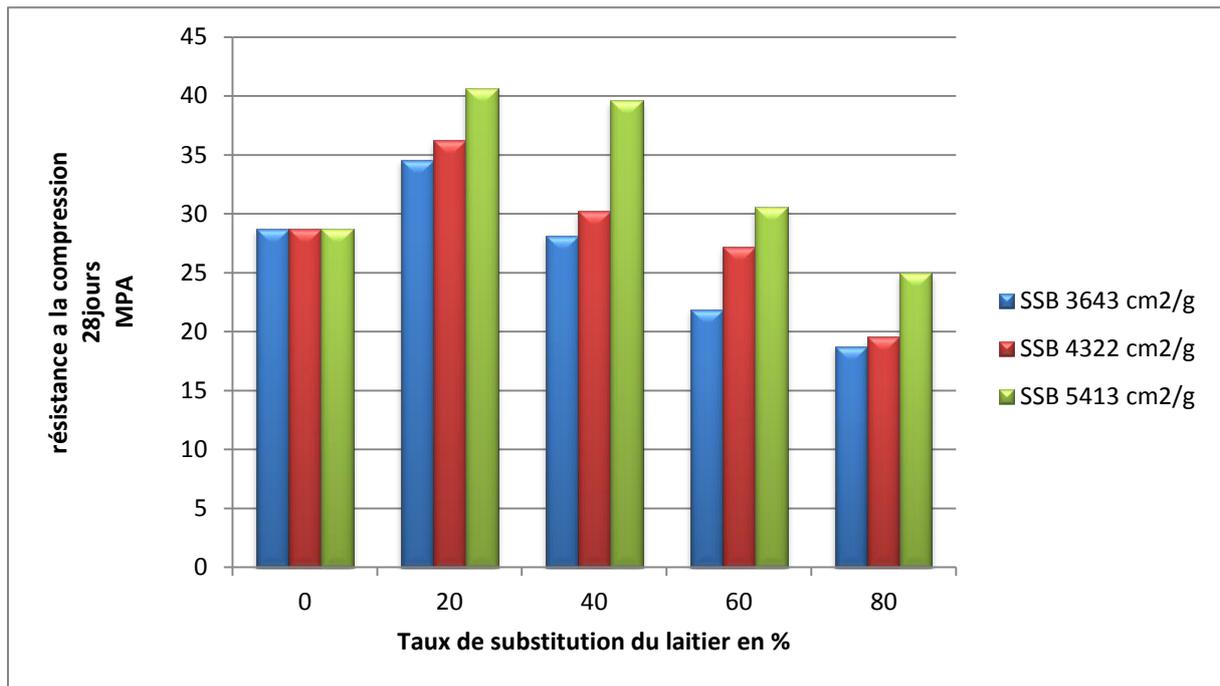


Figure 44: histogramme représentatif de R_c en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.

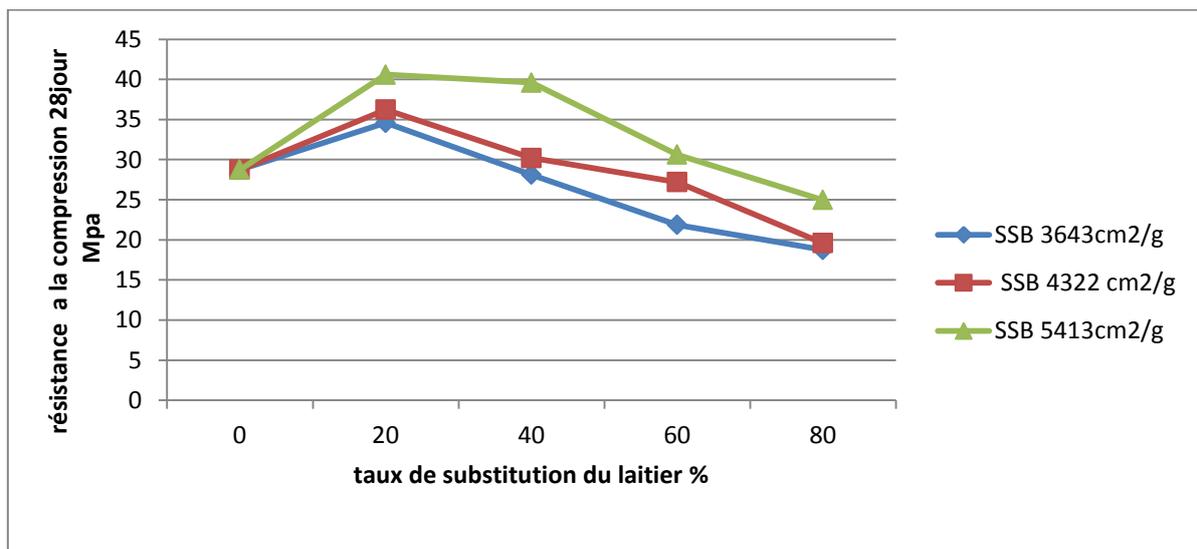


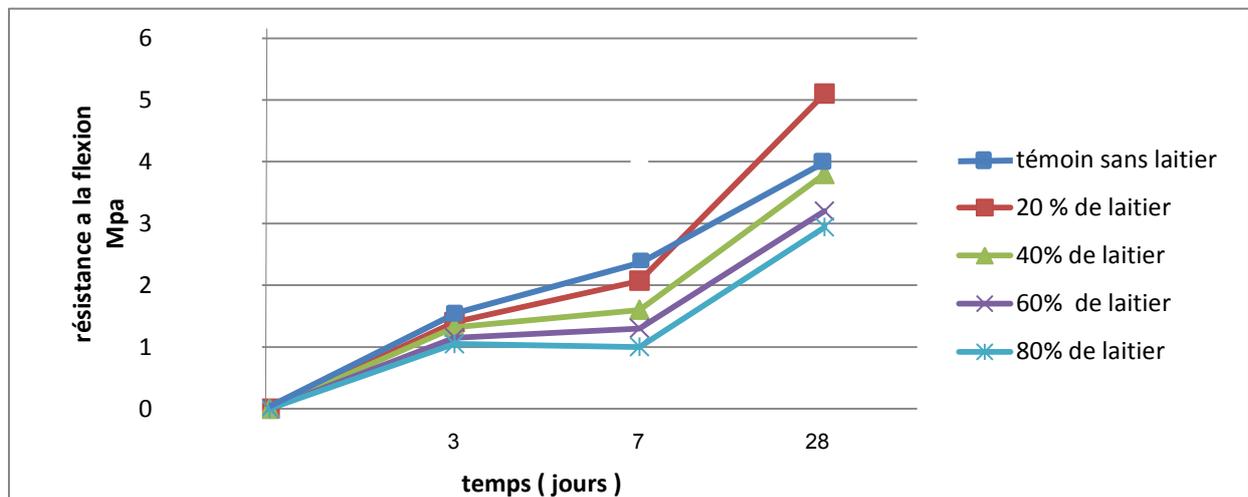
Figure 45: graphe représentatif de R_c en fonction de % de laitier pour les 3 SSB.

IV.1.2.2 Pour l'activation thermique

IV.1.2.2.1 Les Résistances à la flexion

Tableau 23: Résistances à la flexion. (Activation thermique).

Pourcentage	Résistance 3jour (MPa)	Résistance 7 jour (MPa)	Résistance 28 jour (MPa)
Témoin	01.49	02.30	04.00
20%	01.40	02.07	05.10
40%	01.32	01.60	03.80
60%	01.15	01.30	03.20
80%	01.05	01.00	02.94

Figure 46: graphe représentatif de R_f en fonction de l'âge pour les différents %.

IV.1.2.2.2 Les résistances à la compression

Tableau 23: résistances à la compression. (Activation thermique).

Pourcentage	Résistance 3jour (MPa)	Résistance 7 jour (MPa)	Résistance 28 jour (MPa)
Témoin	9.5	18.9	26.50
20%	8.2	16.9	28.40
40%	7.24	14.8	25.90
60%	6.66	12.68	21.00
80%	5.1	6.3	19.00

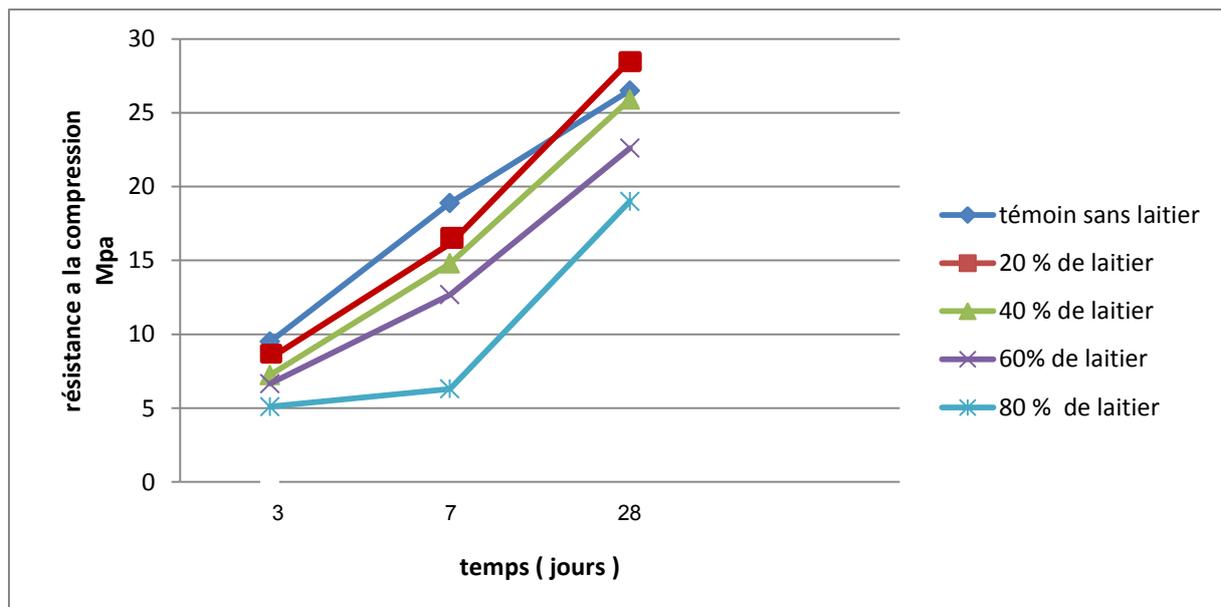


Figure 47: graphe représentatif de R_c en fonction de l'âge pour les différents %.

IV.1.2.3 Activation chimique

IV.1.2.3.1 Résistances à la flexion

Tableau 24: Résistances à la flexion. (Activation chimique).

pourcentage	Résistance 3j	Résistance a 7j	Résistance à 28j
60%	2.30	4.80	6.33
80%	1.75	3.20	4.75
100%	1.20	1.70	3.90

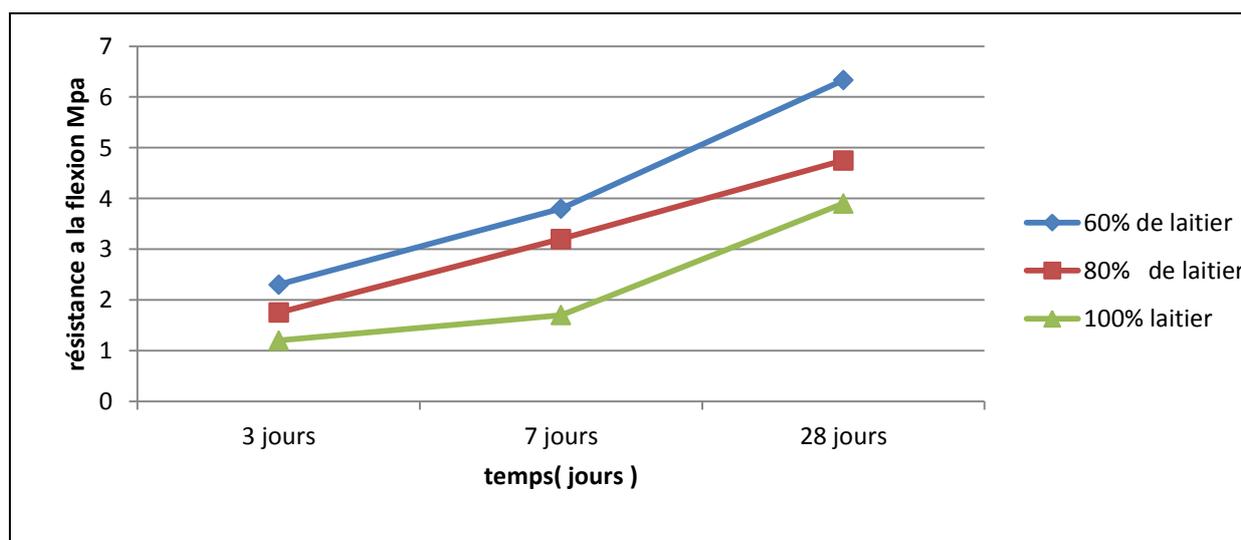
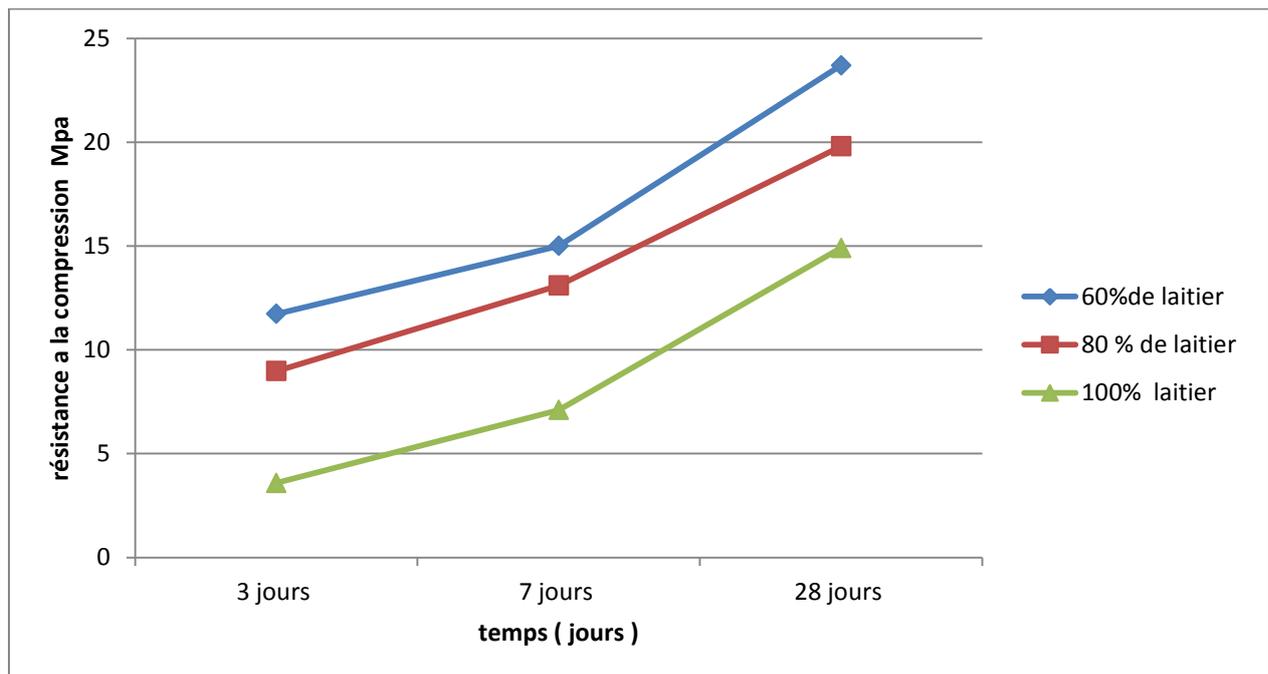


Figure 48: graphe représentatif de R_f en fonction de l'âge pour les différents %.(activation chimique).

IV.1.2.3.2 Résistances à la compression

Tableau 25: résistances à la compression. (Activation chimique).

pourcentage	Résistance 3j	Résistance a 7j	Résistance à 28j
60%	11.73	15.00	23.70
80%	08.98	13.10	19.80
100%	03.59	07.10	14.90

Figure 49: graphe représentatif de R_c en fonction de l'âge pour les différents %.(activation chimique).

IV.2 Interprétations

IV.2.1 Activation mécanique

➤ Pour $SSB_1=3643 \text{ cm}^2/\text{g}$

- Amélioration de la résistance à la compression a 28 jours pour un dosage de 20% de laitier ($R_c=40.60 \text{ MPa}$) par rapport au témoin ($R_c=28.75 \text{ MPa}$) dosage
- Pour un dosage de 40% de laitier, une résistance à la compression a 28 jours presque égaux à celle de témoin
- Pour un dosage de 60% à 80% de laitier, une dégradation de résistance mécanique a la compression

- Pour $SSB_2 = 4322 \text{ cm}^2/\text{g}$.
 - De 20% à 40% de laitier, une résistance mécanique à la compression plus élevée à celle de témoin.
 - Une diminution de résistance à la compression pour un dosage de 60% de laitier
 - Pour 80% de laitier une chute de résistance mécanique à la compression (18.59 MPa)
- Pour $SSB_3 = 5413 \text{ cm}^2/\text{g}$
 - De très bonnes résistances à la compression comparée au témoin
 - Pour les dosages de 20% à 60% de laitier une augmentation de la résistance à la compression avec une résistance remarquable pour le dosage de 40% (39.90 MPa)
 - Pour 80% une faible diminution de résistance mécanique à la compression comparée (24.97 MPa) au témoin.

IV.2.2 activation thermique

- Dans le cas d'un dosage en laitier de 20% de laitier ($R_c = 28.40 \text{ MPa}$). On remarque une petite amélioration de la résistance mécanique à la compression par rapport au témoin. ($R_c = 26.50 \text{ MPa}$).
- Une faible diminution de la résistance mécanique à la compression pour les dosages de 40% et 60% en laitier.
- Une diminution remarquable de résistance à la compression pour un dosage en laitier de 80%.

Remarque

Comparé un mortier avec le même $SSB = 3643 \text{ g}/\text{cm}^2$ et les mêmes pourcentages au mode d'activation mécanique. Les éprouvettes ont subi un choc thermique qui provoque des microfissures qui influent sur les résistances mécaniques.

IV.2.3 Activation chimique

- On remarque que la résistance mécanique à la compression diminue avec l'augmentation de taux de substitution du laitier.
- On constate que le laitier a développé des propriétés liante avec une résistance mécanique à la compression à 28 jours $R_{C28} = 14.9 \text{ MPa}$.

IV.2.4 Résistance mécanique a la flexion

Pour les 3 modes d'activation de laitier:

- Pour les dosages de 20% à 60% de laitier on remarque une petite augmentation de la résistance mécanique a la flexion avec une dispersion relativement faible ± 0.4 MPa.

Les mortiers résiste très bien à la compression mais leurs résistance à la flexion est très faible (10 fois moins).

IV.2.5 Influence de la quantité du laitier sur les mortiers

IV.2.5.1 Influence de la quantité du laitier et sa finesse sur la consistance et la prise

D'après les résultats obtenus on constate que l'augmentation du pourcentage du laitier a un double effet :

- augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte du liant,
- retardement du temps de prise.

On remarque aussi que l'addition progressive du laitier se traduit par une augmentation de la quantité d'eau. Cela peut être dû à la porosité du laitier ajouté. De même, on remarque que les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de laitier. Cela s'explique par le fait que la réaction chimique est retardée à court terme le laitier granulé ne développe pas de propriétés liantes dans l'eau à température ambiante à cause de la formation d'une couche acide autour du grain du laitier qui empêchant le dernier de s'hydrater, ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de l'augmentation de la quantité du laitier ajouté, Par conséquent les cristaux de CSH (élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte) existent uniquement en faible quantité aux très jeunes âges. L'augmentation de la finesse de laitier contribue à une augmentation de la consistance de la pâte de ciment. Cela est dû au fait que la surface de mouillage du liant augmente au fur et à mesure que le laitier étudié est broyé plus finement.

IV.2.5.2 L'influence de la quantité du laitier et sa finesse sur les résistances mécaniques

Dans cette partie du travail, nous avons étudié en premier lieu l'effet de la variation de la quantité de laitier ajouté au ciment à différents pourcentages (0%, 20%, 40%, 60% et 80%) et en second lieu l'effet de sa finesse (surface spécifique) (3643 cm²/g, 4322 cm²/G et 5413 cm²/g) sur les résistances.

D'après les résultats obtenus, on constate que :

- l'incorporation ou l'addition progressive du laitier granulé de haut fourneau dans le ciment généralement entraîne une diminution des résistances mécaniques. Cela s'explique par le fait que l'incorporation du laitier dans le ciment entraîne systématiquement une réduction des minéraux C_3S et C_2S . Ces derniers, sont donc les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances à court et à moyen terme.
 - L'augmentation de la surface spécifique de laitier granulé de $SSB_1=3643\text{cm}^2/\text{g}$ à $SSB_3=5413\text{cm}^2/\text{g}$ améliore nettement les résistances mécaniques pour le mortier contenant jusqu'à 40 % de laitier (résistances comparables à celles d'un mortier témoin). Ce résultat confirme le rôle physique du laitier finement broyé qui consiste à remplir les vides entre les grains de ciment (de l'ordre du micron). Ce remplissage fait augmenter la Compacité du mortier et par conséquent sa résistance. Aussi, il ne faut pas négliger le rôle chimique du laitier qui consiste à améliorer la microstructure de la pâte en fixant la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par l'hydratation du ciment, cette dernière se présente sous forme de plaquettes de faibles résistances. Cette réaction pouzzolanique donne naissance à un deuxième silicate de calcium hydraté supplémentaire (C-S-H), principal responsable du durcissement de la pâte de ciment [33].
- Pour les dosages de 20% à 40% on remarque une augmentation des résistances mécaniques dû probablement à une germination hétérogène. Toutefois, à l'âge de 28 jours les mortiers contenant jusqu'à 60% du laitier avec une finesse de $5413\text{cm}^2/\text{g}$ atteindront une résistance plus élevée à celles d'un mortier témoin sans ajout ce qui nous permettra d'obtenir un mortier de classe acceptable et faire ainsi une économie de ciment.

IV.2.6 Influence du mode d'activation sur les propriétés physiques et mécaniques

On utilisera un laitier activé selon trois méthodes différentes :

1. Activation mécanique
2. Activation thermique
3. Activation chimique

En comparant les résultats des essais physico-mécaniques sur les mortiers étudiés, on constate que l'activation mécanique donne les meilleurs résultats, ou on a augmenté la surface spécifique de laitier utilisé par rapport à l'activation thermique et chimique.

La surface spécifique joue un rôle très important physiquement et mécaniquement qui influence d'une façon directe sur l'indice hydraulique de laitier. (Qualité de laitier).

Conclusion et recommandations

Le taux d'intégration actuel du laitier granulé dans le ciment (20 % en moyenne) est faible et ne permet pas d'absorber la production des hauts fourneaux d'EL HADJAR. L'étude de la valorisation du laitier de haut fourneau d'EL HADJAR dans les ciments a apporté quelques éléments de réponse quant à la possibilité d'introduire le laitier granulé dans les ciments comme addition minérale active et à quel taux de substitution

Pour répondre à ces questions, 3 modes d'activation de laitier sont élaborés :

- Activation Mécanique par augmentation de broyage de laitier afin d'avoir 3 SSB différents.
- Activation Thermique : utilisé un SSB proche à celui du ciment $SSB = 3643 \text{ cm}^2/\text{g}$, les éprouvettes on subit un traitement thermique avec
 - Température 80 C°
- Activation chimique : On a utilisé une activation mixte par l'ajout de 1.5% de la soude (Naoh) et la même quantité de carbonate de sodium (Na_2CO_3).

L'ajout de laitier granulé diminue les résistances à court et moyen terme à peu près proportionnellement avec le pourcentage de laitier rajouté, Mais les cinétiques de durcissement étant différentes On a montré que l'utilisation des laitiers granulés ne répond pas uniquement à un souci environnemental mais contribue à certaines améliorations des propriétés physiques et mécaniques

Les principaux constats et conclusions tirés de ce travail sont :

- l'addition progressive du laitier se traduit par une augmentation de la quantité d'eau et un retardement de temps de prise
- L'augmentation de la surface spécifique de laitier granulé de $3643 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $5413 \text{ cm}^2/\text{g}$ améliore nettement les résistances mécaniques.
- Les Résistances mécanique à la compression augmentent pour un taux de laitier de 20% à 40% de laitier ajouté ($SSB 5413 \text{ cm}^2/\text{g}$ $R_C 20\%$, $40\% \approx 40 \text{ MPa}$).
- Pour des dosages de 40% à 80% on a enregistré une faible diminution des résistances mécaniques.

- Les résultats obtenus avec l'activation mécanique étant les plus performants mécaniquement et physiquement
- Les laitiers présentent des résistances à long terme voisines ou peu élevée à celles d'un ciment portland CEM1 Les résultats obtenus nous permettront d'obtenir un mortier de classe acceptable et faire ainsi une économie de ciment, Tout en mettant en évidence l'intérêt du broyage fin du laitier qui joue un rôle physique et chimique important dans l'hydratation dont l'augmentation de la surface spécifique de laitier étant préférable.

En fin, Nous proposons d'utilisé une activation mécanique de laitier et d'augmenter le dosage jusqu'à 60% de substitution du laitier à condition de le broyer suffisamment et pour le retardement de délai de prise l'utilisation d'un adjuvant accélérateur de prise reste un choix.

Les ciments à forte teneur en laitier se caractérisent par une faible chaleur d'hydratation, qui peut être mise à profit pour le coulage d'éléments massifs et le bétonnage par temps chaud comme pour plusieurs types d'ouvrages: les routes, les ouvrages en masse et les ouvrages hydrauliques.

Annexe

1. Les essais physico-chimiques :

1.1. Masse volumique absolue :

1.1.1. Principe de la mesure : (avec le CHATELIER)

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit, lorsqu'on y introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue. La méthode nécessite également une balance au décigramme, voluménomètre et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre : ce sera par exemple du tétrachlorure de carbone, si la poudre est du ciment (ou bien on peut remplacer le tétrachlorure par le pétrole).

1.1.2. Équipement nécessaire :

- Un voluménomètre d'une contenance minimale de 50 cm³.
- Un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1 °C.
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment, du toluène par exemple (le benzène, le pétrole, ne doit plus être utilisé).
- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre, précis à 0,1 °C, permettant de connaître la température du laboratoire.

1.1.3. Conduite de l'essai :

Remplir l'appareil de tétrachlorure de carbone jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions zéro et 1. Éviter de mouiller les parois lors du remplissage. Immerger le voluménomètre dans un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1 °C. Pendant l'équilibrage de température, peser une masse de ciment de 64 g à 0,1 g près.

- a) Repérer exactement le niveau atteint N_0 .
- b) Verser le ciment très lentement (en $\frac{1}{4}$ d'heure environ) dans l'appareil en prenant garde à ne pas laisser de dépôt sur les parois.

- c) Déplacer le volumétre contenant le ciment, de récipient et le poser sur la table.
Boucher le volumétre, l'incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va-et-vient de manière à faciliter le départ de l'air.
- d) Replacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N1 du liquide après équilibre
- La masse volumique absolue est donnée par le rapport:

$$\rho_c = \frac{64}{N_1 - N_0} \cdot g / cm^3$$

1.2. Mesure de la surface spécifique Blaine « EN 196-6 / NF P 15-476 » :

1.2.1. Mode opératoire :

Le principe de fonctionnement de cette appareil est comme suit :

- a) On prend notre échantillon et on le met dans la cellule de l'appareil «après avoir placé la grille et un papier a filtre ».
- b) On met un autre papier sur le liant et on tasse avec le piston.
- c) On place la cellule dans l'ajutage et on ouvre le robinet et grâce a la poire aspirante, on aspire l'air qui se trouve dans le tube et ainsi le liquide vas se déplace petite a petite au niveau des repères jusqu'à ce qu'il atteint le niveau supérieur.
- d) On ferme le robinet et on calcule le temps que met le liquide pour atteindre son niveau initial.
- e) On calcule la surface spécifique de Blaine par la formule ci-dessous :

K : constante de l'appareil

η : Viscosité de l'air à T° de l'essai

ρ_c : masse volumique du ciment

m : masse de ciment

V : volume de la cellule

$$p = 1 - \frac{m_c}{V \cdot \rho_c} = 0,500$$

$$S = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{p^3}}{1-p} \cdot \frac{1}{\sqrt{0,1 \cdot \eta}}$$

1.2.2. Appareillage :

La surface Blaine des ciments varie de 3100 à 6000 cm²/g.

Finesse - Méthode Blaine (EN 196-6 / NF P 15-476).

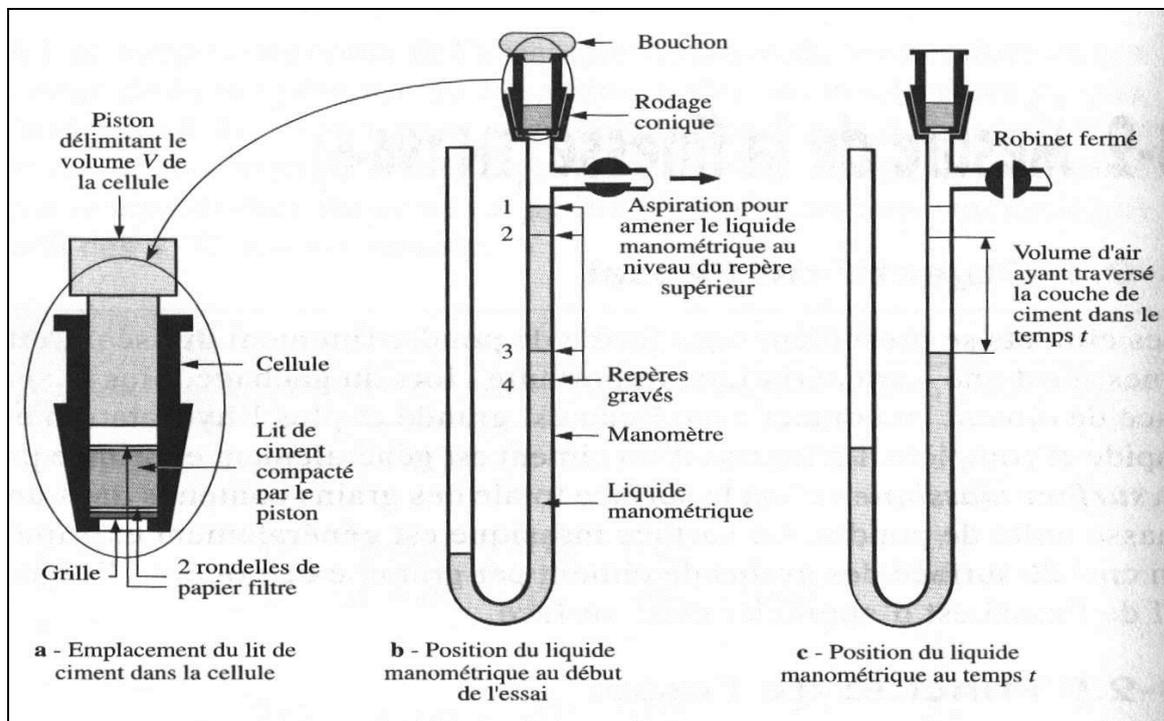


Figure 1 : La surface spécifique de Blaine

1.3. Consistance de la pâte normale du ciment « NF P 15-144 » :

1.3.1. Définition de la pâte normale :

La pâte normale est une pâte pure de consistance normale, c'est à dire, telle qu'en opérant avec l'appareil de Vicat (voir fig. 2), la lecture donnant l'épaisseur de la pâte restant entre l'extrémité inférieure de la sonde et le fond au moule quand celle ci a cessé de s'enfoncer sous son propre poids, est de 6mm ± 1mm.

1.3.2. Mode opératoire :

1.3.2.1. Préparation de la pâte normale :

Il est effectué au moyen du malaxeur spécifié dans la norme NF P15 – 411. Deux vitesses de rotation du batteur doivent pouvoir être réalisées:

- Une vitesse lente d'environ 140 trs / mn.
- Une vitesse rapide, double de la précédente, d'environ 280 trs / mn.

Le malaxeur étant en position de fonctionnement:

- a) Verser dans le récipient la quantité d'eau préalablement déterminée par tâtonnements successifs de manière à réaliser la consistance normale ; lui ajouter le liant 810g pour remplir les moules cylindriques (12 moules à remplir pour chaque malaxage).
- b) Mettre le malaxeur à la vitesse lente pendant une minute, puis à la vitesse rapide pendant 2 minutes.
- c) Arrêter le mouvement, avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et fond du récipient de façon qu'aucune fraction de pâte n'échappe au malaxage.
- d) Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 minutes à vitesse rapide.

1.3.2.2. Confection de l'éprouvette :

Introduire immédiatement la pâte malaxée dans le moule tronconique (préalablement placé sur une plaque de base plane en verre légèrement graissée) remplir à refus sans tassement ni vibrations excessifs, araser la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule, perpendiculaire à la surface et déplacer d'un mouvement de scie de faible amplitude.

1.3.2.3. Vérification de la consistance normale :

L'appareil de Vicat, plateau nu, ayant été muni de la sonde de consistance, placer immédiatement la moule rempli de la pâte dans l'axe de la sonde ; laisser descendre cette dernière perpendiculairement à la surface de la pâte et l'immobiliser à son contact ; marquer un temps d'arrêt puis abandonner la sonde à elle même sans vitesse initiale.

Procéder à la lecture de l'épaisseur de la pâte, quand la sonde a cessé de descendre sous son propre poids.

1.3.3. Appareil utilisé :

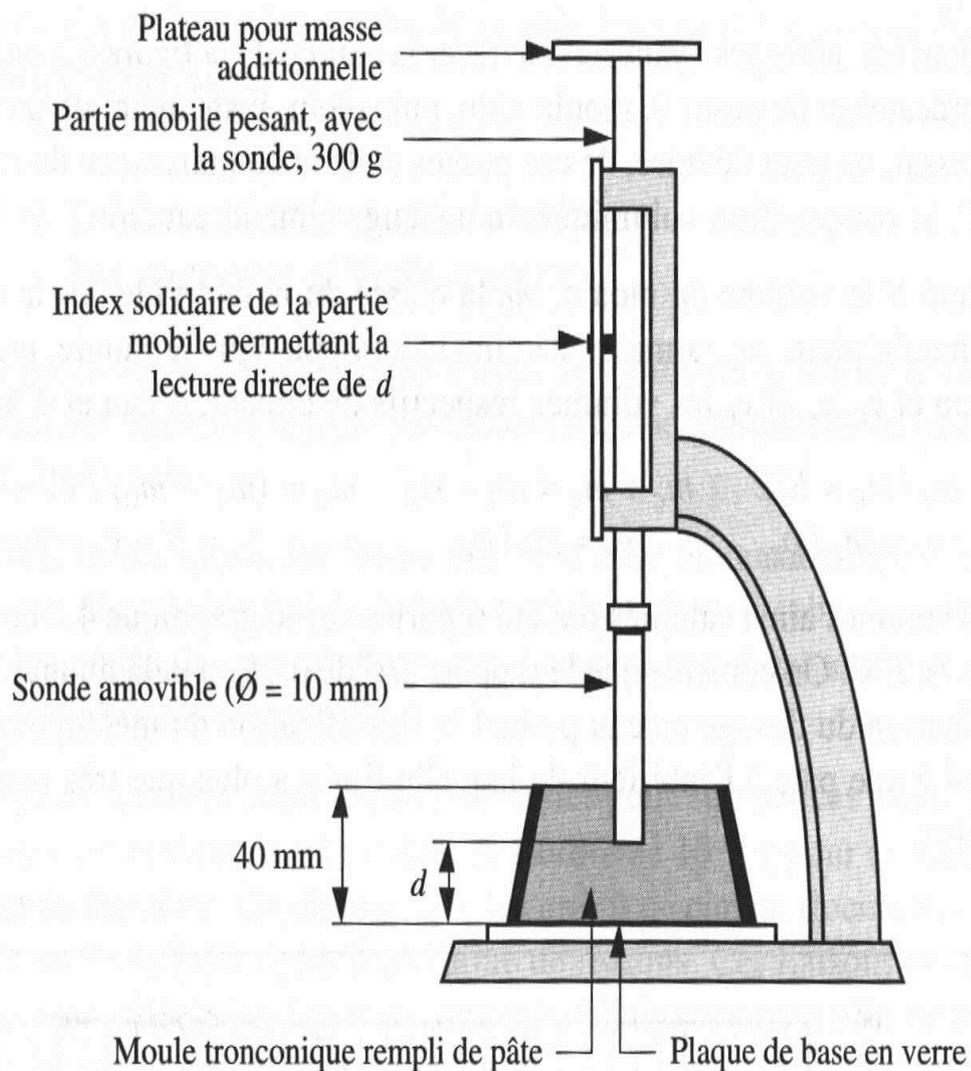


Figure 2 : appareil de Vicat muni d'une sonde.

1.4. Détermination du temps de prise «NF P 15-431 » :

1.4.1. Mode Opérateur :

- Régler préalablement l'appareil Vicat muni de l'aiguille.
- Remplir le moule Vicat de pâte de consistance normale et arasée.
- Conserver le moule rempli et arasé ainsi que sa plaque de base dans l'armoire et au bout d'un temps convenable les placer dans l'axe de l'aiguille de Vicat.
- Abaisser l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte.

- e) Observer une pause de 02 secondes à cette position de manière à éviter une vitesse initiale ou une accélération forcée des parties mobiles.
- f) Lâcher alors rapidement les parties mobiles, l'aiguille doit pénétrer verticalement dans la pâte.
- g) Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30 secondes après la libération de l'aiguille.
- h) La lecture qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de pause doit être enregistrée conjointement avec le temps écoulé depuis l'instant zéro.
- i) Respecter l'essai de pénétration sur la même éprouvette à des positions convenablement espacées à plus de 10 mm du bord du moule, à des intervalles de temps espacés (exemple : 10 mn).
- j) Conserver l'éprouvette entre les essais de pénétration dans l'armoire humide.
- k) Nettoyer l'aiguille aussitôt après chaque pénétration.

1.4.2. Calcul :

Le temps mesuré depuis l'instant zéro au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plaque de pause soit T_1 , d'ou $T_d = T_1 - T_0$

Le temps de fin de prise est le moment ou l'aiguille ne pénètre plus dans le moule soit T_2 d'ou $T_f = T_2 - T_0$.

- T_d = temps de début de prise.
- T_f = temps de fin de prise.
- T_0 = temps du début des prises des essais.

NB: T_d doit être supérieur à 1h 30mn.

Selon : **NA-230/1990** \Leftrightarrow **NF P 15-431/1964.**

2. Les essais mecaniques :

2.1. Etude sur les mortiers normalises « NF P15-403 » :

2.1.1. Définition et composition:

Le mortier normal tel qu'il est défini selon la NF P15-403, se compose en masse d'une partie de liant et de trois parties de sable normal et d'une demi-partie d'eau ($E/C = 0,50$).

Elle se résume à calculer les résistances mécaniques à la flexion et à la compression simple à 28 jours, avec des pourcentages de Laitier de 0 % à 80% .

La numérotation des échantillons est la même que celle énumérée dans la partie concernant l'étude de la composition chimique des échantillon (même pourcentage d'ajout).

2.1.2. Confection des éprouvettes prismatiques «4×4×16 »:

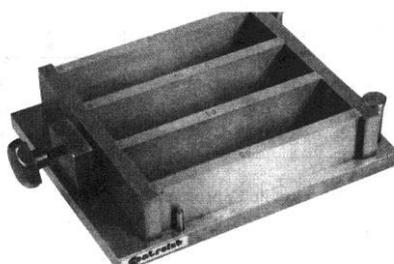


Fig. 3 : Moule à 3 alvéoles pour éprouvettes «4×4×16 ».

2.1.2.1. Mortier normal :

Pesée des constituants : La masse des constituants nécessaires aux essais est déterminée en fonction de l'éprouvette (ou des éprouvettes) à préparer ; elle pesée avec une précision de 0,5%. Dans le cas de la préparation de 3 éprouvettes 4×4×16 , les quantités sont respectivement les suivantes :

Sable sec1350 g ;
Liant450 g ;
Eau225 g (E/C = 0,50)

Malaxage :Le malaxage doit être effectué au moyen du malaxeur spécifié par la norme .Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- a) Mettre 225 ml d'eau ;
- b) Mettre 450 g de liant ;
- c) Malaxer pendant 30s à vitesse lente , puis malaxer pendant 2 mn à vitesse rapide.
- d) Arrêter le mouvement avec le batteur démonter de son axe racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie de mortier n'échappe au malaxage.
- e) Après remontage du batteur reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide .

2.2. Confection des éprouvettes :

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs (Tonitechnic) conformément au mode opératoire suivant :

- a) Le malaxage étant terminé, forme une galette rectangulaire .

- b) La partager en 06 fractions égales, le moule ayant été fixé sur la table à chocs muni de sa hausse .
- c) Introduire dans chacun des 3 compartiments une fraction de la galette, égaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale, déplacée dans un double aller et retour .
- d) Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche après 60 nouveaux chocs.
- e) Le moule étant tiré de la machine et débarrassé de la hausse, araser le mortier avec l'arrête de la règle métallique plate, maintenue verticale et déplacée par un mouvement de scie de faible amplitude et sur la longueur des éprouvettes .
- f) Nous avons préparé 12 batteries de 3 éprouvettes « 4×4×16 » pour chaque âge (7,28 et 60 jours), sort un total de 72éprouvettes. Pour cela on eu besoin de :

Pour une batterie de 3 éprouvettes	En total (21 moules) :	
Sable (oued Souf)	: 1350 g	⇒ 28.350 kg
Liant (% ciment+% Laitier)	: 450 g	⇒ 09.450 kg
Eau	: 225 ml	⇒ 04.725 litres .

2.3. Essai mecanique de rupture par flexion (NF P 14-451):

2.3.1. Définition :

L'éprouvette utilisée dans l'essai de flexion est une éprouvette prismatique 4 × 4× 16 en mortier . La rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine munie d'un dispositif à trois rouleaux

2.3.2. Dispositif de l'essai :

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10 mm de diamètre, distant de 100 ou de 106,7 mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage,et un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des deux premiers, et transmettant la charge F.

- ✚ Pour transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux rouleaux doivent pouvoire osciller légèrement de leur centre dans le plans vertical perpendiculaire au grand axe de l'éprouvette.

2.3.3. Machine d'essai :

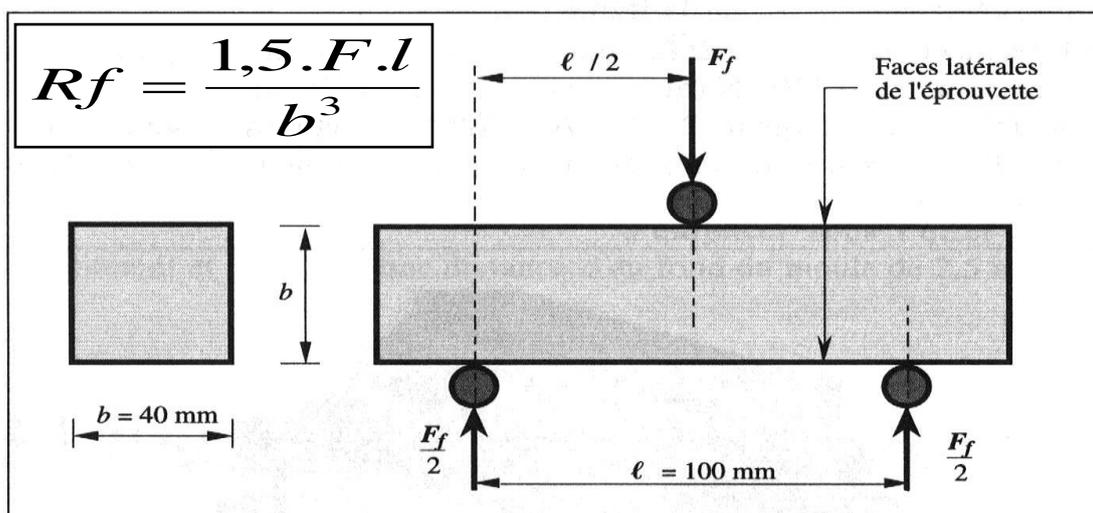


Figure 4 : Essai mécanique de rupture par flexion

- Le dispositif à rouleaux est adapté dans une machine d'essai permettant d'exercer et de mesurer de faibles charges (inférieure à 1000 daN) avec une précision de 1% . La charge F doit croître progressivement de $5 + 1 \text{ daN / s}$.

2.4. Résistance mécanique a la compression :

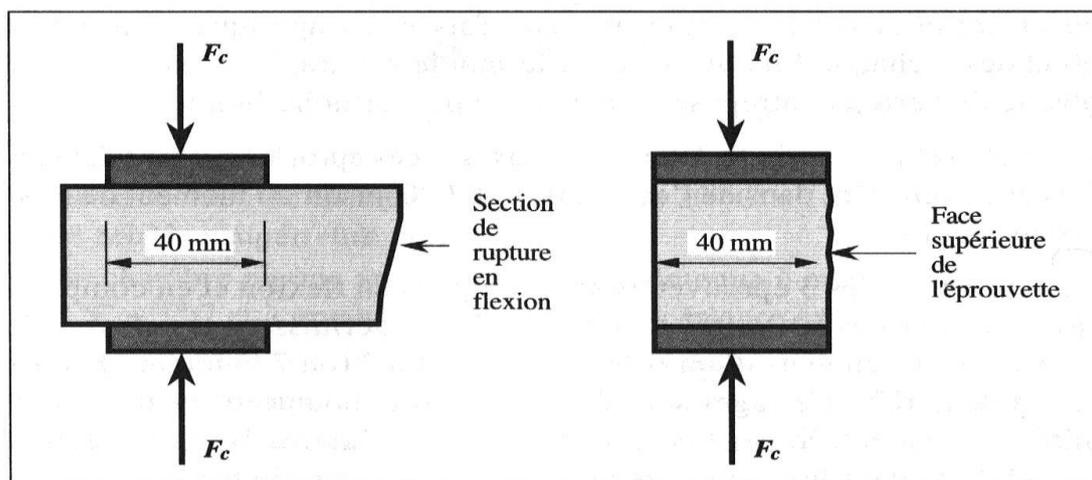
2.4.1. Définition :

L'essai de compression est exécuté sur une presse pour matériaux durs, sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai de flexion. Si la compression a lieu plus de 20mm après celui de la flexion, il faut conserver les demi éprouvettes dans l'armoire humide.

2.4.2. Dispositif de l'essai :

Chaque demi prisme est essayé en compression sur ses faces de moulage, sous une section de $40 \times 40 \text{ mm}$, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur, de $40 \pm 0,1 \text{ mm}$ de largeur, de longueur supérieur à 40mm et dont la tolérance de plénitude est de 0,01mm. Ces plaques sont en acier dur d'une dureté Vickers d'au moins 600, ou de préférence en carbure de tungstène.

Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm. (voir fig. 5)



$$Rf = \frac{F_c}{b^2}$$

Figure 5 : Résistance mécanique a la compression

2.4.3. Machine d'essai :

L'ensemble du dispositif et de l'éprouvette est lacé entre les plateaux d'une presse répondant aux spécifications du fascicule de documentation FD P n°18-308 « Spécification de construction, d'emploi et de contrôle des presses destinées à l'essai de compression des matériaux durs ».

- **Contrainte de rupture à la compression :**

La charge doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 10 et 20 bars /s. Toutefois, jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée, la charge peut croître rapidement. La contrainte de rupture par compression. La valeur retenue pour chacune des épreuves est la médiane des résultats élémentaires.

Références bibliographique

- [1] **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [2] **KOMAR A.**, « Matériaux et éléments de construction », 3ème édition Mir, 1978, 380 p.
- [3] **BAHIM MOURAD** « sous produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el HADJAR dans les matériaux a matrice cimentaire»; thèse Doctorat, université de ANNABA; 2005.
- [4] **ROPER H.**, « Composition, morphologie, hydratation et propriétés adhésives de quelques laitiers granulés », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 13 - 17
- [5] **REGOURD M.**, « Les laitiers de haut fourneau », rapport principal du 8ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Rio, volume 1, thème 3, 1986, p 200 - 229
- [6] **DEMOULIAN E., GOURDIN P., HAWTHORN F. et VERNET C.**, « Influence de la composition chimique et de la texture des laitiers sur leur hydraulité », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 89 - 94.
- [7] **SMOLCZYK H. G.** , Duisburg, Rheinhausen, « L'influence de la chimie du laitier sur les résistances des ciments de haut fourneau », Zement, KalkGips n°6, 1978
- [8] **GOURDIN P.**, « Composition minéralogique potentielle des laitiers vitrifiés de haut fourneau », Ciments – bétons – plâtres et chaux. N° 727, 6, 1980, p 363.
- [9] **REGOURD M.**, « Structure and behaviour of slag portland cement hydrates », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 10.
- [10] **OUILI A.**, «Contribution à l'activation alcaline des laitiers de hauts fourneaux », Thèse Génie Civil, INSA Lyon, 1994, 153 p.
- [11] **DRON R. et BRIVOT**, « Approche du problème de la réactivité du laitier granulé », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Volume 2, Thème 3, p 134 –139, Paris, 1980
- [12] **KONDO R. and UEDEA S.**, 5th ISCC, vol 2, 1969, p 203.
- [13] **REGOURD M., THOMAS J. H., BAILLEF P. and TOURAY J. C.**, « Blast furnace slag hydratation surface analysis », Cement and Concrete Research 13, 1983, 549 - 556.
- [14] **RICHARDSON I. G., GROVES G W.**, J.Mater.Sci 27, 1992, p 6204 – 6212.

- [15] **LOGNOT I.**, « Etude de l'hydratation du laitier de hauts fourneaux et de ses produits en présence de différents activants : application aux coulis d'injection », Thèse de Doctorat, Université de Dijon, 1996.
- [16] **DRON R.**, « Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline », Rapport de recherche LPC, 1973, n° 38.
- [17] **CHAPELLE**, « Attaque sulfocalcique des laitiers et pouzzolanes, CERILH, 1958, 63 p.
- [18] **MANTEL D. G.**, « Activity of five granulated blast furnace slag with eight different portland cements », ACI, Materials Journal, vol 91, n°5, 1994, 471 – 475.
- [19] **KORTBAOUI A.**, « Introduction au laitier de haut fourneau et activation des laitiers par les alcalis: Caractérisation chimiques et mécaniques », projet de fin d'étude de session, université de Sherbrooke 1992, non paginé.
- [20] **D'ANS J., EICK H.**, « The system CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O at 20 °C », Zement-Kalk-Gips, 1953, Vol.6, n° 9, pp 302 -311
- [21] **DOUGLAS E. and BANDSTETR J. A.**, « preliminary study of alkali activation of gypsum anhydrite - slag mixtures », ACI, Journal Materials, Vol 25, n° 2, 1990.
- [22] **MCKURDY K G., STEIN H N.**, Cem Con Res, 3, 1973, pp 509 – 520
- [23] **TEOREANU.I et GEORGESCU.M.**, « Activation de quelques composés alumineux au système CaO – MgO – Al₂O₃ – SiO₂, revue Roumaine, Vol 12, p 529 – 534, 1969
- [24] **VERNET C. DEMOULIAN E., GOURDIN P., HAWTHORN F.**, « Cinétique de l'hydratation des ciments au laitier », 7ème congrès international de la chimie du ciment, Paris, 1980, volume 2, thème 3, pp 128 – 133.
- [25] **REGOURD M., MORTUREUX B., GAUTIER E., HORNAIN H. et VOLANT J.**, « Caractérisation et activation thermique des ciments au laitier », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 105.
- [26] **FRIGIONE G., SERSALE R. et COLLELA C.**, « Manufacts obtained by compaction and hydrothermal treatment of granulated blast furnace slag, Silicates Industriels, 42, p 4 – 5, 1996.
- [27] **SATARINE.V I., VCHESTOPEROV S., SYRKINEY M., CHOKOTOVA B. G., ZDOROV A. I. et FEDWER L. A.**, « Intensification des processus de durcissement du ciment portland de laitier et perfectionnement de la structure du ciment durci », 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, vol 2, thème 3, 1980, p 69.
- [28] **BEHIM M., REDJEL B., JAUBERTHIE R.**, « Réactivité du laitier de hauts fourneaux d'Annaba (Algérie) en substitution partielle du ciment, Journal de Physique IV, 12, France, p223 – 228, 2002.

[29] VICAT, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.

[30] LANGEN, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.

[31] PRUSSING, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.

[32] LURMAN, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.

[33] NASRI ABDELGHANI, «effets de l'activation mécanique de laitier de haut Fournaux sur le comportement mécanique de mortier» université de M'Sila 2006.

Résumé

Le Laitier granulé de haut fourneau broyé est utilisé comme ajout minéral dans de nombreux pays.

En Algérie, son dosage est limité entre 15% et 20% en remplacement de ciment cause d'une diminution significative de la résistance mécanique initiale, dans ce travail expérimental, on a fait varier, d'une part, le pourcentage du laitier dans le ciment. Et d'autre part, le mode d'activation (mécanique, thermique et chimique).

D'après les résultats obtenus, il ressort : "un mortier confectionné à partir d'un ciment composé contenant jusqu'à 60% de laitier peut atteindre des résistances mécaniques (R_c et R_f) comparables à celle d'un témoin sans laitier.

D'après nos résultats, l'activation mécanique et l'augmentation de la surface spécifique du laitier granulé de haut fourneau sont les plus performants physiquement et mécaniquement par rapport à l'activation thermique et chimique.

Mots-clés : Laitier, activation. Surface spécifique, résistances mécaniques.

Abstract

Granulated blast-furnace slag is used as a supplementary cementitious material in replacement of cement in many countries.

In Algeria, it's proportion is usually limited to 15% and 20% of cement replacement owing to a significant decrease in early age mechanical strength. In this experimental works, on the one hand, the percentage of the slag in cement was varied, on other hand, activation mode (mechanical, thermal and chemical).

According to the experimental results, it follows: "a mortar prepared from composed cement containing until 60% of slag can reach mechanical strengths (R_c and R_f) comparable to those of a witness without slag.

Based on our results, the mechanical activation and the increase of the specific surface area of the granulated blast furnace slag are the most physically and mechanically efficient than the thermal and chemical activation.

Keywords: slag, activation, specific surface, mechanical strengths.

ملخص:

يتم استخدام خبث أفران الصهر المكسر كمضاف معدني في العديد من البلدان. في الجزائر. تقتصر الكمية المستعملة ما بين 15% و 20% كبديل للاسمنت بسبب الانخفاض الملحوظ في القوة الميكانيكية الأولية. في هذا العمل التجريبي. قمنا بتغيير. من جهة. نسبة الخبث في الاسمنت. و من ناحية أخرى. قمنا بتغيير طريقة التفعيل (ميكانيكيا. حراريا و كيميائيا).

وفقا للنتائج التي تم الحصول عليها. يمكن أن يصل الملاط المصنوع من الاسمنت المركب المحتوي على ما يقارب 60% من خبث الفرن إلى نتائج المقاومة الميكانيكية للضغط و للجبذ مقربة للملاط بدون خبث.

بناء على نتائجنا. يعد التنشيط الميكانيكي و زيادة مساحة السطح لخبث أفران الصهر الأكثر فعالية من الناحية الفيزيائية و الميكانيكية مقارنة بالتفعيل الحراري و الكيميائي.

الكلمات المفتاحية:

الخبث، التفعيل، المساحة السطحية، المقاومة الميكانيكية.