REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux

Thème

Effet de la finesse et le taux de remplacement de laitier du hauts fourneaux sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique du mortier de ciment

---

Présenté par

OULD ZMIRLI Mustapha rached
KERMEZLI Mohamed mohcine

Proposé et Dirigé par

Mr : TALAICHE Zoheir

Promotion Juin 2021

Remerciement

Nous remercions en premier lieu Dieu qui nous avons donnés ce bien là et pour que nous venons ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

- *Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur Monsieur* **TALAICHE Zoheir et SAFIDDINE Salim**

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel pour les facilités qu'ils n'ont accordés pour terminer ce travail.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail

Dédicace :

Je Dédie Ce Mémoire De Master A:

♥ Ma mère.

♥ Mon père.

♥ Mon frère Youcef,

♥ Tous nos professeurs

Mohcen

Dédicace

Merci Mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir.
La force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents et a mes freres otmane et abdelnour et leurs enfants et leurs femmes ma sœur sadjida et son mari et ses filles et ma fiance mariam et a toute ma famille et A mes amis avec qui j'ai partagé des moments des plus agréables A mes encadreurs qui me soutenu pour arriver au bout de ce travail

Mustapha

Résumé :

Le but de ce travail est d'étudier l'influence du taux de remplacement du l'aitier de hauts fourneaux (0 ; 10: 20et 30%)ct sa finesse sur les propriétés du mortier de ciment à l'état frais et durci L'étude à l'état frais consiste à mesurer l'affaissement et le temps de début de prise du mortier en fonction de la teneur en laitier dans le ciment. En revanche, la mesure de 1a résistance à la traction et à la compression, à 7 et 28 jours, des éprouvettes (4x4xl6cm') du mortier sera faite pour étudier l'effet à l'Etat durci.

mots clés : Laitier de hauts fourneaux ;mortier ;ouvrabilité :résistance mécanique.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير معدل الإحلال لجناح الفرن العالي (0 ، 10: 20 و 30٪) ودرجة نقاوتها ماعدا خصائص الملاط الأسمنتي في حالته الطرية والمتصلبة. تتكون الحالة من قياس الترهل ووقت ضبط الملاط كدالة لمحتوى الخبث في الأسمنت.من ناحية أخرى ، قياس مقاومة العمل والضغط ، في 7 و28 يومًا ، أنابيب الاختبار (16x4x4) من الملاط لدراسة التأثير في الحالة الصلبة.

الكلمات المفتاحية: خبث فرن الانفجار؛ ملاط ؛ قابلية التشغيل: مقاومة ميكانيكية.

Summary:

The aim of this work is to study the influence of the replacement rate of the blast furnace wing (0; 10: 20 and 30% and its fineness except the properties of the cement mortar in the fresh and hardened state. The study in the fresh state consists in measuring the sagging and the setting time of the mortar as a function of the slag content in the cement. On the other hand, the measurement of the resistance to action and to compression, at 7 and 28 days, test tubes (4x4xl6cm) of the mortar will be made to study the effect in the hardened state.

Keys words: Blast furnace slag; mortar; workability: mechanical resistance.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Titre	page
REMMERCIMENT	-
DIDICACE	-
Résume	-
Tableaux de matière	-
Liste des figures	-
Introduction générale	1
Chapitre I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
Introduction	2
I.1 Les mortiers de ciments	2
I.1.1 Généralités	2
I.1.2 Composition de mortier	3
I.1.3 Les sables	3
I.1.4 Les adjuvants	4
I.1.5 Les ajouts	5
I.1.6 Les différents mortiers	5
I.1.6.1 Les mortiers de ciment	5
I.1.6.2Les mortiers de chaux	5
I.1.6.3Les mortiers bâtards	5
I.1.6.4Mortiers fabriqués sur chantier	6
I.1.6.5Mortier industriel	6
I.1.7 Utilisation de mortier	7
I.1.8 Le dosage de mortier	7
I.1.9 Réalisation de mortier de ciment	7
I.1.10 Les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers de ciment	7
I.1.11 Les propriétés physiques des mortiers de ciment	9
I.2 La rhéologie des pates cimentaires	10

SOMMAIRE

I.2.1 Généralité	**10**
I.2.2 Propriétés rhéologiques	**10**
I.2.3 Seuil de cisaillement	**10**
I.2.4 Viscosité plastique	**10**
I.2.5 Thixotropie	**11**
I.3 Recyclage et valorisation de déchets	**12**
I.3.1 Généralité	**12**
I.3.2 Les déchets et les types des déchets	**13**
I.3.2.1 Définition d'un déchet	**13**
I.3.2.2 Origine de la production des déchets	**13**
I.3.2.3 Les déchets utilisés en génie civil	**14**
I.3.2.4 Valorisation de déchets	**17**
I.4 Le laitier	**19**
I.4.2 Le laitier de haut fourneau	**19**
I.4.3 Types de laitier de haut fourneau	**20**
I.4.3.1 Le laitier de haut fourneau est cristallisé	**20**
I.4.3.2 Le laitier de haut fourneau est dit vitrifié	**20**
I.4.3.3 le laitier vitrifié granulé	**20**
I.4.3.4 le laitier vitrifié bouleté	**20**
I.4.4 Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du laitier de haut fourneau	**21**
I.4.5 VALORISATION DU LAITIER DU HAUT FOURNEAU	**23**
I.4.6 Hydratation du laitier de haut fourneau	**24**
I.4.6.1 Réactivité hydraulique du laitier	**24**
I.4.6.2 Processus d'hydratation	**26**
I.4.7 Activation du laitier	**27**
I.4.7.1 Modes d'activation alcaline	**27**
I.4.8 Propriétés des ciments au laitier de haut fourneau	**31**

SOMMAIRE

I.4.9 Risque d'instabilité volumique	**31**
I.4.10 Caractéristiques environnementales	**32**
I.4.11Valorisation du laitier en Algérie	**32**
CHAPIRETE II MATERIAUX ET ESSAIS	
II.1. Introduction	**35**
II.2 Caractérisation des Matériaux utilisés	**35**
II.2.1 Sable	**35**
II.2.2 Ciment	**37**
II.2.2.1. Composition du ciment	**38**
II.2.3 Laitier de haut fourneau	**39**
II.2.4 Eau de gâchage	**40**
II..3 Malaxage et préparation	**40**
II.4 Préparation des éprouvettes	**42**
II.5 Conservation	**42**
II.6 Les essais sur les mortiers	**43**
II.6.1. Etat frais	**43**
II.6.1.1 Essais d'étalement au mini-cône	**43**
II.6.1.2 L'air occlus	**43**
II.6.2 Etat durci	**44**
II.6.2.1 Résistance à la compression	**44**
II.6.2.2Essai de traction par flexion	**45**
II.7 Organigramme D'expérience Etudier	**46**
CHAPIRETE III RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
III.1 Introduction	**48**
III.2 Formulation de mortier	**48**
III.3 État frais	**49**
III.4 État durci	**52**
III.4.1 Résistance à la compression	**54**

SOMMAIRE

Conclusion générale	**59**
Les références	**61**

Figure	page
Figure I.1 : compositions de mortier	**2**
Figure I.2 : Moule pour moulage des éprouvettes de mortier	**8**
Figure I.3 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	**9**
Figure I.4 : Dispositif de rupture en compression.	**9**
Figure I.5 : Méthode de mesure de la thixotropie	**11**
Figure I.6 : les deux procédures de la reprise de la thixotropie (Khayat 2003) [6]	**12**
Figure I.7 : exemple des déchets toxiques	**15**
figure I.8 : schéma de principe d'un haut fourneau (source interne Arcelor métal)	**21**
figure I-9 diagramme de Kiel système Ca O-SiO2-AI203 :	**23**
Figure I-10 évolution de la résistance à la compression de laitiers granulés de haut fourneau en fonction de l'indice de basicité (cao/sio2)	**25**
figure I-11 : domaine de stabilité du gel d'alumine	**30**
figure I-12 développement des résistances mécaniques pour les ciments CEM I et CEM III (bellmann et al 2009)	**30**
FigureII.1 : Courbe granulométrique de sable utilisée [18].	**36**
Figure II.2 ciment biskria	**37**
FIGURE II.3 poudre de laitier avant broyage (a) et après broyage (b)	**38**
Figure II.4: Détermination de la surface spécifique	**39**
Figure II.5 le laitier a été séché et broyé	**40**
Figure II.6 malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L	**41**
Fig.II.7 Séquence de malaxage du béton de sable fluide	**41**
Figure II.8 : LES MOULES 4X4X16	**42**

Figure II.9 : conservation dans l'eau a 20 °C	**42**
Figure II.10 : Essai d'étalement au mini cône	**43**
Figure II-11 : L'aéromètre à mortier.	**44**
Figure II.12: Essai de compression sur mortier	**45**
Figure II.13: Variables étudiées	**46**
La figure III.1 représente l'effet de pourcentage de laitier de haut fourneau sur la valeur d'étalement	**50**
Figure III.2 les résultats de l'air occlus en fonction de pourcentage de haut fourneau	**51**
Figure III.3 La résistance à la compression en fonction de poucentage de laitier de haut à fourneau à 7 jours	**51**
Figure III.4 La résistance à la compression en fonction de poucentage de laitier de haut à fourneau à 7 jours	**52**
Figure III.5 La résistance à la compression en fonction de poucentage de laitier de haut à 28 jours fourneau	**54**
Figure III.6 La résistance à la traction par flexion en fonction de pourcentage à haut fourneau à 7 jours	**55**
Figure III.7 La résistance à la traction par flexion en fonction de pourcentage à haut fourneau à 28 jours	**56**

Tableaux	page
Tableau I-2 echelle de composition des laitiers de haut fourneau (Alexandre et al 1988,bellman et al 2009, regourd et al ,1983	**22**
tableau I-3 : hydratation du laitier activé avec la soude	**29**
tableau I- 4 : hydratation du laitier activé avec la chaux	**31**
tableau I-5 : hydratation du laitier activé avec le gypse (sulfurique)	**31**
tableau I- 6: hydratation du laitier activé avec le soude et gypse (sodo-sulfatique)	**31**
Tableau II.1 : Caractéristiques physique de sable utilisé	**37**
Tableau II.2 caractestique physico-mécanique du ciment CPA CEM 1 42.5	**38**
Tableau II.2 caractestique chimiques du laitier d'EL hadjer	**40**
Tableau III.1 : Composition des différents mortiers réalisés.	**48**
Tableau III.2 Essais appliqués sur le mortier frais	**49**
Tableau III.3 Les résultats obtenus de l'essai d'étalement	**49**
Le tableau suivant III.4 présente les résultats de l'essai d'air occlus pour les deux mortiers	**50**
Le Tableau III.5 présente les résultats de la résistance à la compression à 7 jours des différents mortiers réalisés	**52**
Tableau III.6 présente les résultats de la résistance à la compression à 28 jours des différents mortiers réalisés	**53**
Le Tableau III.7 présente les résultats de la résistance à traction à 7 jours des différents mortiers réalisés	**55**
Tableau III.8 présente les résultats de la résistance à traction à 28 jours des différents mortiers réalisés	**56**

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De nos jours, dans le domaine de la construction et des travaux publics, et devant les besoins croissants en terme de matériaux et les exigences de préservation de l'environnement dans une vision du développement durable, il est devenu nécessaire de trouver la possibilité d'élaboration de nouveaux matériaux avec la réutilisation et la valorisation des déchets de démolition et les sous-produits industriels. Par conséquent beaucoup d'importance est donnée à la valorisation des déchets et des sous-produits industriels dans la fabrication du ciment et du béton.

Dans ce contexte, dans plusieurs universités au monde entier, les la boratoires de recherche sur les matériaux travail sur le développement de nouveaux composites cimentaires à base de déchets, dans le but de conduire une partie de recyclage, d'autre partie d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers et des bétons. Dans le but, ce travail de recherche a pour objectif d'étudier la possibilité d'élaboration d'un mortier avec la substitution du ciment par 10% et 20% et 30% de laitier des hauts Fourneaux

CHAPITER I:
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction:

dans le cadre de la recherche bibliographique nous avons procédé a l'étude des déchets utilise dans la composition du ciment pour l'amélioration de ce dernier et le rendre plus efficace et encore de réduire les couts et préserver la nature en utilisant ces déchets alors pour mieux comprendre cette procédure la définition suivante a été faite pour éclaircir les différents composant

I.1 Les mortiers de ciments :

I.1.1 Généralités :

Une construction est généralement réalisée par éléments, donc il faut assurer la liaison entre eux (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons qui a pour but de :

- ✓ Solidariser les éléments entre eux
- ✓ Assurer la stabilité de l'ouvrage
- ✓ Combler les interstices entre les blocs de construction

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

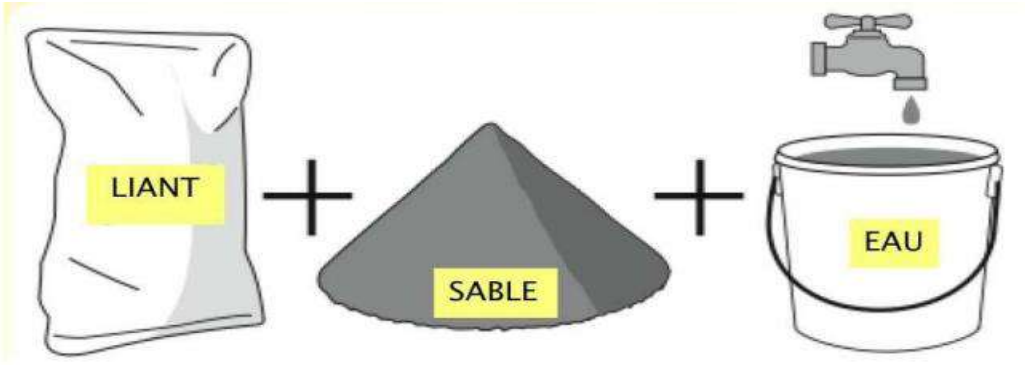


Figure I.1 : compositions de mortier

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être :

- ✓ Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- ✓ Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs préposés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- ✓ Livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années ; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers.

I.1.2 Composition de mortier :

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment ; de l'eau ; du sable ; des adjuvants 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 sont constitués par des mélanges de :

- ✓ Liant (ciment ou chaux)
- ✓ Eau
- ✓ Sable
- ✓ Adjuvants

I.1.3 Les sables :

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé". Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les

dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être :

- ✓ Naturels et roulés (de rivières, de sablières,), de nature siliceuse ou silico-calcaire ;
- ✓ Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- ✓ Spéciaux (lourds, réfractaires, légers)
- ✓ Sable de laitier
- ✓ Sable d'oxydes de fer, de chromite ; corindon ;
- ✓ Sable de briques concassées ; liège torréfié ; polystyrène expansé ; vermiculite, perlite. Certains sables sont à éviter, notamment les "sables à lapin", généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- ✓ Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire)
- ✓ Fins : jusqu'à 1,6 mm
- ✓ Moyens : jusqu'à 3,15 mm
- ✓ Gros : jusqu'à 5 mm

I.1.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment).

Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :

- ✓ Les plastifiants (réducteurs d'eau)

- ✓ Les entraîneurs d'air
- ✓ Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs)
- ✓ Les hydrofuges. Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

I.1.5 Les ajouts :

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont :

- ✓ Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice.)
- ✓ Fibres de différentes natures
- ✓ Colorants (naturels ou synthétiques)
- ✓ Polymères.

I.1.6 Les différents mortiers :

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier :

I.1.6.1 Les mortiers de ciment :

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

I.1.6.2Les mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

I.1.6.3Les mortiers bâtards :

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

I.1.6.4Mortiers fabriqués sur chantier :

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toute façon ils doivent être propre et de bonne granulométrie. Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables.

I.1.6.5Mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

I.1.7 Utilisation de mortier :

- ✓ Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié
- ✓ Mortiers d'imperméabilisation
- ✓ Mortier d'isolation thermique
- ✓ Mortier de jointoiement
- ✓ Mortier de ragréage
- ✓ Mortier de scellement, mortier pour chape
- ✓ Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.

- ✓ Mortier de réparation

I.1.8 Le dosage de mortier :

Ces dosages sont indicatifs, en volume et non en poids.

- ✓ Mortier de montage ou à maçonner (assemblage des blocs et pierres) : 1 vol. de ciment ou de chaux + 2 à 3 vol. de sable + 1/3 vol. d'eau.
- ✓ Le dosage en eau dépend de l'utilisation du mortier : Un enduit à projeter doit être beaucoup plus liquide qu'un mortier d'assemblage de Parpaings. Un mortier trop sec manque d'homogénéité et il est difficile à utiliser (il ne colle pas). Un mortier trop humide sèche mal et il est difficile à appliquer en épaisseur (il coule)

Utilisation / **Matériaux**	**Pose de brique et parpaings**	**Goberis (Sous-couche d'enduit)**	**Mortier de chape maigre**
Ciment	50 Kg	50 Kg	50 Kg
Sable	120 à 130 litres	120 à 130 litres	180 litres
Nature de mélange à obtenir	Octueux	Presque liquide	Pâteux

I.1.9 Réalisation de mortier de ciment :

• Malaxage mécanique :

Pour de plus gros travaux utilisez un malaxeur à mortier mécanique. Ces malaxeurs sont disponibles dans les centres de location d'outillage. On procède comme suit : - Versez dans le malaxeur une quantité d'eau égale à la moitié de volume total de ciment, - Faire démarrez le malaxeur - Ajoutez la moitié de sable puis le ciment, puis le reste du sable - Malaxez jusqu'à uniformité de couleur de mélange, au moins 5 minutes et pas plus de 10.

I.1.10 Les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers de ciment :

I.1.10.1 Les résistances mécaniques :

L'exigence essentielle pour un béton ou un mortier est de pouvoir résister aux contraintes mécaniques de la construction. C'est pourquoi la détermination des résistances mécaniques est essentielle pour caractériser un béton, d'autant plus que cet essai relativement

simple permette d'obtenir une image globale de la qualité du béton. Pour obtenir des résultats fiables, la confection des éprouvettes, ainsi que les essais mécaniques proprement dits, doivent être réalisés avec soin.

Les caractéristiques suivantes peuvent être déterminées expérimentalement :

- ✓ La résistance à la compression sur prismes de mortier
- ✓ La résistance à la traction et à la flexion sur prismes de mortier

- **Résistance à l'écrasement :**

Cette résistance dépend d'une multitude de facteurs, en particulier de la qualité du liant, de la nature et de la pureté du sable. Toutefois, le liant et le sable étant donnés, et en laissant provisoirement de côté le soin apporté à la mise en œuvre, la résistance dépend du :

- ✓ Qualité de l'eau de gâchage
- ✓ Composition granulométrique du sable
- ✓ Nature et dosage en ciment
- ✓ Rapport C/E
- ✓ Énergie de malaxage et mise en œuvre
- ✓ Protection les tous premiers jours

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C.



Figure I.2 : Moule pour moulage des éprouvettes de mortier

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

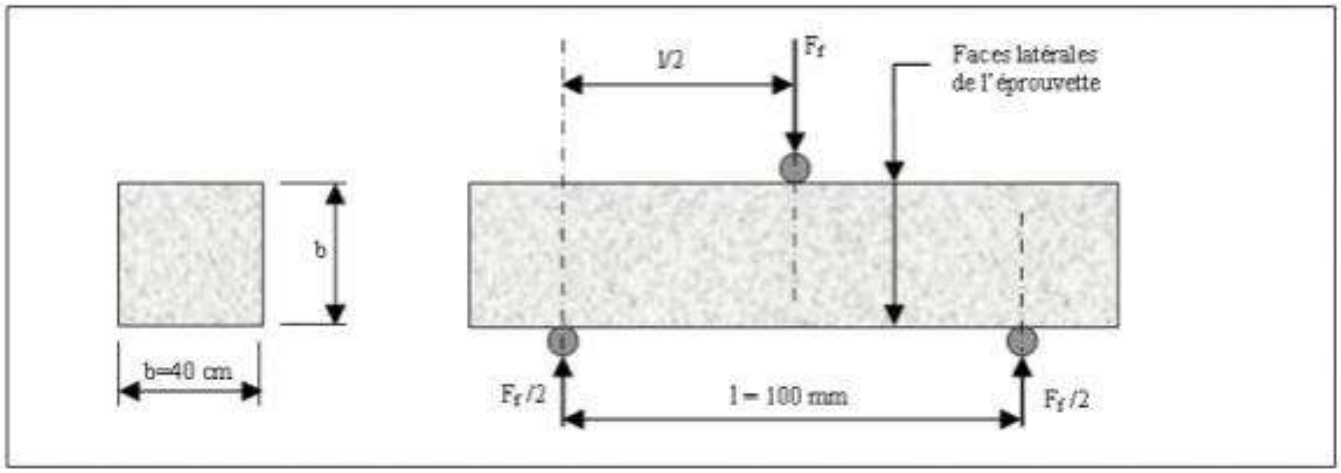


Figure I.3 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

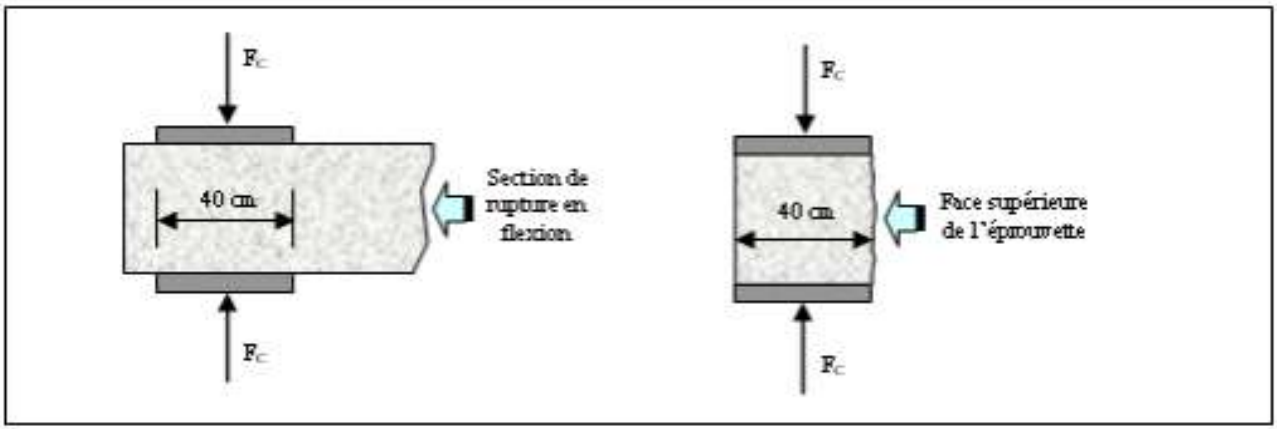


Figure I.4 : Dispositif de rupture en compression.

I.1.11 Les propriétés physiques des mortiers de ciment :

I.1.11.1 La masse volumique :

La masse volumique sèche d'une éprouvette donnée de mortier durci est déterminée par le quotient de sa masse à l'état sec en étuve par le volume qu'elle occupe lorsqu'elle est immergée dans l'eau, à l'état saturé

I.2 La rhéologie des pates cimentaires :

I.2.1 généralité :

Expérimentalement, l'étude du comportement rhéologique d'un fluide, est de faire placer ce dernier entre deux plaques parallèles dont l'une se déplace à une vitesse, grâce à l'application d'une force dirigée dans le sens du déplacement. Dans un tel dispositif appelé rhéomètre, on mesure les principaux paramètres rhéologiques du fluide telle que la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse (vitesse de déplacement de la paroi divisée par l'épaisseur du fluide) et en fonction de la viscosité plastique.

I.2.2 Propriétés rhéologiques :

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

I.2.3 Seuil de cisaillement :

Le seuil de cisaillement est la force minimale nécessaire pour mettre en mouvement un fluide soumis à une contrainte de cisaillement. En dessous de ce seuil, le fluide possède les propriétés d'un solide élastique mais, une fois la contrainte atteint ce seuil, le coulis se comporte comme un fluide newtonien ayant une viscosité plastique. Ce paramètre a une importante conséquence sur les propriétés du coulis :

- ✓ L'existence du seuil de cisaillement nécessite la présence d'une pression de démarrage lors de la mise en œuvre, la présence d'un seuil de cisaillement dans les suspensions de ciment leur confère un mode d'écoulement particulier.

- ✓ La stabilité des coulis de ciment se trouve améliorée à cause du seuil de cisaillement qui freine et bloque la sédimentation des grains de ciment, le seuil de cisaillement est l'un des facteurs les plus importants qui limitent le rayon de pénétration du coulis de ciment à l'intérieur de la fissure, (finesse, granulométrie, dispersion des grains).

I.2.4 Viscosité plastique :

La viscosité est la résistance interne d'un fluide qui lui confère une résistance à l'écoulement. La viscosité correspond à la pente de la droite donnant la variation du taux de

cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement Dans le cas des pâtes de ciment qui ont le comportement d'un corps de Bingham, deux types de grandeurs peuvent être définies à savoir, la viscosité plastique et la viscosité apparente.

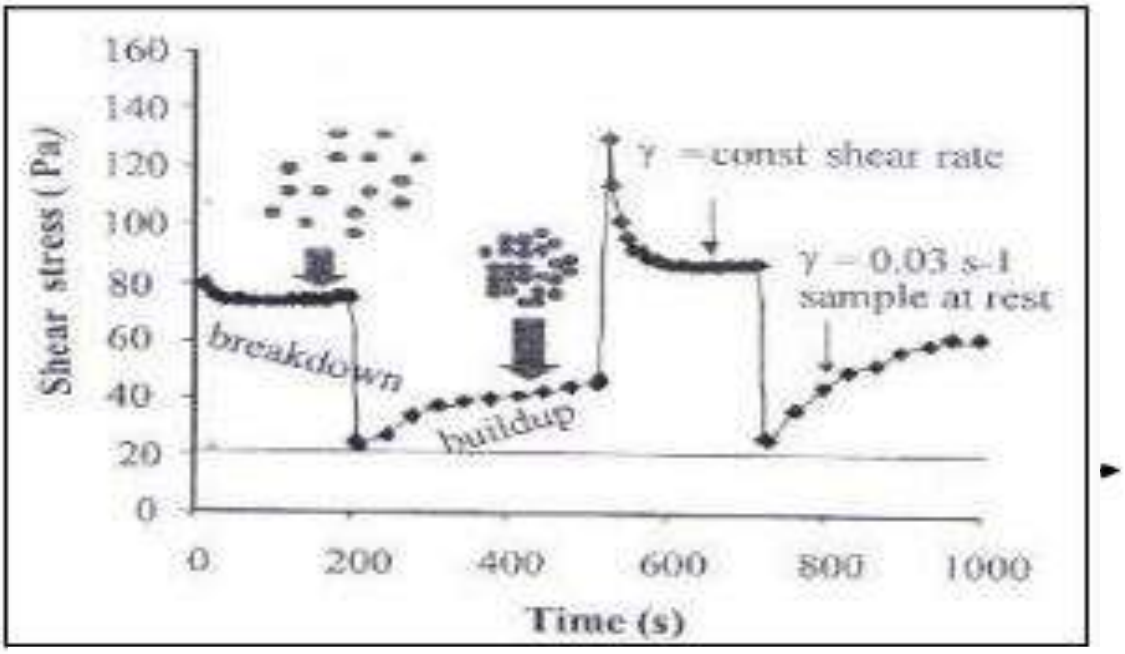


Figure I.5 : Méthode de mesure de la thixotropie (Khayat 2003) [6]

I.2.5 Thixotropie :

La thixotropie étant un comportement dépendant du cisaillement et du temps, il est souhaitable de maintenir l'un des facteurs constant (le cisaillement) et observer l'évolution de la structure en fonction du temps. Particulièrement, la thixotropie de la pâte de ciment est un domaine mal compris, mais assez important dans son application sur le chantier. Lors du transport ou du coulage du béton, ce dernier va supporter une certaine agitation physique (ou bien on peut dire qu'il est en train de cisailler) ce qui provoque la diminution de la viscosité du béton, mais lorsque le béton arrive au chantier ou la mise en œuvre est terminer, on a besoin que la viscosité du béton reprenne son état initial pour éviter la sédimentation des granulats. Donc, la thixotropie de la pâte est un des paramètres très importants dans l'ouvrabilité du béton.

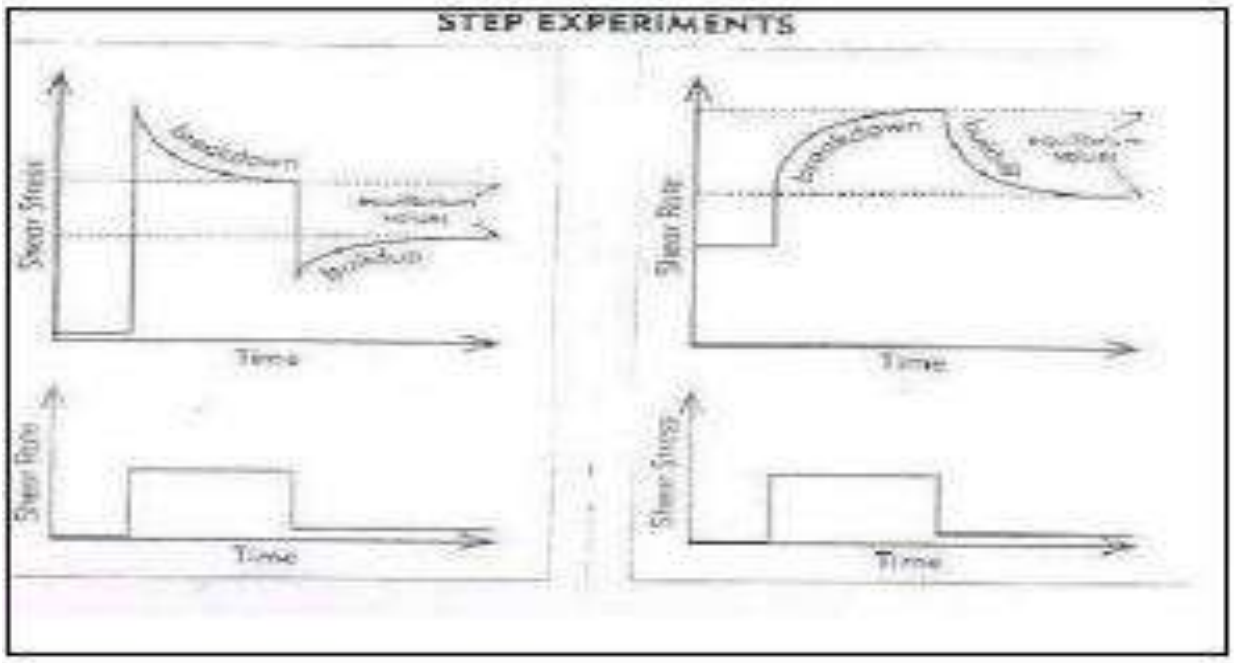


Figure I.6 : les deux procédures de la reprise de la thixotropie (Khayat 2003) [6]

Pour caractériser la thixotropie, plusieurs méthodes ont été utilisées. On peut caractériser de manière 30 simple la thixotropie par un indice de thixotropie. Pour mesurer l'indice de thixotropie, on se place à gradient de vitesse constant et on mesure la diminution de la viscosité entre le temps 0 et le temps T. Il s'agit d'une grandeur sans dimension. Plus l'indice est élevé, plus la thixotropie est marquée. Une autre façon de l'évaluation de la thixotropie par l'aire comprise entre les courbes d'écoulement montantes et descendantes d'une rhéogramme est également pratiquée, mais c'est une mesure très arbitraire. Par ailleurs, elle ne donne aucune information sur la reprise de la structure thixotrope [17].

C'est Bouton qui a fait l'association des différentes méthodes avec un enchaînement automatique, comme mesure avec une vitesse imposée, une contrainte imposée et l'essai de fluage pour préciser la structure initiale du matériau.

I.3 Recyclage et valorisation de déchets

I.3.1 Généralité

Du fait de l'augmentation des activités du Bâtiment et des Travaux Publics depuis quelques décennies, on constate un afflux croissant du volume des déchets issus des chantiers.

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.

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique **[1].**

I.3.2 Les déchets et les types des déchets

I.3.2.1 Définition d'un déchet

Selon l'**article L541-1-1 du Code de l'Environnement**, un déchet est défini comme « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». En fonction de leurs types et de leurs origines, les déchets ont un niveau de dangerosité variable qui, dans certains cas, peut être préjudiciable à l'homme et à l'environnement **[2].**

I.3.2.2 Origine de la production des déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- ✓ **Biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- ✓ **Chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- ✓ **Technologiques** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- ✓ **Économiques** : les produits en une durée de vie limitée ;
- ✓ Écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- ✓ **Accidentelles** : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets **[4].**

I.3.2.3 Les déchets utilisés en génie civil [6]

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci –dessous ; bien que les déchets utilisables en génie civil soient :

A. Déchets industriels dangereux non toxiques

Ce type de déchets regroupe généralement :

- ✓ Des déchets de fer, de cuivre, de plomb.
- ✓ Des déchets contenant des fibres d'amiante.
- ✓ Des produits de préservation du bois.
- ✓ Des déchets solides dangereux de construction et de démolition de bâtiment à caractère industriel.



Photo I.1-: Des déchets industriels non toxiques **[13][14]**.

B. Déchets inertes

Tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine ».

Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve : le béton, les briques, les tuiles, les céramiques, les carrelages, les matériaux à base de gypse



Photo I.2 : Exemple de quelques déchets inertes**[11].**

C. Déchets toxiques

Ils sont à caractère industriel et obtenus en général après traitement chimique des matériaux synthétiques. Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques.



Figure I.7 : exemple des déchets toxiques **[12].**

D. Déchets industriels dans des conditions spécifiques (DIB)

Ils proviennent d'industries générant de très grandes quantités de déchets en sous-produits industriels, dont les caractéristiques sont bonnes et relativement stables (cendres volantes les scories d'aciéries, le laitier, etc.)



Photo 1.3 :des cendres volantes stockées dans une usine**[16].**

E. Déchets ménager et assimilés

Les déchets ménagers et assimilés sont les déchets solides produits par les ménages sur leur lieu d'habitation Ils regroupent :

- ✓ Les ordures ménagères.
- ✓ Les déchets d'emballage recyclables en verre.
- ✓ Les déchets encombrants issus des ménages.
- ✓ Les déchets végétaux.
- ✓ Déchets de matière alimentaire (Déchets de café).
- ✓ Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, …).

F. Les déchets industriels banals (D.I.B.)

Un déchet industriel banal (DIB) est un déchet ni inerte ni dangereux, généré par les entreprises dont le traitement peut éventuellement être réalisé dans les mêmes installations que les ordures ménagères : cartons, verre, déchets de cuisine, emballages, déchets textiles, ...

I.3.2.4 Valorization de déchets

- **Recyclage**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures: la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- ✓ Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- ✓ Réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- ✓ Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine **[7].**

- **Impacts du recyclage sur l'environnement**

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande **[8].**

Le recyclage de déchets permet de :

- ✓ Réduire l'extraction de matières premières.
- ✓ Réduire des pollutions et nuisances.
- ✓ Préservé de la diversité biologique et des espaces naturels.
- ✓ Protection des recoures naturels.
- ✓ La protection de l'atmosphère.
- ✓ Contrôle et déduire des déchets dangereux.

➢ **Récupération**

Séparation de certains produits ou matériaux des déchets à des fins de réemploi de réutilisation et de recyclage **[15]**.

➢ **Compostage**

Procédé biologique qui permet, sous l'action de bactéries aérobies (en présence d'oxygène), la dégradation accélérée de déchets organiques pour produire du compost **[15]**.

➢ **Incinération**

Méthode de traitement thermique des déchets qui consiste en une combustion (technologie et température variant selon la nature du déchet) et un traitement des fumées. De cette technique résultent trois catégories de résidus : mâchefers, cendres et résidus d'épuration des fumées. La chaleur générée par l'incinération fait l'objet de valorisation énergétique (production d'électricité et de chaleur) dans la plupart des unités **[15]**.

❖ **La Valorisation**

Terme générique recouvrant le recyclage matière et organique, la valorisation énergétique des déchets, ainsi que le réemploi, la réutilisation et la régénération **[9].**

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de « mesurer pour connaître et connaître pour agir ».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir **[10].**

I.4 Le laitier

Dans cette partie, nous définirons l'origine du laitier du haut fourneau qui est étudié dans le cadre de ce mémoire, les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de ce matériaux, les mécanismes d'hydratation, les risques éventuels concernant leur utilisation et leurs caractéristiques environnementales

I.4.1 Origine des laitiers : [3]

Lors de la fabrication d'acier ou d'alliage silicium-manganèse, il se forme des coproduits tels que les laitiers. Chaque laitier peut être considéré comme un produit unique car il résulte du type d'acier ou de l'alliage que l'on a voulu fabriquer. Pendant la fabrication de l'acier par haut fourneau et convertisseur, on obtient deux types de laitiers : les laitiers de haut fourneau et les laitiers d'aciérie de conversion. Pour la fabrication d'alliages silico manganèse par voie électrique, on obtient le laitier de silico manganèse. En sidérurgie, les laitiers purifient l'acier en absorbant les impuretés issues des minerais de fer.

I.4.2 Le laitier de haut fourneau : [3]

Pour fabriquer de l'acier industriel, le minerai de fer aggloméré est chargé dans la partie supérieure du haut fourneau en couches alternées avec du coke, un combustible puissant proche du carbone pur fabriqué à partir de charbon. On insuffle de l'air chaud et du charbon pulvérisé dans le bas du haut fourneau à une température proche de 1200°C. Ceci provoque la combustion du coke qui entraine la fusion du minerai, ainsi que la formation d'un gaz réducteur qui transforme les oxydes de fer du minerai en métal, formant ainsi du CO et du CO2. On recueille alors la fonte liquide à 1500°C (environ 96% Fe et 4%,5 C) et le laitier dans le bas du haut fourneau

Les constituants non-métalliques et/ou non absorbés par la fonte et non gazeux constituent le laitier de haut fourneau, qui est à l'état liquide. Il surnage car sa densité d'environ 3, est inférieure à celle de la fonte qui est de La séparation de la fonte et du laitier se fait par un dispositif de siphonage.

On parle de laitiers de fraiche production lorsqu'ils entrent, dès leur élaboration, dans la filière de valorisation.

I.4.3 Types de laitier de haut fourneau : [3]

On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

I.4.3.1 Le laitier de haut fourneau est cristallisé

lorsqu'il est dirigé par une rigole vers des fosses où il refroidit et se cristallise lentement à l'air sous forme de roche dure. Après le début de la solidification, ce laitier est arrosé afin d'en abaisser la température puis fragmenté, concassé et criblé.

I.4.3.2 Le laitier de haut fourneau est dit vitrifié,

Ou granulé, s'il est dirigé vers un dispositif dans lequel il subit une trempe (arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression). L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément de fines particules d'un produit vitreux désordonné. Il possède ainsi une énergie interne plus élevée qu'à l'état cristallin, ce qui le rend plus réactif chimiquement

. Lors de son hydratation, le laitier évoluera sous une forme cristalline stable pouvant être mise à profit pour les formulations de ciments ou de bétons. On distingue deux types de laitiers vitrifiés :

I.4.3.3 le laitier vitrifié granulé,

Pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en un minimum de temps.

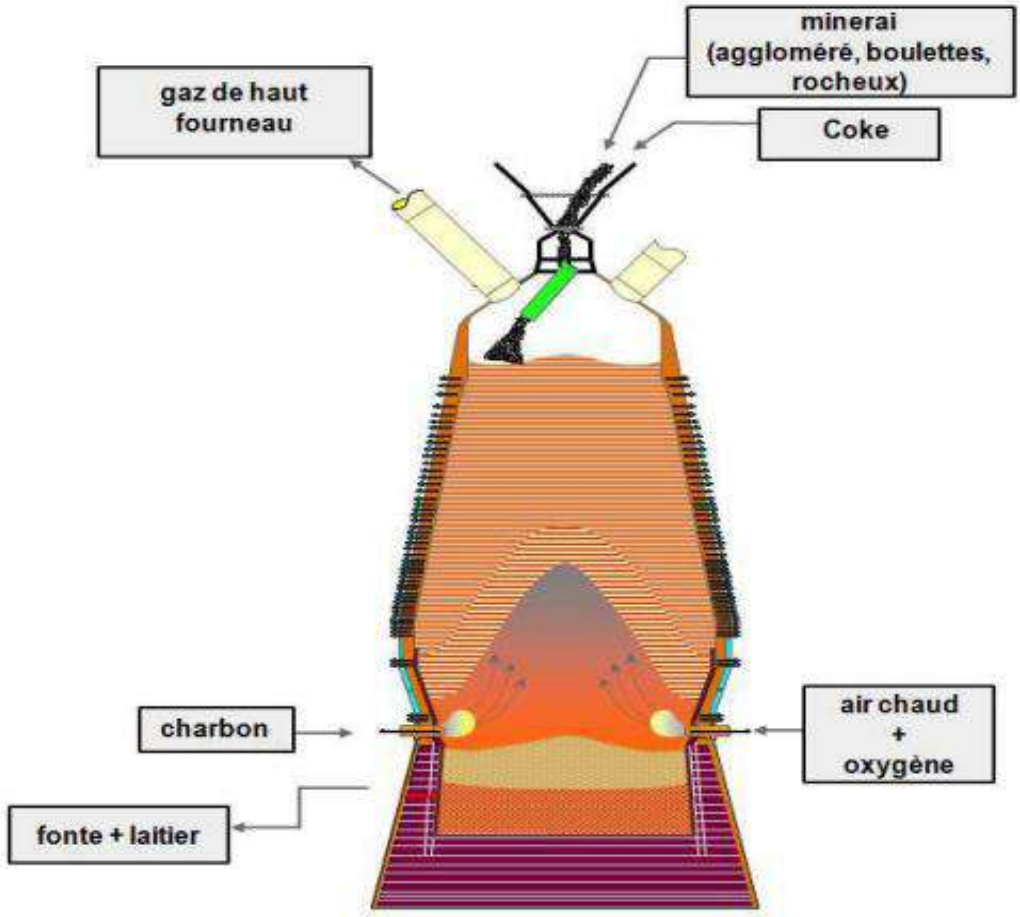


figure I.8 : schéma de principe d'un haut fourneau (source interne Arcelor métal)

I.4.3.4 le laitier vitrifié bouleté

Soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules.

I.4.4 Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du laitier de haut fourneau :

Les principaux composants chimiques de ce type de laitier sont la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie qui représentent 95 à 97% de la composition totale du laitier. nous montre les constituants majeurs sous forme d'oxydes et les teneurs pouvant être rencontrés dans

ce type de laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est stable dans une même usine, mais peut varier entre usines.

Des traces de Ti02, Na20, K20, S03 sont également détectées dans ce type de laitier. Le laitier de haut fourneau cristallisé est typiquement gris et poreux. Le laitier de haut fourneau vitrifié se présente sous forme d'un sable de couleur claire.

L'origine des deux types de laitiers est la même, la différence entre ces deux matériaux réside seulement dans leurs microstructures et minéralogie. La vitrification des laitiers leur confère des propriétés hydrauliques. Pour être réactif, le laitier doit être vitreux: un laitier de haut fourneau granulé doit avoir au minimum deux tiers de sa masse en laitier vitreux mais compte généralement plus de 90% de phase vitreuse. Le laitier se présente sous la forme d'un liquide surfondu qui conserve, du fait de la trempe, une énergie de cristallisation non dissipée qui lui permet d'être hydraulique.

Constituant	Teneur en %
Ca O	35-48
Si02	32-41
Al2O3	9-18
Mg O	1-9
Mn O	0,4-0,7
Fe	0,2-3
Fe	0,4-1,5

Tableau I-2 echelle de composition des laitiers de haut fourneau (Alexandre et al 1988,bellman et al 2009, regourd et al ,1983

L'hydraulicité du laitier doit être stimulée par un activant basique pour être efficace rapidement (le laitier seul mélangé à l'eau durcit mais la cinétique de développement des résistances mécanique est très lente), alors que celle du ciment Portland intervient par simple addition d'eau. Cette prise hydraulique, exothermique, se produit de façon très progressive et permet la formation de produits d'hydratation solides qui constituent la prise et le durcissement du laitier et s'accompagne d'un développement progressif des résistances mécaniques.

Le diagramme de Kiel, diagramme ternaire représentant le système chaux-silicealumine, situe le laitier de haut fourneau par rapport à d'autres liants couramment utilisés. indique que ce

laitier (zone 4) a une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland (zone 5), même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydratation.

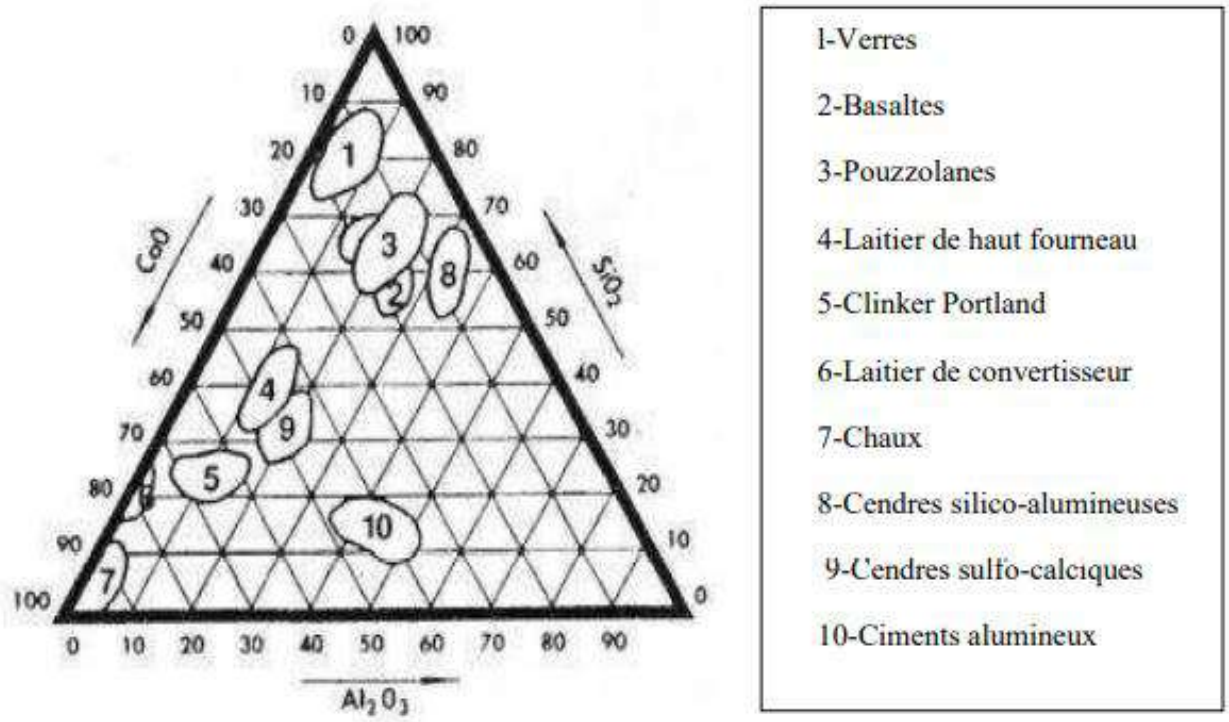


figure I-9 diagramme de Kiel système Ca O-SiO2-AI203 :

D'un point de vue minéralogique, le laitier est caractérisé par une phase amorphe très majoritaire, de l'ordre de 90%. Pour les 10% restant, on parle alors de germes de cristallisation. Ces germes minéralogiques sont essentiellement des silicates ou des silicoaluminates de chaux (merwinite et mélilite)

I.4.5 VALORISATION DU LAITIER DU HAUT FOURNEAU

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

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

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

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

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

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

- ✓ Pour la confection des bétons Dans un béton, le squelette granulaire (sable et granulats naturels peuvent être remplacés par le laitier vitreux et le laitier cristallisé concassé respectivement). le laitier concassé forme d'excellents granulats pour le béton. De même le laitier granulé entre dans la confection des bétons légers (bétons cellulaires), et les briques de laitiers .

- ✓ Pour les travaux routiers Les utilisations concernent la construction des chaussées, des routes, autoroutes et les assises où on peut utiliser soit le laitier granulé où le laitier concassé.

I.4.6 Hydratation du laitier de haut fourneau : [3.5]

De nombreuses études sur l'hydratation du laitier de haut fourneau ont déjà été menées et ont permis de proposer des mécanismes d'hydratation et différents modes d'activation, qui seront décrits dans cette partie.

I.4.6.1 Réactivité hydraulique du laitier :

Il faut tenir compte de plusieurs paramètres pour pouvoir évaluer la réactivité du laitier de haut fourneau.

* La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie (jusqu'à 15%), mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse

* Les calculs d'indices de basicité permettent d'évaluer le caractère hydraulique des laitiers. Ils correspondent à la somme des constituants basiques du laitier sur la somme de ses constituants acides. Pour une bonne activité hydraulique, l'indice de basicité Ca0/Si02 doit être proche de 1,3 comme illustré dans la Figure I-10

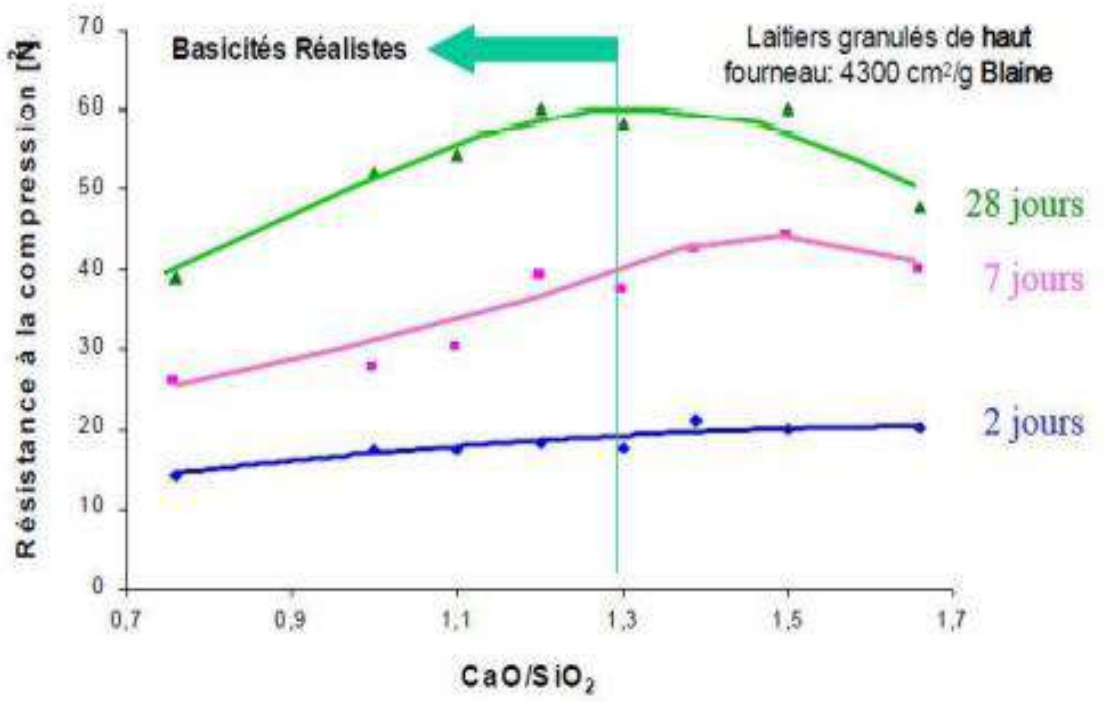


Figure I-10 évolution de la résistance à la compression de laitiers granulés de haut fourneau en fonction de l'indice de basicité (cao/sio2)

- D'un point de vue granulométrique, plus le laitier n'est fin, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées. En effet la surface de contact entre les phases vitreuses du laitier, l'agent activateur et l'eau se trouve augmentée.

- Un des critères les plus importants reste la connaissance de la minéralogie du laitier. En effet, la détermination du taux de vitrification est très importante car sa structure vitreuse est riche en énergie qui n'a pas été dissipée, et n'a pas atteint son niveau d'énergie le plus bas correspondant à l'état cristallin.

L'hydraulicité du laitier vitrifié est définie par sa faculté à' évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau énergétique en formant des produits d'hydratation solides. Le laitier vitrifié est ainsi un matériau hydraulique latent

L'hydraulicité du laitier dépend donc de sa teneur en verre ainsi que de sa structure. De nos jours, la teneur en verre des laitiers de haut fourneau utilisés comme constituants des ciments dépasse largement 90% de la masse initiale, mais on pense que de faibles proportions de matériaux cristallins peuvent avoir un effet bénéfique sur l'hydraulicité

*D'autres facteurs influent sur l'activité d'un laitier de haut fourneau et sur son hydratation. On peut citer la concentration en ions alcalins dans le milieu et la température durant les premières phases du processus d'hydratation

I.4.6.2 Processus d'hydratation :

Contrairement au ciment qui s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier de haut fourneau vitrifié n'est rapidement soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour développer une cinétique d'hydratation satisfaisant l'objectif recherché (performances conformes aux ciments, d'un agent d'addition appelé activant.

Le processus d'hydratation du laitier est ensuite semblable à celui du ciment Portland tel qu'il fut expliqué par Le Chatelier

Le processus d'hydratation peut être vu comme une répétition de cycles dissolution concentration - précipitation, qui se prolonge pendant des années jusqu'à hydratation maximum des grains de laitier (quand les grains de laitier ne sont plus accessibles par la solution alcalinisée). Cette hydratation est responsable de la prise et le durcissement de laitier vitrifié. L'hydratation débute par la dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution, qualifiée d'hydroxylique par Van Rompaey

aboutit à une solution basique concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés, la dissolution n'est possible que lorsque le pH du milieu dépasse une valeur de l'ordre de 12, pH fixé par l'équilibre de dissolution - précipitation de l'hydroxyde de calcium (pH = 12,5 12,6).

Cette' précipitation fait à son tour chuter la concentration' des éléments dans la solution, ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produit jusqu'à concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. Les cristaux formés peuvent apparaître sur les grains de laitier ou sur1es granulats. Il y a dans un premier temps une augmentation du frottement interne du squelette, puis formation de ponts cristallins qui se rejoignent en formant un maillage qui entoure les granulats, constituant un ensemble cohérent. La fixation du maillage

sur les granulats, qui dépend de leur état de surface; est facilitée sur les surfaces rugueuses et anfractueuses (pourvues de cavités profondes et sinueuses).

Ensuite, la précipitation des hydrates formés et leur arrangement cristallin conduisent à un développement des résistances mécaniques dans le temps, au fur et à mesure que se poursuit le phénomène.

Les grains de laitiers étant plus lisses que les grains de clinker, hydrates ont plus de mal à se développer sur ces grains et le développement des résistances mécaniques se trouve plus lent pour des ciments au laitier par rapport à des ciments Portland. Il est important de prendre en compte l'activateur dans la réaction d'hydratation." En effet, la quantité et le choix de l'activant influent sur le gain de résistance et la nature des hydrates formés. Van Rompaey prétend que les réactions d'hydratation du laitier de haut fourneau forment des silicates de calcium hydratés (CxSyHz), Des aluminates de calcium hydratés (C4AH13) ainsi que Des sulfo-aluminates de calcium hydratés (3CaO. Al2O3.CaS04.12H20) Et de l'ettringite (C3A.3CaS04.32H20.

I.4.7 Activation du laitier : [3.5]

Lors du contact entre le laitier et l'eau, il se produirait une première réaction. Le calcium et l'alumine passent en solution et forme un gel d'alumine AI(OH) 3. Ce gel se forme entre un pH de 4 et jusqu'à un pH compris entre 8,5 et 10 comme Ce gel bloque la poursuite de la dissolution du laitier et donc de son hydratation. Ce phénomène définit le laitier de haut fourneau comme étant un matériau hydraulique latent. Il est nécessaire qu'un activateur engage la dissolution de ce gel, afin de permettre la poursuite de l'hydratation.

On caractérise l'activation par le mode d'action chimique qu'elle met en jeu L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate.

I.4.7.1 Modes d’activation alcaline

Il existe trois modes d’activation :

L’activation alcaline par la soude ou la chaux, l’activation sulfatique par les sulfates" ou l'activation sulfato-calcique (ou solosulfatique) qui est une combinaison des deux premières

activations. La soude, agit comme un catalyseur tandis que la chaux et les sulfates agissent comme des réactifs.

Les activateurs les plus connus sont : le c1inker Portland, les' hydroxydes de calcium, les sulfates de calcium, les sulfates alcalins, la soude, les silicates et carbonates de soude et les chlorures de calcium.

Lors d'une activation alcaline, l'activant peut-être la soude, la potasse ou la chaux. Le pouvoir dissolvant de l'eau est modifié par une élévation du pH, ce qui assure le passage en solution de l'alumine du laitier, de la silice et de la chaux ainsi que la formation d'hydrates de natures différentes en fonction du choix de l'activant. Lors de l'ajout de soude ou de potasse, il se forme trois hydrates : Les C-S-H (moins denses que ceux formés lors de l'hydratation d'un Ciment Portland), l'aluminate tétra calcique hydratée (C4AH13) et la gehlenite hydratée (C2ASH8). L'activant se limite à un rôle de catalyseur. Pour l'activation calcique, la gehlenite hydratée n'apparait pas en présence de chaux hydratée. En effet toute l'alumine du laitier se retrouve dans l'aluminate tétra calcique hydraté. Ce composé est nettement plus riche en chaux, d'où une consommation de l'activant (CaO), comparé à l'activation par la soude. Les grains de silice, dissoute se trouvent dans les phases hydratées sous calcium hydraté. L'activation sulfatique peut concerner les ciments sur sulfatés. Le gypse (CaS04, 2H2 0) (ou anhydrite CaS04) est un véritable réactif qui se solubilise dans l'eau et se combine avec les éléments du laitier, pour donner naissance à l'ettringite (C6AS3H32, trisulfoaluminate de calcium hydraté en forme d'aiguilles).

Il se forme aussi des gels de C-S-H autour des grains de laitier. Ici, il y a plus d'ettringite que dans un ciment Portland pur. Le gypse, l'anhydrite ou le phospho gypse peuvent être utilisés comme activant sulfatiques. Pour l'activation sulfato-calcique (en présence de gypse et de chaux), la chaux présente avec le gypse permet d'accélérer la cinétique d'hydratation du laitier par rapport à une activation uniquement à base de sulfate de calcium. L'activation sulfato-calcique est rencontrée dans les ciments au laitier de haut fourneau (type CEM III). Le gypse et la chaux libérée par l'hydratation des silicates du c1inker participent au mécanisme d'hydratation de ces ciments. Ce mécanisme d'activation peut être aussi utilisé dans les ciments sur sulfatés susceptibles, de contenir jusqu'à 5% de constituants secondaires (c1inker par exemple).

Avec la soude
$C_5S_3A + NaOH + 12H_2O \longrightarrow 1/3C_4AH_{13} + 7/3CHS + 2/3C_2ASH_8$ Laitier la soude Aluminate Silicates Gehlinite

tableau I-1 : hydratation du laitier activé avec la soude

L'évolution des résistances mécaniques des bétons au laitier est liée à la formation de nombreuses aiguilles d'ettringite dans la pâte durcie. Au jeune âge, ces résistances sont inférieures à un ciment Portland à 28 jours, mais les résistances à âge avancé (90jours) peuvent être équivalentes, voire plus élevées pour un ciment au laitier, dans certains cas, selon le taux de remplacement. des courbes de résistance de mortiers à base de ciment CEM I (au minimum 95% de clinker Portland) CEM III/B (72% de laitier de haut fourneau et 28% de c1inker Portland), CEMII/B-S (27% dé laitier de haut fourneau et 73% de c1inker Portland), et un ciment SSC sur sulfaté.

Pour l'activation sodo-sulfatique, la soude joue un rôle de catalyseur tandis que la chaux et le gypse entrent dans la réaction d'hydratation. Cette activation utilise cinq fois plus d'activant que l'activation calcique, mais la quantité d'hydrates formée est deux fois plus importante [Divet et al, 2006]. Tous les produits d'hydratation obtenus à partir des différentes activations se résument dans les réactions données par les tableaux. Selon (Voinovitch et Dron, 1976), La composition chimique du laitier est schématisée par la formule C5S3A reflétant la répartition courante des 3 oxydes: L'équation d'hydratation ramenée à une mole s'écrit:

tableau I- 4 : hydratation du laitier activé avec la chaux



Avec la chaux:

$C_5S_3A + 2CaO + 16H_2O \longrightarrow C_4AH_{13} + 3CH_3$

Laities La chaux Aluminates Silicates

tableau I-5 : hydratation du laitier activé avec le gypse (sulfurique)

figure I-11 : domaine de stabilité du gel d'alumine

Avec le gypse (sulfatique) :

$C_5S_3A + 2CaSO_4 + 76/3H_2O \longrightarrow 3CHS + 1/2C_3A.3.CaSO_4 \cdot 32H_2O + 2/3AI(OH)$

Laitier Sulfate Silicates Ettringite Hydroxyde d' Alu mine

tableau I- 6: hydratation du laitier activé avec le soude et gypse (sodo-sulfatique)

Avec la soude et le gypse (Sodo sulfatique) :

C

figure I-12 développement des résistances mécaniques pour les ciments CEM I et CEM III (bellmann et al 2009)

Laitier Sulfate Soude Silicates Ettringite sulfate de soude

Tableau II-5: Hydratation du laitier activé avec la soude et le gypse (Sodo-sulfatique)

A partir des différentes réactions, on remarque que les différents types d'activations conduisent à des produits d'hydratation dont seul le silicate de calcium hydraté (CSH) apparaît dans tous lescas.

I.4.8 Propriétés des ciments au laitier de haut fourneau : [3.5]

L'ajout de laitier de haut fourneau dans des mortiers ou bétons modifie ses propriétés, et donc permet :

-D'améliorer certains aspects du comportement du matériau, mais il peut aussi réduire la cinétique de développement des résistances. Ainsi, les résistances mécaniques au jeune âge (2 jours par exemple) des ciments au laitier sont en général inférieures aux ciments Portland, mais au-delà de 28 jours, la pente des courbes de résistance est plus forte que celle des ciments Portland et Les résistances mécaniques obtenues à long terme peuvent être supérieures.

Ce niveau faible des résistances au jeune âge peut être un inconvénient dans le cas de constructions minces. Par ailleurs, les ciments au laitier de haut fourneau présentent une faible chaleur d'hydratation Cette propriété est intéressante car elle permet de réduire le risque de fissuration lors du retrait thermique et améliore par ce biais la durabilité vis-à-vis des agents agressifs.

Les bétons au laitier offrent une imperméabilité croissante avec la teneur en laitier. La pâte de ciment au laitier développe plus de C-S-H microporeux et une porosité capillaire plus faible qu'une pâte de ciment Portland classique. En effet, on observe une diminution du nombre de pores et de ses rayons moyens. Les bétons aux laitiers ont une résistance élevée à la diffusion des chlores ainsi qu'une meilleure résistance aux milieux agressifs (eau de mer...) car ils présentent moins de portlaendite qu'un ciment Portland. L'eau de mer agit sur la portlandite (Ca(OH) 2) et la dissout ce qui en augmente ainsi la porosité et diminue les résistances mécaniques. Par contre, les bétons au laitier sont plus sensibles à la carbonatation accélérée par rapport à des bétons à base de ciment Portland

I.4.9 Risque d'instabilité volumique : [3.5]

Tout risque de gonflement du laitier est en principe écarté, car le matériau ne contient ni chaux libre ni magnésie libre, qui sont les premiers responsables d'instabilités dimensionnelles. Toutefois, dans certains cas exceptionnels, le laitier cristallisé peut ne pas être stable.

Il se désagrège alors après solidification et se transforme en une poudre grossière. Un 'tel laitier est dit « faisant ». Ce phénomène est. Dû à la présence de C2S (silicates bi-calcique) dont le passage de la forme β à la forme y lors du refroidissement, peut s'accompagner d'une augmentation du volume. Cette expansion provoque une réduction du produit en poussière.

«L'effusement» reste cependant un phénomène très exceptionnel qui a tendance à disparaître avec la diminution de la basicité des laitiers actuels et avec des limites en termes de composition déterminées par les usines pour éviter de former des laitiers de haut fourneau cristallisé de type fusant. Le laitier vitrifié ne présente pas de risque d'instabilité volumique.

I.4.10 Caractéristiques environnementales

D'après l'association américaine « Slag Cément », les pays valorisant jusqu'à 80% du laitier de haut fourneau en remplaçant le ciment Portland par l'introduction de laitier dans le béton permet de réduire jusqu'à 59% les émissions de CO_2 et de 42% l'énergie intrinsèque nécessaire à la fabrication de bétons et de leurs éléments constitutifs .Ces réductions concernent seulement les bétons au laitier par rapport aux bétons classique.

I.4.11Valorisation du laitier en Algérie

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

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

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

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

- ✓ La fabrication des briques silico calcaires à base du laitier.
- ✓ La fabrication du béton cellulaire autoclavé.
- ✓ La fabrication d'un ciment de laitier activé sans clinker.

Conclusion

Après la recherche Bibliographique avoir toute ces définitions nous avons constaté qu'on peut intégrer plusieurs types de déchets dans la composition du ciment et du béton donc pour mieux expliquer cette méthode nous allons concentrer sur les laitiers des hauts fourneaux

CHAPITER II
MATERIAUX ET ESSAIS

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux et les techniques expérimentales utilisées dans notre étude. Pour la première partie on présente les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition de nos mortiers, à savoir le sable, les ciments, le laitier de haut fourneau et l'eau de gâchage. Sur mortier frais dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions de mortier de ciment. Ensuite nous présenterons par la suite les différents essais réalisés au cours de notre étude et leurs modes opératoires (état frais et durci).

Les différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de l'université de Médéa et celui de la SETAM de Médéa au cours de cette étude sont les suivants :

A l'état frais

- ✓ Essais d'étalement au mini cône.
- ✓ Essai de l'air occlus.

A d'état durci

- ✓ Essai de compression sur demi-prisme d'éprouvettes 4×4×16 cm à l'âge de 7 et 28 jours.
- ✓ Essai de traction par flexion sur les mêmes éprouvettes.

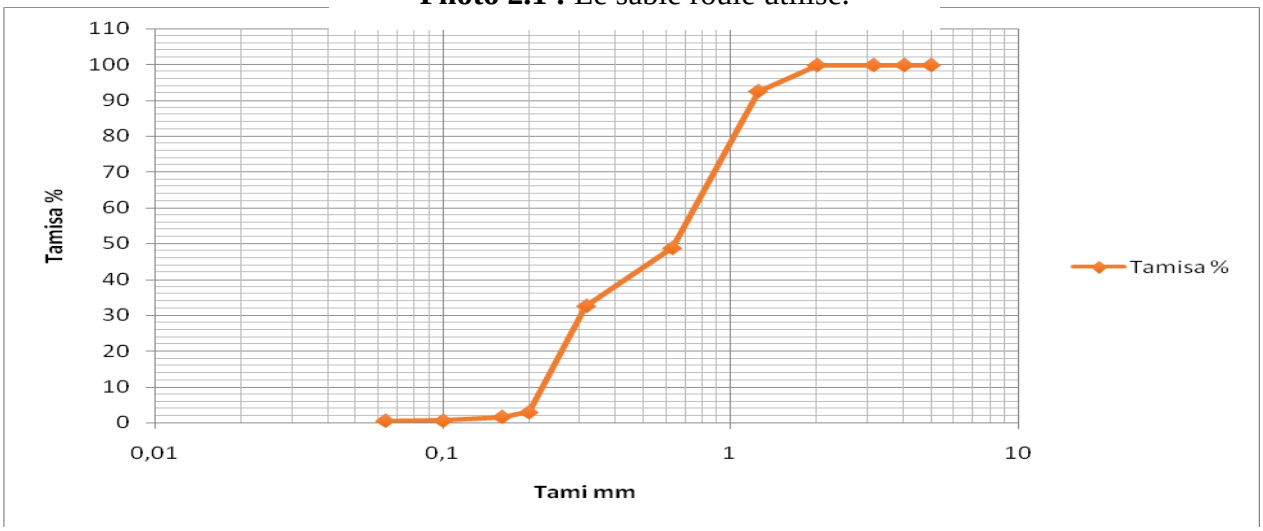
II.2 Caractérisation des Matériaux utilisés

II.2.1 Sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable de carrière d'OUED SOUF situé à 500 Km au Sud Est de la capitale d'Alger, sa classe granulaire est 0/3. La photo 2.1 suivante donne un aperçu sur la nature du sable utilisé. L'analyse granulométrique de sable utilisée est présentée sur la Figure 2.1 et Les caractéristiques physiques du sable utilisé sont regroupées dans letableau2.1ci-dessous [**18].**



Photo 2.1 : Le sable roulé utilisé.



FigureII.1 : Courbe granulométrique de sable utilisée [18].

II.2.2 Ciment

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale, Il s'agit d'un ciment portland artificiel CEM1 42.5 produit par la cimenterie de Biskra en Algérie, Selon les essais effectués, la masse volumique absolue et la finesse de ce ciment sont 3.149 g/cm3 et 2900 cm2 /g respectivement, La composition chimique est donnée par l'usine présentée au tableau suivant (***Tableau II.1)*** [23].

Caractéristiques	**Sable**	**Normes**
Classe granulaire	0/3	NF EN 933-1 **[19]**
Module de finesse	2.25	NF EN 933-1 **[19]**
Masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.63	NF EN 1097-6 **[20]**
La compacité (%)	1.56	NF EN 1097-3 **[21]**
La porosité (%)	59	NF EN 1097-3 **[21]**
Equivalent de sable (%)	41	NF EN 1097-3 **[21]**
Coefficient d'absorptiond'eau (%)	8109	NF EN 933-8 **[22]**
Coefficient d'absorptiond'eau (%)	0.42	NF EN 1097-6 **[20]**

Tableau II.1 : Caractéristiques physique de sable utilisé [18].



Figure II.2 ciment Biskria

II.2.2.1. Composition du ciment

- Au moins 95% de clinker (K)

- Ajouts : la proportion de constitution secondaire est limitée à 05%

Les résultats obtenus des propriétés physico-mécaniques du ciment sont résumés dans le tableau II.2, Selon les résultats, Le ciment répond aux exigences fixées par les normes du ciment CPA CEM I 42.5.

Tableau II.2 caractestique physico-mécanique du ciment CPA CEM 1 42.5

Consistance normale		**27**	**NF EF 196-3 [90]**
Temps de prise (min)	**Début**	**170**	
	Fin	**255**	
Résistance à la compression(MPA)	**28j**	**≥42.5**	**NF EN 196-1 [91]**

II.2.3 Laitier de haut fourneau

Le laitier utilisé est un laitier granulé provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Il est fourni sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm et de couleur jaunâtre. Le laitier est ensuite réduit en poudre avec une finesse de 3800 cm2 /g à l'aide d'un broyeur à boulets. Le temps de broyage est fixé à 150 min pour chaque 5 kg. Sa masse volumique absolue est de 2875 kg/m3.



FIGURE II.3 poudre de laitier avant broyage (a) et après broyage (b)

➢ **Surface Spécifique [EN 196-6]**

- **Principe de la mesure :**

Perméabilimètre de Blaine à mesure de temps automatique selon EN 196-6 et ASTM C204 Détection des niveaux par des cellules photo-électriques.

- **Conduite de l'essai :**

Après la mise en place de la cellule remplie de son échantillon de ciment ou fines de déchet, il suffit de presser le bouton départ pour que la pompe électrique d'aspiration se mette en marche et que l'essai commence. A la fin automatique de l'essai, le temps de passage s'affiche et restera maintenu jusqu'au nouvel essai.



Figure II.4: Détermination de la surface spécifique (Perméabilimètre de Blaine)

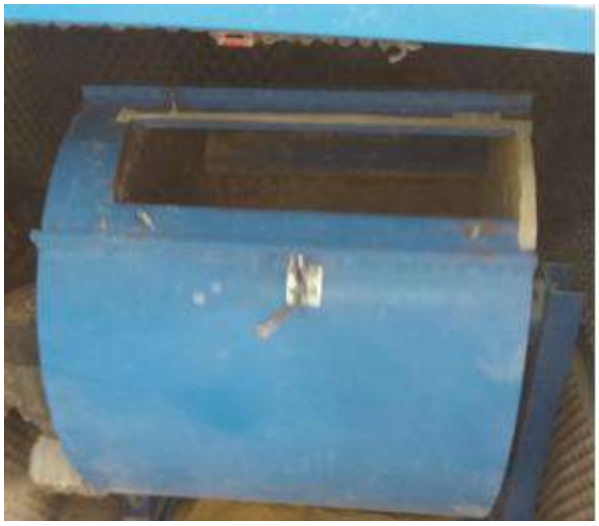




Figure II.5 los angeles et letuve

Les résultats de sa composition chimique sont fournis dans le tableau II.2 [25]

Tableau II.2 caractestique chimiques du laitier d'EL hadjer

Composition chimique (%)									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	SO_3	TiO_2	Total
40,10	6,00	2,00	42.20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20	101,15

II.2.4 Eau de gâchage

Pour la confection des éprouvettes on a utilisé l'eau potable du robinet, exempte d'impureté set propre et conforme à la norme NF EN 1008 [26].

II..3 Malaxage et préparation

Le malaxage des mortiers se fait en malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L ***Figure II.6*** pour la confection des éprouvettes 4×4×16cm. L'introduction des constituants se fait du plus gros au plus fin. Le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin d'assurer un mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés **[18]**.

Le malaxage de chaque mélange se fait de la manière suivante :

- ✓ On verse les gros grains (le sable).

- ✓ On ajoute le ciment après on malaxe à sec pendant 30 sec.
- ✓ On verse deux tiers d'eau de gâchage, puis on malaxe pendant 1 minute.
- ✓ Après, malaxé le mélange à vitesse rapide pendant 3 minutes, puis on laisse le mélange repose 3 minute.
- ✓ Puis lancer vitesse rapide pendant 1 minute et 30 sec.

➢ L'Introduction du laitier à haut fourneau été effectuée au départ (après l'introduction du sable).

✓ Mesure la densité et l'ouvrabilité du mortier frais immédiatement au fin malaxage **[18].**



Figure II.6 malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L

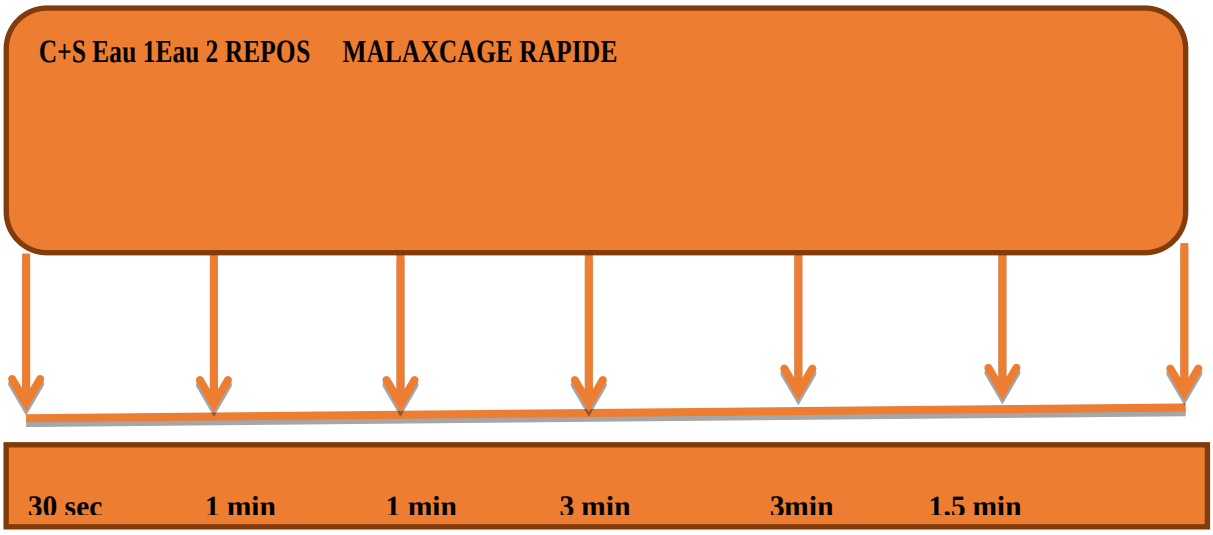


Fig.II.7 Séquence de malaxage du mortier

II.4 Préparation des éprouvettes

Les différents types de mortiers sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le coulage des éprouvettes est réalisé sans vibration ni compactage dans des moules métalliques de forme prismatique 4x4x16 cm destinés aux différents essais programmés à l'état durci. Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 36 éprouvettes (figure II.8).



Figure II.8 / LES MOULES 4X4X16

II.5 Conservation

Après le démoulage qui fait après 24h les éprouvettes destinées à l'écrasement seront conservées dans l'eau à une température de 20°C.(Figure II.9) : Conservation dans l'eau a20 °C



Figure II.9 : conservation dans l'eau a 20 °C

II.6 Les essais sur les mortiers

II.6.1 Etat frais

II.6.1.1 Essais d'étalement au mini-cône

Dans cette étude, deux essais ont été effectués pour valider le caractère des mortiers Auto plaçant formulés selon les recommandations de l'AFGC. A. Essais d'étalement au mini-cône

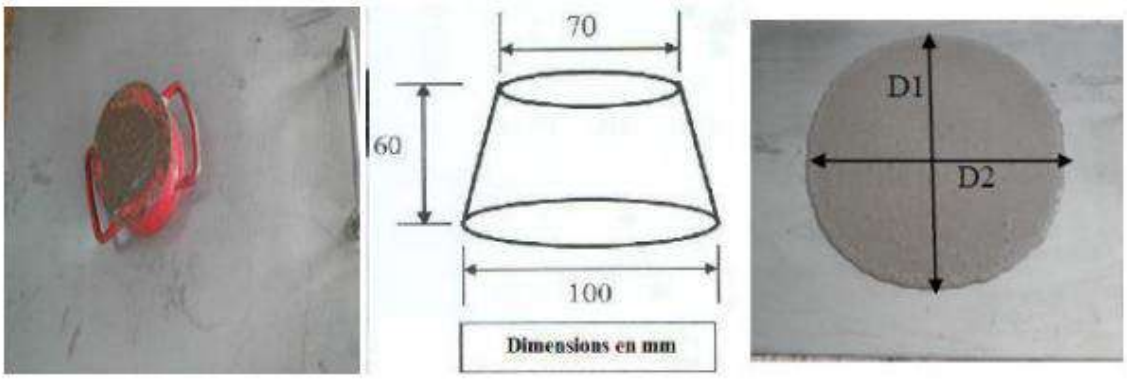


Figure II.10 : Essai d'étalement au mini cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placer sur une surface horizontale Lisse, une fois le moule soulevé et la galette stabilisée, le diamètre d'étalement est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La Figure II.10 montre les étapes de l'essai d'étalement au mini cône.

D'après les résultats des expériences réalisées sur des matériaux japonais par Nawa et al. [27], L'étalement doit être compris entre 250 et 280 mm, Quant à Chai qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm, un autre intervalle pris par Domone entre 270 et 330mm [28].

II.6.1.2 L'air occlus:

- ✓ **Objectif de l'essai :**

Pour la mesure de l'air occlus dans le mortier frais, on a utilisé la méthode dite « par pression ».

- ✓ **Principe de l'essai:**

Comme le seul élément compressible dans le mortier frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au mortier frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le mortier.

✓ **Equipment nécessaire :**

Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à mortier de capacité de 1litre(Figure II-11) selon la norme française NF EN 12350-7.

✓ **Conduit de l'essai:**

On commence par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois. On fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau l'aide d'un tube dans le premier robinet. Le deuxième est ouvert. Quand l'eau commence à sortir par ce dernier, on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0 ٪On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Figure II-11 : L'aéromètre à mortier.

II.6.2 Etat durci

II.6.2.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme EN 196-1 [24] par compression Axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques après rompre en flexion a l'âge de 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN (Figure II.12)

La résistance à la Compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois (03) Demi-prismes des trois éprouvettes.

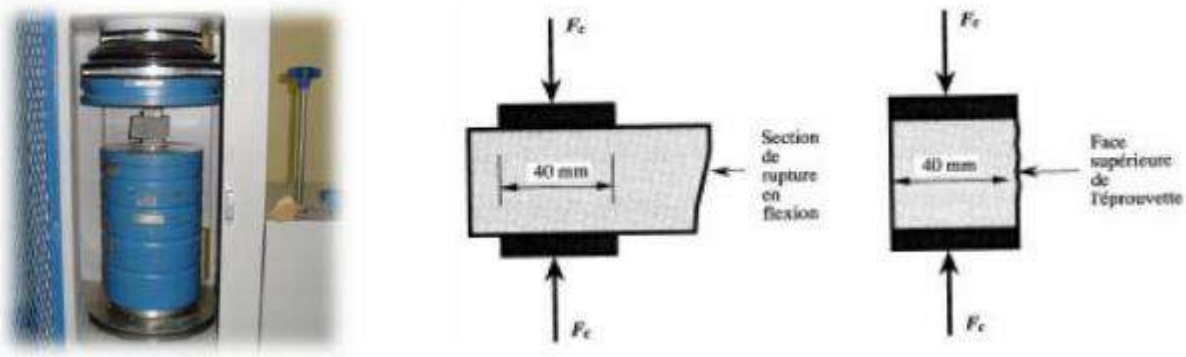
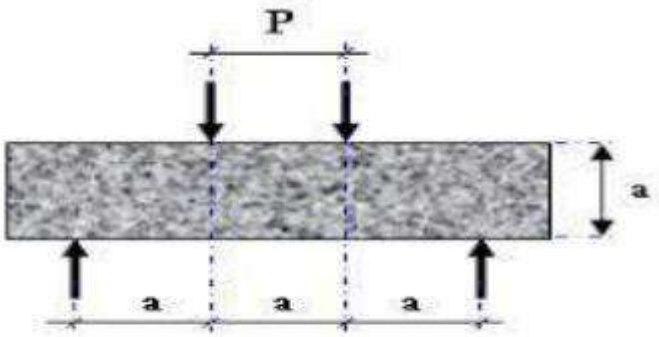


Figure II.12: Essai de compression sur mortier.

II.6.2.2Essai de traction par flexion

L'essai de résistance à la traction consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition (PC) par lequel on introduit la vitesse de chargement (50 N/s)suivant la norme en vigueur [29]. La force à la rupture est donnée par le même système. La résistance à la traction est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de (4×4×16) cm3 à 7 et 28 jours.



A. Essai de traction par flexion

II.7 Organigramme D'expérience Etudier:

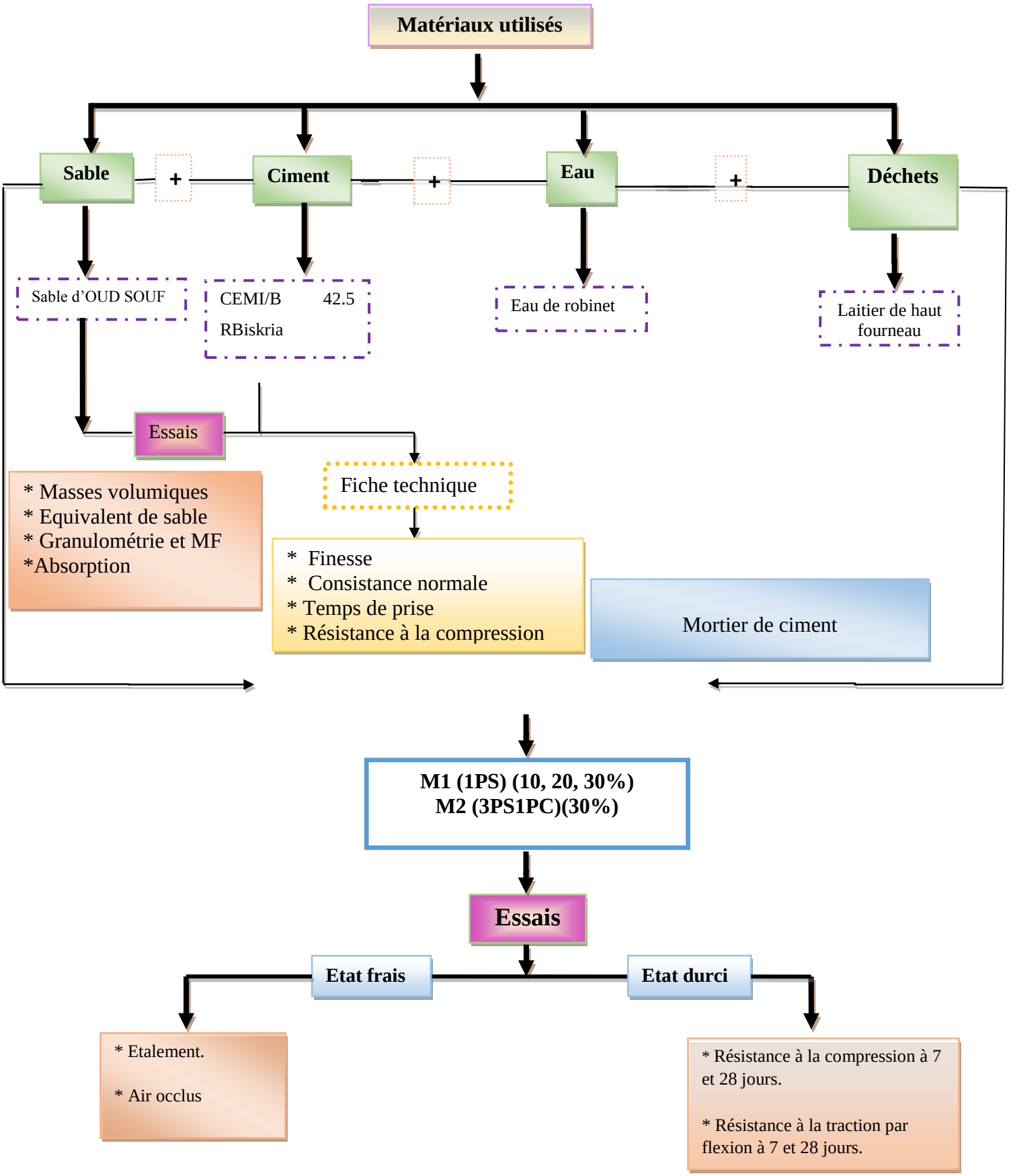


Figure II.13: Variables étudiées.

CHAPIRETE III
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction :

L'étude expérimentale a pour objectif principal d'étudier l'effet de laitiers de haut fourneau sur le comportement des mortiers de ciment à l'état frais et durci. Pour cela, différents mortiers ont été réalisés et comparés à un mortier témoin sans déchets. Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés ci-après.

III.2 Formulation de mortier :

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité et la qualité nécessaire de chaque matériaux surtout la finesse et e taux de remplacement de laitier de hauts fourneaux afin d'obtenir un mortier avec une bonne ouvrabilité et bonnes caractéristiques mécaniques, pour cela on a préparé deux types de mortiers, le mortier de ciment (M1) qui se compose généralement d'un part de sable, un part de ciment et des quantités différentes de laitier de haut fourneau (10%,20 et 30%) avec un mortier de ciment témoin et un rapport E/C de 0.5, pour le deuxième mortier (M2) on à formuler avec 3 parts de sable, un part de ciment et 30% de laitier de haut fourneau avec le même rapport E/C = 0.5 .

Il faut noter que le laitier utilisé testé par l'essai de Blaine et nous donne

Le tableau suivant (III.1) montre les différentes compositions de mortiers réalisés

Tableau III.1 : Composition des différents mortiers réalisés.

	Matériaux / Pourcentage de laitier	Sable	Ciment	eau	laitier
M1 (1PS1PC)	0%	900	900	450	
	10%	900	810	450	90
	20%	900	720	450	180
	30%	900	630	450	270
M2 (3PS1PC)	0%	1350	450	225	
	30%	1350	315	225	135

III.3 État frais

Les différents essais réalisés sur le mortier à l'état frais sont résumés dans le tableau ci-dessous :

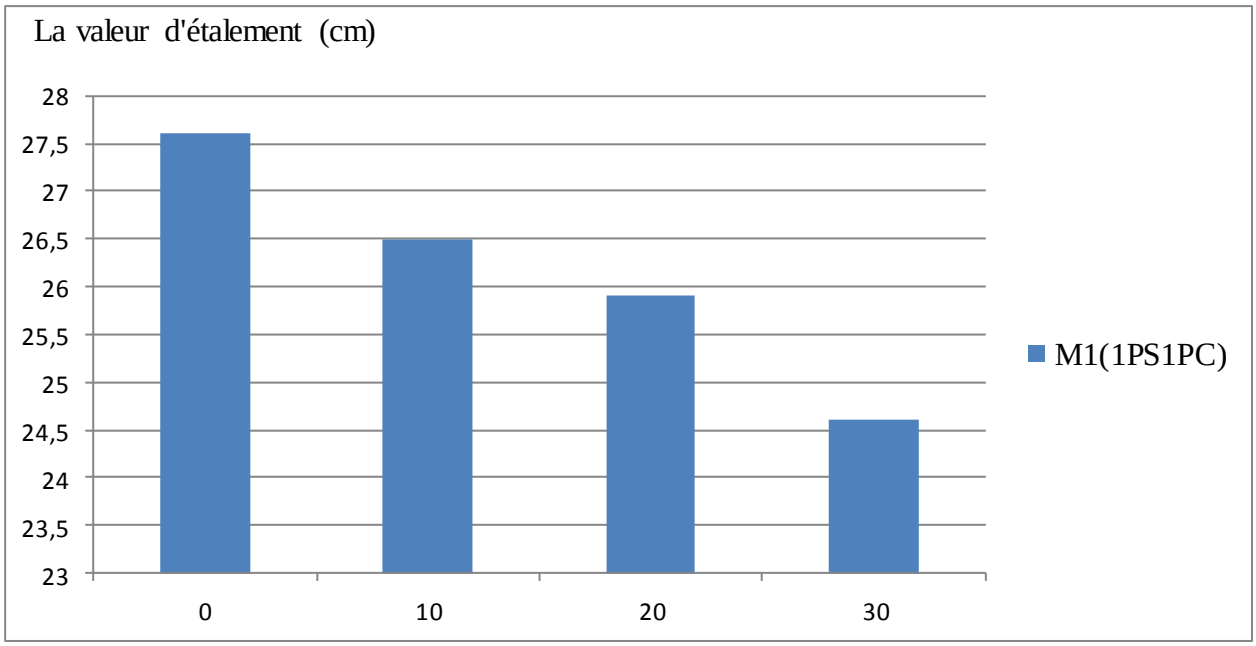
Tableau III.2 Essais appliqués sur le mortier frais.

Essai	Appareil
Etalement	Mini cône
L'air occlus	L'aéromètre à mortier

Les résultats obtenus sont présentés et discutés ci-après :

Tableau III.3 Les résultats obtenus de l'essai d'étalement

Mortier utilisé	Pourcentage de laitier de haut fourneau	La valeur d'étalement (cm)	
		Pour chaque mélange	∑
M1 (1PS1PC)	0%	27.3	27.6
		27.5	
		28.0	
	10%	26.7	26.5
		26.5	
		26.3	
	20%	25.6	25.9
		26.3	
		25.8	
	30%	24.4	24.6
		24.9	
		24.5	



La figure III.1 l'effet de pourcentage de laitier de haut fourneau sur la valeur d'étalement.

Le tableau suivant III.4 les résultats de l'essai d'air occlus pour les deux mortiers

Type de mortier utilisé	Pourcentage de laitier de haut fourneau (%)	Air occlus (%)
M1 (1PS1PC)	0	1.25
	10	1.35
	20	1.50
	30	1.55
M2 (3PS1PC)	0	5.9
	30	8.9

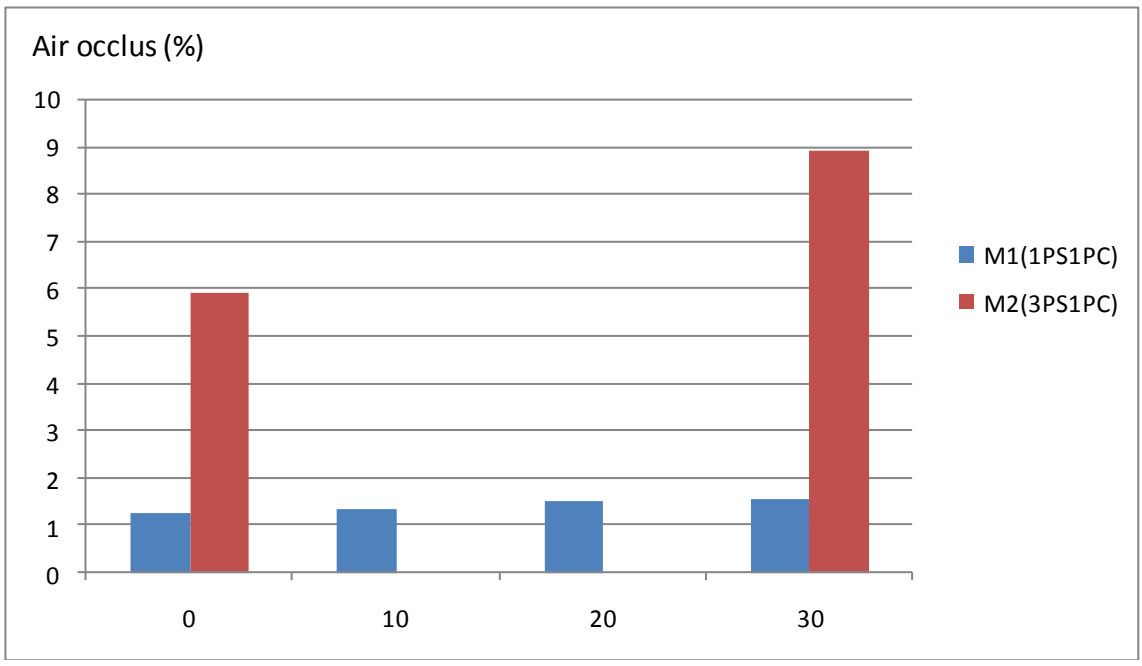


Figure III.2 les résultats de l'air occlus en fonction de pourcentage de haut fourneau

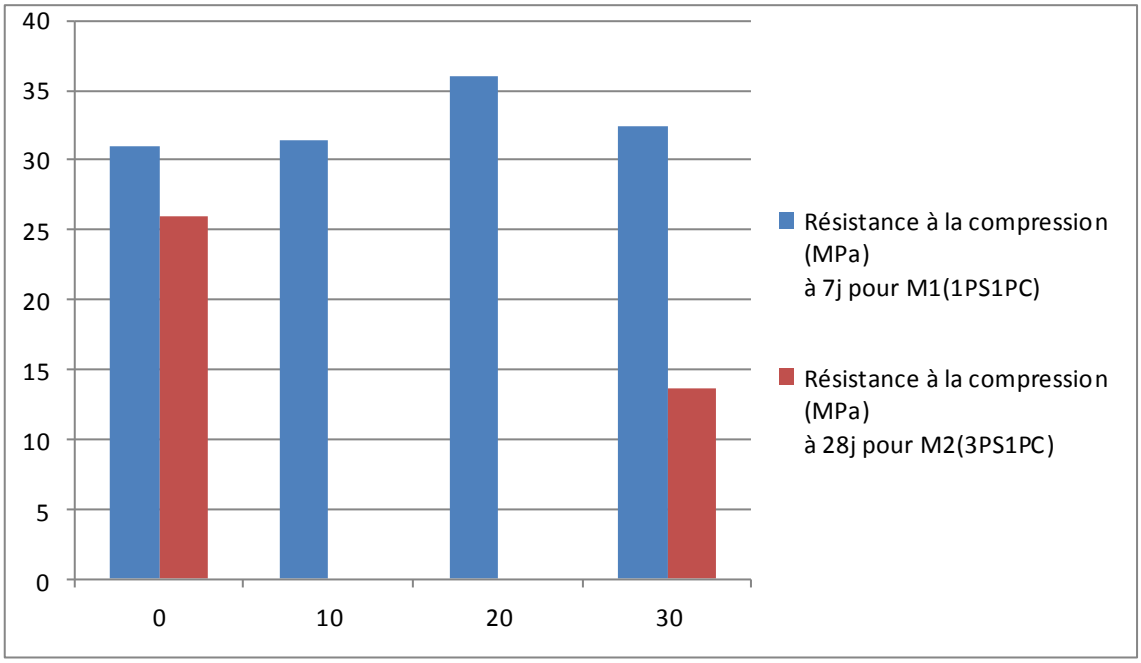


Figure III.3 La résistance à la compression en fonction de poucentage de laitier de haut à fourneau à 7 jours

III.4 État durci

III.4.1 Résistance à la compression

Le Tableau III.5 les résultats de la résistance à la compression à 7 jours des différents mortiers réalisés

Type de mortier utilisé	Pourcentage de laitier de haut fourneau (%)	Charge de compression (KN)	∑ Charge de compression (KN)	Contrainte(MPa)	∑ Contrainte(MPa)
M1 (1PS1PC)	0%	47.40	46.14	29.80	31
		42.71		27	
		48.31		36.70	
	10%	47.15	49.68	29.66	31.4
		48.32		30.34	
		53.57		33.88	
	20%	51.25	57.06	32.23	36.02
		53.73		33.75	
		66.22		42.09	
	30%	51.92	51.50	32.78	32.42
		59.53		37.33	
		43.97		27.17	
M2 (3PS1PC)	0%	38.90	41.37	24.46	26.03
		39.95		25.22	
		45.26		28.43	
	30%	23.46	21.81	14.73	13.73
		21.20		13.88	
		20.08		12.60	

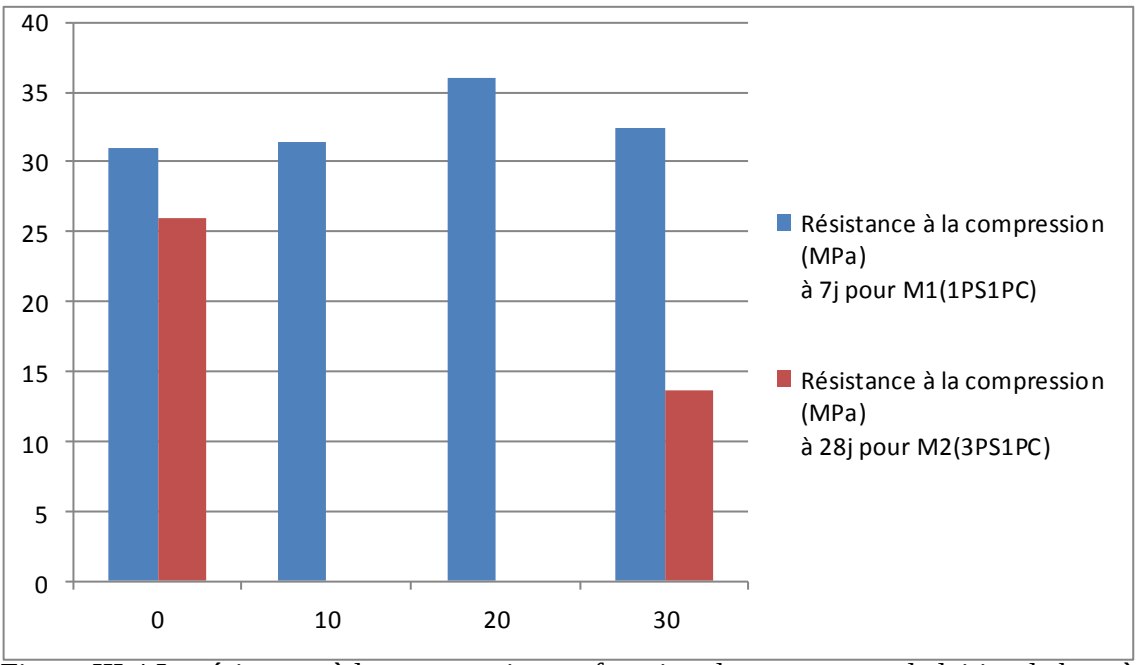


Figure III.4 La résistance à la compression en fonction de poucentage de laitier de haut à fourneau à 7 jours

Tableau III.6 les résultats de la résistance à la compression à 28 jours des différents mortiers réalisés

Type de mortier utilisé	Pourcentage de laitier de haut fourneau (%)	Charge de compression (KN)	∑ Charge de compression (KN)	Contrainte(MPa)	∑ Contrainte(MPa)
M1 (1PS1PC)	0%	88.89	87.66	55.71	55.11
		86.22		54.33	
		87.89		55.31	
	10%	75.20	74.93	47.20	47.13
		74.56		46.96	
		75.05		47.25	
	20%	66.43	65.50	41.70	41.05
		63.08		39.56	
		66.89		41.91	
	30%	54.82	60.29	34.54	37.95
		64.09		40.35	
		61.98		38.98	
M2 (3PS1PC)	0%	45.01	41.40	24.46	25.93
		43.69		25.22	
		35.52		28.43	
	30%	34.08	36.09	21.48	22.65
		39.47		24.71	
		34.74		21.76	

Les figures III.3 a III.4 montre la variation de la résistance à la compression des mortiers à nase de laitier de haut fourneau à 7 et 28 jours selon les résultats présenté, Il est clair que l'utilisation de ce type de laitier a un effet sur la résistance à la compression qui a une courbe ascendante plus la proportion de cette poudre est élevée par rapport au mortier témoin ou mortier sans laitier de haut fourneau pour le court terme 7 jour avec une augmentation de 16% mais on remarque qu'elle commence à descendre dans l'utilisation de 30% de laitier dans les deux types de mortiers utilisées.

Pour les résultats de 28 jours, une dégradation de la résistance de 32 et 12% est enregistrée pour M1 et M2 successivement.

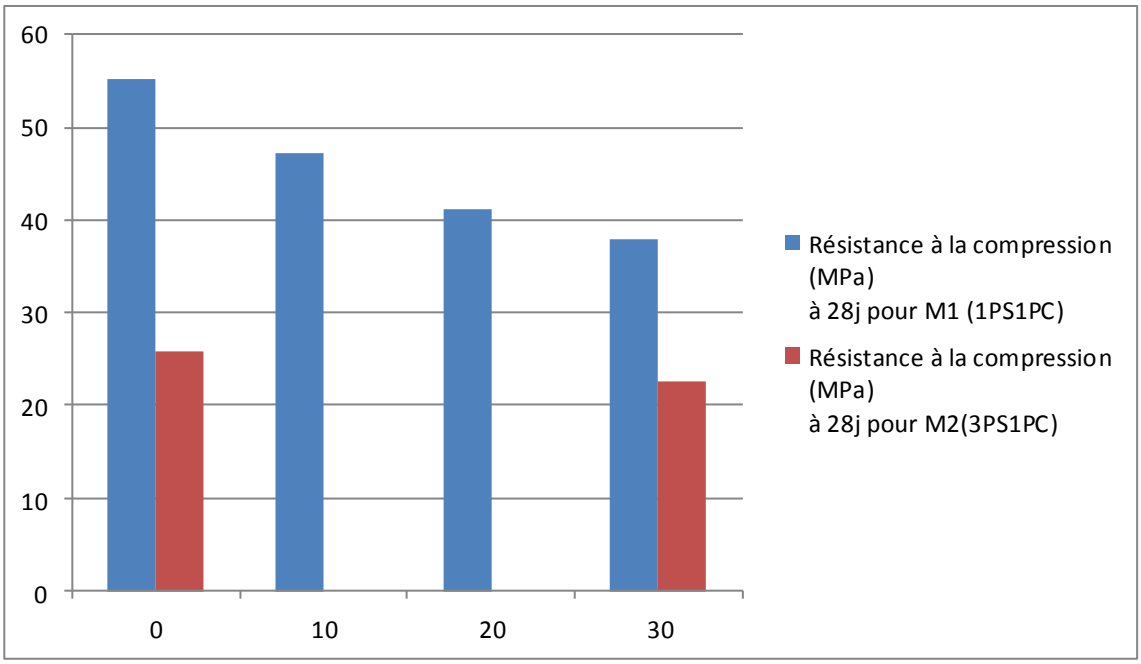


Figure III.6 La résistance à la compression en fonction de poucentage de laitier de haut à 28 jours fourneau

III.4.1 Résistance à la Traction par flexion :

Les résultats de la résistance à la traction des différents mortiers réalisés en fonction de l'âge et le pourcentage de substitution laitier de haut Fournaux et la combinaison entre les deux sont présentés dans les Figures III.5 - III.6 et les tableaux III.7 et III.8 Suivantes.

Le Tableau III.7 présente les résultats de la résistance à traction à 7 jours des différents mortiers réalisés

Type de mortier utilisé	Pourcentage de laitier de haut fourneau (%)	Charge appliquée (KN)	∑Charge appliquée (KN)	Contrainte (MPa)	∑Contrainte (MPa)
M1 (1PS1PC)	0%	2.69	2.14	16.62	14.32
		1.67		12.15	
		2.16		14.20	
	10%	1	0.89	10.85	10.37
		0.94		13.18	
		0.74		7.09	
	20%	1.44	1.33	14.30	13.53
		1.03		12.30	
		1.52		14	
	30%	2.04	1.36	15.57	12.56
		0.93		11.86	
		1.13		10.26	
M2 (3PS1PC)	0%	1.04	0.70	10.30	8.51
		0.53		8.02	
		0.55		7.03	
	30%	0.73	0.74	7.41	8.68
		0.59		6.88	
		0.91		11.77	

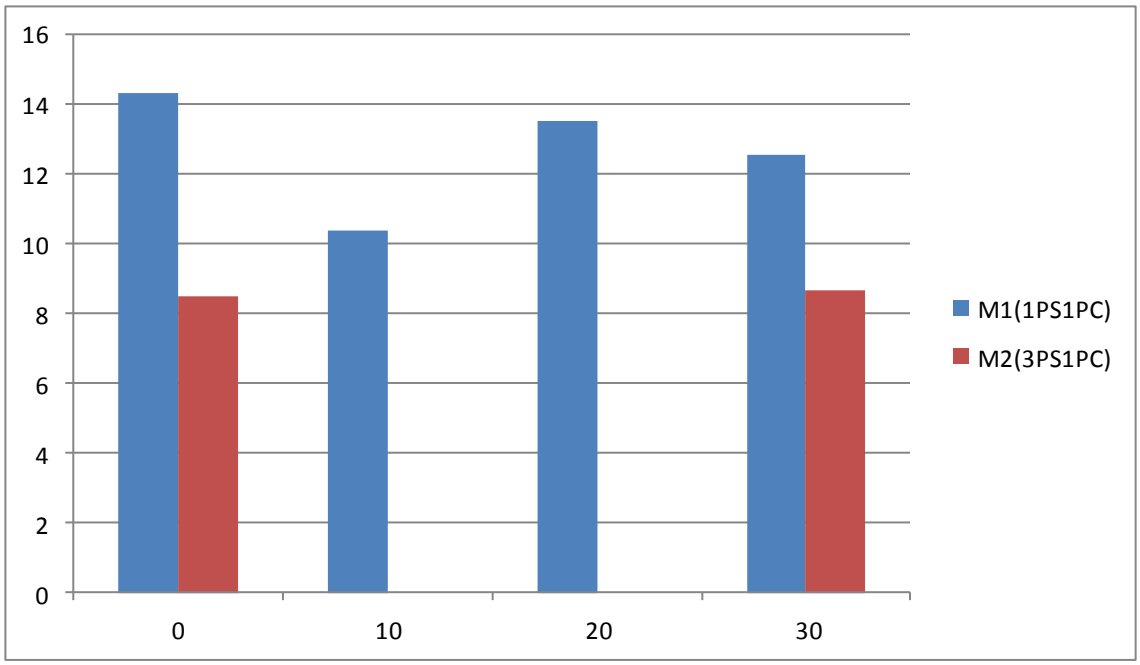


Figure III.6 La résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage de laitier de haut fourneau à 7 jours

Tableau III.8 les résultats de la résistance à traction à 28 jours des différents mortiers réalisés

Type de mortier utilisé	Pourcentage de laitier de haut fourneau (%)	Contrainte (MPa)	∑Contrainte (MPa)
M1 (1PS1PC)	0%	6.15	6.38
		6.60	
		6.40	
	10%	6.77	6.96
		7.20	
		6.92	
	20%	7.60	7.68
		7.56	
		7.90	
	30%	6.24	6.20
		6.30	
		6.06	
M2 (3PS1PC)	0%	4.47	3.56
		2.90	
		3.32	
	30%	6.28	6.31
		6.63	
		6.02	

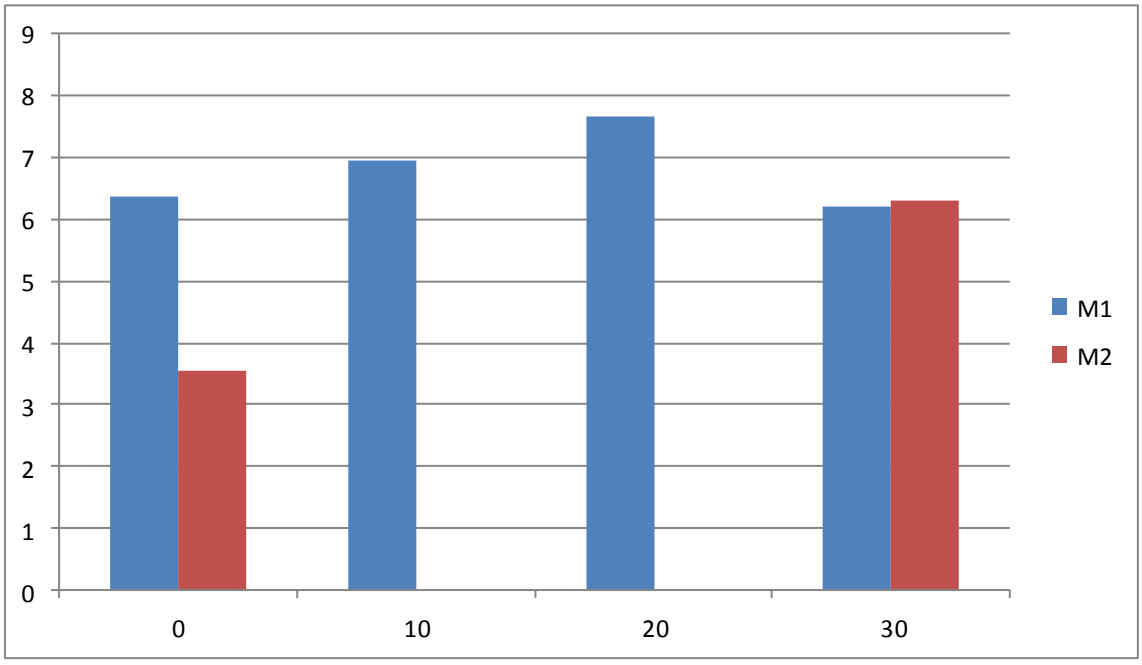


Figure III.7 La résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage de laitier de haut fourneau à 28 jours

Les figures III.6-III.5 montrent la variation de la résistance à la traction des mortiers en fonction de pourcentage de laitier de haut fourneau des différentes mortiers M1 et M2 à l'âge de 7 et 28 jours ; on remarque que la résistance à la traction de M1 et grande que cela de M2 sans utilisation de laitier pour 7 jours et nous n'avons pas enregistré une valeur supérieure lors de son utilisation (10%,20% et 30%), par contre à l'âge de 28 jours la valeur optimale enregistrée pour le mortier M1 avec l'utilisation de 20% de laitier avec une augmentation de 20.3% par rapport au mortier témoin, d'autre part la résistance de mortier M2 aurait diminue a l'utilisation de 30% de laitier de haut fourneau.

conclusion générale

La présente expérience a pour but de fabriquer un matériau économique et écologique en même temps en mélangeant les substances du ciment par un pourcentage par rapport au laitier de hauts-fourneaux en plus nous avons fait une éprouvette de référence de mortier de ciment tout en utilisant un sable adéquat au mortier . A la fin de notre expérience et a travers les résultats trouvés on peut conclure que :

- ✓ Nous avons remarqué que l'écoulement diminue lors de l'adition de laitier.
- ✓ D'après l'essai de l'aire occlus le pourcentage d'aire dans le mortier de ciment augmente.
- ✓ Un taux de 20% de laitier s'avère efficace en terme de résistance, en effet le gain de résistance peut aller jusqu'à 15% à long terme.
- ✓ L'utilisation du laitiers a une finesse de 3200cm2/g est avérée très importante dans le cas des mortiers fabriqué à base de sable pour améliorer la porosité de ce dernier, de sorte que 20% du laitier peut couvert la porosité produite par l'utilisation de sable.
- ✓ les résultats d'écrasement montre que la contrainte augmente en ajoutant le laitier jusqu'à 20% et a partir de plus de 20 % elle commence a re-diminue.

Les Références

[1] Article L. 541-3 Code de l'Environnement - Livre V, Titre IV – chapitre 1er relatif à L'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. 2007-2017 Legifrance p. (561-562)

[2] Article L. 541-1-1 Code de l'Environnement, Prévention et gestion des déchets 2007-2017 Legi-france p. (559).

[3] NOUIDER .M « influence e d'eau de gâchage sur la résistance mécanique d'un mortier à sable des dunes master hydraulique urbain université kasdimerbahOurgla 2011».

[4] Mr. CHELABI HAMZA et TALEB ZAHIR, Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre, en vue de l'obtention du diplôme de Master en génie civil, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de BOUIRA, 2016/2017.

[5] M.VENUAT « la pratique des ciments .mortiers et béton Tome 1 – caractéristique des liants et des bétons .mise en œuvre des coulis et mortiers » édition 2 –collection moniteur - 277p 1989.

[6] CourardL."Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil" Notes de cours (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux deConstruction, 1998), 195 p.

[7] Karim Ouamane, DG L'AND au service de la gestion des déchets industriels Alger, 25 mai 2017.

[8] Quebaud M., "Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats", Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.

[9] SPERANDIO K., identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en oeuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.

[10] MICHEL M." Valorisations des déchets et des sous-produits industriels "EdMassion, Paris (1981).

[11] https://mainsvertes.org/2019/03/19/tout-savoir-sur-les-dechets-en-algerie-partie-1/

[12] http://www.ccpays-solesmois.fr/vivre-ici/dechets/dechets-dangereux/

[13] https://www.algerie360.com/vol-de-cables-courtiers-des-dechets-et-cri-dalarme-des-entreprises-les-combines-de-la-mafia-du-cuivre/

[14] http://www.cecif.com/produits/fiche-8228-les-dechets-de-fer.html

[15] IkhlefKhadidja et ZirariImen, valorisation de déchets de fonderie dans le béton de sable, projet de fin d'étude pour l'obtention du diplome de Master en Génie Civil, Universitaire Yahia FARES de Médéa, 2018.

[16] http://www.zhengkefr.com/drying-equipment/rotary-dryer/fly-ash-rotary-dryer.html

[17] BELMOKHTAR NASSIMA, ZERAIG AKILA «Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment » ,en vue de l'obtention du diplôme de Master en génie civil,Université M'Hamed Bougera de Boumerdes 2017.

[18] Ikhlef Khadidja et Zirari Imen, valorisation de déchets de fonderie dans le béton de sable, projet de fin d'étude pour l'obtention du diplome de Master en Génie Civil, Universitaire Yahia FARES de Médéa, 2018.

[19] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[20] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[21] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR

[22] NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

[23] HAMRAOUI Somia et REBAIA Zohra 2017 « Etude de l'effet des additions minérales sur le comportement d'un mortier auto plaçant traité thermiquement» projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master, Université Yahia Fares de Médéa.

[24] CEN EN 196-1 Nome française CENEN 196-1,1995 ≪ Méthode d'essais des ciments, partie I : ≪ Détermination des résistances mécanique ≫ AFRON, Paris, Aout .

[25] BACHEN. Sara., 2015 « Effet couplé de la température et des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons auto plaçant »mémoire de Magister, Université Yahia Fares de Médéa.

[26] NF EN 1008, 2003,« Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », AFNOR.

[27] NAWA T., IZUMI T., EDAMATSU Y., 1998 «State- of- the-art- report on materials and design of self-compacting concrete» Proc. of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, Kochi University of Technology, Japan, pp. 166-190.

[28] DOMONE P.L., JIN J., 1999« Properties of mortar for self-compacting concrete », Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 109-120.

[29] NF EN 12390-5, 2001, « Essai pour béton durci. Partie 5 : Résistance à la flexion des éprouvettes », AFNOR.