

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie
DEPARTEMENT : Génie Civil



DOMAINE : Science et Technologie
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

Présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Par :

- **ALLAL Meftah**
- **BERBICHE Younes**

LE THEME

**Propriétés et durabilité des pâtes de laitier
cristallin dans les milieux agressifs**

Devant le jury composé de :

Pr. Bibi Mekki	Université de M'sila	Président
Pr. Rahmouni Zine El Abidine	Université de M'sila	Encadreur
Dr. Tebbal Nadia	Université de M'sila	Co-Encadreur
Dr. Maza Mekki	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

A ma chère mère,

la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle je n'aurais eu la volonté

d'atteindre ce niveau ;

*A qui j'ai appris le sens la persistance et l'ambition. A qui reste toujours
la source du don infini. A qui m'a éduqué l'amour du travail et la patience pour
obtenir le vœux, à mon cher père que Dieu le tout puissant prolonge son âge.*

A mon frères :taki. A tous mes sœurs :Hakima, Zakia Ourda, Nadjet et Hanan.

A Mon ami Mr/Wail et sa femme Mme Mariem.

*Tous ceux qui ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce
travail. Pour notre pays*

Tout en exprimant tous nos sentiments de respect,

*Nous consacrons cet humble travail à l'accomplissement de longs TEMPS
d'études.*

A mes collègues de département de génie civil promotion 2019-2020

A tous mes amis.

...je dédie ce modeste travail

ALLAL MEFTAH

Dédicaces

A ma chère mère,

la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle je n'aurais eu la volonté

d'atteindre ce niveau ;

*A qui j'ai appris le sens la persistance et l'ambition. A qui reste toujours
la source du don infini. A qui m'a éduqué l'amour du travail et la patience pour
obtenir le vœux, à mon cher père que Dieu le tout puissant prolonge son âge.*

*A tous mes frères : Zakaria, Toufik, Abdelmalek, Charif et Adam. A tous mes
sœurs.*

*Tous ceux qui ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce
travail. Pour notre pays*

Tout en exprimant tous nos sentiments de respect,

*Nous consacrons cet humble travail à l'accomplissement de longs TEMPS
d'études.*

A mes collègues de département de génie civil promotion 2019-2020

A tous mes amis.

...je dédie ce modeste travail

BERBICHE YOUNES.

Remerciement

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu mon DIEU Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

Aussi je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur PR,

RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE et Mme TEBBAL Nadia pour son

Incroyable dévotion à parfaire notre travail et à nous aider par ses orientations et ses précieux conseils pour l'élaboration de cette Et Pour leurs enseignements,

leurs conseils, leurs encouragements et surtout pour leurs patiences ; Je remercie très vivement le jury pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Mes enseignants(es) du département de génie civil et les responsables du laboratoire.

Mes chaleureux remerciements vont également, à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation ;

Je souhaite également remercier tous les enseignants de département de génie civil ayant assurés mes années d'études.

Aussi, je remercie tous mes collègues du Département de génie civil pour le soutien moral qu'ils m'ont apporté.

je ne saurais jamais suffisant remercier mon père et ma mère, mes frères et mes sœurs, que je porte toujours avec moi dans ma pensée. Sans leurs

confiances immenses en moi, sans leurs aides et leurs amours, je n'aurais pas pu aller au bout de mes projets.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont conseillées, qui se sont simplement intéressées à ce travail, et aussi celles qui, nous l'espérons me pardonneront de les avoir oubliées.

Allal Meftah

Remerciement

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu mon DIEU Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

Aussi je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur PR,

RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE et Mme TEBBAL Nadia pour son

incroyable dévotion à parfaire notre travail et à nous aider par ses orientations et ses précieux conseils pour l'élaboration de cette Et Pour leurs enseignements,

leurs conseils, leurs encouragements et surtout pour leurs patiences ; Je remercie très vivement le jury pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Mes enseignants(es) du département de génie civil et les responsables du laboratoire.

Mes chaleureux remerciements vont également, à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation ;

Je souhaite également remercier tous les enseignants de département de génie civil ayant assurés mes années d'études.

Aussi, je remercie tous mes collègues du Département de génie civil pour le soutien moral qu'ils m'ont apporté.

je ne saurais jamais suffisamment remercier mon père et ma mère, mes frères et mes sœurs, que je porte toujours avec moi dans ma pensée. Sans leurs

confiances immenses en moi, sans leurs aides et leurs amours, je n'aurais pas pu aller au bout de mes projets.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont conseillées, qui se sont simplement intéressées à ce travail, et aussi celles qui, nous l'espérons me pardonneront de les avoir oubliées.

Berbiche Younes.

RESUME

La valorisation des laitiers de haut fourneau d'El Hadjar, dans le domaine de la construction, est un travail qui vise d'une part la sauvegarde de l'environnement et la lutte contre les nuisances qui en résultent, et d'autre part, l'utilisation rationnelle et économique des matériaux locaux. L'utilisation du laitier du haut fourneau comme granulats fins et grossiers la réalisation des bétons est connu depuis fort longtemps, vu ses caractéristiques physiques et mécaniques importantes.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation du laitier du haut fourneau d'El-Hadjar (Annaba), tout en visant :

La détermination des caractéristiques du laitier granulé et cristallisé d'El-Hadjar.

La possibilité d'utiliser les granulats de laitier (granulé comme liant) et (cristallisé comme sable) pour fabriquer des bétons identiques ou meilleurs aux bétons ordinaires (à base de granulats naturels). Les résultats obtenus sont prometteur.

Mots clés : Valorisation, Mortier, ciment, Laitier de haut fourneau, Les résistances mécaniques et Durabilité.

ABSTRACT

The valuation of El Hadjar blast furnace slag, in the construction sector, is a work that aims on the one hand to protect the environment and fight against the resulting nuisances, and on the other hand, the rational and economical use of local materials. The use of blast furnace slag as fine and coarse aggregates in the production of concrete has been known for a long time, given its important physical and mechanical characteristics. This study is part of the valuation of slag from the blast furnace of El-Hadjar (Annaba), while aiming to:

The determination of the characteristics of granulated and crystallized El-Hadjar slag.

The possibility of using slag aggregates (granulate as leant) and (crystallized as sand) to make concrete identical or better than ordinary concrete (based on natural aggregates). The results obtained are promising.

Key words: Valuation, Mortar, Cement, Blast furnace slag, Mechanical resistance and durability.

ملخص

إن تثمين الأفران العالية لمركب الحجار في ميدان البناء هو عمل يهدف من جهة إلى الحفاظ على البيئة، ومن ناحية أخرى محاربة الأضرار الناتجة عنه، كذلك الاستعمال الأمثل والاقتصادي للمواد المحلية، إن استعمال خبث الأفران العالية كحصى صغير (الرمال) أو كبير (ركام) معروف منذ القديم في صناعة الخرسانة، نظرا لخصائصه الفيزيائية و الميكانيكية العالية.

الدراسة التالية تدخل في إطار تقييم نفايات صناعة الحديد (الخبث) المتراكمة في مصنع الحجار - عنابة - وهذا من خلال:

- دراسة خصائص الخبث المفتت و الخبث المتبلور (خبث الحجار).
- دراسة إمكانية استعمال الخبث المفتت كإسمنت و الخبث المتبلور كرمال لإنجاز خرسانة مماثلة أو أحسن من الخرسانة العادية (خرسانة الحصى الطبيعي). النتائج المتحصل عليها جد طموحة.
- الكلمات المفتاحية : تثمين ، الخرسانة، الإسمنت، خبث الأفران العالية، المقاومة الميكانيكية والاستدامة .

Sommaire

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	v
ABSTRACT.....	v
ملخص	vi
SOMMAIRE.....	vii
Listes des tableaux.....	x
Listes des figures.....	xii
Introduction générale.....	01
Généralités.....	01
Objectifs--	01
Plan du mémoire.....	02

CHAPTRE 1 : LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

1. Introduction.....	03
1.1 Laitier cristallin.....	03
1.1.1 Introduction.....	03
1.1.2 Description générale du laitier cristallin.....	03
1.1.2.1 laitier de hauts fourneaux.....	04
1.1.2.2 Laitier d'aciérie électrique	05
1.1.2.3 laitiers d'aciérie de convertisseur à oxygène	05
1.1.3 Propriétés du laitier cristallin	06
1.1.3.1 Distribution granulométrique et caractéristiques de fabrication	06
1.1.3.2 Densité.....	07
1.1.3.3 Absorption	07
1.1.3.4 Etat de surface.....	07
1.1.4 Composition chimique.....	08
1.2 Le laitier granulé.....	08
1.2.1 Caractéristiques.....	09
1.2.1.1 Composition chimique.....	09
1.2.1.2 Composition minéralogique potentielle du laitier.....	09
1.2.1.3 Granulométrie	10
1.2.1.4 Masses volumiques	10
1.2.2 Réactivité hydraulique du laitier granulé.....	10

SOMMAIRE

1.2.2.1	But de la tempe	10
1.2.2.2	Taux de vitrification	11
1.3	L'activation chimique	11
1.3.1	Introduction	11
1.3.2	Définition	12
1.3.3	Rôle de l'activant	12
1.3.4	Les différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus	12
1.3.4.1	Activation alcaline	12
1.3.4.2	Activation sulfatique	13
1.3.4.3	Activation calcio – sulfatique	13
1.3.4.4	Activation par le Clinker du ciment portland	13
1.4	Valorisation du laitier en Algérie	14
1.5	Utilisations du laitier en génie civil	14
1.5.1	Emploi du laitier granule dans la fabrication des ciments	14
1.5.2	Emploi du laitier vitrifié dans les liants hydrauliques routiers	15
1.5.3	Emploi du laitier vitrifié dans le béton	16
1.5.3.1	Le laitier granule (NF P 18-306)	16
1.5.3.2	Le laitier moulu (NF P 18-506)	17
1.6	Conclusion	17

CHAPITRE 2 : L'ACTIVATION CHIMIQUE DU LAITIER ET LEUR

DURABILITE 2.1	Introduction	18
2.2	Définition	18
2.3	Rôle de l'activant	18
2.4	Les différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus	19
2.4.1	L'activation calcique du laitier de haut fourneau	19
2.4.2	L'activation alcaline du laitier de haut fourneau	20
2.4.2.1	Activateurs alcalins	20
2.4.2.2	Hydratation	23
2.4.2.2.1	Nature des produits d'hydratation	23
2.4.2.2.2	Nature des C-S-H	24
2.4.2.2.3	Microstructure des produits d'hydratation du laitier activé par Na_2CO_3	25
2.4.2.2.4	Cinétique d'hydratation	25
2.4.2.2.5	Propriétés de durabilité	26
2.4.3	L'activation sulfatique du laitier de haut fourneau	27
2.4.3.1	Produits d'hydratation	27
2.4.4	Activation calcio-sulfatique	27
2.4.5	Activation sodo-sulfatique	28
2.4.6	L'activation du laitier de haut fourneau en présence de ciment portland	28
2.4.6.1	Hydratation du mélange de laitier et ciment Portland	28
2.4.6.2	Activation chimique	29
2.4.6.3	Activateurs alcalins	29
2.4.6.4	Activateurs chlorés	30
2.4.6.5	Influence de Mg	30
2.5	Autres moyens d'accélération	31
2.5.1	Activation thermique	31
2.5.1.1	Liant ternaire	32
2.5.2	Accélération par le ciment sulfo-alumineux	32

SOMMAIRE

2.5.3. Activation par le Clinker du ciment portland -----	32
2.6. Les facteurs d'activation -----	33
2.6.1. La finesse -----	33
2.6.2. La température de cure -----	34
2.7. Propriétés liées à la durabilité des bétons de laitier -----	35
2. 7.1. Perméabilité du béton à l'eau-----	36
2. 7.2. Résistance aux cycles de gel/dégel-----	36
2. 7.3. Résistance aux cycles de mouillage-séchage et stabilité volumétrique des granulats de laitiers au sein d'une matrice cimentaire-----	38
2. 7.4. Résistance au feu et aux températures élevées -----	39
2. 7.5. Résistance à l'abrasion du béton-----	40
2. 7.6. Lixiviation des métaux lourds-----	40
2.8. Conclusion -----	41

CHAPITRE 3: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

3.1. Introduction -----	42
3.1.1. Matériaux de bases -----	42
3.1.2. Caractéristiques des matériaux -----	42
3.1.2.1. Sable -----	42
3.1.2.1.1. Analyse granulométrique -----	43
3.1.2.1.2. Module de finesse -----	44
3.1.2.1.3. Masse volumique absolue-----	44
3.1.2.1.4. Masse volumique apparente -----	45
3.1.2.1.5. Porosité et Compacité-----	45
3.1.2.1.6. Equivalent de sable-----	46
3.1.2.2. Sable du laitier cristallin -----	46
3.1.2.2.1. Composition chimique-----	46
3.1.2.2.2. Analyse granulométrique du laitier cristallin-----	47
3.1.2.2.3. Masse volumique du laitier cristallin -----	49
3.1.2.2.4. La porosité et compacité du laitier cristallin-----	49
3.1.2.3. Les mélanges (sable de dune + laitier cristallin) -----	49
3.1.2.3.1. Analyse granulométrique du mélanges -----	49
3.1.2.3.2. Masse volumique du mélanges-----	51
3.1.2.4. Caractéristiques de ciment utilisé -----	53
3.1.2.4.1. Caractéristiques chimique de ciment CRS -----	53
3.1.2.5. Le laitier de haut fourneau(laitier granulé) -----	55
3.1.2.5.1. Composition chimique-----	55
3.1.2.5.2. Caractéristiques du laitier de haut fourneau -----	55
3.1.2.5.3. Réactivité hydraulique du laitier-----	56
3.1.2.5.4. Facteurs influant sur l'activité d'un laitier de haut fourneau et sur son hydratation -----	57
3.1.2.5.5. L'Activant-----	57
3.1.2.6. L'eau de gâchage -----	57
3.1.2.7. Les adjuvants -----	58
3.1.2.8. Définition et formulation du mortier normal (EN 196-1) -----	59
3.2. Formulation de notre travail -----	59
3.3. Les essais physico-mécanique -----	63
3.3.1. Mesure des résistances mécaniques -----	63

SOMMAIRE

3.4. Essai de durabilité -----	65
3.4.1. Lieu des essais -----	65
3.4.2. Préparation des échantillons -----	65
3.4.3. Attaque des mortiers par les acides -----	65
3.4.3.1. Procédure de l'essai -----	65
3.4.4. Porosité accessible à l'eau -----	66
3.4.4.1. Méthode de détermination -----	67
3.4.5. Mesure de l'absorption capillaire -----	67
3.5. Conclusion -----	69

CHAPITRE 4: ANNEXE

4.1. Introduction -----	70
4.2. Présentation des résultats -----	70
4.2.1. La masse volumique -----	70
4.2.2. L'absorption d'eau -----	71
4.2.3. la porosité accessible à l'eau -----	71
4.2.4. Les résistances mécaniques -----	72
4.3. fiche technique de l'adjuvant super plastifiant SP40 -----	72
Conclusion générale -----	74
Références bibliographiques -----	75

LISTES DES TABLEAUX

N°	Intitule	N°
Tableau	PREMIER CHAPITRE	Page
Tableau 1.1	Composition chimique du laitier en %	09
Tableau 1.2	Indiqué les différents types de ciment comprenant du laitier en pourcentage	15
Tableau 1.3	Composition des liants composites obtenus par mélange et/ou broyage de clinker ou de coproduits de l'industrie en %	15
Tableau 1.4	Composition chimique du laitier granulé en Pourcentage	16
DEUXIEMME CHAPITRE		
Tableau 2.1	Principales caractéristiques de chaleur d'hydratation d'un laitier activé par différents activateurs alcalins	26
Tableau 2.2	Résistance à la compression sur cube de mortier à différentes échéances et avec différentes températures de cure	34
Tableau 2.3	Résistance en compression avant et après les cycles de gel/dégel pendant 25 jours pour six mélanges comportant un taux croissant de granulats de laitier	38
Tableau 2.4	Résistance en compression pour différents mélanges incorporant des granulats de laitier avant et après les cycles de mouillage / séchage pendant 30 jours	38
Tableau 2.5	Résultats du test de lixiviation pour des granulats de laitier	41
TROIXIEMME CHAPITRE		
Tableau 3.1	Analyse granulométrique du sable (sable de Boussaâda)	43
Tableau3.2	Masse volumique absolue du sable de Boussaâda	45
Tableau 3.3	La masse volumique apparente du sable de Boussaâda	45
Tableau3.4	la porosité et compacité pour le sable de Boussaâda	46
Tableau 3.5	Les résultats d'équivalent du sable de Boussaâda	46
Tableau 3.6	La composition chimique du laitier cristallin d'EL HADJAR	47
Tableau 3.7	Analyse granulométrique du laitier cristallin	47
Tableau 3.8	Masse volumique absolue du laitier cristallin	49

LISTES DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 3.9	Masse volumique apparente de laitier cristallin	49
Tableau 3.10	La porosité et compacité pour le sable de laitier cristallin	49
Tableau 3.11	Analyse granulométrique du mélanges	50
Tableau 3.12	Masse volumique absolue du mélanges	51
Tableau 3.13	Masse volumique apparente du mélanges	51
Tableau 3.14	La porosité et compacité pour le sable de mélanges	52
Tableau 3.15	caractéristiques chimiques de ciment CRS	53
Tableau 3.16	Caractéristiques minéralogiques de ciment CRS	53
Tableau 3.17	Caractéristiques physiques du ciment utilisé(CRS)	54
Tableau 3.18	composition chimique du laitier de haut fourneau	55
Tableau 3.19	Caractéristiques physiques du laitier granulé	56
Tableau 3.20	Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage	57
Tableau 3.21	Composition des déférents mortiers et pates	59
Tableau 3.22	Composition des déférents mortiers et pates	63
QUATERIEMME CHAPITRE		
Tableau 4.1	La masse volumique du déférent mortier	71
Tableau 4.2	L' Absorption d'eau du déférent mortier	72
Tableau 4.3	la porosité accessible à l'eau du déférent mortier	72
Tableau 4.4	Les résistances mécaniques des différents mortiers	73

LISTES DES FIGURES

N° Figure	Intitule	N° Page
	PREMIER CHAPITRE	
Figure 1.1	Laitier cristallin	3
Figure 1.2	Processus d'élaboration des différents types de laitiers	4
Figure 1.3	Schéma de principe d'un haut fourneau	5
Figure 1.4	Schéma de principe d'un four à arcs électriques	5
Figure 1.5	Convertisseur à oxygène	6
Figure 1.6	Laitiers d'aciérie électrique ayant une structure poreuse et Rugueuse	7
Figure 1.7	Visualisation au microscope électronique à balayage (MEB) de laitiers d'aciérie électrique (grossissement x15)	7
Figure 1.8	Diffractogramme aux rayons X d'un laitier cristallisé	8
Figure 1.9	Laitier cristallisé et laitier vitrifié granulé de haut fourneau	8
Figure 1.10	Diffractogramme des rayons X d'un laitier vitrifié	10
Figure 1.11	Influence du taux de cristallinité dans le laitier d'après DEMOULIAN et al	11
DEUXIEME CHAPITRE		
Figure 2.1	Diagramme du processus de production du silicate de sodium	21
Figure 2.2	Diagramme de phase du système $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$	22
Figure 2.3	Diffractogrammes de pâte de laitier activé par Na_2CO_3 (NC), Na_2SiO_3 (NS) et NaOH (NH)	23
Figure 2.4	Représentation schématique de la microstructure des produits d'hydratation du laitier activé par Na_2SiO_3 et du ciment Portland	24
Figure 2.5	Répartition élémentaire par analyses MEB/EDX dans un grain de laitier et dans la matrice liante – à gauche : activation par K_2SiO_3 , à droite : hydratation en présence de ciment Portland	24
Figure 2.6	Observations MEB du développement de la microstructure d'une pâte de laitier activé par Na_2CO_3	25
Figure 2.7	Modélisation de l'évolution du volume des hydrates en fonction du taux de laitier	29
Figure 2.8	Effet de différents activateurs sur la résistance à la compression d'un liant contenant 50% de laitier	30
Figure 2.9	Evolution de la résistance à la compression de mortiers à base de ciment et calcaire (PLC) et à base de ciment et dolomite (PDC) conservés à 40 °C et 60 °C	31
Figure 2.10	Résistance en compression à 28 jours en fonction de la finesse du laitier (activé avec du silicate de sodium : $\text{Na}_2\text{O} = 5.5\%$, $M_s = 1$; sable/laitier = 2)	33
Figure 2.11	Observation au MEB d'une pâte de ciment au laitier AAS conservée 4heures à température ambiante, puis 12 heures à 80°C	35
Figure 2.12	Résistance à la compression à 3 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours, 180 jours de ciments au laitier à 25°C et 45°C , a) laitier de finesse 450 m kg ; b) laitier de finesse 900 m kg	35

LISTES DES TABLEAUX ET FIGURES

Figure 2.13	Étude de la perte de résistance mécanique après les cycles de gel-dégel en comparaison au même béton après un mûrissement de 90 jours. Séries C/K : Remplacement partiel de la partie fine des granulats par des laitiers / cendres volantes	37
Figure 2.14	Résistance en compression et module d'élasticité pour différents bétons soumis à une élévation de température (M1 : béton de référence, M2-M5 : bétons de laitier)	39
TROISIEME CHAPITRE		
Figure 3.1	La courbe granulométrique du sable de Boussaâda	44
Figure 3.2	laitier cristallin	47
Figure 3.3	La courbe granulométrique du laitier cristallin	48
Figure 3.4	La courbe granulométrique du laitier et du sable	48
Figure 3.5	La courbe granulométrique du mélanges	50
Figure 3.6	la compacité et porosité de mélanges	53
Figure 3.7	ciment utilisé(CRS)	54
Figure 3.8	essais de surface spécifique (CRS)	54
Figure 3.9	essais de surface spécifique du laitier granulé	56
Figure 3.10	Echantillon de laitier Granule	56
Figure 3.11	MEDAPLAST SP 40, est un super plastifiant à base de de Polymères	58
Figure 3.12	Evolution de la résistance en compression	58
Figure 3.13	Moule des Eprouvettes 4x4x16	60
Figure 3.14	Table à choc	60
Figure 3.15	Lisser la surface des éprouvettes en tenant la règle presque à plat	61
Figure 3.16	appareille pour mesuré la (température et humidité)	61
Figure 3.17	Démoulage des éprouvettes	62
Figure 3.18	Conservation des éprouvettes dans l'eau	62
Figure 3.19	Dispositif pour l'essai de la résistance traction par flexion (Appareil laboratoire M'sila)	63
Figure 3.20	Dispositif pour l'essai des résistances à la compression (Appareil laboratoire M'sila)	64
Figure 3.21	Acide chlorhydrique (H Cl)	65
Figure 3.22	agressions chimiques des éprouvettes immergées dans ces solutions acides	66
Figure 3.23	« Balance » de précision 0.1 g	66
Figure 3.24	Dispositif de la Pesée hydrostatique ,Saturation en eau sous-eau pendant mesuré la masse dans récipient l'eau	67
Figure 3.25	Essais d'absorption capillaire pour éprouvettes de mortier et Pâte	68

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. GENERALITES :

Dans le monde, on dispose d'à peu près de 250 millions de tonnes par an de laitier du haut fourneau, cependant l'utilisation des ajouts minéraux n'est que d'environ 90 millions de tonnes (Bucchi, 1986), en Algérie la production du laitier par les hauts fourneaux d'Annaba avoisine un demi-million de tonnes (avec un taux de granulation de 50 %), le reste est refroidi lentement à l'air en se cristallisant.

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

Le recours aux ajouts minéraux est certainement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable à l'industrie du béton. L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du ciment est très importante car en plus des économies d'énergie et de la diminution de l'émission de CO₂, les ajouts minéraux améliorent les propriétés du béton frais et durci.

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

La pénétration d'agents agressifs dans le béton, notamment les chlorures en environnement marin, conduit -à l'amorçage et au développement du processus de corrosion. An d'assurer une durabilité minimum, la nouvelle norme **NF EN 206-1** établit des prescriptions réglementaires de formulation des bétons en fonction de l'agressivité des conditions environnementales déniées sous forme de classes d'exposition.

2. OBJECTIFS DE MEMOIRE:

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

A. L'utilisation du laitier granulé finement broyé, en guise de ciment sans clinker avec des accélérateurs de durcissement de laitier (les activant) pour la confection des bétons. Certains alcalis tels que les silicates de sodium et de potassium soluble ayant la forme chimique (R₂O m SiO₂) sont

INTRODUCTION GENERALE

avantageux, de même les alcalis caustiques de la forme (R-OH) et leurs sels sont efficaces, et présentant des coûts réduits.

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

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

En général, les sables et les graviers naturels alluvionnaires obtenus par criblage, où parfois par concassage sont satisfaisants, de même les roches éruptives où sédimentaires concassées. Le recours à des granulats artificiels tel que le laitier cristallisé concassé, permet d'élargir la gamme des matériaux de construction, de formuler des bétons de densité réduite, présentant des propriétés mécaniques et physiques intéressantes.

3. PLAN DE MEMOIRE:

Le mémoire se divise en 4 chapitres; Le premier chapitre est consacré à : nous définirons l'origine du laitier de haut fourneau, les caractéristiques physicochimiques et minéralogiques de ce matériau puis les mécanismes d'hydratation, leur valorisation et leur utilisation.

Le deuxième chapitre est consacré à : nous présenterons la définition et des généralités sur l'activation du laitier, leurs différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus, ensuite une présentation des différents facteurs d'activation. Nous terminerons par une présentation sur propriétés liées à la durabilité des bétons de laitier et leurs résistances aux eaux agressives.

Le troisième chapitre concerne la description des moyens expérimentaux, et la caractérisation des matières premières utilisées dans ce travail, et les constituants minéraux de la matrice cimentaire, à savoir le ciment et le laitier, lesquels seront analysés en premier lieu sur leurs compositions chimiques et minéralogiques.

Le quatrième chapitre une présentation des résultats obtenus en laboratoire, et discutés afin de savoir l'effet de l'activation chimique du laitier. Ensuite dans la conclusion, nous ferons un bilan des acquis de ce travail et nous présenterons la valorisation d'un sous-produit métallurgique (le laitier de haut fourneau) par activation chimique alcaline en améliorant ainsi ces propriétés hydrauliques pour permettre de mieux comprendre, la masse volumique, l'absorption d'eau et le comportement mécanique (les résistances en compression, traction et en flexion) des différents échantillons testés.

Enfin, des perspectives et des recommandations sont présentées.

CHAPITRE 1

Le laitier de haut fourneau

PREMIER CHAPITRE

LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

1.1. LAITIER CRISTALLINES:

1.1.1. Introduction :

Le problème des sous-produits et déchets industriels est l'un des problèmes majeurs de notre civilisation industrielle, et l'avenir même de cette civilisation est largement conditionné par les solutions que nous pourrions apporter à ce problème. A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation de ces sous-produits et déchets qui doivent être exploitées en profondeur[1].

1.1.2. Description générale du laitier cristallin:

Le laitier est un sous-produit des industries du fer et de l'acier et est bien souvent classé comme déchet industriel ou considéré comme tel par certaines entreprises de construction, à tort. En réalité, il peut être valorisé en divers matériaux de construction polyvalents suivant leur traitement après fabrication. Lorsque ces sous-produits sont collectés, deux perspectives de refroidissement s'offrent en effet à eux [2].



Figure 1.1 : Laitier cristallin [laboratoire de génie civil université de Msila].

Une trempe leur conférant des propriétés hydrauliques : le laitier qui surnage au-dessus de la fonte est refroidi immédiatement après la coulée et, par conséquent, rapidement vitrifié. La trempe fige ce sous-produit dans un état instable et lui confère des propriétés hydrauliques. La majorité des

éléments, tels que Ca, Mg, Si et Al sont sous forme de phase non cristalline. Une fois broyé à une finesse de 400-500 m²/kg, ce produit développe de bonnes propriétés cimentaires sous l'effet d'un catalyseur (le gypse dans le ciment). Par ailleurs, la composition minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement : plus le refroidissement est rapide, plus le laitier sera vitreux [2].

Un refroidissement lent leur permettant une cristallisation dans un état stable : ce procédé ne nécessite qu'une fosse de stockage du laitier en fusion et des rampes d'arrosage. Les laitiers coulés à terre sont refroidis doucement par aspersion d'une faible quantité d'eau. Un concassage secondaire est généralement nécessaire pour utiliser ce matériau. Ce procédé lui confère, cependant, une certaine hétérogénéité, qui amoindrit la stabilité des propriétés mécaniques du béton [2].

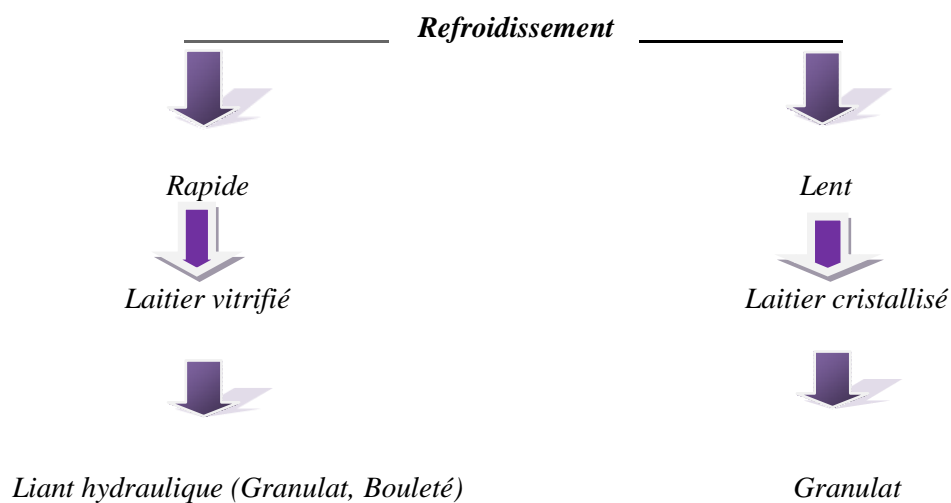


Figure 1.2 : Processus d'élaboration des différents types de laitiers [3].

L'utilisation des laitiers sous forme cristalline est pour l'instant moins rentable que celle sous forme de liant hydraulique. Cependant, cette application a l'avantage d'être facilement adaptable pour tout type de laitier, contrairement à l'utilisation cimentaire. En plus d'une distinction microstructurale (laitier amorphe ou cristallin), les laitiers sont aussi classés selon leur origine :

1.1.2.1. Laitiers de hauts fourneaux:

La production d'une tonne de fonte génère 250 à 300 kg de laitier de haut fourneau. Pour l'élaboration de la fonte, le haut-fourneau (Figure 1-3) est alimenté par un mélange de minerai de fer, de coke et de chaux. De l'air chaud (à 1200 °C) est ensuite insufflé dans la tuyère et provoque la combustion du coke. Des réactions d'oxydation et de réduction ont lieu et il se forme de la fonte et un liquide essentiellement chargé d'oxydes. Ce résidu est appelé le laitier de haut fourneau.

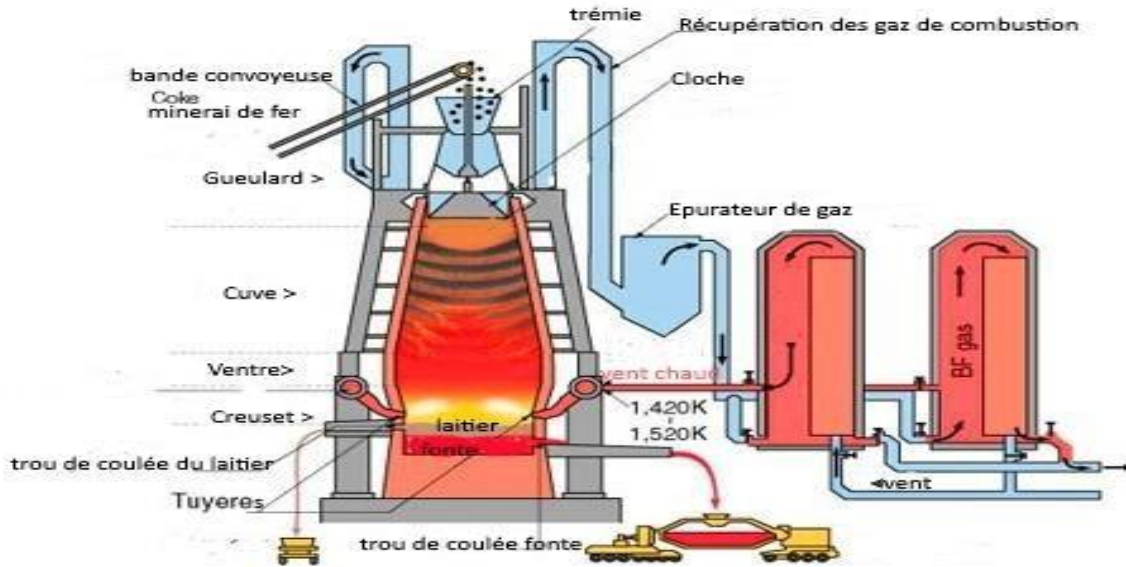


Figure 1.3 : Schéma de principe d'un haut fourneau [4].

1.1.2.2. Laitiers d'aciérie électrique:

Les laitiers d'aciérie électrique sont générés lors de l'élaboration d'aciers dans des fours à arcs électriques alimentés par des ferrailles recyclées (Figure 1-4).

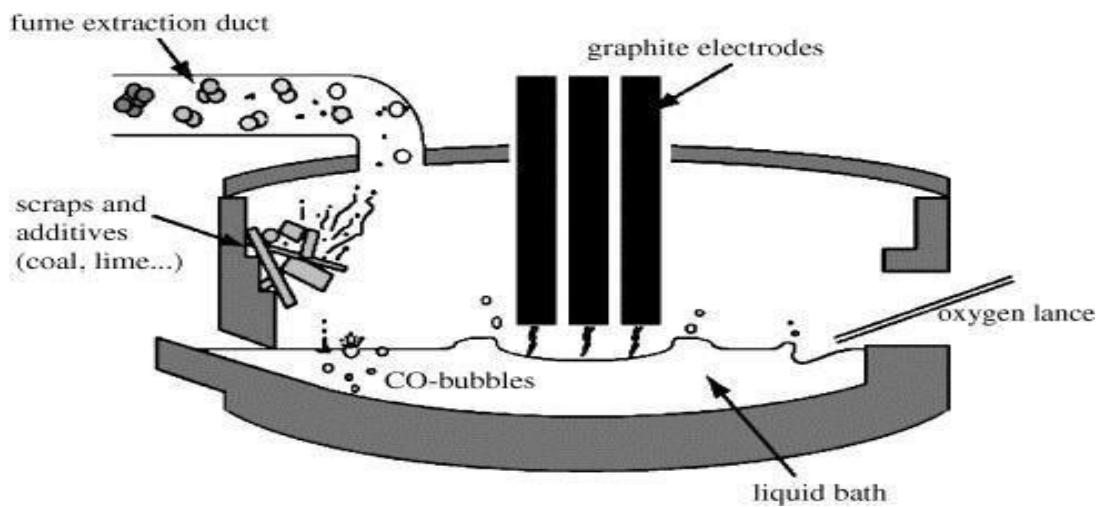


Figure 1.4 : Schéma de principe d'un four à arcs électriques [5].

1.1.2.3. Laitiers d'aciérie de convertisseur à oxygène:

La production d'une tonne d'acier génère environ 100 kg de laitier d'aciérie de conversion.

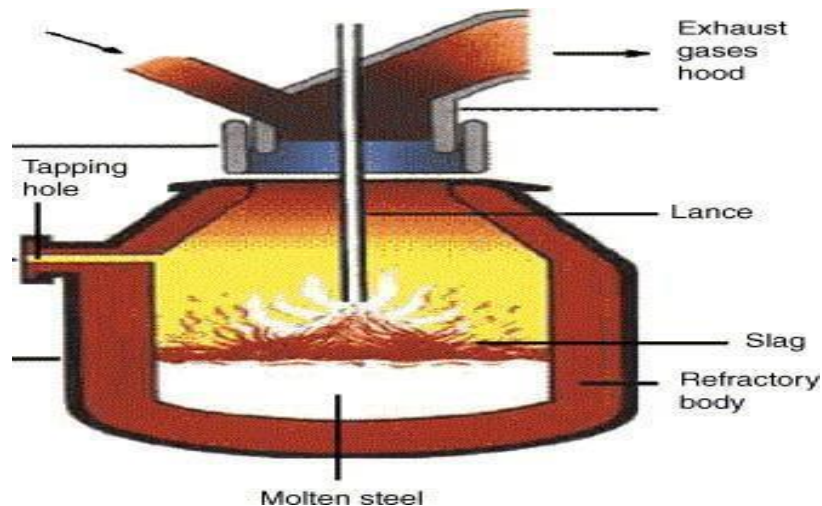


Figure 1.5 : Convertisseur à oxygène [6].

La fonte en fusion sortie du haut fourneau est introduite dans un convertisseur (Figure 1-5). De l'oxygène pur est insufflé sous pression en même temps qu'est introduite de la chaux et des ferrailles de récupération. L'affinage par l'oxygène permet de brûler la plus grande partie du carbone et d'oxyder les impuretés contenues dans la fonte. La chaux fixe dans le laitier les éléments « poisons » pour l'acier (Si, Mn, P et S). De la chaux magnésienne est injectée dans le convertisseur, pour atteindre la saturation en chaux et/ou magnésie du laitier, et ainsi éviter la dissolution de la magnésie des réfractaires. On obtient alors de l'acier relativement pur et un laitier, appelé laitier d'aciérie de conversion. Après un refroidissement violent par aspersion d'eau, il est concassé et criblé pour produire des granulats [6].

1.1.3. Propriétés du laitier cristallin:

Il existe de nombreuses différences entre un laitier cristallin et un granulats naturel. Les propriétés détaillées dans cette section sont la distribution granulométrique et les caractéristiques de fabrication, la densité, l'absorption d'eau, la résistance à l'abrasion, l'état de surface, la nature cristalline, la composition chimique et le risque d'expansion [6].

1.1.3.1. Distribution granulométrique et caractéristiques de fabrication:

Les scories ont souvent moins de particules fines que les granulats naturels. Cependant, on ne peut pas généraliser cette caractéristique puisqu'elle varie beaucoup en fonction du type de laitier utilisé, des méthodes de broyage et du type de granulats naturels auquel on le compare.

Bien souvent, le broyage des laitiers conduit à leur utilisation sous forme de granulats grossiers tels que le 5-20 ou 5-14. Dans le cas où le laitier cristallin ne correspond pas aux exigences d'un fuseau granulométrique CSA A.23.1, il est nécessaire d'ajuster sa granulométrie en rajoutant un granulats naturels afin d'améliorer l'ouvrabilité du mélange à l'état frais ainsi que ses propriétés mécaniques [7].

1.1.3.2. Densité:

La densité relative du granulat de laitier est plus grande que celle du granulat naturel [8.9]. La littérature à ce sujet indique que la densité relative des laitiers cristallins se situe généralement entre 3 et 4 alors que les granulats naturels ont généralement une densité de l'ordre de 2,75.

1.1.3.3. Absorption:

Dans les études caractérisant les laitiers cristallins, l'absorption est bien souvent relevée afin d'appréhender la rhéologie du béton. Celle-ci est généralement supérieure à celle des granulats naturels de l'étude servant à faire un béton de référence [10.11.12]. Les valeurs d'absorption des laitiers cristallins se situent généralement entre 1 et 5 % alors que pour un granulat naturel celles-ci sont souvent en deçà de 1 % [13]. La mesure de l'absorption d'un granulat est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée.

1.1.3.4. État de surface:

La plupart des laitiers cristallins possèdent une porosité élevée ainsi qu'un état de surface rugueux [14]. Le fait que les laitiers soient plus poreux que les granulats naturels influe sur son absorption. L'état de surface rugueux des laitiers va, quant à lui, influencer la zone de transition pâte-granulat au sein du béton. Cet état de surface poreux et rugueux est observable dans les Figures 1.6 et 1.7.



Figure 1.6: Laitiers d'aciérie électrique ayant une structure poreuse et rugueuse [14].

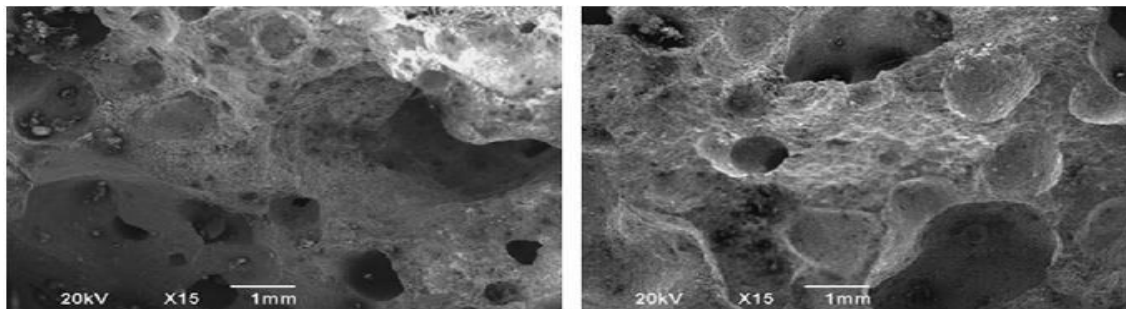


Figure 1.7: Visualisation au microscope électronique à balayage (MEB) de laitiers d'aciérie électrique (grossissement x15) [14].

1.1.4. Composition chimique:

Le laitier cristallisé, lorsqu'il est refroidi lentement en couche épaisse, présente une texture poreuse essentiellement due à une libération de soufre en cours de refroidissement. La réaction serait limitée par la quantité de sulfure et le potentiel d'oxygénation de laitier. Les laitiers les plus désulfurant donc les plus basiques et les plus chauds provoquent des réactions soufre / oxygène plus énergiques avec une tendance à une plus grande porosité [15].

On peut considérer le laitier cristallisé, pour 95 à 98 (%) de sa composition, comme le mélange de quatre oxydes SiO_2 , CaO , Al_2O_3 et MgO , le complément étant constitué par des oxydes secondaires FeO et MnO et des composés sulfurés [15]. Le laitier cristallisé par refroidissement lent à l'air a atteint son degré de stabilité maximal. L'analyse aux rayons X donne un diffractogramme (Figure 1. 8) comportant un petit dôme de phase amorphe et les raies des phases cristallines.

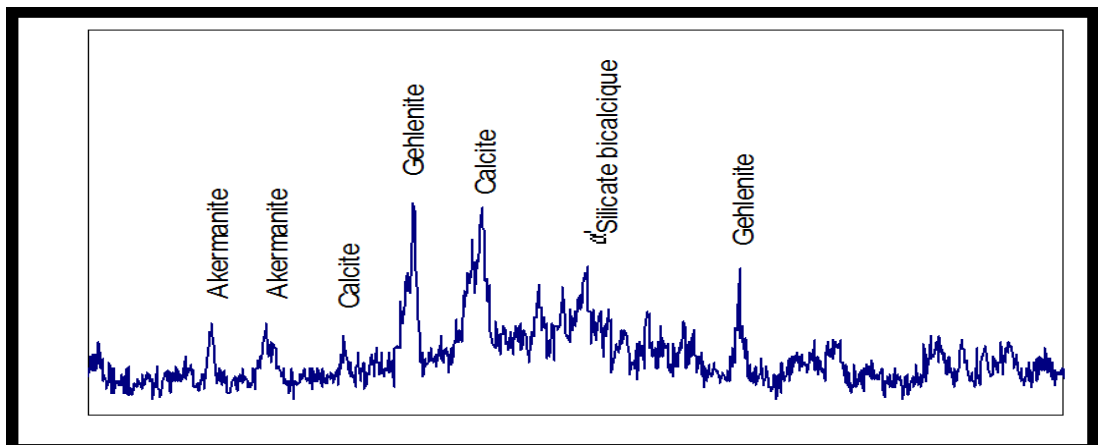


Figure 1. 8 - Diffractogramme aux rayons X d'un laitier cristallisé [16]

1.2. LE LAITIER GRANULE:

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 [17]. On s'avisa ultérieurement des propriétés hydrauliques latentes du **laitier granulé** (Figure 1.9) ainsi obtenu [15].



Figure 1.9– Laitier cristallisé et laitier vitrifié granulé de haut fourneau [32].

1.2.1. Caractéristiques:

1.2.1.1. 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 (Al₂O₃) de 8 à 24 (%), le soufre (S) de 1 à 2.5 (%). Le tableau (1.1) récapitule les compositions chimiques du laitier dans quelques pays producteurs de fonte [15, 18 et 19].

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 [20], et on sait que l'état vitreux est le plus actif chimiquement. D'autres travaux [21 - 22] ont montrés l'influence non négligeable des éléments mineurs tels que P₂O₅, MnO, Na₂O et K₂O sur l'évaluation de l'activité hydraulique des laitiers.

Tableau 1. 1 - Composition chimique du laitier en % [15, 18 et 19]:

Oxydes	Teneur en %							
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud		Canada	France	Japon
SiO ₂	38.2	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	42.18	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al ₂ O ₃	7.96	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	3.82	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO ₃ , S*	0.47	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	4.68	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.04	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO ₂	0.65	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na ₂ O	0.2	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K ₂ O	0.65	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
Total	100.85	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

1.2.1.2. Composition minéralogique potentielle du laitier:

La composition minéralogique potentielle des laitiers a été calculée à partir des principaux

oxydes (CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂) par analyse chimique [23].

Les phases cristallisées susceptibles d'apparaître au cours de la dévitrification sont la méllilite 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 montécéllite (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 % [23].

1.2.1.1. Granulométrie:

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

1.2.1.2. 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.

1.2.2. Réactivité hydraulique du laitier granulé:

1.2.2.1. But de la tempe:

Le but de la tempe du laitier est d'empêcher la cristallisation, par figeage à la température ambiante, d'une configuration instantanée désordonnée du laitier, de structure vitreuse. Les laitiers vitreux présentent en diffraction des rayons X un halo large et diffus (Figure1.10). Ce halo est l'image du degré de l'ordre local qui existait dans le liquide et qui a été figé par la trempe. L'hydraulicité du laitier dépend dans de larges limites de sa structure [16].

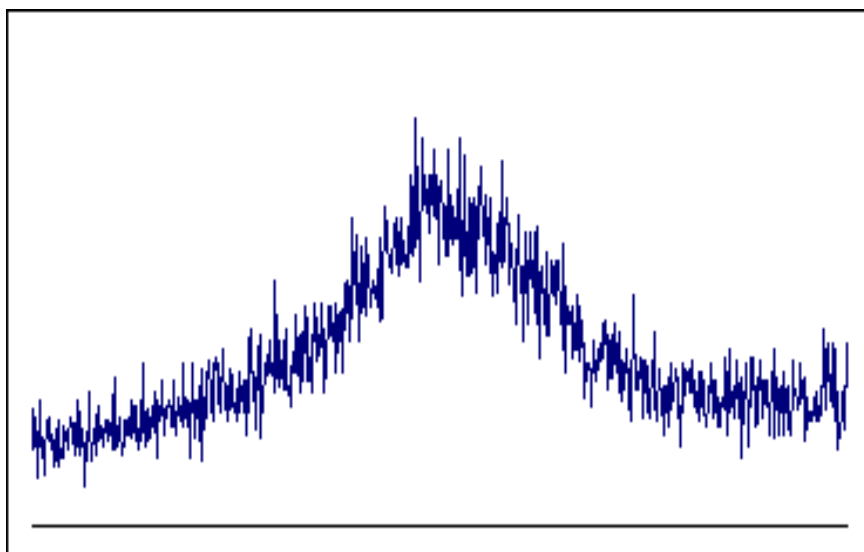


Figure1.10 : Diffractogramme des rayons X d'un laitier vitrifié [24]

1.2.2.2. Taux de vitrification:

Une analyse à la microsonde électronique des éléments Ca, Al, Si, et Mg révèle dans certains cas une distribution homogène d'un grain à l'autre et à l'intérieur de chaque grain. En fait, les laitiers totalement vitreux et de composition homogène sont rares [23]. Une vitrification parfaite n'est pas le critère d'une réactivité maximale [21]. Les cristaux de merwinite (C_3MS_2) présents au taux de 0 à 5 (%) (figure 1.11) accroissent les résistances mécaniques, et au-delà de 5 % et jusqu'à 35 %, les baisses de résistances mécaniques sont de faibles amplitudes.

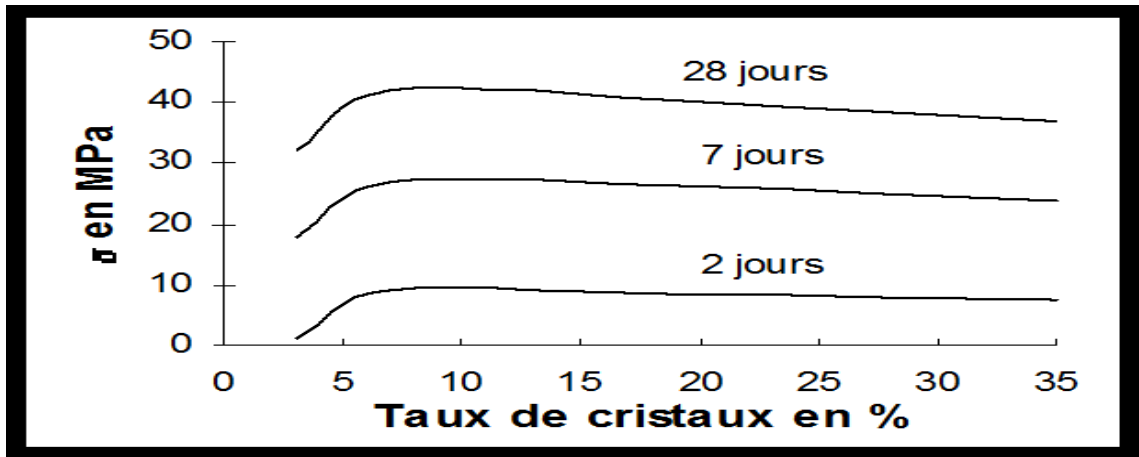


Figure 1.11- Influence du taux de cristallinité dans le laitier d'après DEMOULIAN et al. [21]

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) [25] montrent des zones hydratées plus larges autour des grains de laitier vitreux contenant en inclusions des cristaux de merwinite qu'autour des grains entièrement vitreux. En effet, on s'est aperçu que plusieurs types de défauts dans la structure engendraient une meilleure réactivité hydraulique. Ainsi les défauts de surface agissent comme centres privilégiés d'activité hydraulique [21].

1.3. L'activation chimique:

1.3.1. Introduction:[26]

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

Pour être utilisé en tant qu'addition cimentaire, le laitier doit participer aux réactions permettant de former des systèmes cimentaires durcis. Les matériaux utilisés dans les systèmes cimentaires présentent le plus souvent un caractère hydraulique. Le laitier de haut fourneau est connu comme présentant un caractère dit hydraulique latent. Il a besoin de l'aide d'un agent activateur pour pouvoir accélérer l'hydratation [26].

1.3.2. Définition:

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

Les activant agissent non. Seulement à titre de catalyseur d'attaque de verre dans le laitier, mais, également en tant que réactif dans les réactions de formation des hydrates [27].

L'activation classique du laitier est effectuée:

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

1.3.3. Rôle de l'activant:

La nécessité d'un agent basique ou activant pour déclencher la prise du laitier, résulte selon [27], du fait que l'hydratation est provoquée par la succession de deux phénomènes où 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 à lieu par les hydroxydes OH de la solution .Elle devient notable à (pH = 12).

Le second est la cristallisation, à partir de la phase aqueuse, des composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que l'est le laitier. Un apport de calcium est donc nécessaire, à défaut duquel le milieu liquide s'appauvrirait en chaux et verrait son pH baisser en dessous du seuil d'attaque. Le rôle de l'activant est double. Il doit :

Répondre à une condition de pH, en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la phase aqueuse en chaux pour atteindre le pH de 12,6 correspondant à cette saturation .

Contribuer à la formation des hydrates, il participe aux réactions de formation des hydrates par lesquelles il est consommé.

1.3.4. Les différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus:

1.3.4.1. Activation alcaline:

Elle peut être sodique ou calcique. Le laitier est activé à la chaux, c'est l'activation calcique. Il se forme en présence d'eau comme produit d'hydratation du silicate de calcium CSH, de l'aluminate tétracalcique C_4AH_8 [28] .

Les adjuvants à base de soude sont très efficaces pour activer les laitiers. On utilise principalement : la soude caustique ; Le carbonate de sodium ; l'aluminate de sodium, le silicate de sodium, le chlorure de sodium et le métasilicate de sodium.

1.3.4.2. Activation sulfatique:

Le laitier est activé par les sulfates de calcium. La réaction est assez lente, et il se forme les composés hydratés suivants : C₃S, C₂S, 3CaSO₄ · 32 H₂O et AL(OH)₃. Les sulfates de calcium utilisés principalement sont les suivants : le gypse naturel : CaSO₄ · 2H₂O ; le semi hydrate : CaSO₄ · ½ H₂O ; l'anhydrite : CaSO₄ et le phosphogypse.

Lors de l'activation sulfatique par le gypse, l'hydratation est lente. L'action accélératrice sur le laitier du sulfate de chaux, aidé de quelques pour cents de Ca(OH)₂ ou de clinker portland est à la base de la prise et du durcissement des ciments sur sulfatés, c'est à dire des ciments constitués essentiellement de laitier et d'anhydrite (CaSO₄) [29].

1.3.4.3. Activation calcio – sulfatique:

Elle est obtenue pour un mélange de gypse et de la chaux et conduit aussi à la formation de CSH mais C₄AH₁₃ et alumine sont remplacés par de l'étringite, dont la texture en aiguille disposées en touffes est plus favorable à la réticulation en réseau [29].

1.3.4.4. Activation par le Clinker du ciment portland:[26]

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C₃S et du C₂S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux développe un PH égale à 12 (basicité de la solution sursaturée de la chaux) ce qui favorise la dissolution du verre du laitier. L'absence du réseau de SiO₂ explique la facilité de l'activation du laitier.

Selon (Guetteche et Houari, 2002), quand on mélange le laitier finement broyé avec l'eau, les ions dissous sont presque inexistant, on remarque une faible conductivité qui ne dépasse pas 0,6 ms/cm pour une surface spécifique du laitier de 6000 cm²/g. Par contre avec l'ajout de 19 % du CPA et 5 % du gypse, la conductivité augmente considérablement. Selon les étapes suivantes:

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

La plupart des ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C₂S et C₃S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté (CSH) du même type que celui formé durant l'hydratation du ciment portland. Cette réaction est généralement lente, et peut se développer sur plusieurs semaines ciment [26].

1.4. Valorisation du laitier en Algérie:

L'utilisation des produits de laitier en Algérie est limitée à quelques rares applications malgré sa production progressant (500.000 tonnes/an) [24].

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.

1.5. Utilisations du laitier en génie civil:[32]**1.5.1. Emploi du laitier granule dans la fabrication des ciments:**

Cette utilisation a absorbé 38% des productions totales 1999 de laitier de SOLLAC. L'obtention du ciment passe par plusieurs étapes :

- mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%) extraits en carrière pour obtenir le cru de cimenterie.
- cuisson (1450°C) de ce cru qui donne le clinker de ciment.

Le ciment est ensuite obtenu par broyage du clinker, addition de gypse et d'autres constituants (laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes de centrales thermiques, pouzzolanes, etc..).

Le laitier utilisé comme constituant principal (> 5% en masse) ou secondaire (< 5% en masse) dans le ciment doit présenter des caractéristiques hydrauliques. En découle que seul le laitier granulé est employé [32].

Au titre de constituant principal, il amène des propriétés particulières au ciment : faible chaleur d'hydratation, résistance élevée aux agressions chimiques (eaux de mer, eaux séléniteuses, eaux très pures, etc...), faible retrait initial, teinte claire stable...

Si le laitier granulé de hauts fourneaux est additionné avec une quantité > 5% en masse, il doit (NF EN 197-1) :

- contenir au moins deux tiers en masse de laitier vitreux.
- être constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme CaO, MgO et SiO₂.
- avoir un rapport en masse (CaO + MgO)/(SiO₂) supérieur à 1 [32].

La détermination de la teneur de chaque constituant est réalisée conformément à la norme NF EN 196-2. Les différents types de ciment comprenant du laitier sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 1. 2- Les différents types de ciment comprenant du laitier en pourcentage [32].

Désignation	Notation	Clinker - K -	Laitier de HF - S -
Ciment Portland compose	CPJ-CEM II/A	80-94%	6 à 20%
	CPJ-CEM II/B	65-79%	21 à 35%
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64%	36-65%
	CHF-CEM III/B	20-34%	66-80%
	CLK-CEM III/C	5-19%	81-95%
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64%	18-30%
	CLK-CEM III/B	20-39%	31-50%
Ciment de laitier à la chaux (NF P15-306)		≤ 30% de chaux	≥70%

1.5.2. Emploi du laitier vitrifié dans les liants hydrauliques routiers:

En complément des ciments normalisés, se sont développés, depuis maintenant de nombreuses années, des liants dénommés « liants hydrauliques routiers » mis au point spécialement pour une utilisation en traitement des sols en place ou en centrale et pour la confection de matériaux d'assises de chaussées. Ce sont des liants composites obtenus par mélange et/ou broyage de clinker ou de coproduits de l'industrie (laitiers, cendres volantes, etc...) [32].

Les principaux liants employés sont décrits dans des avis techniques délivrés par le Comité Français pour les Techniques Routières (CFTR).

Leurs compositions sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau 1. 3 - Composition des liants composites obtenus par mélange et/ou broyage de clinker ou de coproduits de l'industrie en %[32].

Produit	Avis technique	Composition	
LSC	65	laitier	88.5%
		anhydrite (CaSO ₄)	11%
		catalyseur	0.5%
ARC DANNES	73	laitier de haut fourneau de ferromanganèse*	10%
		laitier de haut fourneau de fonte	complément à 100
		somme des deux laitiers	≤ 83%
		chaux aérienne vive	12%
		sulfate de calcium	7%
ROC CRAIE	4	laitier de haut fourneau	85%
		gypse	13%
		catalyseur	2%
ROLAC 124	75	laitier de haut fourneau	76%
		cendres hydrauliques	24%

PRV - Type A	78	laitier vitrifié de haut fourneau	50 à 60%
		cendres volantes silico-alumineuses	20 à 30%
		chaux vive	12 à 18 %
		sulfate de calcium	3 à 7%

(*) Le pourcentage de laitier de ferromanganèse est fonction de la réactivité du laitier de fonte.

1.5.3. Emploi du laitier vitrifié dans le béton:

1.5.3.1. Le laitier granulé (NF P 18-306):

Le laitier granulé peut être employé dans les bétons classiques de granulats naturels comme sable actif (remplacement de tout ou partie du sable), soit sous sa forme brute, soit sous forme de laitier pré broyé. Cette incorporation se traduit par une augmentation des résistances mécaniques. (à dosage en ciment constant), le malaxage et la mise en œuvre provoquant l'attrition de fines hydrauliques dont l'action vient se cumuler avec celles de la liaison pâte de ciment-sable de laitier.

Par contre, le béton perd de sa maniabilité, d'autant plus que l'ajout de laitier est important. Cette maniabilité peut alors être améliorée par différents ajouts (cendres volantes, charge inerte). Ce laitier, de masse volumique supérieure à 0.80 kg/dm^3 , doit avoir la composition chimique suivante [32].

Tableau 1. 4 - Composition chimique du laitier granulé en Pourcentage.

Constituants	Pourcentage
SiO ₂	29 à 38
Al ₂ O ₃	13 à 24
CaO	38 à 48
MgO	≤6
FeO	≤4
MnO	≤2
soufre des sulfates exprimé en S	≤2
soufre des sulfates exprimé en SO ₃	≤0.5

Les laitiers provenant de fontes spéciales (ferro-manganèse) et les laitiers extraits de crassiers sont exclus des bétons. De plus, ces derniers ne doivent pas être employés pour les bétons dans lesquels il entre du ciment alumineux [32].

1.5.3.2. Le laitier moulu (NF P 18-506):

La norme XP P 18-305 « Béton prêt à l'emploi » autorise l'utilisation du laitier vitrifié moulu de classe B (au sens de la norme P 18-506) comme addition en substitution du ciment. Le coefficient k de prise en compte est de 0,9 c'est à dire que 50 kg de laitier remplacent 45 kg de ciment.

La quantité A d'addition est limitée en fonction du dosage C en ciment par la relation $A/(A+C) \leq 0.3$ pour les environnements habituels, $A/(A+C) \leq 0.15$ à partir de la classe 3 d'environnement[32].

Pour l'environnement le plus courant : humide avec gel modéré (2b1), la quantité minimale de liant équivalent $C+kA$ est de 280 kg/m³, la quantité de laitier peut ainsi s'élever à 86 kg/m³, celle de ciment étant de 203 kg/m³. Le ciment doit obligatoirement être de type CEM I, les autres (CEM II à CEM V) n'autorisent pas la prise en compte de l'addition du laitier en substitution du ciment.

Le laitier moulu permet de modifier certaines propriétés du béton, principalement le comportement aux milieux agressifs et aux alcalis-réactions, la diminution de la chaleur d'hydratation et de la porosité. Ces modifications dépendront du taux d'addition et de la finesse de mouture du laitier. Il doit répondre aux spécifications détaillées dans la norme NF P 18-506 [32].

1.6. Conclusion:

Ce chapitre a été spécifié à une brève recherche bibliographique relative aux caractéristiques de laitier. Tout comme dans le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, nous devons accorder beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton. Les sous-produits peuvent être utilisés comme constituant principal du clinker ou comme granulats pour le béton.

Le laitier de haut fourneau est l'un des sous-produits sidérurgiques, qui ont le meilleur potentiel étant donné leurs propriétés très recherchées telles que leur solidité, leur résistance mécanique, leur forme, leur résistance à l'abrasion et leur granulométrie. Le laitier granulé 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. Ce mode de refroidissement transforme le laitier liquide en un granulat fin (procédé ou mode de granulation du laitier) à grains déchetés de dimensions inférieures à 5 mm. Notre travail traite la possibilité d'employer le laitier comme granulats du béton, application qui est particulièrement prometteuse du fait que 75% du béton est constitué de granulats.

CHAPITRE 2

L'activation chimique du laitier et leur durabilité

DEUXIEME CHAPITRE

L'ACTIVATION CHIMIQUE DU LAITIER ET LEUR DURABILITE

2.1. INTRODUCTION:

Le laitier granulé finement broyé ne possède pas par lui-même aucune vertu liante, mais en présence d'un milieu basique il réagit chimiquement pour former des composés possédant des valeurs liantes. Pour être utilisé en tant qu'addition cimentaire, le laitier doit participer aux réactions permettant de former des systèmes cimentaires durcis. Les matériaux utilisés dans les systèmes cimentaires présentent le plus souvent un caractère hydraulique. Le laitier de haut fourneau est connu comme présentant un caractère dit hydraulique latent.

Il a besoin de l'aide d'un agent activateur pour pouvoir accélérer l'hydratation [26].

2.2. Définition:

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

Les activateurs agissent non seulement à titre de catalyseur d'attaque de verre dans le laitier, mais également en tant que réactif dans les réactions de formation de déshydrates [27]. L'activation classique du laitier est effectuée:

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

2.3. Rôle de l'activateur:

La nécessité d'un agent basique ou activateur pour déclencher la prise du laitier, résulte selon [27], du fait que l'hydratation est provoquée par la succession de deux phénomènes où 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 hydroxydes OH de la solution. Elle devient notable à $\text{pH} = 12$.

Le second est la cristallisation, à partir de la phase aqueuse, des composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que l'est le laitier. Un rapport de calcium est donc nécessaire, à défaut duquel le milieu liquide s'appauvrirait en chaux et verrait son pH baisser en dessous du seuil d'attaque. Le rôle de l'activateur est double. Il doit :

Répondre à une condition de pH, en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la phase aqueuse en chaux pour atteindre le pH de 12,6 correspondant à cette saturation .

Contribuer à la formation des hydrates, il participe aux réactions de formation des hydrates par lesquelles il est consommé [27].

2.4. LES DIFFERENTS MODES D'ACTIVATION ET LA NATURE DES HYDRATES

OBTENUS:

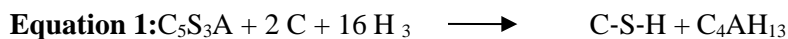
2.4.1. L'activation calcique du laitier de haut fourneau:

La première activation qui a été pratiquée sur le laitier de haut fourneau est l'activation calcique, c'est-à-dire l'activation par la chaux. En présence d'eau, cette dernière se transforme rapidement en portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) conduisant à un dégagement de chaleur qui peut aussi activer thermiquement les réactions chimiques [33].

Dans ce type d'activation, la chaux intervient dans deux étapes de l'hydratation du laitier : la dissolution de ce dernier et la précipitation des hydrates. Le rôle de la chaux en tant qu'activateur est donc double :

- elle augmente le pH de la solution interstitielle à une valeur supérieure à 12, ce qui permet d'accélérer la dissolution du laitier ;
- elle contribue à la formation d'hydrates en apportant du calcium, son rôle ne se limite alors pas à un rôle catalytique.

En approchant la composition chimique du laitier par la formule $\text{C}_5\text{S}_3\text{A}$, [33] propose l'équation stœchiométrique suivante pour l'hydratation du laitier par activation calcique :



Les produits d'hydratation seraient donc le silicate de calcium hydraté (C-S-H avec un ratio C/S=1 et H/S=1) et l'aluminate tétracalcique hydraté (C_4AH_{13}) de la famille des AFm (Atomic Force Microscope) . La présence de C-S-H est confirmée par d'autres auteurs [34, 35] qui mettent également en évidence la présence de phases de type hydrogénât $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH})_8$ et $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$ qui sont thermodynamiquement plus stables que C_4AH_{13} .

Dans ces systèmes, la teneur en chaux diminue avec le temps, ce qui montre bien qu'elle participe à la formation des hydrates [34, 36]. La cinétique de durcissement du laitier activé par 5% de chaux est relativement lente avec environ 2 MPa après 24 heures mais 35 MPa sont obtenus à 28 jours sur mortiers [37]. Les travaux de [38] sur l'activation par 7,5 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ confirment la cinétique de durcissement assez lente par l'activation calcique.

Alternativement à l'activation par la chaux, des travaux ont été menés [39] sur l'activation par la magnésie (magnésie calcinée MgO). Les produits d'hydratation identifiés sont C-S-H et l'hydrotalcite qui est analogue à C_4AH_{13} mais avec Mg à la place de Ca. Les cinétiques de durcissement sont

légèrement supérieures à celles obtenues par l'activation calcique mais restent du même ordre de grandeur.

2.4.2. L'activation alcaline du laitier de haut fourneau:

La première utilisation d'alcalins dans les matériaux cimentaires date des années 1930, quand Kùhl entreprit des recherches sur la prise de mélanges de laitier moulu et de potasse. Chassevent mesura la réactivité des laitiers en utilisant de la potasse ou de la soude en 1937. Purdon fit la première étude expérimentale significative en 1940 sur des ciments sans clinker constitués de laitier et de soude [40]. Plus tard en 1957, Glukhovsky découvrit la possibilité de produire des liants en utilisant des aluminosilicates à faible teneur en calcium (argiles) et de solutions de métaux alcalins [41]. Il appela ces liants « soil cements ». En 1981, le français Davidovits produit des liants en mélangeant des alcalins avec un mélange cuit de kaolinite, calcaire et dolomie [42]. Il appela ces liants « géopolymères » du fait de leur structure polymérique.

Depuis leur découverte, les liants alcali-activés et les bétons associés ont été produits commercialement et utilisés dans une grande variété de projets de construction dans l'ex-Union Soviétique, la Chine et quelques autres pays. Plus de 60 spécifications et normes en lien avec les liants alcali-activés et les bétons associés ont été développés dans l'ex-Union Soviétique. Ces textes couvrent les matières premières, les liants, les bétons, les structures et leur mise en œuvre.

Depuis les années 1970 et encore plus depuis les années 1990, de nombreuses études ont été menées en Europe et dans le monde sur l'activation alcaline (dont celle du laitier de haut fourneau) et ont permis d'augmenter le niveau de connaissance de ces systèmes. L'ouvrage « Alkali-Activated Cements and Concrete »[43] présente un très bon état de l'art de l'activation alcaline des laitiers.

2.4.2.1. Activateurs alcalins:

Les activateurs alcalins les plus utilisés sont la soude (NaOH), le silicate de sodium ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) et dans une moindre mesure le carbonate de sodium (Na_2CO_3) [43].

A. Soude:

L'hydroxyde de sodium, appelé également soude ou soude caustique, est un solide ionique de formule chimique NaOH. Il se présente généralement sous forme de pastilles, de paillettes ou de billes blanches, corrosives et hygroscopiques. Il est très soluble dans l'eau. Il s'agit d'un produit chimique extrêmement courant.

Aujourd'hui, 99 % de la soude produite est d'origine électrochimique. La soude est obtenue par électrolyse du chlorure de sodium NaCl. Elle s'obtient pour le moment majoritairement par une électrolyse avec cathode de mercure. Cette opération produit en même temps du chlore, de la soude et de l'hydrogène.

Lorsque l'hydroxyde de sodium sous forme solide est mélangé avec de l'eau, la température du mélange augmente jusqu'à atteindre une température proche de celle du point d'ébullition de l'eau, risquant ainsi de provoquer des éclaboussures dangereuses. La soude caustique est irritante et corrosive pour la peau, les yeux, les voies respiratoires et digestives. Elle doit être manipulée avec des gants, des lunettes de protection et une protection du visage (visagière) et une protection des voies respiratoires si présence de poussière ou d'aérosol. Ainsi, l'utilisation de soude implique de fortes contraintes industrielles en termes de sécurité et de protection de l'environnement[43].

B. Silicate de sodium:

Le silicate de sodium (« waterglass » en anglais) est le nom générique pour une série de composés de formule $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$. Il existe sous forme de poudre ou sous forme liquide. Les silicates de sodium liquides disponibles commercialement ont un module n compris entre 1,60 et 3,85. Il s'agit d'un liquide assez visqueux. Sa viscosité augmente quand sa concentration ou le module de la solution augmente. Le silicate de sodium est obtenu par la fusion d'un mélange de sable siliceux et de carbonate de sodium à une température d'environ 1 400 °C. Le verre est ensuite dissout en autoclave (Figure 2.1). Afin de réduire le module du silicate de sodium, de l'hydroxyde de sodium lui est souvent ajouté [43].

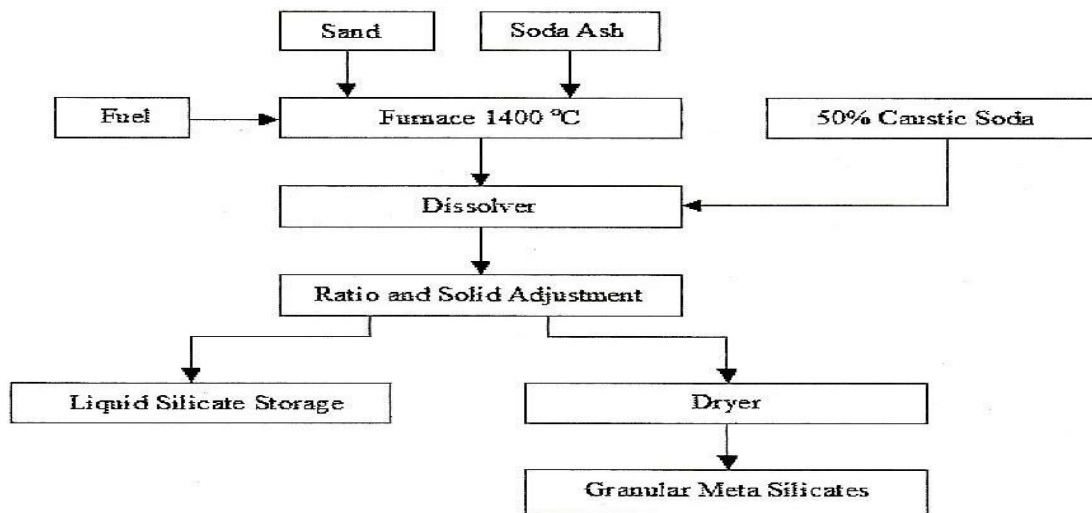


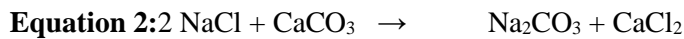
Figure 2.1: Diagramme du processus de production du silicate de sodium [43].

Le procédé d'obtention du silicate de sodium est tel que son impact environnemental est à prendre en considération (indicateur de changement climatique supérieur à celui du ciment portland). Par ailleurs, sa disponibilité en France est relativement faible.

C. Carbonate de sodium:

Le carbonate de sodium (« soda ash » en anglais) est un composé chimique ayant pour formule Na_2CO_3 . Il s'agit d'un sel de sodium de l'acide carbonique. Il s'agit d'un produit chimique très

courant. Le carbonate de sodium peut être obtenu soit à partir de ressource naturelles (gisement de natron $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ou par des procédés industriels. Jusqu'en 1789, le carbonate de sodium, cet ingrédient nécessaire aux industries du verre, du savon, des textiles et du papier, provenait de cendres de plantes (algues ou salicorne). En 1789, le chimiste français Nicolas Leblanc invente le procédé Leblanc qui permet d'obtenir du carbonate de sodium à partir de sel marin. Le procédé Leblanc a été utilisé jusque dans les années 1870, où il a été supplanté par le procédé Solvay. Le procédé Solvay a été découvert par le chimiste belge Ernest Solvay qui ouvre sa première usine en Belgique en 1863. Ce procédé est encore utilisé actuellement. Le procédé Solvay produit du carbonate de sodium (Na_2CO_3) à partir de sel (chlorure de sodium NaCl) et de craie (carbonate de calcium CaCO_3) chauffée à 1 000 °C; on obtient en outre du chlorure de calcium (CaCl_2), qui est valorisé. Le bilan global des réactions est :



Le diagramme de phase du système $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ est donné en Figure 2.2. Il existe trois carbonates de sodium hydratés : le carbonate de sodium monohydrate ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), le carbonate de sodium heptahydrate ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) et le carbonate de sodium décahydrate ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Leur formation dépend de la concentration et de la température de la solution. La solubilité du carbonate de sodium dans l'eau pure augmente jusqu'à la température de 35,4 °C puis diminue faiblement. A 20 °C la solubilité du carbonate de sodium est de 21,5 g pour 100 g d'eau.

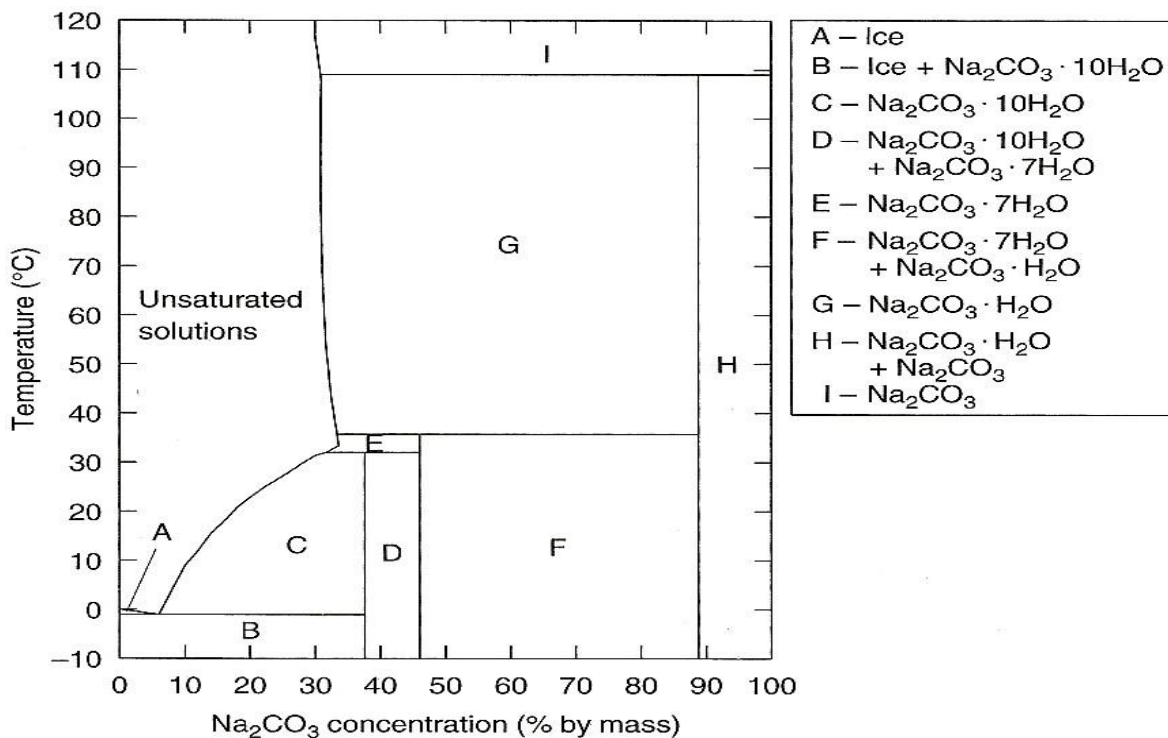


Figure 2.2 : Diagramme de phase du système $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ [43].

2.4.2.2. Hydratation:

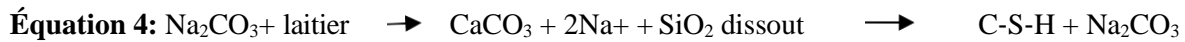
2.4.2.2.1. Nature des produits d'hydratation:

La nature de l'activateur a une influence sur les produits d'hydratation Figure 2.3. Il a été montré que C-S-H, C_4AH_{13} et C_2ASH_8 sont les produits d'hydratation dans le cas d'une activation par la soude. [33] propose l'équation stœchiométrique suivante pour l'hydratation du laitier :



Dans le cas d'une activation par le carbonate de sodium, le produit principal C-S-H est accompagné de C_4AH_{13} et de monocarboaluminate $C_3A.CaCO_3.12H_2O$ qui est obtenu par échange d'un ion OH^- par un ion carbonate dans C_4AH_{13} .

[44] a expertisé des bétons datant d'entre 1964 et 1982. Il s'agit de bétons de laitier activé par du carbonate de sodium. Seulement très peu de calcite provenant du laitier a été identifiée. Ainsi, il propose un mécanisme de réaction dans lequel Na_2CO_3 se régénérerait et $CaCO_3$ serait un produit de transition pour former au final des C-S-H selon :



Les auteurs s'accordent à dire que le magnésium précipite sous forme d'une hydrotalcite carbonatée ($Mg_6Al_2CO_3(OH)16.4H_2O$) [45, 46, 47, 48].

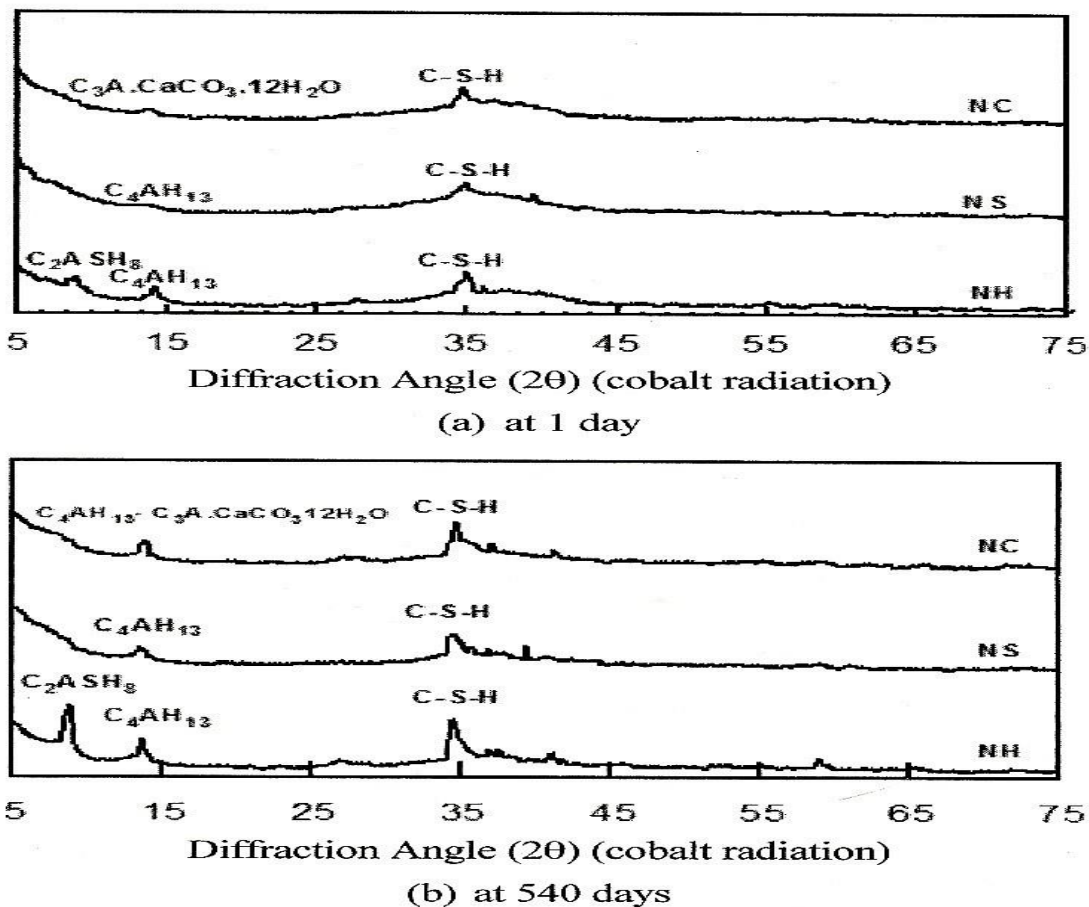


Figure 2.3 : Diffractogrammes de pâte de laitier activé par Na_2CO_3 (NC), Na_2SiO_3 (NS) et $NaOH$ (NH) [43].

2.4.2.2.2. Nature des C-S-H:

La nature de l'activateur a une influence sur les C-S-H. La cristallinité de C-S-H est plus grande lors de l'activation par la soude que par le silicate de sodium.

De plus, le ratio Ca/Si est faible : selon [48], alors que le ratio Ca/Si du laitier anhydre est de 1,1, le ratio Ca/Si est de l'ordre de 0,9 lors de l'activation par la soude et de l'ordre de 0,75 lors de l'activation par le silicate de sodium (apport de silicium de l'activateur). En effet, des ions sodium remplacent partiellement les ions calcium en compensation de charge dans l'inter feuillet des C-S-H. Une comparaison entre l'hydratation du laitier activé par Na_2SiO_3 ou K_2SiO_3 (AAS) et du ciment Portland (OPC) est proposée par [49] ainsi que par [50] (Figure 2.4 et Figure 2.5). Les C-S-H du laitier activé sont de plus faible ratio C/S, incorporent plus d'alcalins et il y a plus de substitution de Si par Al.

Pour le laitier activé par Na_2SiO_3 , le laitier se dissout rapidement et la notion de C-S-H externe ne s'applique pas tout à fait. Les C-S-H apparaissent sous forme de gel dans la matrice entre les grains de laitier. Pour le ciment Portland, les C-S-H ont plutôt une croissance topotactique sous forme d'aiguilles pour former les C-S-H externes. La croissance des C-S-H internes est également plus importante.

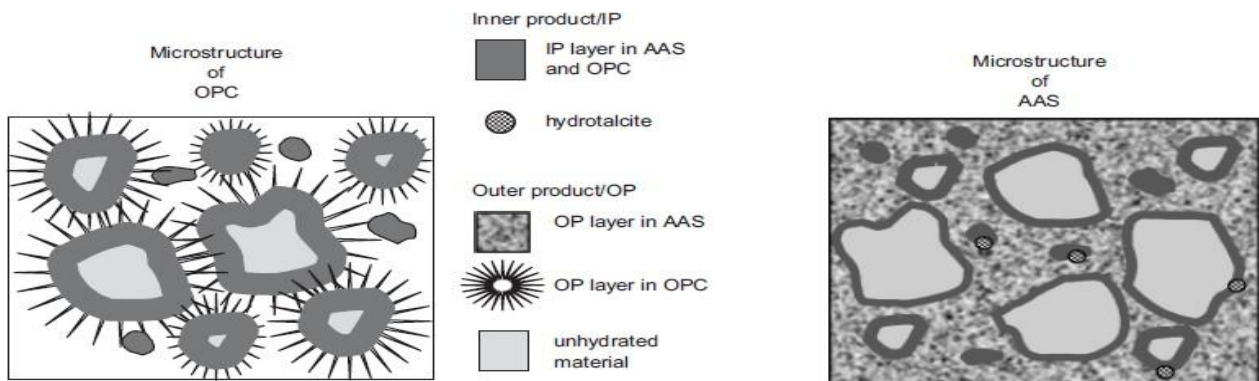


Figure 2.4 : Représentation schématique de la microstructure des produits d'hydratation du laitier activé par Na_2SiO_3 et du ciment Portland [49]

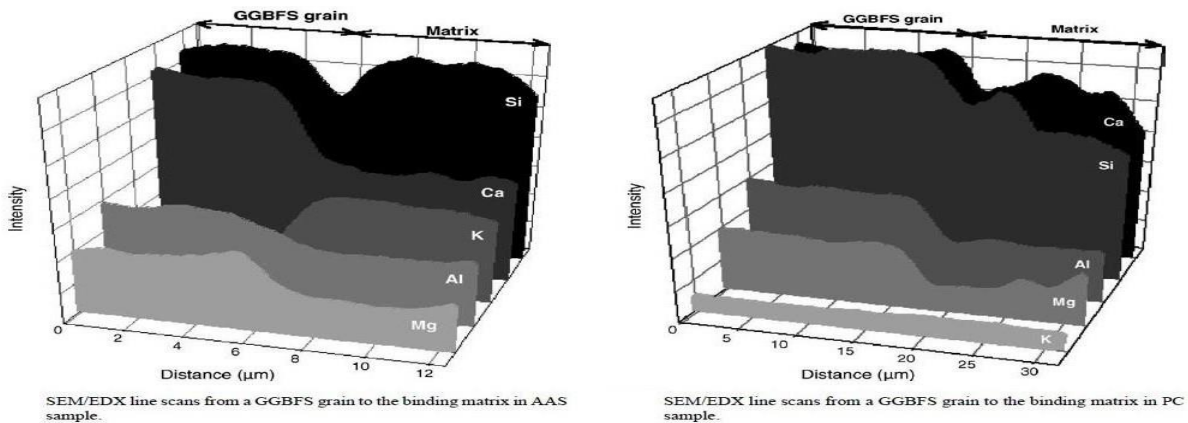


Figure 2.5 : Répartition élémentaire par analyses MEB/EDX dans un grain de laitier et dans la matrice liante – à gauche : activation par K_2SiO_3 , à droite : hydratation en présence de ciment Portland[50].

2.4.2.2.3. Microstructure des produits d'hydratation du laitier activé par Na_2CO_3 :

Le développement de la microstructure de pâte de laitier activé par Na_2CO_3 (ainsi que NaOH et Na_2SiO_3) a été étudié par [51].

L'évolution dans le temps de l'hydratation de laitier activé par Na_2CO_3 est présentée (Figure 2.6) :

- à 20 minutes : précipitation de CaCO_3 mal cristallisé à la surface des grains de laitier.
- à 2 heures : précipitation plus importante de CaCO_3 et C-S-H. L'attaque par OH^- est encore possible.
- à 1 jour : les grains sont presque entièrement recouverts par C-S-H ayant la morphologie « foil-like » courante.
- à 3 jours : la structure est encore plus dense avec présence de C-S-H et $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ mis en évidence par DRX.

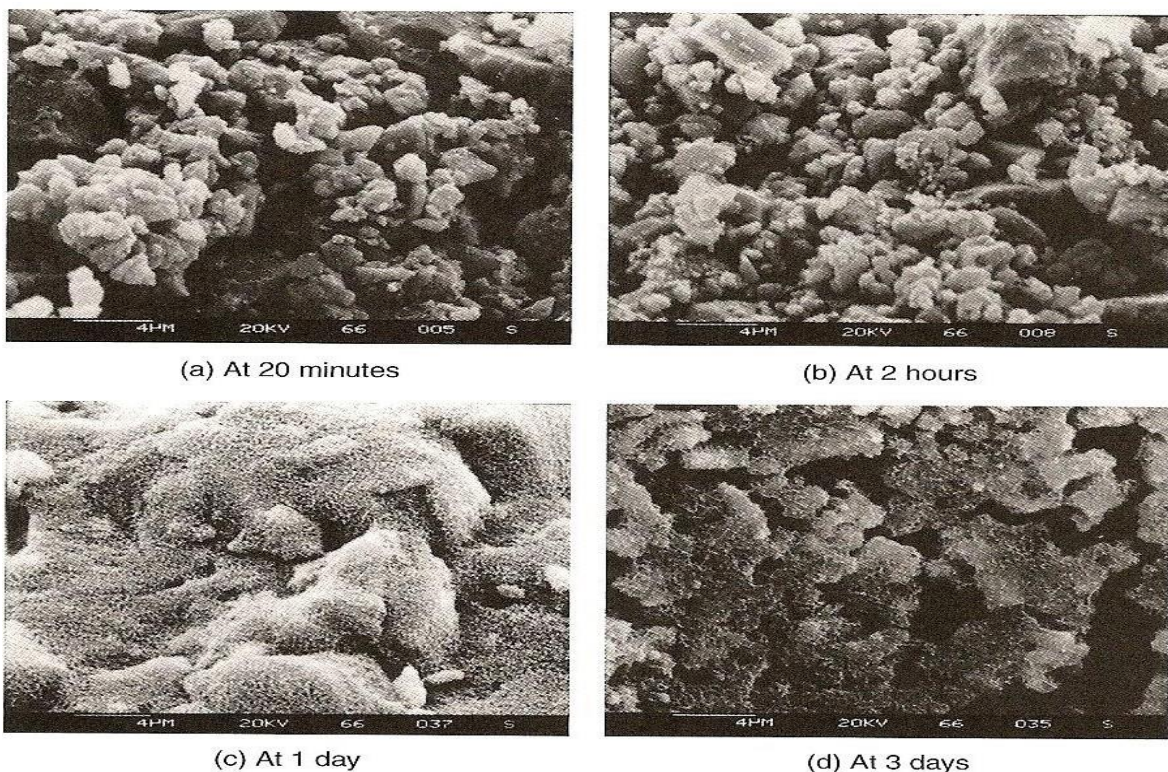


Figure 2.6 : Observations MEB du développement de la microstructure d'une pâte de laitier activé par Na_2CO_3 [51].

2.4.2.2.4. Cinétique d'hydratation:

Le Tableau 2.1 présente les principales caractéristiques de chaleur d'hydratation d'un laitier activé par différents activateurs alcalins (4 % Na_2O) aux températures de 25 °C et 50 °C. Lors de l'activation par NaOH , le temps d'apparition du pic de la période d'accélération (principal pic de chaleur d'hydratation) est beaucoup plus court que celui du ciment Portland et la chaleur d'hydratation est moindre.

Lors de l'activation par Na_2SiO_3 , l'apparition du pic de la période d'accélération est au contraire beaucoup plus tardive que pour le ciment Portland et la chaleur d'hydratation reste moindre.

On notera cependant que l'activation par Na_2SiO_3 est extrêmement sensible à la température, le temps d'apparition du pic d'accélération étant divisé par 8 entre 25 °C et 50 °C.

Lors de l'activation par Na_2CO_3 , l'apparition du pic de la période d'accélération est plus tardive que pour le ciment Portland et la chaleur d'hydratation reste également moindre. On notera aussi que l'activation par Na_2CO_3 est extrêmement sensible à la température, le temps d'apparition du pic d'accélération étant divisé par 10 entre 25 °C et 50 °C [52].

Tableau 2.1: Principales caractéristiques de chaleur d'hydratation d'un laitier activé par différents activateurs alcalins[52]:

Activateur	pH initial de la solution à 23 (°C)	Temperature d'hydratation (°C)	Temps d'apparition du pic de la période d'accélération (h)	Chaleur d'hydratation à 24 h (kJ/kg)
Ciment Portland (contrôle)	5,2 (eau)	25	1.99	208
		50	1.11	351
NaOH	13.87	25	0.25	125
		50	0.11	208
Na_2SiO_3	12.89	25	17.75	63
		50	2.17	253
Na_2CO_3	12.16	25	5.25	115
		50	0.52	305

2.4.2.2.5. Propriétés de durabilité:

La durabilité est l'une des propriétés les plus importantes pour les bétons. Le béton est par nature un matériau durable. Cependant, le béton est susceptible d'être dégradé dans différentes conditions d'exposition si les précautions nécessaires ne sont pas mises en œuvre.

La plupart des études en lien avec la durabilité porte sur l'activation par le silicate de sodium. Il est généralement admis que les liants et bétons à base de laitier activé par des alcalins présentent une meilleure résistance aux agressions chimiques mais un retrait plus grand que les liants et bétons à base de ciment Portland.

Voici une synthèse de l'état de la connaissance sur les propriétés de durabilité [43] :

- La performance des liants et bétons à base de laitier activé par des alcalins est contrôlée par la nature du laitier, la nature et le dosage de l'activateur utilisé et du ratio eau sur laitier.
- Dans des conditions humides, les liants à base de laitier activé peuvent présenter une perméabilité à l'eau et aux chlorures plus faible, et une meilleure résistance aux environnements corrosifs (acide, sulfate, chlorures) que le ciment Portland.

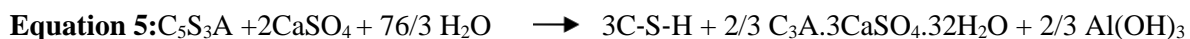
- Dans des conditions humides ou modérément humides, les bétons de laitier activé peuvent être carbonatés plus vite que les bétons de ciment Portland.
- Quand des granulats alcali-réactifs sont employés, les bétons de laitier activé peuvent présenter un gonflement élevé. Cependant, le gonflement dépend des paramètres de formulation du béton. La réaction alcali-granat peut être réduite ou éliminée par l'introduction de pouzzolanes telles que les cendres volantes, la fumée de silice ou le métakaolin.
- Les agents entraîneurs d'air pour les bétons à base de ciment Portland peuvent ne pas fonctionner dans les bétons de laitier activé. Pour une teneur et une distribution en air équivalente, les bétons de laitier activé ont une résistance au gel/dégel équivalente voire meilleure que les bétons de ciment Portland.
- Les bétons de laitier activé présenteraient une meilleure résistance au feu que ceux à base de ciment Portland.

2.4.3. L'activation sulfatique du laitier de haut fourneau:

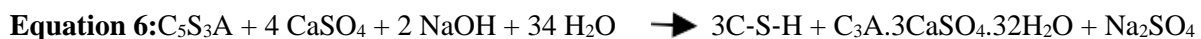
L'activation du laitier par les sulfates peut être calcio-sulfatique (sulfate de calcium) ou sodio-sulfatique (sulfate de sodium) [43].

2.4.3.1. Produits d'hydratation:

Les auteurs s'accordent généralement à dire que les principaux produits d'hydratation du laitier activé par les sulfates sont C-S-H et l'ettringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). On peut schématiser l'hydratation par les équations stoechiométriques suivantes [43, 53] : Activation par le sulfate de calcium :



Activation par le sulfate de sodium :



2.4.4. Activation calcio-sulfatique:

L'activation par le sulfate de calcium est bien connue dans les ciments sur sulfatés. La norme européenne NF EN 15743 donne les spécifications relatives à ces liants. Ils doivent contenir au moins 75 % de laitier de haut fourneau, entre 5 % et 20 % de sulfate de calcium (gypse ou héli hydrate ou anhydrite) et entre 0 % et 5 % d'autres constituants (ciments, chaux ou autres). Tel qu'il est écrit dans la norme, la cinétique d'hydratation des ciments sur sulfatés est plus lente que pour le clinker Portland et conduit à une résistance à la compression et à des dégagements de chaleur d'hydratation sensiblement plus faibles que pour les ciments courants.

En outre, sa composition rend le béton avec lequel il est fabriqué résistant à de nombreux agents chimiquement agressifs, en particulier les sulfates. La cinétique de durcissement et la résistance

moins des ciments sur sulfatés nécessitent la prise de précautions supplémentaires, lors de leur utilisation, pour assurer une cure suffisante du béton et la sécurité de la construction dans laquelle ils sont incorporés. Cette vitesse de durcissement lente est confirmée par [54], qui selon la réactivité du laitier utilisé a obtenu entre 3 MPa et 10 MPa à 1 jour et entre 32 MPa et 38 MPa à 28 jours sur des mortiers à E/C = 0,40 avec une activation par l'anhydrite.

2.4.5. Activation sodo-sulfatique:

L'activation sodo-sulfatique combine une activation alcaline et une activation sulfatique. Pour l'activation du laitier seul (sans ciment Portland), relativement peu d'études ont été répertoriées comparativement aux autres activateurs alcalins et au sulfate de calcium. Cette faible popularité peut s'expliquer par le fait que l'activation par le sulfate de sodium ne permette d'obtenir que des résistances plutôt faibles au jeune âge. Ces dernières sont inférieures à celles qui peuvent être obtenues avec l'activation par la soude, le carbonate de sodium ou le silicate de sodium [55].

A titre d'exemple, les résultats présentés par [55] de résistances en compression sur pâte de laitier activé par Na_2SO_4 montrent que les résistances atteintes sont au mieux deux fois plus faibles que pour un ciment Portland.

2.4.6. L'activation du laitier de haut fourneau en présence de ciment portland:

Le ciment Portland est le moyen le plus courant pour utiliser le laitier granulé moulu de haut fourneau. Le laitier est présent dans les ciments de type CEM II, CEM III (jusqu'à 95 %), CEM V conformes à la norme NF EN 197-1 et peut être employé en mélange avec le ciment CEM I ou CEM II dans les bétons dans les conditions prévues par la norme NF EN 206-1. Le développement sur le marché de ces liants est dû aux nombreux avantages qu'ils procurent : faible chaleur d'hydratation, résistance aux sulfates et agents chimiquement agressifs, couleur claire mais également faible empreintes environnementales. Il existe cependant un inconvénient majeur et particulièrement pour des applications en préfabrication: sa faible résistance au jeune âge.

2.4.6.1. Hydratation du mélange de laitier et ciment Portland:

Une modélisation par [56] de l'assemblage des phases stables hydratées du mélange de laitier et ciment Portland mène aux résultats suivants (Figure 2.7) :

- La Portlandite est consommée, en particulier pour les forts taux de substitution du ciment par du laitier. Les C-S-H ont un ratio Ca/Si plus faible et incorporent une faible quantité d'aluminium. La strätlingite (C_2ASH_8) peut devenir stable pour de forte concentration en laitier.
- Le monocarboaluminate de calcium hydraté et l'ettringite tendent à disparaître au profit de l'hydrotalcite.

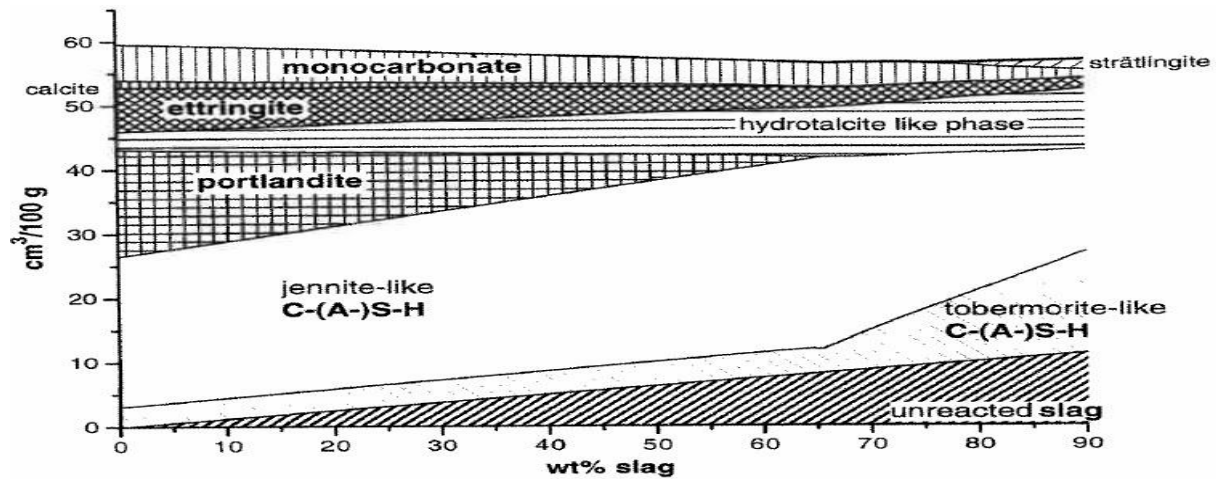


Figure 2.7: Modélisation de l'évolution du volume des hydrates en fonction du taux de laitier [56].

2.4.6.2. Activation chimique:

En présence de ciment Portland, plusieurs types d'activation du laitier ont lieu simultanément :

- L'activation est principalement calcique de fait de la forte teneur en portlandite produite par l'hydratation des C_3S et C_2S .
- Une activation sulfatique a lieu de par la présence de sulfate de calcium en tant que régulateur de prise.
- Une faible activation alcaline existe même si la teneur en alcalin du béton est faible. En effet, ces derniers sont concentrés dans la phase liquide contenue dans la porosité ce qui permet d'atteindre des pH supérieurs à 13. Ainsi, le laitier s'hydrate en présence de ciment Portland mais la cinétique de durcissement du mélange reste bien inférieure à celle du ciment Portland seul [56].

2.4.6.3. Activateurs alcalins:

L'utilisation d'activateurs alcalins peut augmenter significativement la résistance à jeune âge des ciments au laitier. Cette augmentation dépend bien sûr de la nature et du dosage en activateur. La Figure 2.8 présente l'effet de différents activateurs sur la résistance à la compression à 14 jours d'un liant contenant 50 % de laitier (4 laitiers différents). Le silicate de sodium est l'activateur le plus efficace. Le sulfate de sodium est le moins efficace. Cependant, d'autres études montrent que le sulfate de sodium peut accélérer de façon significative la cinétique de durcissement.

Pour d'autres auteurs, les performances obtenues avec le sulfate de sodium en présence de chaux sont meilleures que celle obtenues avec du silicate de sodium [57].

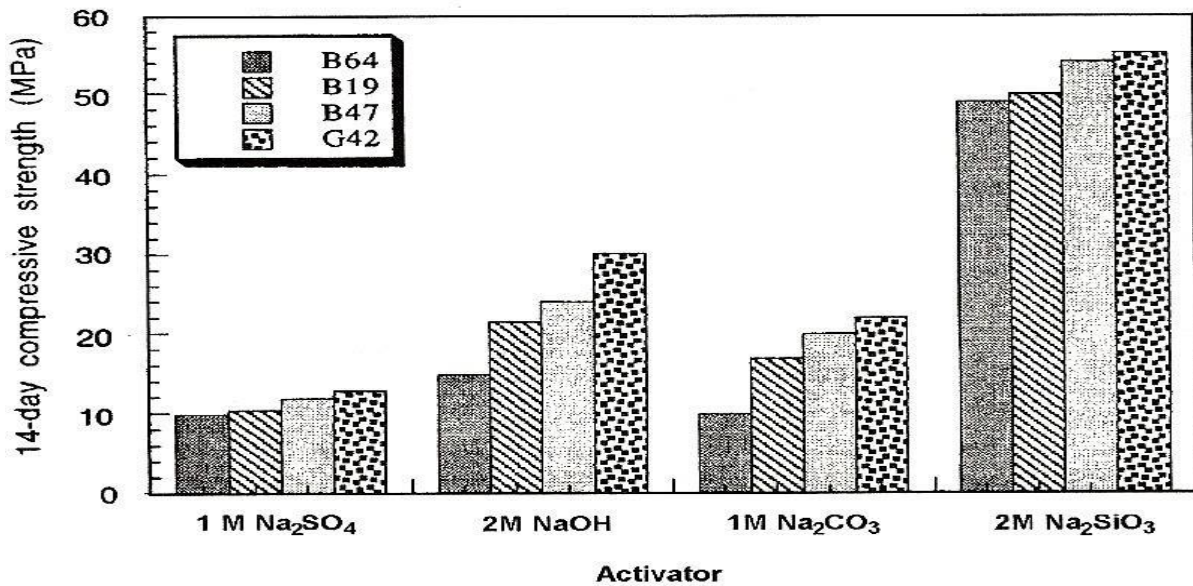


Figure 2.8: Effet de différents activateurs sur la résistance à la compression d'un liant contenant 50% de laitier [43].

2.4.6.4. Activateurs chlorés:

Le chlorure de calcium est un accélérateur de l'hydratation des ciments bien connu et très efficace. Son efficacité interviendrait au niveau de quatre processus distincts [58] : un effet catalytique des réactions d'hydratation durant les premières heures de cure, une augmentation de la réaction pouzzolanique et du taux de croissance des hydrates, et la modification de la morphologie des hydrates et de la porosité de la pâte.

Ces processus peuvent influencer l'hydratation du laitier et du clinker et se traduisent par une diminution du temps de prise et une augmentation des résistances mécaniques à tout âge. Par ailleurs, ce même auteur a également étudié l'intérêt d'accélérateurs non chlorurés tels que le thiocyanate de calcium et de sodium (« TCN et NCN»), le nitrate de calcium (« CN ») et l'alun de potassium (« Alun »). Il a été mis en évidence le potentiel des mélanges ternaires TCN-CN-Alun et NCN-CN-Alun pour l'accélération de l'hydratation des laitiers.

Les travaux de [59] sur l'hydratation du C₃S suggèrent qu'en présence de sels de calcium, et particulièrement CaCl₂, le développement des C-S-H serait plus aciculaire perpendiculairement à la surface des grains. Cela conduirait à un avancement réactionnel plus grand avant d'atteindre la période durant laquelle la cinétique de l'hydratation est lente puisque gouvernée par la diffusion à travers la couche d'hydrates formée à la surface des grains de ciment.

2.4.6.5. Influence de Mg:

L'addition de magnésium par le biais de dolomite semble permettre d'augmenter la résistance de mortiers à base de ciment Portland (Figure 2.9). La dolomite Ca Mg(CO₃)₂ est un carbonate double de

magnésium et calcium. Comparativement à la calcite, sa dissolution mène à la formation d'hydrotalcite additionnelle qui permet de réduire la porosité, augmenter l'avancement réactionnel de l'ensemble du liant et ainsi augmenter les performances mécaniques [60].

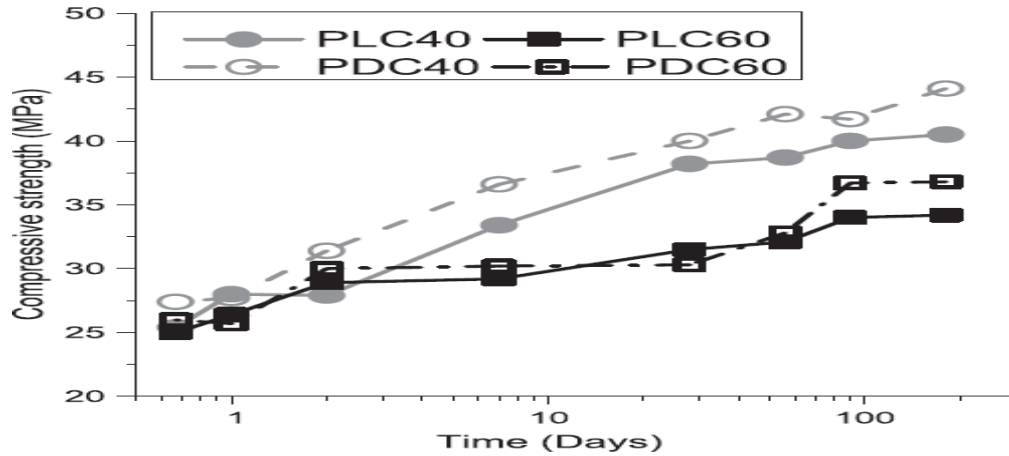


Figure 2.9: Evolution de la résistance à la compression de mortiers à base de ciment et calcaire (PLC) et à base de ciment et dolomite (PDC) conservés à 40 °C et 60 °C [60].

2.5. Autres moyens d'accélération:

2.5.1. Activation thermique:

Le traitement thermique est un moyen puissant pour accélérer la cinétique d'hydratation des matériaux cimentaires. C'est une technique largement utilisée en préfabrication sur les produits à démoulage différé pour des raisons de productivité et permettant d'écourter les échéances de démoulage ou de relâchement des câbles de précontrainte.

Des prescriptions existent sur les cycles de traitement thermique dans la norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » et dans le guide technique du LCPC « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne ». Les réactions d'hydratation de matériaux cimentaires sont des réactions thermo-activées, c'est-à-dire que leur cinétique augmente avec la température. Le matériau cimentaire est d'autant plus sensible à la température que son énergie d'activation est élevée [61].

La présence de laitier de haut fourneau augmente significativement l'énergie d'activation des mélanges de laitier et ciment Portland [61]. Ainsi, l'application d'un traitement thermique pour accélérer les réactions d'hydratation est encore plus efficace sur le laitier que sur le ciment Portland [62]. L'efficacité de différentes méthodes d'activation ont été comparées par [63] : l'activation mécanique (finesse du laitier), l'activation thermique et l'activation chimique (par la soude, la potasse ou le silicate de sodium). L'étude a été réalisée sur des mortiers avec 50 % de laitier et 50 % de ciment Portland. Il en ressort que l'activation thermique est plus efficace que l'activation chimique mais que l'activation mécanique reste la plus efficace des méthodes.

2.5.1.1. Liant ternaire:

L'addition d'ultrafines telles que celles calcaires peut jouer un rôle de filler et de sites de nucléation [64]. L'effet de l'addition d'ultrafines calcaires sur les propriétés à jeune âge des systèmes incorporant jusqu'à 50 % de laitier a été étudié par [65]. Les résultats montrent que l'incorporation d'une addition calcaire à hauteur de 8 à 17 % peut permettre d'obtenir des liants ternaires d'une réactivité à jeune âge presque équivalente à celle d'un ciment Portland.

2.5.2. Accélération par le ciment sulfo-alumineux:

L'accélération par du ciment sulfo-alumineux d'un ciment au laitier et d'un ciment sur sulfaté a été étudiée par [66]. Le ciment sulfo-alumineux est un liant ettringitique à base de yeelite ($C_4A_3.SO_4$) et de gypse. La présence de clinker Portland dans les liants ternaires étudiés entraîne une prise et un durcissement rapides du mortier. Pour pallier un faible maintien de maniabilité, des retardateurs de prise peuvent être utilisés mais ces derniers ont tendance à altérer les performances mécaniques à moyen terme. Si la présence de clinker Portland dans les premiers instants a un aspect négatif, elle permet à plus long terme une activation calcique du laitier [66].

2.5.3. Activation par le Clinker du ciment portland:

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_3S et du C_2S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux développe un PH égale à 12 (basicité de la solution sursaturée de la chaux), ce qui favorise la dissolution du verre du laitier. L'absence du réseau de SiO_2 explique la facilité de l'activation du laitier.

Selon (Guetche et Houari, 2002), quand on mélange le laitier finement broyé avec l'eau, les ions dissous sont presque inexistant, on remarque une faible conductivité qui ne dépasse pas 0,6 ms/cm pour une surface spécifique du laitier de 6000 cm^2/g . Par contre avec l'ajout de 19 % du CPA et 5 % du gypse, la conductivité augmente considérablement. Selon les étapes suivantes:

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

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

durant l'hydratation du ciment portland. Cette réaction est généralement lente, et peut se développer sur plusieurs semaines ciment[31].

2.6.LES FACTEURS D'ACTIVATION:

2.6.1. La finesse:

La surface spécifique du laitier est un facteur influençant sa réactivité. L'effet est significatif seulement dans les trois premiers jours : plus la finesse du laitier est grande, plus la résistance à la compression augmente[30], [31]. Avec un taux de gâchage égal et une maniabilité suffisante pour les différents laitiers testés, la figure 2.10 donne les résistances à 28 jours. L'optimum de finesse est compris entre 4500 et 6500 cm^2/g pour les laitiers acides et neutres et entre 4000 et 5500 cm^2/g pour les laitiers basiques [31].

Malhotra et Metha précisent que les particules de laitier dont le diamètre est inférieur à 10 μm contribuent au développement des résistances avant 28 jours, celles dont le diamètre est compris entre 10 et 45 μm contribuent aux résistances ultérieures, les particules dont le diamètre est supérieur à 45 μm présentent une faible réactivité. Mais il faut préciser que même si une plus grande finesse améliore la réactivité, elle entraîne aussi une plus grande consommation d'eau pour avoir des conditions de plasticité similaires, ce qui fait chuter les résistances finales.

De plus, l'influence de la surface spécifique sur les résistances mécaniques dépend de la nature de l'activateur alcalin : avec de la soude NaOH ou du carbonate de sodium Na_2CO_3 , l'augmentation de la surface spécifique de 450 à 900 m^2/kg permet l'augmentation des résistances à 3 jours alors qu'avec une solution de silicate de sodium $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$, les résistances diminuent avec l'augmentation de la surface spécifique [31].

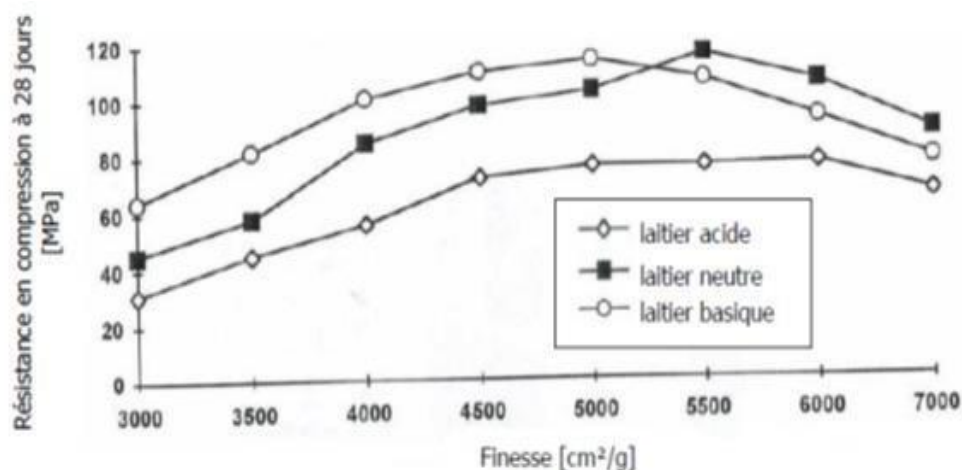


Figure 2.10. Résistance en compression à 28 jours en fonction de la finesse du laitier (activé avec du silicate de sodium : $\text{Na}_2\text{O} = 5.5\%$, $M_s = 1$; sable/laitier = 2) [31].

2.6.2. La température de cure:

Brough et Atkinson ont étudié l'influence de la température de cure sur le développement des résistances de mortiers à base de laitier activé avec des silicates de sodium ("waterglass" $\text{Na}_2\text{O} \cdot m \text{H}_2\text{O}$). Lorsque la température de malaxage et de cure est seulement de 5°C, le laitier activé par des silicates de sodium voit le développement de sa résistance fortement retardé : le démoulage ne peut avoir lieu à un jour car l'échantillon est trop mou. Par contre à 28 jours, la résistance est correcte (Le tableau (2.2)). L'élévation de la température à 40°C et à 80°C a un effet stimulateur : l'accélération des résistances est très forte et les résistances à moyen terme sont nettement améliorées. Précisons qu'avec une température de 80°C, le développement des résistances est extrêmement rapide puisque dès 12 heures, la résistance atteint déjà 70 MPa, résistance similaire à la résistance obtenue par le mélange conservé à 20°C pendant 28 jours.

Les analyses des échantillons dont la cure est de 80°C indiquent que la microstructure à 1 jour est similaire à celle des échantillons conservés à 20°C à des échéances plus longues (1 mois à 1 an) (figure 2.11). La composition des hydrates est similaire : il y a formation dans les deux cas d'une phase hydrotalcite ($\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) et d'un gel de C-S-H. [30] ont précisé que l'augmentation de la température de cure (45°C) a des effets différents suivant le type d'activateur utilisé : les résistances au jeune âge sont améliorées par l'augmentation de la température avec des carbonates de sodium Na_2CO_3 comme activateur, par contre, à tous les âges, les résistances sont moins bonnes avec de la soude NaOH ou des silicates de sodium $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, NaOH comme activateurs lorsque la température augmente (figure 2.12). L'explication de ce phénomène est basée sur la formation d'une grande quantité de produits d'hydratation dont la distribution est très hétérogène au jeune âge, ce qui entraîne une densification conséquente de la matrice et une modification de la microstructure.

Donc avec le temps, les processus de diffusion sont plus difficiles et les réactions suivantes sont ralenties [30].

Tableau 2.2: Résistance à la compression sur cube de mortier à différentes échéances et avec différentes températures de cure [67]:

Température d'hydratation (°C)	Résistance en compression (MPa)			
	1 jour	3 jour	7 jour	28 jour
5	-	2	7	41
20	7	44	55	78
40	52	65	79	99
80	72	-	-	-

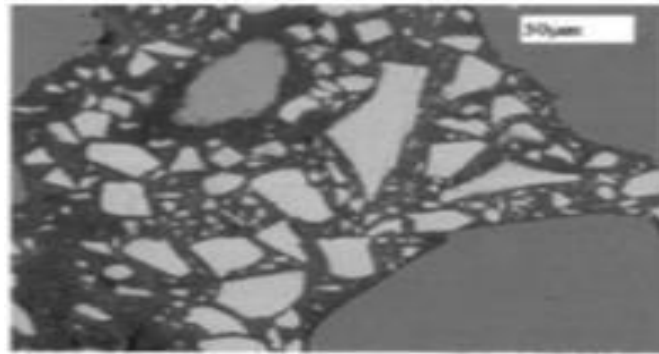


Figure 2.11: Observation au MEB d'une pâte de ciment au laitier AAS conservée 4 heures à température ambiante, puis 12 heures à 80°C [67].

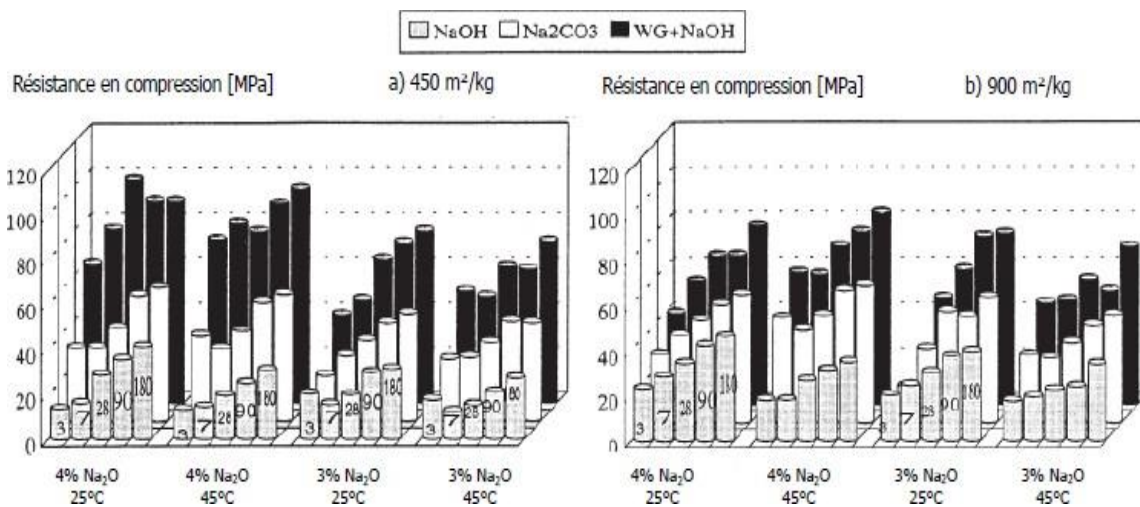


Figure 2.12 : Résistance à la compression à 3 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours, 180 jours de ciments au laitier à 25°C et 45°C , a) laitier de finesse 450 m²/ kg ; b) laitier de finesse 900 m² / kg [30].

2.7. PROPRIETES LIEES A LA DURABILITE DES BETONS DE LAITIER :

Lorsqu'on fabrique un béton, on parle souvent de résistance mécanique en compression, traction et flexion. Mais, ces propriétés mécaniques, bien qu'elles soient très importantes pour la conception même d'un ouvrage ou d'une structure ne sont pas forcément les seules à entrer en jeu. Même si un béton possède une excellente résistance mécanique, sa durabilité dans le temps n'est pas toujours prouvée. Il est donc toujours intéressant de caractériser la durabilité d'un béton placé dans son environnement. Depuis une dizaine d'années, la durabilité est ainsi devenue une propriété primordiale pour développer la technologie du béton et construire des structures ayant une durée de service élevée, dans le but de réduire notre impact sur l'environnement tout en diminuant les coûts [68].

En effet, même si une structure possédant une bonne durabilité nécessite plus de coûts qu'une structure conventionnelle lors de sa fabrication, l'économie réalisée sur ses réparations et sa maintenance doit être prise en compte. Ainsi, lors de la fabrication de nouvelles structures en béton, trois paramètres sont essentiels : le coût des matériaux et de la construction, la durabilité de l'ouvrage

et le respect de la structure vis-à-vis de l'environnement [68]. L'utilisation de sous-produits industriels en substitution du ciment ou des granulats (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, verre broyé ou encore vitrifiés de déchets non-organiques) semble être une bonne solution si leur tenue au sein du béton dans le temps n'est pas compromise. L'étude de la durabilité de tels bétons est donc un facteur clé afin de pouvoir réduire les coûts et l'impact sur l'environnement, et devient aussi importante que la résistance mécanique en compression. Par définition, la durabilité du béton est liée à sa capacité de résister aux attaques physiques et chimiques perpétuées par son environnement [69].

Les attaques les plus fréquentes sont la lixiviation et l'efflorescence, la carbonatation, l'alcali-réaction, les cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, l'abrasion, les sulfates et les acides. Les facteurs clés responsables des attaques physiques et chimiques sont liés aux conditions environnementales (humidité et température par exemple) et aux mécanismes de diffusion au sein de la matrice cimentaire [70]. Étant donné que le transport d'espèces chimiques ne peut se faire on comprend qu'un béton durable doit être un produit de grande qualité possédant une bonne imperméabilité [71].

2.7.1. Perméabilité du béton à l'eau :

La perméabilité du béton se définit comme la propriété qui gouverne l'écoulement d'un fluide dans le solide poreux qu'est le béton. Un béton contenant des granulats de laitier possède en général une faible perméabilité à l'eau en comparaison d'un béton conventionnel de même rapport E/C. Cela est notamment dû à l'excellente zone de transition dans le béton de laitier lui conférant une densité matricielle importante. Ainsi, de par cette imperméabilité, un béton fabriqué avec des granulats de laitier possédera de bonnes caractéristiques de durabilité [10 ; 14].

2.7.2. Résistance aux cycles de gel/dégel :

Lorsque le béton est soumis au gel, une partie de son eau libre contenue dans ses pores ou ses granulats est susceptible d'occuper plus de volume. En effet, l'eau sous forme solide occupe un volume 9 % supérieur que l'eau sous forme liquide. Si le béton soumis au gel est bien préparé (teneur en air entre 5 et 8 %, $L_{\leq 250} \leq 250 \mu\text{m}$ [norme CSA A23.1]), l'eau libre va préférentiellement geler dans les fines bulles d'air bien réparties qui vont ainsi jouer le rôle de vase d'expansion.

Par contre, dans le cas d'un mauvais réseau d'air, le gel dans les pores de la pâte cimentaire et des granulats entraîne des contraintes pour le béton pouvant causer des dégâts irrémediables. Dans une optique de durabilité, la résistance aux cycles de gel/dégel est donc une caractéristique fondamentale pour les ouvrages extérieurs dans les pays froids. Elle est liée à plusieurs autres propriétés du béton telles que sa porosité, sa perméabilité, la structure de ses pores et les caractéristiques de ses granulats.

Les granulats naturels peu poreux possèdent une faible absorption et vont donc contenir une quantité négligeable d'eau libre dans leurs pores.

Néanmoins, cela est différent pour les granulats de laitier, plus poreux. Le gel peut provoquer des fissurations au sein du granulat si celui-ci ne possède pas des propriétés mécaniques suffisantes. Cependant, les études menées à ce sujet montrent que les bétons de laitier soumis à des cycles de gel-dégel possèdent des résistances aussi bonnes voire meilleures que celles des bétons conventionnels, prouvant ainsi la possibilité d'utilisation des laitiers cristallins en tant que granulats, et ce même dans des pays froids.

D'ailleurs, même pour un remplacement de la partie fine granulaire à hauteur de 50 % (le maximum possible sans problèmes importants de rhéologie), le béton de laitier donne des résistances supérieures à celles du béton de référence (Figure 2.13) [73].

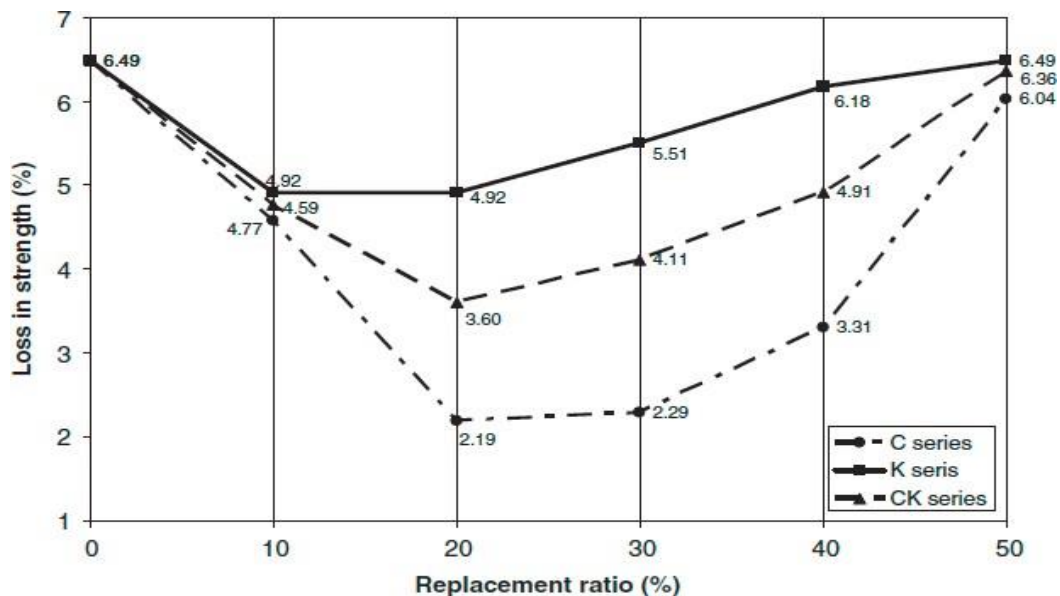


Figure 2.13: Étude de la perte de résistance mécanique après les cycles de gel-dégel en comparaison au même béton après un mûrissement de 90 jours. Séries C/K : Remplacement partiel de la partie fine des granulats par des laitiers / cendres volantes [73].

Selon l'étude réalisée par Pellegrino *et al.* en 2012, le béton tout laitier (remplacement total de la partie fine et grossière des granulats par des laitiers) a donné les meilleurs résultats de résistance aux cycles de gel-dégel suivant l'essai de la norme ASTM C 666, par rapport aux bétons incorporant un taux moins important de granulats de laitier. L'excellent réseau d'air au sein de la matrice cimentaire a permis pour tous les bétons de ne pas subir de détériorations importantes et même de gagner en résistance en compression. Ainsi, le béton tout laitier totalise une variation de +18 % (voir mélange 5 du Tableau 2.3) alors que le béton traditionnel a gagné 11 % de résistance [12]. Ainsi, les laitiers cristallins semblent posséder de bonnes propriétés mécaniques pour résister aux contraintes engendrées par l'expansion de l'eau libre lors du gel.

Tableau 2.3: Résistance en compression avant et après les cycles de gel/dégel pendant 25 jours pour six mélanges comportant un taux croissant de granulats de laitier [12]

Béton	Résistance en compression (MPa)		Variation(%)
	<i>Après gel-dégel</i>	<i>Avant gel-dégel</i>	
Conventionnel	50,1	44,6	+11,0
Laitier 25%	51,7	45,4	+12,2
Laitier 50% (remplacement de la partie fine seulement)	50,4	44,0	+12,6
Laitier 50%	49,6	45,2	+8,9
Laitier 75%	48,8	45,1	+7,6
Laitier 100%	50,5	41,4	+18,0

2.7.3 : Résistance aux cycles de mouillage-séchage et stabilité volumétrique des granulats de laitiers au sein d'une matrice cimentaire:

L'essai de mouillage-séchage est utile pour simuler la tenue dans le temps de béton exposé à un environnement humide ou marin, en étudiant la variation de résistance en compression avant et après les cycles. Cet essai est mené en suivant la norme ASTM D-4792.

Généralement, les effets combinés d'expansion et de contraction dus au mouillage-séchage sont très nocifs pour les bétons et ceux de laitier n'échappent pas à cette règle. Comme présenté sur Tableau 2.4, les bétons à taux de remplacement élevé montrent même en fait une résistance plus faible face à ces attaques [12].

Tableau 2.4: Résistance en compression pour différents mélanges incorporant des granulats de laitier avant et après les cycles de mouillage / séchage pendant 30 jours [12]:

Béton	Résistance en compression (MPa)		Variation (%)
	<i>Après mouillage-séchage</i>	<i>Avant mouillage-séchage</i>	
Conventionnel	39,2	44,6	-13,7
Laitier 25%	42,8	45,4	-6,1
Laitier 50% (partie fine seulement)	41,4	44,0	-6,4
Laitier 50%	37,9	45,2	-19,5
Laitier 75%	36,9	45,1	-22,2
Laitier 100%	37,4	41,4	-10,8

Généralement, cette moindre résistance au mouillage-séchage des bétons de laitier est liée aux phénomènes d'expansion des granulats de laitier. La chaux (CaO) et périclase (MgO) libres réagissent avec l'eau durant les cycles de mouillage, causant une expansion volumétrique supplémentaire [73 ; 76; Palanco *et al.*, 2011]. À l'inverse des laitiers de hauts fourneaux qui possèdent une bonne stabilité volumétrique, les autres laitiers comme ceux provenant d'aciéries électriques ont tendance à être

expansifs en milieu humide [77]. Lors de l'étude du potentiel de remplacement des granulats naturels par des laitiers, la détermination de la force d'expansion dans une matrice confinée, telle que l'autoclave est essentielle. Le danger d'expansion est effectivement la principale propriété des laitiers limitant leur utilisation dans le béton [12]. Si l'essai d'expansion en autoclave fournit un résultat nul (comme pour un granulats naturels), le laitier étudié est stable et peut être incorporé dans une matrice cimentaire si les autres propriétés requises sont atteintes. Si le résultat d'expansion est positif, d'autres tests plus approfondis sont requis. La convenance de ces laitiers dans le béton dépend de la force maximale d'expansion, de la contrainte de tension exercée par chaque granulats et de la contrainte maximale autorisée au sein du béton [77].

Enfin, bien que les granulats de laitier puissent montrer une stabilité volumétrique acceptable, il est nécessaire de la confirmer par des essais de durabilité réels sur des bétons incorporant ces laitiers. De nos jours, il est fondamental de construire des structures durables, incorporant donc des matériaux ayant prouvé leurs qualités en tant que granulats de béton [77].

2.7.4 : Résistance au feu et aux températures élevées:

Comme les laitiers proviennent d'une fabrication réalisée à 1600°C, on s'attend à ce que leur utilisation dans le béton améliore ses propriétés de résistance au feu et aux températures élevées. Cependant, les diverses études réalisées à ce sujet montrent en fait que l'incorporation de laitiers au sein du béton ne permet pas nécessairement une amélioration de sa résistance aux températures élevées. Comme le montre Figure 2.14, jusqu'à 600 °C, la résistance en compression est meilleure pour un béton de laitier que pour un béton de référence. Mais entre 600 °C et 800 °C une perte de résistance mécanique d'environ 35 % se produit pour la plupart des laitiers d'aciéries électriques étudiés ; perte nettement plus grande que celle des bétons conventionnels [78 ;79].

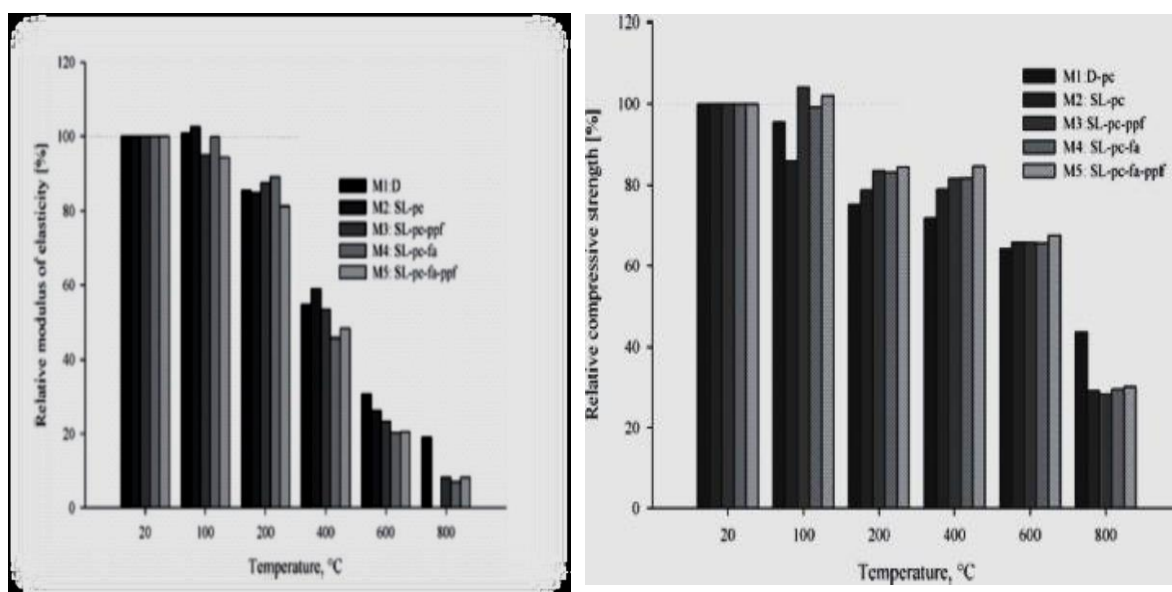


Figure 2.14: Résistance en compression et module d'élasticité pour différents bétons soumis à une élévation de température (M1 : béton de référence, M2-M5 : bétons de laitier) [79].

Les analyses minéralogiques montrent que cette perte est due à une expansion volumétrique (transformation de wüstite en magnétite par exemple), affectant ainsi négativement les propriétés mécaniques du béton par l'apparition de fissures dans la zone de transition. La littérature à ce sujet indique que cette transformation est irréversible. Ainsi, le laitier peut devenir stable et permet d'améliorer les résistances aux températures élevées du béton s'il est déjà traité thermiquement jusqu'à 1000°C. Il est à noter que les propriétés intrinsèques de résistance mécanique des laitiers sont meilleures que celles des granulats naturels, car aucune fissuration n'apparaît au sein du laitier lors de l'exposition thermique. Au contraire, la dolomite subit une réaction de décarbonatation pour des températures supérieures à 700°C, causant ainsi une microfissuration au travers du granulat [80].

2.7.5. Résistance à l'abrasion du béton :

La résistance à l'abrasion est mesurée par la méthode d'essai ASTM C779-00. La résistance à l'abrasion d'un béton dépend principalement de celle des matériaux qui le constituent, et donc surtout de celle de ses granulats grossiers [81 ; Liu, 1994]. De plus, la qualité de surface de ses granulats l'influence grandement. Il peut être suggéré d'incorporer des laitiers cristallins pour améliorer la résistance à l'abrasion d'un béton [82].

Il est particulièrement important d'étudier la résistance à l'abrasion des bétons de chaussée composés de laitier, une de leurs utilisations courantes. En effet, si les laitiers se dégradent plus facilement et rapidement que les granulats naturels, les particules fines présentes aux bords des routes seront principalement des fragments de laitier. La teneur en métaux lourds nocifs des laitiers peut alors engendrer des problèmes de santé pour la population en cas d'inhalation [72 ; 75 et 83]. Si les granulats de laitier ne possèdent pas une résistance à l'abrasion suffisante au sein d'un béton de route, il est possible de leur incorporer des particules plus résistantes à l'abrasion [75]. Lors de l'étude d'implantation de sous-produits industriels dans un béton de route, des tests de lixiviation sont donc nécessaires.

2.7.6 : Lixiviation des métaux lourds:

L'augmentation de l'incorporation de sous-produits industriels au sein du béton peut causer des problèmes environnementaux à cause de la lixiviation des métaux lourds, surtout dans le cas de dallage ou de pavage [10]. De plus, la possibilité de lixiviation de certains matériaux lourds du granulat vers la pâte cimentaire pendant la phase d'hydratation doit être prise en compte [74]. Pour cela, des bétons âgés d'au moins 28 jours sont broyés puis placés dans une cuve remplie d'eau distillée et d'acide nitrique. L'eau de lixiviation est ensuite récupérée et testée pour relever la teneur des métaux lourds principaux tels que le cuivre, le zinc, le nickel, le chrome, le cadmium et le plomb. Ces valeurs sont ensuite comparées aux données des normes exigées dans le pays.

Les résultats pour les bétons avec des laitiers cristallins sont toujours excellents. Ainsi, l'eau de lixiviation provenant d'un béton avec un grand volume de laitier cristallin peut être décrit comme déchet inactif (Tableau 2.5) [10 ; 12].

Tableau 2.5: Résultats du test de lixiviation pour des granulats de laitier [12]:

Éléments	Concentration (mg/L)	Limites (mg/L)
Ni	<40	50
F	<1,5	1,5
S	<200	250
Cl	<75	100
B	0,0125	1
Cu	<0,001	0,05
Zn	<0,03	3
Be	<0,005	0,01
Co	<0,001	0,25
V	0,103	0,25
As	<0,02	0,05
Cd	<0,003	0,005
Cr	<0,002	0,05
Pb	<0,04	0,05
Hg	<0,001	0,001
pH	10,8	5,5-12,0

2.8. Conclusion :

La technologie des granulats est complexe, de par l'hétérogénéité des matières premières (caractéristiques intrinsèques variées, sources d'extraction diversifiées, etc.). La maîtrise de cette technologie participe à la compréhension des phénomènes observés sur le béton, que ce soit à l'état frais, durci ou pour des aspects de durabilité. La littérature traitant de la valorisation de laitiers cristallins montre que ces granulats peuvent facilement être incorporés au sein d'une matrice cimentaire, avec certaines précautions toutefois. Si le risque d'expansion volumétrique est affranchi, les laitiers cristallins semblent être tout à fait aptes à servir de granulats pour béton, offrant même bien souvent de meilleures résistances mécaniques et de durabilité que les bétons conventionnels.

CHAPITRE 3
Caractérisation des matériaux
utilisées

TROISIEMME CHAPITRE

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

3.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés, Les différentes techniques expérimentales utilisées pour les caractérisations granulométrique, chimique des matériaux.

3.1.1. Matériaux de bases:

Nous avons utilisé pour la confection du mortier des matériaux locaux dont les caractéristiques sont déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil de l'université de M'Sila:

- ✓ Le sable de rivière fin d'origine silicique de la région de BOUSAADA (OUED MAÏTER) .
- ✓ Le ciment utilisé est CEM I-SR 3 : Ciment portland résistant aux sulfates encore noté (CRS).
- ✓ Le laitier de haut fourneau.
- ✓ L'eau potable du laboratoire.
- ✓ L'activant.
- ✓ L'adjuvant.

3.1.2. Caractéristiques des matériaux :

3.1.2.1. Sable :

Le sable utilisé dans cette étude provient des abords de l'oued Maïter (carrière de lafarge). Cet oued est situé entre les collines de Boussaâda, entre lesquelles souffle un vent provenant du sud chargé de grains fins. L'avancée du désert a permis donc au fil des ans le dépôt du sable dans l'oued, qui par la suite a assuré son transport et son étalement.

Ce sable est d'origine éolienne, c'est un sable de dune , du moins ses grains fins. Le sable de dune de Boussaâda, siliceux, ses grains roulés de formes arrondies et de surfaces lisses, est caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximal qui n'excède pas 3,0 mm .

✓ Les caractéristiques physiques du sable de dune testé sont :

3.1.2.1.1. Analyse granulométrique : [NA EN 933-5]

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Tableau 3.1. Analyse granulométrique du sable (sable de Boussaâda)

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	59	59	2.95	97.05
1.25	54.1	113.1	5.655	94.345
0.63	78.9	192	9.6	90.4
0.315	551.8	743.8	37.19	62.81
0.16	1074.2	1818	90.9	9.1
0.08	168.2	1986.8	99.34	0.66
Fond	8.2	1995	99.75	0.25

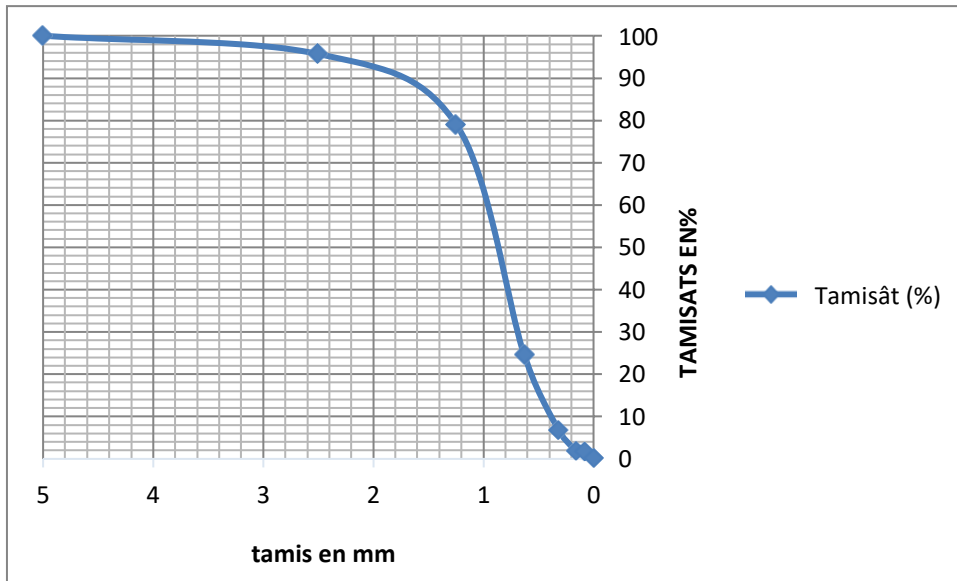


Figure 3.1: La courbe granulométrique du sable de Boussaâda.

3.1.2.1.2. Module de finesse : [84]

Le caractère plus ou moins d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse M_f celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité pour les tamis d'ouverture (0.16 / 0.315 / 0.63 / 1.25 / 2.5 / 5 mm) sur 100 ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de compositions des bétons.

$$M_f = \sum R_c / 100$$

R_c : Refus cumulé.

$M_f = 2.46$

Pour le sable de Boussaâda: $M_f = 2.46$; $2 < M_f < 2.5$ \Rightarrow C'est un sable moyen.

3.1.2.1.3. Masse volumique absolue : la norme NFP 18-301:

La masse volumique ρ est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir en compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Cet essai a pour but de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsqu'on a établi une composition du béton.

Tableau 3.2. Masse volumique absolue du sable de Boussaâda.

N° d'essai	Masse utilisée M (g)	Volume utilisée V _e (ml)	V ₂ (ml)	ρ (g/ml)	ρ _{moy} (g/ml)
1	60	120	144	2.5	2.53
2	60	120	144	2.5	
3	60	120	143	2.6	

3.1.2.1.4. Masse volumique apparente: NF P 18-554 :

On utilise la méthode de l'entonnoir : - Cette méthode est plus efficace.

Tableau 3.3. La masse volumique apparente du sable de Boussaâda.

N° d'essai	Volume de récipient (ml)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ _{APP} (g/ml)	γ _{Appm} (g/ml)
1	120	3	173.6	1.42	1.43
2	120	3	175.2	1.43	
3	120	3	175.1	1.43	

3.1.2.1.5. Porosité et Compacité :

C'est le volume des vides entre les grains du sable où le rapport du volume des vides au volume total du sable. On calcul la porosité selon la formule suivante :

$$P = \left[1 - \left(\frac{\gamma_{app}}{\rho} \right) \right] \cdot 100$$

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolue des grains au volume apparent du matériau.

La compacité donnée par la formule :

$$C = \frac{\gamma_{app}}{\rho}$$

Tableau 3.4. la porosité et compacité pour le sable de Boussaâda.

La Porosité%	La compacité%
43.48	57.52

3.1.2.1.6. Equivalent de sable (la norme NF P 18 -598):[85]

Il est défini par la norme NFP 18-598 ; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propriété d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fin qui flocculent.

Tableau 3.5. Les résultats d'équivalent du sable de Boussaâda.

Essai	h ₁	h ₂ (cm)	E.S.V%	E.S.Vmoy	H' ₂ (cm)	E.S.P %	E.S.Pmoy
1	11.4	8.6	75.44	75.29	8.5	71.43	71.18
2	11.5	8.7	75.65		8.5	71.77	
3	11.5	8.6	74.78		8.7	70.16	

Donc :

$75 < E.S.V < 85$
 $70 < E.S.P < 80$

} Sable propre à faible pourcentage de farine argileuses convient parfaitement
 pour des bétons de hautes qualité.

3.1.2.2. Sable du laitier cristallin :

3.1.2.2.1. Composition chimique :

La composition chimique du laitier cristallin recueillie auprès du laboratoire de Génie Sider d'El Hadjar sont résumés dans le tableau: 3.6.

Tableau 3.6.La composition chimique du laitier cristallin d'EL HADJAR[86].

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	Mn ₂ O ₃	SO ₃	P.A.F
%	34.99	9.79	45.78	0.34	0.86	0.67	3.92	0.29	2.47	0.38	0.50

**Figure 3.2:**laitier cristallin, (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) université de Msila.**3.1.2.2.2. Analyse granulométrique du laitier cristallin :****Tableau 3.7.**Analyse granulométrique du laitier cristallin.

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	86.1	86.1	4.305	95.695
1.25	450.5	536.6	26.83	79.17
0.63	971.5	1508.1	75.405	24.595
0.315	357.1	1865.2	93.26	6.74
0.16	95.5	1960.7	98.035	1.965
0.08	4.6	1965.3	99.265	1.735
Fond	30.2	1995.5	99.775	0.225

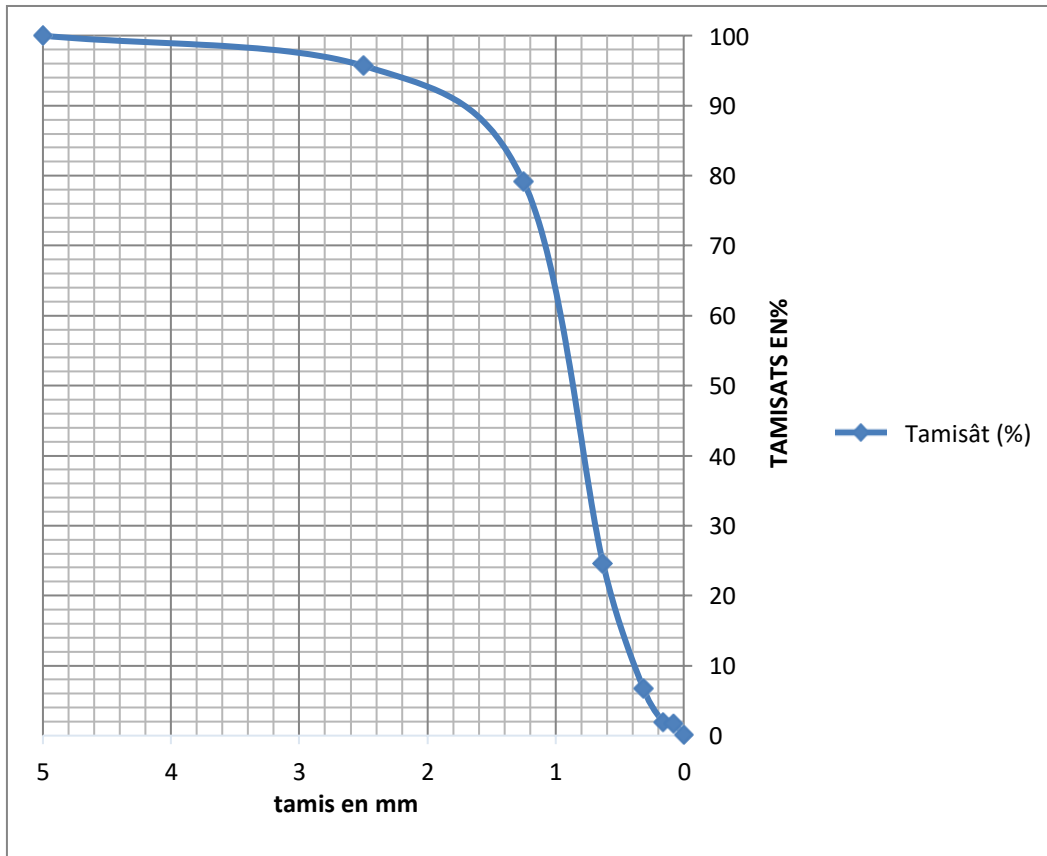


Figure 3.3: La courbe granulométrique du laitier-cristallin.

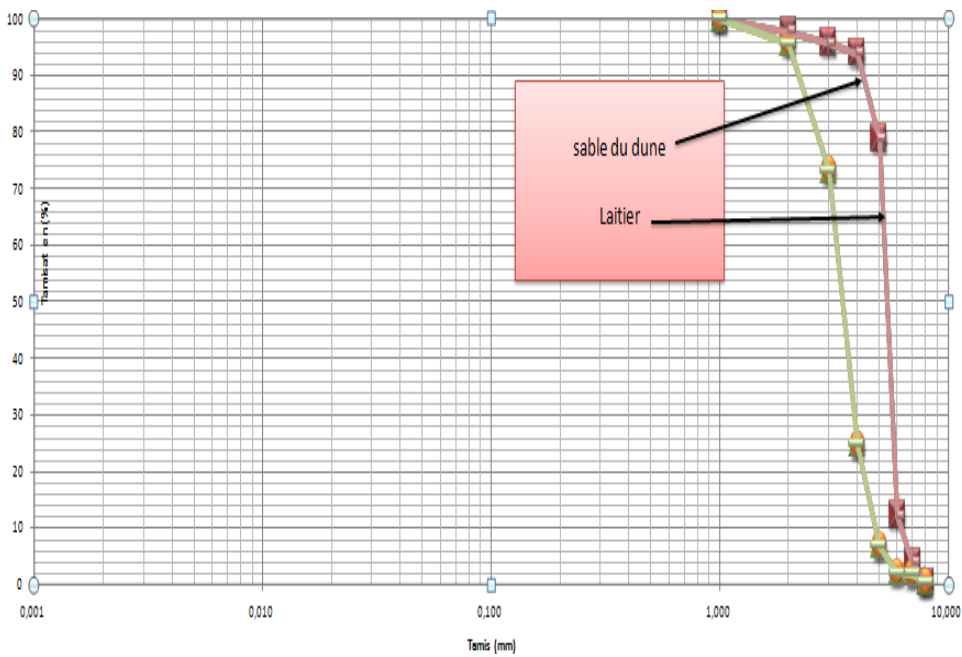


Figure 3.4: La courbe granulométrique du laitier et du sable.

3.1.2.2.3. Masse volumique du laitier cristallin :

Tableau 3.8.Masse volumique absolue du laitier cristallin.

N ^o	Volume utilisé V ₁ (ml)	Masse utilisée M (g)	V ₂ (ml)	ρ (g/ml)	ρ _{moy} (g/ml)
1	80	20	90	2	1.88
2	80	20	91	1.82	
3	80	20	91	1.82	

Tableau 3.9:.Masse volumique apparente de laitier cristallin.

N ^o d'essai	Volume de récipient (ml)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ _{APP} (g/ml)	γ _{APm} (g/ml)
1	120	3	144.2	1.18	1.18
2	120	3	143.3	1.17	
3	120	3	145.1	1.18	

3.1.2.2.4. La porosité et compacité du laitier cristallin:

Tableau 3.10.La porosité et compacité pour le sable de laitier cristallin.

La Porosité%	La compacité%
37.23	62.77

3.1.2.3. Les mélanges (sable de dune + laitier cristallin):

3.1.2.3.1. Analyse granulométrique du mélanges :

Tableau 3.11. Analyse granulométrique du mélanges:

Tam is (mm)	Tamisât(%) 90(%)S _a 10(%)L _c	Tamisât(%) 80(%)S _a 20(%)L _c	Tamisât(%) 70(%)S _a 30(%)L _c	Tamisât(%) 60(%)S _a 40(%)L _c	Tamisât(%) 50(%)S _a 50(%)L _c	Tamisât(%) 40(%)S _a 60(%)L _c	Tamisât(%) 30(%)S _a 70(%)L _c	Tamisât(%) 20(%)S _a 80(%)L _c	Tamisât(%) 10(%)S _a 90(%)L _c
5	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2.5	96.91	96.78	96.64	96.51	96.37	96.24	96.1	95.97	95.83
1.25	92.32	90.11	87.99	85.87	83.76	81.64	79.52	77.405	75.29
0.63	83.82	77.24	70.66	64.08	57.5	50.92	44.34	37.76	31.18
0.315	57.203	51.60	45.99	40.38	34.78	29.17	23.56	17.95	12.35
0.16	8.39	7.76	6.96	8.82	5.53	4.82	4.11	3.39	2.68
0.08	0.77	0.875	1.21	1.09	1.2	1.305	1.41	1.52	1.63
fond	0.246	0.245	0.24	0.24	0.237	0.23	0.23	0.23	0.23

N.B : S_a:sable de dune Boussaâda ; L_G : laitier cristalline(granuler).

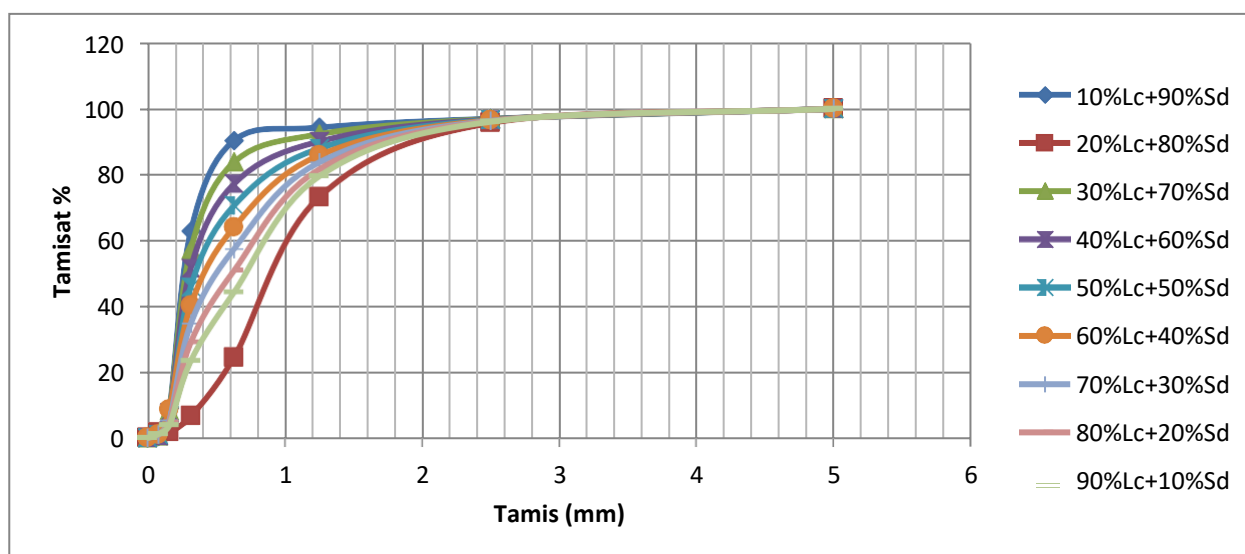


Figure 3.5: Les courbes granulométrique du mélanges.

3.1.2.3.2. Masse volumique du mélanges:

Tableau 3.12.Masse volumique absolue du mélanges:

Mélanges %	N° d'essai	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	M(g)	ρ (g/ml)	P _{moy} (g/ml)
90Sd +10Lc	1	120	144	60	2.5	2.57
90Sd +10Lc	2	120	143	60	2.6	
90Sd +10Lc	3	120	143	60	2.6	
80Sd +20Lc	1	120	145	60	2.4	2.40
80Sd +20Lc	2	120	146	60	2.31	
80Sd +20Lc	3	120	144	60	2.5	
70Sd +30Lc	1	120	146	60	2.31	2.40
70Sd +30Lc	2	120	145	60	2.4	
70Sd +30Lc	3	120	144	60	2.5	
60Sd +40Lc	1	120	146	60	2.31	2.31
60Sd +40Lc	2	120	146	60	2.31	
60Sd +40Lc	3	120	146	60	2.31	
50Sd +50Lc	1	120	145	60	2.4	2.28
50Sd +50Lc	2	120	146	60	2.31	
50Sd +50Lc	3	120	148	60	2.14	
40Sd +60Lc	1	120	148	60	2.14	2.35
40Sd +60Lc	2	120	144	60	2.5	
40Sd +60Lc	3	120	145	60	2.4	
30Sd +70Lc	1	120	147	60	2.22	2.28
30Sd +70Lc	2	120	146	60	2.31	
30Sd +70Lc	3	120	146	60	2.31	
20Sd +80Lc	1	120	147	60	2.22	2.22
20Sd +80Lc	2	120	147	60	2.22	
20Sd +80Lc	3	120	147	60	2.22	
10Sd +90Lc	1	120	148	60	2.14	2.25
10Sd +90Lc	2	120	146	60	2.31	
10Sd +90Lc	3	120	146	60	2.31	

Tableau 3.13.Masse volumique apparente du mélanges:

Mélanges%	N° d'essai	V(ml)	M2(g)	M1(g)	ρ (g/ml)	ρ _{moy} (g/ml)
90Sd +10Lc	1	120	3	178.8	1.42	1.46
90Sd +10Lc	2	120	3	178.3	1.46	
90Sd +10Lc	3	120	3	182.5	1.49	

80Sd +20Lc	1	120	3	177	1.45	1.44
80Sd +20Lc	2	120	3	177.4	1.45	
80Sd +20Lc	3	120	3	174.8	1.43	
70Sd +30Lc	1	120	3	177	1.45	1.44
70Sd +30Lc	2	120	3	174.8	1.43	
70Sd +30Lc	3	120	3	177.4	1.45	
60Sd +40Lc	1	120	3	172.1	1.41	1.41
60Sd +40Lc	2	120	3	175.2	1.44	
60Sd +40Lc	3	120	3	169.6	1.39	
50Sd +50Lc	1	120	3	167.3	1.37	1.36
50Sd +50Lc	2	120	3	165.9	1.36	
50Sd +50Lc	3	120	3	166.2	1.36	
40Sd +60Lc	1	120	3	165.1	1.35	1.35
40Sd +60Lc	2	120	3	164.4	1.36	
40Sd +60Lc	3	120	3	165.3	1.35	
30Sd +70Lc	1	120	3	152.9	1.25	1.28
30Sd +70Lc	2	120	3	158.6	1.30	
30Sd +70Lc	3	120	3	158.7	1.35	
20Sd +80Lc	1	120	3	153.2	1.25	1.24
20Sd +80Lc	2	120	3	153.8	1.25	
20Sd +80Lc	3	120	3	151	1.23	
10Sd +90Lc	1	120	3	150.6	1.23	1.23
10Sd +90Lc	2	120	3	151.4	1.24	
10Sd +90Lc	3	120	3	149.3	1.22	

Tableau 3.14.La porosité et compacité pour le sable de mélanges:

Mélanges %	Porosité %	Compacité %
90Sd +10Lc	43.19	56.81
80Sd +20Lc	40	60
70Sd +30Lc	40	60
60Sd +40Lc	38.96	61.04
50Sd +50Lc	40.36	59.64
40Sd +60Lc	42.98	57.02
30Sd +70Lc	43.86	56.14
20Sd +80Lc	44.14	55.86
10Sd +90Lc	45.33	54.67

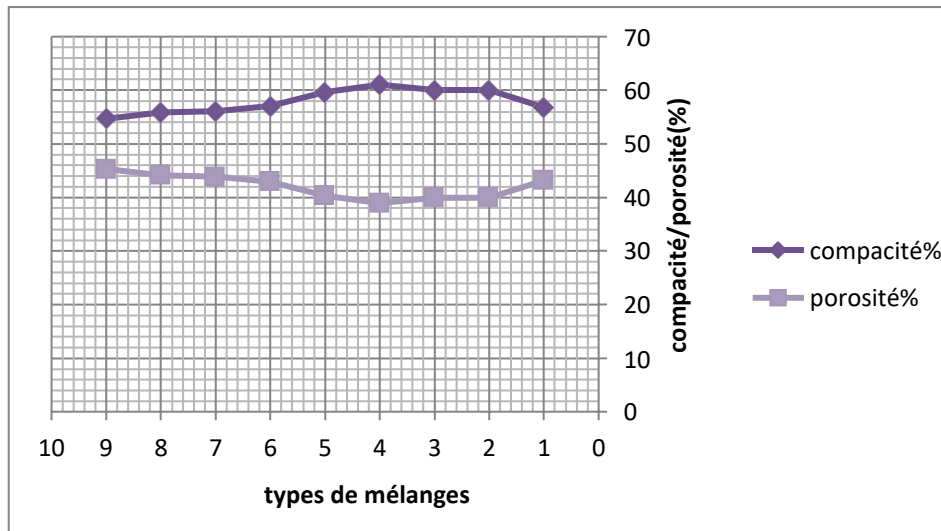


Figure 3.6: la compacité et porosité de mélanges.

Commentaire : on remarque que le mélange (N°:04: 60Sd+40Lc) est le plus compact avec une porosité minimale donc: dans notre travail on utilise le mélange (60Sd+40Lc).

3.1.2.4. Caractéristiques de ciment utilisé :

3.1.2.4.1. Caractéristiques chimique de ciment CRS:

Tableau 3.15. caractéristiques chimiques de ciment CRS:

Analyses chimiques Par XRF	CRS
SiO ₂	21.92
Al ₂ O ₃	4.09
Fe ₂ O ₃	4.78
CaO	62.72
MgO	1.58
SO ₃	2.30
K ₂ O	0.54
Na ₂ O	0.00
Cl	0.016
Paf	2.56
Résidus insoluble	0.60

Tableau 3.16. Caractéristiques minéralogiques de ciment CRS:

Analyses Minéralogiques	CRS
Alite_Sum	50.82
Belite_beta	0.81
Alum_cubic	0.85
Ferrite	0.08
Lime	3.93
Portlandite	0.15
FCaO_XRD	0.13

Analyses Minéralogiques	CRS
Periclase	0.08
Quartz	0.5 0
Arcanite	0.03
Langbeinite	0.22
Aphthitalite	1.02
Hémi-hydrate	0.04
Anhydrite	0.45
Calcite	0.38
Dolomite	0.93



3.7:ciment utilisé(CRS)

(Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila).

➤ Caractéristiques physiques du ciment utilisé :



Figure 3.8 : essais de surface spécifique (CRS)
(Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila).

Tableau 3.17.Caractéristiques physiques du ciment utilisé(CRS):

Caractéristiques	CRS
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.01
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.9
Surface spécifique (g/cm ²)	3674

3.1.2.5. Le laitier de haut fourneau(laitier granulé):

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.

3.1.2.5.1. Composition chimique:

Le tableau : 3.18 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.

Tableau 3.18.composition chimique du laitier de haut fourneau:

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Laitier	36.03	11.35	0.76	41.97	7.32	1.89	0.45	0.16

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 silico-aluminates de chaux (merwinite et méllilite) [Alexandre et al, 1998].

3.1.2.5.2. Caractéristiques du laitier de haut fourneau:

Le laitier de haut fourneau vitrifié moulu, qui est utilisé dans notre étude est principalement valorisé comme addition pour liants hydrauliques ou dans la fabrication de bétons, mortiers ou coulis. Le laitier de haut fourneau granulé est également utilisé dans la production de ciment courant de type CEM III (jusqu'à 95% de laitier de haut fourneau). La vitrification des laitiers leur confère des propriétés hydrauliques. Pour être réactif, le laitier doit être vitreux.

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. 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.

✓ **Caractéristiques physiques du laitier granulé:**



Figure 3.9 : essais de surface spécifique du laitier granulé (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila).

Tableau 3.19.Caractéristiques physiques du laitier granulé:

Caractéristiques	laitier granulé
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.92
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.95
Surface spécifique (g/cm ²)	3500



Figure 3.10:Echantillon de laitier-Granule. (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) université de Msila

3.1.2.5.3. Réactivité hydraulique du laitier:

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. Le laitier vitrifié est ainsi un matériau hydraulique latent.

3.1.2.5.4. Facteurs influant sur l'activité d'un laitier de haut fourneau et sur son hydratation:

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 [Divet et al, 2006].

* 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 CaO/SiO_2 doit être proche de 1,3 [Divet et al, 2006].

* D'un point de vue granulométrique, plus le laitier est fin, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées.

* a 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 dissipé.

* L'hydraulicité du laitier dépend donc de sa teneur en verre ainsi que de sa structure.

*La concentration en ions alcalins dans le milieu et la température durant les premières phases du processus d'hydratation [Van Rompaey, 2006].

3.1.2.5.5. L'Activant:

L'activant utilisé est le l'hydroxyde de sodium (Na OH) dissout dans de l'eau de concentration 1.5g/l, incorporé dans le mélange lors du malaxage.

3.1.2.6. L'eau de gâchage :

L'eau remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment, et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Il convient de noter que les exigences relatives à l'eau de gâchage diffèrent beaucoup pour les mortiers et le béton. Dans le cas de béton un faible rapport eau-ciment est préférable. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

Pour la confection des différents mortiers, nous avons utilisé l'eau distribuée par le réseau du service public de la ville de M'Sila (Algérie). Les résultats de l'analyse chimique de cette eau ont été réalisés au laboratoire de L'Algérienne des eaux et sont présentés dans le tableau 3.20. Ils répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et NF EN 1008 (IDC P 18-211), (2003).

Tableau 3.20. Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage. (laboratoire de chimie Msila)

Elément	TC ^o	PH	NO ⁻³	Cl ⁻	SO ⁻⁴	Ca ⁺²
Teneur (mg/l)	21.00	7.57	15.00	220.1	272.4	176.00

3.1.2.7. Les adjuvants:



Figure3.11 : MEDAPLAST SP 40, est un super plastifiant à base de de polymères- (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) .

L’adjuvant utilisé MEDAPLAST SP 40, est un super plastifiant à base de de polymères combinés, fourni par l’entreprise GRANITEX (Alger - Algérie). Il est recommandé dans la réalisation des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il diminue considérablement la teneur en eau du béton [87].

L’adjuvant MEDAPLAST SP 40 permet d’augmenter les résistances mécaniques à long terme. Il est applicable à tout type de ciment conforme à la norme EN 934-2 NA 774. La plage d’utilisation recommandée entre 0.6% à 2.5% du poids de ciment [87].

Caractéristiques physiques et chimiques de l’adjuvant « MEDAPLAST SP 40 » [87]:

- ❖ Aspect**Liquide**
- ❖ Couleur **Marron**
- ❖ PH..... **8.2**
- ❖ Densité**1.20+0.01**
- ❖ Teneur en eau..... **<1g/l**
- ❖ Extrait sec **40%**

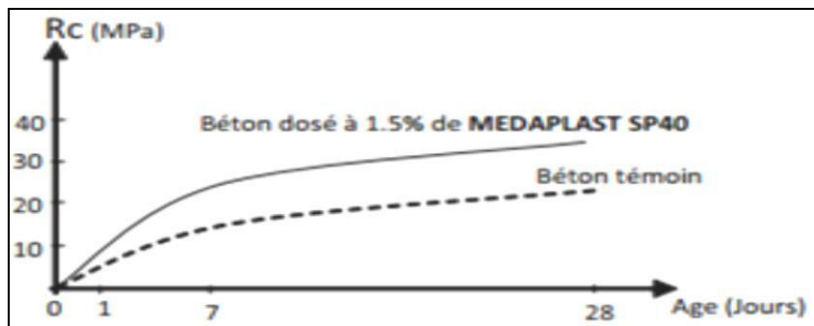


Figure 3.12:Evolution de la résistance en compression [87].

3.1.2.8. Définition et formulation du mortier normal(EN 196-1):

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350 g (\pm 5g).

La composition du mortier à tester est la suivante :

- sable = 1350 g (\pm 5 g).
- ciment = 450 g.
- Eau de gâchage = 225 ml.

3.2. Formulation de notre travail;**A- Le liant est le ciment CRS:**

Tableau 3.21.Composition des différents mortiers et pâtes:

Pourcentage %	C (g)	S (g)	E (g)	LC (g)	Adj (%)	A _f (cm)	E/C
100% sable 00% laitier	450	1350	225	0	1.2	4	0.5
100% laitier 00% sable	450	0	315	1350	1.2	4	0.7
40% laitier 60% sable	450	810	270	540	1.2	4	0.6
Pâte 100% CRS	450	0	130.5	0	1.2	3	0.29

3.2.1. Préparation des éprouvettes [89]:

La préparation des éprouvettes doit suivre le mode opératoire suivant :



Figure 3.13 : Moule des Eprouvettes 4x4x16.
(Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) .

- Le moule et sa hausse fermement fixés à la table de choc.
- Remplir avec précaution à l'aide d'une cuillère convenable, le moule à moitié et dans chaque compartiment de celui-ci. voire figure 3.14.

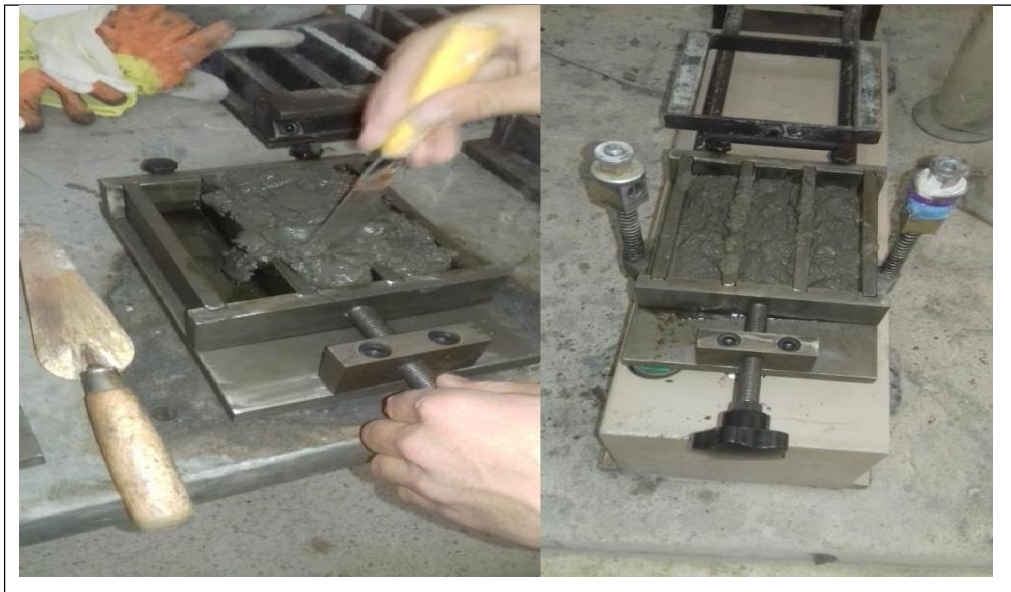


Figure 3.14:Table à choc (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila).

- Etaler la couche uniformément en utilisant une spatule adéquate ; la tenir verticalement et avec des mouvements de vas et viens.
- Démarrer ensuite l'appareil de choc pour 15 coups.
- Introduire la seconde couche, niveler avec la spatule et démarrer l'appareil pour 15 autres coups.
- Retirer avec précaution le moule de la table, puis enlever immédiatement l'excès de mortier avec une règle métallique plate.
- Lisser la surface des épreuves en tenant la règle presque à plat.

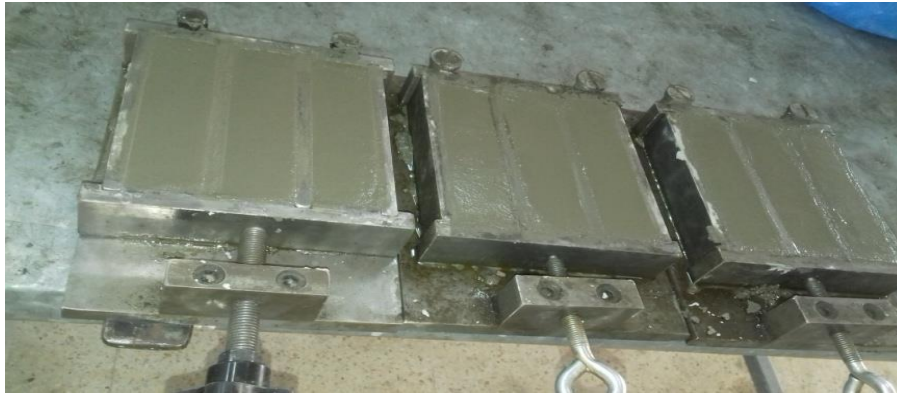


Figure 3.15: Lisser la surface des éprouvettes en tenant la règle presque à plat (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) .

- Etiqueter les moules pour identification.
- Conserver les moules dans la chambre d'humidité jusqu'au démoulage;



Figure 3.16 : appareille pour mesuré la (température et humidité).
(Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) université de Msila

- Après 24 heures de cure, faire sortir les moules et procéder au démoulage des éprouvettes.



Figure 3.17: Démoulage des éprouvettes. (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila).

- Immerger sans tarder, les éprouvettes dans un bain d'eau de température $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

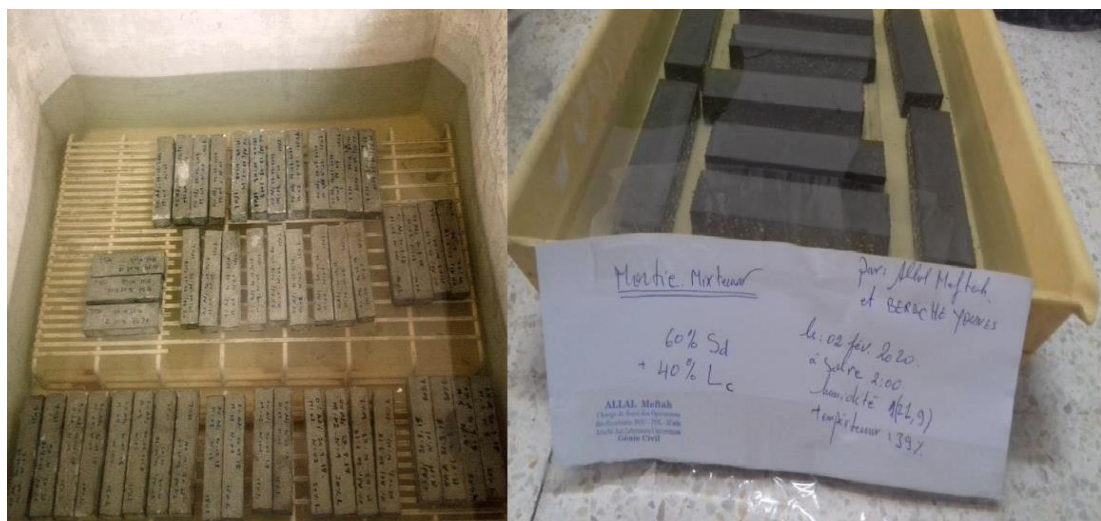


Figure 3.18: Conservation des éprouvettes dans l'eau. (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila).

B – Le liant est le laitier granulé :**Tableau 3.22.** Composition des différents mortiers et pâtes:

Pourcentage %	Laitier Granule (g)	Sable (g)	Laitier Cristallin (g)	SS (g)	HS (g)	Etalement (cm)	Adj (%)
100% sable 00% laitier C	301.65	603.45	0	193.05	48.36	18.5 – 18	1.2
100% laitier C 00% sable	301.65	0	603.45	193.05	48.36	-	1.2
40% laitier C 60% sable	301.65	362.07	241.38	241.31	96.72	21.5-18.5	1.2

3.3. Les essais physico-mécanique:

La résistance mécanique du mortier après durcissement dépend du rapport eau/ciment. Cette résistance mécanique est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression et flexion. Il s'agit de briser trois éprouvettes de mortier à chaque échéance **7** et **28** jours et à l'aide d'une presse hydraulique, pour en déduire des résistances à la flexion et à la compression [90].

3.3.1. Mesure des résistances mécaniques :**a) Résistance à la flexion:**

La mesure de la résistance à la flexion a été effectuée à l'aide d'un appareil «**PILOT/CONTROLS**» pour vu d'un dispositif de flexion trois points (Figure 3.19).

Les essais de flexion sont réalisés sur l'appareil de flexion en plaçant l'éprouvette symétrique et centrée sur le plateau de la presse hydraulique puis une charge continue est appliquée sur l'éprouvette jusqu'à la rupture. La charge P en KN et la résistance à la flexion Rf en MP sont affichées sur l'écran de l'appareil où l'on effectue la lecture [90]. Les essais sont effectués conformément à la Norme NF EN 196-1.



Figure 3.19: Dispositif pour l'essai de la résistance traction par flexion .
(Laboratoire du développement et recherche des Géo matériaux – université de Msila)

b) Résistance à la compression:

La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les six demi prismes issues de la flexion. Le demi prisme est centré entre les deux plateaux de l'appareil **PILOT/CONTROLS**(Figure 3.20) et un chargement est effectué à une vitesse constante de 0.5KN/ jusqu'à la rupture.

On effectue la lecture de la charge d'écrasement P en KN et la résistance à la compression R_c en MPa sur l'écran de l'appareil [90]. Les essais sont effectués conformément à la Norme NF EN 196-1.



Figure 3.20: Dispositif pour l'essai des résistances à la compression,

(Laboratoire du développement et recherche des Géo matériaux – université de Msila).

3.4. Essai de durabilité:

3.4.1. Lieu des essais :

Laboratoire de génie civil Matériaux, université de M'sila.

3.4.2. Préparation des échantillons:

Les éprouvettes ont été confectionnées et conservées selon la norme ASTM C 267 – 97 (Standard Test Methods for Chemical Résistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes1).

3.4.3. Attaque des mortiers par les acides :

3.4.3.1. Procédure de l'essai :

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes prismatiques de mortier 40 x 40 x 160 mm³ ont été confectionnées selon la Norme ENV196-1. Démoulées à 24 heures, les éprouvettes ont été conservées dans une chambre humide 20°+/-2°C, humidité = 90% jusqu'à 28 jours. Après 28 jours, les éprouvettes sont pesées pour déterminer leurs masses avant l'attaque chimique puis elles sont immergées dans les différentes solutions suivantes.

*5% d'acide chlorhydrique (HCl);



Figure 3.21: Acide chlorhydrique (HCl); (Laboratoire du développement et recherche des Géo matériaux – université de Msila).

* l'eau potable .

La résistance due aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans ces solutions acides est évaluée selon la Norme ASTM C 267-97.



Figure 3.22 : agressions chimiques des éprouvettes immergées dans ces solutions acides.
(Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) .

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis laissées sécher pendant 30mn. Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de précision de 0.01g (Figure 3.26). Cette opération est effectuée à 7et 28 jours après l'immersion dans la solution. Les solutions d'attaque sont contrôlées par un pH-mètre pour vérifier si le pH est constant et égale à un. Le degré de l'attaque est évalué par la formule de perte de masse suivante:

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1-M2)/M1] \times 100$$

Avec:

M1 : masse des éprouvettes avant immersion.

M2 : masse des éprouvettes après immersion.



Figure 3.23 : « Balance » de précision 0.1 g
(Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) université de Msila

3.4.4. Porosité accessible à l'eau :

Cet indicateur est un paramètre global ayant un impact sur la qualité du matériau vis-à-vis de la plupart des désordres du béton et sur sa résistance mécanique (La diminution de la porosité implique une

diminution du rapport E/C). Néanmoins ce rapport n'est pas toujours discriminant sur les réactions internes au béton notamment.

Le principe consiste en la mesure des vides connectés avec la surface à l'intérieur de la masse du béton :

3.4.4.1.Méthode de détermination :

Pesée hydrostatique proposé par l'AFPC-AFREM et la norme NF P 18-459 .

$$P_{eau} = [(M_{air} - M_{sec}) / (M_{air} - M_{eau})] * 100$$

Avec:

M_{eau} : la pesée hydrostatique, le poids du béton saturé sous l'eau

M_{air} : le poids du béton saturé dans l'air

M_{sec} : le poids du béton sec dans l'air .



Figure 3.24:Dispositif de la Pesée hydrostatique ,Saturation en eau sous- eau pendant mesuré la masse dans récipient l'eau . (Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila).

3.4.5. MESURE DE L'ABSORPTION CAPILLAIRE:

Détermination Du Coefficient D'absorption D'eau Par Capillarite Du Mortier Durci:

✓ PRINCIPE :

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est mesuré sur des éprouvettes de mortier prismatiques, dans les conditions prescrites, à pression atmosphérique. Après séchage jusqu'à masse constante, la face clivée de l'éprouvette est immergée dans 5 à 10 mm d'eau pendant une durée spécifique.

On détermine alors l'augmentation de la masse.

✓ ECHANTILLONS:

Quatre éprouvettes prismatiques avec des dimensions 160 mm x 40 mm x 40 mm .

✓ **PRÉPARATION ET CONDITIONNEMENT DES ÉPROUVETTES:**

Les éprouvettes sont confectionnées conformément à la EN 1015-11 dans un moule préalablement muni en face inférieure d'un papier filtre absorbant bien défini. De même, une autre feuille de papier absorbant est placée sur les prismes après arasement du mortier frais. La cure dépend du type de mortier comme indiqué dans EN 1015-11. A la fin de la période de durcissement, le produit d'étanchéité est appliqué sur les quatre surfaces longues et les éprouvettes sont cassées en deux (prismes de 4x4x8 cm³). Les éprouvettes sont séchées à 60 ± 5°C jusqu'à masse constante (≤ 0.2% à 24h d'intervalle). La masse sèche, M0, de chaque éprouvette est mesurée, Figure 3.25:



Figure 3.25 :Essais d'absorption capillaire pour éprouvettes de mortier et Pâte.
(Laboratoire des Géo matériaux – université de Msila) .

✓ **MODE OPERATOIRE:**

Les éprouvettes sont placées sur des supports adéquats dans un bac à eau muni d'un couvercle anti évaporation et d'un système d'alimentations automatique en eau afin de respecter un niveau d'immersion partiel de 5 à 10 mm .

✓ **EXPRESSION DES RÉSULTATS:**

Le coefficient de sportivité est défini par la relation suivante : $S = (Q / A) / t$

Avec :

S : le coefficient de sportivité en (mm/h^{0,5}) ;

Q : le volume de l'eau absorbée en mm³ ;

A: la surface en contact avec l'eau en mm² ;

t : le temps écoulé en heure ;

La mesure de la sportivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux.

3.5. Conclusion :

Durant toutes les étapes de réalisation de ce travail, le respect du plan du mémoire et des normes en vigueur des différents essais effectués, ont donné une manière à cette partie pratique pour mieux organiser ce travail, néanmoins plusieurs paramètres susceptible d'influencer l'étude sur les propriétés du mortier dans un laboratoire, car cela nécessite du temps, des moyens de grandes précision on comparaison du matériau mortier.

La compréhension de ce sujet conduit à une division en deux volets distincts dans cette étude, dans un premier part les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés pour la formulation des types du mortier élaboré.

CHAPITRE 4

Annexe

QUATRIEMME CHAPITRE

ANNEXE

4.1. Introduction :

Dans le cadre de ce travail de mémoire, les mortiers qui ont fait l'objet de notre étude sont :

1. Mortier classique.
2. Mortier à base de laitier cristallin.
3. Mortier à base de laitier cristallin et laitier granulé.
4. Mortier à base de laitier cristallin(40%) et sable de dune(60%).
5. Mortier à base de laitier cristallin(40%) et sable de dune(60%) et laitier granulé .

Dans ce chapitre qui constitue en fait une des parties essentielles du mémoire nous présentons l'ensemble des résultats obtenus par des mesures effectuées sur les divers échantillons élaborés (Masse volumique, Absorption, la porosité, perte de masse et les résistances mécaniques).

4.2. Présentation des résultats:

4.2.1. La Masse volumique:

Tableau 4. 1: La masse volumique du déférent mortier.

Formulation	Conservation à l'eau		Conservation dans l'acide (HCl)	
	La masse volumique (Kg/m ³)		La masse volumique (Kg/m ³)	
	7jours	28jours	7jours	28jours
100% sable 00% laitier	2078.12	/	/	/
100% laitier 00% sable	1984.38	/	/	/
40% laitier 60% sable	2070.31	/	/	/
Pate 100% CRS	2153.65	/	/	/

4.2.2. L'Absorption d'eau:

Tableau 4.2: L' Absorption d'eau du déférent mortier.

Formulation	Conservation à l'eau		Conservation dans l'acide (HCl)	
	L' Absorption d'eau (%)		L' Absorption d'eau (%)	
	7jours	28jours	7jours	28jours
100% sable 00% laitier	0.13	/	/	/
100% laitier 00% sable	0.26	/	/	/
40% laitier 60% sable	0.19	/	/	/
Pate 100% CRS	0.09	/	/	/

4.2.3. la porosité accessible à l'eau:

Tableau 4.3: la porosité accessible à l'eau du déférent mortier.

Formulation	Conservation à l'eau		Conservation dans l'acide (HCl)	
	la porosité accessible à l'eau (%)		la porosité accessible à l'eau (%)	
	7jours	28jours	7jours	28jours
100% sable 00% laitier	9.31	/	/	/
100% laitier 00% sable	17.72	/	/	/
40% laitier 60% sable	11.71	/	/	/
Pate 100% CRS	7.74	/	/	/

4.2.4. Les résistances mécaniques:

Tableau 4.4: Les résistances mécaniques des différents mortiers.

Formulation	Conservation à l'eau				Conservation dans l'acide (HCl)			
	résistances mécaniques							
	7jours		28jours		7jours		28jours	
	Traction (MPa)	Compression (MPa)	Traction (MPa)	Compression (MPa)	Traction (MPa)	Compression (MPa)	Traction (MPa)	Compression (MPa)
100% sable 00% laitier	4.765	30.18	/	/	/	/	/	/
100% laitier 00% sable	4.420	20.30	/	/	/	/	/	/
40% laitier 60% sable	5.035	26.07	/	/	/	/	/	/
Pate 100% CRS	6.595	76.09	/	/	/	/	/	/

4.2.fiche technique de l'adjuvant super plastifiant SP40:

NOTICE TECHNIQUE

2 1 3 6

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1
et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau**DESCRIPTION**

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

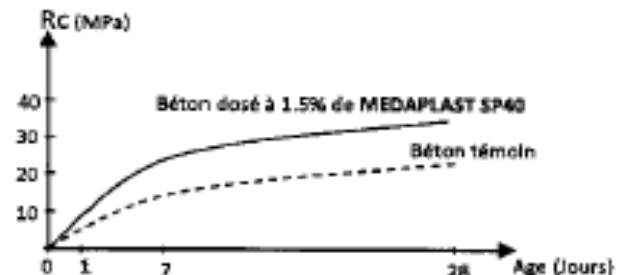
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de conformance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

**Granitex**

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale:

L'utilisation des diverses formes de laitier (granulé) dans les ciments et (granulé et cristallisé) dans les bétons est surtout intéressante dans les régions proches des lieux de production du laitier ou les granulats naturels sont manquant ou de qualité discutable (sable fin). Il ne faut pas perdre de vue également le caractère économique et écologique de l'emploi des granulats artificiels en substitution partielle ou totale aux granulats naturels.

Les principales conclusions tirées de ce travail d'après Les résultats des essais montrent:

- ✓ Le degré de vitrification du laitier d'El HADJAR est satisfaisant, ainsi que sa composition chimique qui s'inscrit dans les limites préconisées par la norme. Cependant les teneurs en CaO et SiO₂ sont proches alors que la plupart des laitiers, la teneur en CaO est généralement supérieure à celle de SiO₂ de l'ordre de 5 à 10 %. On peut noter aussi que la composition chimique du laitier a peu varié entre 1987 et 2000; il est vrai que dans cette période il y a eu peu de modification de procédé d'une part, de l'origine du minerai ,d'autre part le laitier conduit à une légère augmentation du rapport (E/C) par contre le dosage du super plastifiant permet une réduction importante de ce rapport.
- ✓ Le mortier du laitier est un mortier léger mais il se comporte différemment des autres mortiers de sa classe vis-à-vis de l'eau et de l'humidité.
- ✓ L'ajout du super plastifiant permet une réduction importante du degré d'absorption d'eau.
- ✓ L'introduction du super plastifiant change complètement le comportement mécanique de ce mortier en comparaison avec les échantillons non adjudanté que ce soit un mortier au laitier ou sans laitier.
- ✓ Une masse volumique plus élevée et une demande en super plastifiant plus importante.
- ✓ Une amélioration des résistances en compression, traction et flexion à 7 jours.
- ✓ Une amélioration notable de la résistance à l'abrasion.

Enfin, l'étude d'un béton « tout laitier » (remplacement à la fois de la partie fine et grossière des granulats par des scories cristallines et d'une partie du ciment par du laitier granule) pourrait être, en cas de réussite, une fantastique percée dans le développement d'un béton écologique.

Références bibliographiques

- [1] **NOUI Safwan**, " L'influence des granulats artificiels « laitier » sur la résistance mécanique du béton ". Mémoire de master. Département de Génie Civil, université de M'Sila 2017, dirigé par **Dr. MENASRI. A**
- [2] **Fronek, B., Bosela, P. ET Delatte, N.** (2012). Steel slag aggregate used in Portland cement concrete.
- [3] **Cherfa H., Ait Mokhtar K.** « Valorisation des déchets industriels pour la stabilisation des couches de chaussées : cas des laitiers des hauts fourneaux » Séminaire International « Innovation et Valorisation dans le Génie Civil ». Les 5 – 7 février 2009 à Hammamet, Tunisie. Communication pages 79 -89.
- [4] **BHATTACHARYA A.K., ADITYA D., SAMBASIVA M.**, « Estimation of operating blast furnace reactor invisible interior surface using Differential Evolution », Applied Soft Computing, vol. 13, 2013, p. 2767-2789
- [5] **GUEZENNEC A., HUBER J., PATISSON F., SESSIECQ Ph., BIRAT J., ABLITZER D.**, « Dust formation in electric arc furnace: birth of the particles », Powder Technology, vol. 157, 2005, p. 2-11
- [6] **KUBAT C., TASKIN H., ARTIR R., YILMAZ A.**, « Bofy-fuzzy logic control for the basic oxygen furnace (BOF) », Robotics and Autonomous Systems, vol. 49, 2004, p. 193-205
- [7] **Frías Rojas M, Sánchez De Rojas MI, Uría A.** (2002). Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry. *Materias de Construcción*, volume 52 p. 79–83.
- [8] **Khazadi, M. et Behnood, A.** (2009). Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, volume 23, numéro 6, p. 2183-2188.
- [9] **Chunlin, L., Kumpeng, Z. ET Depeng, C.** (2011). Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study. 2011 International Conference on Advances in Engineering.
- [10] **Papayianni, I. et Anastasiou, E.** (2011). Concrete incorporating high calcium fly ash and EAF slag aggregates. *Magazine of Concrete Research*, volume 63, numéro 8, p. 597-604.

Références bibliographique

- [11] **Asi, I. M., Qasrawi, H. Y. et Shalabi, F. I.** (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 34, numéro 8, p. 902- 911.
- [12] **Pellegrino, C., Cavagnis, P., Faleschini, F. et Brunelli, K.** (2012). Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate. *Cement and Concrete Composites*.
- [13] **Tarn, V. W. Y., Gao, X. F., Tarn, C. M. et Chan, C. H.** (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 3, p. 364-9.
- [14] **Abu-Eishah, S. I., El-Dieb, A. S. ET Bedir, M. S.** (2012). Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, volume 34, p. 249-256.
- [15] **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [16] **WANG.P Z., TRETTIN R. and HUBERT V.**, « Influence of structural change of granulated blast furnace slag on the hydraulic reactivity », 11ème Congrès International sur la Chimie du Ciment, Dublin, p 1020 – 1026, 2003.
- [17] **KOMAR A.**, « Matériaux et éléments de construction », 3ème édition Mir, 1978, 380 p.
- [18] **Document technique** du laboratoire de la cimenterie de HADJR SOUD, Décembre 2002.
- [19] **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
- [20] **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
- [21] **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 Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 89 - 94.
- [22] **SMOLCZYK H. G.** , Duisburg, Rheinhausen, « L'influence de la chimie du laitier sur les résistances des ciments de haut fourneau », Zement, Kalk Gips n°6, 1978

Références bibliographique

- [23] **GOURDIN P.**, « Composition minéralogique potentielle des laitiers vitrifiés de haut fourneau », Ciments – bétons – plâtres et chaux. N° 727, 6, 1980, p 363.
- [24] **BEHIM M., CYR M., HABITA M F. et CLASTRES P.** « Hauts-Fourneaux d'El HADJAR (Algérie): Réactivité du laitier granulé »; Revue : "Ciments, Bétons, Plâtres, chaux" N° 860 - Avril - Mai 2003
- [25] **FREARSON J. P. H. and UREN J.M.**, « Investigation of a ground granulated blast furnace slag containing mervinitic crystallatin » to be presented at the 2nd Int. Conf. On the use fly ash, silica fume, slag and natural pozzolan in concrete, Madrid april, 1986, p 21 – 26
- [26] **BARRON J SAUTEREY .R** « le béton hydraulique bullerais des laboratoires des ponts et chaussées paris p 559 ».
- [27] **Roger Dron** . Structure des laitiers et hydratation des ciments de laitier - ciment de laitier granule sans clinker. 7^{ème} congrès international de la chimie, Vol 2. 1981.
- [28] **J. J. Chang, W. Yeih, C. C. Hung.** Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicatebased slag pastes. Cement and Concrete Composites 27 (1) pp. 85-91(2005)
- [29] **M. Daimon**, Mécanisme et cinétique de l'hydratation du ciment au laitier Proceedings of the 7^{ème} International Conference on the Chemistry of Cement, Paris, 1980
- [30] **A. Fernandez-Jimenez, J. G. Palomo, F. Puertas.** Alkali-activated slag mortars. Mechanical strength behavior. Cement and Concrete Research 29 (8) pp. 1313-1321(1999)
- [31] **S. D Wang, K. L. Scrivener, P. L. Pratt.** Factors affecting the strength of alkali-activated slag. Cement and Concrete Research 24 (6) pp. 1033-1043(1994)
- [32] **PREDIS - Groupe de travail n°5** : « Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP », Guide technique régional relatif à la valorisation des laitiers de hauts fourneaux , Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille. p 18-20
- [33] **R. Dron** - Mécanisme de la prise du laitier granule sous activation alcaline - Rapport de recherche n°38 LCPC (1974)
- [34] **N.Y. Mostafa, S.A.S. El-Hemaly, E.I. Al-Wakeel, S.A. El-Karashy, P.W. Brown** - Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag - Cement and Concrete Research 31 (2001) 899-904

Références bibliographique

- [35] **J. Schneider, M.A. Cincotto, H. Panepucci** - ^{29}Si and ^{27}Al high-resolution NMR characterization of calcium silicate hydrate phases in activated blast-furnace slag pastes - *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 993-1001
- [36] **D. Li, Z. Xu, Z. Luo, Z. Pan, L. Cheng** - The activation and hydration of glassy cementitious materials - *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1145-1152
- [37] **A. Melo Neto, M. Alba Cincotto, W. Repette** - Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum - *Cement and Concrete Composites* 32 (2010) 312-318
- [38] **K.H. Yang, A.R. cho, J.K. Song, S.H. Nam** - Hydration products and strength development of calcium hydroxyde-based alkali-activated slag mortars - *Construction and Building Materials* 29 (2012) 410-419
- [39] **F. Jin, A. Abdollahzadeh, A. Al-Tabbaa** - Effect of different MgO on the hydration of MgO-activated granulated ground blastfurnace slag paste - *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto* (2013)
- [40] **A.O. Purdon**, The action of alkalis on blast-furnace slag, *Journal of the Society of Chemical Industry* 59 (1940) 191-202
- [41] **V.D. Glukhovsky** - Soil silicates (Gruntosilicaty) - Editions Budivelnik Kiev URSS (1959)
- [42] **J. Davidovits** - Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process - Brevet US4472199 A
- [43] **C. Shi, P.V. Krivenko, D. Roy** - *Alkali-Activated Cements and Concretes* - Edition Taylor & Francis (2006)
- [44] **H. Xu, J.L. Provis, J.S.J. van Deventer, P. Krivenko** - Characterization of aged slag concretes - *ACI Materials Journal* V. 105 No. 2 March-April 2008
- [45] **I.G. Richardson, A.R. Brough, G.W. Groves, C.M. Dobson** - The characterization of hardened alkaliactivated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase - *Cement and Concrete Research* 24 (1994) 813-829
- [46] **S.D. Wang, X.C. Pu, K.L. Scrivener, P.L. Pratt** - Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems - *Advances in Cement Research* 7 (1995) 93-102
- [47] **A. Fernandez-Jiménez** - Cementos de escorias activadas alcalinamente : influencia de las variables y modelizacion del proceso - Tesis doctoral de la Universidad Autonoma de Madrid (2000)

Références bibliographique

- [48] **F. Puertas, A. Fernandez-Jimenez, M.T. Blanco-Varela** - Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate - *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 139-148
- [49] **A. Gruskovnjak, B. Lothenbach, L. Holzer, R. Figi and F. Winnefeld** - Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement - *Advances in Cement Research* 18 (2006) 119-128
- [50] **I. Lecomte, C. Henrist, M. Liégeois, F. Maseri, A. Rulmont, R. Cloots** - (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement - *Journal of the European Ceramic Society* 26 (2006) 3789-3797
- [51] **C. Shi** - Early hydration and microstructure development of alkali-activated slag cement pastes - *Proceedings of the 10th international congress on the chemistry of cement, Göteborg* (1997)
- [52] **C. Shi, R.L. Day** - A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements - *Cement and Concrete Research* 25 (1995) 1333-1346
- [53] **I.A. Voinovitch, R. Dron** - Action of different activators on the hydration of slag - *J. Silicates Industriels* 41 (1976) 209-212
- [54] **A. Gruskovnjak, B. Lothenbach, F. Winnefeld, R. Figi, S.-C. Ko, M. Adler, U. Mäder** - Hydration mechanisms of super sulphated slag cement - *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 983-992
- [55] **A.M. Rashad, Y. Bai, P.A.M. Basheer, N.B. Milestone, N.C. Collier** - Hydration and properties of sodium sulfate activated slag - *Cement and Concrete Composite* 37 (2013) 20-29
- [56] **B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton** - Supplementary cementitious materials - *Cement and Concrete research* 41 (2011) 1244-1256
- [57] **E. Marciano, A.F. Battagin** - The influence of alkali activator on the early hydration and performance of Portland blast furnace slag cement - *Proceedings of the 10th international congress on the chemistry of cement, Göteborg* (1997)
- [58] **G. Van Rompaey** - Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré - Thèse de doctorat de l'Université Libre de Bruxelles (2006)

Références bibliographique

- [59] **F. Begarin** - Etude de paramètres endogènes et exogènes au ciment Portland ordinaire influençant l'hydratation de sa phase principale : le silicate tricalcique - Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne (2012)
- [60] **M. Zajac, S. K. Bremseth, M. Whitehead, M. Ben Haha** - Effect of $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ on hydrate assemblages and mechanical properties of hydrated cement pastes at 40 °C and 60 °C - *Cement and Concrete Research* 65 (2014) 21-29
- [61] **S.J. Barnett, M.N. Soutsos, S.G. Millard, J.H. Bungey** - Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies - *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 434-440
- [62] **J.I. Escalante-Garcia, J.H. Sharp** - The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures - *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 695-702
- [63] **F. Sajedi, H. Abdul Razak** - Comparison of different methods for activation of ordinary Portland cement slag mortars - *Construction and Building Materials* 25 (2011) 30-38
- [64] **J. Camiletti, A.M. Soliman, M.L. Nehdi** - Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete - *Materials and Structures* 46 (2012) 881-898
- [65] **P. Mounanga, M.I.A. Khokhar, R. El Hachem, A. Loukili** - Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler - *Materials and Structures* 44 (2011) 437-453
- [66] **M. Michel** - Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux - Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2009)
- [67] **A.R. Brough, A. Atkinson** – Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I. Strength, hydration and microstructure - *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 865-879
- [68] **Mehta PK (1999)** Concrete technology for sustainable development – an overview of essential properties. Dans *Concrete for Sustainable Development in the Twenty-first Century*. Routledge, London, p. 83–94.
- [69] **Erdogan TY. (2002)** Materials of construction. *Metu Press*, Ankara.
- [70] **Baradan B. (2002)** Durability of reinforced concrete structures. Dokuz Eylul University Engineering Faculty Press, Izmir (Turquie).

Références bibliographique

- [71] **Richardson MG. (2002).** Fundamentals of durable reinforced concrete. London
- [72] **Saffarzadeh A., Shimaoka T., Motomura Y., Watanabe K. (2006)** Chemical and mineralogical evaluation of slag products derived from the pyrolysis/melting treatment of MSW, *Waste Management*, volume 26,p. 1443–1452.
- [73] **Yüksel, I., Bilir, T. et Özkan, O. (2007).** Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. *Building and Environment*, volume 42, numéro 7, p. 2651-2659.
- [74] **Števíla, L., Madej, J., Kozánková, J. et Madejová, J. (1994).** Hydration products at the blast furnace slag aggregate - cement paste interface. *Cement and Concrete Research*, volume 24, numéro 3, p. 413-423.
- [75] **Takahashi, F., Shimaoka, T., Gardner, K. et Kida, A. (2011).** Size-dependent enrichment of waste slag aggregate fragments abraded from asphalt concrete. *Journal of hazardous materials*, volume 194, p. 209-215.
- [76] **Pellegrino C, Gaddo V. (2009).** Mechanical and durability characteristics of concrete; containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*; p. 663–671.
- [77] **Wang, G. (2010).** Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate. *Construction and Building Materials*, volume 24, numéro 10, p. 1961-1966.
- [78] **Netinger, I., Bjegović, D. et Mladenović, A. (2010).** Fire resistance of steel slag aggregates concrete. *High Temperature Materials and Processes*, volume 29, numéro 1-2, p. 77 87.
- [79] **Netinger, I., Jelčić Rukavina, M., Bjegović, D. et Mladenović, A. (2012).** Concrete containing steel slag aggregate: Performance after high temperature exposure. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*. p. 1347-1352.
- [80] **Bazant Z.P et Kaplan M.F. (1996)** Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical models, 1ère edition, Pearson Education.
- [81] **Laplante P, Aitcin PC, Vezina D. (1991)** Abrasion resistance of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. p. 19–30.
- [82] **Sadeghzadeh M, Page CL, Kettle RJ. (1987)** Surface microstructure and abrasion resistance of concrete. *Cement and Concrete Research*, p. 581–90.

Références bibliographique

- [83] **Nishigaki M. (2000)** Producing permeable blocks and pavement bricks from molten slag, *Waste Management*, volume 20 p. 185–192.
- [84] **MOUSSAOULAMEL**, " Valorisation du laitier granule et cristallise comme granulats dans la réalisation des bétons ".Mémoire de fin d'étude cycle ingénieur. Département de génie civil, université de M'Sila 2005, dirigé par **Mme. ZEGHICHI**.
- [85] **NF P 18 – 598** « Granulats : Equivalent de sable » AFNOR – Paris – 1997.
- [86] **H. Cherfa1 & K. Ait Mokhtar1**, " Utilisation de granulats de laitier cristallisé comme matériau de construction en technique routière». Université des Sciences et de technologie Houari Boumediene. Alger. 2010.
- [87] **TEBBAL Nadia**. "Effet de la nature des granulats sur les propriétés physicomécaniques et durabilité d ' un béton à haute performance». Thèse de doctorat. Département de génie civil, université de M'Sila le 26/04/2017, dirigé par **Pr: RAHMOUNI Zine-El-Abidine**.
- [88] <https://www.granitex.dz> > cariboost-files / MEDAPLAST –20SP – 2040.pdf
- [89] **BENCHEIKH Amel**, " « Contribution à la caractérisation d'un ciment à base du laitier +5 % de calcaire». Mémoire de fin d'étude de Master Académique. Département de Génie Civil, université de M'Sila 2017, dirigé par **Pr : BEDDAR Miloud et MEDDAH Abdelaziz**.
- [90] **Mohamed touhami GOUASMI**, "« Effets d'agrégats légers à base de poly terephthalat d'éthylène sur les propriétés des mortiers » MÉMOIRE DE MAGISTER EN CHIMIE. Département de chimie des polymères, université D'ORAN 2013, dirigé par **Pr : H.TAIBI**.
- [91] **KOMMAR. A.**. « *Matériaux et éléments de constructions* ». Moscou, édition Mir, 1975.