



N° d'ordre :

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ DE M'SILA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MAGISTER EN GÉNIE CIVIL

Spécialité: Géomateriaux

Option : Matériaux

Par

Zied BENGHAZI

SUJET

**L'EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR
LES PROPRIÉTÉS DU CIMENT AU LAITIER
ACTIVÉ**

Soutenu le 29/06/2008 Devant le jury composé de :

B. MEZGHICHE

L. ZEGHICHI

M. BIBI

M. BEDDAR

Z. RAHMOUNI

Pr. Université de Biskra

M.C. Université de M'sila

M.C. Université de M'sila

M.C. Université de M'sila

C.C. Université de M'sila

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Je dédie ce travail,

*à mes parents et à toute ma famille qui m'ont soutenu non seulement durant la
préparation de ce travail, mais aussi dès le premier jour que j'ai vu la lumière de
ce monde,*

à mes amis et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment,

à tous ceux qui aiment et respectent le droit du savoir.

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur D^r L. ZEGHICHI pour sa patience, ses idées et ses conseils, sans oublier D^r B. MEZGHICHE pour son soutien moral. Comme, Je souhaite remercier tous ceux qui, par leur aide de près ou de loin, leurs encouragements et leurs conseils, m'ont permis de réaliser ce mémoire.

En deuxième lieu, je remercie les membres de jury, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles que nombreux, pour mes futurs travaux.

Ce travail a été mené au sein du laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie d'Elma Labiod – Tébessa.

Pour leur support technique et moral, je remercie et je salue chaleureusement les personnels de FERPHOS qui m'ont garanti la matière de pouzzolane pour mon étude expérimentale; les personnels de la société des ciments de Tébessa (S.C.T) et l'équipe du laboratoire de contrôle de qualité.

Pour tout le monde, merci infiniment.

RÉSUMÉ

L'intérêt qui est porté de plus en plus à la valorisation des déchets et des sous-produits industriels, est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matière première et à la pollution.

L'objectif principal de cette étude rentre dans le cadre de la valorisation du laitier d'El-Hadjar, elle traite en premier lieu l'activation alcaline du laitier: méthode efficace pour produire des ciments au laitier sans clinker (100 % laitier activé par les alcalis: NaOH, Na₂CO₃, Na₂OSiO₂...). En second lieu, l'étude traite l'influence des additions minérales (pouzzolane, fumée de silice,...) sur les propriétés des ciments au laitier activé, ce qui permet de produire des ciments au laitier activé composés.

ABSTRACT

The interest which is carried more and more to the valorization of wastes and the industrial by-products, is related at the same time to the crisis of energy, the reduction in the world raw material resources and to pollution.

The main objective of this study returns within the framework of the valorization of the slag of El-Hadjar, it initially treats the alkaline activation of the slag: effective method to produce slag cements without clinker (100 % activated slag by alkalis: NaOH, Na₂CO₃, Na₂OnSiO₂...). In the second place, the study treats the influence of the mineral additions (pozzolana, smoke of silica...) on the properties of the activated slag cements, which makes it possible to produce compound activated slag cements.

ملخص

إنّ الاهتمام المنصبّ أكثر فأكثر حول تّثمين المخلفات الصّناعيّة و المنتجات الثانويّة، مرتبط على التّوازي بأزمة الطّاقة، تناقص الموارد العالميّة للمواد الأوليّة و التلوث.

الهدف الأساسي من هذه الدّراسة يندرج في إطار تّثمين خبث فرن الحجّار. إذ تعالج في المقام الأوّل التّنشيط القاعدي للخبث: وهي طريقة فعّالة لإنتاج إسمنت مكوّن من الخبث فقط (100% خبث أفران منشّط بواسطة قواعد: NaOH ، Na₂CO₃ ، Na₂OnSiO₂ ، ...). في المقام الثّاني، تتناول الدّراسة تأثير الإضافات المعدنيّة (البوزولانّة، دخان السيليس،) على خصائص إسمنت الخبث المنشّط، ممّا يسمح بإنتاج إسمنت خبث مرّكب.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Table des illustrations	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations et notations	xi
Introduction générale	1

PREMIÈRE PARTIE: ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction	5
CAHAPITRE I: Les ciments	
I.1. Définition et généralités	6
I.2. Propriétés des ciments	6
I.2.1. Propriétés générales	6
I.2.2. Propriétés particulières	8
I.2.2.1. Résistance à l'eau de mer	8
I.2.2.2. Résistance aux eaux sulfatées	8
I.2.2.3. Utilisation en précontrainte	8
I.2.2.4. Blancheur	9
I.3. Méthodes de fabrication du ciment Portland	9
I.3.1. Fabrication par voie humide	10
I.3.2. Fabrication par voie sèche	11
I.3.3. Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche	13
I.4. L'hydratation des ciments	15
I.5. Les principaux ajouts	16
I.5.1. Laitier granulé de haut fourneau (S)	17
I.5.2. Pouzzolanes naturelles (Z)	17
I.5.3. Cendres volantes	18
I.5.3.1. Généralités	18
I.5.3.2. Cendres volantes siliceuses (V)	18
I.5.3.3. Cendres volantes calciques (W)	18
I.5.4. Schistes calcinés (T)	19
I.5.5. Calcaires (L)	19
I.5.6. Fumées de silice (D)	19
I.6. Classification des ciments	21
I.6.1. Ciments courants	21
I.6.2. Liant équivalent	21
I.6.3. Les autres ciments	22
CAHAPITRE II: Le laitier et les ciments au laitier	
II.1. Définition	24
II.2. Caractéristiques du laitier	24
II.3. Les différentes formes de laitiers	25
II.3.1. Laitier rocheux (ou cristallisé)	26
II.3.2. Laitier bouleté	26
II.3.3. Laitier expansé	26
II.3.4. Laine de laitier et laine de roche	26

II.3.5. Laitier granulé	27
II.3.5.1. Fabrication	27
II.3.5.2. Description du produit	29
II.4. Emploi du laitier vitrifié en cimenterie	30
II.4.1. Ciment au laitier	30
II.4.2. Qualités demandées au laitier destiné à la cimenterie	31
II.4.3. Caractéristiques et domaines d'emploi	31
II.4.3.1.Évolution de la résistance dans le temps	31
II.4.3.2. Effet de la chaleur d'hydratation	31
II.4.3.3. Résistance aux agressions chimiques	33
II.5. Prise hydraulique du laitier vitreux	33
II.6.Méthodes d'activation du ciment au laitier	33
II.6.1. Activation calcique	33
II.6.2. Activation par le clinker du ciment Portland	33
II.6.3. L'activation sulfatique	34
II.6.4. L'activation alcaline	34
II.6.4.1. L'activation par les alcalis caustiques (la soude)	34
II.6.4.2. L'activation par les sels non siliceux (carbonate de sodium)	35
II.6.4.3. L'activation par les sels siliceux (verre soluble)	35
II.6.5. L'activation mixte (soudo-sulfatique)	35
II.7.Comportement mécanique des ciments au laitier	35
II.7.1. Influence de la composition chimique	35
II.7.1.1. Le module de basicité	36
II.7.1.2. Le module d'activité	36
II.7.2. Influence de la porosité de la pâte du ciment	37
II.7.3. Influence de la finesse de mouture (surface spécifique)	38
II.7.4. Influence de la concentration de l'activant	38
II.7.5. Influence de la température de cure	38
Conclusion	39

DEUXIÈME PARTIE: ÉTUDE EXPERIMENTALE

Introduction	41
CAHAPITRE III: Stratégie de l'étude	
III.1. L'addition de la pouzzolane naturelle	42
III.2. L'addition du calcaire comme activant alcalin	42
III.3. Propriétés physico-chimiques des matériauxutilisés	43
III.3.1. Le laitier	43
III.3.2. La pouzzolane	44
III.3.3. Le gypse	44
III.3.4. Le calcaire	45
III.3.5. Le ciment	45
III.3.5. Le sable	45
III.4. Présentation des plans d'expérience	46
III.4.1. Définition des paramètres étudiés (entrée du plan)	46
III.4.1.1. Les proportions des matériaux étudiés	46
III.4.1.2. La surface spécifique	46
III.4.1.3. La concentration de l'activant	46
III.4.1.4. la température de cure	47
III.4.2. Conception des plans d'expériences	47

III.4.2.1. Le plan factoriel complet (mélange laitier + pouzzolane)	47
III.4.2.2. Le plan de mélange (mélange laitier + gypse + calcaire)	48
III.4.3. Mesure des propriétés physico-mécaniques de la pâte de ciment (sortie du plan)	48
III.4.3.1. Essai de pénétration à l'aiguille – Détermination de la consistance normalisée	48
III.4.3.2. Essai de prise du ciment – Détermination du début et fin de prise	49
III.4.3.3. Essai du Chatelier – Détermination de la stabilité	49
III.4.3.4. Essai d'écrasement – Détermination de la résistance à la compression	49
III.5. Mesure de propriétés mécaniques pour mortier de ciment	49
III.5.1. Essai d'écrasement – Détermination de la résistance à la flexion	49
III.5.2. Essai d'écrasement – Détermination de la résistance à la compression	49
CAHAPITRE IV: Résultats et discussion	50
IV.1. Effets de la pouzzolane sur le ciment au laitier	50
IV.1.1. L'effet sur la consistance normalisée	50
IV.1.2. L'effet sur le temps du début et fin de prise	51
IV.1.3. L'effet sur la stabilité de la pâte	52
IV.1.4. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)	52
IV.2. Effets du calcaire sur le ciment au laitier	60
VI.2.1. L'effet sur la consistance normalisée	60
VI.2.2. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)	61
IV.3. Effets de la pouzzolane sur le comportement mécanique du mortier de ciment au laitier activé par la soude	66
VI.3.1. L'effet sur la résistance mécanique à la compression	66
VI.3.2. L'effet sur la résistance mécanique à la Flexion	67
IV.4. Modélisations des effets mesurées	67
IV.4.1. Effets de la pouzzolane sur le ciment au laitier activé	67
IV.4.1.1. L'effet sur la consistance normalisée	68
IV.4.1.2. L'effet sur le temps du début et fin de prise	68
IV.4.1.3. L'effet sur la stabilité de la pâte	69
IV.4.1.4. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)	70
IV.4.2. Effets du calcaire sur le ciment au laitier	70
IV.4.2.1. L'effet sur la consistance normalisée	71
IV.4.2.2. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)	71
Conclusion	72
Conclusion générale et perspectives	73
Références bibliographiques	77

ANNEXES

Annexe A: Effets de la pouzzolane sur le ciment au laitier activé	I
Annexe B: Effets du calcaire sur le ciment au laitier activé	IV
Annexe C: Composition chimique des différents mélanges étudiés	VI
Annexe D: Condition techniques et récapitulation des résultats expérimentaux	IX

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 – Comparaison entre les méthodes de fabrication de ciment _____	13
Figure 2 – Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche _____	14
Figure 3 – Fabrication du ciment _____	15
Figure 4 – L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment _____	16
Figure 5 – Situation du laitier de haut fourneau dans le système (CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃) _____	28
Figure 6 – Pot de granulation _____	28
Figure 7 – Granulation en rigole et fond filtrant _____	28
Figure 8 – Tambour INBA [Coupe] _____	29
Figure 9 – Évolution de la résistance à la compression R _c de deux ciments en fonction du Temps t _____	32
Figure 10 – Élévation de la température au moment de la prise du ciment (d'après Lesage) _____	32
Figure 11 – Définition des points expérimentaux dans l'espace expérimental _____	49
Figure 12 – Définition du domaine d'étude du plan mélange _____	48
Figure 13 – La consistance normalisée en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	51
Figure 14 – Le temps de début de prise en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	52
Figure 15 – Le temps de fin de prise en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	52
Figure 16 – La résistance à la compression à 2 jours (R _{c2}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	53
Figure 17 – La résistance à la compression à 7 jours (R _{c7}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	53
Figure 18 – La résistance à la compression à 28 jours (R _{c28}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	54
Figure 19 – La résistance à la compression à 56 jours (R _{c56}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	54
Figure 20 – La résistance à la compression à 90 jours (R _{c90}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane _____	55
Figure 21 – L'évolution de la résistance à la compression pour SSB 1 _____	55
Figure 22 – L'évolution de la résistance à la compression pour SSB 2 _____	56
Figure 23 – Les spectres des mélanges laitier/pouzzolane par DRX à 56 jours (a-g) _____	57-60
Figure 24 – La consistance normalisée en fonction du pourcentage des constituants du mélange (laitier + calcaire + gypse) _____	61
Figure 25 – La résistance à la compression à 2 jours (R _{c2}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse) _____	62
Figure 26 – La résistance à la compression à 7 jours (R _{c7}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse) _____	62
Figure 27 – La résistance à la compression à 28 jours (R _{c28}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse) _____	63
Figure 28 – La résistance à la compression à 56 jours (R _{c56}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse) _____	63
Figure 29 – La résistance à la compression à 90 jours (R _{c90}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse) _____	64
Figure 30 – L'évolution de la résistance à la compression, en comparaison avec le ciment à 100 % laitier activé par la soude (5mol/l) _____	64

Figure 31 – L'évolution de la résistance à la compression du mélange (80 % laitier + 10 % Pouzzolane + 5 % calcaire + 5 % gypse)	65
Figure 32 – L'évolution de la résistance à la compression du mélange (80+5+5) % + 10 % pouzzolane, en comparaison avec différents mélanges	65
Figure 33 – L'évolution de la résistance à la compression d'un ciment au laitier à 20 % de pouzzolane en comparaison avec un ciment Portland ordinaire	66
Figure 34 – L'évolution de la résistance à la flexion d'un ciment au laitier à 20 % de pouzzolane, en comparaison avec un ciment Portland ordinaire	67
Figure C.1 – La variation de la composition chimique des ciments étudiés en fonction du pourcentage de pouzzolane	VI
Figure C.2 – La variation de la composition chimique des ciments étudiés en fonction du pourcentage du gypse et du calcaire	VII
Figure C.3 – La variation de la composition chimique des principaux mélanges étudiés	VIII
Figure D.1 – Perméabilimètre de Blaine	IX
Figure D.2 – l'Appareil de Vicat	X
Figure D.3 – (a): malaxeur à ciment; (b): table à choques	X
Figure D.3 – (a): moule pour pâte de ciment (2 x 2 x 2) cm ³ ; (b): moule pour mortier de ciment (4 x 4 x 16) cm ³	XI
Figure D.4 – (a) éprouvettes cubiques de pâte de ciment (240); (b) éprouvettes prismatiques de mortier de ciment (12)	XIII

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Effets principaux des ajouts les plus utilisés	20
Tableau 2 – Classement des ciments suivant leur résistance et les spécifications mécanique et physique pour chaque classe	22
Tableau 3 – Classification des ciments suivant leurs types et leur composition	23
Tableau 4 – Variation de la composition chimique du laitier	25
Tableau 5 – Composition chimique du laitier	43
Tableau 6 – Composition chimique de la pouzzolane	44
Tableau 7 – Composition chimique du gypse	44
Tableau 8 – Composition chimique du calcaire	45
Tableau 9 – Composition chimique du ciment	45
Tableau 10 – Composition granulométrique du sable normalisé (référence)	46
Tableau 11 – Matrice d'expérience en unités centrées réduites (plan d'expériences factoriel complet à 8 essais)	47
Tableau 12 – Plan d'expériences de mélange à 3 essais	48
Tableau 13 – L'expansion de la pâte de ciments en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane	52
Tableau 14 – Valeurs du coefficient δ_A pour la consistance normalisée	68
Tableau 15 – Valeurs du coefficient δ_A pour le début de prise	69
Tableau 16 – Valeurs du coefficient δ_A pour la fin de prise	69
Tableau 17 – Valeurs du coefficient δ_A pour la stabilité de la pâte	69
Tableau 18 – Valeurs du coefficient δ_A pour la résistance à la compression	70
Tableau A.1 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la consistance normalisée	I
Tableau A.2 – Matrice des effets de la pouzzolane sur le temps du début de prise	I
Tableau A.3 – Matrice des effets de la pouzzolane sur le temps de fin de prise	I
Tableau A.4 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 2 jours	II
Tableau A.5 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 7 jours	II
Tableau A.6 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours	II
Tableau A.7 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 56 jours	III
Tableau A.8 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 90 jours	III
Tableau B.1 – Matrice des effets du calcaire sur la consistance normalisée	IV
Tableau B.2 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 2 jours	IV
Tableau B.3 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 7 jours	IV
Tableau B.4 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours	IV
Tableau B.5 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 56 jours	V
Tableau B.6 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 90 jours	V
Tableau C.1 – composition des mélanges en fonction du pourcentage de pouzzolane	VI
Tableau C.2 – composition des mélanges en fonction du pourcentage du gypse et du calcaire	VII

Tableau C.3 – composition du mélange du laitier + gypse + calcaire + pouzzolane	VII
Tableau D.1 – Mélange laitier et pouzzolane (SSB 1)	XI
Tableau D.2 – Mélange laitier et pouzzolane (SSB 2)	XI
Tableau D.3 – Pâte de ciment CPJ II/A	XII
Tableau D.4 – Résistance à la compression du ciment de référence (100 % laitier)	XII
Tableau D.5 – Mélange laitier et gypse+calcaire	XII
Tableau D.6 – Mélange laitier et gypse	XII
Tableau D.7 – Mélange laitier et pouzzolane + gypse + calcaire	XIII
Tableau D.8 – comparaison entre les résistances à la compression du ciment Portland et le ciment au laitier activé avec 20 % d'addition	XIII
Tableau D.9 – comparaison entre les résistances à la flexion du ciment Portland et le ciment au laitier activé avec 20 % d'addition	XIII

LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS

- α : indice d'activité hydraulique;
- γ : masse volumique apparente [kg/m^3];
- δ_A : représente le facteur A qui prend des valeurs différentes (coefficients) pour chaque niveau;
- Δ : l'ouverture entre les aiguille de l'appareil du Chatelier (essai de stabilité) [mm];
- ϵ : représente la moyenne des valeurs absolues des résidus;
- μ : la moyenne générale des valeurs mesurées (noté souvent I);
- ρ : masse volumique absolue [g/cm^3];
- ρ_0 : masse volumique du ciment de référence [g/cm^3];
- τ : temps de début de prise [min];
- τ' : temps de fin de prise [min];
- A: quantité d'addition [kg/m^3];
- A_1 : représente le coefficient associé au facteur A;
- AB_1 : le coefficient associé à l'interaction des deux facteurs A et B;
- B_1 : représente le coefficient associé au facteur B;
- C: quantité de ciment équivalente, calculée par le produit (k.A) [kg];
- C': quantité de ciment courant [kg];
- C_1 : représente le coefficient associé au facteur C;
- E/C: proportion de l'eau de gâchage par rapport au ciment;
- F: pourcentage de fines produites par un broyage normalisé;
- i: module d'activité du laitier (formule de Langavant);
- k: coefficient d'équivalence pour le ciment équivalent ;
- K: module d'activité du laitier (indice de Keil);
- K': module d'activité du laitier (normes soviétiques [GOST 3476-74]);
- K_0 : coefficient de calcul du module de verre soluble;
- L: liant équivalent [kg/m^3];
- L_i : limite inférieure garantie de la résistance à la compression [MPa];
- L_s : limite supérieure garantie de la résistance à la compression [MPa];
- m: module du verre soluble;
- M_a : module d'activité du laitier;
- M_b : module de basicité du laitier;
- r: résidu de calcul entre les mesures expérimentales et les valeurs calculées à partir des modèles construits;
- R: désigne les classes de ciment à durcissement rapide;
- R_{cj} : valeur expérimentale de la résistance mécanique à la compression à j jours [MPa];
- $R_{cj\ th}$: valeur théorique de la résistance mécanique à la compression à j jours [MPa];
- R_{fj} : valeur expérimentale de la résistance mécanique à la flexion à j jours [MPa];
- $R_{fj\ th}$: valeur théorique de la résistance mécanique à la flexion à j jours [MPa];
- S: la surface spécifique [g/cm^2];
- S_0 : surface spécifique du ciment de référence [cm^2/g];
- SSB: la surface spécifique de Blaine [g/cm^2];
- t: temps mesuré [s];
- t_0 : moyenne des trois mesures de temps pour le ciment de référence [s];
- X_A : variable prenant des valeurs positives ou négatives selon A;
- $X_A X_B$: variable prenant des valeurs positives ou négatives selon l'interaction AB;
- X_B : variable prenant des valeurs positives ou négatives selon B;
- X_C : variable prenant des valeurs positives ou négatives selon A.
- Y_{th} : valeur théorique de la repense (grandeur modélisée);

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le ciment est un matériau très important en Algérie comme dans le monde entier, pour la réalisation des bâtiments civils et industriels, des chaussées rigides et des ouvrages d'art. Il existe autant de variété de ciment (classes de ciments) que leur utilisation est multiple et nécessite des caractéristiques spécifiques en fonction de chaque usage. La procédure de fabrication de ce matériau est presque la même pour les différentes classes, et consomme beaucoup d'énergie.

L'industrie du ciment reconnaît depuis longtemps que le coût de l'énergie peut être élevé. En effet, il peut représenter de 25 à 35 % du total des coûts directs. Les usines utilisent notamment de moins en moins de fours à procédé humide, qui sont peu éco-énergétiques, et se tournent vers les fours à procédé sec, plus économes en combustible [1].

Un four à procédé sec comme celui de la cimenterie d'Elma Labiod (Tébessa), consomme une moyenne de 6000 m³/h de gaz naturel, pour 80 tonnes de clinker; soit 2,6 GJ pour chaque tonne de clinker produite.

Surtout que les fours à procédé sec sont plus éco-énergétiques que ceux du procédé humide, mais ils dégagent une grande quantité de poussière dont on ne récupère que 15 à 25 %, alors que 75 % de poussière est dégagée est émise à l'atmosphère où elle reste suspendue. Une partie de cette poussière en suspension est respirée par l'homme et les animaux; le reste finira par tomber sur terre ou sur les surfaces aquatiques (naturelles et artificielles), causant ainsi des dégâts surtout pour le secteur de l'agriculture.

En plus des poussières dégagées, les études ont montrées que la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂, dont la moitié vient de combustible et l'autre moitié de la calcination du CaCO₃ présente essentiellement dans le calcaire qui constitue environ 80 % de la farine crue [2]. Ce qui représente presque 5 % des émissions de gaz responsables à l'effet de serre. Une cimenterie comme celle d'Elma Labiod dégage plus de 100 tonnes de CO₂ par heure, uniquement dans l'opération de la cuisson du clinker. Nous pouvons ainsi imaginer le CO₂ dégagé par les cimenteries d'un pays comme l'Algérie, pour 16 millions de tonnes de ciments produites en 2007.

Cette consommation considérable d'énergie et la pollution engendrée par les dégagements des cimenteries, ainsi que l'épuisement des gisements des ressources naturelles, ont mené à la recherche de nouvelles ressources de matières premières, permettant l'obtention des ciments avec des caractéristiques semblables à celles des ciments Portland et pourquoi pas meilleures, tout en réduisant le coût de fabrication et en préservant l'environnement.

Les ajouts minéraux alors, présents une part importante de la production des ciments dans le monde entier. Leur utilisation est très importante, non seulement du point de vue technique (pour l'amélioration des propriétés physico-chimiques des ciments), mais aussi pour l'économie de l'énergie et la diminution des émissions des fours.

En Algérie la majorité des cimenteries fabriquent le ciment Portland aux ajouts (CPJ-CEM II/A) dont la proportion des ajouts utilisée atteint jusqu'à 20 %.

Les déchets industriels et spécialement le laitier des hauts-fourneaux, présentent une matière première importante et prometteuse dans le domaine de l'industrie des ciments. La production mondiale du laitier est d'environ 250 millions de tonne par an de laitier du haut fourneau. Cependant l'Algérie ne produit qu'une petite quantité avoisine un demi-million de tonne, avec un taux de granulation de 50 %; mais on ne consomme que 20% dans le domaine de fabrication des ciments le reste est stocké à l'extérieur occupant de larges surfaces de terrines sans considérables applications [2].

Le ciment au laitier doit être activé pour développer des propriétés hydrauliques. Pour cela il existe plusieurs méthodes d'activation employées (activation calcique, sulfatique et alcaline), dont chacune présente des avantages et des inconvénients. Les études sur le ciment à base du laitier d'El-Hadjar seul présente des caractéristiques physico-mécaniques faibles par rapport à celles du ciment Portland ordinaire. Ceci met en évidence l'intérêt d'utiliser des additions minérales (pouzzolane, Calcaire, fumée de silice,...), pour but d'améliorer les propriétés présentées par le ciment au laitier, de la même façon employée pour les ciments Portlands composées. Beaucoup d'études ont été menées pour ce but, mais la composition chimique du laitier et la particularité des matériaux utilisés comme addition (surtout naturels), varient pour chaque unité sidérurgique et d'une région à une autre; par conséquent, leur effet est aussi variable. D'ici, il est important de réaliser des études sur les matériaux locaux, que ce soit le laitier ou les additions pouvant lui être associées.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation du laitier d'El-Hadjar. Elle traite l'amélioration des caractéristiques propriétés physico-mécaniques des ciments au laitier activé par la soude caustique (activant alcalin de la forme R-OH, très efficace et présentant un cout réduit par rapport aux autres activant alcalins), on utilisant des additions minérales par substitution de la même manière utilisée pour les ciments Portland aux ajouts. Nous avons choisi de nous concentrer essentiellement sur l'étude de l'effet la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, comme étant une addition minérale qui présente des propriétés très intéressantes. Cependant, du fait de la nature caustique de la soude et la délicatesse de sa préparation et sa mise en œuvre, nous avons essayé de mettre le pied sur le chemin du développement de l'utilisation du calcaire non seulement comme addition minérale mais aussi comme activant alcalin (assure un milieu basique pour l'hydratation du ciment au laitier, $\text{CaO/Si} > 1$). Nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences (MPE), dans l'étude expérimentale qui est adaptée pour ce genre d'études, pour réduire et organiser les essais et aussi pour nous aider expliquer les différents résultats mesurés.

Ce mémoire est donc devisé en deux parties:

La première partie (chapitres I et II) est une synthèse bibliographique:

- Dans le premier chapitre, nous avons fait rappel des propriétés des ciments Portlands, leurs modes et techniques de fabrication et leur classification, ainsi que les principaux ajouts utilisés dans cette fabrication.
- Le deuxième chapitre expose les différentes formes de laitiers, leurs caractéristiques, leur emploi dans les cimenteries et les différentes méthodes utilisées pour l'activation du laitier. ensuite, il présente les facteurs influant sur les propriétés mécaniques des ciments au laitier, qui seront utiles ensuite pour la détermination des paramètres de l'étude expérimentale.

La seconde partie (chapitres III et IV) est consacrée à l'étude expérimentale:

- Le troisième chapitre présente la stratégie adoptée pour cette étude et les principales caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés. nous avons aussi défini dans ce chapitre les différents paramètres étudiés pour la conception des plans d'expériences, ainsi que la description des essais effectués sur pâte et mortier de ciment.
- Les différents résultats expérimentaux obtenus, leur interprétation et l'influence de chaque paramètre étudié, sont présentés dans le quatrième chapitre.

PREMIÈRE PARTIE:
ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Il existe autant de variété de ciment que leur utilisation est multiple, dont chaque usage nécessite des caractéristiques spécifiques propre à lui. Du fait de la consommation considérable d'énergie pour la fabrication des ciments et la pollution engendrée par les dégagements des cimenteries, ainsi que l'épuisement des gisements des ressources naturelles, les cimentiers se sont dirigés à la recherche de nouvelles ressources de matières premières, permettant l'obtention des ciments avec des caractéristiques semblables ou meilleures à celles des ciments au clinker, et de résoudre ces problèmes. Le laitier des hauts-fourneaux (et les autres déchets industriels), présente une matière première importante et prometteuse dans le domaine de l'industrie des ciments.

Dans cette première partie, nous faisons rappel des ciments Portlands, leurs propriétés, leurs modes de fabrication et leur classification, nous mentionnons aussi les principaux ajouts utilisés dans le domaine des ciments. Ensuite, nous exposons les différentes formes de laitiers, leurs caractéristiques, leur emploi dans les cimenteries et les différents modes d'activation du laitier. Enfin, elle présente les facteurs influant sur les propriétés physico-mécaniques des ciments au laitier.

CHAPITRE I: LES CIMENTS

I.1. Définition et généralités

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment gâché et mélangé avec des granulats et de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve une ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance donnés et aussi présenter une stabilité de volume à longue échéance.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation de silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tels que, par exemple, les aluminates. La somme des proportions d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse, dans les ciments.

Les ciments sont constitués de petits grains individuels de différentes matières, mais ils doivent être statistiquement homogènes en composition. Un haut degré de régularité dans toutes les propriétés du ciment est obtenu par un procédé continu de production en masse et, en particulier, par des procédés convenables de broyage et d'homogénéisation [3].

I.2. Propriétés des ciments

I.2.1. Propriétés générales

Mélangé à l'eau, le ciment forme une pâte qui se solidifie dans l'air ou sous l'eau, d'où sa qualification de «liant hydraulique», qualité qu'il partage avec les chaux hydrauliques, par opposition aux chaux aériennes qui ne durcissent pas sous l'eau [3].

Ce phénomène (durcissement dans l'air ou sous l'eau) résulte de l'hydratation du ciment [4].

La présence d'eau au voisinage des grains de ciment est donc nécessaire pour que ce phénomène puisse se poursuivre ; or, il dure plusieurs semaines. D'où l'importance d'éviter la dessiccation prématurée par une protection du béton contre l'évaporation.

La quantité d'eau strictement nécessaire à l'hydratation du ciment est d'environ 30 % de la masse du ciment. Dans la pratique, il en faut plus pour produire et mettre en œuvre un béton ou un mortier, sans pour autant altérer sa qualité. L'utilisation de certains types d'adjuvants, réducteurs d'eau, plastifiants ou superplastifiants, permet de réduire la teneur en eau excédentaire, ce qui contribue à améliorer les propriétés du béton.

Le temps de prise est mesuré à l'aide de l'appareil Vicat (NF EN 196-3). La prise est retardée par un excès d'eau, par le froid, par les impuretés du sable et par les adjuvants retardateurs; elle est accélérée par la chaleur et les adjuvants accélérateurs.

La prise est suivie du durcissement. L'accroissement de la résistance mécanique est la principale manifestation de la poursuite des réactions d'hydratation dans le béton durci. La résistance normalisée est mesurée en laboratoire sur des éprouvettes de 4 cm x 4 cm x 16 cm de mortier, aux échéances de 2, 7 et 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1.

La chaleur d'hydratation est une autre manifestation des réactions d'hydratation. Elle augmente, en général, avec la classe de résistance du ciment, le dosage, la température initiale.

L'échauffement du béton qui en résulte, d'autant plus important que l'isolation naturelle (béton de masse) ou provoquée (coffrage isolant) est plus grande, provoque une accélération de l'hydratation au jeune âge.

Lors du séchage du mortier ou du béton durci, le départ d'eau de la pâte de ciment provoque une déformation appelée: retrait de dessiccation. Vu la lenteur des processus mis en jeu, la déformation de retrait observée est une déformation différée. L'utilisation d'un ciment pour lequel la valeur limite de retrait total est spécifiée par la norme NF P 15-301 (32,5 ou 42,5) permet de limiter la composante de cette déformation, due au type de ciment.

Le retrait plastique (ou de serrage) est provoqué par une dessiccation prématurée du matériau ayant lieu avant ou en cours de prise. Ce retrait sera évité (ou tout au moins fortement limité) en humidifiant les supports et en protégeant les surfaces non coffrées par une cure.

Le retrait thermique après prise, l'une des composantes des déformations endogènes, est fonction de l'épaisseur des pièces et de l'intensité du flux thermique dû à l'exothermie des réactions d'hydratation du ciment. Dans les pièces massives, il est important de réduire ce retrait en choisissant un ciment à faible chaleur d'hydratation [4].

L'hydratation du ciment produit des hydrates baignés par une solution interstitielle basique. Dans le béton armé, le pH élevé de la pâte protège normalement les armatures de la corrosion : c'est le phénomène de passivation.

La diffusion du dioxyde de carbone atmosphérique en présence d'un minimum d'eau favorise la carbonatation du béton. Celle-ci entraîne une diminution de la basicité et donc de la passivation des armatures, avec une possible formation de rouille en présence d'oxygène. Ce phénomène se développe beaucoup plus lentement lorsque le béton est en contact permanent avec l'eau, dans des conditions normales de PH et de salinité.

Il faut donc veiller à respecter les règles qui définissent et prescrivent l'enrobage des armatures et faire en sorte que le béton de recouvrement soit compact pour limiter la progression de la carbonatation et la diffusion des chlorures. Ce béton de recouvrement doit être le plus résistant possible car la vitesse de carbonatation est d'autant plus faible que la résistance à la compression est élevée. Il est important d'éviter, par une cure appropriée à la vitesse de développement des résistances, une dessiccation précoce qui bloquerait le processus d'hydratation et donc le développement des résistances [4].

I.2.2. Propriétés particulières

I.2.2.1. Résistance à l'eau de mer

Les ciments résistant à l'eau de mer (NF P 15-317) sont des ciments courants possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires. Ils présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement. Ces ciments sont marqués PM [4].

I.2.2.2. Résistance aux eaux sulfatées

Les ciments résistant aux eaux sulfatées (XP P 15-319) sont des ciments courants possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires. Ils présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement. Ces ciments sont marqués ES [4].

I.2.2.3. Utilisation en précontrainte

Les ciments conformes à la norme NF P 15-318 sont des ciments courants destinés à la réalisation d'ouvrages en béton précontraint [4]:

- pour la précontrainte par pré-tension, il est recommandé d'utiliser des ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2 % d'ions sulfure ;
- pour la précontrainte par post-tension, il est recommandé d'utiliser au moins des ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7 % d'ions sulfure. Si le

dispositif de précontrainte n'assure pas totalement et durablement l'isolation des armatures, utiliser un ciment de la classe CP2.

I.2.2.4. Blancheur

Les ciments blancs sont des CPA-CEM I ou des CPJ-CEM II conformes à la norme NF P 15-301. La blancheur des ciments blancs n'est pas une caractéristique normalisée. Elle est due à l'absence d'oxydes colorants (de fer, de chrome, de manganèse...) [4].

I.3. Méthodes de fabrication du ciment Portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru ;
- cuisson ;
- broyage et conditionnement.

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

- fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne) ;
- fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide) ;
- fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée) ;
- fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

Le composant de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de 62 % à 67 % de la chaux (CaO) avec 19 % à 25 % de silice (SiO₂), 2 % à 9 % d'alumine (Al₂O₃), et de 1 % à 5 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃) [4]. La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier (Fe₂O₃), l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: les calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide est le clinker [5].

Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, d'au moins deux tiers, en masse,

de silicates de calcium $[(CaO)_3.SiO_2]$ (50-70% du clinker) et $[(CaO)_2.SiO_2]$ (10-30% du clinker), la partie restante contenant de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes. Le rapport en masse $(CaO)/(SiO_2)$ ne doit pas être inférieur à 2,0. La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5,0 % en masse [3, 5].

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium ($CaCO_3$).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: une partie de (CaO) est retenue par (Al_2O_3) et (Fe_2O_3) en formant une masse liquide. (SiO_2) et (CaO) restants réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du (CaO) non combiné [5].

I.3.1. Fabrication par voie humide

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple, mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont [5]:

- zone de séchage ;
- zone de décarbonatation ;
- zone de clinkérisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toute façon, quelle que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud d'environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse (CaSO_4) afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20 t/min) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse [5].

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage [4].

Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4 %) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160 °C et avant d'être transporté vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C [5].

I.3.2. Fabrication par voie sèche

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20 % (figures 2 et 3). Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis. Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur [5].

Les fours sont constitués de deux parties:

- un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur) ;
- un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques [5]:

1. La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.
2. Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie. Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisés. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99 %, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.
3. Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'une préhomogénéisation puis d'une homogénéisation.

Les différentes méthodes de fabrication de ciment sont présentées dans le schéma suivant sous une forme comparative :

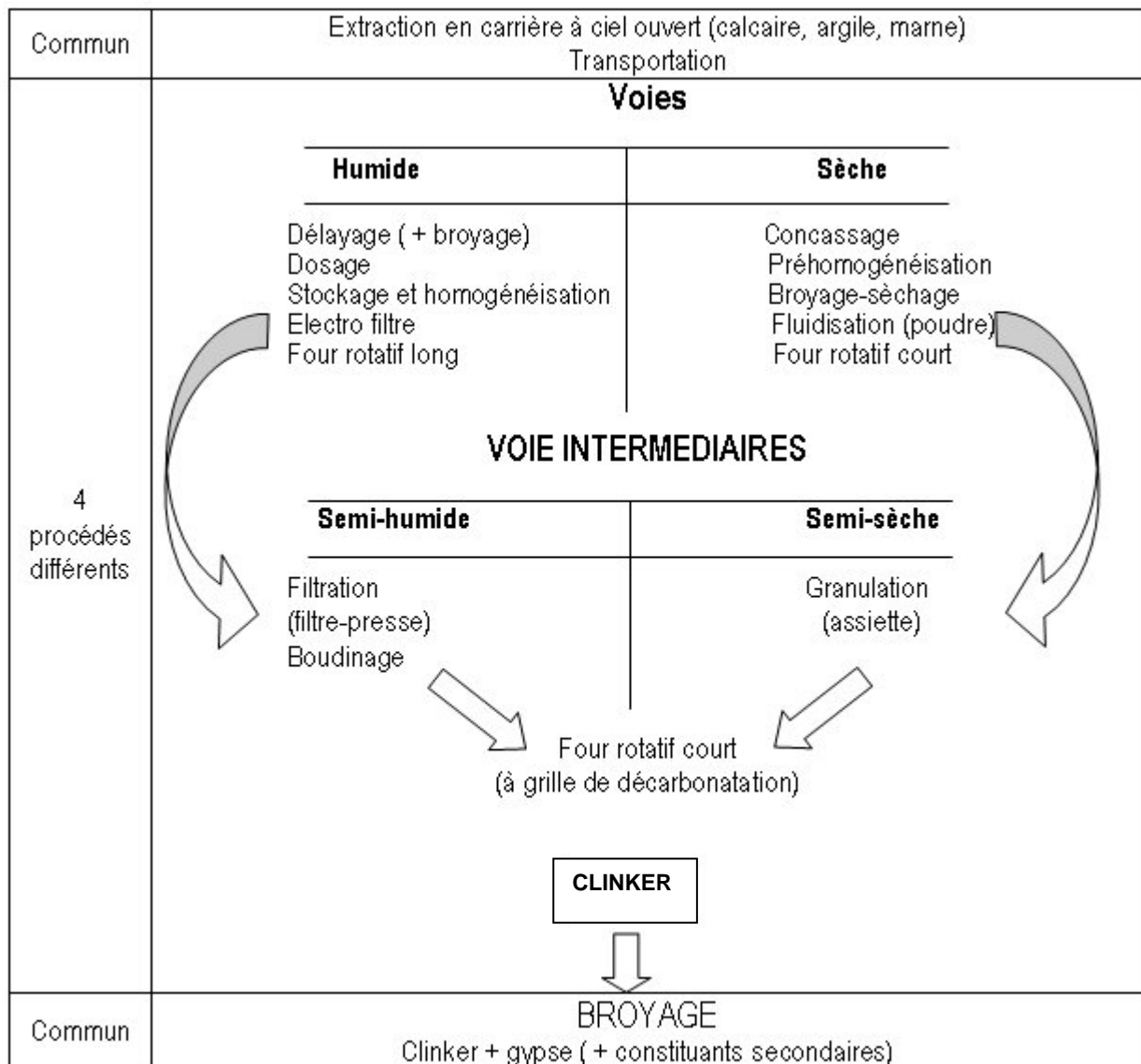


Figure 1 – Comparaison entre les méthodes de fabrication de ciment [5].

I.3.3. Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche

Comme étant la plus utilisée, la méthode de fabrication de ciment par voie sèche est présentée plus clairement dans ce schéma :

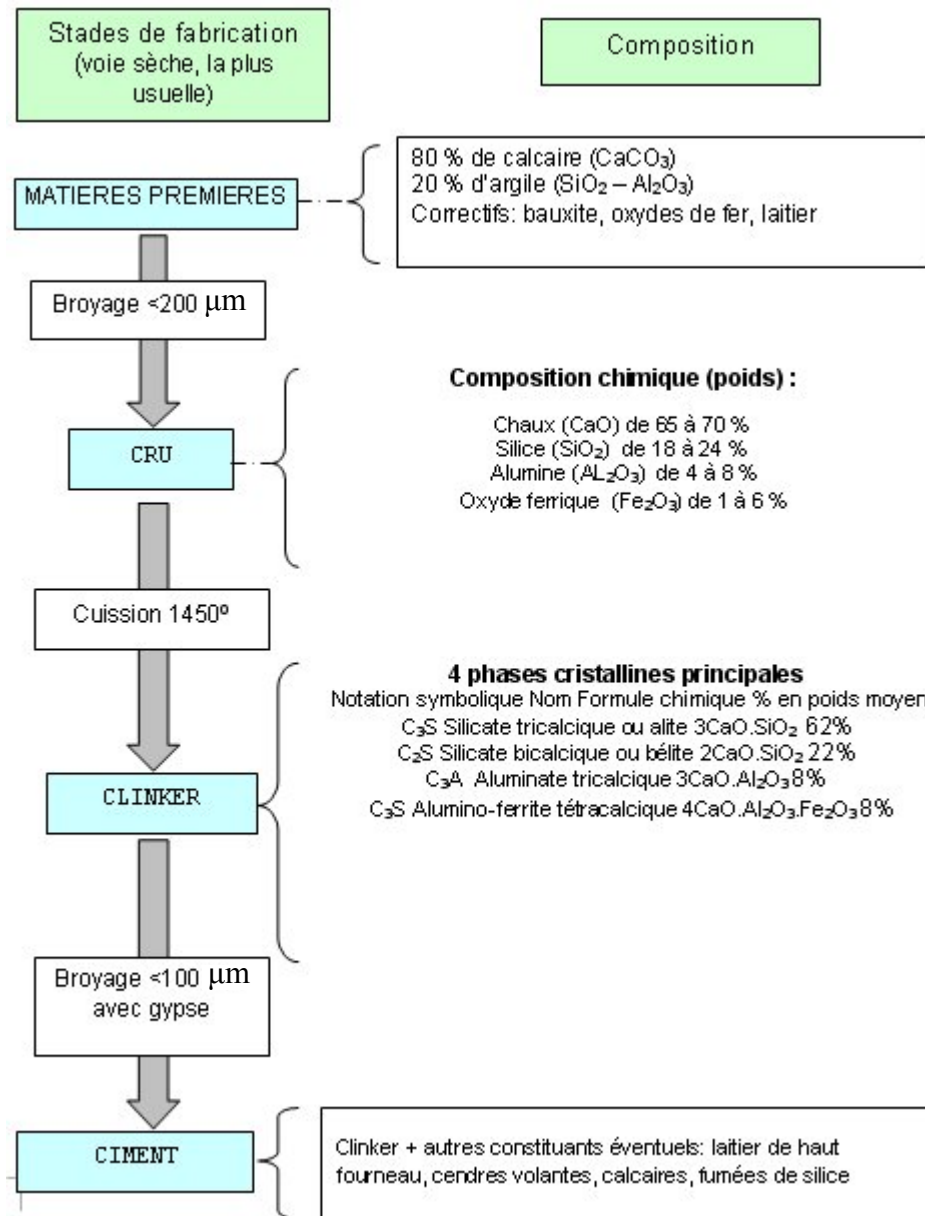


Figure 2 – Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche [5].

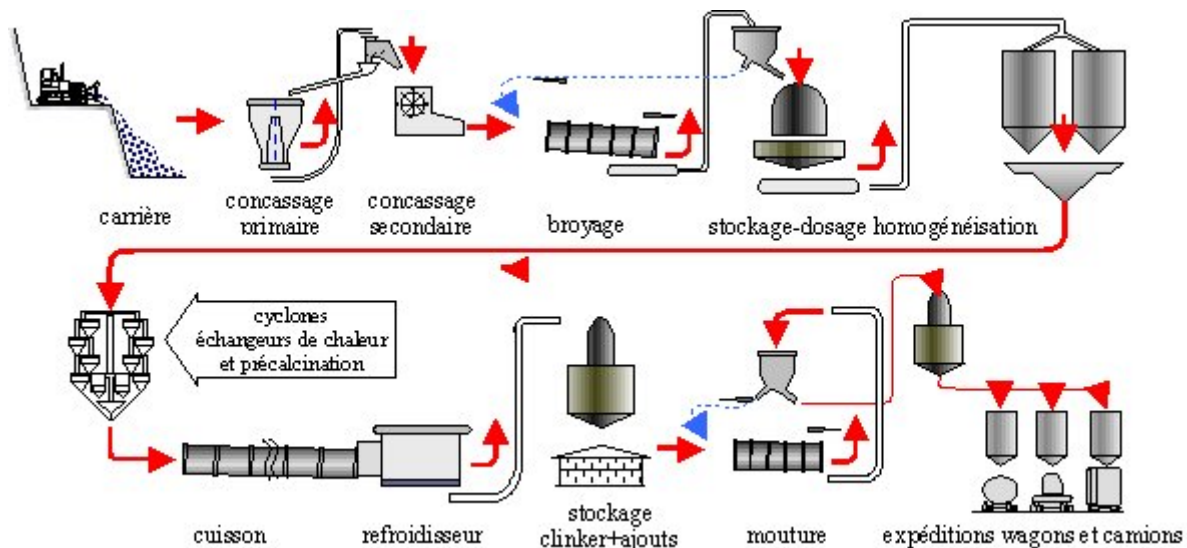


Figure 3 – Fabrication du ciment [5].

I.4. L'hydratation des ciments

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire (figure 4). Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium (C_3S) et (C_2S), la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de portlandite [$Ca(OH)_2$] en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermorite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermorite ne peut se former qu'en présence d'eau [5].

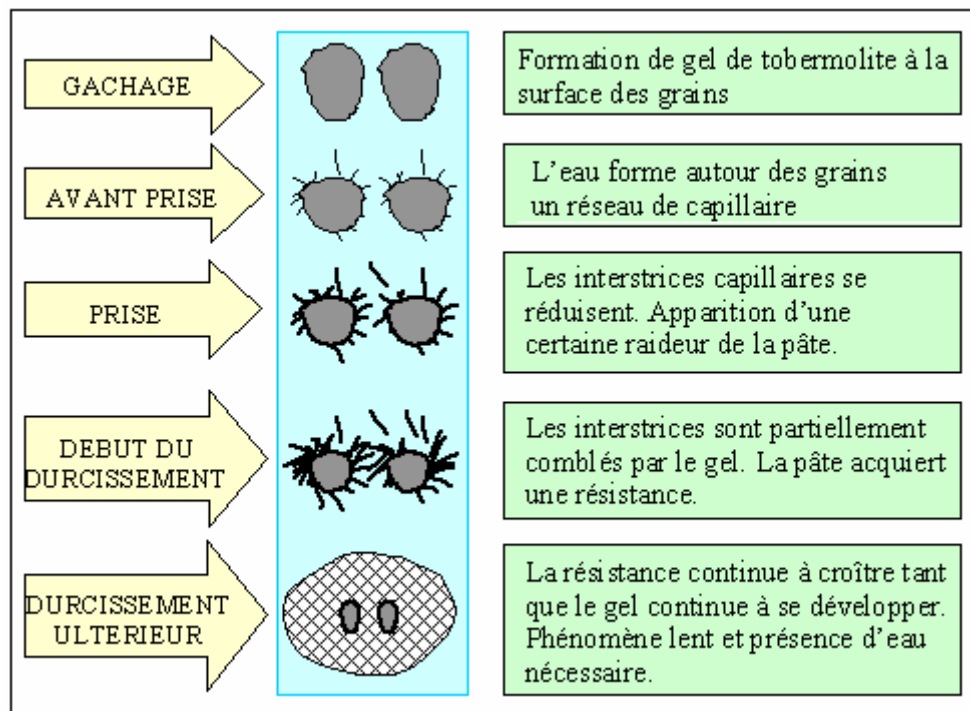
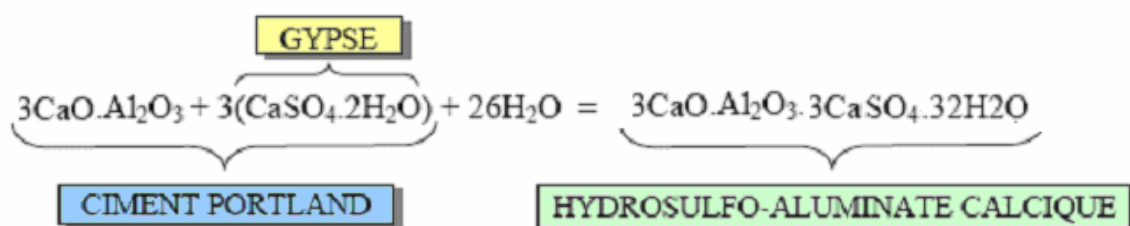
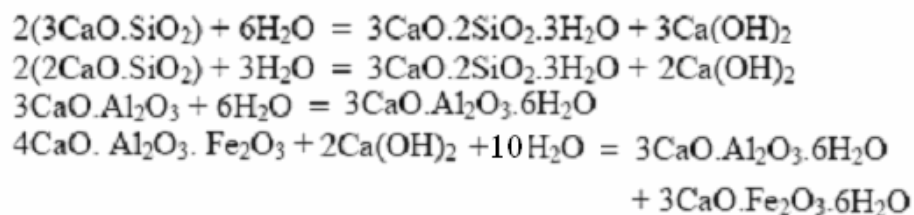


Figure 4 – L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment [4].

Quelques réactions chimiques importantes [4]



Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux représenter les propriétés des ciments portlands [5].

1.5. Les principaux ajouts

Le ciment portland est constitué principalement de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du

ciment, on ajoute d'autres constituants associés agissent sur les propriétés chimiques ou physiques du béton [5].

1.5.1. Laitier granulé de haut fourneau (S)

Le laitier de haut fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable.

Si la proportion de laitier granulé de haut fourneau dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seuls les laitiers satisfaisants aux spécifications suivantes doivent être utilisés.

Le laitier granulé de haut fourneau doit contenir au moins deux tiers, en masse, de laitier vitreux. Le laitier granulé de haut fourneau doit être constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme (CaO), (MgO) et (SiO₂). Le restant contient (Al₂O₃) avec, en outre, de faibles quantités d'autres oxydes.

Le rapport en masse (CaO + MgO)/(SiO₂) doit dépasser 1,0.

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau [3].

1.5.2. Pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont :

- des substances d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriée ;
- des argiles et des schistes activés thermiquement.

Bien que les cendres volantes et les fumées de silice aient des propriétés pouzzolaniques (voir § 1.5.3 et 1.5.6).

Les pouzzolanes naturelles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température ambiante habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium [Ca(OH)₂] dissous, pour former des composés de silicate de calcium et d'aluminate de calcium développant des résistances. Ces composés sont semblables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matières hydrauliques.

Si la proportion de pouzzolanes naturelles dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seules les pouzzolanes satisfaisantes aux spécifications suivantes doivent être utilisées.

Les pouzzolanes doivent être composées essentiellement de (SiO₂) réactif et de (Al₂O₃). La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes. La

proportion de (CaO) réactif est négligeable. La teneur en (SiO₂) réactif doit être d'au moins 25 % en masse [3].

Les pouzzolanes naturelles doivent être convenablement préparées, c'est-à-dire sélectionnées, homogénéisées, séchées et réduites en poudre, en fonction de leur état à la production ou à la livraison [3].

I.5.3. Cendres volantes

I.5.3.1. Généralités

Si la proportion de cendres volantes dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seules les cendres volantes satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées.

Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse ou silico-calcaire. Les premières ont des propriétés pouzzolaniques ; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques. La perte au feu des cendres volantes sèches doit, dans tous les cas, être inférieure ou égale à 7 % en masse. De plus, dans cette limite, pour une usine donnée, une livraison de cendres ne doit pas présenter une perte au feu s'écartant de plus de 2 %, en absolu, de la perte au feu moyenne calculée sur l'ensemble des livraisons annuelles.

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé [3].

I.5.3.2. Cendres volantes siliceuses (V)

La cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques. Elle doit contenir essentiellement de la silice (SiO₂) réactive et de l'alumine (Al₂O₃). Le restant contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes. La proportion de chaux réactive (CaO) doit être inférieure à 5 % en masse. La teneur en silice (SiO₂) réactive de la cendre volante conforme à la norme NF P 15-301, ne doit pas être inférieure à 25 % en masse [3].

I.5.3.3. Cendres volantes calciques (W)

La cendre volante calcique est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques.

Elle doit contenir essentiellement de la chaux réactive (CaO), de la silice réactive (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃). Le restant contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes). La proportion de chaux réactive (CaO) ne doit pas être inférieure à 5 % en masse. La cendre volante contenant entre 5 % et 15 % de chaux réactive (CaO) doit contenir plus de 25 % en masse de silice réactive (SiO₂). La cendre volante calcique finement broyée contenant plus de 15 % de chaux réactive (CaO), doit présenter une résistance à la compression d'au moins 10 N/mm² à 28 jours lorsqu'elle est essayée selon la norme NF EN 196-1 modifiée. L'expansion de la

endre volante calcique doit être inférieure à 10 mm lorsqu'elle est essayée selon la norme NF EN 196-3 en utilisant un mélange de 30 % en masse de cendre volante broyée et de 70 % en masse de ciment de référence [3].

I.5.4. Schistes calcinés (T)

Les schistes calcinés, et en particulier les schistes bitumineux calcinés, sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. Du fait de la composition de la matière naturelle ainsi que du procédé de production, les schistes calcinés contiennent des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminat monocalcique, de même que de petites quantités de chaux libre (CaO) et de sulfate de calcium, ainsi que des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, particulièrement (SiO₂).

De ce fait, les schistes calcinés finement broyés montrent de fortes propriétés hydrauliques, comme le ciment Portland, et, en plus, des propriétés pouzzolaniques.

Si la proportion de schistes calcinés dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal) seuls les schistes calcinés satisfaisants aux spécifications suivantes doivent être utilisés.

Les schistes calcinés, finement broyés, essayés selon la norme NF EN 196-1 doivent avoir une résistance à la compression d'au moins 25,0 N/mm² à 28 jours. L'expansion des schistes calcinés, essayés selon la norme NF EN 196-3, doit être inférieure à 10 mm en utilisant un mélange de 30 % en masse de schistes calcinés broyés et de 70 % en masse de ciment de référence [3].

I.5.5. Calcaires (L)

Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excédant 5 %, en masse (constituant principal), les calcaires doivent satisfaire aux spécifications suivantes [3]:

- teneur en calcaire (Ca CO₃) ≥ 75 % en masse ;
- teneur en argile adsorption de bleu de méthylène¹¹) ≤ 1,20 g/100 g ;
- teneur en matières organiques ≤ 0,50 % en masse.

I.5.6. Fumées de silice (D)

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines ayant une très haute teneur en silice amorphe. Si la proportion de fumées de silice dans le ciment excède 3 % en masse, seules les fumées de silice satisfaisantes aux spécifications suivantes doivent être utilisées:

- silice amorphe (SiO₂) ≥ 85 % en masse ;
- perte au feu ≤ 4 % en masse ;
- aire massique (non traitée) ≥ 15 m²/g.

En outre, le producteur de ciment doit être en mesure de communiquer, sur demande, la teneur en silicium libre des fumées de silice utilisées [3].

Pour le cobroyage avec du clinker et du gypse, la fumée de silice peut être dans son état original, densifiée, ou granulée (avec de l'eau).

Les fumées de silice proviennent 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 [3].

Le tableau 1 résume les effets principaux des ajouts les plus utilisés.

Tableau 1 – Effets principaux des ajouts les plus utilisés [6].

Constituant ajouté		Effets principaux du constituant ajouté au clinker
S	Laitier granulé de haut fourneau	- Diminue la réactivité à court terme. Diminue les retraits ; - Montée en résistance moins rapide ; - Adapté aux ouvrages en contact avec le sol.
Z	Pouzzolane naturelle	- Diminue la réactivité à court terme et ses effets ; - Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
Q	Pouzzolane calcinée	- Diminue la réactivité à court terme et ses effets ; - Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
V	Cendre volante siliceuse	- Apporte une résistance complémentaire à long terme ; - Améliore la durabilité en diminuant la perméabilité ; - Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton.
W	Cendre volante calcique	- Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton.
T	Schiste calciné	- Diminue la réactivité à court terme et ses effets ; - Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
L et LL	Calcaire broyé	- Accélère la cinétique d'hydratation à très court terme (2 à 7 jours) ; - Complète le squelette granulaire.
M	Mélange de constituants	- Associe les effets des différents constituants ; - Diminue le prix du ciment. Couleur et propriétés variables.

I.6. Classification des ciments

Il existe un grand nombre de ciments, en fonction des constituants utilisés et de leur dosage, du procédé de fabrication.

Le CEN/TC 51 a recommandé de séparer les « ciments courants » des « ciments spéciaux » :

Les ciments dits courants, désignés CEM (NF EN 197-1 : 2001) : ciment à base de clinker Portland, ciment de laitier et ciment de haut-fourneau, sont élaborés par les cimentiers et peuvent renfermer plusieurs constituants.

Les liants équivalents, réalisés en centrale à béton, sont constitués d'un assemblage de ciment de clinker pur et de poudres aux propriétés diverses (NF EN 206-1 : 2002) [6].

Les ciments dits spéciaux sont dotés de propriétés singulières [5]: ciments alumineux, ciment prompt...

I.6.1. Ciments courants

Les ciments courants conformes sont subdivisés en cinq types principaux (tableau 3) [3]:

- I Ciment Portland ;
- II Ciment Portland composé ;
- III Ciment de haut fourneau ;
- IV Ciment pouzzolanique ;
- V Ciment au laitier et aux cendres.

Les caractères S (laitier granulé de haut fourneau), P (pouzzolane naturelle), Q (pouzzolane calcinée), V (cendre volante siliceuse), W (cendre volante calcique), T (schiste calciné), L (calcaire broyé) et M (mélange de constituants) comme cité plus haut, agissent sur les propriétés singulières du béton (tableau 1) [6].

En plus de ce classement, les ciments courants sont aussi subdivisés selon leur classe de résistance à la compression (tableau 2).

I.6.2. Liant équivalent

Ce liant, recomposé directement en centrale par les producteurs de béton, est l'assemblage d'un ciment de clinker pur CEM I et d'une addition, poudre plus ou moins active. Cette addition peut être [6]:

- quasiment inerte (type I) ;

— pouzzolanique ou hydraulique (type II).

Il est défini en terme d'équivalence vis-à-vis des résistances mécaniques.

Si A est la quantité d'addition exprimée en kg/m^3 et k le coefficient d'équivalence alors, le produit (k . A) sera équivalent à une quantité (C') de ciment CEM I.

Le liant équivalent L s'exprime alors par:

$$L = C + kA \text{ ou } L = C + C'$$

Pour la valeur de k se reporter à la norme EN 206-1. Cette valeur est non seulement fonction de l'addition, mais peut être aussi fonction des conditions d'exposition des ouvrages et de la nature du ciment utilisé. Par ailleurs, elle ne porte que sur une quantité limitée d'addition [6].

I.6.3. Les autres ciments

Les ciments autres que ceux qui sont définis au tableau 3 sont des ciments pour lesquels il n'existe pas encore de norme ou d'agrément européen, mais qui peuvent posséder la marque NF. Il s'agit des ciments à maçonner et des ciments à propriétés singulières, tels que le ciment alumineux et le ciment prompt naturel [6].

Tableau 2 – Classement des ciments suivant leur résistance et les spécifications mécaniques et physique pour chaque classe [3].

Classe	Résistance à la compression				Retrait des CPA-CEM I CPJ-CEM II 28 jours ($\mu\text{m/m}$)	Temps de début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Résistance au jeune age		Résistance normale				
	2 jours	7 jours	28 jours				
	Li	Ls	Li	Ls			
32,5	—	—	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	$\geq 13,5$	—	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	≤ 1000	≥ 60	
42,5	$\geq 12,5$	—					
42,5R	≥ 20	—	$\geq 52,5$	—	—		
52,5	≥ 20	—					
52,5R	≥ 30	—					

Tableau 3 – Classification des ciments suivant leurs types et leur composition [3].

Valeurs en pourcentage en masse 1)

Désignation	Notation	Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumées de silice D 3)	Pouzzolanes naturelles Z	Cendres volantes		Schistes calcaires T	Calcaires L	Constituants secondaires 2)
						siliceuses V	calcaires W			
Ciment Portland	CPA-CEM I	95 – 100	—	—	—	—	—	—	—	0 – 5
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A	80 – 94	←————— 6 – 20 4) 5) —————→							
	CPJ-CEM II/B	65 – 79	←————— 21 – 35 4) 5) —————→							
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35 – 64	36 – 65 5)	—	—	—	—	—	—	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20 – 34	66 – 80 5)	—	—	—	—	—	—	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5 – 19	81 – 95	—	—	—	—	—	—	0 – 5
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65 – 90	—	←————— 10 – 35 5) —————→		—	—	—	—	0 – 5
	CPZ-CEM IV/B	45 – 64	—	←————— 36 – 55 5) —————→		—	—	—	—	0 – 5
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40 – 64	18 – 30 5)	—	←————— 18 – 30 5) —————→		—	—	—	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20 – 39	31 – 50 5)	—	←————— 31 – 50 5) —————→		—	—	—	0 – 5

1) Les valeurs indiquées se réfèrent au noyau du ciment, à l'exclusion des sulfates de calcium et des additifs.
 2) Les constituants secondaires peuvent être du filler ou bien un ou plus des constituants principaux, sauf lorsque ceux-ci sont incorporés en tant que constituants principaux du ciment.
 3) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 % dans tous les ciments.
 4) La proportion de filler est limitée à 5 %.
 5) Le fabricant est tenu à une déclaration de composition stipulant les constituants utilisés et la proportion de chacun d'eux ; il s'engage à ne pas faire varier ces proportions au-delà d'une fourchette de ± 5 points, le clinker étant aussi un constituant. La forme et les modalités d'application de cette déclaration sont définies dans l'annexe B de la présente norme.

CHAPITRE II: LE LAITIER ET LES CIMENTS AU LAITIER

II.1. Définition

Les laitiers de haut fourneau sont un sous-produit de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. La production des laitiers est liée à celle des fontes à partir desquelles seront élaborés les aciers [7].

Pour chaque tonne de fonte la quantité de laitier produite dépend principalement de la masse des oxydes non réductibles enfournés, et est donc en raison inverse de la teneur en fer du minerai de fer.

L'utilisation majeure des laitiers des hauts-fourneaux est surtout dans le domaine de construction comme liant ou aussi comme granulats pour béton et travaux routiers, ainsi que pour la fabrication de vitrocéramiques, pierres artificielles, etc [8].

Les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants (1 800 MJ/t de laitier soit 3,5 % du bilan énergétique du haut-fourneau [8]) et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte [7].

II.2. Caractéristiques du laitier

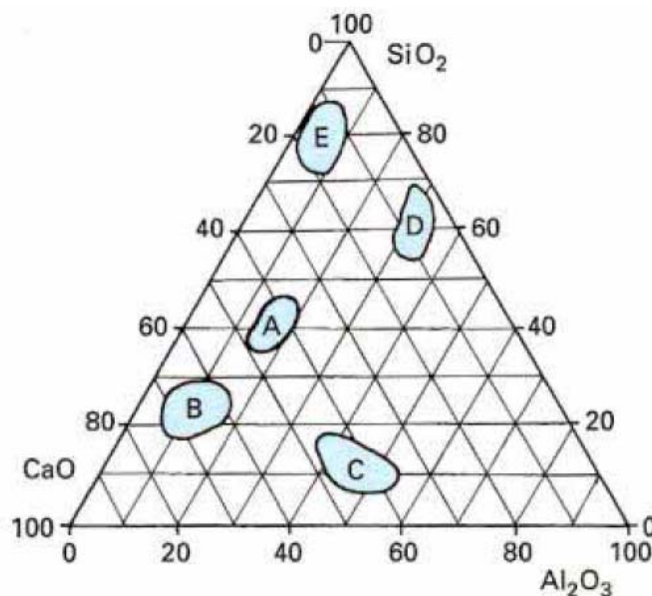
Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (> 90 %) de quatre oxydes ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$). Ils contiennent également des petites quantités des oxydes ($\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$) et des quantités insignifiantes des sulfures ($\text{CaS} - \text{MnS} - \text{FeS}$) [2].

Cette composition dépend de plusieurs facteurs; elle varie suivant la nature du minérale, du métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement [8]. Le tableau 4 présente la variation des principaux éléments constituant le laitier du haut fourneau:

Tableau 4 – Variation de la composition chimique du laitier [9].

Element chimique	Pourcentage [%]
CaO	30 à 50
SiO ₂	28 à 38
Al ₂ O ₃	8 à 24
MgO	1 à 18
SO ₃	1 à 2,5
Fe ₂ O ₃	1 à 3
MnO	1 à 3

La figure 5 compare la position des laitiers et celle de divers matériaux dans le diagramme triangulaire chaux-silice-alumine:



- | | | | |
|---|-------------------|---|---------------------------------|
| A | laitiers | D | pouzzolanes et cendres volantes |
| B | ciments Portland | E | verres |
| C | ciments alumineux | | |

Figure 5 – Situation du laitier de haut fourneau dans le système (CaO-SiO₂-Al₂O₃) [8].

II.3. Les différentes formes de laitiers

Les laitiers peuvent se présenter sous différentes formes et avec une granulométrie s'étend de 0 à 300 mm, selon les méthodes de refroidissement de ces derniers :

II.3.1. Laitier rocheux (ou cristallisé)

Le laitier rocheux s'obtient en déversant le laitier liquide dans une fosse et en l'y laissant refroidir le plus lentement possible. Dans d'autres cas, le laitier est d'abord versé dans des cuves en acier coulé placées sur des chariots circulant sur voie ferrée. Les fosses sont alors installées à distance du haut-fourneau, et le laitier y est déversé par basculement des cuves. Après refroidissement, souvent avec arrosage, le laitier est extrait de la fosse par des moyens classiques en travaux publics : pelles sur chenilles et camions de chantier [8].

II.3.2. Laitier bouleté

Le bouletage consiste à refroidir le laitier dans des conditions telles qu'il se forme des boulettes quasi sphériques, dont l'intérieur est creux. Ce traitement se pratique dans une installation qui comprend [8]:

- un **déversoir**, qui forme une lame de laitier liquide d'épaisseur constante ;
- un **couloir d'alimentation** incliné, sur lequel coule un film d'eau, et qui est soumis à des vibrations pour éviter le collage du laitier ; à ce moment, le laitier commence à se refroidir, devient donc plus visqueux (ce qui lui permet de retenir les gaz inclus) et subit un commencement d'expansion ;
- un **tambour**, muni d'ailettes, refroidi par un courant d'eau intérieur et tournant à environ 300 tours par minute, qui disperse le laitier ; la plupart des morceaux projetés par le tambour, pas encore solidifiés, sont expansés et prennent une forme sphérique sous l'effet de la tension superficielle ; les autres morceaux éclatent pour donner du laitier granulé ; le tambour projette le laitier sur l'aire de réception où il se refroidit et s'égoutte ;
- des **injections d'eau** (environ 1 m³/t de laitier).

II.3.3. Laitier expansé

C'est un laitier cristallisé dans lequel, pendant le refroidissement, on a provoqué la formation d'alvéoles. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour favoriser l'expansion, elles comprennent toujours une injection d'eau (environ 1 m³/t de laitier), complétée éventuellement par une injection d'air et de vapeur d'eau [8].

II.3.4. Laine de laitier et laine de roche

La laine de laitier et la laine de roche sont fabriquées par filage d'un matériau liquide ; le filage nécessite 1000 à 5000 m³ d'air par tonne de laitier. La laine de laitier provient du laitier sortant de la halle de coulée du haut-fourneau ; c'est une méthode peu employée, car les conditions pour un bon filage [liquide de viscosité faible et régulière, ayant donc une température suffisamment élevée et une composition bien déterminée] sont plus facilement remplies quand on opère la

refusion du laitier rocheux dans un four à cuve analogue au cubilot : on peut y ajuster le lit de fusion, qui comprend alors au maximum 80 % en masse de laitier, le complément étant du silex, du basalte, voire du minerai de fer [8].

II.3.5. Laitier granulé

II.3.5.1. Fabrication

a) Granulation

Le laitier granulé est obtenu en mettant brutalement en contact le laitier liquide avec une importante quantité d'eau (environ 10 m³/t de laitier), de façon à le diviser en petits grains et à le refroidir très vite [8].

On exploite différents procédés de granulation [8]:

- **la granulation en bassin** consiste à verser le laitier liquide dans un bassin de grandes dimensions rempli d'eau ; ce procédé a l'inconvénient de fabriquer une fraction parfois importante de laitier cristallisé à cause de l'augmentation de la température de l'eau pendant la granulation ;
- **la granulation en rigole** se fait en laissant couler le laitier liquide dans une goutte parcourue par un fort courant d'eau, qui sert à la fois à granuler et à transporter le sable de laitier ;
- **la granulation en pot** (figure 6) est une amélioration de la précédente : le laitier liquide est divisé et refroidi par un ensemble de jets d'eau issus de fentes pratiquées dans une boîte alimentée en eau ; ce système, qui est le seul mis en place dans les installations nouvelles ou renouvelées, permet d'optimiser le débit d'eau, et, en modifiant les fentes d'injection de l'eau, d'optimiser les conditions de granulation.

b) Filtration

Le laitier granulé doit être séparé de l'eau qui a servi à la granulation et égoutté le mieux possible pour limiter sa teneur en eau. Des systèmes, parfois complexes, ont été utilisés ; on n'exploite plus guère que deux procédés :

— **Le fond filtrant** où la pulpe d'eau et de laitier est versée dans un bassin dont le fond est constitué par une nappe de tuyaux en ciment percés de trous et recouvert de gravier grossier. La filtration se fait vers les tuyaux, d'abord à travers la couche de laitier granulé, puis à travers le gravier. Après l'évacuation du laitier par un pont muni d'un grappin, on souffle de l'air comprimé dans les tuyaux pour prévenir le colmatage des trous (figure 7). Ce système est très efficace, mais coûteux à l'installation et en frais d'entretien.

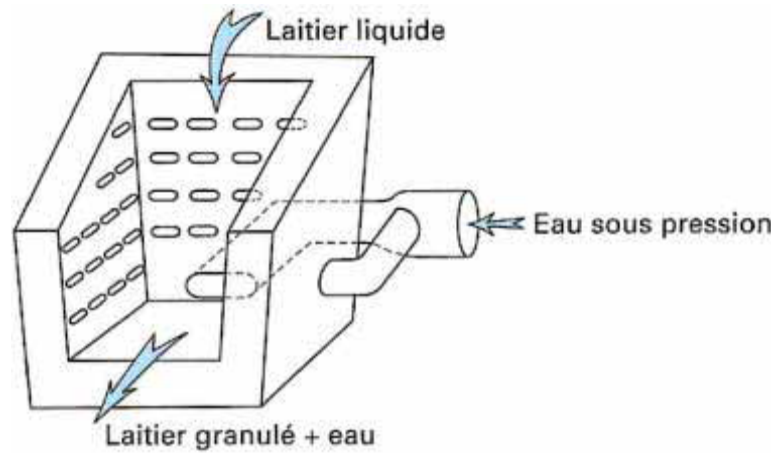


Figure 6 – Pot de granulation [8].

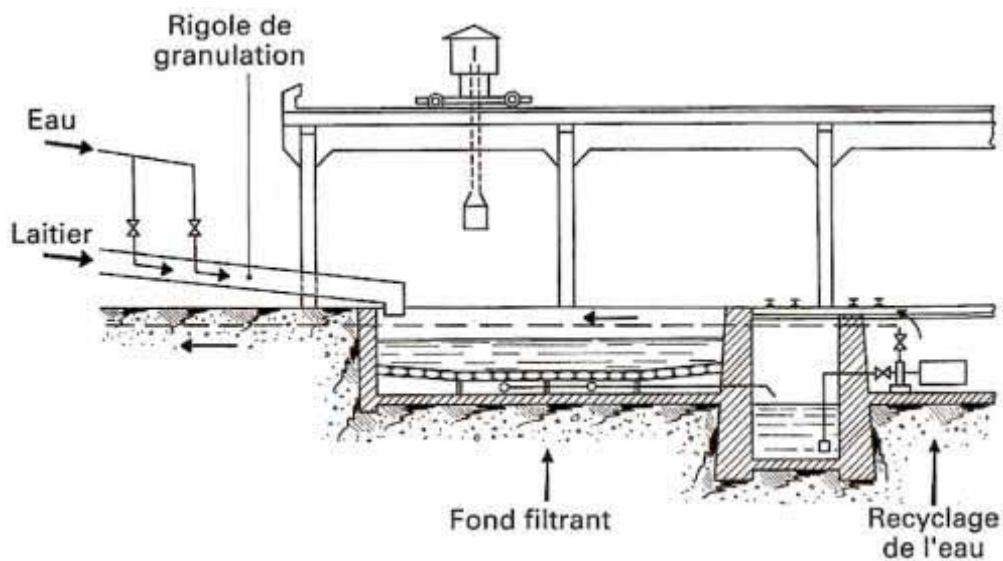


Figure 7 – Granulation en rigole et fond filtrant [8].

—Le tambour INBA développé par la société P. Wurth, où le laitier est séparé de l'eau dans un tambour rotatif muni de tamis filtrants dont l'efficacité est maintenue par un décolmatage à l'air et à l'eau (figure 8). Un convoyeur à bande situé dans l'axe du tambour évacue le granulé égoutté. Ce système tend à se généraliser à cause de son faible encombrement, et de son coût inférieur à celui d'un fond filtrant [10].

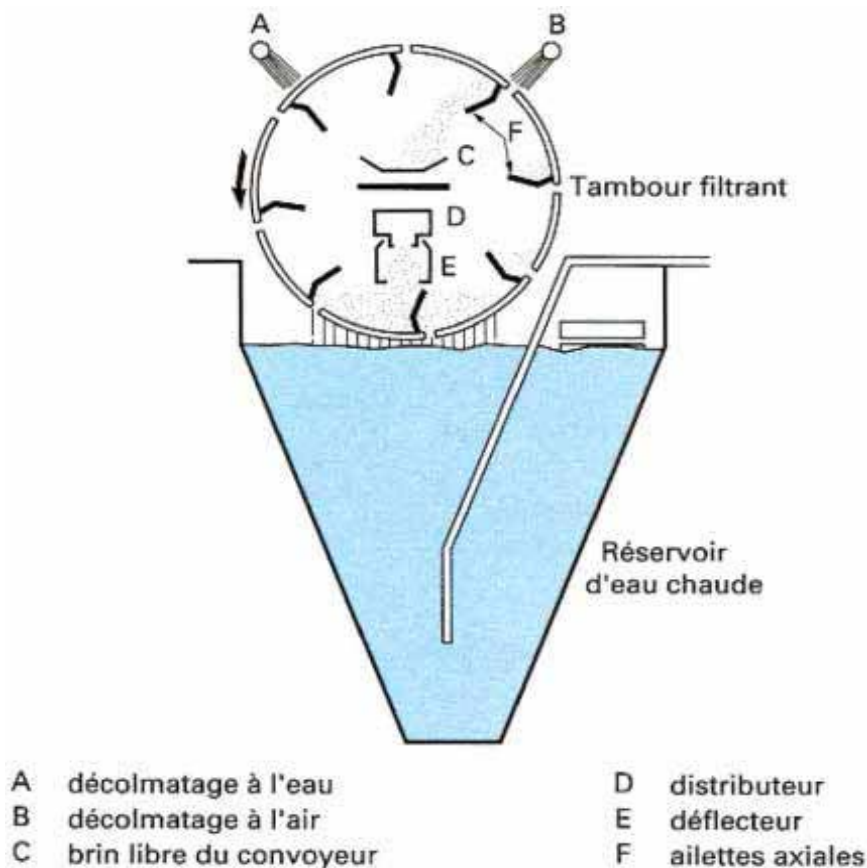


Figure 8 – Tambour INBA [Coupe] [8].

II.3.5.2. Description du produit

Le laitier granulé se présente sous la forme d'un sable de dimensions 0 à 5 mm, et dont la dimension médiane est de l'ordre du millimètre. La trempe subie par le laitier ayant empêché sa cristallisation, la principale caractéristique du granulé est d'être, pour 85 à 100 %, sous la forme vitreuse ; il s'agit d'un liquide surfondu à très forte viscosité, donc en état instable et susceptible de cristalliser ; la chaleur latente de cristallisation est d'environ 200 MJ/kg. L'état instable du laitier granulé est à l'origine de sa capacité à faire prise à la manière d'un liant hydraulique ; cette hydraulité dépend de la composition du laitier et augmente avec la surface spécifique des grains. D'une part, des formules empiriques établissent une correspondance entre l'analyse et l'hydraulité : par exemple, on considère que cette propriété est à un niveau suffisant quand l'indice de Keil:

$$K = \frac{(\text{CaO} + \text{CaS} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2}$$

est supérieur à 1,5. D'autre part, on mesure la faculté qu'a le laitier granulé de développer une surface spécifique importante lors des manutentions, malaxages ou compactages : par exemple, on détermine le coefficient α (indice d'activité hydraulique):

$$\alpha = \text{SF}/1000$$

où S: est la surface spécifique des fines naturelles du laitier, et F le pourcentage de fines produites par un broyage normalisé [10].

Le coefficient α varie généralement entre 15 et 100 [9] :

- pour $\alpha < 15$, le laitier est très pauvre;
- pour $15 < \alpha < 40$, le laitier est pauvre;
- pour $40 < \alpha < 55$, le laitier est suffisant;
- pour $55 < \alpha < 85$, le laitier est bon;
- pour $85 < \alpha < 100$, le laitier est très bon;
- pour $\alpha > 100$, le laitier est excellent.

Pour un laitier habituel, la teneur en eau résiduelle varie de 8 % à 15 % [8].

II.4. Emploi du laitier vitrifié en cimenterie

II.4.1. Ciment au laitier

Après les travaux de L. Vicat vers 1818 et de E. Langen en 1862, vint les travaux de G. Prussing qui ont permis le lancement de la première fabrication industrielle du ciment au laitier en Allemagne en 1882. En 1900 le ciment au laitier fut utilisé pour la construction du métro à Paris.

Actuellement, l'introduction du laitier dans le cycle de fabrication du ciment par des teneurs variables, permet une réduction considérable du coût énergétique de la fabrication des ciments (réduction des combustibles de 30 à 40 %) [2], ainsi que l'obtention des ciments présentant des caractéristiques physico-chimiques intéressantes telles que la résistance aux milieux agressifs, et le faible retrait.

Cette utilisation du laitier se fait:

- Soit, en mélange avec le clinker, avant le broyage pour la fabrication des ciments Portland au laitier [8];
- Soit, en mélange avec du calcaire comme matière première pour la préparation du clinker par voie sèche, qui est souvent mélangé à son tour avec du laitier (d'après les travaux de Neville, 2000) [2];
- Soit, par broyage du laitier à une finesse appropriée pour être utilisé seul comme liant, en présence d'un catalyseur à base d'alcalis ou de sulfate [2].

Les ciments au laitier qui font l'objet d'une norme sont répertoriés au tableau 2 (voir chapitre I).

II.4.2. Qualités demandées au laitier destiné à la cimenterie

- a) **Forte hydraulicité**, et donc taux de vitrification élevé ($\geq 90\%$, on emploie donc du laitier granulé ou bouleté) ; teneur en chaux aussi forte que possible, qui favorise la prise. Une teneur en alumine élevée est parfois recherchée parce qu'elle améliore la résistance initiale (on a, en Allemagne, enfourné de la bauxite au haut-fourneau dans ce but) ; l'effet de la teneur en MgO est discuté et ne présente aucun risque de gonflement [8].
- b) **Bonne aptitude au broyage**, on doit éviter l'emploi de laitier coulé froid qui donne des grains durs [8].
- c) **Teneur en eau inférieure à 10 %**, pour éviter ou limiter les frais de séchage avant broyage [8].

II.4.3. Caractéristiques et domaines d'emploi

Pratiquement, le ciment CPJ étant utilisé comme le ciment Portland (CPA), à cause de sa faible teneur en laitier ($\leq 35\%$). Alors, on va s'intéresser aux ciments à forte teneur en laitier (CHF et CLK) [8].

II.4.3.1. Évolution de la résistance dans le temps

La figure 9 compare l'évolution de la résistance à la compression d'un ciment CPA et celle d'un CHF [8]:

- le ciment CHF prend plus lentement au départ, ce qui nécessite de garder le béton humide assez longtemps, et de prendre des précautions quand il faut décoffrer rapidement. Des adjuvants, comme des chlorures, peuvent accélérer la prise ;
- à long terme, la résistance du ciment CHF dépasse celle du CPA, d'où l'emploi du ciment au laitier vient quand la résistance finale doit être élevée.

II.4.3.2. Effet de la chaleur d'hydratation

Les ciments ont une chaleur d'hydratation d'autant plus faible que la teneur en laitier est plus forte (figure 10), la température au coeur du béton est donc plus faible avec les fortes teneurs en laitier, ce qui réduit le risque de fissuration et fait conseiller l'emploi des CHF et des CLK pour les grandes masses de béton. La mise en œuvre de ces ciments est plus facile par temps chaud, par contre, par temps froid, ils sont plus sensibles au gel que les autres [8].

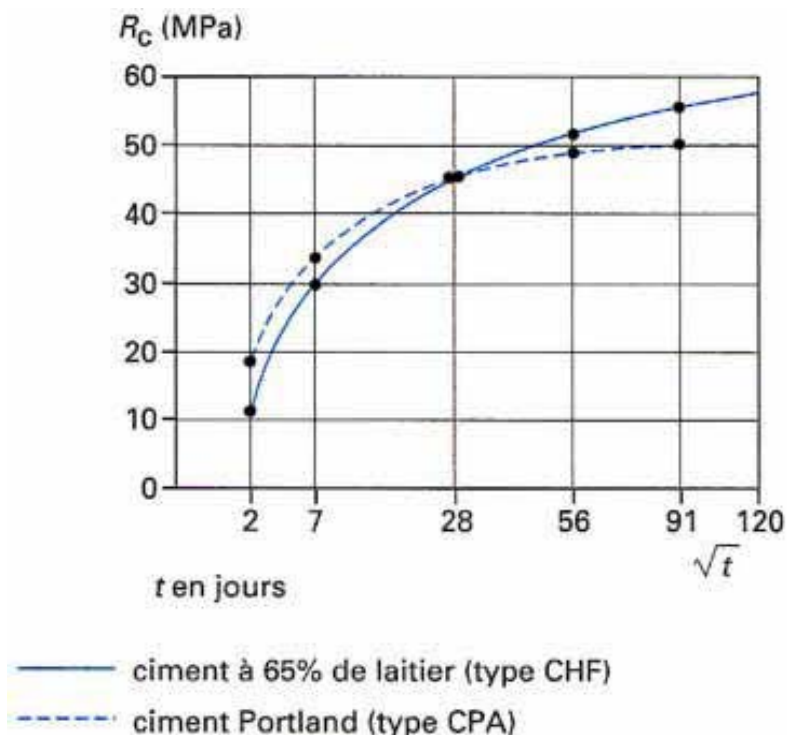


Figure 9 – Évolution de la résistance à la compression R_c de deux ciments en fonction du temps t [8].

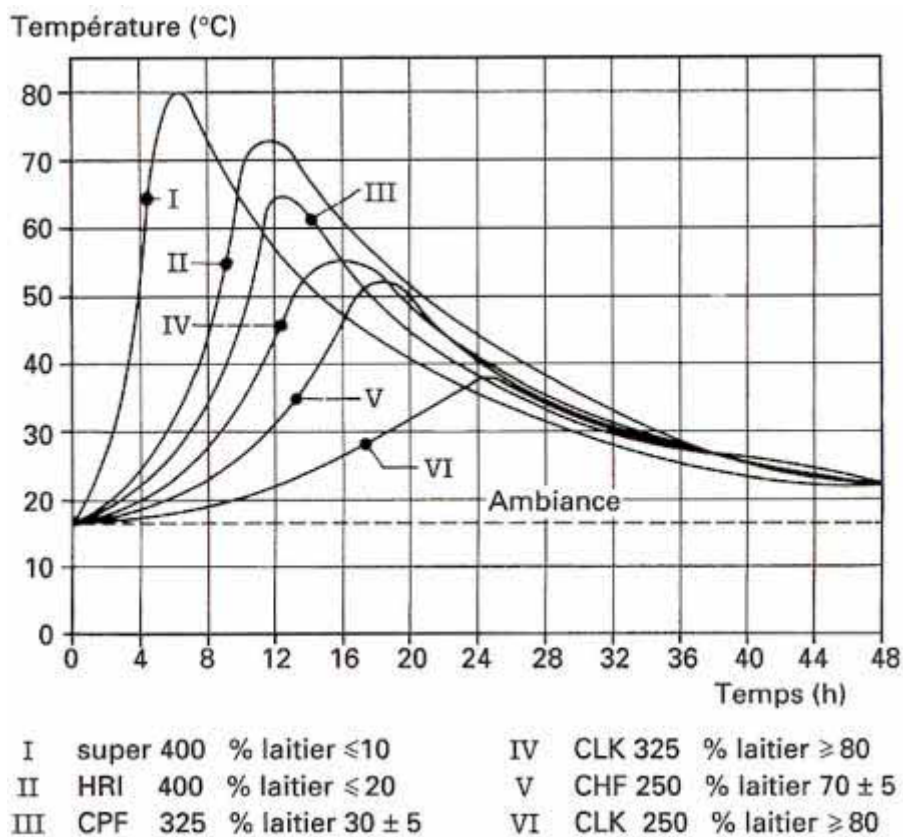


Figure 10 – Élévation de la température au moment de la prise du ciment (d'après Lesage) [8].

II.4.3.3. Résistance aux agressions chimiques

Du fait de leur teneur en chaux faible ou nulle, les ciments CHF et CLK sont peu sensibles à l'attaque des eaux acides, des eaux chargées en chlorures ou en sulfates, et des eaux très pures. Ils sont donc recommandés pour les ouvrages marins, les égouts, les travaux dans la nappe phréatique, etc [8].

II.5. Prise hydraulique du laitier vitreux

L'hydratation du laitier, qui conduit à sa prise en masse, se fait à partir de l'eau de gâchage, qui, à condition d'être suffisamment basique ($\text{pH} \approx 12$), dissout un peu de laitier ; on obtient alors une solution concentrée, ce qui permet la précipitation de composés hydratés, d'où une baisse de concentration, et le déroulement de cycles :

dissolution \rightarrow concentration \rightarrow précipitation

La prise est semblable à celle du ciment, à la différence que, ce dernier étant très basique (pH du ciment gâché ≈ 13), son hydratation se déclenche dès l'humidification, alors que, pour une prise rapide, le laitier vitreux doit être activé [8].

II.6. Méthodes d'activation du ciment au laitier

L'activation du laitier consiste à assurer la basicité nécessaire pour donner lieu à sa prise hydraulique. On distingue trois types d'activations, selon la nature de l'agent activant utilisé [11]:

II.6.1. Activation calcique

La chaux assure un pH suffisant pour permettre le passage en solution de l'alumine et par conséquent, de la silice et de la chaux. Les produits de l'hydratation sont: Les silicates de chaux hydratés (CSH) et l'aluminate tétracalcique (C_4AH_{13}), ces derniers consomment l'activant (la chaux).

Dans ce type d'activation, la géhlenite est incompatible avec la phase chaux qui se décompose en (CSH) et (C_4AH_{13}), et n'a pas lieu de se former [11].

Les bétons obtenus présentent une faible chaleur d'hydratation (idéal pour les ouvrages de masse).

II.6.2. Activation par le clinker du ciment Portland

Lors de l'hydratation, l'activation du laitier est faite par la chaux du clinker. Les composés qui apparaissent à la prise dans les ciments contenant ou non du laitier sont le (CSH), de l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) et de la portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] ; toutefois, la chaux libre étant d'autant plus utilisée pour l'activation que la teneur en laitier est plus élevée, plus il y a de laitier, moins il y aura de portlandite dans le béton. Dans le cas du béton de ciment CLK, il y en a plus de portlandite.

L'hydratation du laitier activé se déroule beaucoup plus lentement que celle du clinker ; la prise est d'autant plus lente que le ciment contient plus de laitier [8].

II.6.3. L'activation sulfatique

Cette activation consiste à mélanger le laitier granulé (75 à 80 %) et un composant sulfatique comme le gypse (10 à 20 %), et pour accélérer l'hydratation on ajoute un activant alcalin comme le ciment Portland ordinaire (< 5 %) [12,13]. Le ciment résultant s'appelle le ciment sursulfaté. Le gypse utilisé dans l'industrie des ciments, doit avoir une teneur en sulfate supérieure à 31 %.

Pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques il est nécessaire d'avoir un rapport Ca/Si >> 1, ainsi qu'une teneur d'alumine (Al_2O_3) supérieure à 13 – 15 % est recommandée pour optimiser le comportement hydraulique [9,12].

Le produit principal de l'hydratation est l'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) et le (CSH) [14-16]. La formation de l'ettringite favorise le développement de la résistance au jeune âge, de la pâte du ciment hydraté; tandis que la formation du (CSH) permette un développement constant de la résistance à long terme [14,17].

II.6.4. L'activation alcaline

L'activation alcaline fut abondamment étudiée (Voinovitch et Dron, 1976), (Glukhoviskij, Zaitsev et Pakhomow, 1983), (Talling et Brandstetr, 1989), (Puertas, 1995) et (Shi et Day, 1995) [18-22]. L'activation alcaline se fait principalement par:

- les alcalis caustiques (dont la formule chimique est R-OH);
- les sels non siliceux provenant d'acides faibles tels que: (R_2CO_3), (R_2SO_3) et (R_2S);
- les sels siliceux du type [$R_2O (m) SiO_2$].

Où, R représente les ions des métaux alcalins (Na^+ , K^+ , Li^+) et m représente le module siliceux (module du verre soluble).

Le produit principal de l'hydratation est un gel de (CSH). Cette phase est différente de celle formée dans l'hydratation du ciment Portland et avec un rapport (CaO/SiO_2) plus petit. La formation des autres phases ou produits d'hydratation dépend de l'activant utilisé, la structure et la composition du laitier utilisé et les conductions de cure et du durcissement [23].

II.6.4.1. L'activation par les alcalis caustiques (la soude)

La soude (NaOH) garantie à la solution un PH supérieur à 12, favorable à la dissolution du verre du laitier; elle agit comme un catalyseur sur le laitier, donnant une pâte à prise et durcissement rapide au jeune âge et améliore les résistances aux âges précoces.

II.6.4.2. L'activation par les sels non siliceux (carbonate de sodium)

Le carbonate de sodium (Na_2CO_3), commercialisé sous le nom de la soude et appelé par fois: cristaux de soude, permet de développer des résistances inférieures à celles qui sont obtenues en utilisant la soude (NaOH) [24].

II.6.4.3. L'activation par les sels siliceux (verre soluble)

Le verre soluble est une solution visqueuse de silicate de sodium ou de potassium, ayant une composition variable: $(\text{R}_2\text{O} \cdot m \cdot \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O})$ [25].

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

$$m = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} \cdot K_0 \quad \text{où: } (K_0=1,032);$$

et pour le verre à base de potassium par:

$$m = \frac{\text{SiO}_2}{\text{K}_2\text{O}} \cdot K_0 \quad \text{où: } (K_0=1,568).$$

Le module de verre soluble varie généralement de 2,5 à 3 [25].

D'après Mezghiche (1996), l'activation par le verre soluble est avantageuse, elle donne des résistances en compression très élevées (3 fois ou plus) par rapport aux autres activants [25]. L'augmentation de la densité du verre soluble liquide (de 1150kg/m^3 à 1300kg/m^3), influe sur la résistance du ciment par une augmentation importante à 28 jours de durcissement normal ou par étuvage; par contre l'augmentation du module siliceux (de 1 à 3) influe négativement sur la résistance en compression pour les différentes densités [26].

II.6.5. L'activation mixte (sodo-sulfatique)

En combinant les deux activants (soude + sulfate), ils réagissent ensemble pour donner de la chaux et du sulfate de sodium. La soude joue le rôle de catalyseur, alors que le gypse et la chaux participent à la formation de l'ettringite et des silicates de chaux hydratés [2].

II.7. Comportement mécanique des ciments au laitier

Comme tous les ciments, le comportement mécanique des ciments au laitier est influencé par plusieurs facteurs tels que: la composition chimique, la finesse de mouture, les conditions de cure et la nature et la concentration de l'activant.

II.7.1. Influence de la composition chimique

Les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux sont le reflet de la composition chimique. L'influence de cette composition sur la réactivité des ciments au laitier et par conséquent, sur leur comportement mécanique, est très complexe.

Les oxydes (Al_2O_3) et (CaO) augmentent l'activité hydraulique du laitier, tandis que la (SiO_2) la fait diminuer [25]. Pour avoir une bonne hydraulité, il faut que le rapport (CaO/SiO_2) soit autour de 1,3; avec les rapports ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) et ($\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) autour de 3 [23].

L'augmentation du (MgO) jusqu'à 18 % est favorable; contrairement au ciment Portland, il n'y a pas de risque de gonflement engendré par le (MgO) libre pendant l'hydratation [27]. La teneur en (Fe_2O_3) n'a pas d'effet considérable sur la qualité du laitier; tandis que les oxydes de titane, de protoxyde et de manganèse doivent être limités.

Une faible quantité de sulfures de calcium (jusqu'à 7 %) accroît quelque peu l'activité du laitier.

Une grande attention alors, a été donnée à la relation entre la composition chimique du laitier et la réactivité, et plusieurs formules sont développées afin d'obtenir une composition favorable du laitier.

II.7.1.1. Le module de basicité

Suivant les auteurs et les pays, il existe plusieurs formules pour exprimer l'indice de basicité du laitier:

$$M_{b1} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$$

$$M_{b2} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$$

$$M_{b3} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

Le module de basicité du laitier présente le rapport entre la somme des oxydes basiques qu'il contient et la somme des oxydes acides, la valeur idéale de l'indice, qui permettra d'obtenir le meilleur laitier s'établit (1,32 à 1,34) [2].

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

- laitier basique dont $M_b > 1$;
- laitier acide dont $M_b < 1$;
- laitier neutre dont $M_b = 1$.

II.7.1.2. Le module d'activité

Il est donné par la formule:

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

— le laitier est basique si $0,17 < M_a < 0,25$;

— laitier est acide si $0.33 < M_a < 0,40$.

Les formules les plus utilisées sont:

En Allemagne (la formule Keil) [8]:

$$K = \frac{(CaO + CaS + MgO + Al_2O_3)}{SiO_2}$$

— pour $K < 1,5$, le laitier est médiocre;

— pour $1,5 < K < 1,9$, le laitier est bon;

— pour $K > 1,9$, le laitier est excellent.

En France (la formule de Langavant) [27]:

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

— pour $12 < i < 15$, le laitier est médiocre;

— pour $15 < i < 20$, le laitier est bon;

— pour $i > 20$ le laitier est excellent.

D'après les normes soviétiques [GOST 3476-74], l'hydraulicité des laitiers granulés des hauts-fourneaux est estimée par le coefficient de qualité qui est défini comme étant le rapport entre les oxydes de calcium, d'aluminium et de magnésium et de bioxyde de silicium et de titane.

$$K' = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO_2}, \quad (\text{pour une teneur en } MgO \leq 10);$$

$$K' = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO_2 + (MgO + 10)}, \quad (\text{pour une teneur en } MgO > 10).$$

L'hydraulicité est élevée quand (K') est élevé [26].

II.7.2. Influence de la porosité de la pâte du ciment

La porosité de la pâte du ciment durcie est due essentiellement à la présence d'une quantité d'eau. Après durcissement du ciment, le reste de l'espace occupé par l'eau dans la pâte fraîche devient des pores. Ces pores sont devisés en [28]:

- pores capillaires qui dépendent de la proportion de l'eau de gâchage par rapport au ciment (E/C) et du degré de l'hydratation;
- pores de gel (produits de l'hydratation).

Le volume de ces pores a un effet inverse sur la résistance mécanique du ciment: plus ce volume augmente, plus la résistance diminue. Cela est dû à la création de discontinuité dans la matière, qui engendre une concentration des contraintes dans des points singuliers et par suite la rupture de l'éprouvette ou de l'élément structurale, avant l'atteinte de la résistance mécanique réelle du ciment.

Les ciments de laitier ont une forte compacité grâce aux hydrates formés pendant l'hydratation du laitier, ce qui donne des pores de dimensions plus petites.

II.7.3. Influence de la finesse de mouture (surface spécifique)

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité du béton est par conséquence, dans le développement de sa résistance mécanique. Une finesse élevée assure un contact plus grand des grains de ciment, ce qui permet une forte réactivité et donne des résistances mécaniques élevées à long terme [14].

D'après, (Nacéri, 2005), en augmentant de la surface spécifique du laitier de 2000cm²/g à 4800 cm²/g, l'activité du ciment au laitier augmente et par suite la résistance mécanique augmente aussi [29].

Ainsi, la faible aptitude du laitier à développer une bonne résistance au jeune âge peut être compensée par l'augmentation de sa finesse (activation mécanique) [30].

II.7.4. Influence de la concentration de l'activant

L'augmentation de la concentration des activants alcalins influe positivement sur la résistance mécanique du ciment au laitier [31], est de même pour l'activation sulfatique avec le gypse [32]. D'après Puertas et al. (2000), dans le cas de la soude (NaOH), la résistance à la compression de la pâte de ciment (100% laitier) est plus de 35 MPa à 28 jours, pour une concentration de 2 mol/l, et supérieure à 50 MPa, pour une concentration de 10 mol/l [23].

II.7.5. Influence de la température de cure

Les ciments au laitier supportent bien l'étuvage (accélération de durcissement); la combinaison de l'activant et de l'étuvage (surtout pour les cycles moyens et longs), améliore nettement la résistance mécanique [33]. Cependant, cette augmentation de température de cure a un effet positif sur le développement de la résistance au jeune et moyen âge; mais à long terme, pour un ciment durci dans une température normale, la résistance est égale ou supérieure à celle qui est pour un ciment traité thermiquement [23].

V. Conclusion

Nous avons montré dans cette partie que les méthodes classiques de fabrication des ciments consomment un taux d'énergie important, que se soit pour la fabrication par voie sèche ou humide; ce qui influe non seulement sur le coût de la production mais aussi sur l'environnement, sans oublier les poussières dégagées par la voie sèche. Le laitier vitreux, en présence d'un activant (alcalin, sulfatique ou les deux ensembles), peut faire prise et durcir comme le ciment Portland ordinaire, même sans utilisation du clinker; cela donne une possibilité de fabriquer un ciment moins coûteux et moins polluant, en supprimant la phase de cuisson.

En fonction de différents facteurs (la composition chimique, la concentration de l'activant, la température de cure,...etc.), les propriétés du ciment de laitier sont impressionnantes et des fois meilleures que celles du ciment Portland ordinaire; ce qui emmène à penser de pouvoir les améliorer pour obtenir des ciments de haute performance. Une des méthodes d'amélioration de ses propriétés se base sur l'utilisation des additions minérales qui agissent sur les propriétés chimiques ou physiques du béton exactement comme dans le cas de la fabrication des ciments Portland ordinaires.

Nous avons donc élaboré une stratégie d'étude qui se portera à la fois sur les effets des additions minérales sur le ciment au laitier activé tout en prenant en compte les principaux facteurs influant sur ses propriétés, et sur la recherche de la possibilité d'activation alcaline du laitier par une addition minérale au lieu des substances alcalines. Nous avons choisi pour cela d'utiliser la technique des plans d'expériences, idéale pour ce genre d'études.

DEUXIÈME PARTIE:
ÉTUDE EXPERIMENTALE

Introduction

L'état de l'art présenté dans la première partie montre que les propriétés physico-mécaniques du ciment au laitier sont influencées par plusieurs facteurs, liés au matériau, à sa mise en œuvre et aux conditions de cure. Ces facteurs confèrent au ciment durci ses caractéristiques physiques et mécaniques.

Dans ce travail, nous avons choisie d'étudier les effets de la pouzzolane naturelle comme addition minérale, sur les propriétés du ciment au laitier activé par la soude (activant alcalin). Du fait de la nature caustique de la soude et la délicatesse de sa préparation et sa mise en œuvre, nous avons essayé d'utiliser le calcaire non seulement comme addition minérale mais aussi comme activant.

CHAPITRE III: STRATÉGIE DE L'ÉTUDE

La stratégie de cette étude est basée sur l'étude des effets des additions minérales (dans notre cas: la pouzzolane et le calcaire) sur les propriétés du ciment au laitier afin de pouvoir les améliorer pour obtenir un ciment au laitier activé sans clinker avec des propriétés semblables ou meilleures que celle du ciment Portland ordinaire.

III.1. L'addition de la pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est considérée comme l'addition principale dans cette étude. Son utilisation consistera à faire remplacer une certaine quantité pondérale de laitier à différents pourcentages par de la pouzzolane pour deux finesses différentes et à en mesurer les effets sur les caractéristiques physiques et mécaniques de la pâte du ciment. L'activant utilisé est la soude caustique (NaOH). Le mélange correspondant aux meilleures caractéristiques mécaniques sera étudié en mortier.

Les propriétés mesurées ici sont:

- a- Des propriétés physiques: La consistance normalisée, le temps de prise et la stabilité.
- b- Des propriétés mécaniques: La résistance normale (à 28 jours), la résistance au jeune âge (à 2 et 7 jours) et la résistance à long terme (à 56 et 90 jours).

III.2. L'addition du calcaire comme activant

Par la même méthode de substitution, le calcaire sera utilisé avec le gypse (pourcentages égaux) comme mélange d'additions, dont le but est d'étudier ses effets sur la résistance mécanique de la pâte du ciment au laitier et de savoir son efficacité comme activant pour le laitier.

Les propriétés mesurées pour cette addition sont: La consistance normalisée (propriété physique) et la résistance à 2, 7, 28, 56 et 90 jours (propriétés mécaniques).

En fin, un pourcentage de pouzzolane sera additionné au meilleur mélange obtenu pour étudier la possibilité d'obtenir un ciment composé de laitier + pouzzolane + calcaire + gypse.

III.3. Propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés

Les analyses physico-chimiques sur les matériaux utilisés sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie d'Elma Labiod (Wilaya de Tébessa).

Les surfaces spécifiques de Blaine sont calculées par la formule simplifiée suivante [34]:

$$S = \frac{\rho_0}{\rho} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t_0}} \times S_0$$

Où:

S: surface spécifique [cm²/g];

S₀: surface spécifique du ciment de référence [cm²/g];

ρ: masse volumique du ciment [g/cm³];

ρ₀: masse volumique du ciment de référence [g/cm³];

t: temps mesuré [s];

t₀: moyenne des trois mesures de temps pour le ciment de référence [s];

III.3.1. Le laitier

Le laitier granulé de haut fourneau de complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Wilaya d'Annaba), obtenu par une trempe d'eau et chute dans un grand bassin (granulation en bassin). Il est utilisé ici comme composant principal du ciment [10].

- Masse volumique apparente: $\gamma = 950 \text{ kg/m}^3$;
- Masse volumique absolue: $\rho = 2787 \text{ kg/m}^3$;
- Surface spécifique de Blaine: $SSB = 3350 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Tableau 5 – Composition chimique du laitier.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
Laitier	39,700	9,260	1,470	40,250	4,130	0,890	0,140	0,590	0,004

- Le module de basicité:

$$M_{b1} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2} = 1,18$$

$M_b > 1$ donc, le laitier est basique.

- Le module d'activité:

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} = 0.23$$

$0,17 < M_a < 0,25$ donc, le laitier est basique.

- L'indice d'activité hydraulique (indice de Keil):

$$\alpha = SF/1000 = (3350 \times 0.72)/1000 = 241,2$$

$\alpha = 241,2 \gg 100$ donc, le laitier est excellent.

III.3.2. La pouzzolane

La pouzzolane naturelle extraite du gisement de Bouhamedi situé au sud de Beni-Saf (Wilaya d'Aïn-Témouchent). C'est une roche volcanique siliceuse variant du rouge au noir. Elle est broyée de façon à obtenir deux surfaces spécifiques différentes, pour être utilisée ici comme addition minérale.

- Masse volumique apparente: $\gamma = 1015 \text{ kg/m}^3$;
- Masse volumique absolue: $\rho = 2748 \text{ kg/m}^3$;
- Surface spécifique de Blaine: SSB1 = $5350 \text{ cm}^2/\text{g}$;
SSB2 = $5650 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Tableau 6 – Composition chimique de la pouzzolane.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
Pouzzolane	46,250	17,340	10,260	10,180	2,900	1,640	3,640	0,800	0,010

III.3.3. Le gypse

Le gypse obtenu du gisement d'Ain Mlila (Wilaya de Oum Elbouaghui), utilisé comme activant sulfatique.

- Masse volumique apparente: $\gamma = 903 \text{ kg/m}^3$;
- Masse volumique absolue: $\rho = 2368 \text{ kg/m}^3$;
- Surface spécifique de Blaine: SSB = $3250 \text{ cm}^2/\text{g}$;

Tableau 7 – Composition chimique du gypse.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
Gypse	6,560	1,740	0,370	29,820	2,860	0,280	-	31,64	0,004

III.3.4. Le calcaire

Le calcaire est obtenu de la carrière de la cimenterie d'Elma Labiod. Grâce à la présence d'un pourcentage important de carbonates de calcium (CaO) [35], le calcaire garantit un milieu alcalin pour l'hydratation du laitier (Ca/Si >> 1,0) [32]. Dans cette étude, le calcaire a été utilisé comme activant alcalin plutôt qu'une addition minérale, au lieu de la chaux utilisée généralement avec le gypse (activation mixte) [8].

- Masse volumique apparente: $\gamma = 970 \text{ kg/m}^3$;
- Masse volumique absolue: $\rho = 2348 \text{ kg/m}^3$;
- Surface spécifique de Blaine: $\text{SSB1} = 3550 \text{ cm}^2/\text{g}$;

Tableau 8 – Composition chimique du calcaire.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
Calcaire	3,590	1,230	0,120	52,250	0,450	0,110	0,040	0,060	0,007

III.3.5. Le ciment

Le ciment est de classe CPJ – CEM II/A, fabriqué par la Société des Ciments de Tébessa (S.C.T). Il est utilisé ici comme référence dans l'étude du comportement mécanique du mélange laitier + pouzzolane.

- Masse volumique apparente: $\gamma = 1250 \text{ kg/m}^3$;
- Masse volumique absolue: $\rho = 3150 \text{ kg/m}^3$;
- Surface spécifique de Blaine: $\text{SSB} = 3900 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Tableau 9 – Composition chimique du ciment.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
Ciment	27,430	5,400	3,480	53,710	1,410	0,920	0,160	2,590	0,004

III.3.6. Le sable

Le sable utilisé est un sable normalisé conforme aux normes EN 196-1, ISO 679 et ISO 9002; il est fabriqué par la société nouvelle du Littoral (Leucate - France).

Tableau 10 – Composition granulométrique du sable normalisé (référence) [36].

Dimensions des mailles carrées [mm]	Refus cumulés sur les tamis [%]
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 1

III.4. Présentation des plans d'expériences

Pour la première addition (la pouzzolane naturelle) nous avons utilisé le plan factoriel complet pour chaque âge de résistance; ce type de plans d'expériences est simple à modéliser et permet d'en extraire le maximum d'information.

Pour la deuxième combinaison (laitier + calcaire + gypse), nous avons choisi d'utiliser le plan de mélange, adapté pour ce type d'étude expérimentale.

III.4.1. Définition des paramètres étudiés (entrée du plan)

Afin d'étudier les effets des additions choisies sur les caractéristiques physico-mécaniques de notre ciment au laitier, il faut prendre en considération les différents facteurs influents sur elles.

III.4.1.1. Les proportions des matériaux étudiés

Les pourcentages de la pouzzolane utilisés dans le premier cas sont: 0 %, 10 %, 20 % et 30 %. Pour le deuxième cas, la norme NF P 15-301 exige une teneur en calcaire (CaCO_3) ≥ 75 %, pour une proportion excédant 5 % (93,17 % dans notre cas). Mais, pour éviter l'obtention d'un ciment sur-sulfaté et par méconnaissance de l'effet du calcaire sur le laitier, nous avons choisi de limiter les proportions du mélange (gypse + calcaire) utilisées à: (5+5) %, (6+6) % et (7+7) %.

III.4.1.2. La surface spécifique

Dans le but de ne concéder que les effets de la surface spécifique de l'addition minérale principale étudiée, nous avons choisi de fixer la finesse du laitier et de faire varier celle de la pouzzolane en deux surfaces spécifiques différentes SSB1 et SSB2.

III.4.1.3. La concentration de l'activant

L'activant utilisé ici est la soude caustique (NaOH), qui est un activant alcalin très fort. Les études faites ont montré la possibilité d'améliorer les caractéristiques mécaniques du ciment au laitier en faisant varier la concentration de la soude de 1 à 10 mol/l [23, 36]. La concentration choisie dans cette étude expérimentale est de 5 mol/l (200 g/l) pour le premier cas de mélange; pour le deuxième cas de mélange la soude est utilisée avec une concentration de 0,8 mol/l (32 g/l), juste comme agent

accélérateur de prise, car nous allons nous concentrer sur l'étude de l'aptitude du calcaire à compenser le gypse dans activation du laitier (activation mixte).

III.4.1.4. La température de cure

Comme l'effet positif de l'augmentation de la température de cure sur le développement de la résistance n'est que pour le jeune et moyen âge (voir § II.7.5 du deuxième chapitre), elle sera fixée à $20 \pm 1^\circ$ pour les essais de résistance, ainsi que pour les autres essais de détermination des caractéristiques physiques.

III.4.2. Conception des plans d'expériences

III.4.2.1. Le plan factoriel complet (mélange laitier + pouzzolane)

L'étude porte sur deux facteurs: pourcentage de l'addition et la surface spécifique. Le premier facteur est à quatre niveaux et le deuxième à deux niveaux (figure 11).

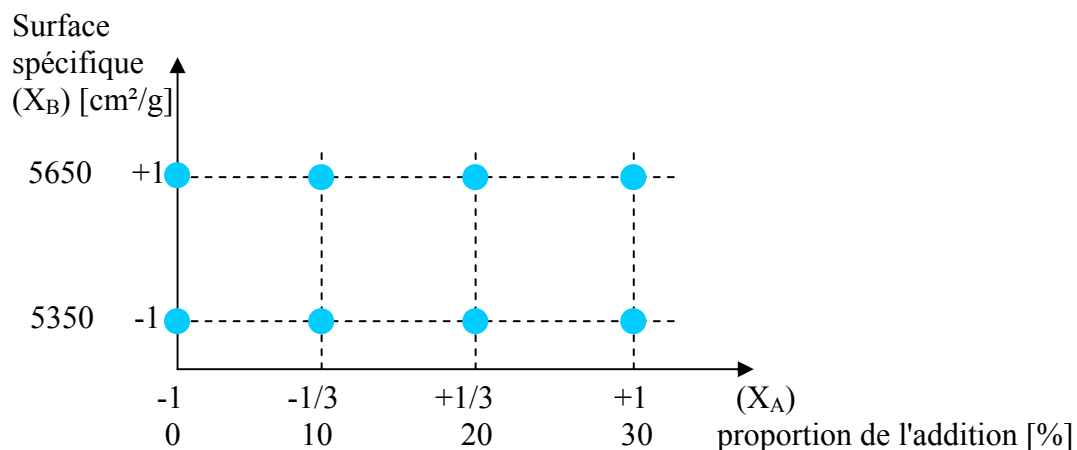


Figure 11 – Définition des points expérimentaux dans l'espace expérimental.

Le plan complet correspondant comporte 8 essais pour chaque âge de résistance (4 x 2) pour chaque âge de résistance, ce qui veut dire 40 en totalité (tableau 11).

Tableau 11 – Matrice d'expérience en unités centrées réduites (plan d'expériences factoriel complet à 8 essais).

N	I	X _A	X _B
1	+1	-1	+1
2	+1	-1/3	+1
3	+1	+1/3	+1
4	+1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1/3	-1
7	+1	+1/3	-1
8	+1	-1	-1

III.4.2.2. Le plan de mélange (mélange laitier + gypse+calcaire)

Les facteurs de cette partie de notre étude sont les proportions des constituants de ce mélange, dont la somme est égale à 100 % (figure 12). Les limites inférieures pour le laitier, le calcaire et le gypse respectivement sont (0%, 5%, 86%) et les limites supérieures sont (7 %, 14 %, 90 %). Le plan d'expériences est à 3 essais seulement (5+5+90 %, 6+6+88 %, 7+7+86 %) (tableau 12), plus un quatrième essai (86+14+0 %) témoin pour la comparaison des effets des mélanges au calcaire avec celui du laitier avec gypse seulement.

Tableau 12 – Plan d'expériences de mélange à 3 essais.

N	A	B	C
1	0,86	0,07	0,07
2	0,88	0,06	0,06
3	0,90	0,05	0,05

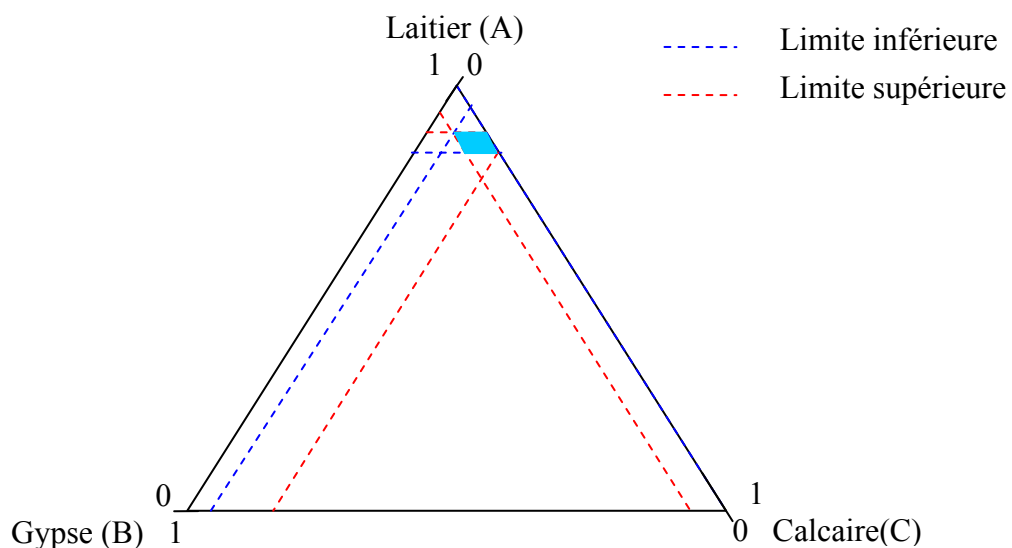


Figure 12 – Définition du domaine d'étude du plan mélange.

III.4.3. Mesure des propriétés physico-mécaniques de la pâte de ciment (sortie du plan)

III.4.3.1. Essai de pénétration à l'aiguille – Détermination de la consistance normalisée

La pâte de ciment à consistance normalisée est une pâte qui a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée (de Vicat). L'eau nécessaire à une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur des pâtes à quantités d'eau différentes [37].

III.4.3.2. Essai de prise du ciment – Détermination du début et fin de prise

Le temps de prise est déterminé par l'observation de la pénétration de l'aiguille de l'appareil de Vicat dans une pâte de ciment de consistance normalisée jusqu'au moment où elle atteint une valeur spécifiée. Le temps du début de prise est le temps qui correspond à la pénétration de l'aiguille à une distance (4 ± 1) mm entre l'aiguille et la plaque de base de l'éprouvette, à partir du temps zéro. Le temps de fin de prise est le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel l'aiguille ne pénètre pour la première fois qu'à 0,5 mm dans l'éprouvette [37].

III.4.3.3. Essai du Chatelier – Détermination de la stabilité

La stabilité est déterminée par l'observation de l'expansion volumique d'une pâte de ciment de consistance normalisée, révélée par un mouvement relatif de deux aiguilles (appareil Le Chatelier) [37].

III.4.3.4. Essai d'écrasement – Détermination de la résistance à la compression

La résistance à la compression de la pâte est déterminée par écrasement des éprouvettes cubiques de dimensions 20 mm x 20 mm x 20 mm.

Les éprouvettes sont préparées par gâchage du ciment avec un rapport E/C égale à la teneur en eau calculé donnant la consistance normalisée. Elles sont conservées dans une chambre humide à une température de $20 \pm 1^\circ$ C est une humidité supérieure à 90 %, jusqu'au temps de l'essai. Les écrasements sont faits à 2, 7, 28, 56 et 90 jours.

III.5. Mesure de propriétés mécaniques pour mortier de ciment

Le mortier préparé est celui qui correspond au mélange donnant les meilleures caractéristiques physico-mécaniques. Dans le but de pouvoir comparer notre ciment au laitier avec le ciment Portland ordinaire, le mortier préparé est un mortier normalisé avec un rapport E/C = 0,5. Les éprouvettes obtenues sont de forme prismatique et de dimension 40 mm x 40 mm x 160 mm; elles sont conservées dans les mêmes conditions précédentes jusqu'au temps d'essai, à 2, 7 et 28 jours.

III.5.1. Essai de flexion – Détermination de la résistance à la flexion

Les éprouvettes sont sorties de la chambre humide au maximum 15 minutes avant que l'essai soit exécuté. La détermination de la résistance à la charge à la flexion est faite par la méthode de la charge concentrée à mi-portée [38].

III.5.2. Essai d'écrasement – Détermination de la résistance à la compression

L'essai d'écrasement est fait avec les demi-prismes résultants de l'essai de flexion, conservées humides jusqu'au moment de l'essai.

CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Effets de la pouzzolane sur le ciment au laitier

IV.1.1. L'effet sur la consistance normalisée

L'étude du mélange laitier + Pouzzolane, montre que la consistance normalisée varie inversement avec le taux de pouzzolane; plus le pourcentage de l'addition est élevé, moins est la quantité d'eau nécessaire pour avoir une pâte à consistance normalisée (figure 13).

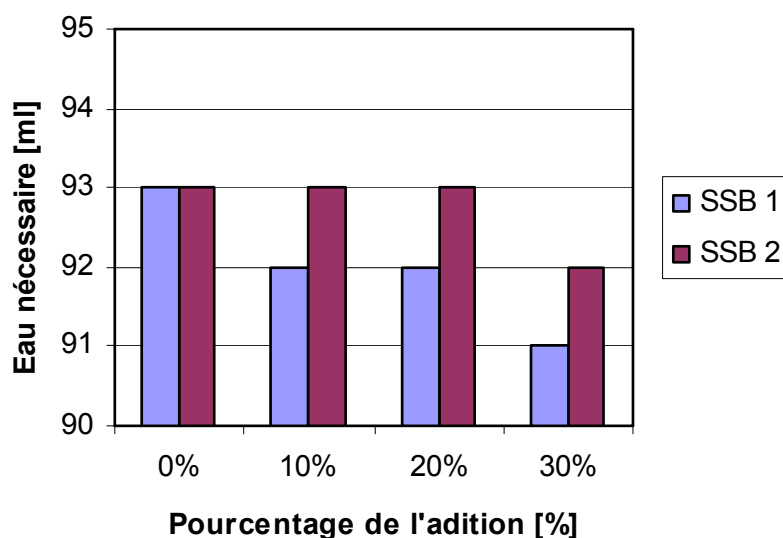


Figure 13 – La consistance normalisée en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

La décroissance est probablement causée par la diminution du rapport (Ca/Si); ce rapport diminue avec l'augmentation du pourcentage de pouzzolane (riche en dioxydes de silicium). La teneur en (CaO) par rapport à celle des (SiO₂) doit être donc, le facteur impératif, influant sur la quantité d'eau nécessaire pour donner une consistance normalisée (Voire annexe C, figure I).

La quantité d'eau nécessaire dans tous les cas est toujours inférieure à celle qui est pour le ciment de référence (égale à 140 ml). Le ciment Portland a un rapport

(Ca/Si) supérieur à celui des différentes pâtes du ciment laitier + pouzzolane étudiées; ce qui argumente l'explication donnée plus haut.

Par contre, plus la surface spécifique de Blaine est élevée, plus la quantité d'eau augmente.

Cette augmentation du besoin d'eau doit être due essentiellement à l'augmentation de la surface de contact de l'eau avec les grains du ciment, ce qui accroît l'absorption de l'eau.

IV.1.2. L'effet sur le temps du début et fin de prise

Les histogrammes ci-dessous (figures 14 et 15) montrent que le temps du début et de fin de prise varie proportionnellement au pourcentage de pouzzolane additionnée.

Pour la pâte avec 0 % pouzzolane, le temps de début de prise est inférieur à 60 minutes, tandis que les pâtes avec 10 % et 20 % d'addition commencent à faire prise après 75 et 120 minutes respectivement. Le temps de fin de prise pour 0%, 10 % et 20 % varie de 150 à 180 minutes. Par contre, l'ajout de 30 % de pouzzolane est très défavorable pour la prise de la pâte de ciment qui ne commence qu'après 6 heures et se termine après plus de 18 heures.

Le début de prise du ciment de référence utilisé, a lieu à partir de 120 minutes et se termine après 180 minutes. Donc, la pouzzolane stabilise la prise du ciment au laitier activé.

L'augmentation de la finesse de la pouzzolane décroît le temps de prise pour toutes les pâtes étudiées. Cette décroissance est due à l'accélération des réactions de l'hydratation du ciment.

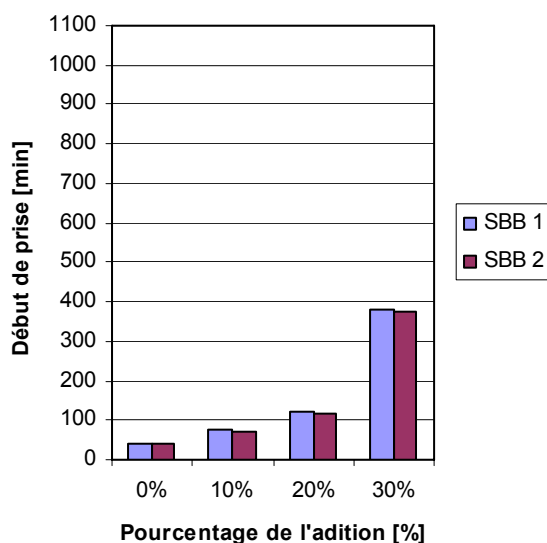


Figure 14 – Le temps de début de prise en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

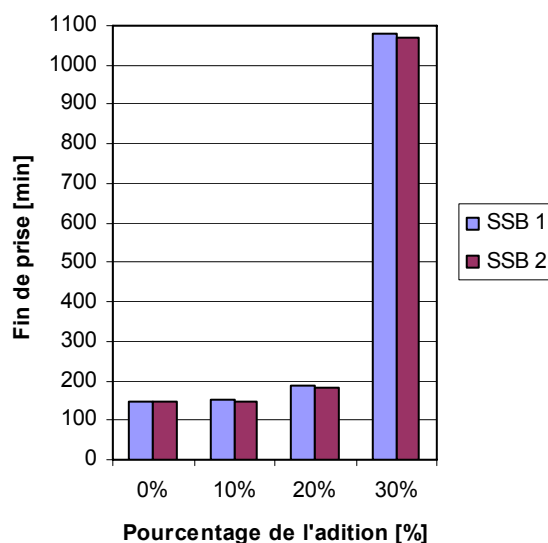


Figure 15 – Le temps de fin de prise en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

L'effet de la finesse de la pouzzolane additionnée, sur le temps de prise du ciment, est minime et négligé ici devant l'influence de ses proportions utilisées.

IV.1.3. L'effet sur la stabilité de la pâte

D'après le tableau 13, la pâte du ciment au laitier activé est très stable et présente une faible expansion plutôt négligeable de l'ordre de 0,5 mm (1,0 mm pour le ciment Portland de référence); cette expansion est nulle avec l'addition de pouzzolane naturelle dans la pâte.

Tableau 13 – L'expansion de la pâte de ciments en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

	0 % pouzzolane	10 % pouzzolane	20 % pouzzolane	30 % pouzzolane
L'expansion de la pâte (SSB 1)	0,5 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm
L'expansion de la pâte (SSB 2)	0,5 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm

Ces résultats indiquent que l'utilisation de la pouzzolane naturelle comme une addition minérale est très bénéfique pour la stabilité du ciment au laitier activé.

IV.1.4. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)

L'analyse de l'évolution de la résistance mécanique à la compression des pâtes étudiées indique que depuis le jeune âge de 2 jours (figure 16), les mélanges contenant 10 % et 20 % de pouzzolane donnent des résultats plus ou moins similaires à celle de la pâte constituée de 100 % de laitier activé (pâte témoin); tandis que les résistances développées pour 30 % d'ajout sont insignifiantes.

À 7 jours et jusqu'à 28 jours (figures 17 et 18), les deux premiers mélanges développent des résistances supérieures à celle de la pâte témoin, ce qui signifie que la pouzzolane a accéléré la cinétique d'hydratation de la pâte de ciment au laitier. L'ajout de 30 % de pouzzolane commence à son tour à développer des résistances, mais elles restent toujours inférieures à celles des autres pâtes étudiées. On dit que la pouzzolane favorise le développement des résistances du ciment au laitier activé.

2 jours

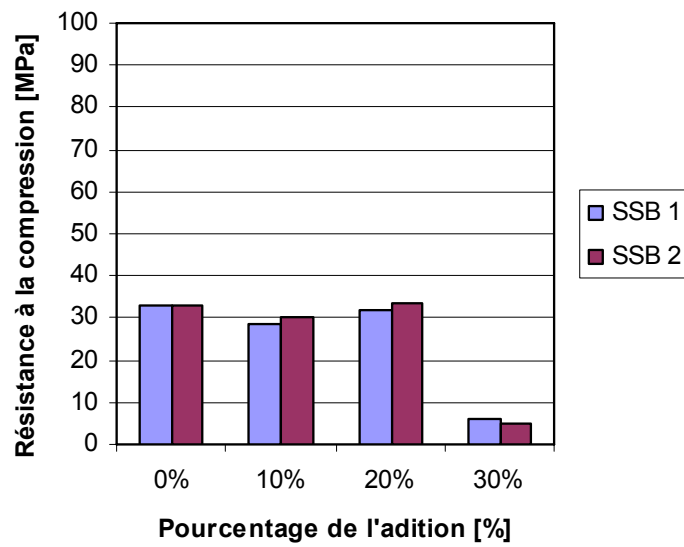


Figure 16 – La résistance à la compression à 2 jours (R_{c2}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

7 jours

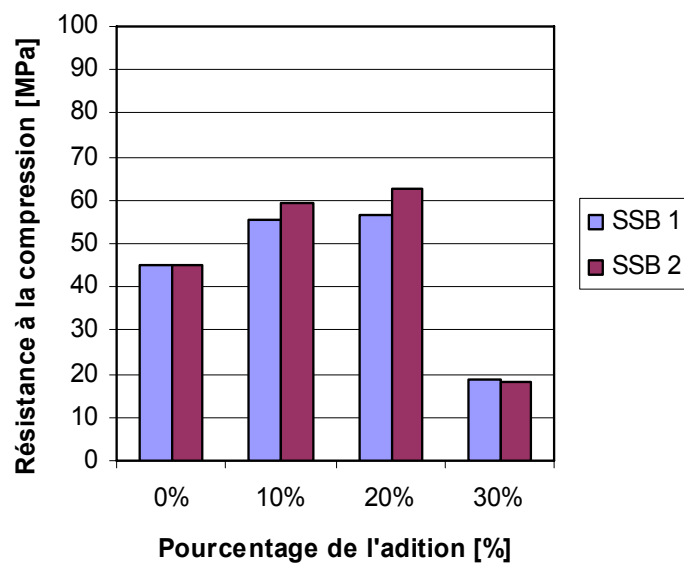


Figure 17 – La résistance à la compression à 7 jours (R_{c7}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

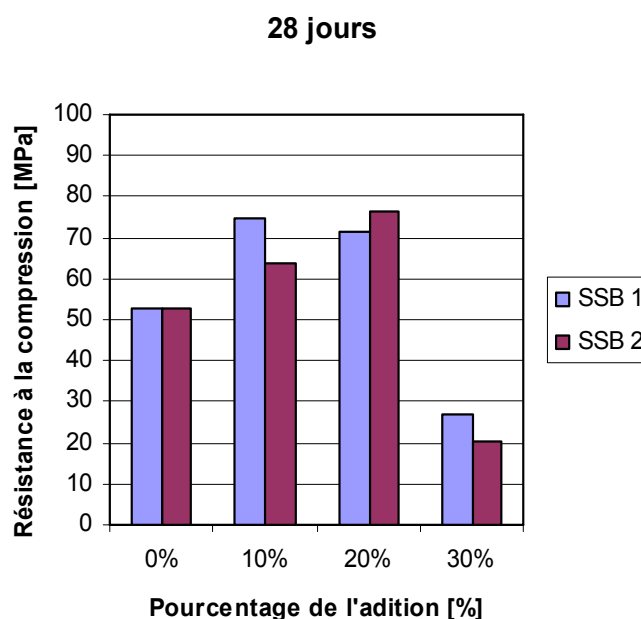


Figure 18 – La résistance à la compression à 28 jours (R_{c28}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

A long terme (à 56 et 90 jours), la résistance mécanique de la pâte témoin devient de plus en plus proche de celles des pâtes avec 10 % et 20 % d'ajout. Toutefois, l'ajout de 20 % de pouzzolane continue à donner les résistances les plus élevées par rapport aux autres mélanges (figures 18 et 19); il permet déjà à 28 jours, d'obtenir 80 % de la résistance développée par la pâte de ciment Portland de référence.

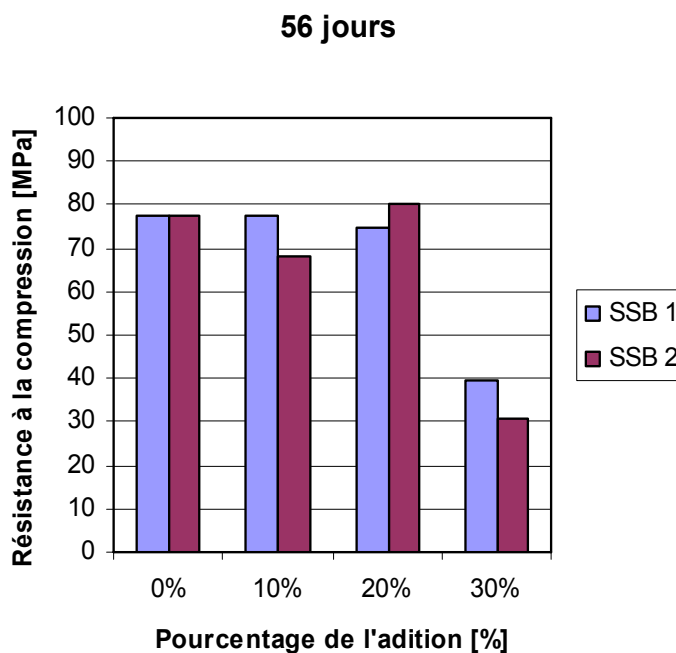


Figure 19 – La résistance à la compression à 56 jours (R_{c56}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

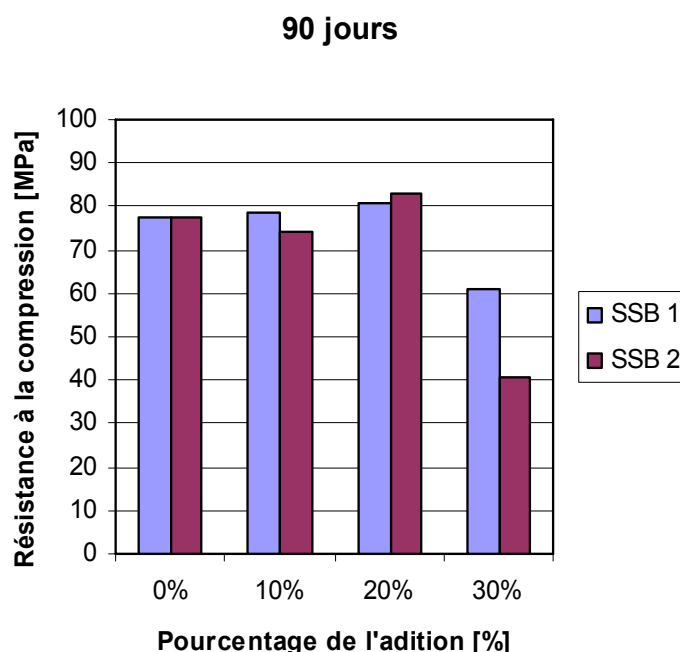


Figure 20 – La résistance à la compression à 90 jours (R_{c90}), en fonction du pourcentage et de la finesse de la pouzzolane.

Pour la SSB1, les résistances développées par les pâtes de 10 % et 20 % d'addition sont sensiblement les mêmes (figure 20), alors qu'on peut voir clairement que la SSB2 permet d'obtenir des résistances pour 20 % de pouzzolane, supérieures à celles qui sont pour 10 % (figures 21 et 22). Ceci montre bien que pour une finesse élevée, l'hydratation du ciment au laitier est plus rapide et complète.

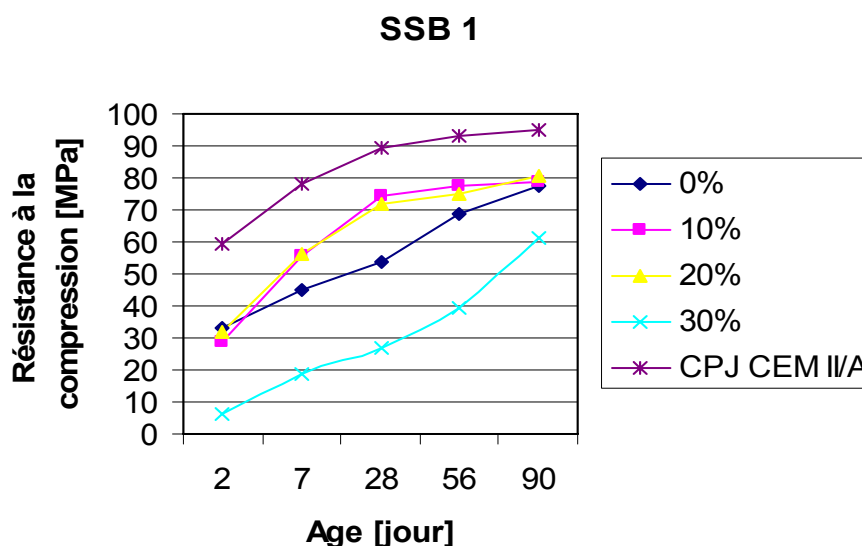


Figure 21 – L'évolution de la résistance à la compression pour SSB 1.

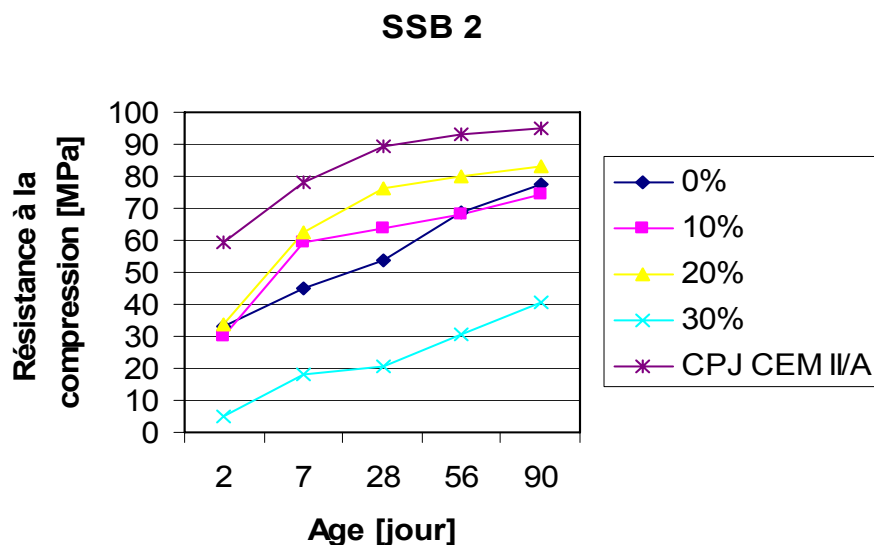


Figure 22 – L'évolution de la résistance à la compression pour SSB 2.

Cependant, l'effet de la finesse sur la résistance est variable avec le temps pour les différents taux d'addition (figures 15 à 19), si on excepte la pâte avec 30 % qui donne des résistances meilleures pour une finesse moins élevée. L'augmentation de la surface spécifique influe positivement sur le développement de la résistance au jeune âge pour 10 % et 20 % d'ajout. Par contre, c'est la surface spécifique N° 1 (SSB1) qui développe plus de résistance à partir du 28^e jour pour 10 % d'ajout (figures 15 à 19).

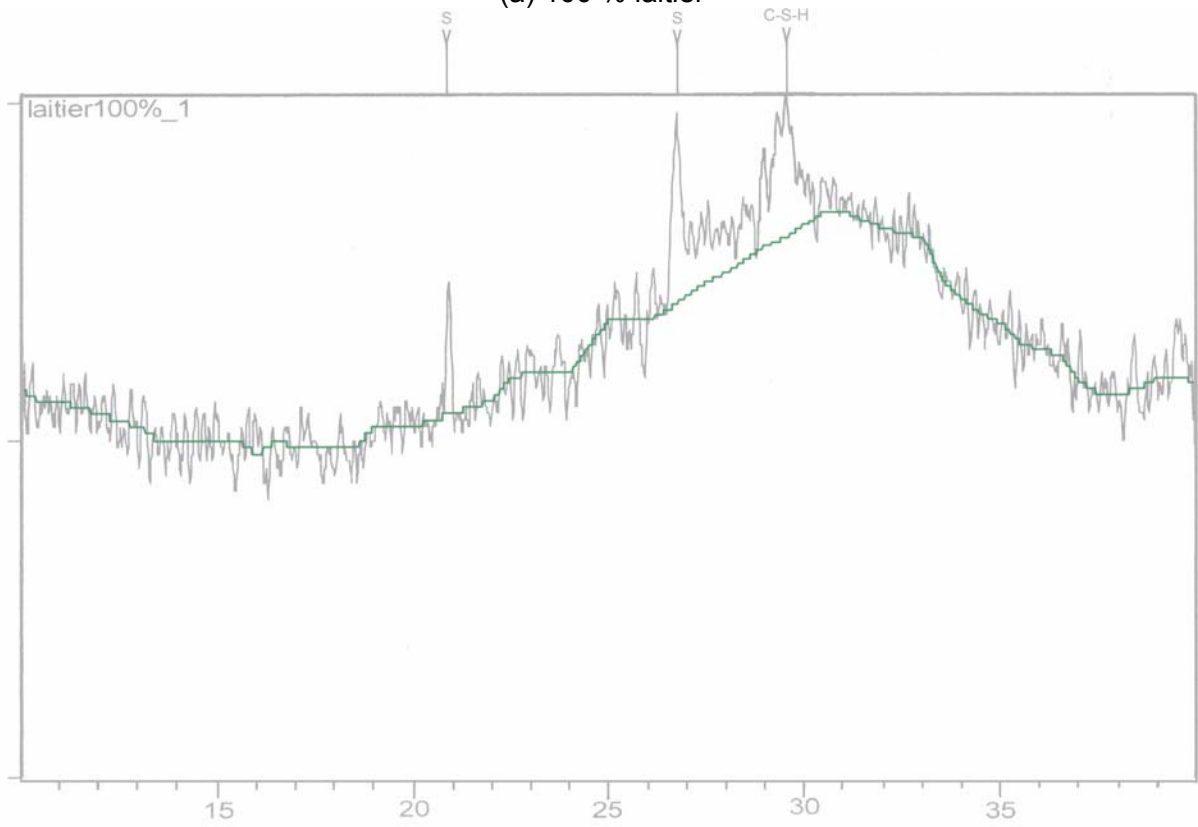
Pour une finesse (SSB1), ce sont les pâtes avec 10 % et 20 % de pouzzolane qui donnent une courbe de développement de résistance proche de celle du ciment Portland de référence. Par contre, pour la deuxième finesse (SSB 2), seule la pâte avec 20 % d'addition qui donne un tel résultat, dont la résistance normale atteint 85 % de celle du ciment de référence.

Les spectres obtenus par le DRX montrent que pour la pâte à 100 % laitier, le principal produit de l'hydratation (à 56 jours) est les (C-S-H) en plus d'une quantité de silicates inertes (figure 23 a).

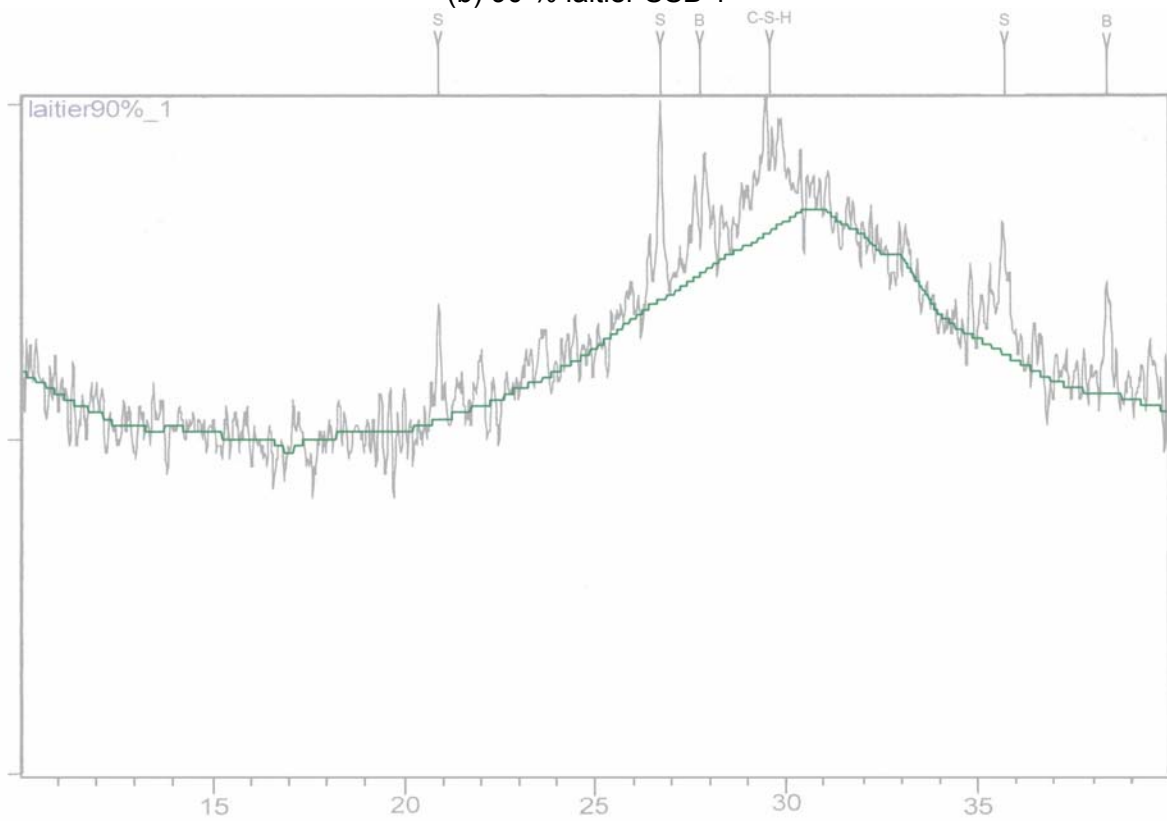
Pour une addition de 10 % et 20 % de pouzzolane (figure 23 b, c, d et e), en plus des deux produits précédents, on remarque la formation des silicates bicalciques; ces produits ont des intensités plus élevées pour la SSB1 (figure 23 b et d).

Dans le cas de 30 % de pouzzolane (figure 23 f et g), c'est pour la SSB2 qu'on remarque une grande intensité des produits d'hydratation avec la formation de méililite pour cette dernière (figure 23 g). D'une façon générale, les produits d'hydratation les plus importants pour tous les mélanges sans les (C-S-H) et les silicates inactives.

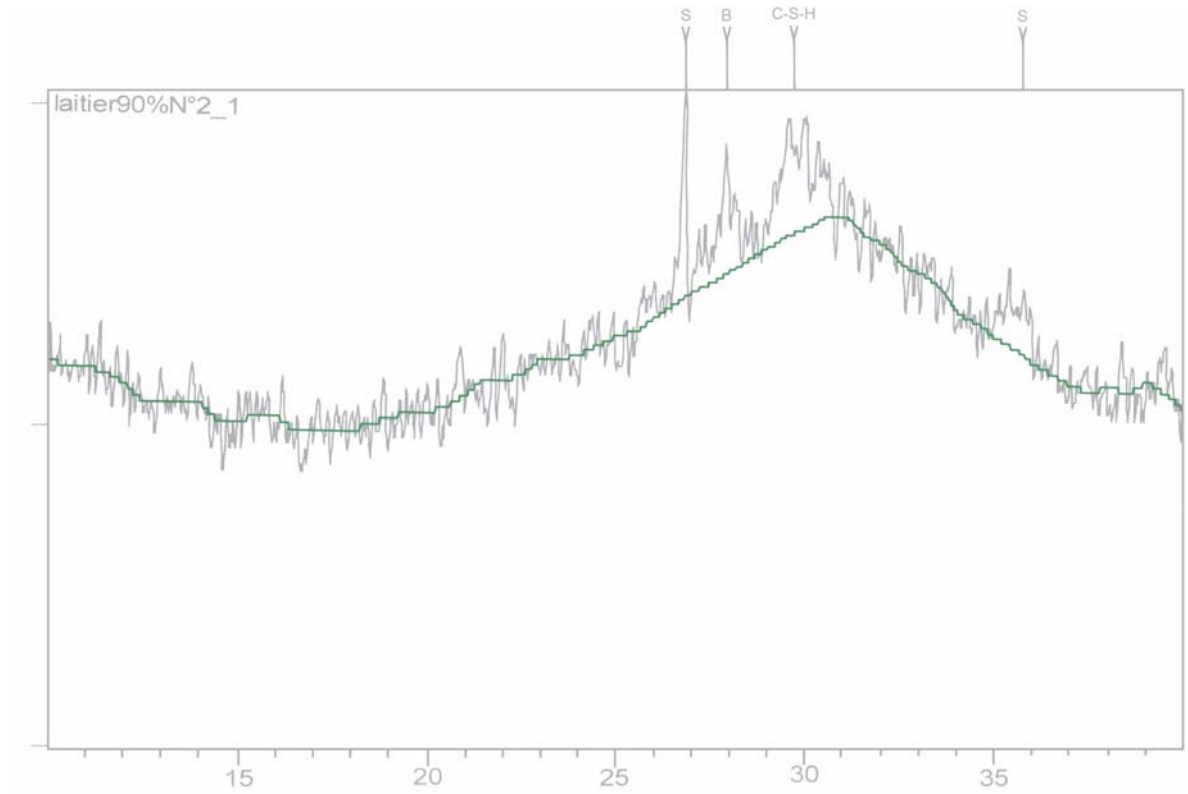
(a) 100 % laitier



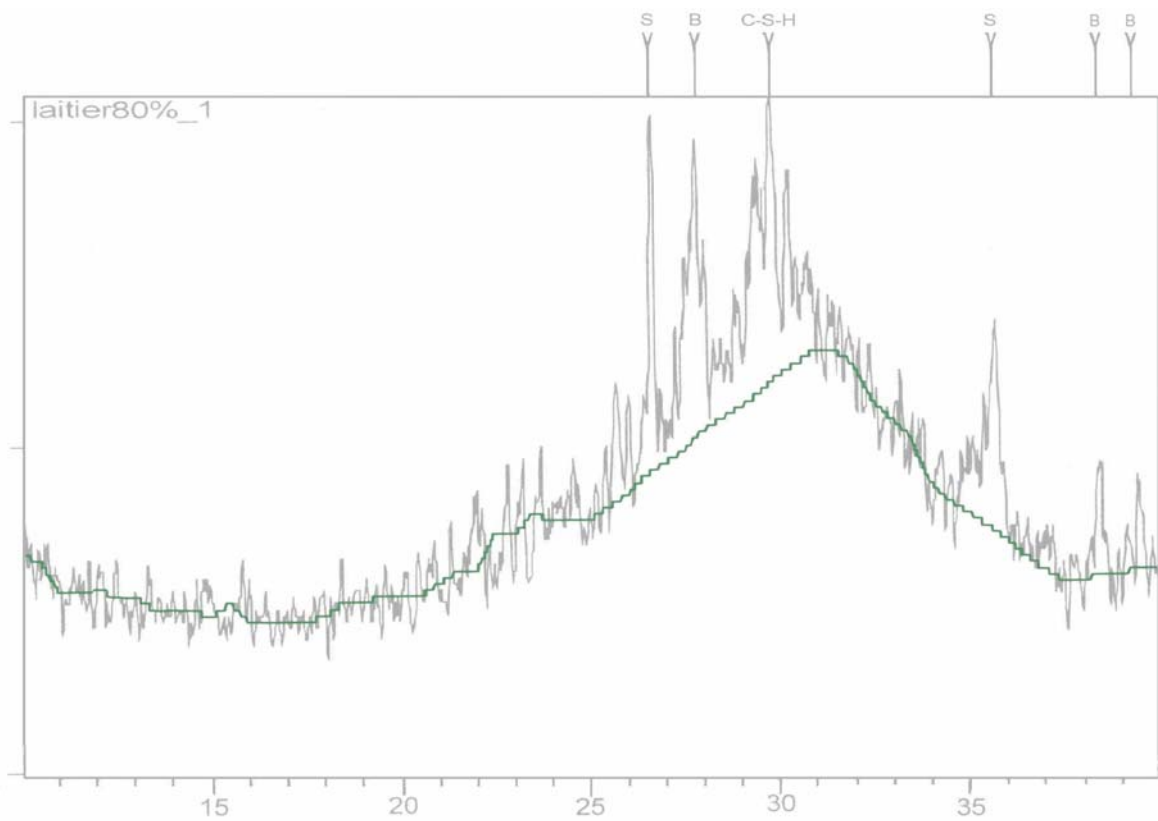
(b) 90 % laitier SSB 1



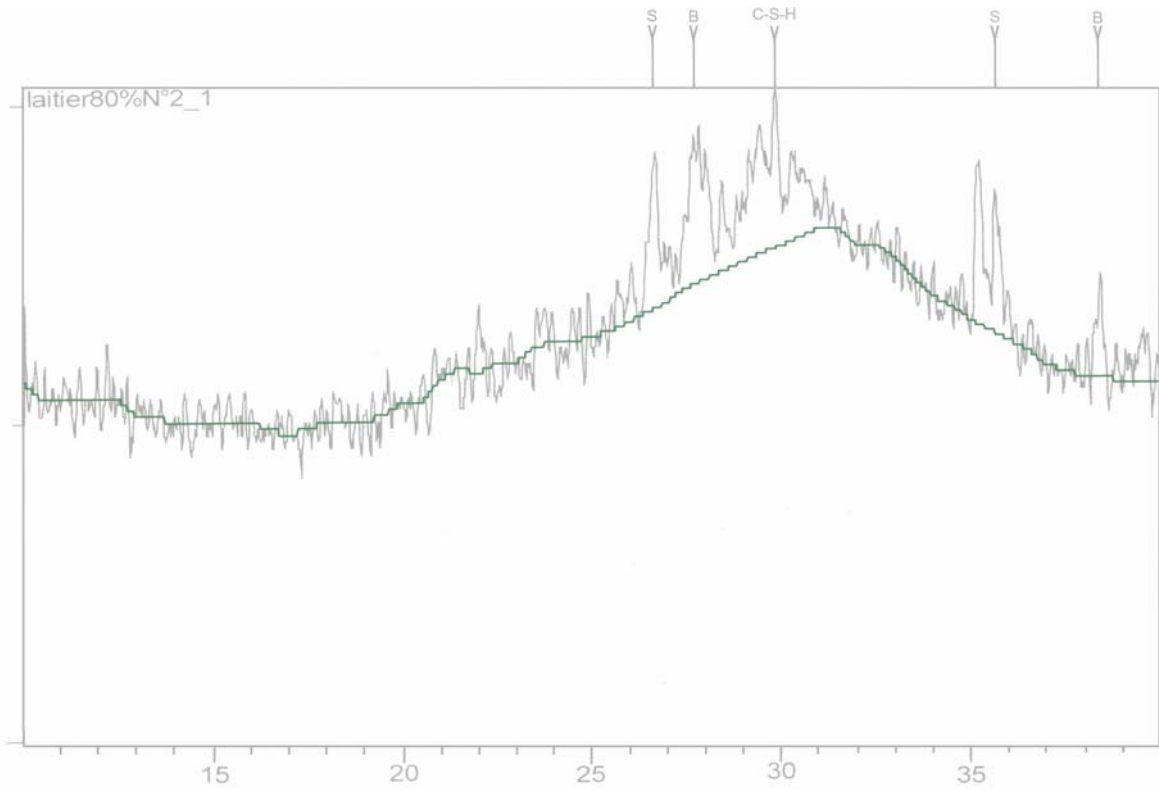
(c) 90 % laitier SSB 2



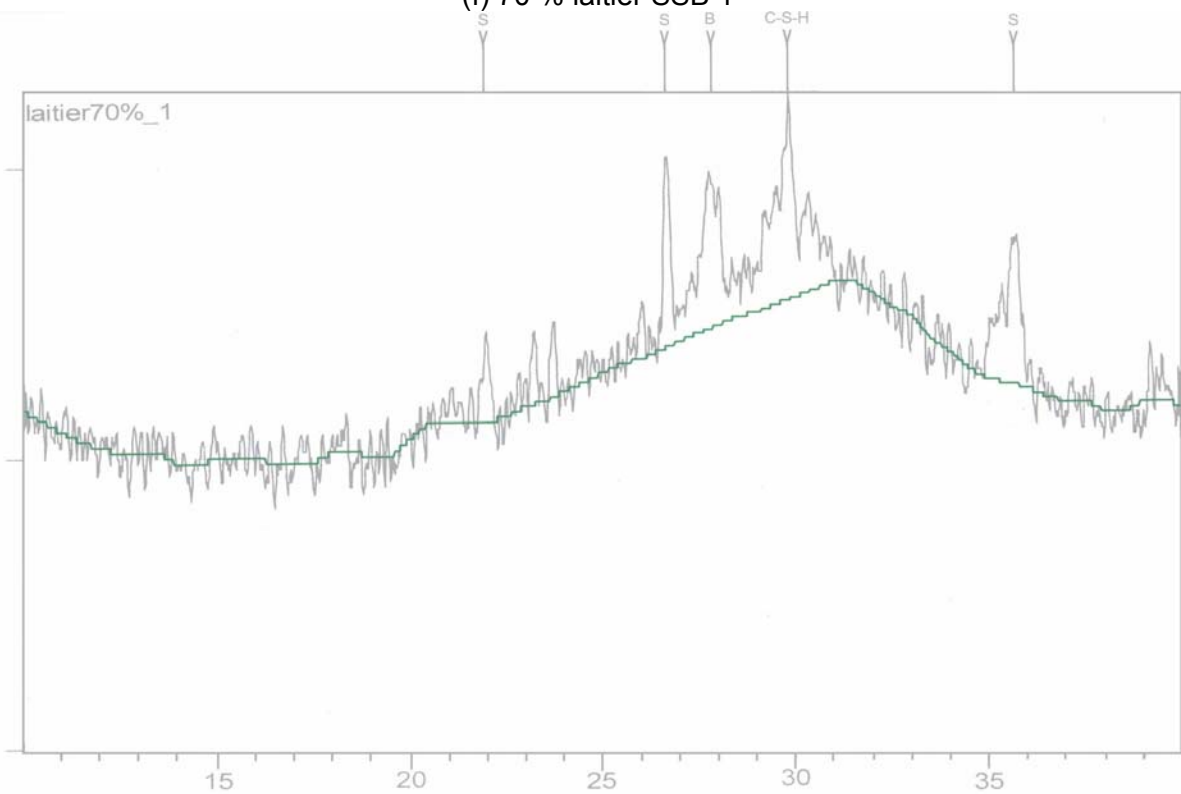
(d) 80 % laitier SSB 1



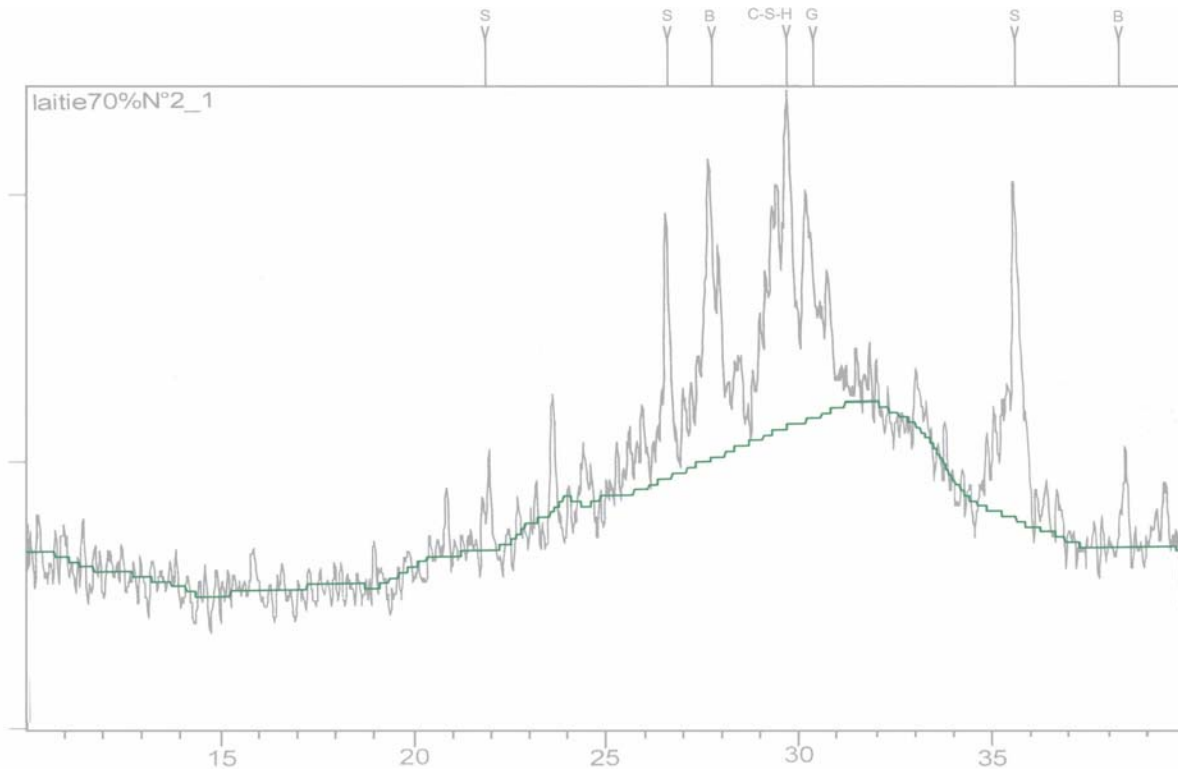
(e) 80 % laitier SSB 2



(f) 70 % laitier SSB 1



(g) 70 % laitier SSB 2



B = silicates bicalciques, C-S-H = silicates de chaux hydratés, G = méllite,
S = silicates (quartz).

Figure 23 – Les spectres des mélanges laitier/pouzzolane par DRX à 56 jours.

IV.2. Effets du calcaire sur le ciment au laitier

IV.2.1. L'effet sur la consistance normalisée

Contrairement au cas du mélange laitier + Pouzzolane, la figure 24 montre que la consistance normalisée varie proportionnellement avec le taux de l'addition (calcaire + gypse); plus le pourcentage de cette dernière est élevé, plus est la quantité d'eau nécessaire pour avoir une pâte à consistance normalisée.

La croissance de la quantité d'eau nécessaire est causée essentiellement par l'augmentation du pourcentage du calcaire riche en (CaO) par rapport au (SiO₂). Le gypse contient aussi du (CaO) mais avec une teneur inférieure à celle qui est dans le calcaire. Cette teneur influe positivement sur le rapport (Ca/Si) est par conséquence le besoin de l'eau augmente (voire annexe C, figure II).

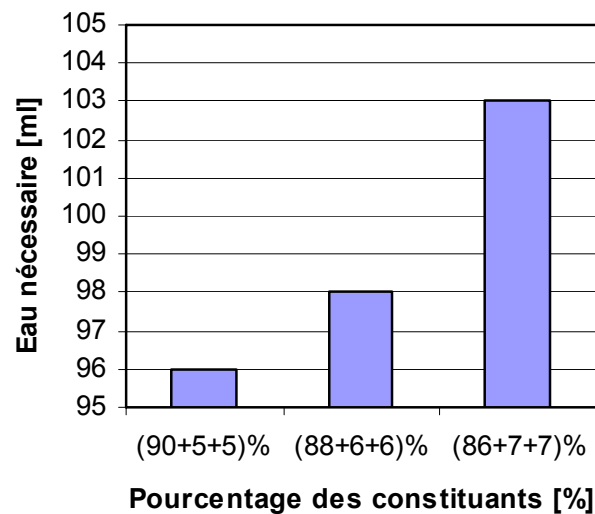


Figure 24 – La consistance normalisée en fonction du pourcentage des constituants du mélange (laitier + calcaire + gypse).

IV.2.2. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)

Au jeune âge, les différents mélanges ne développent que de faibles résistances jusqu'au 7^e jour, où elles dépassent 25 MPa, sauf pour le mélange avec un taux d'ajout (5 % calcaire + 5 % gypse), qui ne dépasse les 20 MPa de résistance à la compression (figures 25 et 26).

Ce retard de développement de résistance doit être dû à la faible alcalinité du mélange, dont le rapport (Ca/Si) variant entre 1,11 et 1,16; ce qui influe sur la formation de l'ettringite, responsable du développement de la résistance au jeune âge.

2 jours

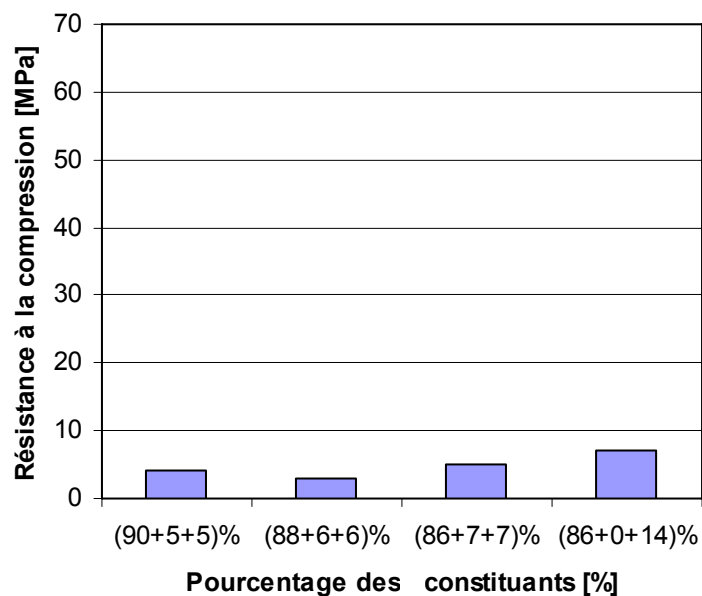


Figure 25 – La résistance à la compression à 2 jours (R_{c2}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse).

7 jours

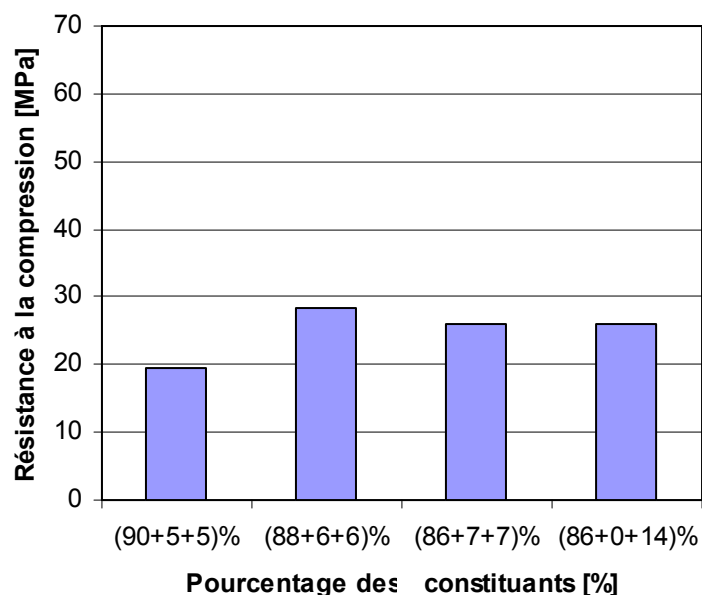


Figure 26 – La résistance à la compression à 7 jours (R_{c7}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse).

A partir du 28^e jour, le mélange avec addition calcaire + gypse développe des résistances supérieures à 40 MPa et meilleures que celle qui est développée par le mélange avec le gypse seulement (figure 27), ce qui représente 52 % de la

résistance du CPJ de référence. Cela doit être dû à la formation des silicates de chaux hydratés (CSH), permettant le développement de la résistance à long terme.

28 jours

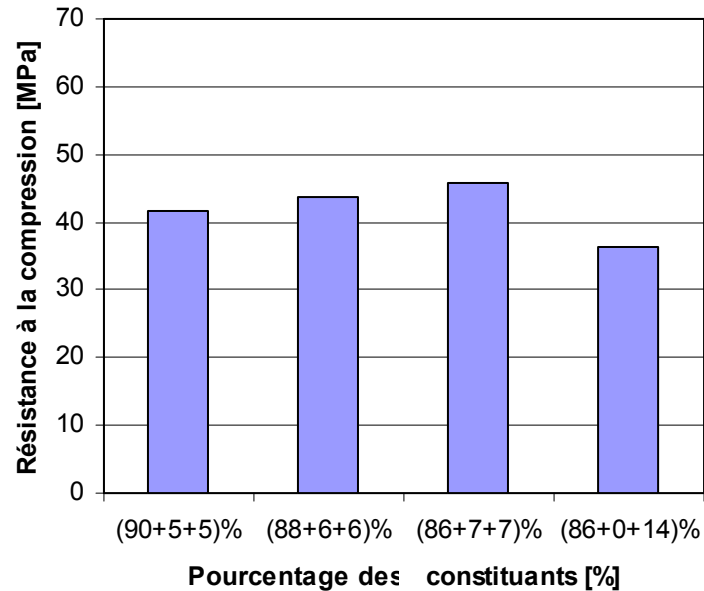


Figure 27 – La résistance à la compression à 28 jours (R_{c28}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse).

56 jours

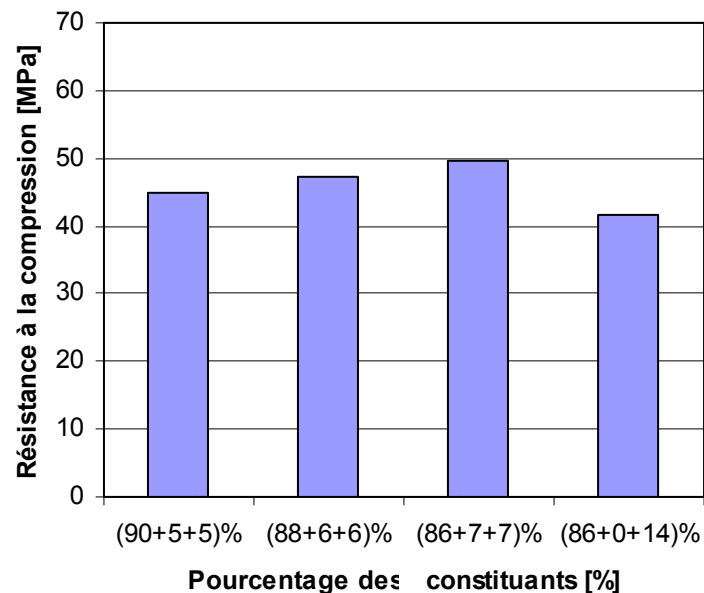


Figure 28 – La résistance à la compression à 56 jours (R_{c56}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse).

Jusqu'à 56 jours, c'est le mélange avec un taux d'ajout de (7 + 7) % qui développe plus de résistance (figure 28), mais à 90 jours la meilleure résistance est développée

par le mélange avec (6+6) % d'ajout; tandis que le mélange du laitier avec le gypse seulement, donne un résultat inférieur à ceux des autres mélanges (figure 29).

90 jours

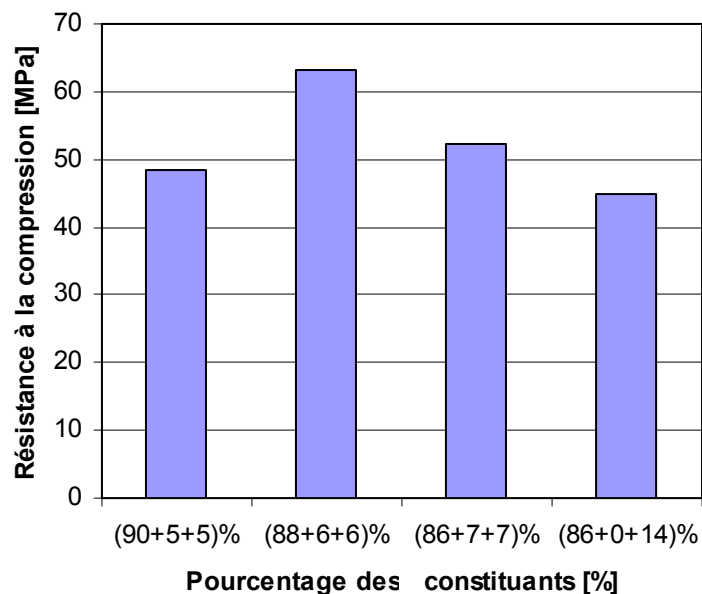


Figure 29 – La résistance à la compression à 90 jours (R_{c90}), en fonction du pourcentage des constituants (laitier + calcaire + gypse).

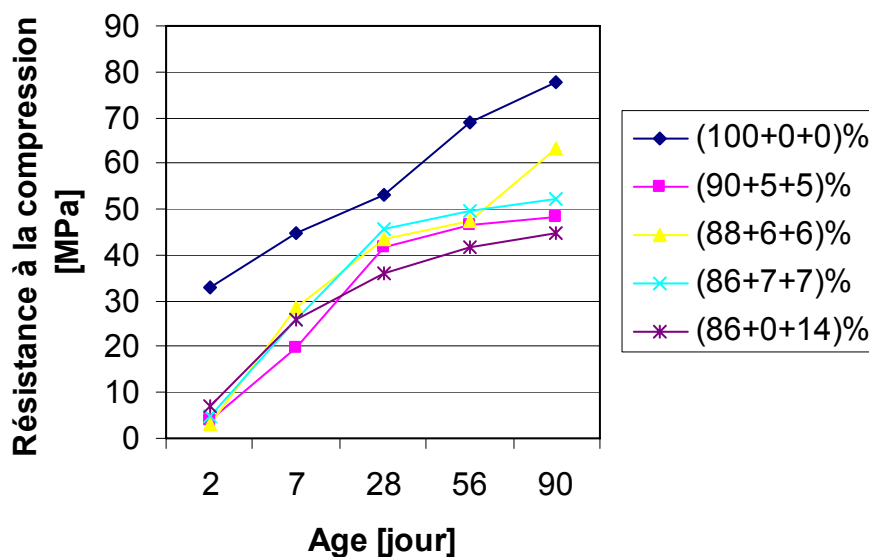


Figure 30 – L'évolution de la résistance à la compression, en comparaison avec le ciment à 100 % laitier activé par la soude (5mol/l).

C'est le mélange avec (6+6) % d'ajout qui donne un comportement proche à celui du ciment à 100 % laitier activé par la soude, dont la croissance de la résistance se poursuit de la même façon à long terme qu'au jeune et moyen âge (figure 30). Les

autres mélanges atteignent à 28 jours, plus de 75 % de la résistance obtenue à 90 jours, ces différents comportements semblent être dus aux différents produits développés au cours de l'hydratation de chaque mélange.

L'addition de 10 % de pouzzolane, au mélange avec (5 + 5) % de gypse et de calcaire, retardait le développement de la résistance à court et moyen terme; cette résistance atteint à 90 jours, une valeur proche de celle du mélange avec (6 + 6) % d'addition gypse + calcaire (figure 31).

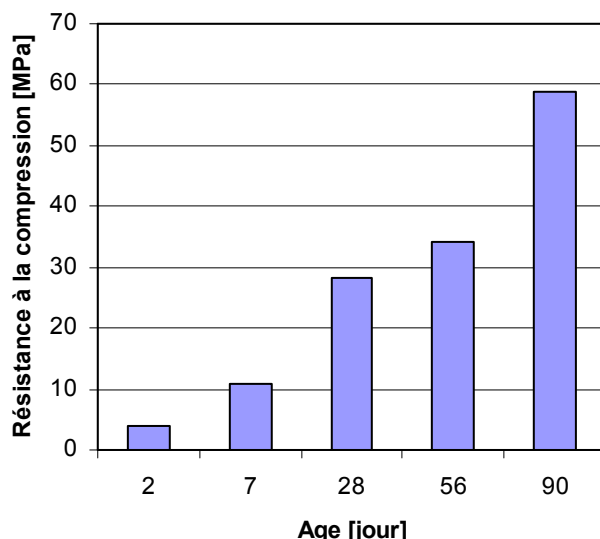


Figure 31 – L'évolution de la résistance à la compression du mélange (80 % laitier + 10 % Pouzzolane + 5 % calcaire + 5 % gypse).

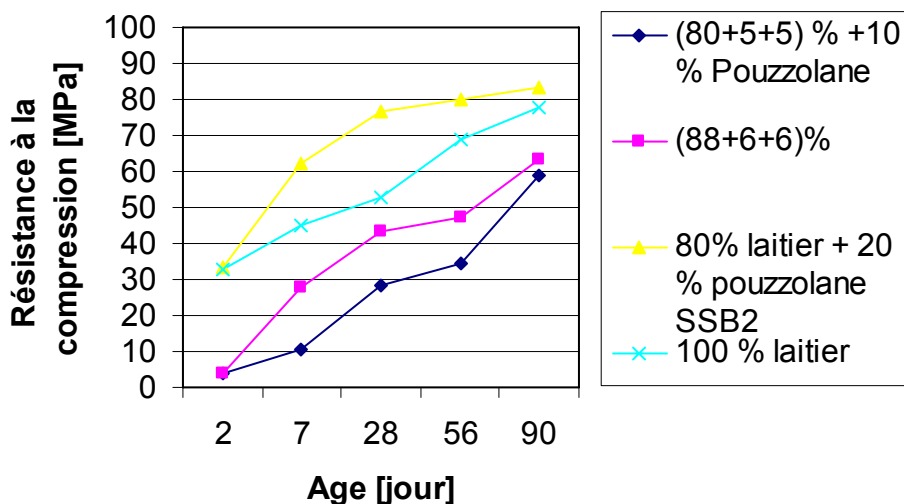


Figure 32 – L'évolution de la résistance à la compression du mélange (80+5+5)% + 10 % pouzzolane, en comparaison avec différents mélanges.

IV.3. Effets de la pouzzolane sur le comportement mécanique du mortier de ciment au laitier activé par la soude.

D'après les études faites plus haut sur l'effet de la pouzzolane naturelle, utilisée comme addition minérale, sur la pâte du ciment au laitier activé par la soude, nous avons constaté que les meilleures propriétés physico-mécaniques sont obtenues pour 20 % de pouzzolane avec une surface spécifique (SSB2).

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que le comportement mécanique du mortier de ciment au laitier activé, avec 20 % d'ajout vis-à-vis à la compression, diffère sensiblement de celui du ciment Portland.

IV.3.1. L'effet sur la résistance mécanique à la compression

La résistance à la compression du ciment Portland atteint une valeur importante et tend à se stabiliser à 28 jours de durcissement (à 7 jours la résistance développée est plus de 85 % de celle qui est développée à 28 jours); tandis que le développement de la résistance à la compression du ciment au laitier activé a une allure presque linéaire (figure 33).

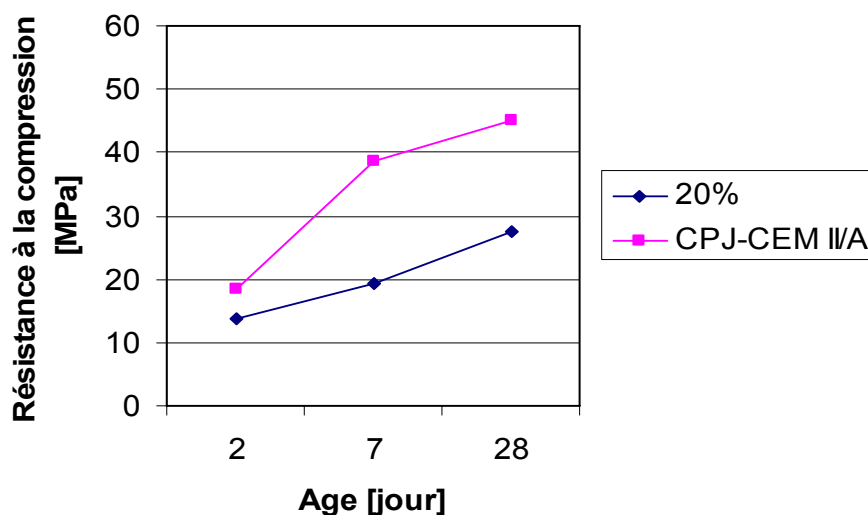


Figure 33 – L'évolution de la résistance à la compression d'un ciment au laitier à 20 % de pouzzolane en comparaison avec un ciment Portland ordinaire.

Les résistances à la compression des deux types de ciment à 2 jours sont très proches et supérieures à 12,5 MPa. À 7 jours, l'écart entre les résistances obtenues devient de l'ordre de 20 MPa, où la croissance de la résistance du ciment Portland devient plus rapide que celle du ciment au laitier activé. Cependant, cet écart de résistance commence à se réduire à l'âge normal (à 28 jours); mais, la résistance de ce dernier reste toujours inférieure à la résistance développée par le ciment Portland ordinaire (la résistance estimée est au voisinage de 38 MPa). Cette différence de comportement mécanique à la compression est due à la nature des produits d'hydratation de chaque type de ciment et à la porosité du ciment au laitier.

IV.3.2. L'effet sur la résistance mécanique à la Flexion

Comme à la compression, le comportement à la flexion du ciment Portland témoin diffère de celui du ciment au laitier activé (figure 34). Au jeune âge (2 jours), les résistances à la flexion des deux mortiers sont très proches (donnent presque le même résultat). A partir du 7 jour le ciment Portland développe des résistances supérieures à celles du ciment au laitier activé; cette différence est bien remarquable à 28 jours (âge normal). Néanmoins la résistance normale à la flexion développée par ce dernier reste admissible aux exigences techniques.

Les résultats obtenus ici, sont influés par les mêmes facteurs que dans le cas de la résistance à la compression.

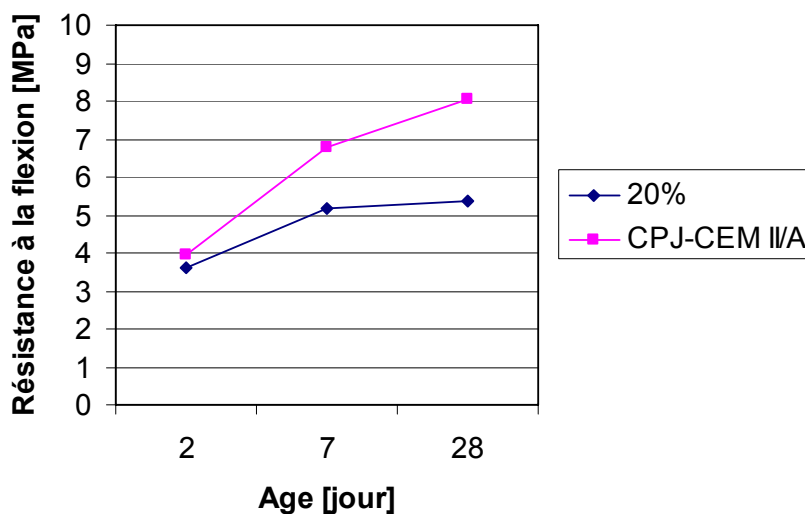


Figure 34 – L'évolution de la résistance à la flexion d'un ciment au laitier à 20 % de pouzzolane, en comparaison avec un ciment Portland ordinaire.

IV.4. Modélisations des effets mesurés

IV.4.1. Effets de la pouzzolane sur le ciment au laitier activé

Les facteurs considérés ici sont: le pourcentage de l'addition et sa surface spécifique (SSB). La seule interaction prise en compte est celle des deux facteurs précédents (interaction du deuxième ordre).

La formule générale des équations mathématiques qui explique les différents effets étudiés de la pouzzolane sur le ciment au laitier activé est la suivante:

$$Y_{th} = \mu + \delta_A + B_1 X_B + AB_1 X_A X_B + \varepsilon$$

Où, Y_{th} est la valeur théorique de la réponse (grandeur modélisée), calculée par le modèle. μ est la moyenne générale des valeurs mesurées. δ_A représente le facteur A défini par quatre niveaux (-1, -1/3, +1/3, +1), il prend des valeurs différentes (coefficients) pour chaque niveau. A_1 représente le coefficient associé au facteur A; tandis que AB_1 est le coefficient associé à l'interaction des deux facteurs A et B. X_B

et $X_A X_B$ sont les variables qui prennent des valeurs positives ou négatives selon B et AB. ε représente la moyenne des valeurs absolues des résidus.

Les équations présentent l'influence des deux facteurs associés considérés et leur interaction du second ordre, sur la consistance normale, la stabilité de la pâte, le début et la fin de prise et sur le développement de la résistance mécanique aux différents âges étudiés.

IV.4.1.1. L'effet sur la consistance normalisée

Comme il est indiqué par δ_A (tableau 14), en allant du niveau -1 au niveau +1 (sans l'accroissement du pourcentage de la pouzzolane), la contribution du facteur A diminue. Pour des faibles pourcentages de pouzzolane, le signe de ces coefficients est positif. Pour le mélange avec 30 % de pouzzolane, le signe du coefficient est négatif. La pouzzolane donc, diminue la nécessité d'eau pour l'obtention d'une consistance normale.

Le signe devant le coefficient du facteur B est positif; ce qui signifie que plus la surface spécifique (SSB) est grande, plus est le besoin d'eau de la pâte de ciment.

Le signe positif du coefficient de l'interaction entre les facteurs A et B, indique que l'association des deux derniers influe positivement sur le besoin d'eau.

$$E/C_{th} = 0,1848 + \delta_A + 0,0007 X_B + 0,0003 X_A X_B + \varepsilon (\pm 0,0005)$$

Tableau 14 – Valeurs du coefficient δ_A pour la consistance normalisée.

Pourcentage d'addition	0 % (-1)	10 % (-1/3)	20 % (1/3)	30 % (1)
δ_A	0,0012	0,0002	0,0002	-0,0018

IV.4.1.2. L'effet sur le temps du début et fin de prise

a) Début de prise

D'après les valeurs du coefficient δ_A (tableau 15), en allant du niveau -1 au niveau +1, la contribution du facteur A augmente d'une façon impressionnante. Pour des faibles pourcentages de pouzzolane, le signe de ces coefficients est négatif et leur valeur absolue est grande. Pour le mélange avec 30 % de pouzzolane, le signe du coefficient est positif avec une valeur plus grande. Le laitier seul, fait prise rapidement, alors que l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane rend la prise difficile et plus lente.

Le signe devant le coefficient du facteur B est négatif avec une petite valeur absolue; ce qui signifie que plus la surface spécifique (SSB) est grande, plus la prise est plus rapide. L'effet de la surface spécifique sur le temps de prise est faible.

Malgré son signe négatif, la très petite valeur absolue du coefficient de l'interaction entre les facteurs A et B, indique que l'association des deux derniers

influe d'une façon très faible sur l'accélération de la prise des pâtes de ciments étudiées.

$$\tau_{th} = 153,125 + \delta_A - 1,875 X_B - 0,7083 X_A X_B + \varepsilon (\pm 58,6389)$$

Tableau 15 – Valeurs du coefficient δ_A pour le début de prise.

Pourcentage d'addition	0 % (-1)	10 % (-1/3)	20 % (1/3)	30 % (1)
δ_A	-111,125	-80,625	-33,125	224,875

b) Fin de prise

Les valeurs absolues et les signes des différents coefficients indiquent, que les facteurs étudiés influent sur le temps de fin de prise, de la même façon que sur le début de prise.

$$\tau'_{th} = 389,25 + \delta_A - 1,75 X_B - 0,75 X_A X_B + \varepsilon (\pm 156,6667)$$

Tableau 16 – Valeurs du coefficient δ_A pour la fin de prise.

Pourcentage d'addition	0 % (-1)	10 % (-1/3)	20 % (1/3)	30 % (1)
δ_A	-244,25	-238,25	-205,25	687,75

IV.4.1.3. L'effet sur la stabilité de la pâte

Le coefficient δ_A (tableau 17), indiqué qu'en allant du niveau -1 au niveau +1, la contribution du facteur A diminue. Pour 0 % de pouzzolane, le signe de ce coefficient est positif. Pour les mélanges de 10% à 30 % de pouzzolane, le signe du coefficient est négatif. La pouzzolane donc, favorise la stabilité de la pâte de ciment étudiée.

Le coefficient du facteur B est nul; ce qui signifie que la surface spécifique (SSB) n'a aucun effet sur la stabilité de la pâte. La même chose pour son interaction avec le facteur A.

$$\Delta_{th} = 0,125 + \delta_A + \varepsilon (\pm 0,0834)$$

Tableau 17 – Valeurs du coefficient δ_A pour la stabilité de la pâte.

Pourcentage d'addition	0 % (-1)	10 % (-1/3)	20 % (1/3)	30 % (1)
δ_A	0,375	-0,125	-0,125	-0,125

IV.4.1.4. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)

Avec la croissance de l'âge de réaction, de 2 à 90 jours, la valeur du terme indépendant de l'équation augmente. Cela signifie que le processus d'activation progresse avec le temps.

L'influence du facteur A est déterminante dans le développement de la résistance à la compression. D'après les valeurs du coefficient δ_{Ad} (tableau 18), en allant du niveau -1 au niveau +1, la contribution à la résistance augmente. Avec 0 % à 20 % de pouzzolane, le coefficient est généralement positif et sa valeur absolue est grande. Pour le mélange avec 30 % de pouzzolane, le coefficient est négatif (sauf pour 7 jours de cure) avec une valeur absolue plus grande que pour les autres mélanges. Ces résultats indiquent que la pouzzolane réagit le plus dans les mélanges pour des proportions ≤ 20 %, et contribue d'une manière pesante au développement de la résistance; tandis que la contribution du laitier est faible. Ce qui est le contraire dans le cas du mélange à 30 % d'addition.

Le coefficient du facteur B est de signe positif au jeune âge, mais il change de signe pour la résistance à 28 jours et plus. Sa valeur absolue est au voisinage de zéro pour tous les âges étudiés, ce qui lui donne une faible contribution au développement de la résistance à la compression. La même remarque est valable pour l'interaction des facteurs A et B.

$$R_{c2 \text{ th}} = 25,2138 + \delta_{A2} + 0,2613 X_B - 0,1313 X_A X_B + \varepsilon (\pm 4,3958)$$

$$R_{c7 \text{ th}} = 45,0838 + \delta_{A7} + 1,2663 X_B + 0,0446 X_A X_B + \varepsilon (\pm 4,2853)$$

$$R_{c28 \text{ th}} = 54,8813 + \delta_{A28} - 1,6688 X_B - 0,1354 X_A X_B + \varepsilon (\pm 5,5153)$$

$$R_{c56 \text{ th}} = 63,6250 + \delta_{A56} - 1,6250 X_B - 0,5083 X_A X_B + \varepsilon (\pm 5,8722)$$

$$R_{c90 \text{ th}} = 71,7750 + \delta_{A90} - 2,8250 X_B - 2,2917 X_A X_B + \varepsilon (\pm 4,8285)$$

Tableau 18 – Valeurs du coefficient δ_A pour la résistance à la compression.

Pourcentage d'addition	0 % (-1)	10 % (-1/3)	20 % (1/3)	30 % (1)
δ_{A2}	+7,7862	+4,2762	+7,6512	-19,7138
δ_{A7}	-0,2838	+12,5512	+14,3162	+26,5838
δ_{A28}	-1,8813	+13,9187	+19,1187	-31,1563
δ_{A56}	+5,1750	+9,3750	+13,8750	-28,4250
δ_{A90}	+5,8225	+4,8250	+10,2250	-20,8750

IV.4.2. Effets du calcaire sur le ciment au laitier

Les facteurs considérés ici sont: le pourcentage du laitier, du gypse et du calcaire. Aucune interaction n'est prise en compte (modèle du premier ordre).

La formule générale des équations mathématiques qui explique les différents effets étudiés du calcaire sur le ciment au laitier activé est la suivante:

La formule générale des équations présentées:

$$Y_{th} = \mu + A_1 X_A + B_1 X_B + C_1 X_C + \varepsilon$$

Où, Y_{th} est la valeur théorique de la réponse, calculée par le modèle. μ est la moyenne générale des valeurs mesurées. A_1 , B_1 et C_1 représentent les coefficients associés aux facteurs A, B et C. X_A , X_B et X_C sont les variables qui prennent des valeurs positives ou négatives selon A, B et C. ε représente la moyenne des valeurs absolues des résidus.

Les équations présentent l'influence des trois facteurs associés considérés, sur la consistance normale, et sur le développement de la résistance mécanique aux différents âges étudiés.

IV.4.2.1. L'effet sur la consistance normalisée

Le coefficient du facteur A est négatif, tandis que les coefficients des facteurs B et C sont positifs. Ce qui signifie que le calcaire et le gypse augmentent le besoin d'eau tandis que le laitier le diminue.

$$E/C_{th} = 0,198 - 0,0047 X_A + 0,0047 X_B + 0,0047 X_C + \varepsilon (\pm 0,0053)$$

IV.4.2.2. L'effet sur le comportement mécanique de la pâte (la résistance à la compression)

Avec la croissance de l'âge de réaction, de 2 à 90 jours, la valeur du terme indépendant de l'équation augmente. Cela signifie que dans ce cas aussi, le processus d'activation progresse avec le temps, malgré que la concentration du NaOH soit très faible.

Au jeune âge, c'est le coefficient du facteur A, qui a le signe positif, alors que les coefficients des facteurs B et C sont négatifs. A partir de 28 jours, c'est complètement le contraire, ce sont les coefficients des facteurs B et C qui deviennent positif est leurs valeurs absolue augmente avec le temps. Ces résultats montrent qu'au jeune âge, le laitier contribue positivement au développement de la résistance à la compression des mélanges étudiés. Par contre, au delà de 28 jours c'est le gypse et le calcaire qui favorisent le développement des résistances.

$$R_{c2\ th} = 5,3333 + 0,4 X_A - 0,04 X_B - 0,4 X_C + \varepsilon (\pm 0,4444)$$

$$R_{c7\ th} = 28,1333 + 0,6 X_A - 0,06 X_B - 0,6 X_C + \varepsilon (\pm 0,7111)$$

$$R_{c28\ th} = 44,1333 - 1,8667 X_A + 1,86 X_B + 1,8667 X_C + \varepsilon (\pm 2,0444)$$

$$R_{c56\ th} = 47,2667 - 1,5333 X_A + 1,5333 X_B + 1,5333 X_C + \varepsilon (\pm 1,5556)$$

$$R_{c90\ th} = 55,1333 - 0,8 X_A + 0,8 X_B + 1,8 X_C + \varepsilon (\pm 5,2444)$$

Conclusion

Nous avons vu dans cette partie que le pourcentage de la pouzzolane naturelle utilisé comme ajout, ainsi que la variation de sa surface spécifique ont des effets considérables sur le ciment au laitier activé par la soude, favorables pour certaines et défavorables pour certaines d'autre. Les meilleures propriétés physico-mécaniques sont obtenues pour 20 % de pouzzolane naturelle, avec une surface spécifique (SSB2).

Le calcaire aussi a montré des effets positifs sur le développement de la résistance à la compression du ciment au laitier activé même à long terme, malgré la très faible concentration du NaOH (activant alcalin) et la faible proportion aussi du gypse (activant sulfatique) généralement utilisé en proportions plus élevées dans le cas des ciments sur-sulfatés. Les résistances obtenues avec une addition composée de calcaire et de gypse sont meilleures que celles pour une quantité équivalente d'addition formée de gypse seul. On peut dire que le calcaire joue le rôle d'un activant pour le laitier.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Nous avons procédé au cours de cette étude à la détermination expérimentale des effets des additions minérales sur les propriétés physico mécaniques du ciment au laitier activé. Pour ce but nous avons concentré sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf comme addition et ses effets sur la consistance normalisée, sur la stabilité de la pâte de ciment, sur le temps de prise et la résistance mécanique. Nous avons aussi essayé d'employer le calcaire comme addition en association avec le gypse, et voire son effet sur la résistance mécanique, ainsi que de connaître son aptitude à jouer le rôle d'un activant pour le laitier.

En général, l'effet de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés du ciment au laitier activé est bénéfique.

La réalisation des plans d'expériences (un plans factoriel complet pour la pouzzolane et un plan mélange pour le calcaire) nous a permis d'identifier parmi les paramètres variés dans cette étude (pourcentages des différentes additions et la finesse de mouture), ceux qui contribuent à la variation des propriétés étudiées, et de modéliser leur influence.

1. Résultats liés à l'utilisation de la pouzzolane comme addition minérale dans la pâte de ciment

- La consistance normalisée varie inversement avec le taux de pouzzolane. La décroissance est probablement causée par la diminution du rapport (Ca/Si); ce rapport diminue avec l'augmentation du pourcentage de pouzzolane (riche en dioxydes de silicium). La teneur en (CaO) par rapport à celle des (SiO₂) est le facteur impératif, influant sur la quantité d'eau nécessaire pour donner une consistance normalisée.
- Plus la surfasse spécifique (SSB) est grande, plus est le besoin d'eau de la pâte de ciment. Ceci est due essentiellement à l'augmentation de la surface de contact de l'eau avec les grains du ciment, ce qui accroît l'absorption de l'eau.
- Le laitier activé sans additions, fait prise rapidement, alors que l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane rend la prise plus lente.
- Plus la surfasse spécifique (SSB) est grande, plus la prise est plus rapide. Cette décroissance de temps de début de prise, est due à l'accélération des réactions de l'hydratation du ciment. L'effet de la surface spécifique sur le temps de prise est faible, devant l'influence de ses proportions utilisées.
- Les facteurs étudiés influent sur le temps de fin de prise, de la même façon que sur le début de prise.
- La pouzzolane favorise la stabilité de la pâte de ciment étudiée.
- La surfasse spécifique (SSB), n'a aucun effet sur la stabilité de la pâte.

- Ces résultats indiquent que la pouzzolane réagit le plus dans les mélanges pour des proportions $\leq 20\%$, et contribue d'une manière pesante au développement de la résistance; tandis que la contribution du laitier est faible. Ce qui est le contraire dans le cas du mélange à 30 % d'addition.
- C'est le mélange avec 20 % de pouzzolane qui donne les meilleurs résultats.
- La faible contribution de la surface spécifique au développement de la résistance est peut être dû au choix de deux SSB de proches valeurs. Pour une finesse élevée, l'hydratation du ciment au laitier est plus rapide et complète.
- Pour une finesse (SSB1), ce sont les pâtes avec 10 % et 20 % de pouzzolane qui donnent une courbe de développement de résistance proche de celle du ciment Portland de référence. Par contre, pour la deuxième finesse (SSB 2), seule la pâte avec 20 % d'addition qui donne un tel résultat. Cela est peut être dû à la nature des produits de l'hydratation du ciment étudié.

2. Résultats liés à l'utilisation de la pouzzolane comme addition minérale dans le mortier de ciment

- La différence du comportement mécanique du ciment au laitier avec 20 % de pouzzolane par rapport au ciment Portland ordinaire, est due à la nature des produits de l'hydratation des deux types de ciment.
- Les résultats obtenus pour le mortier du ciment au laitier activé, avec addition minérale sont inférieurs à ceux du ciment Portland, alors que les prédictions issues des études effectuées sur la pâte du même mélange, estiment une résistance supérieure à 35 MPa (ciment de classe de résistance 32,5). Une des causes principales de cet écart est d'avoir pris $E/C = 0,5$ dans le but de préparer un mortier normalisé, ce qui augmente la porosité du ciment au laitier.

3. Résultats liés à l'utilisation du calcaire comme addition minérale avec le gypse, dans la pâte de ciment

- Le calcaire et le gypse augmentent le besoin d'eau tandis que le laitier le diminue. Cette croissance de la quantité d'eau nécessaire est causée essentiellement par l'augmentation du pourcentage du calcaire riche en (CaO) par rapport au (SiO₂). Le gypse contient aussi du (CaO) mais avec une teneur inférieure à celle qui est dans le calcaire. Cette teneur influe positivement sur le rapport (Ca/Si) est par conséquent le besoin de l'eau augmente.
- En présence du calcaire le processus d'activation progresse avec le temps, malgré que la concentration du NaOH soit très faible.
- Le retard de développement de résistance, doit être dû à la faible alcalinité du mélange, dont le rapport (Ca/Si) variant entre 1,11 et 1,16; ce qui influe sur la formation de l'ettringite, responsable du développement de la résistance au jeune âge.

- Au jeune âge, le laitier contribue positivement au développement de la résistance à la compression des mélanges étudiés. Par contre, au delà de 28 jours c'est le gypse et le calcaire qui favorisent le développement des résistances.
- A partir du 28^e jour, le mélange avec addition calcaire + gypse développe des résistances meilleures que celle qui est développée par le mélange avec le gypse seulement. Cela doit être dû à la formation des silicates de chaux hydratés (CSH), permettant le développement de la résistance à long terme (résultant principal de l'hydratation du laitier dans un milieu alcalin).
- Grâce au grand rapport (Ca/Si) du calcaire, il présente un milieu alcalin pour l'hydratation du laitier, et peut être ainsi utilisé comme activant pour le ciment au laitier.
- L'addition de 10 % de pouzzolane, au mélange avec (5 + 5) % de gypse et de calcaire, retarde le développement de la résistance à court et moyen terme.
- Les résistances normales des pâtes des différents mélanges (laitier + calcaire + gypse), présentent plus de 45 % de la résistance normale de la pâte du ciment de référence du même âge; on estime alors une résistance normale supérieure à 20 MPa pour les mortiers de ces mélanges (ciment à maçonner).

4. Perspectives

- **Une étude sur les produits de l'hydratation:** Afin de mieux expliquer les phénomènes et les résultats expérimentaux trouvés, il faut connaître les différents produits de l'hydratation et leur concentration.
- **Une étude avec une concentration plus élevée de l'activant:** Les résultats obtenus dans le cas de l'addition de la pouzzolane, sont pour une concentration de 5 mol/l d'activant (NaOH). Il est intéressant de réaliser une étude avec une concentration plus élevée (10 mol/l).
- **Une étude au voisinage de la proportion de pouzzolane optimale:** Malgré que les meilleurs résultats soient obtenus pour une addition de 20 % de pouzzolane, il vaut mieux d'étudier les effets de cette dernière au voisinage de 20 %, pour savoir si la résistance continue à croître ou chute pour des proportions supérieures.
- **Des études avec d'autres additions minérales:** les résultats donnés par l'addition de la pouzzolane sont encourageantes. Il est nécessaire aussi de faire des études sur d'autres additions.
- **Des essais sur mortier avec E/C plus faible:** Du fait du faible besoin d'eau du ciment au laitier et pour éviter la formation excessive des pores, il est recommandé de reproduire les essais sur mortier avec un rapport E/C = 0,3.

- **Une étude sur béton de ciment au laitier activé:** L'étude de la résistance mécanique peut être validée sur des éprouvettes de béton.
- **Une étude complémentaire sur l'utilisation du calcaire comme activant:** Pour compléter la recherche sur l'utilisation du calcaire comme activant alcalin, une étude doit être menée sur ce sujet avec des proportions de calcaire plus grandes.
- **Une étude sur la résistance aux milieux agressifs:** Pourtant le ciment au laitier est durable et résiste bien aux milieux agressifs, les produits d'hydratation dus à l'utilisation des additions minérales, peuvent influencer sur cette résistance, Il est recommandé alors, de faire une étude sur la résistance aux milieux agressifs, surtout pour les mélanges contenant le calcaire et le gypse.
- **Développement et optimisation des modèles construits:** Les modèles mathématiques construits ici, peuvent être développés et optimisés, pour mieux présenter les différentes propriétés physico-mécaniques étudiées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRPHIQUES

- [1]: Guide d'évaluation de la consommation d'énergie : Production de ciment clinker. Ressources naturelles Canada. Office de l'efficacité énergétique. No de cat. : M27-01-1464F. Canada. 2001.
- [2]: L. Zeghichi. Etude des bétons basiques à base des différents granulats. Thèse de doctorat en génie civil. Université de Biskra, 2006. 168 pages.
- [3]: NF P 15-301. Liants hydrauliques. Ciments courants: Composition, spécifications et critères de conformité. Juin 1994.
- [4]: FD P 15-010. Liants hydrauliques. Guide d'utilisation des ciments. Octobre 1997.
- [5]: Cours en ligne: Matériaux de construction. Agence universitaire de la francophonie. Université nationale RDP Lao. Disponible sur: <http://www.la.refer.org/>
- [6]: G. Bernier. Formulation du béton. Technique de l'ingénieur, C 2 210. 2004. pp. 9-10.
- [7]: S. Chabi. Etude de l'influence des additions minérales actives sur les caractéristiques physico-mécaniques des ciments et bétons pour les fondations immergées (cas du sud algérien). Mémoire de magister en génie civil. Université de Biskra, 2004. 165 p.
- [8]: M. Burteaux. Laitiers de haut fourneau. Technique de l'ingénieur, M 7 425. 1995. pp. 1-9.
- [9]: F.M. Léa. The chemistry of cement and concrete. «La chimie du ciment et du béton». Chemical publishing co. Inc. New York, N.Y. 1971.
- [10]: I. Messaoudene et A. Naceri. Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur la réponse mécanique du mortier. Proceeding du 1^{er} congrès international sur la technologie et la durabilité du béton. Faculté de génie civil. Laboratoire du bâti dans l'environnement. Université des sciences et de la technologie – Houari Boumediene. Du 24 au 26 Mai 2004.
- [11]: R. Dron. Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline. Thèse universitaire, Paris VI, rapport de recherche No. 38, LCPC Paris, 1973.
- [12]: H. Kühl et E. Schleicher. Gipsschlackenzement. «Ciment de scories au plâtre». Fachbuchverlag GmbH, Leipzig, 1952.
- [13]: J. Stark. Sulfathüttenzement. «Ciment du haut fourneau au sulfate». Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 1995, 41, No. 6/7. pp. 7-15.
- [14]: H.G. Smolczyk. Die Hydratationsprodukte Hüttensandreicher Zemente. «Produits d'hydratation du ciment du haut fourneau». Zement-Kalk-Gips, 1965, 23, No. 5. pp. 238-246.

- [15]: H. E. Schweite, U. Ludwig et P. Jäger. Untersuchungen im System $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$. «Études dans le système $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ». Zement-Kalk-Gips, 1964, 17, No. 6. pp. 229-236.
- [16]: J. Stark, U. Frohburg et I. Mielke. Super sulfated cement with and without cement clinker. «Le ciment sur-sulfaté avec et sans clinker». Proceedings of the Conference of Non-Traditional Cement and Concrete. Brno, 2001.
- [17]: H. E. Schweitem U. Ludwig et P. Otto. Untersuchungen an Sulfathüttenzementen. «Études des ciments du haut fourneau au sulfate». Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. No. 2227. Westdeutscher Verlag, Köln and Opladen, 1971.
- [18]: I. A. Voinovitch et R. Dron. Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé. Bulletin - liaison LCPC. 83, mai - juin 1976.
- [19]: V. Glukhoviskij, Y. Zaitsev et V. Pakhomow. Slag-alkaline cements and concretes – structures, properties, technological and economical aspects of use. «Les ciments et les bétons basiques au laitier – structures, propriétés, aspects économiques et technologiques d'utilisation », Silic Ind 10, 1983. pp. 197-200.
- [20]: B. Talling et J. Brandstetr. Present and future of alkali-activated slag concretes, Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. «Présent et future des bétons au laitier alkali-activé, les cendres volantes, la fumée de silice, le laitier et la pouzzolane naturelle dans les bétons». Proceeding of the 3rd International Conference. Trondheim, Norway, 1989. SP114-74. pp. 1519-1545.
- [21]: F. Puertas. Cementos de escorias activadas. Situación actual y perspectivas de futuro. «Ciments de scories activées. Situation actuelle et perspectives de future», Mater Constr 239 (45), 1995. pp. 53-64.
- [22]: C. Shi et R. L. Day. A calorimetry study of early hydration fly ashes. «Étude calorimétrique de l'hydratation des cendres volantes au jeune âge». A cement for the future. Cement and Concrete Research 29, 1995. pp. 1333-1346.
- [23]: F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso et T. Vázquez. Alkali-activated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products. «Ciment Alkali-activé de cendres volantes/laitier. Comportement mécanique et produits d'hydratation». Cement and Concrete Research 30, 2000. pp. 1625-1632.
- [24]: L. Zeghichi, B. Mezghiche et R. Chebili. Study of the effect of alkalis on the slag cement systems. «Étude de l'effet des alcalis sur les systèmes de ciment de laitier». Canadian Journal of Civil Engineering 32, 2005. pp. 934-939.
- [25]: B. Mezghiche, M. Bouabaz et M. Chebah. High strength concrete. «Le béton de haute performance». Proceedings of the international conference (concrete in the service of mankind). Dundee, Scotland, June 27-28th, 1996.
- [26]: B. Mezghiche. Technologie des bétons aux laitiers basiques pour RADP. Thèse de doctorat en sciences techniques. Institut de Minerais de Krivoi Rog, Kiev, 1989. 136 p.

- [27]: J. Bijen. Blast furnace slag cement for durable marine structures. «Le ciment au laitier du haut fourneau pour les structures maritimes durables». Netherlands, 1996.
- [28]: M. Mellas. Quelques aspects de la qualité du béton in situ par le microscope électronique à balayage. Thèse de doctorat en génie civil. Université de Biskra, 2003. 131 pages.
- [29]: A. Nacéri. L'influence de la teneur en laitier et sa surface spécifique sur la résistance du mortier durci. First international conference on environmental engineering. Ain Shams University, April 9-11th, 2005. pp. 1232-2241.
- [30]: A. Nacéri et I. Messaoudene. The chemical and physical effects of the granulated blast furnace slag on concrete compressive strength. «Les effets chimiques et physiques du laitier du haut fourneau sur la résistance à la compression du béton». World Journal of Engineering 3(3), 2006. pp. 45-51.
- [31]: L. Zeghichi, B. Mezghiche et A. Merzougui. La valorisation du laitier d'El-Hadjar dans la confection des ciments. Actes du séminaire international de géomatériaux GEOMAT 02. Université de M'sila, 10-11 mars 2003. pp.433-473.
- [32]: T. Matschei, F. Bellmann et J. Stark. Hydration behaviour of sulfate-activated slag cement. «Comportement d'hydratation du ciment de laitier activé par les sulfates». Advances in Cement Research. October 2005, 17, No. 4. pp. 167-178.
- [33]: L. Zeghichi, B. Mezghiche et A. Merzougui. Etude de l'influence des solutions basiques sur le ciment au laitier. 11th international conference for building and construction. Cairo, Egypt, June 17th-21st, 2004. pp. 523-530.
- [34]: NF EN 196-6. Méthodes d'essais des ciments. Détermination de la finesse. Août 1990.
- [35]: M. Boule, Conférences de géologie, 1907. p. 148.
- [36]: A. Bougara, K. Ezziane, A.Hallal. Étude de l'activation du laitier d'El-Hadjar par des solutions alcalines. Algérie équipement, N° 40. Algérie, Décembre 2005. Pp3-5.
- [37]: NF EN 15-473. Méthodes d'essais des ciments. Partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité. Août 1995.
- [38]: NF EN 15-471. Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination de la résistance mécanique. Août 1995.

ANNEXES

Annexe A

Effets de la pouzzolane sur le ciment au laitier activé

Tableau A.1 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la consistance normalisée.

Essai	Global	A	B	AB	E/C	E/C _{th}	r
1	1	-1	-1	1	0,1860	0,1862	-0,0002
2	1	-1/3	-1	1/3	0,1840	0,1845	-0,0005
3	1	1/3	-1	+1/3	0,1840	0,1839	0,0001
4	1	1	-1	-1	0,1820	0,1812	0,0008
5	1	-1	1	-1	0,1860	0,1872	-0,0012
6	1	-1/3	1	-1/3	0,1860	0,1859	0,0001
7	1	1/3	1	1/3	0,1860	0,1855	0,0005
8	1	1	1	1	0,1840	0,1832	0,0008
Effet	0,1848	-0,0008	0,0007	0,0003			0,0004

Tableau A.2 – Matrice des effets de la pouzzolane sur le temps du début de prise.

Essai	Global	A	B	AB	τ	τ_{th}	r
1	1	-1	-1	1	42,0000	-44,7917	86,7917
2	1	-1/3	-1	1/3	75,0000	44,8194	30,1806
3	1	1/3	-1	-1/3	122,0000	151,4306	-29,4306
4	1	1	-1	-1	381,0000	468,5417	-87,5417
5	1	-1	1	-1	42,0000	-47,1250	89,1250
6	1	-1/3	1	-1/3	70,0000	41,5417	28,4583
7	1	1/3	1	1/3	118,0000	147,2083	-29,2083
8	1	1	1	1	375,0000	463,3750	-88,3750
Effet	153,1250	87,9583	-1,8750	-0,7083			0,0000

Tableau A.3 – Matrice des effets de la pouzzolane sur le temps de fin de prise.

Essai	Global	A	B	AB	τ'	τ'_{th}	r
1	1	-1	-1	1	145,0000	-89,7500	234,7500
2	1	-1/3	-1	1/3	153,0000	73,9167	79,0833
3	1	1/3	-1	-1/3	186,0000	264,5833	-78,5833
4	1	1	-1	-1	1080,0000	1315,2500	-235,2500
5	1	-1	1	-1	145,0000	-91,7500	236,7500
6	1	-1/3	1	-1/3	149,0000	74,9167	74,0833
7	1	1/3	1	1/3	182,0000	260,5833	-78,5833
8	1	1	1	1	1074,0000	1310,2500	-236,2500
Effet	389,2500	235,7500	-1,7500	-0,7500			-4,0000

Tableau A.4 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 2 jours.

Essai	Global	A	B	AB	R _{c2}	R _{c2 th}	r
1	1	-1	-1	1	33,0000	39,2012	-6,2012
2	1	-1/3	-1	1/3	28,6800	31,3829	-2,7029
3	1	1/3	-1	+1/3	32,1300	30,4495	1,6805
4	1	1	-1	-1	6,0000	-1,2238	7,2238
5	1	-1	1	-1	33,0000	39,9862	-6,9862
6	1	-1/3	1	-1/3	30,3000	31,9929	-1,6929
7	1	1/3	1	1/3	33,6000	30,8845	2,7155
8	1	1	1	1	5,0000	-0,9638	5,9638
Effet	25,2138	-6,5938	0,2613	-0,1313			0,0004

Tableau A.5 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 7 jours.

Essai	Global	A	B	AB	R _{c7}	R _{c7 th}	r
1	1	-1	-1	1	44,8000	50,0062	-5,2062
2	1	-1/3	-1	1/3	55,4700	58,5262	-3,0562
3	1	1/3	-1	+1/3	56,4000	55,9762	0,4238
4	1	1	-1	-1	18,6000	10,7612	7,8388
5	1	-1	1	-1	44,8000	52,4495	-7,6495
6	1	-1/3	1	-1/3	59,8000	61,0290	-1,2290
7	1	1/3	1	1/3	62,4000	58,5384	3,8616
8	1	1	1	1	18,4000	13,3829	5,0171
Effet	45,0838	-6,4279	1,2663	0,0446			0,0004

Tableau A.6 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

Essai	Global	A	B	AB	R _{c28}	R _{c28 th}	r
1	1	-1	-1	1	53,0000	61,4187	-8,4187
2	1	-1/3	-1	1/3	74,6000	72,7187	1,8813
3	1	1/3	-1	+1/3	71,6000	73,4187	-1,8187
4	1	1	-1	-1	27,0000	18,6437	8,3563
5	1	-1	1	-1	53,0000	58,3520	-5,3520
6	1	-1/3	1	-1/3	63,0000	69,4715	-6,4715
7	1	1/3	1	1/3	76,4000	69,9909	6,4091
8	1	1	1	1	20,4500	15,0354	5,4146
Effet	54,8813	-6,8854	-1,6688	-0,1354			0,0004

Tableau A.7 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 56 jours.

Essai	Global	A	B	AB	R _{c56}	R _{c56 th}	r
1	1	-1	-1	1	68,8000	77,9417	-9,1417
2	1	-1/3	-1	1/3	77,6000	77,1306	0,4694
3	1	1/3	-1	-1/3	75,0000	76,6194	-1,6194
4	1	1	-1	-1	39,6000	29,3083	10,2917
5	1	-1	1	-1	68,8000	75,7083	-6,9083
6	1	-1/3	1	-1/3	68,4000	74,2194	-5,8194
7	1	1/3	1	1/3	80,0000	73,0306	6,9694
8	1	1	1	1	30,8000	25,0417	5,7583
Effet	63,6250	-8,0250	-1,6250	-0,5083			0,0000

Tableau A.8 – Matrice des effets de la pouzzolane sur la résistance mécanique à la compression à 90 jours.

Essai	Global	A	B	AB	R _{c90}	R _{c90 th}	r
1	1	-1	-1	1	77,6000	84,3583	-6,7583
2	1	-1/3	-1	1/3	78,8000	80,7361	-1,9361
3	1	1/3	-1	+1/3	80,8000	83,5139	-2,7139
4	1	1	-1	-1	61,2000	49,7917	11,4083
5	1	-1	1	-1	77,6000	83,2917	-5,6917
6	1	-1/3	1	-1/3	74,4000	76,6139	-2,2139
7	1	1/3	1	1/3	83,2000	76,3361	6,8639
8	1	1	1	1	40,6000	39,5583	1,0417
Effet	71,7750	-6,2250	-2,8250	-2,2917			0,0000

Annexe B

Effets du calcaire sur le ciment au laitier activé

Tableau B.1 – Matrice des effets du calcaire sur la consistance normalisée.

Essai	Global	A	B	C	E/C	E/C th	r
1	1	-1	1	1	0,2060	0,2121	-0,0061
2	1	0	0	0	0,1960	0,1980	-0,0020
3	1	1	-1	-1	0,1920	0,1839	0,0081
Effet	0,1980	-0,0047	0,0047	0,0047			0,0000

Tableau B.2 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 2 jours.

Essai	Global	A	B	C	R _{c2}	R _{c2} th	r
1	1	-1	1	1	4,8000	4,1333	0,6667
2	1	0	0	0	5,2000	5,3333	-0,1333
3	1	1	-1	-1	6,0000	6,5333	-0,5333
Effet	5,3333	0,4000	-0,4000	-0,4000			0,0000

Tableau B.3 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 7 jours.

Essai	Global	A	B	C	R _{c7}	R _{c7} th	r
1	1	-1	1	1	27,4000	26,3333	1,0667
2	1	0	0	0	27,8000	28,1333	-0,3333
3	1	1	-1	-1	29,2000	29,9333	-0,7333
Effet	28,1333	0,6000	-0,6000	-0,6000			0,0000

Tableau B.4 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

Essai	Global	A	B	C	R _{c28}	R _{c28} th	r
1	1	-1	1	1	47,2000	49,7333	-2,5333
2	1	0	0	0	43,6000	44,1333	-0,5333
3	1	1	-1	-1	41,6000	38,5333	3,0667
Effet	44,1333	-1,8667	1,8667	1,8667			0,0000

Tableau B.5 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 56 jours.

Essai	Global	A	B	C	R_{c56}	R_{c56}^{th}	r
1	1	-1	1	1	49,6000	51,8667	-2,2667
2	1	0	0	0	47,2000	47,2667	-0,0667
3	1	1	-1	-1	45,0000	42,6667	2,3333
Effet	47,2667	-1,5333	1,5333	1,5333			0,0000

Tableau B.6 – Matrice des effets du calcaire sur la résistance mécanique à la compression à 90 jours.

Essai	Global	A	B	C	R_{c90}	R_{c90}^{th}	r
1	1	-1	1	1	52,4000	57,5333	-5,1333
2	1	0	0	0	63,0000	55,1333	7,8667
3	1	1	-1	-1	50,0000	52,7333	-2,7333
Effet	55,1333	-0,8000	0,8000	0,8000			0,0000

Annexe C

Composition chimique des différents mélanges étudiés

1. Les mélanges du laitier + pouzzolane

Tableau C.1 – composition des mélanges en fonction du pourcentage de pouzzolane.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
90%+10%	40,360	10,070	2,350	37,240	4,010	0,960	0,490	0,610	0,005
80%+20%	41,010	10,880	3,230	34,240	3,880	1,040	0,840	0,630	0,005
70%+30%	41,670	11,680	4,100	31,230	2,980	1,120	1,190	0,650	0,006
100%+0%	39,700	09,260	1,470	40,250	4,130	0,890	0,140	0,590	0,004

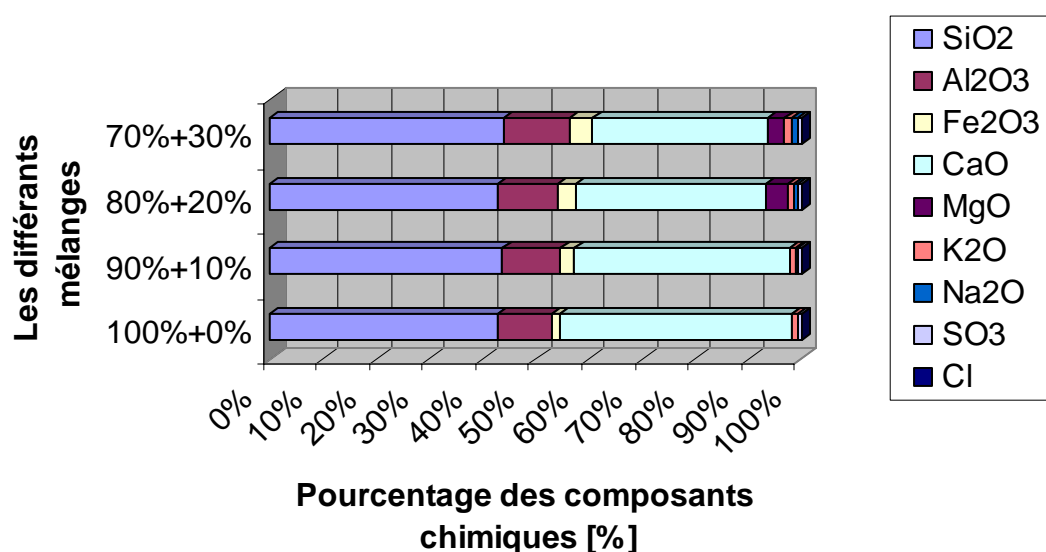


Figure C.1 – La variation de la composition chimique des ciments étudiés en fonction du pourcentage de pouzzolane.

2. Les mélanges du laitier + gypse + calcaire

Tableau C.2 – composition des mélanges en fonction du pourcentage du gypse et du calcaire.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
(90+5+5)%	36,240	8,480	1,350	40,330	3,880	0,820	0,130	2,120	0,004
(88+6+6)%	35,540	8,330	1,320	40,340	3,830	0,810	0,120	2,420	0,004
(86+7+7)%	34,690	8,170	1,300	40,360	3,780	0,790	0,120	2,730	0,004
(86+0+14)%	35,060	8,210	1,320	38,790	3,950	0,800	0,120	4,940	0,005

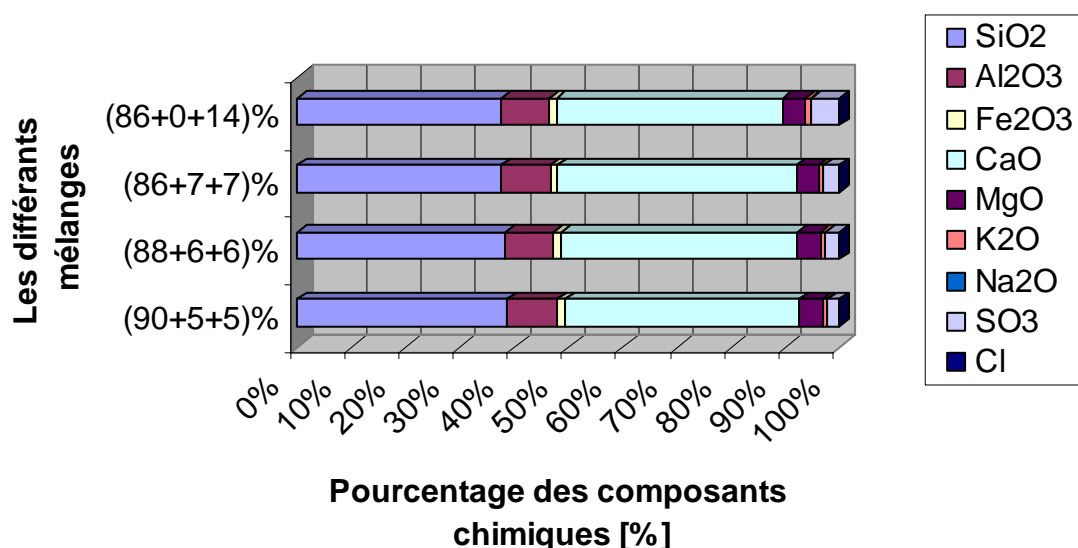


Figure C.2 – La variation de la composition chimique des ciments étudiés en fonction du pourcentage du gypse et du calcaire.

3. Le mélanges du laitier + gypse + calcaire + pouzzolane

Tableau C.3 – composition du mélange du laitier + gypse + calcaire + pouzzolane.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
(80+5+5)%+10% pouzzolane	36,890	9,290	2,230	37,320	3,960	0,900	0,480	2,140	0,005

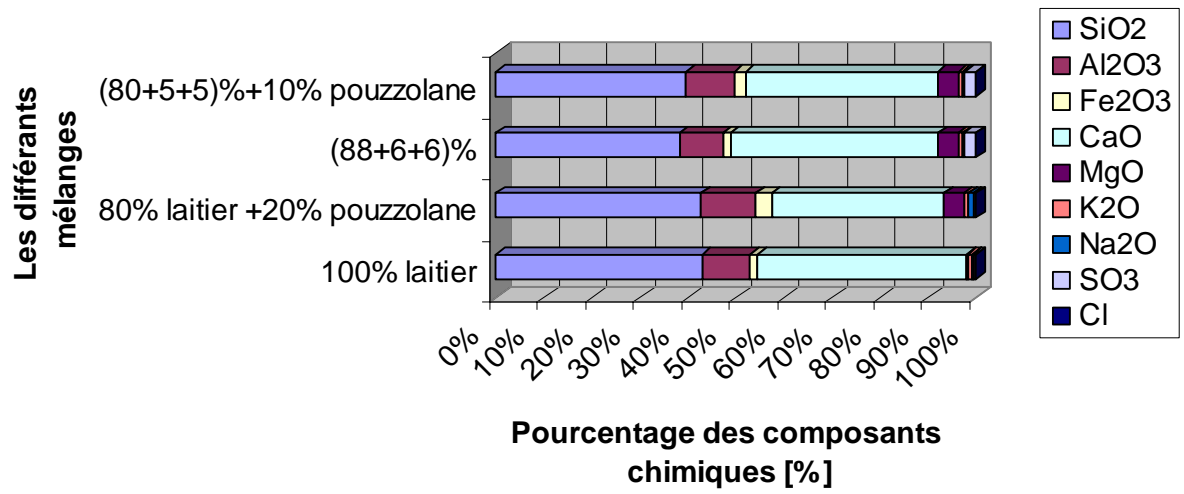


Figure C.3 – La variation de la composition chimique des principaux mélanges étudiés.

Annexe D

Condition techniques et récapitulation des résultats expérimentaux.

D.1. Matériel utilisé pour les différentiels essais

D.1.1. Finesse de mouture

La finesse est déterminée par un appareil appelé "perméabilimètre de Blaine" qui consiste à mesurer le temps nécessaire pour le passage d'un volume d'air à travers les couches du liant après avoir déterminé la température, densité et masse volumique [5].

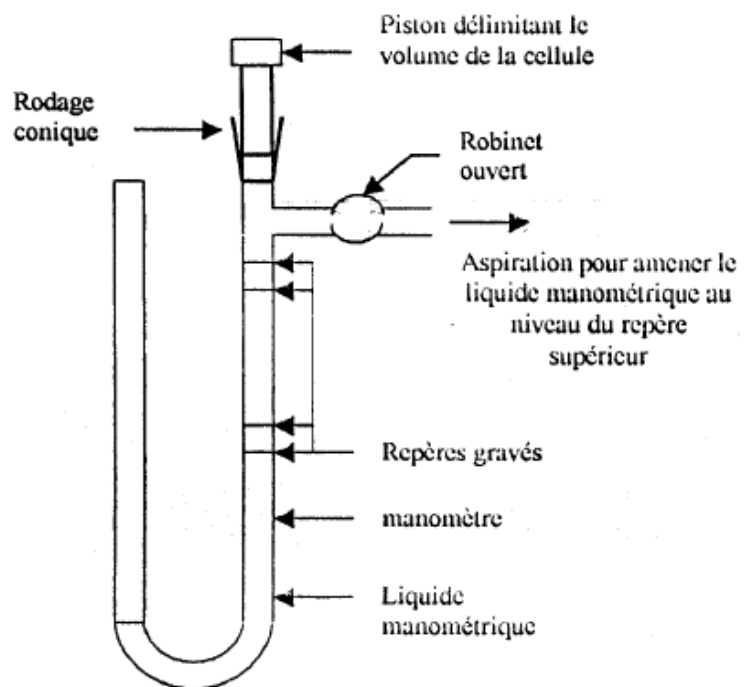
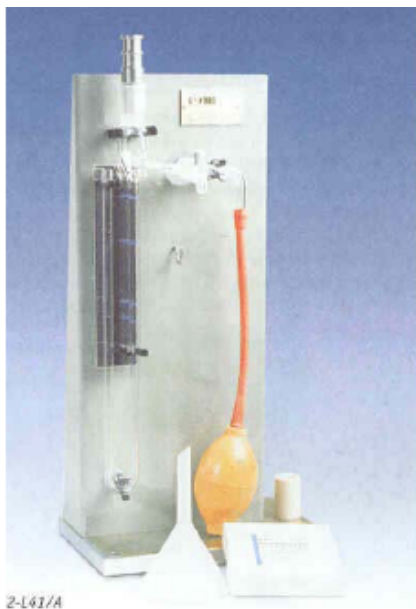


Figure D.1 – Perméabilimètre de Blaine.

D.1.2. Essais de consistance normale

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement, on le détermine à l'aide de "L'aiguille de Vicat". La fin de la prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide [5].



Figure D.2 – l'Appareil de Vicat.

D.1.3. Essais de stabilité de la pâte

Le gonflement est engendré par les agents expansifs, la détection de ce phénomène se fait à l'aide des aiguilles du Châtelier.

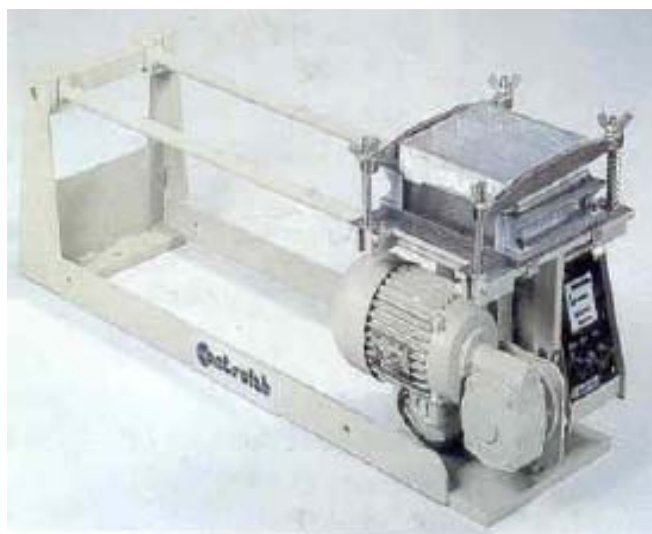
D.1.4. Préparation des éprouvettes

Le matériel utilisé est:

- un malaxeur à ciment;
- des moules de $(2 \times 2 \times 2) \text{ cm}^3$, pour pâte de ciment;
- des moules de $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, pour mortier de ciment;
- une table à choques;
- une enceinte climatique à 95 % d'humidité et à une température $(20 \pm 1)^\circ \text{ C}$.



(a)



(b)

Figure D.3 – (a): malaxeur à ciment; (b): table à choques.



(a)



(b)

Figure D.3 – (a): moule pour pâte de ciment (2 x 2 x 2) cm³; (b): moule pour mortier de ciment (4 x 4 x 16) cm³.

D.1.5. Appareils des essais destructifs

Nous avons utilisé:

- une presse de compression hydraulique;
- une machine de flexion pour mortier.

D.2. Les tableaux des résultats des essais de compression

D.2.1. Résistance à la compression de la pâte de ciment en [MPa]

Tableau D.1 – Mélange laitier et pouzzolane (SSB 1).

Proportion du mélange laitier/pouzzolane en %	90/10	80/20	70/30
R _{C2}	28,68	32,13	06,00
R _{C7}	55,47	56,40	18,60
R _{C28}	74,60	71,60	27,00
R _{C56}	77,60	75,00	39,60
R _{C90}	78,80	80,80	61,20

Tableau D.2 – Mélange laitier et pouzzolane (SSB 2).

Proportion du mélange laitier/pouzzolane en %	90/10	80/20	70/30
R _{C2}	30,30	33,60	05,00
R _{C7}	59,20	62,40	18,40
R _{C28}	63,80	76,40	20,45
R _{C56}	68,40	80,00	30,80
R _{C90}	74,40	83,20	40,60

Tableau D.3 – Pâte de ciment CPJ II/A.

Résistance à la compression	CPJ II/A
R _{C2}	59,20
R _{C7}	78,40
R _{C28}	89,60
R _{C56}	93,30
R _{C90}	95,20

Tableau D.4 – Résistance à la compression du ciment de référence (100 % laitier).

Résistance à la compression	100% laitier
R _{C2}	33,00
R _{C7}	44,80
R _{C28}	53,00
R _{C56}	68,80
R _{C90}	77,60

Tableau D.5 – Mélange laitier et gypse+calcaire.

Proportion du mélange laitier/(gypse+calcaire) [%]	90/(5+5)	88/(6+6)	86/(7+7)
R _{C2}	06,00	05,20	04,80
R _{C7}	29,20	27,80	27,40
R _{C28}	41,60	43,60	47,20
R _{C56}	45,00	47,20	49,60
R _{C90}	50,00	63,00	52,40

Tableau D.6 – Mélange laitier et gypse.

Proportion du mélange laitier/ gypse [%]	86/14
R _{C2}	04,00
R _{C7}	25,85
R _{C28}	36,20
R _{C56}	41,73
R _{C90}	44,80

Tableau D.7 – Mélange laitier et pouzzolane + gypse + calcaire.

Proportion du mélange laitier/(pouzzolane+gypse+calcaire) [%]	80/(10+5+5)
RC ₂	06,40
RC ₇	08,60
RC ₂₈	28,20
RC ₅₆	35,00
RC ₉₀	58,60

D.2.2. Résistance à la compression du mortier de ciment en [MPa]

Tableau D.8 – comparaison entre les résistances à la compression du ciment Portland et le ciment au laitier activé avec 20 % d'addition.

	CPJ II/A	Laitier + 20 % Pouzzolane
RC ₂	19,50	14,50
RC ₇	38,80	19,75
RC ₂₈	45,20	28,10

D.2.3. Résistance à la flexion du mortier de ciment en [MPa]

Tableau D.9 – comparaison entre les résistances à la flexion du ciment Portland et le ciment au laitier activé avec 20 % d'addition.

	CPJ II/A	Laitier + 20 % Pouzzolane
R _{f2}	4,00	3,60
R _{f7}	6,80	5,20
R _{f28}	8,10	5,40

D.3. Le volume de travail

Le travail expérimental présenté dans ce mémoire, a été réalisé durant un stage de 6 mois au sein du laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Tébessa.



Figure D.4 – (a) échantillons cubiques de pâte de ciment (240); (b) échantillons prismatiques de mortier de ciment (12).