

REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



DOMAINE : GÉNIE CIVIL
FILLIÈRE : GÉNIE CIVIL
OPTION : MATÉRIAUX
DE GÉNIE CIVIL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

PAR : DJAIDJA Samir

THEME :

*VALORISATION DU LAITIER GRANULÉ
ALGÉRIEN DANS LES MATÉRIAUX DE
CONSTRUCTION : RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE*

SOUTENU DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE:

Dr. Meddah Abdelaziz

Président

Dr. SILINE Mohammed

Encadreur

Dr. Chikouche Mohammed Aziz

Examineur

PROMOTION : 2020/2021

إهداء

إذا كان الإهداء يعبر ولو بجزء من الوفاء والشكر والتقدير
فالإهداء إلى.....

الله تعالى أولاً على توفيقه وعونه وامتنانه
إلى.....

معلم البشرية ومنبع العلم نبينا محمد (صلى الله عليه وسلم)
إلى.....

مثل الأبوة الأعلى... والدي العزيز
إلى.....

حبيبة قلبي الأولى... أمي الحنونة
إلى.....

رمز الحنان .. إلى شريكة حياتي... زوجتي الغالية
إلى.....

الحب كل الحب.... أبنائي: سناء- عبد الصمد – عبد الشافي
إلى.....

كافة الأهل والأصدقاء

إلى.....

من مهدوا الطريق أمامي للوصول الى ذروة العلم

أهدي هذا الجهد المتواضع

REMERCIEMENTS

*Tout au long de cette période, j'ai reçu l'aide et l'attention de mon encadreur **Dr. SILINE Mohammed** qui me donne des conseils prodiges à la réalisation de ce travail donc je tiens particulièrement à le remercier infiniment.*

*Merci à tous mes collègues les étudiants du Master 2 Génie Civil-
option Matériaux de génie civil et surtout les ingénieurs avec
beaucoup de gentillesse et une bonne humeur.*

*Je souhaitais encore dire un très grand merci à tous mes
enseignants au département de Génie civil pour ses efforts à nous
former et enseigner.*

*Enfin je voudrai exprimer ma gratitude à tout le personnel de
Notre département.*

Merci à tous.

ملخص

يعود تقييم الخبث في مجال الهندسة المدنية إلى عدة سنوات في الجزائر كما في أي مكان آخر في العالم. غالبًا ما يتم مواجهة استخدام الخبث المتبلور في الأعمال الجيوتقنية أو كمواد مجمعة في الخرسانة ، لتحل محل الرمل والحصى. يستخدم الخبث المزجج ، المعروف باسم الخبث المحبب ، بشكل أساسي كإضافة معدنية للكلنكر (أحيانًا للأسمنت) بعد طحنه إلى درجة نعومة تشبه أو تتجاوز الأسمنت (بنعومة من 3000 إلى 4000 سم² / غ). يستخدم الخبث المحبب أيضًا كمصدر سيليكات الألمنيوم وهي المادة المنشطة والفعالة في تطوير مادة رابطة أخرى عالية الاستجابة ، وهي الجيوبوليمر. تعتمد كفاءة الخبث على عدة عوامل مرتبطة بطبيعة وخصائص هذه المادة ، مثل تركيبها الكيميائي والمعدني ، ودقتها ، وما إلى ذلك.

الهدف من العمل المقدم في هذه الأطروحة هو إجراء بحث بيبلوغرافي عن حبيبات الخبث الجزائري وإنتاجه وخصائصه وكذلك النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها بعد استخدامه في مجال المواد الأسمنتية وأنواعها وخصائصها . حيث أنه غالبًا ما يتطلب التفاعل المتواضع للخبث الجزائري إجراءات معالجة أو تنشيط مناسبة ، وطرق التنشيط هذه من الأنواع التالية: الميكانيكية والكيميائية والحرارية. النتائج الرئيسية التي ذكرها العديد من الباحثين الذين استخدموا الخبث الحبيبي الجزائري في عملهم على الملاط والخرسانة حيث تم عرض تأثيرات استخدام هذه المادة على الخواص وقوة الانضغاط وقوة تحمل المواد الإسمنتية بشكل صريح. تنتهي الأطروحة باستنتاج يعرض فيه جوهر هذا البحث البيبلوغرافي.

Abstract

The valuation of slag in the field of civil engineering dates back several years in Algeria as elsewhere. The use of crystallized slag is often encountered in geotechnical work or as an aggregate in concrete, replacing sand and gravel. Vitrified slag, known as granulated slag, is mainly used as a mineral addition to clinker (sometimes to cement) after its grinding to fineness that resembles or exceeds that of cement (of the order of 3000 to 4000 cm² / g). Granulated slag is also used as an aluminosilicate (precursor) source in the development of another highly responsive binder, namely the geopolymer. The efficiency of the slag depends on several parameters related to nature and characteristics of this material, such as its chemical and mineralogical composition, its fineness, etc.

The objective of the work presented in this thesis is to carry out a bibliographic research on Algerian granulated slag, its production, its properties as well as the main results obtained following its use in the field of cementitious materials, its types, its characteristics, and mainly that of the Algerian milkman. The modest reactivity of Algerian slag often requires appropriate treatment or activation procedures, these activation methods are of the following types: mechanical, chemical and thermal. the main results reported by several researchers who used Algerian granulated slag in their work on mortars and concretes where the effects of the use of this material on the fresh properties, compressive strength and durability of cementitious materials are explicitly presented. The manuscript ends with a conclusion in which the gist of this bibliographic research is presented.

Resumé

La valorisation du laitier dans le domaine du génie civil date de plusieurs années en Algérie comme ailleurs. L'utilisation du laitier cristallisé est souvent rencontrée dans les travaux de géotechnique ou comme granulat dans le béton, en remplacement du sable et du gravier. Le laitier vitrifié, connu sous le nom de laitier granulé, est surtout utilisé comme addition minérale au clinker (parfois au ciment) après son broyage à des finesses qui ressemblent ou dépassent celle du ciment (de l'ordre de 3000 à 4000 cm²/g). Le laitier granulé est utilisé aussi comme source aluminosilicate (précurseur) dans l'élaboration d'un autre liant très répondu à savoir le géopolymère. L'efficacité du laitier est fonction de plusieurs paramètres liés à la nature et les caractéristiques de ce matériau, telles que ses compositions chimique et minéralogique, sa finesse, ...etc.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire, est de faire une recherche bibliographique sur le laitier granulé algérien, son élaboration, ses propriétés ainsi que les principaux résultats obtenu suite à son utilisation dans le domaine des matériaux cimentaires ses types, ses caractéristiques, et principalement celle du laitier algérien. La modeste réactivité du laitier algérien nécessite souvent des procédures appropriées de traitement ou activation, ces méthodes d'activation sont de types : mécanique, chimique et thermique. les principaux résultats rapportés par plusieurs chercheurs qui ont utilisés le laitier granulé algérien dans leurs travaux sur les mortiers et bétons où les effets de l'utilisation de ce matériau sur les propriétés fraîches, la résistance à la compression et la durabilité des matériaux cimentaires sont explicitement présentés. Le manuscrit se termine par une conclusion dans laquelle l'essentiel de cette recherche bibliographique est présenté.

TABLE DES MATIERES

1. اهداء	
2. Remerciements	
3. ملخص	
4. Absruct	
5. Resumé	
6. Table des matieres.....	07
7. Introduction Générale.....	09

I. Le ciment et les additions minérales

Introduction.....	13
I-1- Le ciment.....	13
I-2- Constituants du ciment	15
I-2-1- Le clinker	15
I-2-2- <i>Le sulfate de calcium</i>	16
I-2-3- <i>Les ajouts</i>	16
I-2-3-1- Le laitier des hauts fourneaux	16
I-2-3-2- Les pouzzolanes (P, Q)	16
I-2-3-2-1- Les pouzzolanes naturelles (P)	16
I-2-3-2-2- Les pouzzolanes artificielles (Q)	17
I-2-3-3- Les cendres volantes (V, W)	17
I-2-3-3-1- Les cendres volantes siliceuses (V)	17
I-2-3-3-2- Les cendres volantes calciques (W).....	17
I-2-3-4- Schistes calcinés (T)	17
I-2-3-5- Calcaire	17
I-2-3-6- Fumée de silice (D).....	17
I-3- Caractéristiques du ciment	19
I-3-1- La prise	19
I-3-2- Durcissement	19
I-3-3- Chaleur d'hydratation	19
I-3-4- Finesse de mouture	20
I-3-5- Retrait	20
I-3-6- Gonflement.....	20
I-3-7- Gonflement.....	20
I-4- L'intérêt d'utilisation des additions minérales	20

II. Le laitier granulé de haut fourneau

Introduction.....	23
II-1- Formation du laitier	25
II-2- Production mondiale du laitier	25
II-3- Caractéristiques du laitier des hauts fourneaux	26
II-3-1- Caractéristiques physico-mécaniques	26
II-3-2- Composition chimique	27
II-3-3- Composition minéralogique	28
II-4- Indices caractéristiques du laitier granulé.....	29
II-5- Exigences de la norme NF 15167-1 (2006) pour le laitier granulé	30

II-5-1- Exigences physiques	30
II-5-2- Exigence mécanique	30
II-6- Caractéristiques principales du laitier granulé algérien	30
Conclusion	32
III. Hydratation et activation du laitier granulé	
Introduction.....	34
III-1- Hydratation du laitier granulé de haut fourneau	35
III-2- Activation du laitier granulé de haut fourneau	37
III-2-1- Activation mécanique	37
III-2-2- Activation thermique	40
III-2-3- Activation chimique.....	41
Conclusion.....	43
IV. Les effets d'utilisation du laitier granulé algérien	
Introduction.....	45
IV-1- Effets du laitier granulé algérien sur les propriétés fraîches	46
IV-1-1- Maniabilité	46
IV-1-2- Temps de prise	48
IV-1-3- Propriétés rhéologiques	48
IV-2- Effet du laitier granulé algérien sur l'hydratation et les propriétés	
Mécaniques.....	49
IV-2-1- Chaleur d'hydratation	49
IV-2-2- Résistance à la compression	50
IV-2-2-1- Pâtes	51
IV-2-2-2- Mortiers	51
IV-2-2-3- Bétons	52
IV-2-3- Produits d'hydratation	53
IV-3- Effets du laitier granulé algérien sur la durabilité	54
IV-3-1- Porosité, absorption et distribution de la taille des pores	54
IV-3-2- Perméabilité et attaque externe	55
Conclusion.....	57
Conclusion Générale.....	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	63
ANNEXES	
Liste des figures.....	70
Liste des tableaux.....	71

Introduction Générale

Introduction Générale:

Le ciment est l'un des matériaux les plus consommés par l'homme, on le voit partout : maisons, bâtiments, routes, ouvrages d'arts,...etc. Ce liant responsable de la liaison et la cohérence entre les différents composants des matériaux cimentaires tels que le mortier et le béton, assure le maintien et la tenue à long terme des ouvrages et constructions face aux différentes actions intérieures ou extérieures. Vu cette immense importance, l'industrie cimentaire s'améliore, se développe et s'accroît jour après jour partout dans le monde. Malheureusement, cette industrie est bien connue par sa forte pollution, la production de chaque tonne de clinker libère environ une tonne de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. La réduction des quantités de ce gaz à effet de serre a suscité l'intérêt de beaucoup de chercheurs à travers la monde, leurs travaux portent particulièrement sur les méthodes permettant soit de réduire les taux de décarbonatation lors du processus de clinkérisation, soit de réduire la quantité du clinker dans le ciment à travers sa substitution par des additions minérales. Le remplacement du clinker par les additions minérales a permis la production et la commercialisation des ciments dites complexes ayant des propriétés similaires voire meilleures que celles du ciment constitué complètement de clinker. Parmi ces additions minérales on trouve le laitier granulé des hauts fourneaux qui fera l'objet de ce mémoire.

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie sidérurgique. Il s'agit d'un produit non métallique constitué essentiellement de chaux (CaO), de magnésie (MgO), de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). La valorisation de ce sous-produit industriel, et des déchets d'une manière générale, dans le domaine des matériaux de construction a connu un intérêt croissant du fait de leur abondance en grandes quantités et leur faible prix. En Algérie, la production annuelle de laitier par l'usine d'EL HADJAR est estimée à environ un million et demi de tonnes par an.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire, est de faire une recherche bibliographique sur le laitier granulé algérien, son élaboration, ses propriétés ainsi que les principaux résultats obtenus suite à son utilisation dans le domaine des matériaux cimentaires. Le manuscrit de mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre une présentation de certaines notions sur le ciment, son industrie et l'intérêt de faire remplacer une partie de clinker par une addition minérale. Le deuxième chapitre présente le matériau de laitier, ses types, ses caractéristiques, et principalement celle du laitier algérien. La modeste réactivité du laitier algérien nécessite souvent des procédures appropriées de traitement qui font l'objet du troisième chapitre. Ces méthodes d'activation sont de types : mécanique, chimique et thermique. Dans le dernier chapitre sont présentés les principaux résultats rapportés par plusieurs chercheurs qui ont utilisés le laitier granulé algérien dans leurs travaux sur les mortiers et bétons où les effets de l'utilisation de ce matériau sur les propriétés fraîches, la résistance à la compression et la durabilité des matériaux

cimentaires sont explicitement présentés. Le manuscrit se termine par une conclusion dans laquelle l'essentiel de cette recherche bibliographique est présenté.

CHAPITRE I

Le ciment et les additions minérales

Introduction :

Historiquement, l'obtention du ciment n'était pas facile, son invention a duré plusieurs siècles. Les Chinois et les Égyptiens construisaient avec des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires. Ce sont les Romains qui ont été les premiers ayant pu inventer ce que nous appelons aujourd'hui liant hydraulique. À l'époque, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pozzuoli au pied du Vésuve donnant naissance au ciment « Pouzzolanique »; matériau capable de fixer la chaux en présence d'eau. Aujourd'hui, le ciment est couramment défini en tant qu'un liant hydraulique artificiel qui permet de coller entre eux les grains de sable et de granulats utilisés dans la fabrication des mortiers et des bétons [LEG 16]. Il s'agit d'un matériau de forte consommation partout dans le monde, il est très présent dans notre vie quotidienne, ce sont les matériaux cimentaires (mortier et béton) qui façonnent notre environnement (voies de circulation, ouvrages d'art et d'assainissement, bâtiments de toute nature, ...etc.). La première unité de fabrication de ciment Portland a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne. Le développement des procédés de fabrication de ciment a connu un grand développement suite à l'apparition de matériels nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Ses procédés s'améliorent sans cesse, le temps nécessaire pour produire une tonne de clinker est passé de 40 heures en 1870, à environ trois minutes actuellement. Vu son importance, le ciment mérite d'être brièvement présenté dans les quelques paragraphes qui suivent.

1. Le ciment :

Le ciment est le principal composant des mortiers et des bétons. Selon la norme européenne EN 197-1 et son homologue algérienne NA 442, le ciment Portland est un liant hydraulique finement moulu, qui lorsqu'il est gâché avec de l'eau forme une pâte permettant de faire prise et qui durcit suite à des réactions chimiques d'hydratation. Cette matière conserve, après durcissement, sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [BOU 20].

Le ciment Portland s'obtient d'un mélange de 95% de clinker et de 5% de gypse. Le clinker est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium qui se forment lors de la cuisson d'une farine composée essentiellement de chaux (CaO), de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃) et d'oxyde de fer (Fe₂O₃). Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment sont le calcaire (environ 80%) et l'argile (20%). Le calcaire (carbonate de calcium) apporte la chaux, alors que l'argile donne la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. Les matières premières sont extraites des gisements adjacents de l'usine, concassées puis finement broyées avant d'être mélangées et homogénéisées dans des proportions bien définies. Le mélange ainsi obtenu, appelé « cru », est ensuite passé à la cuisson dans un four rotatif incliné, cette cuisson se déroule sous une température d'environ 1450 °C et sous une atmosphère oxydante. C'est au cours de la cuisson que se forme le « clinker », suite

aux réactions entre les constituants des matières premières. Ce clinker est ensuite refroidi rapidement à l'air, puis broyé et réduit en poudre après l'ajout d'une quantité de gypse (3 à 5% en masse) indispensable pour la régulation de la prise, ce qui permettra d'obtenir un ciment Portland [HAM 14]. Le processus de fabrication de ciment est présenté sur la Figure I.1.

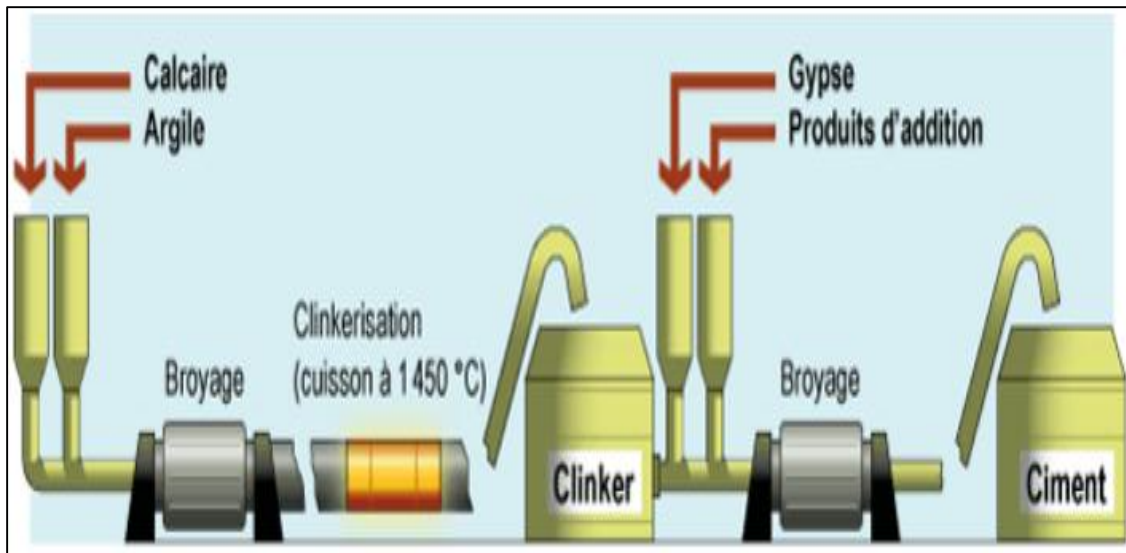


Figure I-1. Processus de fabrication de ciment.

La formation du clinker (Clinkérisation) se fait dans le four rotatif en fonction de l'évolution de la température. Les différentes étapes de clinkérisation sont les suivantes [SCK 04]:

- De 20 à 100 °C : évaporation de l'eau libre.
- De 100 à 300 °C : adsorption de l'eau par certains minéraux.
- De 300 à 900 °C : élimination de l'eau chimique (liée) contenue surtout dans l'argile.
- A partir de 500 °C : changement de structure des minéraux silicatés (déshydroxylation).
- De 600 à 900 °C : décarbonatation des calcaires et des dolomies.
- A partir de 800 °C : formation de la Bélite (C_2S) et de certaines combinaisons intermédiaires des aluminates et ferrites.
- A partir de 1250 °C : formation de la phase liquide et commencement de formation de C_3S .
- Jusqu'à 1450 °C : fin des réactions de formation de l'alite et cristallisation de l'alite et de la Bélite.
- 1300 à 1240 °C : trempe du clinker avec formation de phases vitreuses de l'aluminate et alumino-ferrite de calcium.

2. Constituants du ciment :

2.1. Le Clinker :

Le clinker est le constituant de base du ciment Portland. La fabrication de ce matériau, issu de la cuisson à 1450 °C (clinkérisation), peut être réalisée selon quatre méthodes : par voie humide, semi-humide, sèche (la plus courante) et semi-sèche. D'un point de vue chimique, la composition du clinker varie en fonction des matières premières utilisées. Les principaux oxydes qui entrent dans la composition du clinker Portland sont: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂ dont les teneurs varient très peu d'un clinker à l'autre. La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le **Tableau I-1**. D'un point de vue minéralogique, le clinker est un ensemble de minéraux, dont les principaux sont :

- Silicates tricalcique (Alite ou C₃S) présente entre 45 et 65% de la masse totale.
- Silicates bicalcique (Bélite ou C₂S) présente entre 15 et 30% de la masse totale.
- Aluminates tricalcique (Célite 2 ou C₃A) présente entre 05 et 15% de la masse totale.
- Aluminoferrite tricalcique (Célite1 ou C₄AF) présente entre 10 et 20% de la masse totale.

La teneur de ces minéraux se calcule à l'aide des formules de Bogue qui sont [**BOU 20**]:

$$C_3S = 4,07 (CaO) - 7,60 (SiO_2) - 6,72 (Al_2O_3) - 1,43 (Fe_2O_3) - 2,85 (SO_3)$$

$$C_2S = 2,87 (SiO_2) - 0,75 (C_3S)$$

$$C_3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69 (Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3,04 (Fe_2O_3)$$

Tableau I-1. Composition chimique moyenne de clinker.

Oxydes	Teneurs (%)	Sources
CaO	55 à 70	Calcaire
SiO ₂	18 à 24	Argile
Al ₂ O ₃	4 à 8	
Fe ₂ O ₃	1 à 8	
MgO	0 à 5	Calcaire et argile
SO ₃	0 à 3	
Alkali (K ₂ O, Na ₂ O)	0 à 2	

2.2. Le sulfate de calcium:

Le sulfate de calcium est une roche, souvent blanche, ajouté aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, pour réguler la prise. Le sulfate de calcium peut être sous l'une de ces trois formes : sulfate de calcium di-hydraté ou gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), héli-hydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ou anhydrite (sulfate de calcium anhydre (CaSO_4)). Le sulfate de calcium est ajouté en faible quantité (3 à 5% de la masse du ciment) de telle sorte que le pourcentage total du SO_3 dans le ciment ne dépasse pas les 3.5%.

2.3. Les ajouts :

Dans le but de réduire les taux des émissions de CO_2 , la consommation des ressources naturelles (calcaire et argile) ainsi que les énergies de cuisson et de broyage que nécessitent la fabrication du ciment, notamment celle du clinker, on se ramène souvent à la réduction de la quantité du clinker dans le ciment, c'est ce qu'on appelle les ciments composés. La substitution d'une partie de clinker par certains matériaux, dites ajouts, permet parfois, en plus de ce qui a été suscité, d'améliorer certaines performances des mortiers et bétons. Le type d'ajout ainsi que sa teneur diffèrent selon le type de ciment voulu et ses performances visées. D'une manière générale, les ajouts peuvent être inertes qui ne participent pas dans les réactions d'hydratation ou actifs ayant le pouvoir de modifier les résultats d'hydratation. La norme NF 197-1 donne la classification de ces ajouts et des ciments résultants ainsi que les plages de substitution permises (**Tableau I-2**).

2.3.1. Le laitier des hauts fourneaux (S) :

Silicates de calcium et de magnésium vitrifiés obtenus par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion de minerai de fer dans un haut fourneau. Le rapport massique $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ doit être supérieur à 1.

2.3.2. Les pouzzolanes (P, Q) :

Substances naturelles siliceuses ou alumino-siliceuses ou une combinaison de celles-ci, elles peuvent être naturelles d'origine volcanique ou artificielle. Les pouzzolanes ne durcissent pas par eux-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau mais, lorsqu'elles sont finement broyées, elles réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium dissous, pour former des composés de silicates de calcium et d'aluminates de calcium générateurs de résistances. La teneur en SiO_2 réactif doit être au moins égale à 25% en masse.

2.3.2.1. Les pouzzolanes naturelles (P) :

Les pouzzolanes naturelles sont en général des matériaux d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriée.

2.3.2.2. *Les pouzzolanes artificielles (Q) :*

Les pouzzolanes naturelles calcinées sont des matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement. Le Métakaolin est obtenu par calcination d'une argile kaolinitique, il fait l'objet de la norme NF P18-513.

2.3.3. *Les cendres volantes (V, W) :*

Elles sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes récupérées dans les filtres des centrales thermiques qui brûlent du charbon.

2.3.3.1. *Les cendres volantes siliceuses (V) :*

C'est une poudre fine constituée de particules principalement sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques. Elle est essentiellement constituée de silice réactive et d'alumine. La proportion d'oxyde de calcium réactif doit être inférieure à 10 % en masse.

2.3.3.2. *Les cendres volantes calciques (W) :*

C'est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Elle est essentiellement constituée d'oxyde de calcium réactif, de silice réactive et d'alumine. La proportion d'oxyde de calcium réactif ne doit pas être inférieure à 10 % en masse. Les cendres volantes calciques peuvent contenir des taux élevés de chaux libre, ce qui provoque l'expansion des mortiers et bétons.

2.3.4. *Schistes calcinés (T) :*

Ils sont des matériaux résultant du traitement thermique à plus de 800 °C de schistes dans des fours spéciaux. En raison de la composition des matériaux naturels et du procédé de production, le schiste calciné contient des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique. Il contient également, outre de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, notamment SiO₂. En conséquence, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques, comme le ciment Portland.

2.3.5. *Calcaire :*

Sa teneur en CaCO₃ doit être supérieure ou égale à 75 %. On distingue:

- **LL** : Calcaire dont le TOC (Total Organic Carbon) est < 0,20 % en masse.
- **L** : Calcaire dont le TOC est < 0,50 % en masse.

2.3.6. *Fumée de silice (D):*

La fumée de silice provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium, elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe.

Tableau I-2. Types de ciment selon la norme NF EN 197-1.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)	Composition (pourcentage en masse) ^{a)}											Constituants secondaires	
		Constituants principaux												
		Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D ^{b)}	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire				
Naturelle P	Naturelle calcinée Q				Siliceuse V	Calciq W	L	LL						
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEM IIIA-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM IIIB-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM IIIA-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM IIIA-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM IIIB-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM IIIA-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM IIIB-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM IIIA-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM IIIB-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
		CEM IIIA-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM IIIB-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM IIIA-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM IIIB-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM IIIA-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM IIIB-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
		CEM IIIA-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM IIIB-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Ciment Portland composé ^{c)}	CEM IIIA-M	80-94	← 6-20 →									0-5	
		CEM IIIB-M	65-79	← 21-35 →									0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →					—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →					—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →		—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →		—	—	—	—	—	0-5	

3. Caractéristiques du ciment [DREUX 98]:

3.1. La prise (NF 196-3):

La prise du ciment Portland présente le phénomène de transformation de pâte cimentaire d'une consistance fluide à un état solide. La prise résulte des différentes réactions chimiques conduites par les composants du ciment et de l'eau, ce qui donne naissance à des hydrates responsables de cette solidité de la pâte cimentaire. L'essai permettant l'évaluation du temps de prise (début de prise et fin de prise) est bien décrit par la norme NF 196-3. Il s'agit d'un test qui mesure le temps nécessaire pour que la profondeur de pénétration de l'aiguille de Vicat dans la pâte cimentaire soit 5 cm (début de prise), et celui à partir duquel, la pénétration de cette aiguille dans la pâte devient impossible (fin de prise). Un ciment Portland ne doit ni durcir trop vite ni prendre beaucoup de temps pour faire sa prise, pour cela, la norme NF 197-1 spécifie, selon le type de ciment, le temps de prise minimal, qui est :

- ✓ 1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5R.
- ✓ 1h pour les ciments des classes 42,5; 42,5R; 52,5 et 52,5R.

Dans la pratique, les temps de prise sont souvent supérieurs à ces valeurs minimales, ils varient entre 2h 30 et 3h30 pour la grande majorité des ciments. Il est noter que la norme ne spécifie pas un temps minimal pour la fin de prise, mais ce temps est généralement de l'ordre de 3h à 7h.

3.2. Durcissement :

L'une des principales caractéristiques du ciment est le durcissement, c'est-à-dire l'acquisition d'une résistance progressive avec le temps. Le durcissement est dû principalement à l'avancement d'hydratation mais les deux phénomènes n'ont pas la même évolution avec le temps. L'hydratation du ciment continue pendant des mois voire des années, alors que le durcissement de la matrice cimentaire se poursuit dès les premières heures.

3.3. Chaleur d'hydratation (NF 196-9):

La dissolution des différents constituants du ciment est exothermique (réaction qui dégage de la chaleur). Selon la teneur de chaque constituant, le dégagement de chaleur, mesuré par **NF 196-9**, est plus ou moins important. Par exemple, le C_3A dégage trop de chaleur lors de son hydratation, c'est pourquoi on a intérêt à utiliser des ciments riches en C_3A lors des coulages en temps froid. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre **65 j/g** par exemple pour certains ciments CEM III/B et **300 j/g** pour un ciment CEM I. La norme algérienne **NA 442** exige pour un ciment normalisé, une valeur maximale de **270 j/g** après **41 h** d'hydratation.

3.4. Finesse de mouture (NF 196-6) :

La finesse de mouture, appelée aussi surface spécifique de Blaine **SSB**, mesurée selon **NF 196-6** et exprimée en cm^2/g , représente la surface (en cm^2) développée par **1g** de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre **3000** et **4000** cm^2/g , certains ciments prompts naturels «CNP» ont un Blaine supérieure à $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$. Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, cependant, plus les risques de retrait et de fissuration sont accrus.

3.5. Retrait (NF P15-301):

Le retrait est la variation (diminution) des dimensions de l'élément (pâte, mortier ou béton) au cours de l'hydratation de son ciment. Il se produit lorsque cet élément est mis dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément. Généralement, le retrait est mesuré à partir de la variation de longueur sur des éprouvettes prismatiques de mortier normalisé (NF 196-1) $4*4*16 \text{ cm}^3$, conservées dans l'air à une température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et une hygrométrie de $(50\pm 5)\%$. Pour un ciment Portland ordinaire CEM I 42.5, la norme **NF P15-301** impose un retrait maximal de $1000 \mu\text{m}/\text{m}$.

3.6. Gonflement :

Contrairement au retrait, si l'élément (pâte, mortier ou béton) se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent, c'est le gonflement. Bien que cet essai n'ait pas normalisé, le gonflement est mesuré de la même façon que le retrait mais cette fois-ci les éprouvettes de mortier sont conservées dans l'eau à une température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. L'intérêt d'utilisation des additions minérales:

Les additions minérales sont devenues le moyen couramment utilisé dans le but de réduire l'impact environnemental de la fabrication du ciment. Elles permettent de minimiser l'émission de CO_2 , de réduire la consommation d'énergie et de ressources naturelles, mais aussi d'améliorer certaines performances des matériaux cimentaires notamment : rhéologie, résistance mécanique, durabilité,...etc.

L'utilisation des additions minérales dans l'industrie cimentaire et les méthodes permettant d'améliorer certaines performances des ciments résultants, présentent aujourd'hui des axes de recherches à grande importance pour les fabricants de ciment mais aussi pour beaucoup de chercheurs à travers le monde. Les recherches menées sur les additions minérales jusqu'à présent ont permis d'exploiter, en plus des matériaux naturels traditionnels (tuf, calcaire, sable de dune, pouzzolanes naturelles,...), plusieurs types de déchets et de sous produits. On peut citer par exemple: le laitier des hauts fourneaux [**BEH 05**], la fumée de silice [**KAD 04**], les cendres volantes [**RAH 04**], les déchets de verre [**ELB 14**], les boues de l'industrie papetière [**OUA 05**], la boue de dragage des barrages [**CHI 16**], la boue de curage des ouvrages de traitement des eaux

[TAN 15], les sédiments marins [BEN 15], les déchets de brique [NAC 09], de carrelage et de marbre [TEN 15], les déchets végétaux et animaux [KAN 14], ...etc.

Sur le plan industriel, les gouvernements de beaucoup de pays, en particuliers les pays européens, préconisent d'éviter l'utilisation de clinker en grande proportions dans le ciment, et par conséquent ils favorisent fortement la commercialisation et l'utilisation des ciments mélangés à base de clinker et d'autres constituants (additions minérales), on parle souvent des ciments CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V. Cette pratique peut garantir des avantages d'ordre:

- **Écologique et environnemental:** l'utilisation de moins de clinker entraîne une diminution du CO₂ produit d'une part. La réutilisation des déchets et la valorisation des sous produits en tant qu'addition minérale dans l'industrie minérale présente une solution pour se débarrasser de ces déchets et ces sous produits est un avantage environnemental d'autre part.

- **Économique :** car beaucoup d'additions minérales sont des sous-produits ou des déchets, donc leurs coût est très faible d'un côté, et ne nécessitent pas de cuisson d'autre côté, ce qui aide à baisser le coût de fabrication de ciment.

- **Technique :** les recherches ont montré que la plus part des additions minérales peuvent conduire à l'amélioration des performances du ciment.

L'effet des additions minérales peut se manifester selon deux mécanismes d'action. Elles peuvent intervenir physiquement via leur finesse qui est généralement plus importante que celle du ciment Portland. Cette propriété permet aux additions minérales de densifier la pâte de ciment en conduisant à un empilement plus compact des grains solides [KAD 04]. Le deuxième mécanisme d'action est d'ordre chimique et est réservé aux seules additions minérales dites actives (matériaux ayant une activité pouzzolanique ou hydraulique). Les additions actives peuvent participer aux processus d'hydratation et modifier le résultat final de cette hydratation.

CHAPITRE 2

Le laitier granulé de haut fourneau

Introduction :

En sidérurgie, le mot **laitier** désigne les scories qui se forment à l'occasion du processus permettant l'élaboration de la fonte par voie liquide, la faible densité du laitier le fait flotter au-dessus du métal en fusion. Certaines ressources affirment que le terme laitier est employé en métallurgie depuis au moins 1676, et que ce nom est bien entendu inspiré du mot « lait ». Pratiquement, si les scories sortantes d'un haut fourneau ne contiennent pas de fer, elles ont généralement une blancheur impressionnante ce qui coïncide avec l'image du lait en ébullition. Dans ce domaine d'industrie, le laitier permet le contrôle de la composition de la fonte notamment en ôtant le soufre, élément indésirable, mais aussi les alcalins, qui perturbent la marche du haut fourneau. De point de vue thermique, le laitier est un stérile à fondre, son enthalpie d'environ 1 800 MJ/t ne correspond qu'à 3,5 % du bilan énergétique du haut fourneau et elle est bien moins intéressante que celle de la fonte. La quantité de laitier produite correspond directement à la richesse du minerai de fer utilisé, cependant le prix de vente du laitier granulé intervient dans moins de 5 % du coût de production de la fonte.

En génie civil, le laitier est un déchet industriel, c'est-à-dire un sous produit qui résulte de l'élaboration de la fonte et qui a de nombreux avantages et utilisations qui couvrent plusieurs domaines d'ouvrages et de matériaux de construction. Le laitier satisfait à de sévères conditions de qualité, il est souvent valorisé comme addition dans la fabrication des ciments, comme adjuvant ou bien encore comme agrégat dans la formulation des mortiers et des bétons. Le laitier est également utilisé dans la fabrication de verre et dans le domaine des travaux publics (ballast, enrobé bitumé..., etc.). Le laitier présente une composition chimique très stable, il est globalement formé des constituants non ferreux. Les constituants majeurs du laitier sont la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la magnésie (MgO). À la sortie du haut fourneau et selon le traitement de refroidissement adopté, le laitier résultant peut avoir deux formes minéralogiques différentes conduisant à deux types de laitier, à savoir: le laitier granulé et le laitier cristallisé (Figure II.1).

- **Le laitier granulé ou vitrifié** : il est généralement produit grâce à la projection d'eau sous pression dans le laitier en fusion dès sa sortie du haut fourneau, en aboutissant à un sable fin et homogène. Le but de ce refroidissement brutal est d'empêcher la recristallisation du matériau qui a eu déjà une structure désordonnée et plus ou moins amorphe sous l'effet de fusion. Dans certains cas, le refroidissement est fait à l'air, mais de nombreux inconvénients (dégagement gazeux, bruit, fibre de verre, encombrement de l'installation) limitent cette pratique. De ce fait, le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente.

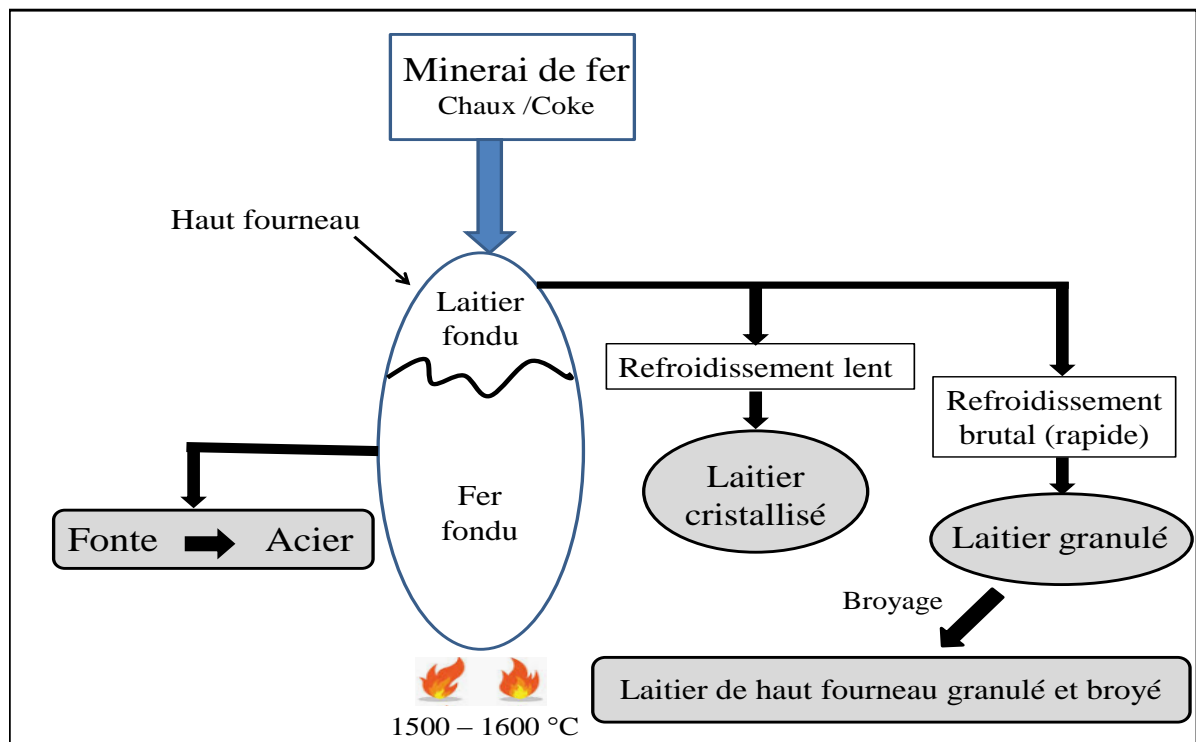


Figure II.1. Schéma représentatif de l'élaboration du laitier.

- **Le laitier cristallisé** : il est issu du refroidissement lent c'est-à-dire par aspersion d'eau du laitier en fusion coulé à terre. La solidification et le refroidissement du laitier amènent à son craquelage. Ce procédé est le premier historiquement réalisé : il ne nécessite qu'une fosse de stockage du laitier en fusion et des rampes d'arrosage. Son obtention ne consomme en outre que de faibles quantités d'eau. Cependant, un concassage secondaire est généralement nécessaire pour utiliser ce matériau. L'inconvénient réside dans le fait que ce matériau présente une certaine hétérogénéité. Contrairement au précédent, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste (**Figure II.2**) [BEH 05].



Figure II. 2. Tptes de laitier de haut fopurneau [BEH 05].

1. Formation du laitier [AFA 14]:

La matière première de minerai de fer est préalablement traitée puis introduite dans le haut fourneau. Elle est composée principalement d'hématite, mais aussi parfois de magnétite et de wüstite, en plus des impuretés de la gangue. Au cours de sa descente, la quantité de minerai de fer est réduite par le gaz réducteur chaud issu de la combustion du coke. Dans la zone sèche (ou cuve) du haut fourneau se déroule la réduction des oxydes de fer sous des températures entre 320 et 1100 °C. Au niveau de la partie supérieure de cette zone, l'hématite est réduite en magnétite qui est ensuite réduite en wüstite. Compte-tenu du profil de température dans le haut fourneau, ces réactions interviennent successivement dans des zones de température croissante. Dans la zone de fusion, se forme le laitier par fusion de la gangue et des additions de fondants (telles que la chaux), la wüstite restante est réduite en fer, tandis que la fonte se carbure en carbone. Enfin au niveau du creuset, la fonte et le laitier se séparent par décantation.

2. Production mondiale du laitier [PRO 20]:

L'association mondiale de l'acier a rapporté que la production mondiale d'acier était de 1,86 milliard de tonnes en 2020, contre 1,88 milliard de tonnes en 2019. La Chine, leader mondial de cette industrie, assure une production annuelle d'environ 1,05 milliard de tonnes. La production du laitier est proportionnelle à la production de l'acier, elle varie d'un pays à l'autre, d'un an à l'autre mais surtout selon les processus d'élaboration de la fonte ou de l'acier. L'organisme des enquêtes géologique des états unis (United State Geological Survey USGS) estime que 15 million tonnes de laitier ont été produites en 2017 au USA, dont 85% est un laitier granulé. La production japonaise a atteint les 36,7 million de tonnes de laitier au cours de l'année de 2018, selon Japan Metal Daily. Le centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques, estime la production française en laitier à environ 4,93 million de tonnes en 2010. Concernant l'Algérie (Figure II.3), la production annuelle en termes de laitier granulé et cristallisé est de l'ordre de 700 000 tonnes selon bougara et al. [BOU 10], dont plus de 70% est un laitier granulé.



Figure II.3. Complexe sidérurgique d'El Hadjar, Algérie.

3. Caractéristiques du laitier des hauts fourneaux :

3.1. Caractéristiques physico-mécaniques :

La masse volumique apparente du laitier est d'environ 1 à 1,4 g/cm³, alors que sa masse volumique absolue varie entre 2,85 à 3 g/cm³ pour le laitier granulé et entre 3,3 et 3,6 g/cm³ pour le laitier cristallisé. La forme du grain de laitier n'est pas fixe, elle diffère selon les méthodes de broyage. Les grains de laitier prennent souvent une forme irrégulière avec des angles et des bords clairs suite à leur broyage à l'aide d'un broyeur à boulets. Cependant, quand un vibro-broyeur de laboratoire est utilisé, la forme du laitier est généralement sphérique avec une surface relativement lisse. [RAS 18] (Figure II.4). Le laitier granulé se présente sous forme d'un sable jaune ou beige, de granulométrie qui s'étale entre 0 et 5 mm, alors que les grains du laitier cristallisé sont souvent un peu plus grands. Le laitier cristallisé a la forme d'une roche artificielle dure, de couleur grise et d'aspect poreux. Ce laitier développe une résistance mécanique élevée (130 à 180 MPa en compression simple) et une bonne résistance à la fragmentation [ADE 14].

Tableau II.1. Quelques propriétés physico-mécaniques du laitier de haut fourneau [DAO 10]

Caractéristiques	Valeurs
Coefficient d'aplatissement (%)	<10
Aptitude au broyage (wt, %)	12 - 15
Coefficient de polissage (PSV, %)	57 - 58
Absorption d'eau (wt, %)	1 – 1,8
Résistance au gel (wt, %)	< 0,5
Adhésion au liant (%)	> 90
Résistance à l'usure (Micro-Deval, MDE)	6-12
Résistance à la fragmentation (Coefficient Los Angeles, LA)	10 - 20
Résistance à la compression simple	80 MPa
Coefficient de polissage accéléré	0,45 – 0,55

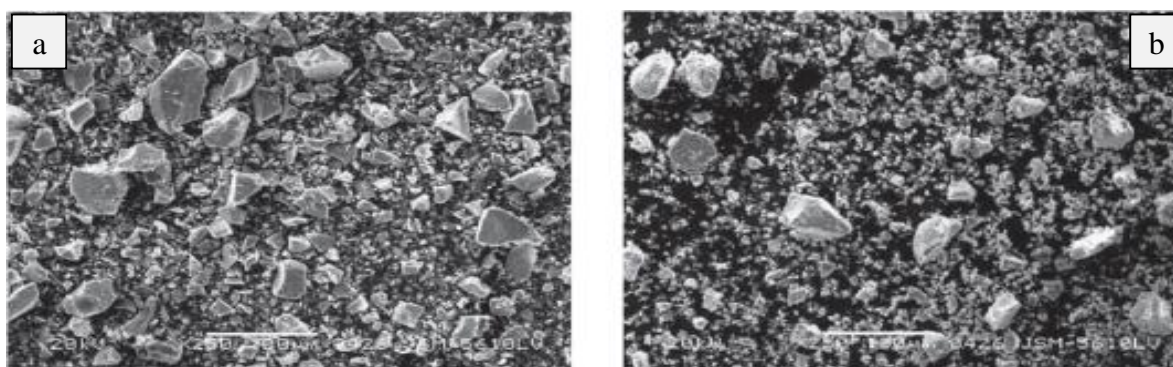


Figure II.4. Forme du laitier, selon les images de MEB, après son broyage à l'aide de : (a- broyeur à boulets ; b- vibro-broyeur) [RAS 18].

3.2. Composition chimique :

Chimiquement, il n'y a pas une grande différence entre les compositions chimiques du laitier granulé et cristallisé. Dans la littérature, on trouve diverses compositions chimiques de laitier granulé issues des tests de fluorescence des rayons X (FRX), quelques exemples sont représentés sur le **Tableau II.2**. A partir de ces valeurs, il est nettement clair que le laitier, granulé dans ces exemples, est majoritairement composé de chaux et de silice, la somme de ces deux oxydes varie entre 70 et 80% de la masse totale du matériau. L'alumine et la magnésie sont bien présentes avec des teneurs qui varient d'un échantillon à l'autre. Il est à noter que la perte au feu (PAF) du laitier est souvent proche de zéro ce qui affirme que les risques de déshydroxylation des argiles ou de décarbonation des carbonates est quasiment nulle. Pour que le laitier granulé soit utilisable comme ajout dans la fabrication du ciment, la norme NF 15167-1 (2006) exige que la somme ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$) dépasse 67% en poids, que le rapport $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$ soit supérieur à 1 et que les teneurs en MgO, sulfure, SO_3 , Cl, et H_2O soient inférieures à 18%, 2%, 2,5%, 0,1% et 1%. Ces exigences prescrites dans la norme NF 15167-1 (2006) ont pour objectif d'améliorer le potentiel pouzzolanique du laitier granulé à travers ses constituants de silice et d'alumine d'une part, et son potentiel hydraulique, notamment à travers sa teneur en chaux, d'autre part. Les exigences qui concernent le laitier cristallisé pour qu'il soit utilisable comme agrégats dans le béton et les travaux routiers ne sont pas discutées dans le présent travail.

Tableau II.2. Différentes compositions chimiques de laitier citées dans la littérature.

	Laitier d'Angleterre [RAS 15]	Laitier de Malysie [PAY 13]	Laitier d'Australie [UDD11]	Laitier Turque [ERD13]	Laitier d'Egypte [RAS15]	Laitier d'Iran [RAS 15]
CaO	40,89	49,76	43,1	34,2	33,07	38,1
SiO ₂	34,94	29,35	33,5	38,4	36,95	36
Al ₂ O ₃	11,69	11,72	14,5	10,64	10,01	13
MgO	7,42	4,2	5,5	6,94	6,43	6,6
Fe ₂ O ₃	3,32	0,52	0,49	0,79	1,48	0,6
SO ₃	1,19	2,09	0,12	1,48	3,52	0,6
K ₂ O	0,34	0,46	0,4	0,84	0,74	1,1
Na ₂ O	0,16	0	0,22	0,16	1,39	0,5
PAF	0,93	0	0	3,09	0	0

3.3. Composition minéralogique :

La composition minéralogique désigne l'ensemble des minéraux qui entrent dans la composition d'un matériau, dont la méthode fréquemment utilisée est la diffraction des rayons X (DRX). Une grande différence est à prévoir entre le spectre résultant d'un laitier granulé et celui d'un laitier cristallisé. En effet, la DRX permet de bien identifier les phases cristallines que peut contenir un matériau (Figure II.5 (a)), tandis que les minéraux de cristallinité perturbée, de structure désordonnée ou amorphe ne sont identifiables par la DRX qu'à travers une large bosse (Figure 5 II.(b)). L'objectif de soumettre un échantillon de laitier à un essai de DRX est d'identifier les différentes phases (minéraux) qui entrent dans sa composition. Le laitier est composé de certains minéraux qui ont été identifiés par plusieurs chercheurs et qui sont regroupés dans le Tableau II.3. Il est à noter que la phase la plus importante dans le laitier granulé, est celle détectable entre 2 Theta égale 20 et 40 °, dont la forme d'arc indique l'état vitreux du matériau.

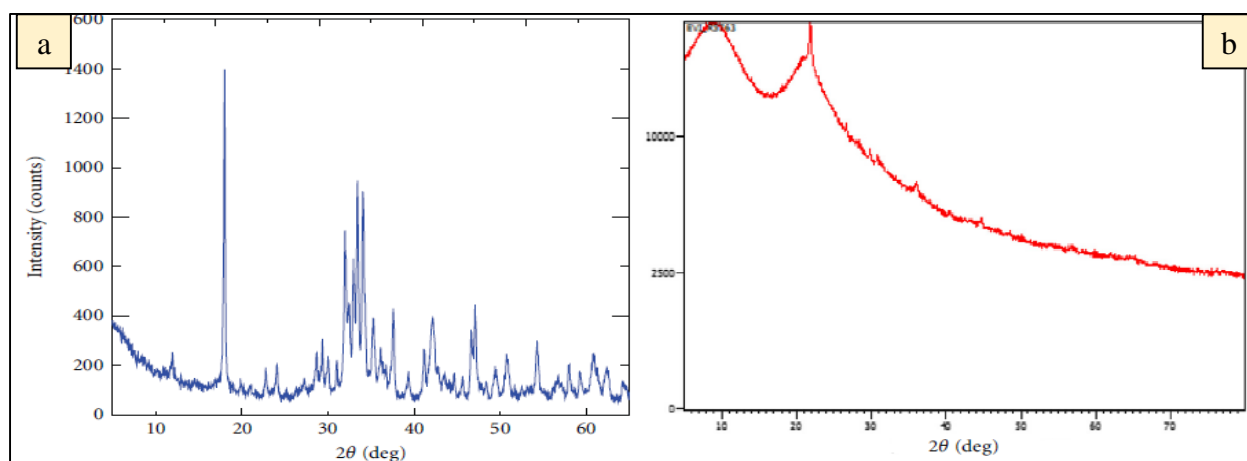


Figure II.5. Spectre de DRX d'un laitier : a). Cristallisé [Yill 11], b). Granulé [APR 16].

Tableau II.3. Différentes phases constituantes de laitier détectables par la DRX

Laitier	Référence	Phases		
Cristallisé	[BEH 05]	Gehlénite (C_2AS)	Akermanite (C_2MS_2)	Rankinite (C_3S_2)
	[ADE 14]	Hématite (Fe_2O_3)	Wustite (Fe, Mg, Mn)O	Silicate bicalcique (β - Ca_2SiO_4)
	[DAO 10]	C_2S (variété β)	Chaux libre (CaO)	Brownmillerite ($Ca_2(AlFe)O_5$)
	[BEL 10]	Ferrite de calcium C_2F	Chaux hydratée ($Ca(OH)_2$)	Wüstite ($Fe_{1-x}O$)
Granulé	[BIS 17]	Fer métallique	Calcite ($CaCO_3$)	/
	[KHA 17]	Gehlénite (C_2AS)	Gypse	Hatrurite (Alite C_3S)
	[SID 12]	Gehlénite (C_2AS)	Silicate de calcium	Merwenite (C_3MS_2)

4. Indices caractéristiques du laitier granulé :

Comme tout autre ajout actif, le laitier granulé est utilisé en tant que substituant au ciment (au clinker évidemment) dans le but d'améliorer le processus d'hydratation et d'augmenter le taux des hydrates. Pour qu'il puisse jouer ce rôle, cet ajout doit avoir une grande vitrosité (plus de 90%) et une bonne réactivité (hydraulicité).

Selon la norme NF 15167-1 (2006), le laitier qui est un matériau obtenu par refroidissement rapide (le refroidissement rapide inclut la trempe dans l'eau (granulation) et la projection dans l'eau et l'air (bouletage)) de minerai de fer fusionnée dans un haut-fourneau, est considéré granulé lorsqu'au moins deux tiers de sa masse est vitrifié (amorphe). Cette exigence mesurée couramment par le taux de verre dont la valeur dépasse le plus souvent les 90%. La diffraction des rayons X (DRX) permet également d'apprécier et de quantifier la teneur de matériau en verre et donc son degré de vitrosité.

Quant à l'hydraulicité du laitier qui désigne sa réactivité chimique, elle est essentiellement basée sur sa composition chimique et ses teneurs en composants acides (tels que le SiO_2) et ceux basiques (CaO , MgO). Selon la littérature (Tableau II.4) plusieurs indices décrivant la réactivité ou l'hydraulicité du laitier granulé ont été proposés. Ces indices peuvent être calculés à partir de la composition chimique du matériau, ils servent à prédire la réactivité du laitier, mais leur pertinence est parfois à discuter.

Tableau II.4. Indices pour évaluer la réactivité du laitier granulé [BEH 05, WIN 14].

$I_1 = (\text{CaO}) / (\text{SiO}_2)$	Pour $I_1 > 1$, le laitier est basique et convient à l'alkali activation
$I_2 = (\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2)$	Module d'activité, pour I_2 entre 0,1 et 0,6 le laitier convient à l'alkali activation
$I_3 = (\text{CaO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3)$	/
$I_4 = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2)$	$I_4 > 1$ est la valeur exigée par la norme NF 197-1
$I_5 = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$	$I_5 > 1$ pour un laitier de bonne qualité
$I_6 = (\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3)$	$I_6 > 1$ pour un laitier de bonne qualité
$I_7 = (\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 10) / (\text{SiO}_2 + 10)$	/
$I_8 = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2)$	$I_8 < 1,5$ faible réactivité. I_8 entre 1,5 et 1,9 bonne réactivité. $I_8 > 1,9$ très bonne réactivité.
$I_9 = (\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)^2$	$I_9 \geq 0,18$ pour un laitier de bonne qualité
$I_{10} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{F} + \text{MnO})$	Coefficient de qualité
$I_{11} = (\text{CaO} + \text{CaS} + 0,5 \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{MnO})$	$I_{11} > 1,5$ pour un laitier de bonne qualité

Il convient de signaler que, selon Behim [BEH 05], ces modules chimiques de basicité ne reflètent pas précisément l'hydraulicité du laitier, du fait de la mauvaise prise en considération de l'alumine (Al_2O_3) dans la plus part de ces indices. Le chercheur a ajouté que le terme " Laitier acide " pour les laitiers dont l'indice est inférieur à 1 n'est pas une limite aux laitiers hydrauliques si la teneur en chaux plus faible est compensée par les teneurs en alumine ou magnésie.

5. Exigences de la norme NF 15167-1 (2006) pour le laitier granulé :

Pour qu'un matériau soit qualifié en laitier granulé selon la norme NF 15167-1 (2006), il doit répondre à d'autres exigences physiques et mécaniques.

5.1. Exigences physiques :

En termes de finesse, la surface spécifique de Blaine (SSB) du laitier granulé doit être au moins égale à $2750 \text{ cm}^2/\text{g}$. En termes de prise, la norme sus-citée exige que le temps de prise initial (déterminé conformément à NF 196-3) d'un mélange composé de 50 % (en masse) de laitier granulé de haut-fourneau finement broyé et de 50 % de ciment d'essai, ne doit pas dépasser le double du temps de prise du ciment d'essai seul.

5.2. Exigence mécanique :

D'un point de vue mécanique, la norme sus-citée évalue la réactivité du laitier granulé de haut fourneau selon une grandeur nommée : *Indice d'activité*. L'indice d'activité présente le rapport entre la résistance à la compression (déterminée selon NF 196-1) d'un mortier préparé selon NF 196-1 dont le liant est composé de 50 % (en masse) de laitier granulé finement broyé et de 50 % de ciment d'essai, et la résistance à la compression du ciment d'essai seul. Pour qu'un laitier de haut fourneau soit conforme à cette norme, son indice d'activité mesuré à 7 jours et à 28 jours ne doit pas être inférieur à 45 % et à 70 %, respectivement.

6. Caractéristiques principales du laitier granulé algérien :

Le laitier granulé de haut fourneau provient en Algérie exclusivement de l'usine de sidérurgie d'El-Hadjar à Annaba. Sa valorisation en tant qu'addition au ciment a fait l'objet de plusieurs recherches dans les universités algériennes. En termes de teneur en verre (vitrosité), le laitier granulé algérien contient entre 80% [ITI 11] et 97,9% d'éléments vitreux [BOU 10b]. En termes de composition chimique, le **Tableau II.5** récapitule quelques valeurs rapportées par certains chercheurs durant ces dernières années. Bien que les échantillons utilisés diffèrent grandement dans leurs compositions chimiques en fonction des matières premières exploitées ce jour-là, on peut observer que le matériau contient généralement des taux élevés de CaO (37,22 – 44,58%) et SiO_2 (33,26 – 42,2%) contre de faibles teneurs en Al_2O_3 (5,64 – 10%) et MgO (2,12 – 9,56%). Il semble que le laitier granulé algérien répond aux exigences chimiques de NF EN 15167-1 (2006),

du fait que la somme (CaO + MgO + SiO₂) dépasse 67% en poids, le rapport (CaO + MgO) / SiO₂ est supérieur à 1 et les autres exigences pour MgO, SO₃, Cl et alcalis sont bien respectées. Cependant, les indices chimiques de ce laitier sont souvent inférieurs aux valeurs minimales spécifiées pour obtenir une hydraulité correcte. Behim et al. [BEH 11] ont fait une comparaison entre les valeurs de quelques indices chimiques du laitier granulé algérien et celles d'autres laitiers, dont les résultats sont rapportés sur la Figure II.6. Les auteurs ont conclu à l'issue de cette comparaison que le laitier algérien présente une faible basicité par rapport aux autres laitiers, d'où sa réactivité ne peut être classée que moyenne. L'hydraulicité modérée du laitier granulé algérien est probablement due à sa forte teneur en SiO₂ et sa faible teneur en MgO.

En termes de propriétés physiques, il a été rapporté que la masse volumique du laitier granulé algérien varie entre 2,8 [MAK 15] et 3,16 g/cm³ [ZEN 09], alors que sa finesse est souvent choisie entre 3000 et 4000 cm²/g [BEH 11]. En termes d'indice d'activité, il a été rapporté [HAD 11] que les indices d'activité du laitier granulé algérien à 7 jours et à 28 jours sont 0,54 et 0,70 respectivement, ce qui permet de le classer comme un laitier de réactivité faible à modérée.

Concernant la composition minéralogique, le laitier granulé algérien est principalement composé d'une phase amorphe identifiée sur les spectres de DRX à travers une bosse dans l'intervalle 2θ entre 20 ° et 40 ° [BOU 19]. Les quelques phases cristallisées se présentent sous forme de calcite, de fer et de traces de gehlénite (C₂AS), merwinite (C₃MS₂) ou akermanite (C₂MS₂) [BEH 11].

Tableau II.5. Quelques compositions chimiques de laitier granule algérien.

	[BOU 19]	[GUE 12]	[MAK 15]	[BIS 17]	[BOU 18]	[BOU 12]	[HAD 11]	[DEB 15]	[ZEN 09]
SiO ₂	42,2	35,85	39,38	38,9	38,2	40,1	41,2	40,0	39,59
Al ₂ O ₃	5,85	5,08	5,64	8,17	7,96	6,0	9,19	7,53	9,73
CaO	42,2	37,22	40,3	40,69	42,18	40,2	42,84	42,69	41,23
MgO	4,72	3,55	4,5	9,56	3,82	4,7	2,12	5,19	3,38
Fe ₂ O ₃	1,9	7,77	2,3	4,15	4,68	2,0	3,44	2,28	3,56
SO ₃	1,54	1,54	0,9	0,36	0,47	0,15	0,15	1,24	0,67
K ₂ O	0,43	0,27	0,46	0,89	0,65	1,2	0,7	0,74	0,58
Na ₂ O	0,12	0,12	0,13	0,1	0,2	/	0,1	0,04	0,01

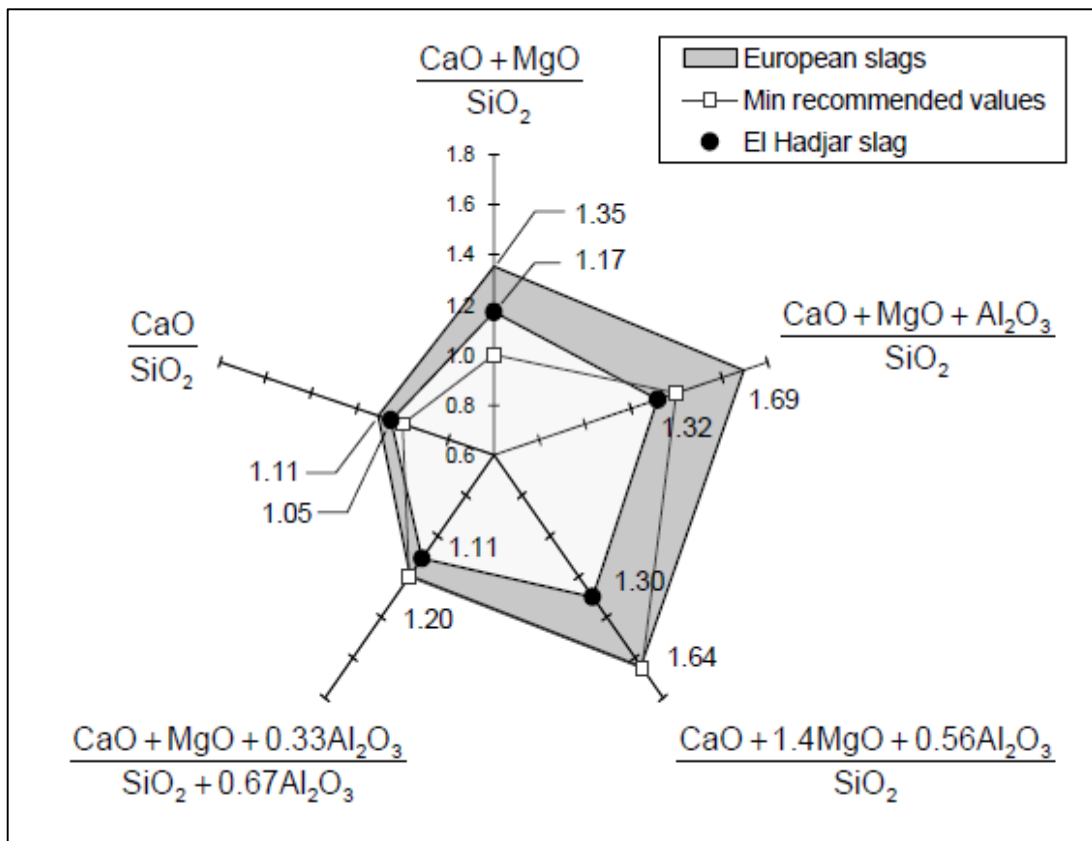


Figure II.6. Comparaison entre le laitier granulé algérien et d'autres laitiers en termes d'indices chimiques de réactivité [BEH 11].

Conclusion :

Le laitier granulé algérien est un sous produit qui a suscité l'intérêt de beaucoup de chercheurs ces dernières années en vue de le valoriser comme ajout dans la fabrication du ciment. L'utilisation de ce laitier comme ajout cimentaire, contribue à augmenter la production du ciment et à améliorer ses performances techniques, tout en préservant l'environnement.

Le laitier granulé algérien est souvent conforme à la norme NF 15167-1 (2006), malgré que son hydraulité mesurée par les différents indices chimiques semble faible à modérée.

L'amélioration de la réactivité du laitier granulé algérien est possible à travers différents traitements chimiques, thermiques ou mécaniques.

CHAPITRE III

Hydratation et activation du laitier granulé

Introduction :

Pour produire l'acier, on produit d'abord la fonte. La matière première que nécessite cette production est bien le minerai de fer contenant une forte teneur d'oxyde de fer. Le minerai, combiné à du coke comme combustible et à la chaux comme fondant, est alimenté dans un haut fourneau dans la partie basse duquel sont soufflés de larges volumes d'air chaud. Le fer est extrait du minerai et s'accumule au fond du haut-fourneau, et le laitier apparaît en dessus, sous forme d'une roche liquide (1500 °C environ) composée des parties non métalliques du minerai combinées à la chaux. Le laitier granulé est ensuite obtenu par refroidissement brutal pour être exploité comme addition réactive dans l'industrie cimentaire. De ce fait, la production du laitier n'est pas parfaitement contrôlable, sa composition et donc ses performances vont avoir une large gamme de variété.

Les études menées sur le laitier granulé de haut fourneau ont montré que ce matériau peut présenter des propriétés hydrauliques latentes. Les performances du laitier granulé semblent être améliorées soit lorsqu'il est activé par un alcali (traitement chimique), soit lorsque le matériau est finement broyé et utilisé avec du ciment Portland (traitement mécanique) ou encore lorsqu'il est traité thermiquement en augmentant la température de cure de la matrice cimentaire (traitement thermique) [OZB 16].

Par exemple et d'un point de vue chimique, le laitier granulé de haut fourneau, lorsqu'il est utilisé seul à température ambiante, ne développe pas de propriétés liantes dans l'eau, comme ce que l'on constate dans le cas de ciment. La formation des hydrates de propriété liante dans le cas de laitier granulé seul est négligeable à cause de la difficulté de sa dissolution dans l'eau. Cependant, dans un mélange laitier granulé – ciment, Behim [BEH 05] a rapporté que la dissolution du laitier granulé est plus importante et que le pH est l'un des facteurs déterminants qui gouvernent la formation des hydrates suite à la solubilité des composants principaux du laitier granulé de haut fourneau, en particuliers, la silice, l'alumine, la chaux et la magnésie. L'auteur estime qu'un fort pH augmente les concentrations des ions d'alumine et de silice et diminue celles des ions de calcium et de magnésie dans la solution interstitielle et améliore l'hydratation du laitier par la solubilité de la mince enveloppe imperméable qui couvre la surface des grains de laitier. De ce fait, le pH doit être supérieur à 11.5 pour activer l'hydratation du laitier. Cependant, pour un $\text{pH} < 11.5$ le laitier ne se dissout pas, par conséquent l'hydratation du silicate tricalcique est fortement ralentie. Rafat Siddique [SID 12] a rapporté que l'hydratation du laitier granulé implique son activation par les alcalis et sulfates pour former ses propres produits d'hydratation. Certains d'entre eux combinent avec les produits de ciment Portland pour former d'autres hydrates.

En réalité, l'amélioration de l'hydratation « la réactivité » du laitier ne se fait pas chimiquement seulement. Les études ont montré que le laitier granulé de haut fourneau, notamment celui de faible

hydraulicité, peut bénéficier d'une amélioration de sa réactivité par trois sortes de traitement, à savoir : chimique, mécanique et thermique. Dans ce chapitre, on exposera l'hydratation du laitier granulé et les différentes méthodes utilisées pour son amélioration.

1. Hydratation du laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier granulé de haut fourneau peut renfermer des propriétés liantes à caractère hydraulique, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, il peut produire, même que c'est très peu et d'une façon latente, des hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. Cependant, Ozbay et al. [OZB 16] ont rapporté que lorsque le laitier granulé s'est hydraté seul avec de l'eau, son hydratation initiale est nettement plus lente que celle du ciment Portland. Pour cela, le ciment Portland, les alcalis ou la chaux sont utilisés comme activateur pour accélérer la vitesse de réaction du laitier granulé. Par ailleurs, dans un système ciment-laitier granulé, l'hydratation des deux matériaux dépend principalement de la décomposition et la dissolution du laitier vitreux par les ions OH issus de l'hydratation du ciment. Les auteurs ajoutent que le principal produit d'hydratation du laitier avec le ciment Portland et l'eau sont les silicates de calcium hydraté (C-S-H) comme on le montre la **Figure III.1**.

Pal et al. [PAL 03], ont étudié l'hydratation d'une matrice composée de ciment Portland et du laitier granulé de haut fourneau. Les auteurs ont également rapporté que le principal produit d'hydratation qui se forme est le (C-S-H). Selon les mêmes auteurs, le mécanisme d'hydratation du laitier est différent de celui du ciment. Lorsque le laitier est mélangé à l'eau, l'hydratation initiale est beaucoup plus lente que celle du ciment Portland. Dans une matrice cimentaire, l'hydratation du laitier dépend de la décomposition et de la dissolution de la structure du laitier vitreux par les ions hydroxydes ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérés lors de l'hydratation du ciment et également de la teneur en alcali dans le ciment. Dans son processus d'hydratation, le laitier granulé consomme les ions ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et les utilise pour former des silicates de calcium hydraté (C-S-H) supplémentaires. Les auteurs pensent également qu'en général, l'hydratation du laitier en présence de ciment Portland, est une réaction en deux étapes. Initialement et au cours de l'hydratation précoce, la réaction prédominante est avec l'hydroxyde alcalin, mais la réaction subséquente est principalement avec l'hydroxyde de calcium.

A son tour, Behim [BEH 05] a étudié l'hydratation du laitier granulé et il l'a résumé en trois étapes distinctes. Dans un milieu aqueux de concentration basique, tel que celui d'une matrice cimentaire hydratée, tout d'abord les composants de laitier granulé se dissolvent dans l'eau de gâchage basique. La concentration du milieu sera donc modifiée suite à la dissolution des grains de laitier. Enfin, une précipitation des hydrates formés sera constatée, ce qui mènera à la condensation de la matrice et le développement des résistances mécaniques.

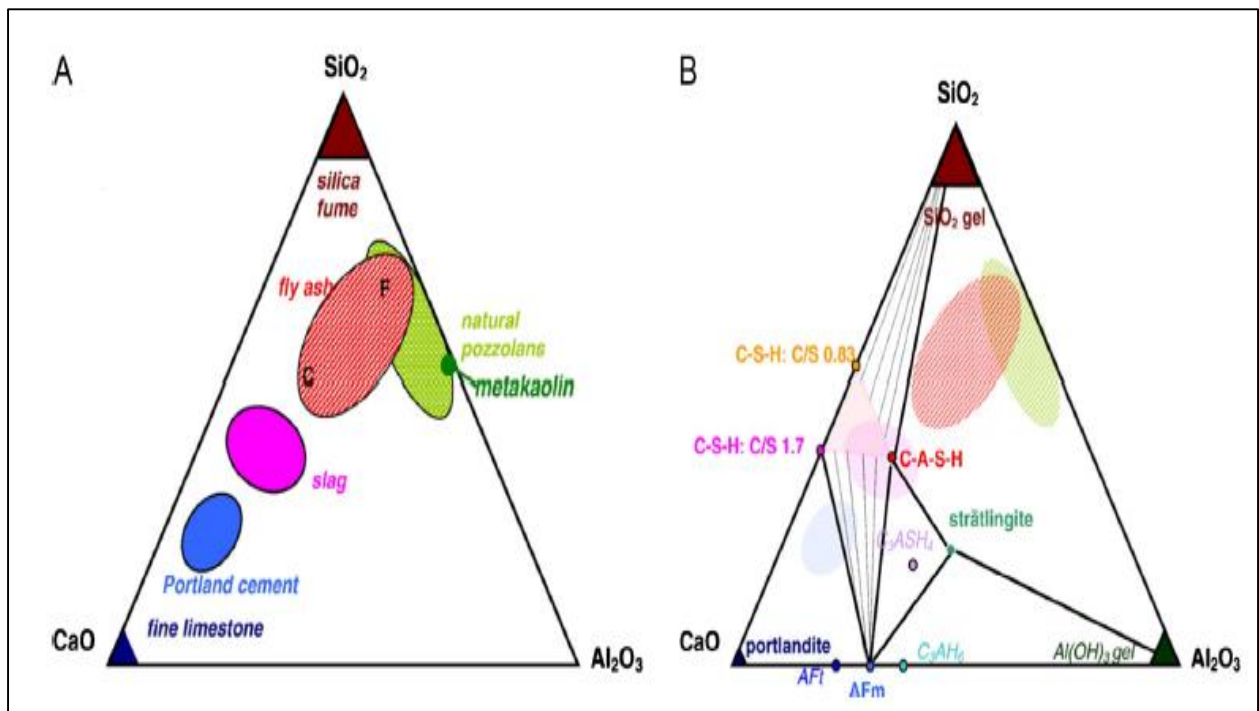


Figure III.1. (A) Diagramme ternaire (CaO - SiO₂ - Al₂O₃) des matériaux cimentaires. (B) Produits d'hydratation des matériaux cimentaires dans le système ternaire (CaO - SiO₂ - Al₂O₃).

Mais, pour pouvoir bien s'hydrater et participer à la formation des hydrates supplémentaires, le laitier granulé de haut fourneau doit satisfaire à certaines exigences, citées par la norme NF 15167-1 (2006) et par certains auteurs notamment [PAL 03]. En tant qu'addition au ciment Portland, le matériau doit d'abord avoir une finesse appropriée (entre 3500 et 4500 cm²/g). En général, une plus grande finesse se traduit par un meilleur développement de la résistance, mais en pratique, la finesse est limitée par des considérations économiques, des performances visées et des facteurs tels que les temps de prise, la demande en eau, le retrait et le développement de la résistance à jeune âge. La vitrosité ou la teneur en verre du laitier granulé est aussi très importante et considérée comme la plus critique pour son hydraulité. Cette propriété est principalement influencée par le mode et le taux de la trempe. Inversement, l'augmentation du contenu cristallin dans le laitier granulé réduit son hydraulité. Pal et al. [PAL 03] pensent qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la teneur en verre et l'hydraulité du laitier et par conséquent, la teneur élevée du laitier granulé en verre ne constitue pas une garantie que ce laitier soit réactif. Cependant, d'autres chercheurs [BEH 11, BIS 17] estiment qu'une teneur minimale en verre est nécessaire pour que le laitier granulé puisse montrer des propriétés satisfaisantes, et que cette teneur doit être au moins de l'ordre de 90% [SID 12]. A son tour, la composition chimique du laitier granulé joue un rôle clé dans son hydraulité. Pal et al [PAL 03] ont rapporté que, indépendamment des différents indices chimiques mentionnés au Chapitre 2, les métallurgistes classent les laitiers granulés comme

basiques ou acidiques et que plus le laitier est basique plus son hydraulicité est forte, en présence d'activateurs alcalins.

2. Activation du laitier granulé de haut fourneau :

Outre le comportement pouzzolanique que peut présenter le laitier granulé de haut fourneau, le comportement de ce matériau est essentiellement hydraulique latent [KUM 08]. L'amélioration de ce comportement dans le laitier granulé de haut fourneau nécessite son activation par l'une des méthodes suivantes :

2.1. Activation mécanique :

Le broyage du laitier granulé de haut fourneau permet de diviser la taille de ses particules et d'augmenter, par conséquent, la surface d'échange entre le laitier granulé et le milieu ambiant (ciment, eau et hydrates formés). Il est bien connu que les fines particules des additions minérales, utilisées comme substituant au ciment Portland, remplissent les vides et accélèrent l'hydratation du ciment en favorisant la nucléation hétérogène des hydrates, ce qui a un effet positif sur la réponse mécanique. Donc, l'augmentation de la finesse du laitier doit certainement favoriser l'hydratation de ses particules [SID 12]. De ce fait, la norme NF 15167-1 a limité la finesse minimale du laitier granulé pour pouvoir l'utiliser comme substituant au ciment à 2750 cm²/g. Behim [BEH 05] a rapporté que la finesse du laitier granulé de haut fourneau intervient favorablement lorsqu'il est utilisé dans une matrice cimentaire en jouant rôle déterminant dans l'évolution des résistances mécaniques, aussi bien à court terme qu'à long terme. Les ciments au laitier peuvent être activés mécaniquement dans un broyeur, ce qui va détruire le squelette du réseau silicaté et active les ions oxygènes.

Kumar et al. [KUM 08] ont étudié l'activation mécanique, à l'aide d'un vibro-broyeur, d'un laitier granulé et son effet sur les propriétés et la microstructure d'un ciment Portland au laitier, avec des taux de substitution entre 50 et 95% et des temps de broyage entre 3 et 60 minutes. Les principales conclusions de cette étude ont été:

- L'activation mécanique du laitier a un effet bénéfique sur le développement précoce de la résistance, tandis que la faible résistance initiale présente l'inconvénient majeur qui ne permet pas d'augmenter la proportion de laitier dans le ciment Portland au laitier classique.
- Les résistances à 1 et à 28 jours ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en laitier (jusqu'à 70%) activé à l'aide d'un vibro-broyeur, contrairement au laitier broyé traditionnellement à l'aide d'un broyeur à boulets, où la résistance à jeune âge a été faible.
- L'effet de la finesse du laitier sur le développement de la résistance mécanique à la compression a été plus remarquable que celui du clinker.

- L'activation mécanique entraîne des changements importants sur la microstructure au cours de l'hydratation. Elle améliore l'hydratation du C₃S du clinker et celle du laitier granulé du fait de l'augmentation de sa réactivité, elle accélère la formation et la consommation des cristaux de Portlandite et enfin elle abouti à une structure plus compacte notamment avec de fortes teneurs en laitier granulé.

Pour le laitier granulé de haut fourneau en provenance d'El-Hadjar, en Algérie, connu par sa faible hydraulité, certains auteurs ont rapporté l'efficacité de ce type de traitement et par conséquent, l'amélioration de la résistance à la compression du ciment mélangé au laitier, notamment à jeune âge. Par exemple, Bougara et al. [BOU 09] ont étudié la possibilité d'activer mécaniquement le laitier granulé algérien par son broyage à des surfaces spécifiques de Blaine (SSB) de l'ordre de 2500, 3600 et 4200 cm²/g. Ils ont constaté que le développement de la résistance à la compression avec l'âge dépendait de la finesse. A titre d'exemple, à 14 jours et pour 50% de teneur en laitier granulé, les finesses de 3600 et 4200 cm²/g ont conduit à des résistances similaires à celle du mortier témoin, tandis que la finesse de 2600 cm²/g a entraîné une perte de presque 50% de la résistance à la compression du mortier témoin. Behim et al. [BEH 11] ont constaté qu'avec 30% de laitier granulé algérien broyé à 2500, 3000, 3500 et 4000 cm²/g, les résistances à la compression à 14 jours ont atteint respectivement 65,55%, 82,91%, 75,07% et 100,28% de la résistance du mortier témoin.

Le traitement mécanique du laitier granulé de haut fourneau, c'est-à-dire son activation mécanique, consiste donc en son broyage prolongé. Plus le temps de broyage est long, plus la finesse est importante. Ce traitement se fait souvent dans les cimenteries lorsqu'il s'agit d'un ciment au laitier granulé à l'aide des broyeurs à haute énergie, tandis que dans les laboratoires de recherche, on fait souvent à des petits broyeurs à boulets ou des vibro-broyeurs (Figure III.2). Bouaziz et al. [BOU 17] ont étudié la différence entre le broyage conventionnel (à boulets) et celui à haute énergie sur les propriétés structurelles d'un laitier granulé de haut fourneau et leurs effets sur la réponse mécanique d'une pâte cimentaire contenant 45% de ce laitier broyé par les deux procédés, pour des périodes de broyage entre 1 et 10 heures. Les auteurs ont remarqué que le broyage à haute énergie a abouti aux meilleures performances, il a permis d'obtenir une finesse de 1,79 m²/g après seulement 3 heures de broyage et a fait augmenter le taux d'amorphisation du laitier, tandis que les effets du broyage traditionnel n'ont pas été remarquables. Les auteurs ont remarqué aussi que le broyage à haute énergie a un effet direct sur l'amélioration de la réactivité du laitier granulé algérien. Ils ont indiqué que l'augmentation de la résistance à la compression à court et à long terme, d'une pâte cimentaire, a été possible en utilisant 45% de laitier broyé à haute énergie. Cette étude a permis aux auteurs de conclure que le broyage à haute énergie a permis au

laitier granulé de diminuer la taille des cristaux de Portlandite et que cette activation mécanique a un effet direct sur les réactions pouzzolaniques qui se produisent dans la pâte de ciment de laitier (Figure III.3).

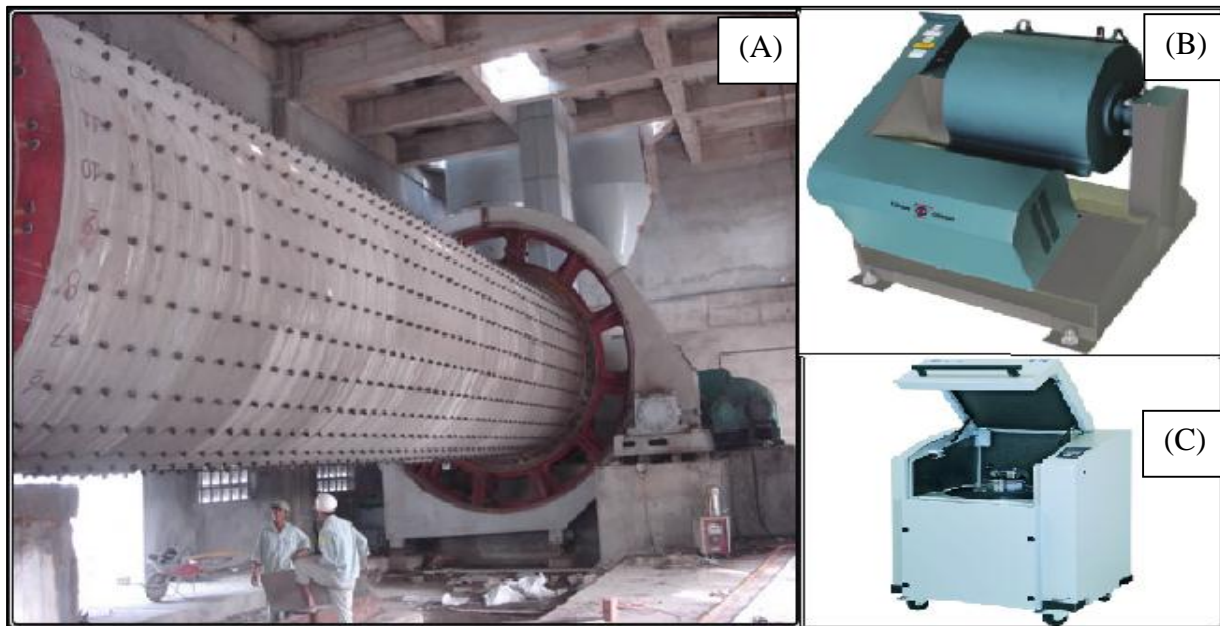


Figure III.2. (A) Broyeur de cimenterie. (B) Broyeur à boulets. (C) Vibro-broyeur.

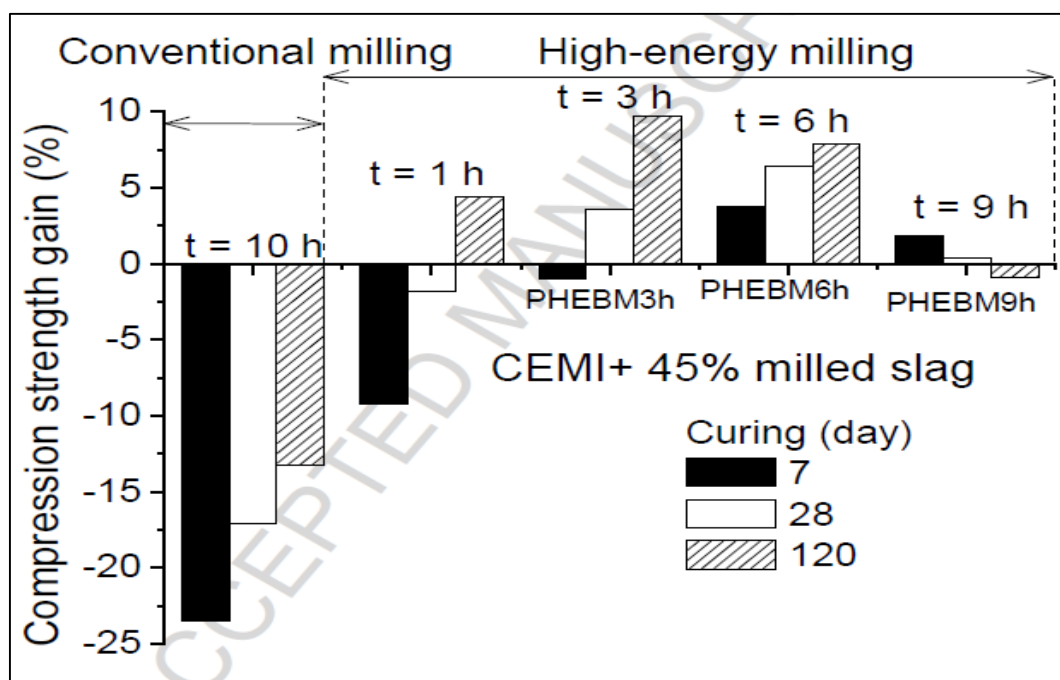


Figure III.3. Effet du type de broyage sur la résistance à la compression d'une pâte de ciment contenant 45% de laitier granulé de haut fourneau [BOU 17].

2.2. Activation thermique :

Le rendement du laitier granulé de haut fourneau dans une matrice cimentaire peut être amélioré également par l'augmentation de la température de cure, c'est ce que nous appelons l'activation thermique. Bien que ce type de traitement soit très répandu essentiellement dans les liants géopolymères, on ne s'intéresse dans cette partie du travail que de la littérature qui concerne l'activation thermique du laitier granulé utilisé comme addition au ciment Portland.

Barnett et al. [BAR 06], a rapporté que l'hydratation du laitier granulé de haut fourneau est beaucoup plus sensible à la température que celle du ciment Portland, c'est pourquoi la résistance à la compression précoce des mélanges ciment-laitier granulé est souvent considérablement améliorée sous des hautes températures de durcissement. Behim [BEH 05], a constaté que l'analyse des images prises par le MEB (microscope électronique à balayage) a permis d'identifier une différence significative entre la structure hydratée d'un ciment au laitier durci à 20 °C, et celle du même ciment lorsqu'il a fait l'objet d'un traitement thermique à 80 °C. L'auteur pense qu'un laitier peu réactif, à température ordinaire, peut donner de bonnes résistances lorsqu'il est traité thermiquement. De plus, l'étuvage améliore favorablement la compacité des ciments au laitier ce qui leur confère une grande résistance mécanique et résistance au gel. Le même auteur estime que les ciments à haute teneur en laitier, lorsqu'ils subissent un étuvage, se caractérisent par des C-S-H de structure dense et homogène avec absence d'Ettringite et que les sulfates sont piégés dans les gels de C-S-H sous forme de solution solide.

L'effet de la température de durcissement sur la réactivité du laitier granulé algérien a été étudié par Bougara et al. [BOU 09], où une augmentation de la résistance initiale avec l'augmentation de la température a été observée. La résistance à la compression sur 7 jours du mortier témoin durci à 20 °C était d'environ 22 MPa, tandis que les mortiers contenant 30% de laitier durci à 40 et 60 °C conduisaient à des résistances d'environ 27 et 28 MPa respectivement. Cependant, un effet négatif de la température de durcissement sur la résistance ultérieure a été remarqué. À 90 jours, la réduction de la résistance des mortiers durcis à haute température était plus prononcée que les mortiers correspondants durcis à 20 °C. Dans une autre étude, Bougara et al. [BOU 18] ont rapporté que l'augmentation de la température de durcissement montrait une hydratation accrue de la pâte contenant un laitier granulé algérien. Les auteurs ont observé que l'augmentation de la température de durcissement a abouti à l'amélioration de l'hydratation de la pâte contenant du laitier, par rapport à celle de la pâte sans laitier. La résistance à la compression à 28 jours du mortier CEM I durci à 40 °C était d'environ 63 MPa, tandis que les mortiers contenant 50% de laitier granulé durcis à 40 °C ont conduit à une résistance d'environ 98 MPa, ce qui a confirmé que les ciments mélangés au laitier étaient thermiquement activés (Figure III.3).

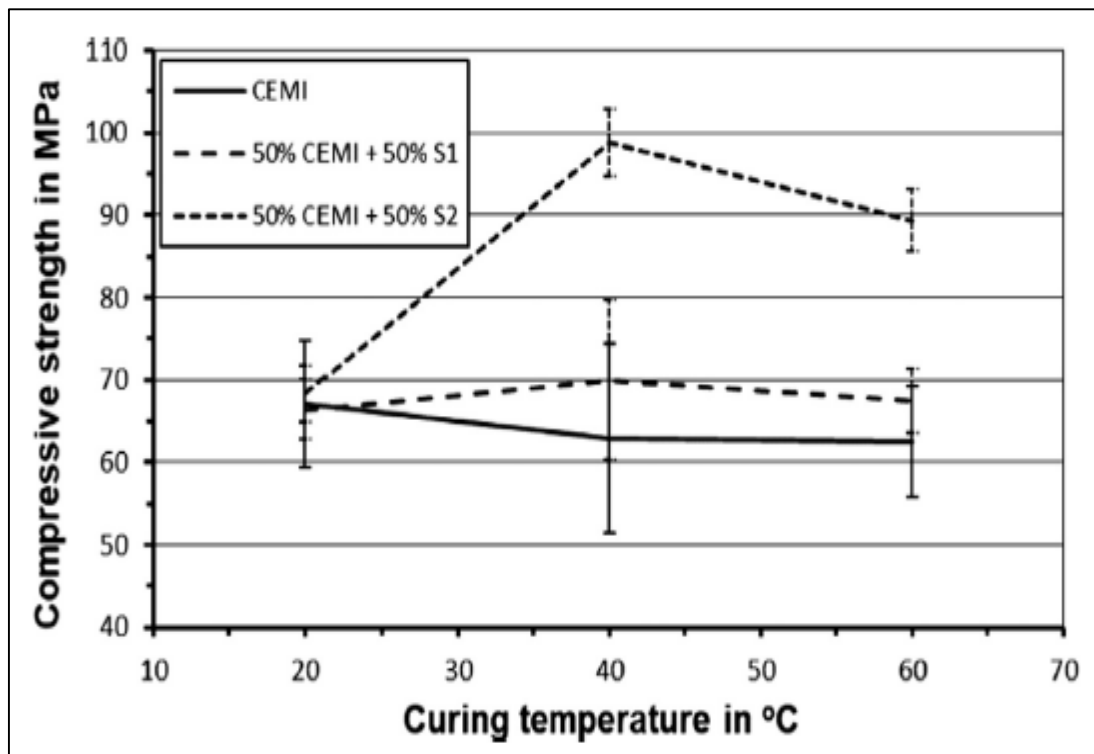


Figure III.3. Effet de la température de cure sur la résistance à la compression à 28 jours d'un ciment CEM I et des ciments contenant 50% de laitier [BOU 18].

2.3. Activation chimique :

Ce type de traitement est utilisé pour élaborer des liants ne contenant pas de ciment. Dans ce cas, des matériaux comme le laitier granulé, le Métakaolin, ...etc., considérés comme des sources aluminosilicatiques, appelés précurseurs, et qui nécessitent un activateur pour pouvoir donner des hydrates à propriétés liantes. Ce type de liants est connu sous le nom de géopolymères ou encore matériaux alcali activé (*Alkali Activated Materials AAM*). L'activation chimique du laitier granulé est très ancienne, Amer et al. [AME 21] ont rapporté que la première activation du laitier granulé revient à Kuhl en 1930, en utilisant l'hydroxyde de potassium (KOH). Un peu plus tard, les géopolymères ont été découverts par Davidovich en 1980.

Selon Behim [BEH 05], ce traitement consiste à maintenir le laitier granulé dans un milieu suffisamment basique, en ajoutant certaines substances chimiques. Ces additions doivent apporter la quantité de chaux nécessaire pour que le pH soit de l'ordre de 12 à 13. Le traitement chimique se fait par une activation alcaline, sulfatique ou sulfato-calcique. L'efficacité de l'activation chimique dépend de plusieurs paramètres liés au précurseur (laitier granulé dans ce cas), de l'activateur et du mode de cure. La composition chimique, la finesse et la teneur en verre (vitreusité) sont les critères les plus importants, concernant le laitier granulé. Le type de l'activateur, sa concentration et sa densité sont les paramètres de l'activateur les plus déterminants. Les activateurs les plus utilisés sont : les silicates de sodium (Na_2SiO_3), les silicates de potassium (K_2SiO_3),

l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH). Cependant, la température et la durée de cure influent directement sur l'efficacité de l'activation et des performances finales du liant [DUA 16, HAS 19, JOH 21, REN 21] (Figure III.4).

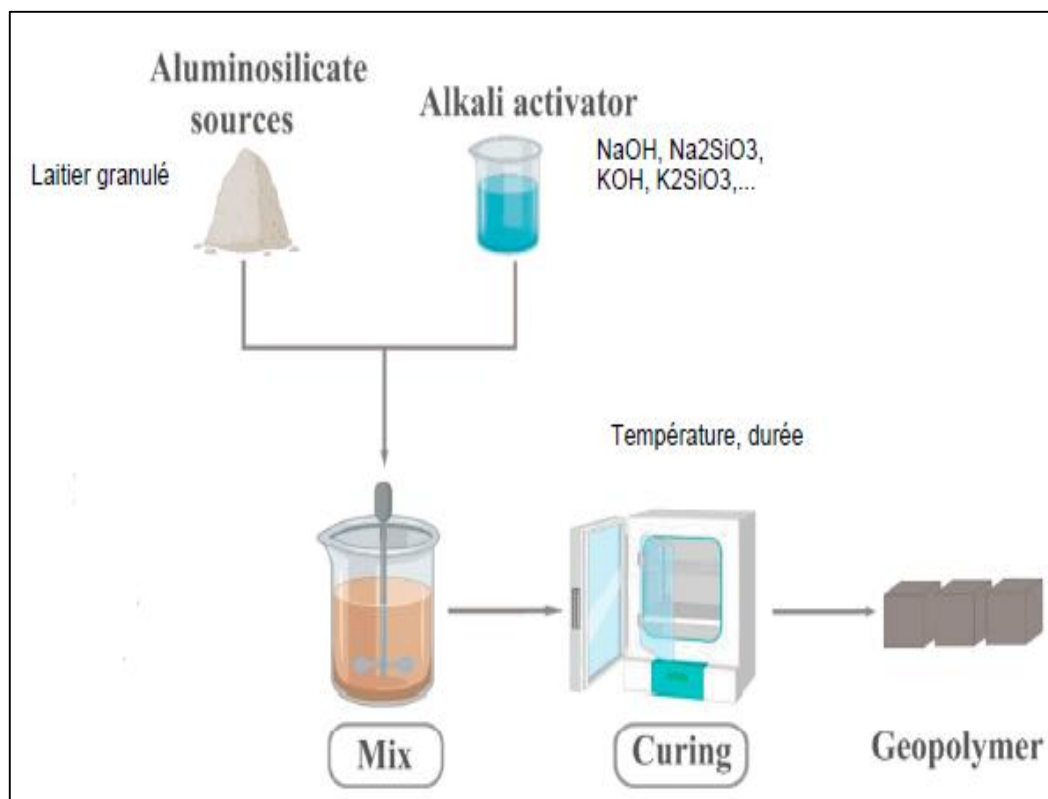


Figure III.4. Activation chimique du laitier granulé : élaboration de géopolymère [REN 21].

Cheah et al. [CHE 21] a rapporté que la réaction entre le laitier granulé et l'eau progresse rapidement au début, puis elle se ralentit après qu'une couche mince riche en gel de silice se forme à la surface des particules de laitier, ce qui empêche l'eau de réagir davantage avec le laitier. En présence d'un activateur, cette couche mince se dissout et la réaction se poursuit. A leur tour, Khan et al. [KHA 17] ont rapporté que l'ajout de NaOH détruit les revêtements amorphes imperméables autour des grains de laitier et stimule les réactions d'hydratation, y compris la réaction pouzzolanique, et libère ainsi les propriétés cimentaire latentes des particules fines de laitier.

Le laitier granulé algérien a fait l'objet d'un traitement chimique en vue d'élaborer des liants géopolymères par plusieurs chercheurs. Prenons l'exemple de l'étude publiée par Bougara et al. [BOU 09]. Les auteurs ont utilisé les solutions de NaOH et KOH (avec une concentration de 4 M), comme activateurs alcalins pour activer chimiquement le laitier granulé algérien qui a été broyé à 3600 cm²/g. Ils ont évalué la résistance à la compression de mortiers à 100% de laitier durcis à 20 °C. Les auteurs ont rapporté que le laitier granulé algérien avait efficacement réagi avec les deux solutions alcalines et que la résistance à la compression des mortiers préparés à partir du laitier activé par les alcalis augmentait avec l'âge. De même, Makhloufi et al. [MAK 15] ont utilisé 1%

de NaOH comme activateur alcalin pour les mortiers contenant le laitier granulé algérien, du calcaire et de la pouzzolane. Il a été rapporté que l'activateur chimique jouait un rôle important dans l'augmentation de la résistance qui était un peu plus élevée que celle des mortiers témoins.

Conclusion :

À l'issue de ce chapitre, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le laitier granulé de haut fourneau est considéré comme liant hydraulique latent. Il renferme une composition en oxydes proche de celle du ciment Portland, mais contrairement au ciment Portland, la réaction du laitier granulé avec l'eau est très latente.
- En présence du ciment, l'hydratation du laitier granulé s'accélère et des phases hydratées supplémentaires, semblables à celles produites par le ciment, se précipitent ce qui améliore la compacité et la résistance mécanique de la matrice cimentaire.
- L'activation du laitier granulé consiste à améliorer son hydratation. Elle se fait à l'aide d'un traitement mécanique, d'un traitement thermique ou encore un traitement chimique.
- L'activation mécanique désigne le broyage du matériau. Plus les particules de laitier granulé sont fines, plus la surface d'échange entre ces particules et le milieu ambiant (eau, ciment, hydrates) est grande et plus l'hydratation du laitier est avancée.
- L'activation thermique consiste à faire durcir la matrice cimentaire contenant du laitier granulé sous une température de cure plus ou moins élevée. Les recherches ont montré que l'hydratation du laitier est considérablement améliorée sous l'effet de température.
- L'activation chimique consiste à maintenir le laitier granulé dans un milieu suffisamment basique, en ajoutant certaines solutions chimiques appelées activateurs. Cette procédure permet d'élaborer un liant ne contenant le ciment traditionnel, appelé géopolymère.

CHAPITRE IV

Les effets d'utilisation du laitier granulé algérien

Introduction :

Dans plusieurs pays du monde, tels que la France, le Japon, les États Unis, la Chine, etc., le laitier granulé de haut fourneau est largement exploité, notamment en industrie cimentaire. En Algérie, la seule ressource de ce matériau est bien le complexe sidérurgique d'El Hadjar (Sider), à Annaba. Ce complexe qui a ouvert ses portes en 1969 est l'un des très rares complexes sidérurgiques en Afrique. Malheureusement, l'instabilité économique, administrative et sociale a fait que la production annuelle en acier de ce grand pôle industriel reste en dessous de 1M de tonnes (près de 700 mille tonnes).

Comme la production du laitier granulé est proportionnelle à celle de l'acier, les quantités produites par Sider restent très faibles par rapport à la production du laitier dans les pays industrialisés, cependant, l'exploitation de ce *déchet* pose de vrais problèmes pour le pays. En l'absence des ressources fiables sur la production et la consommation annuelle du laitier granulé algérien, nous prenons comme exemple les données rapportées dans la thèse doctorale de Mourad Behim [BEH 05] qui donne au moins une idée sur la production nationale en laitier granulé (Tableau IV.1).

La valorisation du laitier granulé algérien dans l'industrie cimentaire est également très limitée. Le coût de ce matériau (vente et transport) par rapport à d'autres additions comme le calcaire, ses faibles performances et l'absence d'une politique industrielle écologique et environnementale en Algérie sont les causes principales qui ont fait que l'exploitation de ce produit dans l'industrie cimentaire reste limitée. Cependant, un très grand nombre de travaux de recherche ont été réalisés aux seins des universités nationales sur l'exploitation et la valorisation du laitier granulé algérien comme addition minérale au ciment. L'objectif de ce chapitre est donner une recherche bibliographique sur les principaux résultats de ces recherches.

Tableau IV.1. Production du laitier par les hauts fourneaux d'El Hadjar [BEH 05].

Désignation	Production (x10 ³)									
	1987		1988		1989		1995		2002	
	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%
Granulé	167	57.3	484	71.2	347	62.7	129	34	467	82.5
Cristallisé	124	41.7	196	28.8	206	37.3	250	66	99	17.5
Total	291	100	680	100	553	100	379	100	566	100

1. Effets du laitier granulé algérien sur les propriétés fraîches :

1.1. Maniabilité :

Malheureusement, seulement quelques études sont disponibles sur l'effet du laitier granulé algérien sur la maniabilité des mortiers et des bétons. Bouaziz et al. [BOU 17] ont examiné l'ouvrabilité des pâtes de ciment au laitier à l'aide du test d'écoulement. Les chercheurs ont remarqué que la pâte de référence a présenté la plus basse consistance, tandis que le mélange contenant 55% de ciment et 45% de laitier granulé algérien, broyé à haute énergie pendant une heure, a abouti à l'amélioration de cette consistance d'environ 43%. Boukendakdji et al. [BOU 12] ont étudié l'effet d'incorporer jusqu'à 25% en poids (avec un incrément de 5%) de laitier granulé algérien ($SSB = 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$) sur les propriétés fraîches d'un béton auto-plaçant (BAP) ayant un rapport eau/ciment de 0,4. L'écoulement du BAP a été évalué à l'aide du temps et diamètre d'affaissement, écoulement à l'anneau (J-Ring), temps d'écoulement dans l'essai à l'entonnoir (V-Funnel), hauteur de remplissage de la boîte en U (U-Box test) et stabilité au tamis. Les principaux résultats ont été les suivants : (i) Bien que les valeurs de l'écoulement sans anneau soient plus élevées que celles avec l'anneau (J-Ring test), les auteurs ont remarqué une augmentation de l'écoulement avec l'augmentation de la teneur en laitier. (ii) À partir du test de temps d'écoulement T50, une bonne fluidité a été observée avec l'augmentation de la teneur en laitier granulé jusqu'à 15%, ensuite le temps d'écoulement a augmenté mais avec un peu de ressuage et de ségrégation. (iii) À partir des résultats de rétention d'ouvrabilité à 0, 30, 60 et 90 min après malaxage, les auteurs ont rapporté que les mélanges de béton sans ou avec 10% de laitier granulé ont perdu une partie de leur ouvrabilité même à 30 min après malaxage, alors que pour 15% de teneur en laitier granulé, la maniabilité a été maintenue jusqu'à environ 60 min après le malaxage. (iv) Les résultats du temps d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel) ont été acceptables pour une teneur en laitier granulé de 20%, mais le temps optimal a été obtenu pour plutôt une teneur de 15% en laitier granulé. (v) Tous les résultats ont satisfait le test de hauteur de remplissage de la boîte en U (U-Box test), puisque la valeur recommandée de 300 mm a été obtenue quelle que soit la teneur en laitier granulé, la hauteur de remplissage maximale a été obtenue pour 15% de teneur en laitier granulé. (vi) D'après les résultats du test au tamis de 5 mm, des teneurs de 20% et 25% en laitier granulé ont donné des taux de passants élevés, ce qui peut entraîner, selon les auteurs, des effets négatifs de ressuage et de ségrégation. Les auteurs ont conclu que le remplacement partiel du ciment Portland par le laitier granulé algérien s'est avéré très bénéfique pour les propriétés fraîches du BAP, où globalement, une amélioration d'écoulement du BAP a été constatée pour une teneur en laitier granulé algérien de 15% (Figure IV.1). Derabla et Benmalek [DER 14] ont travaillé sur le même sujet en utilisant 20 et 40% en poids de laitier granulé algérien ($SSB = 2280 \text{ cm}^2/\text{g}$) dans

leurs mélanges de BAP. En termes d'ouvrabilité, les auteurs ont observé que l'utilisation du laitier granulé a permis de réduire la quantité de superplastifiant nécessaire pour atteindre une fluidité donnée. Au moment que le BAP témoin a été besoin de 9,82 (kg/m³) de superplastifiant pour obtenir un étalement de 61 cm, les BAPs contenant 20% et 40% de laitier granulé algérien n'ont été besoin que de 7,06 et 6,03 kg/m³ de superplastifiant, respectivement, pour atteindre à peu près le même étalement. Les résultats du temps d'écoulement de V-Funnel (entre 6,5 et 8,15 s) ont indiqué que les mélanges de BAP ont satisfait aux exigences du temps d'écoulement admissible. L'augmentation de la teneur en laitier a conduit à un allongement du temps d'écoulement à travers l'entonnoir. D'après les résultats du test au tamis, tous les BAP ont eu une stabilité élevée (laitance < 2,5%) et par conséquent ils ont eu une résistance élevée à la ségrégation et au ressuage. Concernant la capacité de remplissage estimée par la boîte en L, les auteurs ont rapporté que les résultats ont été similaires à ceux couramment retrouvés dans la littérature. L'effet du laitier granulé algérien a été plus évident dans les travaux de Hadj-sadok et al. [HAD 12] lorsqu'ils ont examiné l'affaissement des mélanges de béton contenant 0, 15, 30 et 50% en poids de laitier granulé (SSB = 4150 cm²/g) comme substitution de ciment Portland. Les auteurs ont remarqué que la fluidité des bétons a augmenté avec la teneur en laitier granulé, les d'affaissements ont été 75, 80, 97 et 104mm respectivement, pour un rapport **w/b** de 0,65 et 55, 61, 58 et 64mm respectivement pour un rapport **w/b** de 0,42.

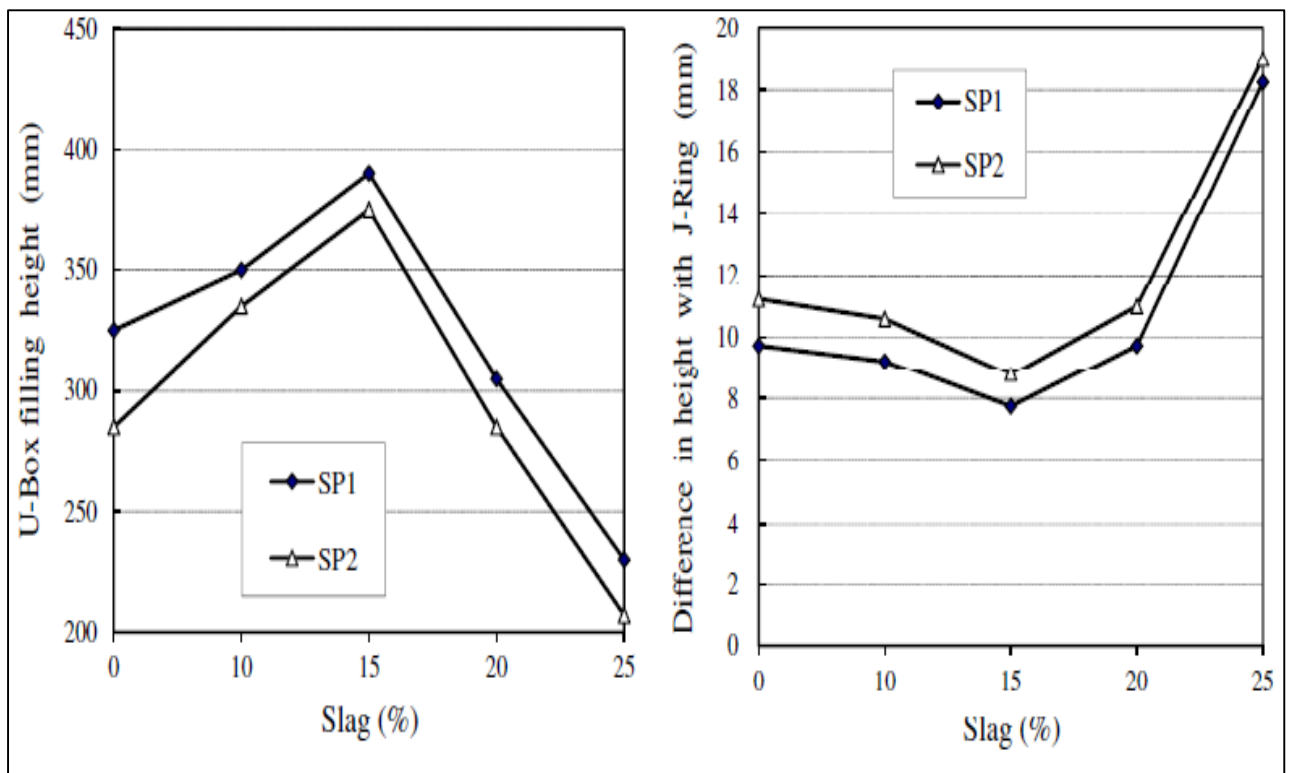


Figure IV.1. Résultats de l'effet du laitier granulé sur l'écoulement d'un BAP [BOU 12].

1.2. Temps de prise :

Bougara et al. [BOU 09] ont étudié l'effet du laitier granulé algérien ($SSB = 3600 \text{ cm}^2/\text{g}$) et utilisé le remplacement du ciment Portland, sur le temps de prise du mortier. Les chercheurs ont enregistré 145, 210 et 221 mn pour le temps de début de prise contre 188, 279 et 290 mn concernant le temps de fin de prise, pour des mortiers contenant 0, 30 et 50% respectivement, de laitier granulé algérien. Ils ont attribué ce retard de prise à l'effet de dilution et aux propriétés latentes de ce laitier.

1.3. Propriétés rhéologiques :

Le comportement rhéologique est souvent étudié afin de décrire la manière dont les matériaux cimentaires peuvent être utilisés à l'état frais, il donne une idée sur leur ouvrabilité, leur fluidité, leur pompabilité, etc. Boukendakdji et al. [BOU 12] ont étudié l'effet de la teneur en laitier granulé algérien sur la viscosité plastique et le seuil de cisaillement d'un béton auto-plaçant BAP. Les auteurs ont rapporté que les valeurs des paramètres rhéologiques ont été en diminution avec l'augmentation de la teneur en laitier granulé dans le BAP, quel que soit le superplastifiant utilisé (Figure IV.2). Derabla et Benmalek [DER 14] ont utilisé les résultats des tests d'ouvrabilité (diamètre d'étalement D, temps nécessaire pour atteindre le diamètre d'étalement de 500 mm : T500, et la densité du BAP frais) pour calculer la viscosité plastique (en Pa.s). Le résultat du BAP témoin a été de 150 Pa.s, alors que des valeurs de 121 et 107 Pa.s ont été obtenues pour des BAPs contenant respectivement 20% et 40% de laitier granulé algérien. Étant donné que la viscosité plastique a diminué avec l'utilisation et l'augmentation de la teneur en laitier granulé, les auteurs ont conclu que le laitier granulé algérien a abouti à un BAP plus visqueux par rapport au BAP témoin.

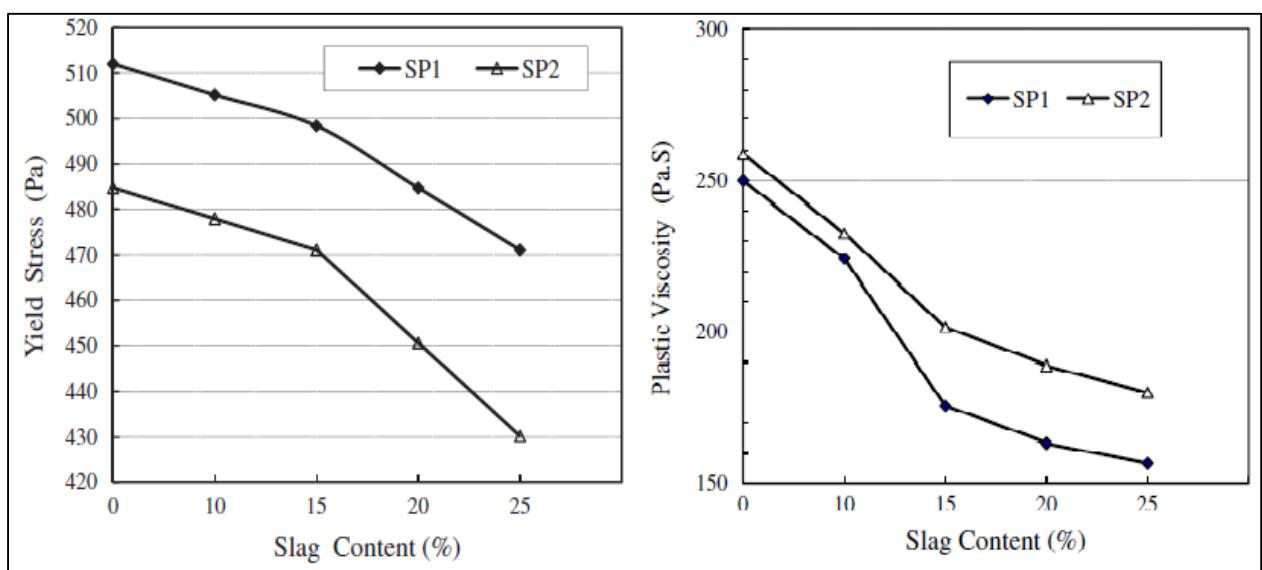


Figure IV.2. L'effet du laitier granulé sur les paramètres rhéologiques d'un BAP [BOU 12].

2. Effet du laitier granulé algérien sur l'hydratation et les propriétés mécaniques :

2.1. Chaleur d'hydratation :

Bougara et al. [BOU 10b] ont évalué la chaleur d'hydratation libérée d'une pâte contenant 50% de ciment Portland et 50% de laitier granulé algérien ($w/b = 0,4$). L'objectif a été de comparer la chaleur d'hydratation de cette variante avec celles de deux autres pâtes contenant 100% de ciment et un mélange 50% de ciment et 50% de laitier en provenance d'Angleterre. Les deux laitiers ont été broyés à une surface spécifique de Blaine de $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ tandis que la finesse du ciment a été $420 \text{ m}^2/\text{kg}$. La chaleur d'hydratation totale après 72h a été : (i) pour la variante de 100% ciment : 281 kJ/kg . (ii) pour la variante contenant le laitier granulé anglais : 160 kJ/kg . (iii) pour la variante contenant le laitier granulé algérien: 130 kJ/kg . Étant donné que la chaleur totale générée par le mélange contenant le laitier granulé algérien a été inférieure à la moitié de celle produite par le ciment Portland, il a été conclu que ce matériau contribue très peu au dégagement de chaleur pendant l'hydratation. Boubekeur et al. [BOU 17b] ont utilisé un calorimètre semi adiabatique placé dans une chambre climatique à 20 °C pour mesurer la chaleur d'hydratation dégagée par un mortier contenant 30% de laitier granulé algérien ($3150 \text{ cm}^2/\text{g}$), en remplacement de ciment, et un mortier témoin (100% de ciment). Les auteurs ont rapporté qu'en raison de sa réaction hydraulique latente, l'incorporation du laitier granulé algérien dans le ciment a abouti à une chaleur d'hydratation inférieure ($\approx 250 \text{ J/g}$) par rapport à celle produite par le ciment seul ($\approx 300 \text{ J/g}$). Les chercheurs ont indiqué également que les courbes de chaleur d'hydratation ont montré une faible chaleur d'hydratation au cours du premier jour, elle se situait à environ 75% de la chaleur d'hydratation finale (Figure IV.3). L'hydraulicité du laitier s'est activée après 3 jours ce qui a provoqué une augmentation de l'hydratation atteignant 97% de sa valeur finale.

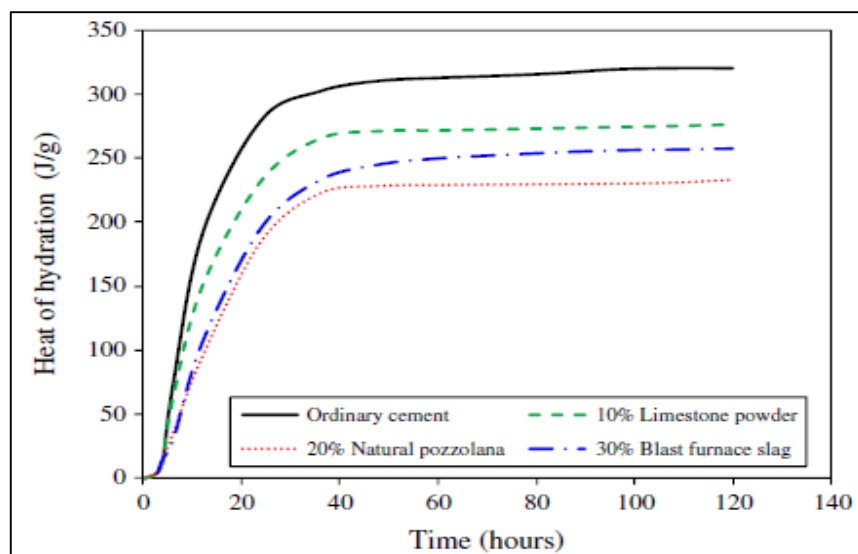


Figure IV.3. Effet du laitier granulé algérien sur la chaleur d'hydratation [BOU 17b].

2.2. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques couramment utilisées pour évaluer l'efficacité des additions minérales et leur effet sur la pâte, le mortier ou le béton. Cela dépend de nombreux facteurs tels que la teneur et la finesse de ces additions, le rapport eau/liant, les conditions de durcissement, etc. Les résultats des tests de résistance à la compression de en présence du laitier granulé algérien, recueillis à partir de plusieurs recherches, sont répertoriés dans le **Tableau IV.2**.

Tableau IV.2. Quelques résultats de résistance à la compression donnés par des pâtes, des mortiers et des bétons contenant le laitier granulé algérien.

Type	Référence	% de laitier	Age (en jour): Résistance à la compression (en MPa)					
Pâte	[BOU 17]	0	(7): 52	(28): 55	(120): 57			
		45	(7): 52	(28): 57	(120): 63			
Pâte	[BOU 10b]	0	(1): 10,86	(7): 36,36	(28): 67,1	(90): 76,93		
		50	(1): 4,27	(7): 27,44	(28): 66,4	(90): 80,87		
Mortier	[BEH 11]	0	(2): 25,3	(7): 35,7	(28): 48,3	(90): 54,4		
		10	(2): 25,9	(7): 37,4	(28): 48,1	(90): 51,0		
		20	(2): 20,8	(7): 30,2	(28): 43,5	(90): 49,2		
		30	(2): 16,4	(7): 29,6	(28): 40,5	(90): 46,4		
		40	(2): 13,0	(7): 23,4	(28): 33,0	(90): 40,0		
		50	(2): 9,1	(7): 17,0	(28): 32,5	(90): 38,5		
		60	(2): 6,4	(7): 11,9	(28): 25,8	(90): 31,4		
		70	(2): 5,6	(7): 11,2	(28): 22,5	(90): 22,5		
		80	(2): 4,8	(7): 9,8	(28): 15,6	(90): 19,0		
		90	(2): 6,2	(7): 7,9	(28): 10,2	(90): 14,5		
		100	(2): 0	(7): 0,6	(28): 1,1	(90): 2,5		
		Mortier	[ABD 17]	0	(3): 28	(28): 53	(90): 70	
				20	(3): 17	(28): 59	(90): 78	
				40	(3): 13	(28): 62	(90): 90	
60	(3): 8			(28): 50	(90): 76			
80	(3): 5			(28): 43	(90): 59			
Mortier	[HAD 11]	0	(2): 24,3	(7): 35,3	(28): 58,9	(90): 68,6		
		30	(2): 13,9	(7): 30,8	(28): 52,5	(90): 67,2		
		50	(2): 6,6	(7): 19	(28): 41	(90): 55,7		
Béton	[HAD 12]	0	(7): 51.85	(28): 61.71	(90): 65.57			
		15	(7): 43.18	(28): 60.98	(90): 63.17			
		30	(7): 43.34	(28): 59.93	(90): 65.31			
		50	(7): 24.77	(28): 53.52	(90): 62.11			
	Béton	[KHO 15]	0	(7): 31	(28): 38			
			10	(7): 27	(28): 37.5			
		15	(7): 28	(28): 39				

2.2.1. Pâtes :

Bouaziz et al. [BOU 17] ont étudié l'effet de l'incorporation de 45% de laitier granulé algérien finement broyé sur la résistance à la compression des pâtes cimentaires. Ils ont trouvé que le broyage à haute énergie a été plus bénéfique que le broyage conventionnel. Il a été constaté qu'un gain de 8,8% par rapport à la résistance du témoin, a été obtenu après 120 jours de durcissement lorsque le laitier granulé algérien est utilisé malgré la réactivité modérée de ce matériau. Bougara et al. [BOU 10b] ont rapporté que le laitier granulé algérien a contribué très peu à la résistance initiale en raison de son faible indice d'hydraulicité. Ils ont constaté qu'au bout de 3 jours, la résistance du mélange contenant 50% de ce laitier n'a été que d'environ 50% de celle du mortier témoin. Cependant le gain de résistance de 22%, enregistré après 90 jours, a été attribué au laitier granulé algérien.

2.2.2. Mortiers :

Behim et al. [BEH 11] ont étudié l'effet du laitier granulé algérien sur la résistance à la compression jusqu'à 90 jours, en faisant varier sa finesse (de 2500 à 4000 cm^2/g par incrément de 500 cm^2/g) et sa teneur (de 0 à 100% par incrément de 10%). Ils ont conclu que :

- Pour la finesse de 4000 cm^2/g et pour tout âge, les mortiers contenant jusqu'à 40% de laitier granulé ont présenté une résistance équivalente à celle du mortier de référence.
- Pour 50% de laitier granulé, la résistance relative a été encore supérieure à 90% de celle du mortier témoin.
- À jeune âge, le laitier n'a présenté qu'un effet de remplissage lié à sa finesse.

Après quelques jours, la résistance à la compression a été améliorée principalement en raison de l'hydraulicité du laitier granulé. L'effet de la finesse du laitier granulé algérien, de taux de substitution et du type de ciment sur la résistance à la compression des mortiers ont fait l'objet d'une étude menée par Guetteche et al. [GUE 12]. Les auteurs ont rapporté que, pour une finesse donnée, la résistance à la compression à 2 et à 28 jours a été en diminution avec l'augmentation de la teneur en laitier granulé algérien. Makhloufi et al. [MAK 15] ont étudié le remplacement de 50% du ciment Portland par le laitier granulé algérien. Les chercheurs ont remarqué que par rapport au mortier témoin, la résistance à la compression des mortiers contenant le laitier a diminué de 24%, de 20%, de 11% et de 5% à 7, 28, 90 et 180 jours, respectivement. À leur tour Abdelli et al. [ABD 17] ont publié une étude, qui porte sur le suivi de l'évolution de la résistance mécanique à la compression, des mortiers confectionnés à partir d'un ciment mélangé avec le laitier granulé algérien finement broyé. Au moment que le mortier de référence élaboré avec 100% de ciment

Portland a présenté la plus grande résistance à la compression à jeune âge, les mortiers contenant le laitier granulé algérien ont abouti aux meilleures résistances au-delà de 28 jours.

2.2.3. Bétons :

Boukandakji et al. [BOU 12] ont travaillé sur la valorisation du laitier granulé algérien. Ils ont rapporté que l'augmentation de la teneur en laitier a causé une diminution de la résistance à la compression à tout âge. Cependant, cette diminution a été moins importante à 90 jours où seulement 3% et 6% de perte de résistance par rapport au béton témoin, ont été enregistrées pour des taux de substitution de 10% et 15% respectivement. Deboucha et al. [DEB 15] ont rapporté que l'incorporation du laitier granulé algérien jusqu'à 30% a amélioré la résistance à la compression des bétons à moyen et long terme. Le gain de résistance à 28 jours a été de 8% lorsque la teneur en laitier granulé a été 20%, alors qu'à 90 jours un gain de 2% a été obtenu pour une teneur de 30% en laitier granulé algérien. Hadj-sadok et al. [HAD 12] ont étudié le développement de la résistance à la compression des bétons fabriqués avec et sans le laitier granulé algérien, en utilisant deux rapports eau/liant (w/b). Ils ont remarqué que la réduction du rapport w/b de 0,65 à 0,42 avait un effet bénéfique sur la résistance à la compression des bétons contenant le laitier granulé. Malgré la faible résistance à la compression obtenue à 7 jours, une bonne amélioration a été observée sur ces bétons après 28 et 90 jours. L'incorporation du laitier granulé algérien à 50% a permis d'atteindre 95 % de la résistance du béton témoin à 90 jours. Derabla et Benmalek [DER 14] ont réalisé des tests de résistance à la compression sur des bétons auto-plaçants (BAPs) contenant 0, 20 et 40% de laitier granulé algérien finement broyé. Ils ont rapporté que l'effet physique (de finesse) du laitier granulé a amélioré la réponse mécanique du béton à un âge précoce, cependant son effet hydraulique s'est produit à long terme. Les auteurs ont constaté que les résistances à la compression à long terme des échantillons traités thermiquement (60 °C) ont diminué par rapport à celles obtenues dans des conditions normales de cure (20 °C), ce qui a été attribué à la perte d'humidité causée par l'augmentation de la température. Khouadjia et al. [KHO 15] ont rapporté que l'incorporation de 10% et 15% de laitier granulé algérien finement broyé dans le béton, en remplacement du ciment, a provoqué une légère diminution de la résistance à la compression à 7 jours. Cependant, une augmentation de résistance a été obtenue après 28 jours de durcissement.

D'après les études mentionnées ci-dessus, l'hydraulicité modérée du laitier granulé algérien est évidente, on peut conclure que son incorporation dans la matrice n'a pas souvent donné les mêmes résultats. L'amélioration de la résistance à la compression des pâtes de ciment a été obtenue lorsque le laitier a été broyé à haute finesse (SSB supérieur à 5000 cm²/g) et utilisé jusqu'à 50% en remplacement du ciment. Cependant, l'amélioration de résistance dans le cas des mortiers et

bétons n'est obtenue que pour des faibles taux de substitution, des grandes finesesses, un faible rapport w/b et l'utilisation de superplastifiant.

2.3. Produits d'hydratation :

Bouaziz et al. [BOU 17] ont utilisé la Diffraction des rayons X (DRX) et l'analyse thermique calorimétrique (DSC) pour évaluer l'avancement d'hydratation des pâtes contenant 45% de laitier granulé algérien par rapport à la pâte témoin (100 % de ciment), après 120 jours de durcissement. À partir des spectres XRD, les auteurs ont remarqué une diminution de l'intensité, un élargissement et un léger décalage des pics relatifs à la Portlandite, ce qui a été attribué aux réactions entre le laitier granulé et cette Portlandite. Cependant, selon les spectres de DSC, des pics endothermiques entre 100 et 250 °C et entre 400 et 550 °C ont été observés. Le premier pic a été lié à la décomposition de l'Ettringite, à la déshydratation du C-S-H et du C-A-H, tandis que le second a été attribué à la décomposition de la Portlandite. Les auteurs ont mesuré le changement d'enthalpie dans les deux pics; ils ont remarqué une légère augmentation du premier en raison de la formation secondaire de C-S-H à partir de réactions entre le laitier granulé et la Portlandite. Cependant, l'aire du deuxième pic a diminué. Bougara et al. [BOU 18] ont examiné l'influence du taux de remplacement de ciment (30, 50 et 70% en poids), du rapport w/b (0,35, 0,4 et 0,45), de la finesse (250, 310, 410 et 500 m²/kg) et de la température de durcissement (20, 40 et 60 °C) sur la réactivité du laitier granulé algérien et sa contribution à la progression de l'hydratation. Les chercheurs ont utilisé l'analyse thermogravimétrique (ATG) pour évaluer le degré d'hydratation à différents âges, en mesurant l'eau chimiquement liée (perte de masse entre 105 et 450 °C). Il a été remarqué que la quantité d'eau liée a diminué avec l'augmentation de la teneur en laitier granulé (Figure IV.4a). Il a également été constaté que la quantité d'eau liée a augmenté avec l'augmentation du rapport w/b (Figure IV.4b), en particulier à 7 et 28 jours.

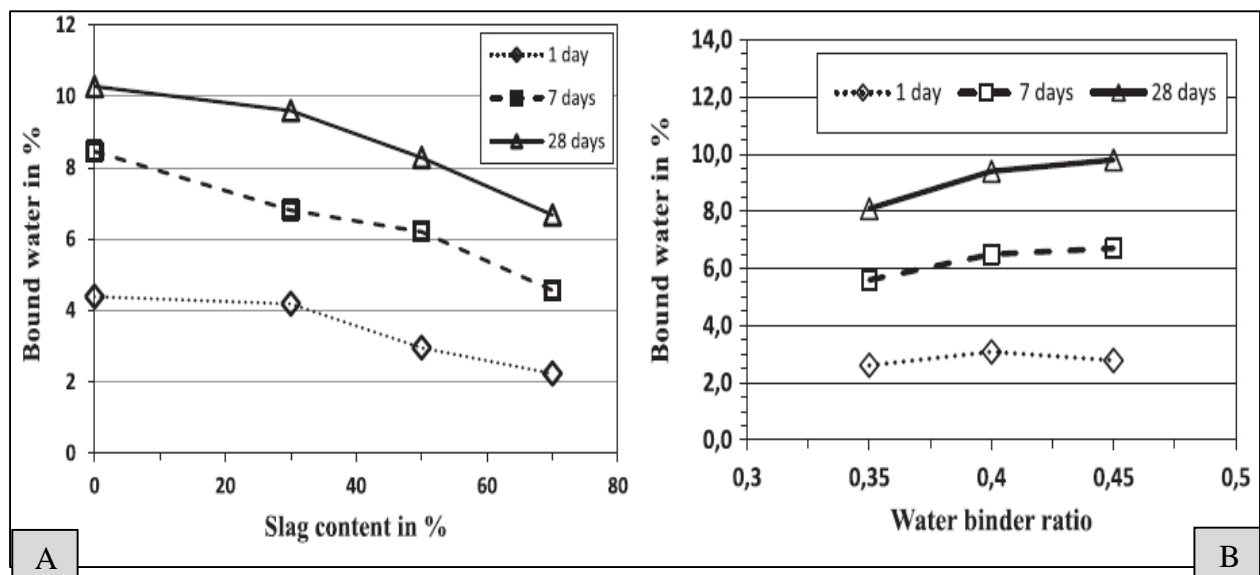


Figure IV.4. Effet de la teneur en laitier granulé algérien et le rapport w/b sur la quantité d'eau liée mesurée par ATG entre 105 et 450 °C : (A) teneur en laitier variable et w/b fixe. (B) teneur en laitier fixe à 50% et w/b variable [BOU 18].

Les auteurs ont expliqué ce résultat par le fait que plus le rapport w/b est élevé, plus l'espace poreux est disponible pour la dissolution des particules réactifs du laitier et la précipitation des produits d'hydratation. En termes de finesse, avec un taux de remplacement de 50% et une température de durcissement de 40 °C, la recherche a indiqué une augmentation de la quantité d'eau liée pour 7 et 28 jours, cependant une légère réduction de la quantité d'eau liée avec l'augmentation de la finesse a été observée à 1 jour. Enfin, la quantité d'eau liée dans la pâte mélangée (contenant 50% de laitier et 50% de ciment Portland) a augmenté avec la température de durcissement, tandis que pour la pâte de référence (100% de ciment), une légère diminution a été observée. À la lumière des résultats de cette étude, les auteurs ont établi que le laitier granulé algérien a été activé thermiquement jusqu'à 40 °C, au-delà de cette température l'effet du matériau sur l'hydratation s'avère très minime où une très petite amélioration a été remarquée.

3. Effets du laitier granulé Algérien sur la durabilité :

3.1. Porosité, absorption et distribution de la taille des pores :

Biskri et al. [BIS 17] ont évalué certains indicateurs de durabilité de béton tels que l'absorption capillaire et la porosité accessible à l'eau. Les auteurs ont signalé que l'utilisation du laitier granulé algérien a considérablement réduit la vitesse d'absorption, ce qui a été attribué à la bonne hydratation des particules de laitier granulé, principalement après 360 jours de durcissement humide. Cependant, l'étude a fait conclure que l'incorporation de laitier a été sans influence significative sur la porosité de l'eau. Hadj-sadok et al. [HAD 11] ont étudié la porosité accessible à l'eau, la porosimétrie par intrusion de mercure (MIP) et la distribution de la taille des pores pour

des mortiers contenant le laitier granulé algérien et durcis à 28, 90 et 360 jours. Pour les différentes périodes, il a été observé que les résultats des deux tests de porosité ont augmenté avec la teneur en laitier granulé, cependant, ils ont diminué avec l'âge pour tous les mortiers. Les auteurs ont rapporté que la distribution des pores des mortiers mélangés a été plus grossière que celle du mortier témoin à 28 jours, alors qu'après 360 jours, les pores des mortiers mélangés ont été plus raffinée surtout dans le cas du mortier contenant 50% de laitier granulé algérien. Deboucha et al. [DEB 15] ont rapporté que l'incorporation du laitier granulé algérien jusqu'à 40% dans le béton a entraîné une diminution dans l'absorption d'eau capillaire à 28 jours (Figure IV.5). Derabla et Benmalek [DER 14] ont étudié la porosité et la capacité d'absorption d'eau des bétons autoplaçants (BAP) traités thermiquement et contenant 0, 20 et 40% de laitier granulé algérien. Les auteurs ont remarqué que dans le cas du traitement standard (20 °C), le BAP avec 20% de laitier granulé a été moins poreux que le BAP témoin, en raison de l'effet physique des particules de laitier, cependant, l'augmentation de la teneur en laitier granulé a entraîné une augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau. Dans le cas du traitement thermique (60°C), les BAPs mélangés ont été plus poreux que le BAP témoin, ce qui a été attribué à la perte d'humidité par l'évaporation d'eau.

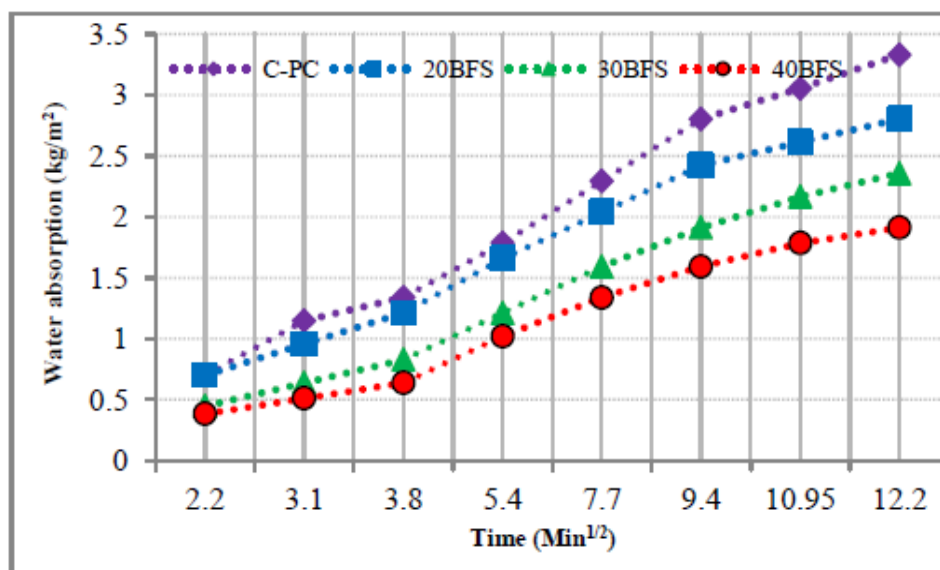


Figure IV.5. Effet de la teneur en laitier granulé algérien sur l'absorption à l'eau [DEB 15].

3.2. Perméabilité et attaque externe :

Boubekour et al. [BOU 19] ont testé la résistance des mortiers contenant le laitier granulé algérien aux attaques sulfatiques (solutions de 5% Na₂SO₄ et 5% MgSO₄) et aux attaques acides (solutions 3% H₂SO₄ et 1% HCl). Les mélanges de mortier ont été formulés en ajoutant 10 % de calcaire et divers taux de laitier granulé algérien (0%, 10%, 20%, 30% et 40%) en remplacement du ciment. Outre que l'expansion des mortiers immergés dans le Na₂SO₄ a été plus élevée que dans le MgSO₄, les auteurs ont observé qu'après 180 jours d'immersion, l'ajout de 20% et 30% de laitier

granulé a diminué l'expansion de presque de 50% par rapport au mortier témoin. Il a été conclu que le laitier granulé algérien a fait diminuer l'expansion en raison de sa faible basicité. Sous les attaques acides, les auteurs ont rapporté qu'après 180 jours d'exposition à une solution à 3% de H_2SO_4 et 1% de HCl, les mortiers les mortiers contenant 30 et 40% de laitier granulé ont présenté les plus faibles pertes de poids (Figure IV.6). Il a été conclu également que l'ajout du laitier granulé algérien a augmenté la résistance à l'attaque acide due à la composition chimique de ce laitier ainsi qu'à son hydraulicité latente, ce qui a donné une bonne résistance à la compression à long terme. Les auteurs ont souligné que l'incorporation du laitier granulé algérien dans un ciment contenant la poudre de calcaire avait un effet bénéfique en réduisant la pénétration d'agents agressifs. Biskri et al. [BIS 17] ont rapporté que le béton contenant le laitier granulé algérien a présenté un coefficient de diffusion des ions chlorure plus faible que le béton contenant de la fumée de silice. Les auteurs ont attribué ce résultat à l'activité hydraulique latente de ce laitier granulé. Hadj-sadok et al.

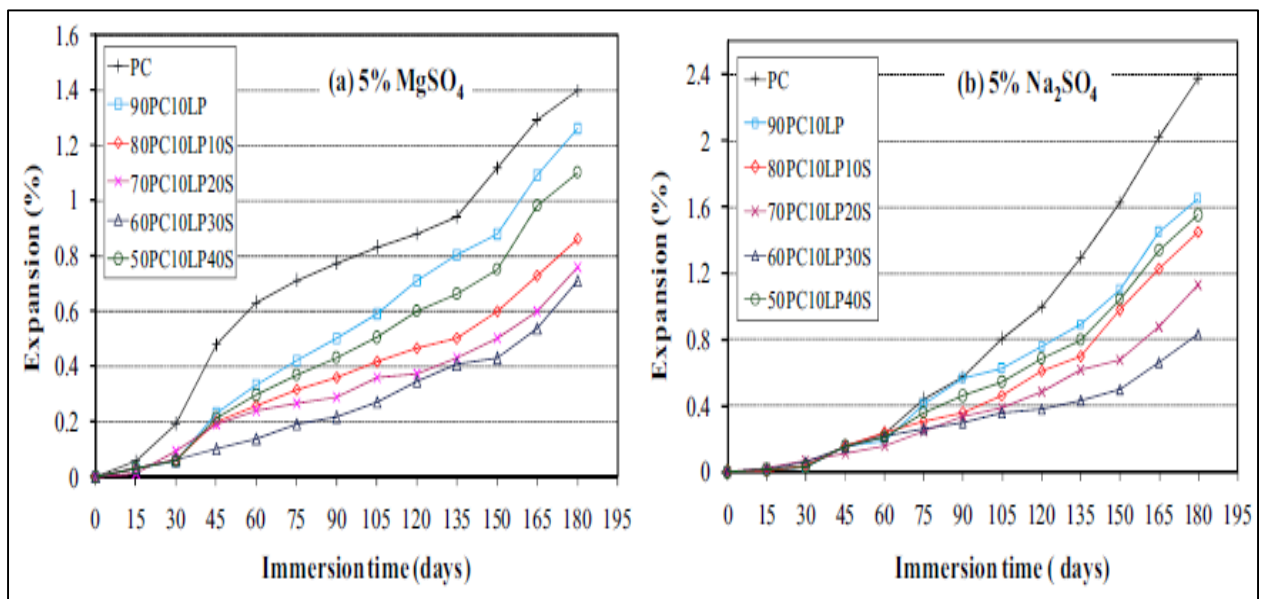


Figure IV.6. Effet du laitier granulé algérien sur la résistance aux attaques sulfatiques [BOU 19].

[HAD 11] ont mesuré pendant 270 jours la diffusion des ions chlorure dans des mortiers avec et sans le laitier granulé algérien. Les auteurs ont constaté que les mortiers mélangés ont connu moins de diffusion par rapport au mortier témoin, la concentration de chlorure a atteint environ 1000 mg/l pour le mortier témoin contre 370 mg/l et 40 mg/l pour les mortiers contenant 30 et 50% de laitier granulé, respectivement. Ce résultat a été attribué à la consommation de Portlandite et à la formation de C-S-H secondaire, ce qui a conduit à une microstructure plus dense et une résistance à la pénétration de chlorure plus élevée. L'effet du laitier granulé algérien sur la durabilité du béton a été également étudié par Hadj-sadok et al. [HAD 12]. Les auteurs ont utilisé

le laitier granulé avec des taux de 0, 15, 30 et 50% en remplacement du ciment, avec deux rapports w/b à savoir 0,42 et 0,65. Il a été rapporté que le laitier a augmenté la sorptivité des bétons avec un rapport w/b de 0,65 à 28 et 90 jours, tandis que pour w/b de 0,42, le coefficient de sorptivité a été inchangé à 28 jours et a légèrement diminué à 90 jours pour ces bétons mélangés. Les bétons ont subi aussi un test de perméabilité à l'azote, les auteurs ont constaté que la perméabilité aux gaz a augmenté avec la teneur en laitier pour les bétons avec un rapport w/b plus élevé. Pour les bétons avec un rapport w/b plus faible, une diminution de la perméabilité a été remarquée pour tous les bétons en particulier pour le mélange avec 50% de laitier granulé où le résultat a été légèrement inférieur au résultat trouvé pour le béton témoin. Dans le même travail, un test de résistance aux sulfates a été réalisé sur des mortiers normalisés contenant jusqu'à 60% de laitier granulé algérien. Les auteurs ont utilisé deux solutions de sulfate différentes à 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et à 5 % de sulfate de magnésium (MgSO_4). Les auteurs ont constaté que l'incorporation de ce laitier a diminué l'expansion des mortiers immergés dans les deux solutions de sulfate par rapport au mortier témoin. Les résultats ont indiqué que la perte de résistance des mortiers immergés dans MgSO_4 a été plus élevée que celle des mortiers immergés dans Na_2SO_4 , mais globalement, les mortiers mélangés ont présenté moins de perte de résistance à la compression et à la flexion par rapport au mortier témoin. Il a été conclu que le laitier granulé algérien a amélioré l'efficacité du mortier contre les attaques de sulfate de sodium et de magnésium. Dans une étude récente, Hadsadok et Courard [HAD 18] ont rapporté que l'utilisation du laitier granulé algérien à 50% a entraîné une réduction très significative du coefficient de diffusion des ions de chlorure et de la perméabilité à l'oxygène à 360 jours.

Conclusion :

Ce chapitre a présenté une synthèse bibliographique sur les différents effets de l'utilisation du laitier granulé algérien dans les mortiers et les bétons. Bien que cette recherche ne contienne pas des travaux effectués aux seins de notre université, nous avons essayé de présenter une large gamme de ces effets dont les résultats rapportés ont été publiés par plusieurs chercheurs dans des revues internationales. À partir de ce qui a été présenté nous pouvons citer les points suivants :

- Le laitier granulé algérien améliore la maniabilité des mortiers et des bétons à cause de sa finesse. Il a un effet bénéfique sur les paramètres rhéologiques en conduisant à des mélanges plus visqueux mais il retarde la prise.
- L'utilisation du laitier granulé algérien à une teneur et une finesse appropriée et améliore la réponse mécanique des mortiers et des bétons, notamment pour des rapports eau/liant bien étudiés.

- À partir des quelques investigations publiées, un effet bénéfique sur la durabilité des bétons a été établi en incorporant le laitier granulé algérien. Cependant d'autres travaux doivent être effectués pour clarifier l'effet de ce matériau envers d'autres phénomènes tels que : la résistance au gel/dégel, le gonflement, le retrait, la corrosion, la carbonatation, la réaction alcali-silice, la conductivité électrique, etc.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale:

Le présent travail a concerné une recherche bibliographique sur le laitier granulé algérien. Ce matériau provient exclusivement de l'unité de siderurgie d'EL Hadjar, à Annaba, dont la production annuelle est à environ 700 000 tonnes.

L'exploitation de ce déchet est un souci majeur pour l'état algérien, le domaine de génie civil peut offrir la possibilité de l'exploiter en particulier dans l'industrie cimentaire en tant qu'addition minérale à caractère active. Malheureusement l'utilisation du laitier granulé algérien par les cimenteries dans leur processus de fabrication de ciment est très limitée, malgré que les études menées sur ce sujet aient donné des résultats très encourageants.

Les études menées jusqu'à présent montrent que le laitier granulé algérien et du fait de sa composition chimique et donc ses indices d'hydraulicité, est moyennement réactif. Par rapport aux laitiers d'autres pays, ce matériau contient un peu plus de chaux et un peu moins de silice, mais son taux de vitrosité est proche de 100%. À l'issue de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le laitier granulé algérien est globalement conforme à la norme NF 15167-1 (2006), notamment en termes de composition chimique. À partir de ses différents indices chimiques, le matériau révèle d'une hydraulicité modérée comme c'est rapporté par certains chercheurs.
- L'amélioration de la réactivité du laitier granulé algérien est possible à travers différents traitements chimiques, thermiques ou mécaniques.
- Du fait de son hydraulicité modérée, l'incorporation du laitier granulé algérien dans la matrice cimentaire n'a pas souvent donné les mêmes résultats. L'amélioration de la résistance à la compression des pâtes de ciment a été obtenue lorsque le laitier a été broyé à haute finesse (SSB supérieur à 5000 cm²/g) et utilisé jusqu'à 50% en remplacement du ciment. Cependant, l'amélioration de résistance dans le cas des mortiers et bétons n'est obtenue que pour des faibles taux de substitution, des grandes finesesses, un faible rapport w/b et l'utilisation de superplastifiant.
- Le laitier granulé algérien améliore la maniabilité des mortiers et des bétons à cause de sa finesse. Il a un effet bénéfique sur les paramètres rhéologiques en conduisant à des mélanges plus visqueux mais il retarde la prise.
- L'utilisation du laitier granulé algérien à une teneur et une finesse appropriée et améliore la réponse mécanique des mortiers et des bétons, notamment pour des rapports eau/liant bien étudiés.

- À partir des quelques investigations publiées, un effet bénéfique sur la durabilité des bétons a été établi en incorporant le laitier granulé algérien. Cependant d'autres travaux doivent être effectués pour clarifier l'effet de ce matériau envers d'autres phénomènes tels que : la résistance au gel/dégel, le gonflement, le retrait, la corrosion, la carbonatation, la réaction alcali-silice, la conductivité électrique, etc.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[ABD 17] Abdelli K, Tahlaïti M, Belarbi R, Oudjit MN (2017) Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and Metakaolin on mortars. *Energy Procedia* 139: 224-229.

[ADE 14]: Obafèmi Gildas F. ADEGOLOYE. «Valorisation des laitiers issus de l'élaboration d'aciers inoxydables comme granulats dans le béton». Thèse de Doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2014.

[AFA 14] : Khalid AFANGA. «Modélisation systémique des filières sidérurgiques en vue de leur optimisation énergétique et environnementale». Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2014.

[AME 21] I Amer, M Kohail, M.S. El-Feky , A Rashad, M A. Khalaf. A review on alkali-activated slag concrete. *Ain Shams Engineering J.* <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.003>

[APR 16] E. Aprianti, P. Shafigh, R. Zawawi, Z.F. Abu Hassan. Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 107 (2016) 365-377.

[BAR 06] Barnett SJ, Soutsos MN, Millard SG, Bungey JH (2006) 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: 434- 440.

[BEH 05] : Mourad BEHIM. « Sous produits industriels et developpement durable : reactivite, role et durabilite des laitiers d'el hadjar dans les materiaux a matrice cimentaire ». Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, 2005.

[BEH 11] Behim M, Cyr M, Clastres P (2011) Physical and chemical effects of El Hadjar slag used as an additive in cement-based materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15: 1413-1432.

[BEL 10]: Essia BELHAJ. «Valorisation des laitiers d'aciérie de conversion dans les liants hydrauliques routiers». Thèse de Doctorat, Université de Nanacy, 2010.

[BEN 15]: F. K. A. BENSALFA, D. KERAL, M. AMEUR, B. MEKARTA, A. SEMCHA. Durability of mortars made with dredged sediments. *Procedia Engineering*, 118 (2015) 240-250.

[BIS 17] : Y. Biskri, D. Achoura, N. Chelghoum, M. Mouret. Mechanical and durability characteristics of High Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, 150 (2017) 167-178.

[BOU 09] Bougara A, Lynsdale C, Ezziane K (2009) Activation of Algerian slag in mortars. *Construction and Building Materials* 23: 542-547.

[BOU 10] Bougara A, Kadri E, Ezziane K. Efficiency of granulated blast furnace slag replacement of cement according to the equivalent binder concept. *Cement and Concrete Composites* (2010) 32, 226-231.

[BOU 10b] Bougara A, Lynsdale C, Milestone NB (2010) Reactivity and performance of blast furnace slags of differing origin. *Cement and Concrete Composites* 32: 319-324.

[BOU 12] Boukendakdji O, Kadri E, Kenai S (2012) Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites* 34: 583-590.

[BOU 17] Bouaziz A, Hamzaoui R, Guessasma S, Lakhel R, Achoura D, Leklou N (2017) Efficiency of high energy over conventional milling of granulated blast furnace slag powder to improve mechanical performance of slag cement paste. *Powder Technology* 308: 37-46.

[BOU 17b] Boubekeur T, Ezziane K, Kadri E (2017) Quantification and analysis of heat hydration of blended cement at different temperature. *Journal of Adhesion Science and Technology* 31: 2741-2756.

[BOU 18] Bougara A, Lynsdale C, Milestone NB (2018) The influence of slag properties, mix parameters and curing temperature on hydration and strength development of slag/cement blends. *Construction and Building Materials* 187: 339-347.

[BOU 19] Boubekeur T, Boulekbache B, Aoudjane K, Ezziane K, Kadri E (2019) Prediction of the durability performance of ternary cement containing limestone powder and ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 209: 215-221.

[BOU 20] : Toufik BOUACHERINE. « Évaluation de la Réactivité pouzzolanique du Métakaolin par les procédés chimiques (Recherche bibliographique) ». Mémoire de Master, Université de M'sila, 2020.

[CHE 21] C.B Cheah, L.E. Tan, M. Ramli. Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review. *Construction and Building Materials* 272 (2021) 121657.

[CHI 16] : Mohamed Aziz CHIKOUCHE. « Optimisation des ajouts à base d'argiles vaseuses et leurs effets sur les propriétés des matériaux cimentaires ». Thèse de Doctorat, Université de M'sila, 2016.

[DAO 10]: Phuc Lam DAO. « Valorisation des laitiers LWS dans les mélanges granulaires ». Thèse de Doctorat, Université de Nanacy, 2010.

[DEB 15] Deboucha W, Oudjit MN, Bouzid A, Belagraa L (2015) Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete. *Procedia Engineering* 108: 254-261.

[DER 14] Derabla R, Benmalek ML (2014) Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term. *Construction and Building Materials* 66: 787-794.

[DRE 98] : G. DREUX & J. FESTA «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8^{ème} Edition. Eyrolles. Mai 1998.

[DUA 16] Duan P, Yan C, Zhou W, Ren D (2016) Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle. *Construction and Building Materials* 118: 76-88.

[ELB 14]: B.S. ELBAHI, L.ZEGHICHI, D. BENAMARA. Influence of the glass powder on the properties of binary and ternary cements. International civil engineering and architecture symposium for academics, Antalya, Turquie, May 2014.

[ERD 13] Özbay Erdogan, Karahan Okan, Lachemi Mo, Hamed, Hossain Khandaker, Atis Cengiz Duran. Dual effectiveness of freezing-thawing and sulfate attack on high-volume slag-incorporated ECC. *Compos. B* 45 (2013) 1384–1390.

[GUE 12] Guetteche MN, Zergua A, Hannachi S (2012) Investigating the local granulated blast furnace slag. *Open Journal of Civil Engineering* 2: 10-15.

[HAD 11] Hadj-sadok A, Kenai S, Courard L, Darimont A (2011) Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 25: 1018-1025.

[HAD 12] Hadj-sadok A, Kenai S, Courard L, Michel F, Khatib J (2012) Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity. *Cement and Concrete Composites* 34: 671-677.

[HAD 18] 44. Hadj-sadok A, Courard L (2018) Chloride diffusion and oxygen permeability of mortars with low active blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 181: 319-324.

[HAM 14] : Moussa HAMIDI. « Élaboration d'un éco-ciment composé à base d'un ajout andésitique brut et activé ». Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 2014.

[HAS 19] Hasnaoui A, Ghorbel E, Wardeh G (2019) Optimization approach of granulated blast furnace slag and metakaolin based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials* 198: 10-26.

[ITI 11] Itim A, Ezziane K, Kadri E (2011) Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. *Construction and Building Materials* 25: 3603-3609.

[JOH 21] John SK, Nadir Y, Girija K (2021) Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review. *Construction and Building Materials* 280: 122443.

[KAD 04] : E. KADRI, R. DUVAL, K. EZZIANE. La fumée de silice et le comportement mécanique des bétons à hautes performances. 1^{er} Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton, Alger, Algérie, 24-26 May, 2004.

[KAN 14]: R. C. KANNING, K. F. PORTELLA, M. O. G. P. BRAGANÇA, M. M. BONATO, J. C. M. D. SONTOS. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 54 (2014) 460-465.

[KHA 17] M.S. Khan, O. Kayali, U. Troitzsch. Effect of NaOH activation on sulphate resistance of GGBFS and binary blend pastes. *Cement and Concrete Composites*, 81 (2017) 49-58.

[KHO 15] Khouadjia MLK, Mezghiche B, Drissi M (2015) Experimental evaluation of workability and compressive strength of concrete with several local sand and mineral additions. *Construction and Building Materials* 98: 194-203.

[KUM 08] Kumar S, Kumar R, Bandopadhyay A, Alex TC, Kumar BR, Das SK, Mehrotra SP (2008) Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement. *Cement and Concrete Composites* 30: 679-685.

[LEG 16] : Akila LEGMA. « Optimisation de la teneur du gypse dans le ciment composé CEM II ». Mémoire de Master, Université de M'sila, 2016.

[MAK 15] Makhoulfi Z, Chettih M, Bederina M, Kadri E, Bouhicha M (2015) Effect of quaternary cementitious systems containing limestone, blast furnace slag and natural pozzolan on mechanical behavior of limestone mortars. *Construction and Building Materials* 95: 647-657.

[NAC 09] : A. NACERI, M.C. HAMINA. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management* 29 (2009) 2378-2384

[OUA 05] : Dounya. CH. OUAZANI. «Caractérisation physico-chimique et valorisation en BTP des cendres de l'incinération des boues de papeterie». Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2005.

[OZB 16] Özbay E, Erdemir M, Durmus HI. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials* 105 (2016) 423-434.

[PAL 03] Pal SC, Mukherjee A, Pathak SR (2003) Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research* 33: 1481-1486.

[PAY 13] Sfaigh Payam, Mohd Zamin Jumaat, Bim Mahmud Hilimi, U. Johnson Alengaram. Oil palm shell lightweight concrete containing high volume ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 231– 238.

[PRO 20] Site internet de l'éditeur mondial Pro Globale Media (Publication de 2020) <https://www.globalslag.com/news/itemlist/tag/Production>

[RAH 04]: V. RAHHAL, R. TALER. Influence of two different fly ashes on the hydration of Portland cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 78 (2004) 191-205.

[RAS 12] Alaa M. Rashad, Sayieda R. Zeedan, Hassan A. Hassan. A preliminary study of autoclaved alkali-activated slag blended with quartz powder. *Construction and Building Materials*, 31 (2012) 70-77.

[RAS 15] Alaa M. Rashad, Influence of different additives on the properties of sodium sulfate activated slag. *Construction and Building Materials*, 79 (2015) 379–389.

[RAS 18] Rashad, Alaa M., 2018. An overview on rheology, mechanical properties and durability of high volume slag used as a cement replacement in paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. 187, 89-117.

[REN 21] Ren B, Zhao Y, Bai H, Kang S, Zhang T, Song S (2021) Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review. *Chemosphere* 267: 128900.

[REZ 12] Bagheri Ali Reza, Zanganeh Hamed, Moalemi Mohamad Mehdi. Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 34 (2012) 663–670.

[SCK 04] : Société des ciments de Ain-El-Kebira, « Chimie des ciments 2 », 2004.

[SID 12] R. Siddique, R. Bennacer. Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar: Review. *Resources, Conservation and Recycling* 69 (2012) 29– 34

[TAN 15]: M. A. TANTAWY. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. *Materials Research Bulletin*, 61 (2015) 415-421.

[TEN 15] M. TENNICH, M. BEN OUEZDOU, A. KALLEL. Effets des déchets de marbre et de carrelage sur les propriétés à l'état durci du béton autoplaçant. *Journées Nationales des Bétons*, Hammamet, Tunisie, May 2015.

[UDD 11] Ahmed Shaikh Faiz Uddin. Mechanical and durability properties of mortars modified with combined polymer and supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (9) (2011) 1311-1319.

[WIN 15] Winnefeld, F., Ben Haha, M., Le, Saout, G., Costoya, M., Ko, S.C., Lothenbach, B. Influence of slag composition on the hydration of alkali-activated slags. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 4 (2015), 85-100.

[YIL 11] I.Z. Yildirim, M. Prezzi. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. *Advances in Civil Engineering*, (2011), 1-13.

[ZEN 09] Zenati A, Arroudj K, Lanez M, Oudjit MN (2009) Influence of cementitious additions on rheological and mechanical properties of reactive powder concretes. *Physics Procedia* 2: 1255-1261.

ANNEXES

Liste des tableaux	Page
CHAPITRE I : LE CIMENT ET LES ADDITIONS MINERALES	
Tableau I-1. Composition chimique moyenne de clinker.	15
Tableau I-2. Types de ciment selon la norme NF EN 197-1.	18
CHAPITRE II: LE LAITIER GRANULE DE HAUT FOURNEAU	
Tableau II.1. Quelques propriétés physico-mécaniques du laitier de haut fourneau [DAO 10]	26
Tableau II.2. Différentes compositions chimiques de laitier citées dans la littérature.	27
Tableau II.3. Différentes phases constituantes de laitier détectables par la DRX	28
Tableau II.4. Indices pour évaluer la réactivité du laitier granulé [BEH 05, WIN 14].	29
Tableau II.5. Quelques compositions chimiques de laitier granule algérien.	31
CHAPITRE IV: Les effets d'utilisation du laitier granulé algérien	
Tableau IV.1. Production du laitier par les hauts fourneaux d'El Hadjar [BEH 05].	45
Tableau IV.2. Quelques résultats de résistance à la compression donnés par des pâtes, des mortiers et des bétons contenant le laitier granulé algérien.	50

Liste des figures	Page
CHAPITRE I : LE CIMENT ET LES ADDITIONS MINERALES	
Figure I-1. Processus de fabrication de ciment.	14
CHAPITRE II: LE LAITIER GRANULE DE HAUT FOURNEAU	
Figure II.1. Schéma représentatif de l'élaboration du laitier.	24
Figure II. 2. Tptes de laitier de haut fopurneau [BEH 05].	24
Figure II.3. Complexe sidérurgique d'El Hadjar, Algérie.	25
Figure II.4. Forme du laitier, selon les images de MEB, après son broyage à l'aide de : (a- broyeur à boulets ; b- vibro-broyeur) [RAS 18].	26
Figure II.5. Spectre de DRX d' un laitier : a). Cristallisé [Yill 11], b). Granulé [APR 16].	28
Figure II.6. Comparaison entre le laitier granulé algérien et d'autres laitiers en termes d'indices chimiques de réactivité [BEH 11].	32
CHAPITRE III: HYDRATATION ET ACTIVATION DU LAITIER GRANULE	
Figure III.1. (A) Diagramme ternaire (CaO - SiO ₂ - Al ₂ O ₃) des matériaux cimentaires. (B) Produits d'hydratation des matériaux cimentaires dans le système ternaire (CaO - SiO ₂ - Al ₂ O ₃).	36
Figure III.2. (A) Broyeur de cimenterie. (B) Broyeur à boulets. (C) Vibro-broyeur.	39
Figure III.3. Effet du type de broyage sur la résistance à la compression d'une pâte de ciment contant 45% de laitier granulé de haut fourneau [BOU 17].	39
Figure III.3. Effet de la température de cure sur la résistance à la compression à 28 jours d'un ciment CEM I et des ciments contenant 50% de laitier [BOU 18].	41
Figure III.4. Activation chimique du laitier granulé :élaboration de géopolymère [REN 21].	42
CHAPITRE IV: Les effets d'utilisation du laitier granulé algérien	
Figure IV.1. Résultats de l'effet du laitier granulé sur l'écoulement d'un BAP [BOU 12].	47
Figure IV.2. L'effet du laitier granulé sur les paramètres rhéologiques d'un BAP [BOU 12].	48
Figure IV.3. Effet du laitier granulé algérien sur la chaleur d'hydratation [BOU 17b].	49
Figure IV.4. Effet de la teneur en laitier granulé algérien et le rapport w/b sur la quantité d'eau liée mesurée par ATG entre 105 et 450 °C : (A) teneur en laitier variable et w/b fixe. (B) teneur en laitier fixe à 50% et w/b variable [BOU 18].	53
Figure IV.5. Effet de la teneur en laitier granulé algérien sur l'absorption à l'eau [DEB 15].	55
Figure IV.6. Effet du laitier granulé algérien sur la résistance aux attaques sulfatiques [BOU 19].	56