

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Ben Bouali de Chlef



Faculté de Génie civil et d'Architecture
Département de Génie Civil

Mémoire de Magister

Présentée par

AHMIDI Saddek

Ingénieur d'Etat en Génie Civil Université de Chlef

En vue de l'obtention du diplôme de **Magister**
Spécialité: **Génie civil**
Option: **Géomatériaux**

Thème

Modélisation de l'efficacité des additions minérales entre les propriétés mécanique et de durabilité par le concept du liant équivalent

Devant le jury composé de :

Ghrici Mohamed	Professeur	UHB Chlef	Président
Ezziane karim	Maître de conférences A	UHB Chlef	Rapporteur
Boukandakji Othman	Maître de conférences A	U. Médéa	Examineur
Debièb Farid	Maître de conférences A	U. Médéa	Examineur
Boukhatem Bakhta	Maître de conférences B	UHB Chlef	Examineur

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier mon promoteur Dr Karim Ezziane, Maître de Conférences à l'Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef, pour m'avoir confié ce travail de recherches, ainsi que pour son aide et ses précieux conseils au cours de ces années.

Je remercie également Dr Mohamed Ghrici, Maître de Conférences à l'Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef, pour sa disponibilité, ses idées et conseils, ainsi que pour son aide précieuse de tous les jours. Merci

Mes sincères remerciements s'adressent à messieurs Boukandakdji Othmane, Dibièb Farid, et mademoiselle Boukhatem Bakhta pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Civil à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef et en particulier les enseignants de post graduation qui ont contribué à ma formation de Magister.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'aide de nombreuses personnes. Que me pardonnent celles que j'oublie ici, je souhaite adresser mes remerciements à tous ceux qui par leur aide et leur soutien m'ont permis de réaliser cette étude.

Mes dernières pensées iront vers ma famille, et surtout mes parents, qui m'auront permis de poursuivre mes études jusqu'à aujourd'hui.

ملخص

ان دراسة تطور مقاومة الاسمنت المركب شهدت جهود ضخمة في مجال البحث حيث أن التنبؤ بها هو مصدر قلق كبير مع إدخال معاملات جديدة في النماذج المقترحة، هناك أنواع مختلفة من المعاملات والمؤشرات المستخدمة من قبل المعايير العالمية، والتي تحدد نشاط استبدال الإضافات الإسمنتية، يحاول هذا العمل دراسة معامل يسمى معامل الكفاءة، الذي يشخص مساهمة الإضافات الإسمنتية في تطوير المقاومة الميكانيكية و الديمومة، ويهدف إلى تحديد خصائص بعض الإضافات المعدنية على مساهماتهم في تطوير القوة الميكانيكية واستنتاج بعد ذلك معاملات كفاءتها من النماذج الكلاسيكية للتنبؤ. سيتم حساب هذه المعاملات عن طريق نموذج بولومي و فيري وغيرها وذلك باستبدال كمية الإسمنت برابط مكافئ له نفس القوة الميكانيكية، والهدف الرئيسي سيكون اشتقاق نماذج خاصة توصيف كل مضاف اسمنتي وفقا للسن والمعدل المستخدم.

الكلمات الدالة: الإسمنت، الإضافة المعدنية، برابط مكافئ، معامل الكفاءة، نموذج، قوة الضغط، و الديمومة.

Résumé

L'analyse de l'évolution des résistances du ciment aux ajouts minéraux a vu d'énormes efforts dans le domaine de la recherche, où leur prédiction constitue une préoccupation majeure par l'introduction de nouveaux coefficients dans les modèles proposés. Il existe différents types de coefficients et d'indices, utilisés par les normes, qui définissent l'activité des ajouts se substituant au ciment. Ce travail tente à étudier un coefficient, appelé coefficient d'efficacité, caractérisant la contribution de l'addition minérale dans le développement des résistances mécaniques et l'amélioration de sa durabilité. Il vise à caractériser certaines additions minérales par leurs contributions dans le développement des résistances mécaniques, et à déduire par la suite leurs coefficients d'efficacité à partir de modèles classiques de prédiction. Ce coefficient d'efficacité sera déterminé selon le modèle de Bolomey et de Féret et d'autres en remplaçant la quantité de ciment par un liant équivalent ayant la même résistance mécanique. L'objectif principal sera de déduire des modèles propres caractérisant chaque addition minérale selon 'âge et le taux utilisé.

Mots clés: ciment, addition minérale, Liant équivalent, coefficient d'efficacité, modèle, résistance mécanique, durabilité.

Abstract

The analysis of the evolution of resistance of cement with mineral additives has seen huge efforts in the field of research, where their prediction is a major concern with the introduction of new factor in the proposed models. There are different types of factor and index used by the norms that define the activity of the replacing additions in cement. This work tries to study a factor called efficiency factor, characterizing the contribution of mineral addition in the development of mechanical strength and improved durability. It aims at characterizing some mineral additions for their contributions in the development of mechanical strength, and then deriving their efficiency factor from classical models. The efficiency factor will be determined by the model Bolomey and Feret and other by replacing the quantity of cement binder having the same equivalent mechanical strength. The main objective will be to derive specific models characterizing each mineral addition according to age and rate used.

Keywords: cement, mineral addition, equivalent binder, efficiency factor, model, mechanical strength, durability.

Table des matières

Introduction générale	2
-----------------------------	---

Chapitre I:

Propriétés des ciments composés

1.1	Introduction.....	5
1.2	Ciment portland	5
1.2.1	Production mondiale du ciment	6
1.2.2	Fabrication du ciment.....	6
1.2.3	Composition chimique du clinker :	9
1.3	Ajouts minéraux.....	9
1.3.1	Laitier des hauts fourneaux	10
1.3.2	Cendres volantes	10
1.3.3	Additions calcaires.....	10
1.3.4	Fumée de silice	11
1.3.5	Pouzzolanes	11
1.4	Avantages des ajouts minéraux	12
1.4.1	Avantages économiques	12
1.4.2	Avantages écologiques	12
1.4.3	Avantages techniques.....	13
1.5	Action des additions minérales	13
1.5.1	Effet granulaire	13
1.5.2	Effet physico-chimique et microstructural	16
1.5.3	Effet chimique	16
1.6	Propriétés des ciments aux ajouts.....	18
1.6.1	Effet sur le ciment frais	18
1.6.2	Effet sur le ciment durcis.....	24
1.6.3	Effet sur la durabilité du ciment	30

Chapitre II:

Concept du liant équivalent et coefficient d'efficacité

2.1	Introduction.....	33
2.2	Concept du liant équivalent	33
2.2.1	Calcul du coefficient d'efficacité	33
2.2.2	Différent modèles du coefficient d'efficacité des ajouts	34
2.3	Indices d'activité et coefficients d'efficacité	37
2.3.1	Selon le modèle de Féret	38

2.3.2	Selon le modèle de Bolomey	38
2.3.3	Selon le modèle d'Abrams	39
2.4	Travaux réalisés sur l'efficacité	40

Chapitre III:

Evaluation du coefficient d'efficacité des résistances mécaniques

3.1	Introduction.....	60
3.2	Matériaux utilise	60
3.2.1	Clinker.....	60
3.2.2	Calcaire	61
3.2.3	Pouzzolane naturelle	61
3.2.4	Laitier	63
3.2.5	Sable.....	64
3.2.6	Adjuvant organique.....	64
3.3	Confection des éprouvettes	65
3.4	Essais	65
3.4.1	Essai de compression	65
3.4.2	Chaleur d'hydratation.....	65
3.4.3	Retrait.....	66
3.5	Etude de l'efficacité des ajouts minéraux.....	66
3.5.1	Evolution des résistances mécaniques.....	66
3.5.2	Déterminations du coefficient d'efficacité	67
3.5.3	Efficacité du calcaire.....	67
3.5.4	Efficacité de pouzzolane naturelle	69
3.5.5	Efficacité du laitier.....	70
3.6	Comparaison des résultats.....	72
3.6.1	Comparaison entre les modèles	72
3.6.2	Comparaison entre les ajouts	73

Chapitre IV:

Evaluation du coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation

4.1	Introduction.....	76
4.1.1	Séquences de l'hydratation	76
4.1.2	Effet de l'addition minérale.....	77
4.2	Méthode de travail	79
4.2.1	Préparation des éprouvettes	79
4.2.2	Mesure de la chaleur dégagée.....	79

4.3	Analyse des résultats	80
4.4	Evaluation du coefficient d'efficacité	82
4.4.1	Effet de l'âge	84
4.4.2	Effet du taux de substitution	84
4.4.3	Effet du type de l'ajout.....	85

Chapitre V:

Evaluation du coefficient d'efficacité de durabilité des additions minérales

5.1	Introduction.....	87
5.2	Durabilité du mortier et ciment.....	87
5.2.1	Attaque par les sulfates	87
5.2.2	Attaque par les acides.....	90
5.2.3	Autres types d'attaques chimiques	90
5.3	Protocole expérimental	90
5.3.1	Matériaux utilisés.....	91
5.3.2	Confection et préparation des mortiers	91
5.3.3	Déroulement des essais	91
5.3.4	Détermination du coefficient d'efficacité.....	92
5.4	Résultats obtenus du coefficient d'efficacité	93
5.4.1	Efficacité de l'attaque par les sulfates	93
5.4.2	Efficacité de l'attaque par les acides	94
5.4.3	Comparaison des coefficients d'efficacité.....	96
5.5	Conclusion	97

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	99
------------	---	-----------

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie	103
----------------------------	------------

Liste des figures

Figure 1.1: Différentes étapes de fabrication d'un ciment Portland [3].	7
Figure 1.2: Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant selon [10].	14
Figure 1.3: Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton selon [11].	15
Figure 1.4: Variation du besoin en eau des pâtes CEM II addition à consistance normalisée en fonction de la teneur relative en addition [12].	15
Figure 1.5: Effet de GGBS sur le temps de prise [22].	18
Figure 1.6: Résistance à la compression jusqu'à 28 jours pour des ciments renfermant de la terre de Santorin [32].	25
Figure 1.7: Résistance à la compression jusqu'à 12 mois pour des ciments renfermant de la terre de Santorin [32].	26
Figure 1.8: Effet du remplacement de ciment Portland par une pouzzolane naturelle Italienne sur la résistance à la compression d'un mortier ISO [31].	27
Figure 1.9: Effet de l'emploi d'une pouzzolane naturelle Italienne sur la chaleur d'hydratation du ciment [31].	28
Figure 1.10: Courbes d'élévation de température pour des bétons d'essais aux cendres volantes et ordinaire [45].	29
FIGURE 2.1: Action d'une fine minérale comparée au ciment. [58].	34
Figure 2.2: Coefficient d'efficacité calculé avec les formules de Bolomey et d'Abram, pour $E/C=0.50$ et $p=0.25$ [59].	39
Figure 2.3. (a) Coefficient d'efficacité (Bolomey) en fonction de l'indice d'activité i et du taux de substitution p . (b) Variation du coefficient d'efficacité en fonction de l'indice d'activité i et du taux de substitution p . [59].	40
Figure 2.4. Schéma conceptuel montrant l'effet de coefficients d'efficacité. [60].	41
Figure 2.5. Les courbes de référence du rapport E/C et résistance à la compression. [62].	42
Figure 2.6. Relation entre le coefficient d'efficacité et de taux de remplacement pour 90 jours. [62].	43
Figure 2.7. Relation entre le ciment équivalent (pour l'équation de Bolomey) et pouzzolane naturelle utilisée. [63].	43
Figure 2.8. Relation entre le ciment équivalent (pour l'équation de Feret) et pouzzolane naturelle utilisée. [63].	44
Figure 2.9. Les coefficients d'efficacité. [64].	46
Figure 2.10. Variation de la fonction a avec la sf/c [65].	47
Figure 2.11. Comparaison entre les résistances à la compression mesurées et calculées. [67].	50
Figure 2.12: la relation entre w/c et une propriété définie (force, coefficient de migration, ... etc.). [68].	51
Figure 2.13: Coefficient d'efficacité (k) de deux cendres volantes (FA1 et FA2) et d'une addition calcaire (L) en fonction du temps (ciment C1). [59].	52
Figure 2.14. Coefficient d'efficacité (k) à 28 jours des additions calcaires (L) et quartzieuses (Q) en fonction de leur finesse ($p=25\%$; ciment C1). [59].	52
Figure 2.15. Variation du coefficient d'efficacité de (a) 5 cendres volantes et 20 ciments Portland et (b) 15 additions calcaires et 4 ciments Portland. [59].	53
Figure 2.16. Coefficient d'efficacité (k) h 28 jours de la fumée de titane en fonction du type de ciment et du taux de substitution p . [59].	54

Figure 2.17: Coefficient d'efficacité de la fumée de silice liée à la résistance à la compression avec un durcissement scellé. [70]	55
Figure 2.18: Coefficient d'efficacité pour le béton contre le remplacement du ciment par la fumée de silice [70].....	55
Figure 2.19: Comparaison des résultats des auteurs avec ceux de Babu et Kumar [72].	57
Figure 2.20: Effet du taux de remplacement sur le coefficient d'efficacité à des âges différents [72].	58
Figure 3.1: Analyse par la diffraction aux rayons X de la pouzzolane de Béni-Saf [74].....	62
Figure 3.2: Analyse par la diffraction aux rayons X du laitier granulé d'El-Hadjar [75]	63
Figure 3.3: Courbes granulométriques des sables utilisés.....	64
Figure 3.4: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au calcaire pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Bolomey.	68
Figure 3.5: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au calcaire pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Feret.	68
Figure 3.6: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au calcaire pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle d'Abrams	68
Figure 3.7: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier à la pouzzolane naturelle pour différents taux de substitution en fonction de l'âge par le modèle de Bolomey.	69
Figure 3.8: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier à la pouzzolane naturelle pour différents taux de substitution en fonction de l'âge par le modèle de Feret.	69
Figure 3.9: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier à la pouzzolane naturelle pour différents taux de substitution en fonction de l'âge par le modèle d'Abrams.	70
Figure 3.10: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au laitier pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Bolomey.	71
Figure 3.11: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au laitier pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Feret.	71
Figure 3.12: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au laitier pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle d'Abrams.	71
Figure 3.13 : Variation linéaire entre la formule de Féret et de Bolomey et Abrams	72
Figure 3.14: Variation du coefficient d'efficacité selon le modèle de Féret pour un taux de substitution faible.....	73
Figure 3.15: Variation du coefficient d'efficacité selon le modèle de Féret pour un taux de substitution modérés	74
Figure 3.16: Variation du coefficient d'efficacité selon le modèle de Féret pour un taux de substitution faible.....	74
Figure 4.1: Courbe classique calorimétrique de l'hydratation d'une pâte de ciment.....	77
Figure 4.2: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différents taux de calcaire.....	80
Figure 4.3: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différents taux de la pouzzolane.....	81
Figure 4.4: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différents taux de laitier	82
Figure 4.5: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents taux de calcaire	83
Figure 4.6: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents taux de pouzzolane.....	83
Figure 4.7: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents taux de pouzzolane laitier	84
Figure 4.8: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents type de l'ajout ..	85
Figure 5.1: Formation de l'ettringite secondaire [98].	88
Figure 5.2: Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates[100].	89

Figure 5.3: Coefficient d'efficacité d'expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion dans une solution de 5% Na ₂ SO ₄	93
Figure 5.4: Coefficient d'efficacité d'expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion dans une solution de 5% MgSO ₄	94
Figure 5.5: Coefficient d'efficacité de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 1 % HCl.....	95
Figure 5.6: Coefficient d'efficacité de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 3 % H ₂ SO ₄	95
Figure 5.7: Comparaison des différents coefficients d'efficacité selon la propriété et l'addition utilisée.....	97

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Exemple de composition chimique d'un clinker [4].....	9
Tableau 1-2: Temps de prise et l'uniformité des ciments [23].....	19
Tableau 1-3: proportions du mélange et l'ouvrabilité [29].....	20
Tableau 1-4: Les résultats des tests de la fluidité pour la surface et de tailles de différentes particules de GGBS [30].....	21
Tableau 1-5: Influence de l'heure de début de test sur la capacité et le taux de ressuage [29].....	23
Tableau 2-1: coefficient d'efficacité (valeur de k. [67].....	49
Tableau 2-2: L'augmentation de pourcentage total de ciment du béton avec laitier pour atteindre la résistance équivalent à 28jours. [72].....	57
Tableau 3-1: caractéristiques du clinker de Oued-Sly.....	61
Tableau 3-2: caractéristiques du calcaire de la cimenterie de chlef.....	61
Tableau 3-3: Caractéristiques de la pouzzolane de Beni-Saf.....	62
Tableau 3-4: Caractéristiques du Laitier d'El-Hadjar.....	63
Tableau 3-5: Caractéristiques physiques des sables utilisés.....	64
Tableau 3-6: caractéristiques physico-chimiques du Medaplast SP 40 [76].....	64
Tableau 3-7: composition du mortier.....	65
Tableau 3-8: Résultats de la résistance à la compression (MPa) d'un mortier contenant différentes proportions d'ajouts minéraux.....	66
Tableau 5-1: Composition des mortiers testés dans les essais de durabilité.....	91

Liste des symboles

- C** et **A** : Les quantités de ciment et d'addition.
- k** ou **k_e** : Coefficient sans dimension représentant l'efficacité de l'addition minérale.
- c** : Volumes de ciment dans le mortier à l'état frais.
- e** : Volumes de l'eau dans le mortier à l'état frais.
- v** : Volumes de l'air dans le mortier à l'état frais.
- K_F** : Coefficient dépendant du squelette granulaire et de la résistance du ciment (Féret).
- ρ_e** et **ρ_c** : Les masses volumiques de l'eau et du ciment.
- d_c** : La densité du ciment.
- y** : Coefficient dépendant de la consistance du béton.
- C₀** : La masse de ciment.
- E** : La masse de l'eau.
- V** : La masse de l'eau équivalente au volume occupé par l'air.
- K_b** : Coefficient prenant en compte la classe du ciment et de celle des granulats (Bolomey).
- K₁** et **K₂** : Sont des constantes empiriques (Abrams).
- i** : L'indice d'activité.
- f_p(t)** : La résistance en compression du mortier contenant une fraction p d'addition.
- f₀(t)** : La résistance du mortier témoin sans addition.
- W** : La teneur en eau.
- C** : La teneur en ciment.
- S** : La teneur en laitier.
- S_C** : La résistance du mélange de contrôle.
- S_P** : La résistance de mélange pouzzolanique.
- A_p** et **B_p** : Des coefficients dépendant du taux de substitution.
- A_f** et **B_f** : Des coefficients dépendant de la finesse du laitier.
- A_t** et **B_t** : Des coefficients dépendant de la température de cure.
- γ_s** : Fraction de la silice réactive.
- f_{s,p}** et **f_{s,c}** : Fraction de la silice dans le ciment et dans l'ajout.
- a** : Constante donnée par (Papadakis).
- t** : L'âge.
- p** : Le taux de substitution.
- a₀**, **a₁**, **a₂** et **a₃** : Des coefficients de régression égale à 0,857, 0,027, -0,00016, et -0,011.
- m_c** : Masse de ciment ou liant contenu dans l'éprouvette.
- C(J/°C)** : Capacité thermique du calorimètre et de l'éprouvette.
- α(J/°C)** : Coefficient de déperdition thermique du calorimètre donné par l'étalonnage.
- Δθ** : Échauffement de l'éprouvette par rapport à la température ambiante.
- Q**, **Q₀** et **Q_p** : La chaleur d'hydratation.
- ε_t** : Dimension de l'éprouvette au temps t.
- ε_{t0}** : Dimension de l'éprouvette au temps t₀.
- M_t** : Masse de l'éprouvette avant l'immersion.
- M_{t0}** : Masse de l'éprouvette après l'immersion.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le ciment est le matériau le plus utilisée dans le monde de la construction et grâce à ses avantages d'exécution et à ses qualités techniques que les constructions d'aujourd'hui sont devenues de plus en plus solides et de plus en plus durables. Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton et se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine. La recherche de ses secrets a toujours occupé l'esprit des chercheurs qui ont déployé tous leurs efforts pour le rendre plus performant, plus économique et moins polluant. Leur recette magique est de lui incorporer des substances minérales lui permettant de palier son déficit et de résister contre toute détérioration extérieure. Le couple ciment substances minérales est le nouveau ciment d'aujourd'hui qui semble, avec l'évolution de ses qualités, ne plus reconnaître de barrière de résistance ni de crainte d'agressions extérieures. L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que le laitier des hauts fourneaux et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental. La minimisation de l'élimination de ces résidus industriels et la diminution de la demande en ressources présente généralement une durée de vie plus longue que le béton traditionnel.

L'analyse de l'évolution des résistances du ciment aux ajouts minéraux a vu d'énormes efforts dans le domaine de la recherche, où leur prédiction constitue une préoccupation majeure par l'introduction de nouveaux coefficients dans les modèles proposés. Il existe différents types de coefficients et d'indices, utilisés par les normes, qui définissent l'activité des ajouts se substituant au ciment. Ce travail tente à étudier un coefficient, appelé coefficient d'efficacité, caractérisant la contribution de l'addition minérale dans le développement des résistances mécaniques et l'amélioration de sa durabilité. Il vise à caractériser certaines additions minérales par leurs contributions dans le développement des résistances mécaniques, le dégagement de chaleur d'hydratation et la résistance aux milieux agressifs et à déduire par la suite leurs coefficients d'efficacité à partir du concept du liant équivalent. L'objectif principal sera de déduire des modèles propres caractérisant chaque addition minérale selon l'âge et le taux utilisé

Ce travail basé sur les résultats des travaux expérimentaux envisagés dans la thèse de Ezziane karim (thèse de Doctorat d'Etat, USTO 2006), Ghrici Mohamed (Thèse de Doctorat d'Etat, USTO 2006) et Boubekeur Toufik (Mémoire de Magister, UHB Chlef 2009). Les résultats présentés s'intéressent à l'identification de certains sous-produits locaux pouvant être utilisés comme ajouts dans l'industrie cimentaire. Deux matières chimiquement actives en l'occurrence le laitier d'El-Hadjar et la pouzzolane de Beni-Saf ainsi que le calcaire, considéré comme inerte, se trouvant dans la région de Chlef en quantités abondantes ont été étudiés dans ces travaux.

Ce mémoire se compose des chapitres suivants

- Chapitre I : Propriétés des ciments composés.
- Chapitre II: Concept du liant équivalent et coefficient d'efficacité.
- Chapitre III : Evaluation du coefficient d'efficacité des résistances mécaniques
- Chapitre IV : Evaluation du coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation.
- Chapitre V : Evaluation du coefficient d'efficacité de durabilité des additions minérales.
- Chapitre VI: Conclusion et recommandations.

CHAPITRE I :

Propriétés des ciments composés.

1.1 Introduction

Le mot ciment vient du latin "caementum", qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens d'origine a été conservé en s'appliquant aux seuls liants hydrauliques, c'est-à-dire capables de durcir au contact de l'eau. Les Grecs sont les premiers constructeurs à employer la chaux obtenue par cuisson du calcaire. Les Romains améliorent ce liant en y ajoutant des cendres volcaniques et des briques pilées et obtiennent ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Ce liant rend possible la construction de grands ouvrages tels que les arènes, les thermes, les amphithéâtres ou les aqueducs, dont certains sont encore parfaitement conservés vingt siècles plus tard.

1.2 Ciment portland

C'est au 18^{ème} siècle que sont produites les premières chaux hydrauliques proches des ciments modernes, principalement du fait des progrès réalisés dans les procédés de cuisson. En 1759, l'Anglais John Smeaton produit un mortier aussi dur que la pierre en mélangeant des chaux hydrauliques et des cendres volcaniques [1]. Le Français Louis Vicat découvre en 1817 les principes chimiques des ciments et définit les règles de fabrication du ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne, mais il publie ses travaux sans prendre de brevets.

C'est l'Anglais Joseph Aspdin qui fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination en combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie.

En Belgique, une première cimenterie voit le jour en 1872 où Dufosse et Henry établissent la première usine de production de ciment Portland du pays à Cronfestu. Dès la fin du 19^{ème} siècle, le béton moderne à base de ciment Portland devint un matériau de construction largement répandu.

De nombreux perfectionnements sont apportés au cours du 20^{ème} siècle à la fabrication du ciment, notamment avec la production des ciments spéciaux, sans toutefois modifier les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés fondamentales du ciment Portland [1].

1.2.1 Production mondiale du ciment

En 2006, la production mondiale de ciment a enregistré une progression de 12 % pour atteindre 2,5 Mdt (+ 6 % par rapport à 2005). Le marché asiatique continue à se développer de la manière la plus dynamique avec une augmentation de la production de 14,7 %, et en particulier en Chine, avec une augmentation de 19 %, suivie par l'Inde (+ 11 %). L'Europe a réalisé 13 % de la production mondiale en 2006 (+ 7 %), dont 10,6 % pour les 27 états membres de l'Union européenne. Le continent américain a connu un léger essoufflement de la croissance de la production de ciment avec une augmentation de 3 %. Quant aux États-Unis, la consommation est restée stable en 2006 (+0,3 %), mais les importations de ciment et de clinker ont atteint un niveau record de 36 Mt. [2]

La répartition de la production du ciment dans le monde est comme suit:

Asie : 69,4 %

Europe 13 %, dont Union européenne 27 : 10,6 %

Amériques sans Etats-Unis : 5,8 %

Afrique : 4 %

Etats-Unis : 3,9 %

CEI (CEI : Communauté des États) : 3,4 %

Océanie : 0,4 %

1.2.2 Fabrication du ciment

La fabrication du ciment se distingue en cinq étapes majeures comme c'est illustré sur la Figure 1.1

L'extraction de la matière première en carrière

Le pré homogénéisation et transport

Le broyage de Cru

La cuisson

Le broyage de clinker

Le stockage

On distingue également quatre types de « voies » en fonction du type de préparation :

- sèche
- semi sèche
- semi humide
- humide

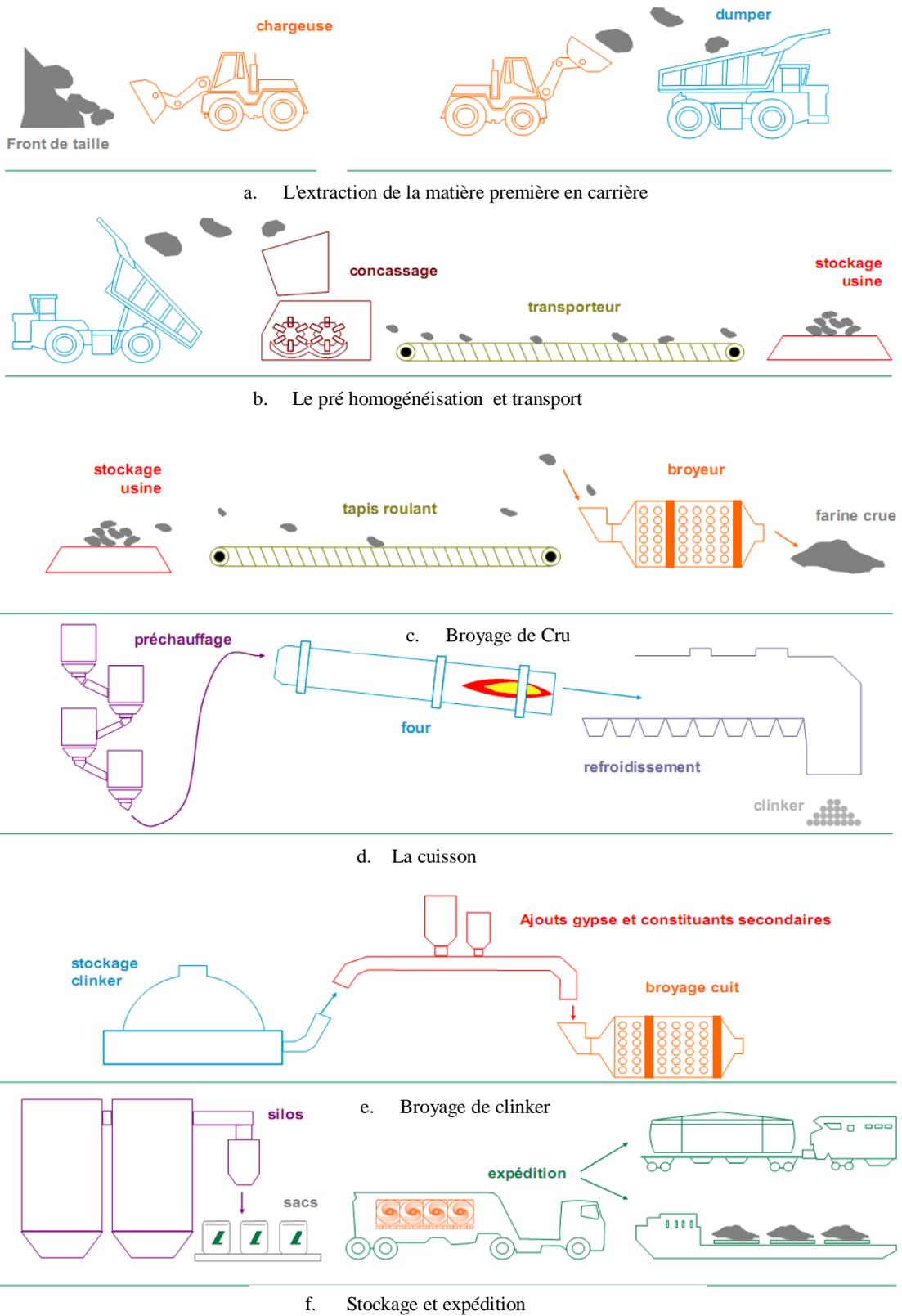


Figure 1.1: Différentes étapes de fabrication d'un ciment Portland [3].

On peut trouver presque partout les matières brutes nécessaires pour réaliser un ciment Portland de composition correcte et de haute qualité. Les sources de matériaux bruts destinés à la fabrication du ciment Portland doivent pouvoir fournir les deux principaux composants, le calcaire (CaO) et la silice (SiO_2), et deux composants secondaires, l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Le calcaire provient ordinairement de la pierre à chaux, mais on peut également l'obtenir de la craie et de la marne. La silice provient du sable ou de schistes, l'alumine de sables, schistes et bauxites, et l'oxyde de fer se trouve généralement sous forme de trace dans les différents matériaux suivant leurs compositions. Comme il est économique d'utiliser les matériaux disponibles, on y rencontre inévitablement des composés non nécessaires ou indésirables. Ils sont mieux connus sous le nom de composants mineurs; ce sont la magnésie (MgO), les alcalis (Na_2O et K_2O), et les oligo-éléments, tels que phosphore, titane et manganèse. On analyse et on proportionne séparément des matériaux bruts appropriés de manière à obtenir des mélanges homogènes. C'est la phase de pré homogénéisation qui consiste à créer un mélange fin homogène qu'on appelle le cru.

Dans la voie sèche, ce mélange subit un concassage puis un broyage auquel on ajoute une étape de granulation dans la voie semi sèche. Dans la voie humide, le mélange liquide est d'abord émotté puis broyé et enfin délayé, il est en plus pressé.

Cette composition - la même dans le monde entier - est déterminée par la considération des propriétés de cuisson et de cimentation optimales, de solidité, et de qualité parfaitement saine. Les matériaux bruts sont écrasés dans des broyeurs à boulets; on analyse le mélange brut résultant et on le mélange intimement soit en présence d'humidité, soit à sec, avant cuisson au four.

Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa lente progression dans le four vers la partie basse plus chaude. Dans un premier temps, le cru subit une étape de séchage puis c'est la phase de décarbonatation. Les premières réactions chimiques se produisent conduisant au dégagement de CO_2 . Puis après une phase de transition, le mélange subit la phase de cuisson. La température est de l'ordre de $1450\text{ }^\circ\text{C}$ (température de clinkerisation).

Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle le clinker et se présente sous forme de caillou. La cuisson est d'une grande importance parce que les recombinaisons chimiques qui se produisent à l'état de demi-fusion doivent être complètes, faute de quoi le ciment ne

serait pas sain. Dans ce processus de cuisson, l'alumine et l'oxyde de fer agissent comme fondants et améliorent la qualité de la combinaison chimique.

Le clinker produit est broyé avec du gypse (retardataire de prise), cette opération est généralement effectuée au moyen d'un broyeur à boulet, dispositif cylindrique chargé avec des boulets d'acier mis en rotation dans lequel on introduit le clinker, de manière à obtenir le ciment Portland. Le broyage constitue, avec le processus de cuisson, l'un des plus importants éléments du coût de fabrication. On utilise par suite très fréquemment des adjuvants du broyage (agents de mouture) qui permettent de réduire les frais et d'améliorer le degré de finesse et potentialiser les résistances.

Le ciment Portland finalement obtenu est anhydre. Pour qu'il conserve son pouvoir de liaison, on doit le protéger contre l'humidité et le gaz carbonique (bioxyde de carbone). Aussi le ciment doit être emballé en sacs étanches à l'humidité et hermétiquement scellés [3].

1.2.3 Composition chimique du clinker :

De fait, la chimie des ciments est essentiellement une chimie des oxydes, et c'est ce qui justifie les conventions d'écriture qui lui sont propres.

Tableau 1-1: Exemple de composition chimique d'un clinker [4]

Oxydes	Notation	Pourcentage	Marge d'erreur
Perte au feu	-	1,08	± 0,05
SiO ₂	S	21,1	± 0,1
Al ₂ O ₃	A	5,11	± 0,05
Fe ₂ O ₃	F	3,31	± 0,05
TiO ₂	-	0,21	± 0,01
MnO	-	0,04	± 0,01
CaO	C	65,5	± 0,2
MgO	M	1,31	± 0,03
SO ₃	S	0,93	± 0,02
K ₂ O	K	1,02	± 0,02
Na ₂ O	N	0,21	± 0,02
P ₂ O ₅	-	0,04	± 0,01
SrO	-	0,08	± 0,01

1.3 Ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux que l'on mélange au ciment Portland et donnent certaines propriétés au béton, grâce à leurs activités hydrauliques et/ou pouzzolaniques. L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du

béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques. Parmi ces ajouts on peut citer :

Les laitiers vitrifiés moulus granulé de haut fourneau

Les cendres volantes

Les additions calcaires

Les fumées de silice

Les pouzzolanes

1.3.1 Laitier des hauts fourneaux

Le laitier vitrifié moulu provient du broyage du laitier vitrifié granulé ou bouleté, qui provient de la fabrication de la fonte et il est obtenu par la trempe du laitier à sa sortie du four. Par contre, les laitiers de fonte non trempés cristallisés et donc non vitrifié sont utilisés comme ballast ou comme granulats et ne peuvent pas être utilisés comme ajouts cimentaire. De même les laitiers d'aciéries et tous les laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des éléments nuisibles aux bétons tels que les sels métalliques sont exclus de l'industrie de ciment.

La norme NF P18-506 [5] distingue deux classes de laitier A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant plus élevée. Les laitiers conformes à la norme NF P 18-506 [5] sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1[6] mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

1.3.2 Cendres volantes

Les cendres volantes sont des poudres fines constituées principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de CO⁻combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO₂ et de Al₂O₃ ; la proportion de SiO₂ réactive constituant au moins 25 % de la masse. Les cendres volantes conformes à la norme NF EN 450 [7] sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1[6], et sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

1.3.3 Additions calcaires

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection. Ils proviennent de gisements de roches calcaires qui peuvent être dolomitiques, massives ou meubles. Les additions calcaires conformes à la norme NF P18-

508 [8] sont du type I selon la norme EN 206-1 [6] et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme.

1.3.4 Fumée de silice

La fumée de silice est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. Elle est entraînée depuis la zone de combustion des fours par les gaz, vers le système de captage. La norme distingue deux classes A et B ; les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe A ou B, conforme à la norme est une addition du type II au sens de la norme EN 206-1 [6] et est substituable au ciment au sens et aux conditions de cette norme.

Toutefois, compte tenu de la très grande finesse de cette addition et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, leur proportion est limitée à 10 % et leur emploi est réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

1.3.5 Pouzzolanes

Le terme pouzzolane tire son nom de Pouzzole, une localité près de Naples en Italie, riche en terre volcanique. La pouzzolane naturelle est une roche siliceuse légère produite par des projections volcaniques basaltiques. Elle comporte de la silice, de l'alumine, de l'oxyde ferrique qui lui donne sa couleur rouge, ainsi que de la chaux et de la magnésie. La pouzzolane possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Il existe également des pouzzolanes artificielles, obtenues par calcination de terres argileuses, de basaltes ou de schistes : leurs propriétés sont équivalentes à celles de la pouzzolane naturelle.

Elle sert comme ajout cimentaire afin de réduire le cout de ciment. Elle est également utilisée pour le jardinage, les constructions, l'assainissement non collectif et les routes. L'application de la pouzzolane dans les jardins peut être multiple : en grosse granulométrie la pouzzolane est utilisée comme roche décorative (paillage) comparable à l'écorce de pin pour limiter l'enherbement, par exemple, dans les massifs d'arbustes ; et en petite granulométrie la pouzzolane sert dans la composition du substrat de certaines cultures comme les bonsaï, l'hydroponie ou pour le lagunage des piscines biologiques. Ce type de roche assure un bon drainage au niveau racinaire. Les bords coupants de la pouzzolane favorisent le développement des racelles. [9]

1.4 Avantages des ajouts minéraux

La recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment portland. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir des avantages économiques écologiques et techniques.

1.4.1 Avantages économiques

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux susceptibles de remplacer le ciment dans le béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et l'utilisateur final et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO₂. Et c'est bien le gaz carbonique qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

1.4.2 Avantages écologiques

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique. De fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO₂ par tonne de LGHF (laitier granulé de haut fourneau) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1 000 Km libère environ 0,022 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment.

1.4.3 Avantages techniques

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux à très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance à la compression, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments composés améliorent la résistance à la fissuration en climat chaud.

1.5 Action des additions minérales

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci, Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment. Cependant plusieurs études récentes, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

- Un effet granulaire résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.
- Un effet physico-chimique et microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.
- un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire (essentiellement présent dans le cas des additions du type II selon la norme EN 206-1[6]), qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physicochimique et microstructural.

1.5.1 Effet granulaire

L'effet granulaire englobent toutes les modifications induites par la présence de particules fines ou ultrafines au sein du squelette solide du mélange cimentaire, ces modifications résultent de la capacité d'empilement des particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange et, d'autre part, de l'intensité des frictions entre les particules de l'addition et les autres grains solides du mélange. Ainsi, l'effet granulaire agit dès le malaxage sur toutes les étapes de la mise en œuvre des matériaux cimentaires avec

additions (le transport, la mise en place et le serrage) et influe sur la densité du squelette granulaire ainsi que sur la capacité d'écoulement et la stabilité des mélanges frais.

Lorsque les particules des additions modifient peu les frictions intergranulaires dans les mélanges cimentaires, l'effet granulaire peut avoir des conséquences favorables dans la mesure où les particules des additions parviennent à remplir les porosités du squelette granulaire (ciment et granulat), et à libérer l'eau habituellement contenue dans les espaces intergranulaires. Cet arrangement favorable optimisé conduit, soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais du moment que la quantité d'eau reste constante (Figure 1.2) [10], soit à la réduction de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance donnée (Figure 1.3) [11]. Dans l'hypothèse où la quantité d'eau est diminuée, la compacité du mélange et ses performances mécaniques sont améliorées.

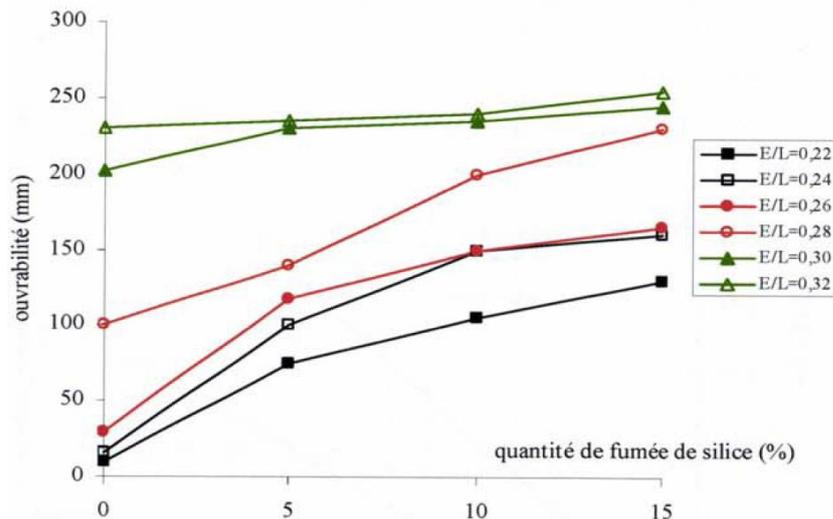


Figure 1.2: Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant selon [10]

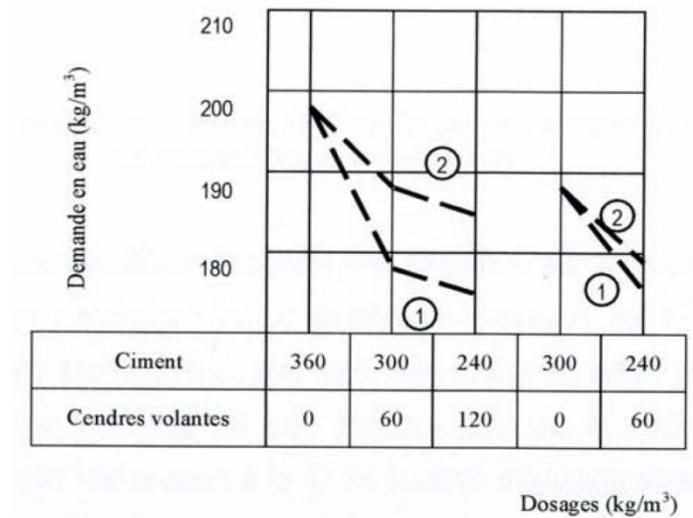


Figure 1.3: Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton selon [11]

Plusieurs études [12, 4, 13, 11, 14] montrent en effet l'existence d'une optimisation des prophètes du squelette granulaire par l'incorporation d'additions minérales de nature et de quantité choisies.

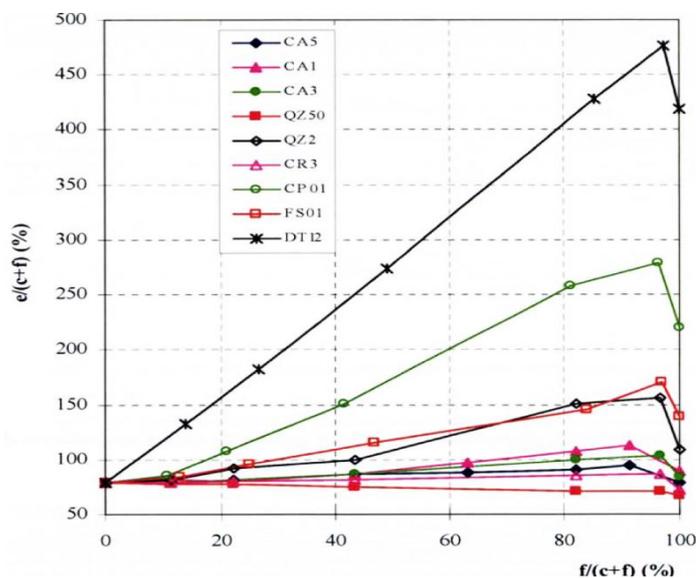


Figure 1.4: Variation du besoin en eau des pâtes CEM II addition à consistance normalisée en fonction de la teneur relative en addition [12]

En revanche, lorsque les particules des additions modifient considérablement les frictions intergranulaires dans les mélanges cimentaires ou ne parviennent pas à remplir les pores du squelette granulaire, l'effet granulaire peut avoir des conséquences défavorables. Kara-Ali [12] montré que dans le cas des additions dont les particules sont de forme

irrégulière, la compacité du squelette granulaire diminue au fur et à mesure de l'introduction des additions. Il a aussi démontré (Figure 1.4) que l'introduction de grandes quantités d'additions dans des pâtes cimentaires à consistance normalisée engendre un besoin en eau significativement plus élevé que celui attendu sur la base du besoin en eau propre du ciment et de l'addition. Le maximum du besoin en eau est atteint aux environs de 85-95% de substitution du ciment quelle que soit l'addition minérale concernée. Par l'analyse de ces différents résultats, on constate que l'effet granulaire des additions, qu'il soit favorable ou défavorable, influe sur le serrage des particules dans le squelette granulaire et, par voie de conséquence, influe sur le processus d'hydratation du ciment ainsi que sur le développement et l'intensité des effets physico-chimique, microstructural et chimique des additions minérales.

1.5.2 Effet physico-chimique et microstructural

L'effet physico-chimique et microstructural concerne les modifications induites par la présence des particules d'additions minérales sur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés. Il n'est plus à démontrer [15, 16, 17, 12], que les additions jouent le rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions d'hydratation du ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire. Pour les additions calcaires, par exemple, il semble que la présence de carbonate de calcium (CaCO_3) favoriserait l'hydratation du C_3S dès les premiers instants et ceci d'autant plus que les particules sont fines et que la quantité de CaCO_3 est grande (jusqu'à 15 à 20%) [18, 19] Quant aux additions siliceuses, les particules de quartz, par exemple, pourraient constituer des sites préférentiels de nucléation en particulier pour la cristallisation des cristaux de portlandite [20]. Ainsi la présence de l'addition provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment, ceci d'autant plus que les particules sont fines [18]. Toutefois, cet effet tend à devenir négligeable après 28 jours. Il en résulte que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

1.5.3 Effet chimique

L'effet chimique concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la

résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et peut se manifester à différents âges en fonction de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et du type de ciment. La réaction pouzzolanique concerne principalement les fumées de silice, les cendres volantes siliceuses (classe F), les pouzzolanes naturelles ou les schistes calcinés. La silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit, en présence d'eau, avec la portlandite formée durant l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H suivant la réaction suivante:



En pratique $x = 1,15$ selon Waller 1999 [21].

Il faut noter que les particules les plus fines du quartz (considéré a priori comme inerte en milieu cimentaire) dont le diamètre est inférieur à 5 μm peuvent également présenter une activité pouzzolanique similaire. Par ailleurs, pour les additions calcaires, la calcite (CaCO_3) réagit avec les aluminates du ciment (C_3A , C_4AH_{13}) en présence d'eau pour former un mono-carboaluminate de calcium hydraté du type $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11 \text{HO}$, cristallisant en fines plaquettes hexagonales [4].

L'activité hydraulique concerne plus particulièrement les laitiers de haut fourneau et les cendres volantes calciques (classe C) qui, en raison du caractère basique du milieu cimentaire, peuvent produire des CSH dont le rapport C / S diffère de celui des CSH issus de la réaction pouzzolanique. Toutefois, certaines additions peuvent présenter un effet chimique défavorable. En effet, il est rapporté que certaines cendres volantes peuvent avoir un effet retardateur de l'ordre d'une ou plusieurs heures sur la prise du ciment, probablement en raison de la libération de sulfates (SO_4) présents à la surface des particules de cendres volantes. Ainsi, seul le début de prise est décalé, l'intervalle de temps entre la prise et le durcissement restant inchangé. Ce retard peut être avantageux dans le cas d'un bétonnage par temps chaud; dans le cas contraire il peut être nécessaire d'utiliser un accélérateur de prise [17]. Il en résulte que l'effet chimique, lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physicochimique et microstructural. Son action sur les propriétés du matériau durci se mesure par la modification du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie empêche toute distinction claire entre ces deux effets. Pour cette raison, ces deux effets peuvent être associés dans une notion unique

plus large qui est celle de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment.

1.6 Propriétés des ciments aux ajouts

1.6.1 Effet sur le ciment frais

1.6.1.1 Temps de prise du ciment

Le temps de prise du ciment avec laitier est généralement supérieure à celui du béton avec du ciment Portland. Le temps de prise augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier comme le montre la Figure 1.5.

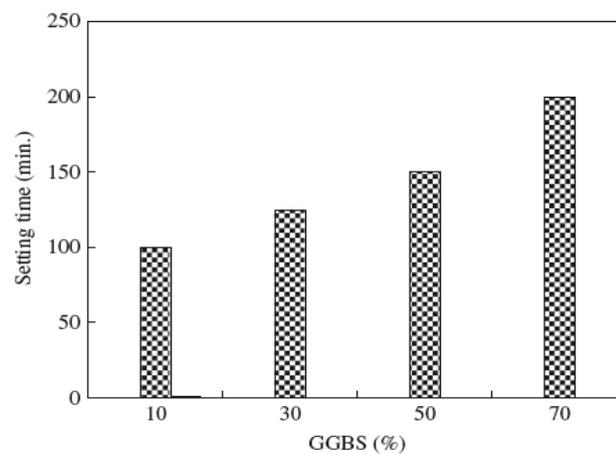


Figure 1.5: Effet de GGBS sur le temps de prise [22]

Wainwright et Ait-Aider [23] ont étudié l'effet du laitier sur le temps de prise et la consistance des ciments. À partir de trois sources différentes de ciment et une % de laitier. Le Tableau 1-2 donne les résultats de temps de prise et la consistance des CPA et des CPJ. Ils ont conclu que: les résultats de consistance et de temps de prise sont presque similaires pour tous les trois sources de ciments; le temps de prise des ciments a été augmenté avec l'augmentation de la teneur en laitier.

Tableau 1-2: Temps de prise et l'uniformité des ciments [23].

Cement type	GGBS (% by wt)	Consistency (%)	Initial setting (min)	Final setting (min)
Source 1	0	31.2	108	182
Source 1	40	29.0	164	224
Source 1	70	26.5	241	318
Source 2	0	30.6	105	171
Source 2	40	28.2	153	219
Source 2	70	26.8	248	322
Source 2	0	30.4	118	169
Source 2	40	30.1	170	213
Source 2	70	27.0	249	310

L'addition d'une pouzzolane naturelle au ciment Portland entraîne un accroissement du temps de prise attribuable en partie à l'effet de dilution (c'est-à-dire la dilution de l'ingrédient le plus actif, soit le ciment Portland) et en partie à l'augmentation de la teneur en eau nécessaire pour préparer une pâte d'une consistance normale. Ainsi, Nicolaldis[24] déclare que les temps de début et de fin de prise d'un ciment Portland mélange renfermant 20 % de terre de Santorin ont augmenté de vingt minutes, en comparaison des temps de prise d'un ciment Portland pur. Les teneurs en eau nécessaires pour préparer une pâte d'une consistance normale s'élevaient respectivement à 24,5 et 26,5 % pour 10 ciments Portland et pour le ciment Portland mélange.

Il semble qu'il y ait consensus dans la documentation publiée sur le sujet quant au fait que les cendres volantes à faible teneur en calcium présentent une certaine tendance à retarder la prise du ciment. Les données obtenues cours d'expériences effectuées au CANMET [23] démontrent que dix des onze cendres volantes soumises à l'étude avaient pour effet de faire augmenter de façon considérable le temps de début de prise et de fin de prise. Des cendres volantes ayant une teneur en CaO se situant entre 1,4 et 13 % ont été employées pour mener ces expériences.

Lane et Best [24] déclarent qu'en général, les cendres volantes retardent la prise du béton. Ils en arrivent à la conclusion que le retardement observé peut varier suivant la proportion, la finesse et la composition chimique des cendres; on considère cependant que la finesse du ciment, la teneur en eau de la pâte et la température ambiante ont un effet beaucoup plus grand sur l'importance de ce retardement.

Il ressort des études effectuées par Davis et ses collaborateurs [25] que les mélanges de cendres volantes-ciment prennent plus lentement que les ciments comparables

condres volantes, mais que les temps de prise se situent dans les limites courantes prescrites.

Maage [26] a mesuré les temps de prise de pâtes de ciment renfermant 0 et 10 % de FSC. On a ajouté à toutes les pâtes, sauf à la pâte témoin, 0,4 % de lignosulfonate sec par unité de poids de ciment. La prise de toutes les pâtes renfermant cet adjuvant fut plus lent que celle de la pâte témoin. Cependant, l'effet de ralentissement du lignosulfonate était considérablement réduit dans les pâtes renfermant des FSC que dans les pâtes de ciment pures. Cette constatation montre, tout comme à l'expérience pratique, que le béton aux FSC peut tolérer une teneur en lignosulfonate plus élevée que le béton normal sans trop ralentir la prise. Les données de calorimétrie isothermique sur les pâtes avec ou sans FSC ou lignosulfonate [27] confirment cette constatation.

La mesure de la pénétration des mortiers constitue un essai plus significatif que l'essai Vicat. Bellander [28] a relevé une tendance au ralentissement de la prise à mesure que l'on augmente la quantité de FSC dans des bétons de résistance égale.

1.6.1.2 Ouvrabilité

Wainwright et Rey [29] rapportent l'influence de l'addition du laitier sur l'affaissement du béton. Quatre sources différentes de laitier (S1 à S4) pour un béton composé de proportion de ciment: eau: sable: gravier de 1 :0.56 :2.5 :3.6. Les proportions du mélange et les résultats d'affaissement sont donnés au Tableau 1-3.

Tableau 1-3: proportions du mélange et l'ouvrabilité [29]

Mix	Mix proportions (kg/m ³)					Water/binder	Slump (mm)	
	OPC	GGBS	Fines	Coarse	Water			
OPC	300	–	750	1080	168	0.56	15	
55% GGBS	Source 1	135	165	750	1080	168	0.56	30
	Source 2	135	165	750	1080	168	0.56	20
	Source 3	135	165	750	1080	168	0.56	25
	Source 4	135	165	750	1080	168	0.56	45
85% GGBS	Source 1	45	255	750	1080	168	0.56	30
	Source 2	45	255	750	1080	168	0.56	40
	Source 3	45	255	750	1080	168	0.56	25
	Source 4	45	255	750	1080	168	0.56	20

Wan et al. [30] ont conclu que la maniabilité du mortier augmente avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier. Quatre échantillons (A, B, C et D) de

laitier ont été utilisés. L'influence de laitier sur la fluidité du mortier est montrée dans le Tableau 1-4. La fluidité de l'échantillon B et D a été bien meilleure que celle de l'échantillon A. La fluidité du mortier a été associée à des caractéristiques morphologiques des particules de laitier ; plus la surface des particules est lisse, plus la fluidité du mortier est meilleure.

Tableau 1-4: Les résultats des tests de la fluidité pour la surface et de tailles de différentes particules de GGBS [30]

Sample	Surface area (m ² /kg)	Average diameter (μm)	Fluidity ratio (%)
Sample A	510	13.69	1.02
Sample B	685	9.12	1.06
Sample C	515	11.72	1.03
Sample D	512	13.15	1.06

1.6.1.3 Retrait plastique

Le retrait des produits renfermant des mélanges de ciment Portland avec pouzzolane est généralement supérieur à celui du produit correspondant ne contenant que du ciment Portland. Cet écart est prévisible, car le retrait d'une pâte hydratée est d'ordinaire attribuable à la teneur en CSH, laquelle serait relativement plus élevée dans le cas des mélanges de ciment Portland avec pouzzolane. De nombreux chercheurs ont toutefois noté que la propension à la fissuration provoquée par le retrait dans les bétons renfermant une pouzzolane est moindre que dans les bétons correspondants sans pouzzolane.

Il existe probablement deux explications qui démontrent pourquoi l'incidence de la fissuration attribuable au retrait dans les produits de ciment Portland avec pouzzolane n'est pas aussi élevée que prévue. En premier lieu, l'effet de contrainte du granulat sur le retrait de la pâte dans le mortier ou le béton contribue dans une plus grande mesure à la détermination de l'ampleur globale du retrait. Dans le cadre d'un essai portant sur le retrait à 90 jours dans des prismes de mortier, Massazza et Costa [31] ont découvert que le retrait du ciment renfermant une pouzzolane Italienne s'élevait à peine à 943 μm, en comparaison de 890 μm pour le ciment Portland ordinaire. Au cours d'une autre étude portant sur des prismes de béton et une période de séchage de 80 semaines [32],

Il est probable que la seconde explication de la diminution relative de la fissuration dans les produits contenant un mélange de ciment Portland avec pouzzolane réside dans la zone de transition plus forte entre le granulat et la pâte, par comparaison avec un béton correspondant (qui présente un rapport eau-ciment similaire) sans pouzzolane. Pour un

rapport eau/liant déterminé, les résistances à la flexion et à la traction d'un béton renfermant un mélange de ciment Portland-pouzzolane

Le retrait plastique et la fissuration se produisent quand l'évaporation d'une surface de béton frais excède le taux de ressuyage de l'eau du béton. Le fait que le ressuyage peut être pratiquement éliminé du béton aux FSC rend celui-ci vulnérable à la fissuration. Johansen [33] a mené une étude systématique de la fissuration due au retrait plastique. Il est arrivé à la conclusion que le moment critique survient juste lors de la prise du béton. Ce problème peut être résolu par l'application d'une méthode de cure appropriée à la surface du béton. L'expérience pratique démontre que dans des conditions d'évaporation rapide (vent et ensoleillement), des mesures de cure doivent être prises immédiatement après la mise en œuvre du béton.

Malhorta et Carette [34] ont mesuré, jusqu'à 100 jours, le retrait du béton laitier-ciment renfermant des FSC. Ils n'ont observé qu'une différence négligeable par rapport au béton témoin.

Wolsiefer [35] s'est également penché sur le retrait du béton aux FSC à résistance élevée (supérieure à 100 MPa). Les échantillons soumis à une cure en atmosphère humide de 14 jours avant d'être exposés à l'air ont subi un retrait inférieur à celui du béton témoin, tandis que le béton aux FSC exposé à l'air après un jour Subis, sait un plus grand retrait.

1.6.1.4 Ressuyage

Le Ressuyage est le terme utilisé pour décrire le mouvement de l'eau à la surface du béton. Le ressuyage se terminera lorsque la circulation de l'eau est bloquée par la croissance de la quantité de C-S-H des produits d'hydratation. Le ressuyage résulte par une variation de la teneur en eau efficace tout au long de l'élément en béton qui produit des changements dans les propriétés du béton.

Wainwright et Ait-Aider [36] ont examiné l'influence de la composition de CPJ et l'ajout du laitier jusqu'à 70% sur les caractéristiques de ressuyage du béton. Cinq séries de mélanges de béton ont été faites avec des teneurs en ciment de 200 kg/m^3 à 400 kg/m^3 et des taux de remplacement de laitier de 40% et 70%. L'eau de ressuyage a été tirée à des intervalles de 10 minutes pendant les 40 premières minutes et à des intervalles de 30 minutes par la suite jusqu'à l'arrêt de ressuyage. Ils ont conclu que le remplacement partiel des CPJ avec 40% et 70% de laitier conduit à une augmentation de ressuyage du béton, ces augmentations sont plus remarquable au taux de remplacement plus élevés.

Olorunsogo [37] ont étudié l'effet de la distribution granulométrique du laitier sur le taux de ressuyage et de la capacité de ressuyage de mortiers contenant 30% et 70% de laitier. L'eau accumulée sur la surface de mélanges de mortier a été recueillie à des intervalles allant de 10 minutes durant les 40 premières minutes et des intervalles de 30 minutes par la suite. Ils ont conclu que pour le même rapport E/C, le taux de ressuyage augmente de façon significative avec l'augmentation de la quantité du laitier, sauf pour le mélange de mortier ayant 30%, de laitier qui avait la plus faible capacité de ressuyage à E/C=0,45.

Wainwright et Rey [29] ont étudié l'influence du laitier sur le ressuyage du béton avec quatre sources différentes (S1-S4). Un mélange de base avec une teneur en ciment nominale de 300 kg/m³ a été utilisé avec un rapport E/C de 0,56 et un taux de remplacement de laitier de 55 et 85% en poids de ciment ont été utilisés. Des tests de ressuyage ont été effectués conformément à la norme ASTM C 232 [38]. La capacité et les taux de ressuyage obtenus sont présentés dans le Tableau 1-5. Ils ont conclu que: (i) plus de 55% de laitier fait augmenter la capacité de ressuyage de 30% par rapport au ciment sans laitier, mais a peu d'effet sur le taux de ressuyage; (ii) l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à 85% n'a aucun effet significatif sur le ressuyage; (iii) la source de laitier a également peu d'effet sur le ressuyage, et (iv) de retarder le début des essais de ressuyage de 30 à 120 min réduit la capacité de ressuyage de CPJ de plus de 55% par rapport à 32% pour les mélanges de laitier.

Tableau 1-5: Influence de l'heure de début de test sur la capacité et le taux de ressuyage [29]

	Bleed capacity (ml/ml)			Bleed rate (ml/cm ² /s) × 10 ⁻⁶		
	30 min	75 min	120 min	30 min	75 min	120 min
OPC	8	8.1 [1.3%]	7.9 [1.3%]	17.8	10.5 [41%]	9.0 [49%]
55% GGBS	10.7	7.7 [28%]	6.7 [36%]	18.5	11.5 [38%]	9.8 [47%]
85% GGBS	11.1	4.2 [62%]	3.5 [68%]	16.5	14.5 [12%]	10.5 [36%]

Remarque: Les valeurs entre parenthèses représentent le changement % pour 30 minutes.

De nombreux chercheurs ont noté une diminution considérable du taux de ressuyage dans le cas des ciments Portland avec pouzzolane. Par exemple, en se servant de la méthode C 243-55 de l'ASTM, Nicolaldis [39] a observé des taux de ressuyage se situant respectivement à 127 × 10⁻⁶ et 84 × 10⁻⁶ cm³/cm² par seconde pour le ciment Portland et pour le ciment Portland avec pouzzolane. Par ailleurs, Davis et Klein [40] ont observé une

diminution plus marquée encore lorsqu'ils ont utilisé dans un mélange de béton maigre de la diatomite finement broyée provenant de Lompoc, en Californie. Après une heure, le ressuage dans le béton servant de point de référence (sans diatomite) s'élevait à 22 % de toute l'eau présente. En remplaçant le ciment à 11 % de son poids par la diatomite, l'eau de ressuage ne représentait que 2 % de la quantité totale d'eau.

La diminution du ressuage est attribuable en partie à l'interférence produite par les particules de pouzzolane finement pulvérisée vers les canaux capillaires dans un mélange de béton fraîchement tassé et en partie à la microporosité des matériaux pouzzolaniques. On croit maintenant que la limitation du ressuage interne du béton joue un rôle important. Lorsqu'il s'agit de déterminer la résistance de la zone de transition entre granulats et pâte pure et, par conséquent, les propriétés mécaniques du béton [41].

1.6.2 Effet sur le ciment durcis

1.6.2.1 Résistances,

Beaucoup de facteurs influencent l'évolution de la résistance dans le béton aux cendres volantes, les plus importants étant les suivants:

— les propriétés des cendres volantes, la composition chimique, la taille des particules, la réactivité, la température et d'autres Conditions de cure.

Raba et Smith [42] ont étudié les propriétés d'un type de cendres volantes sub-bitumineuses (à 20 % de CaO) rendant ces dernières propres à la fabrication du béton. Ils ont présentes les données obtenues sur l'augmentation de la résistance à la compression attribuable à la présence de cendres volantes à teneur élevée en calcium. Il y a lieu de noter que la méthode de dosage des mélanges utilisée a fait intervenir le remplacement d'un certain volume de granulats fins, la masse de ciment et de granulats grossiers ayant été gardée constante pour chaque série de mesures.

Après avoir étudié 36 mélanges de béton, dont la plupart contenaient des cendres volantes de propriétés très variées, Crow et Dunstan [43] conclure que l'activité pouzzolanique a pu être associée dans une certaine mesure à la finesse des cendres; ainsi, les cendres plus fines ont réagi plus facilement avec le ciment port-land. La finesse a semblé jouer un plus grand rôle dans la réaction des cendres à faible teneur en calcium que dans celle des cendres à teneur élevée en calcium.

Bien que l'effet pouzzolanique commence à se manifester dans une pâte de ciment Portland avec pouzzolane dès la libération des alcalis et des ions de calcium au cours de l'hydratation du ciment Portland, la plus grande partie de cet effet et, par conséquent, de l'évolution de la résistance qui y est associée semble se produire après sept jours d'hydrations. La Figure 1.6 et la Figure 1.7 illustrent les résultats typiques d'une recherche portant sur l'effet du temps de durcissement sur la résistance à la compression des mortiers de l'ASTM C 109 de ciments Portland avec 10, 20 ou 30 % de pouzzolane de terre de Santorin.

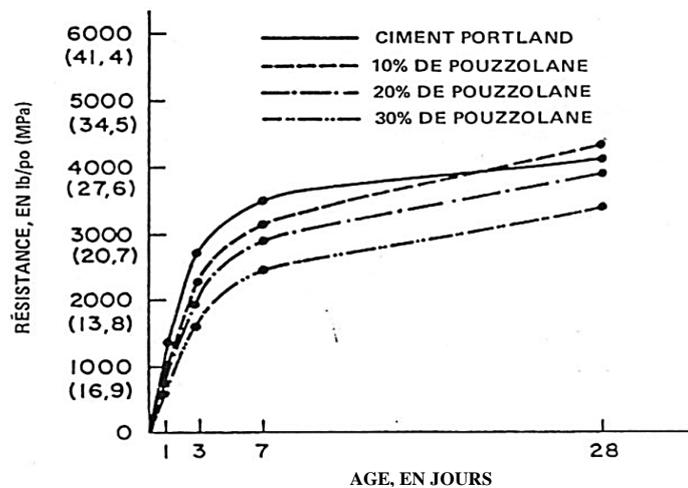


Figure 1.6: Résistance à la compression jusqu'à 28 jours pour des ciments renfermant de la terre de Santorin [32]

Selon les données relatives à la résistance à la compression à 1, 3, 7 et 28 jours, il apparaît évident que la résistance jusqu'à sept jours se révélait à peu près proportionnelle à la quantité de ciment Portland présent dans le ciment mélangé, ce qui démontre que la mise en œuvre de l'effet pouzzolanique n'était alors pas assez avancée pour influencer sur la résistance. Toutefois, à 28 jours, la résistance du ciment renfermant 10 % de pouzzolane était légèrement plus élevée que celle du ciment Portland servant de point de référence; quant aux ciments contenant 20 et 30 % de pouzzolane, leurs résistances respectives étaient de 7 et 18 % plus faibles que la résistance du ciment témoin. Sur la foi des données présentées à la Figure 1.6, on en est arrivé à la conclusion que l'incidence bénéfique produite sur la résistance par la mise en œuvre de l'effet pouzzolanique au cours de la période se situant entre le 7 et le 28 jour d'hydrations ne se révélait pas considérable.

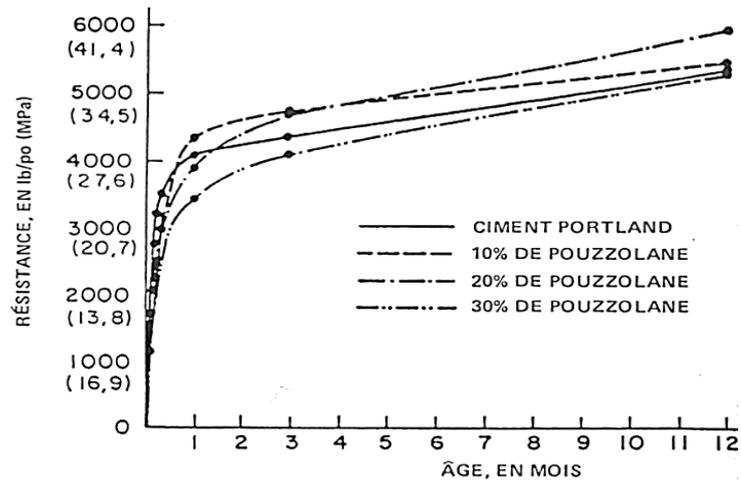


Figure 1.7: Résistance à la compression jusqu'à 12 mois pour des ciments renfermant de la terre de Santorin [32]

Les données présentées à la Figure 1.7 en regard des périodes de 28 jours, de 90 jours et d'un an démontrent que les ciments renfermant 10 et 20 % de terre de Santorin présentaient à 90 jours une résistance supérieure d'environ 10 % à celle du ciment témoin.

La résistance du ciment contenant 30 % de pouzzolane était comparable à celle du ciment Portland servant de point de référence, tandis que les deux, autres ciments à la pouzzolane affichaient une résistance supérieure à celle du ciment témoin.

La Figure 1.8 illustre des résultats semblables sur l'effet obtenu par Massazza et Costa [31] par suite du remplacement de ciment Portland par une pouzzolane naturelle italienne. Ces auteurs confirment la lenteur de la réaction qui se produit entre la chaux et la pouzzolane et ils en arrivent à la conclusion que les ciments à la pouzzolane présentent au début une résistance moindre que celle du ciment Portland servant de point de référence; toutefois, la résistance finale peut se révéler supérieure, selon la qualité et la quantité de pouzzolane utilisée. Il semble qu'on devrait éviter d'utiliser dans le ciment mélangé trop de pouzzolane.

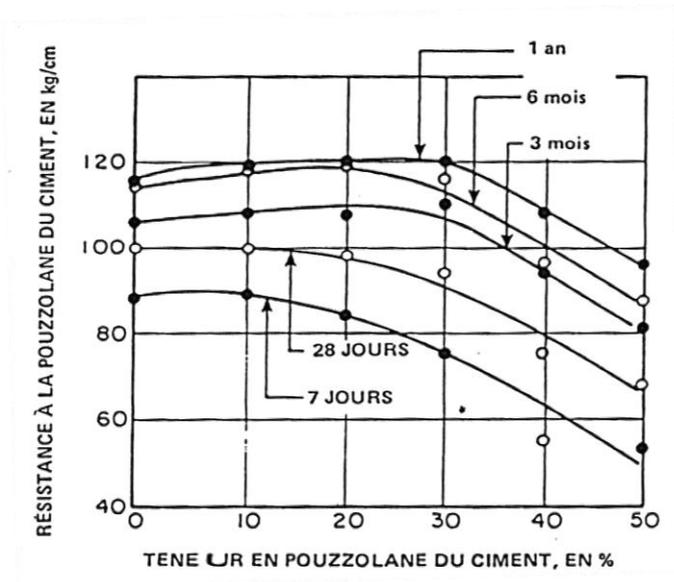


Figure 1.8: Effet du remplacement de ciment Portland par une pouzzolane naturelle Italienne sur la résistance à la compression d'un mortier ISO [31]

1.6.2.2 Chaleur d'hydratation

En utilisant une pouzzolane naturelle d'Italie, Massazza et Costa [31] ont démontré que l'addition d'une pouzzolane dans un ciment Portland entraînait une nette diminution de la chaleur d'hydratation (voir la Figure 1.9). Toutefois, cette réduction ne se révélait pas directement proportionnelle à la quantité de ciment remplacé. De fait, cette réduction était moindre en raison d'une certaine évolution de la chaleur observée au cours de la mise en œuvre de l'effet pouzzolanique. Par exemple, lorsque la proportion de ciment remplacé équivalait à 20 %, la chaleur d'hydratation du ciment Portland à 90 jours régressait de 94 à 85 cal/g et à 28 jours, de 85 à 76 cal/g. De même, en remplaçant 20 % du ciment Portland grec par la terre de Santorin, Nicolaidis [39] a observé une baisse de 9 cal/g au titre de la chaleur d'hydratation à 7 jours.

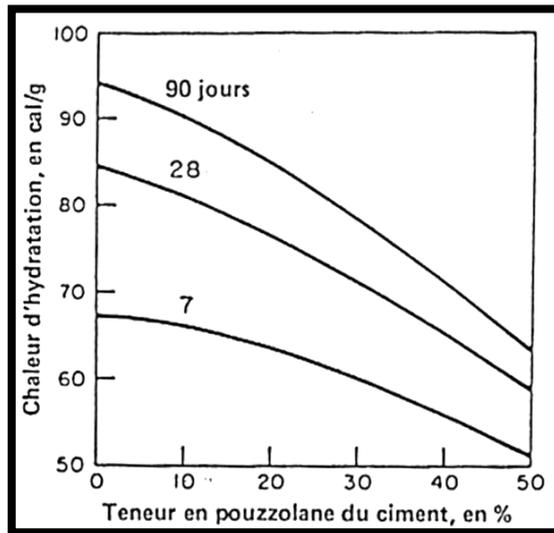


Figure 1.9: Effet de l'emploi d'une pouzzolane naturelle Italienne sur la chaleur d'hydratation du ciment [31].

L'hydratation ou la prise de la pâte de ciment portland s'accompagne d'un dégagement de chaleur qui provoque une élévation de température dans le béton. Le remplacement du ciment par des cendres volantes ralentit l'élévation de température dans le béton frais. Ce phénomène joue un rôle majeur dans le béton de masse, dans lequel le refroidissement, s'il s'effectue à la suite d'une forte élévation de température, peut entraîner une fissuration du béton. La construction d'un barrage-poids donna lieu à la première utilisation d'importance des cendres volantes dans le béton, où elles furent employées principalement pour limiter l'élévation de température [44].

Compton et MacInnis [45] ont établi les courbes température-temps illustrées à la Figure 1.10 pour deux bétons d'essai, dont un avait été préparé en remplaçant 30 % du ciment par des cendres volantes de l'Est du Canada.

On estime que la contribution des cendres volantes au dégagement de chaleur aux premiers âges représentait entre 15 et 30 % de celle d'une masse équivalente de ciment portland [46].

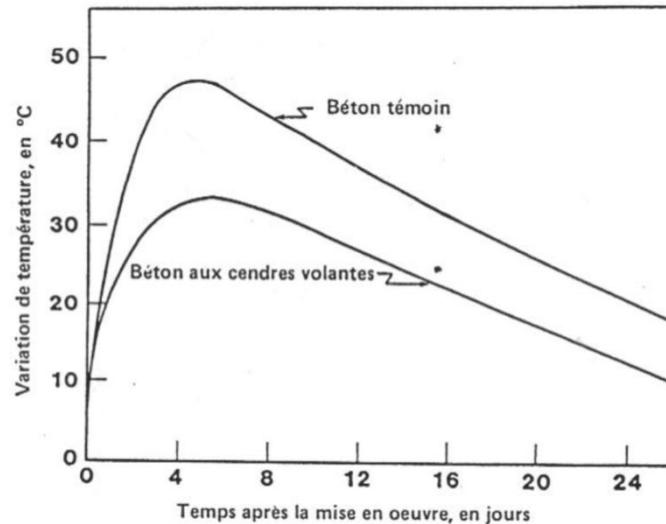


Figure 1.10: Courbes d'élévation de température pour des bétons d'essais aux cendres volantes et ordinaire [45]

Meland [27] démontré que la chaleur totale après deux jours était réduite quand on remplaçant le ciment par des FSC dans une proportion de 1 :1. Cependant, au cours d'un si court période, la réaction pouzzolanique est à peine amorcée.

1.6.2.3 Fluage,

Les données disponibles sur le fluage du béton aux cendres volantes sont limitées.

Parmi des études plus récentes, celles de Ghosh et Tlmusk [47] ont porté sur des cendres volantes bitumineuses de teneurs en carbone et de finesses différentes, incorporées à des bétons de résistance nominale de 20, 35 et 55 MPa (à des rapports eau-ciment de 1, 0,4 et 0,2 respectivement). Les bétons ont tous été dosés pour posséder une résistance équivalente à 28 jours. On a pu constater que, pour la majorité des échantillons, les bétons aux cendres volantes ont présenté Un fluage moins important que les bétons témoins. Ce phénomène a été attribué à une augmentation de la résistance après le chargement relativement plus considérable pour les bétons aux cendres volantes que pour les bétons témoins.

Gifford et Ward [48] Ont fait une étude sur le béton maigre de masse et en sont venus à la conclusion que les cendres volantes font diminuer le fluage en raison d'un certain nombre de facteurs, dont les suivants

- les cendres volantes font augmenter le module d'élasticité;
- elles contribuent au volume total des granulats et réduisent le volume de pâte soumis au fluage.

Buil et Acker [49] ont mesuré le fluage d'un béton témoin ($W/C = 0,44$, 53 MPa) et celui d'un béton renfermant 33 % de FSC [$W/(C + S) = 0,40$, 76 MPa] au séchage à l'air libre et dans un environnement étanche. Cependant, il semble que l'étanchéité n'ait pas été très efficace, car des étanches non sollicités ont également subi une déformation considérable. Les échantillons étanches des deux types de béton ont subi un fluage comparable, tandis qu'à l'air libre, le béton aux FSC a subi une déformation due au fluage moindre que celle qu'a subi le béton témoin.

Wolsiefer [35] a mesuré le fluage du béton aux FSC. Les échantillons de bétons à résistance élevée ont été soumis à des sollicitations à 12 heures et à 28 jours. Wolsiefer signale que jusqu'à quatre mois, les bétons aux FSC ont subi un fluage moindre que celui qu'a subi le béton normal à résistance élevée.

1.6.3 Effet sur la durabilité du ciment

1.6.3.1 Résistance aux sulfates

L'attaque du béton par les sulfates entraîne d'ordinaire l'expansion, la fissuration et la perte de la résistance mécanique attribuables à la formation d'ettringite et de gypse. Ces minéraux se forment par suite d'une interaction entre une eau sulfatée et des produits d'hydratation du ciment, tels le monosulfate hydraté (C_4ASH_{18}) et l'hydroxyde de calcium (CH). L'eau de mer et les eaux souterraines provenant de sols alcalins constituent les plus fréquentes sources de sulfate dans les eaux naturelles.

Il est notoire que l'utilisation de pouzzolanes naturelles, sous forme mélanges liants chaux-pouzzolane ou de ciment Portland avec pouzzolane favorise la durabilité du béton exposé à l'eau sulfatée. Cette durabilité est attribuable au fait non seulement que l'effet pouzzolanique réduit la perméabilité du béton, mais aussi qu'il entraîne la formation de produits résistant aux sulfates (c'est-à-dire moins d'hydroxyde de calcium dans la pâte hydratée et du CSH présentant un plus faible rapport de CaO à SiO_2). Les résultats obtenus par suite de maintes recherches effectuées en laboratoire, y compris ceux dont il est traité ci-après, semblent confirmer que l'addition d'une pouzzolane naturelle améliore la résistance du ciment Portland aux sulfates.

Massazza et Costa [31] ont décrit l'effet produit par le remplacement de ciment Portland par 10, 30 et 40 % d'une pouzzolane naturelle italienne sur l'expansion de prismes de mortier 1:3. Ils ont noté une réduction considérable de l'expansion des mortiers dans lesquels 30 ou 40 % du ciment avait été remplacé par la pouzzolane. Selon ces

auteurs, ces résultats sont attribuables à la réduction de la teneur en hydroxyde de calcium et à une plus grande imperméabilité.

Le premier rapport sur les FSC dans le béton, publié en 1952 [50], contient des données sur la résistance aux sulfates de bétons conservés dans une solution de sulfate de sodium à 10 %. Bernhardt a observé que la résistance aux sulfates augmentait lorsque le ciment était remplacé par des FSC dans une proportion variant entre 10 et 15 %. Il a toutefois souligné que la brièveté des essais ne permettait pas d'en tirer de conclusions définitives.

1.6.3.2 Résistance à l'expansion alcali-silice

Quel que soit le mécanisme suivant lequel l'expansion liée à la réaction alcali-silice est limitée par l'incorporation d'une pouzzolane dans le béton, de nombreux chercheurs ont observé que les pouzzolanes naturelles fournissent à cette fin un meilleur rendement que les matériaux pouzzolaniques dérivés de sous-produits. Ainsi, Pepper et Mather [51] ont découvert que le pourcentage en volume solide de pouzzolane nécessaire à titre de produit de remplacement du ciment Portland pour obtenir une réduction appropriée de l'expansion se situait à 20 % pour la diatomite, entre 20 et 30 % pour le schiste argileux calciné et entre 40 et 50 % pour les cendres volantes.

1.6.3.3 Corrosion de l'armature

Le processus de corrosion des armatures d'acier placées dans le béton peut se diviser en deux étapes : la prise et la propagation. L'acier contenu dans le béton est d'ordinaire passif et le pH élevé de l'eau interstitielle permet d'empêcher la corrosion. La pellicule d'oxyde de fer passive qui protège normalement l'acier est détruit lorsque la valeur du pH tombe au-dessous de 10 ou 11, ou lorsque les ions de chlorure atteignent la surface de l'acier, même en présence d'un pH plus élevé.

Le taux de corrosion après la destruction de la pellicule d'oxyde de fer est fonction de l'humidité et de l'oxygène, ainsi que de la résistivité électrique du béton.

CHAPITRE II:

Concept du liant équivalent et
coefficient d'efficacité.

2.1 Introduction

L'analyse de l'évolution des résistances du ciment aux ajouts minéraux a vu d'énormes efforts dans le domaine de la recherche, où leur prédiction constitue une préoccupation majeure par l'introduction de nouveaux coefficients dans les modèles proposés. Il existe différents types de coefficients et d'indices, utilisés par les normes, qui définissent l'activité des ajouts se substituant au ciment. Ce travail tente à étudier un coefficient, appelé coefficient d'efficacité, caractérisant la contribution de l'addition minérale dans le développement des résistances mécaniques et l'amélioration de sa durabilité. Il vise à caractériser certaines additions minérales par leurs contributions dans le développement des résistances mécaniques, et à déduire par la suite leurs coefficients d'efficacité à partir de modèles classiques de prédiction. Ce coefficient d'efficacité sera déterminé selon le modèle de Bolomey et de Féret et d'autres en remplaçant la quantité de ciment par un liant équivalent ayant la même résistance mécanique. L'objectif principal sera de déduire des modèles propres caractérisant chaque addition minérale selon l'âge et le taux utilisé.

2.2 Concept du liant équivalent

Le liant est l'association dans la formulation du béton, d'un ciment et d'une addition minérale qui répondent chacun à des normes précises. Ce liant obtenu est souvent comparé au ciment pour illustrer la variation des propriétés du ciment lorsqu'il est substitué.

Le liant équivalent est constitué de ciment et d'une addition minérale NF EN 206-1 [6]. Pour tenir compte des apports respectifs des constituants vis-à-vis des résistances mécaniques ou de la durabilité, la quantité de liant équivalent (L_{eq}) est définie par :

$L_{eq} = C + k_e A$, avec C et A les quantités de ciment et d'addition et k_e est un coefficient sans dimension représentant l'efficacité de l'addition minérale utilisée par rapport au ciment.

2.2.1 Calcul du coefficient d'efficacité

Le calcul d'un coefficient d'efficacité peut être effectué de différentes façons :

2.2.1.1 Approche expérimentale

Cette approche est utilisée par plusieurs auteurs [52; 53; 54], et consiste globalement à déterminer expérimentalement (sur le mortier ou le béton contenant l'addition) le rapport $(E/C)_{eq}$ permettant d'obtenir la même résistance mécanique que la

référence sans addition. Connaissant les quantités de matériaux utilisées, il suffit alors de calculer la valeur du coefficient d'efficacité. Certaines variantes sont possibles pour tenir compte de la demande en eau du mélange tel que le coefficient d'efficacité à maniabilité constante [54].

2.2.1.2 Approche rationnelle

Cette approche utilise une loi empirique exprimant la résistance du béton (ou mortier) en fonction du rapport E/C_0 , où, C_0 est la masse de ciment dans l'éprouvette de référence sans addition [55; 56; 57]. A partir des relations telles que celles développées par Bolomey ou Abrams, il suffit de remplacer la quantité de ciment par la quantité de liant équivalent

$$L_{eq} = C + kA.$$

2.2.2 Différent modèles du coefficient d'efficacité des ajouts

A partir des résistances des mortiers composés avec différentes type d'ajouts et en utilisant plusieurs formules (Féret, Bolomey, Abrams), avec l'introduction du concept du liant équivalent, on peut définir un coefficient d'efficacité des ajouts décrivant leurs contributions dans le développement des résistances mécaniques. Ainsi, ce coefficient d'efficacité, déduit, caractérise mieux les ajouts et peut permettre de prédire la résistance d'un mélange avec ajout a un âge et un taux de substitution donnés à partir d'un mélange de référence confectionne sans ajout. Ce coefficient peut être identifié selon la composition du mélange telle que l'âge, le taux de substitution et la finesse des ajouts.

Les valeurs du coefficient k indiquent d'une façon explicite, comme c'est représenté sur la Figure 2.1, l'efficacité de l'addition par rapport au ciment. L'efficacité nulle, représente une addition inerte tandis qu'une addition meilleure que le ciment doit avoir une efficacité supérieure à l'unité.

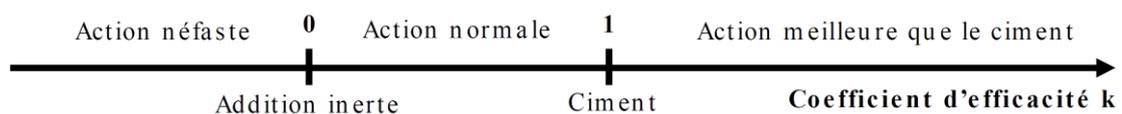


FIGURE 2.1: Action d'une fine minérale comparée au ciment. [58]

2.2.2.1 Modèle de Féret

En 1892, Féret auquel on attribue les premières recherches, a travaillé sur un principe de compacité optimale. Initialement, une compacité est déterminée sur un mélange ternaire de sables puis une matrice cimentaire y est insérée. Cette méthode donne un mortier avec une granularité discontinue sans obtenir le matériau le plus compact à l'état durci. A travers l'équation 2-1, Féret relie une résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique E/C.

$$R_F = K_F \left[\frac{c}{c+e+v} \right]^2 \quad \text{Équation 2-1}$$

Avec : c, e, et v représentent les volumes de ciment, d'eau et de l'air occlus dans le mortier à l'état frais.

K_F : coefficient dépendant du squelette granulaire et de la résistance normale du ciment.

En considérant que le volume d'air est proportionnel au volume d'eau, et en remplaçant les volumes par leurs expressions équivalentes, on trouve.

$$R_0 = \left[\frac{\frac{C_0}{\rho_c}}{\frac{C_0}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + y \frac{E}{\rho_e}} \right]^2 = K_F \left[\frac{1}{1 + \frac{E}{C_0} d_c (1+y)} \right]^2 \quad \text{Équation 2-2}$$

De cette équation, on déduit l'expression de K_F

$$K_F = R_0 \left(1 + \frac{E}{C_0} d_c (1+y) \right)^2 \quad \text{Équation 2-3}$$

Avec :

C_0 et E ; les poids de ciment et d'eau dans le mortier

ρ_e et ρ_c : respectivement les masses volumiques de l'eau et du ciment.

d_c : la densité du ciment.

y : coefficient dépendant de la consistance du béton.

Dans le cas général d'un mortier contenant une proportion d'addition minérale $A = pC_0$, le ciment est remplacé par un liant équivalent composé de cette addition minérale et du ciment. Ainsi la valeur de C_0/ρ_c aura la valeur :

$$\frac{c_0}{\rho_c} = [(1 - p) + k_e p] \frac{c_0}{\rho_c} \quad \text{Équation 2-4}$$

En remplace l'expression de C_0/ρ_c dans l'équation 2-2

$$R(p) = K_F \left[\frac{(1-p) + k_e p}{(1-p) + k_e p + \frac{E}{c_0} d_c (1+y)} \right]^2 \quad \text{Équation 2-5}$$

A partir de l'équation ci-dessus, on détermine l'expression analytique du coefficient d'efficacité, selon le modèle de Féret, comme suit:

$$K_e = 1 - \frac{1}{p} \left[1 + \frac{\sqrt{\frac{R(p)}{K_F} \frac{E}{c_0} d_c (1+y)}}{\sqrt{\frac{R(p)}{K_F} - 1}} \right]^2 \quad \text{Équation 2-6}$$

2.2.2.2 Modèle de Bolomey

La résistance en compression donnée par Bolomey dépend de la forme des granulats ainsi que de la consistance du béton. Elle est établie selon l'équation 2-7, qui représente une variante de la loi de Féret.

$$R_b = K_b \left[\frac{c_0}{E+V} - 0,5 \right] \quad \text{Équation 2-7}$$

Où C_0 , E , V sont les masses de ciment, de l'eau réelle et de l'eau équivalente au volume occupé par l'air. K_b est un coefficient prenant en compte la classe du ciment et de celle des granulats, d'où on peut écrire que:

$$K_b = \frac{R}{\frac{c_0}{E+V} - 0,5} \quad \text{Équation 2-8}$$

En remplaçant la quantité de ciment par l'expression d'un liant équivalent ayant une proportion p d'addition minérale et en prenant la masse d'eau équivalente au volume de l'air proportionnelle à celle de l'eau $V=yE$, on obtient:

$$R(p) = K_b \left[\frac{[(1-p) + k_e p] c_0}{1+y} - 0,5 \right] \quad \text{Équation 2-9}$$

De l'équation ci-dessus, on déduit l'expression de k_e [58]:

$$K_e = \frac{1}{p} \left[\left[\frac{R(p)}{K_b} + 0,5 \right] (1+y) \frac{E}{c_0} - (1-p) \right] \quad \text{Équation 2-10}$$

2.2.2.3 Modèle d'Abrams

Abrams définit empiriquement une méthode dans laquelle le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants pour exprimer les résistances mécaniques d'un mortier ou béton.

$$R_A = \frac{K_1}{K_2 \left(1,5 \frac{E}{C}\right)} \quad \text{Équation 2-11}$$

Avec: K_1 et K_2 sont des constantes empiriques.

En remplaçant la quantité de ciment par l'expression d'un liant équivalent ayant une proportion p d'addition minérale et en prenant la masse d'eau équivalente au volume de l'air proportionnelle à celle de l'eau $V=yE$, on obtient:

$$R = \frac{K_1}{K_2 \left(1,5 \frac{E}{C} \left(\frac{1+y}{1-p+pk}\right)\right)} \quad \text{Équation 2-12}$$

En notant que l'indice d'activité (i) est le rapport des résistances entre le mortier avec $p\%$ d'addition (a) et le mortier témoin (0), il vient :

$$i = \frac{f_{s,p}}{f_{s,c}} = K_2 \left(1,5 \frac{E}{C} \left(1 - \frac{(1+y)}{1-p+pk}\right)\right)$$

De l'équation ci-dessus on déduit l'expression de k_e

$$k_e = \left[\frac{\frac{(1+y)}{\ln(i)} - 1 + p}{1 - \frac{E}{1,5 C \ln(K_2)}} \right] \frac{1}{p} \quad \text{Équation 2-13}$$

2.3 Indices d'activité et coefficients d'efficacité

L'indice d'activité, noté i , est défini comme le rapport entre la résistance en compression $f_p(t)$ du mortier contenant une fraction p d'addition et la résistance du mortier témoin sans addition $f_0(t)$

$$i(p) = \frac{f_p(t)}{f_0(t)} \quad \text{Équation 2-14}$$

Donc, on peut remplacer les résistances du ciment $f_p(t)$ et $f_0(t)$ par leurs formules dans les modèles proposés (Féret, Bolomey, Abrams). Ainsi, on extrait le coefficient d'efficacité en fonction de l'indice d'activité et des paramètres de composition du mélange

tels que le rapport E/Co et dosage en addition p. Le coefficient k est donc implicitement fonction du temps.

2.3.1 Selon le modèle de Féret

D'après l'équation 2-2 de Féret et par l'introduction du Concept du liant équivalent on peut exprimer l'indice d'activité par l'expression suivant :

$$i = \frac{f_{s,p}}{f_{s,c}} = \frac{K_F \left[\frac{1}{1 + \frac{E}{C_0} \left(\frac{1+y}{1-p+k_e p} \right) d_c (1+y)} \right]^2}{K_F \left[\frac{1}{1 + \frac{E}{C_0} d_c (1+y)} \right]^2} \quad \text{Équation 2-15}$$

$$\sqrt{i} = \frac{1 + \frac{E}{C_0} d_c (1+y)}{1 + \frac{E}{C_0} \left(\frac{1+y}{1-p+k_e p} \right) d_c (1+y)} \quad \text{Équation 2-16}$$

On suppose que $y=0$

$$\sqrt{i} = \frac{1 + \frac{E}{C_0} d_c}{1 + \frac{E}{C_0} d_c \left(\frac{1}{1-p+k_e p} \right)} \quad \text{Équation 2-17}$$

$$\frac{1 + \frac{E}{C_0} d_c}{\sqrt{i}} = 1 + \frac{E}{C_0} d_c \left(\frac{1}{1-p+k_e p} \right) \quad \text{Équation 2-18}$$

$$\left(\frac{1}{1-p+k_e p} \right) = \frac{C_0}{E d_c} \left[\frac{1 + \frac{E}{C_0} d_c}{\sqrt{i}} - 1 \right] \quad \text{Équation 2-19}$$

$$1 - p + k_e p = \frac{E d_c}{C_0} \frac{1}{\left[\frac{1 + \frac{E}{C_0} d_c}{\sqrt{i}} - 1 \right]} \quad \text{Équation 2-20}$$

A partir de l'équation ci-dessus, on détermine l'expression analytique du coefficient d'efficacité, comme suit:

$$k_e = \left[\frac{E d_c}{C_0} \frac{1}{\left[\frac{1 + \frac{E}{C_0} d_c}{\sqrt{i}} - 1 \right]} - 1 + p \right] \frac{1}{p} \quad \text{Équation 2-21}$$

2.3.2 Selon le modèle de Bolomey

A partir de l'équation de Bolomey l'équation 2-7 et 2-9 , nous pouvons écrire l'indice d'activité par l'expression suivant :

$$i(p) = \frac{f_p(t)}{f_0(t)} = 1 - \frac{p \cdot (1 - k_e)}{1 - 0.5 \frac{E}{C_0}} \quad \text{Équation 2-22}$$

Le coefficient d'efficacité s'écrit alors :

$$k = 1 - \frac{1-i}{p} \left[1 - 0.5 \frac{E}{C_0} \right] \quad \text{Équation 2-23}$$

2.3.3 Selon le modèle d'Abrams

D'après l'équation d'Abrams (l'équation 2-11), on peut écrire l'indice d'activité par l'expression suivant :

$$i = \frac{f_{s,p}}{f_{s,c}} = K_2^{1,5} \frac{E}{C} \left(1 - \frac{1}{1-p+pk} \right) \quad \text{Équation 2-24}$$

Le coefficient d'efficacité s'écrit alors :

$$k = \left[\frac{1}{1 - \frac{\ln(i)}{1,5 \frac{E}{C} \ln(K_2)}} - 1 + p \right] \frac{1}{p} \quad \text{Équation 2-25}$$

Cry et al [59] caractériser les additions minérales par l'approche rationnelle. Le coefficient K_2 de la relation d'Abrams, nécessaire au calcul du coefficient d'efficacité, est une constante qui dépend principalement des propriétés du ciment utilisé. Pour les ciments Portland courants, Ils sont retenus une valeur de 5, qui s'approche bien de celles qui peuvent être calculés à partir de travaux d'autres auteurs en pratique, les relations de Bolomey ou d'Abrams donnent des résultats comparables (Figure 2.2).

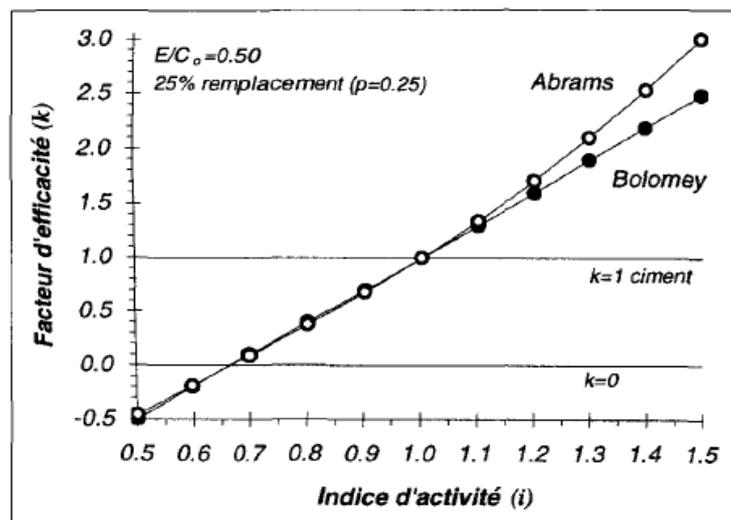


Figure 2.2: Coefficient d'efficacité calculé avec les formules de Bolomey et d'Abram, pour $E/C_0 = 0.50$ et $p = 0.25$ [59].

Coefficient d'efficacité calculé avec les formules de Bolomey et d'Abram, pour $E/C=0.50$ et $p=0.25$

A partir de la relation (2-23), Cyr et al [59] calculer l'incertitude sur le coefficient d'efficacité. Elle dépend à la fois du taux de substitution p et de l'incertitude sur l'indice d'activité i .

L'incertitude sur i peut être estimée à partir des incertitudes sur les résistances du mortier de référence et du mortier avec addition. La Figure 2.3 montre que le coefficient d'efficacité est très sensible à l'incertitude sur l'indice d'activité pour les taux de substitution les plus faibles. Remarquons que le coefficient k n'est pas bien défini quand le taux de substitution tend vers 0.

Par exemple, une incertitude de $\pm 5\%$ sur i conduit à une incertitude de $\pm 75\%$ sur k pour un taux de 5% alors qu'elle est réduite à $\pm 7.5\%$ pour un taux de 50%.

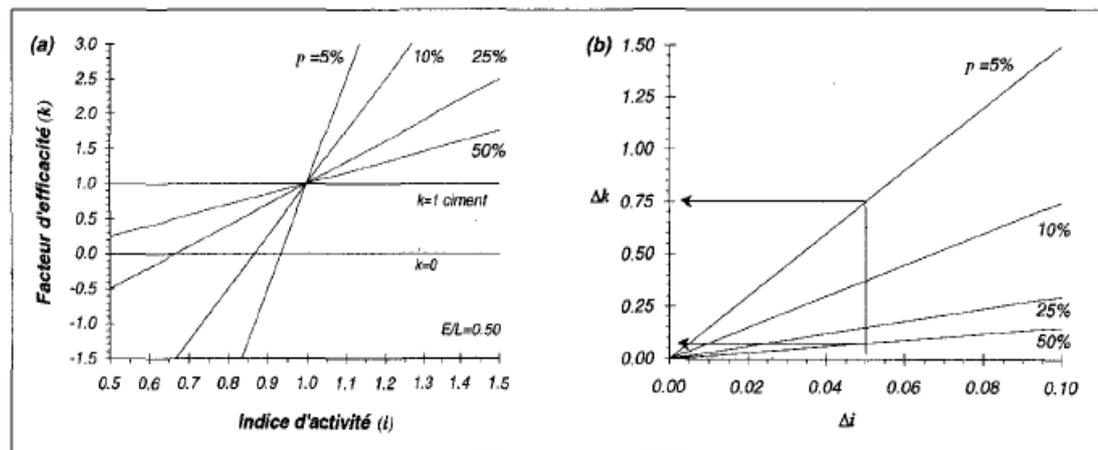


Figure 2.3. (a) Coefficient d'efficacité (Bolomey) en fonction de l'indice d'activité i et du taux de substitution p . (b) Variation du coefficient d'efficacité en fonction de l'indice d'activité i et du taux de substitution p . [59]

2.4 Travaux réalisés sur l'efficacité

Plusieurs études ont été réalisées pour caractériser l'efficacité des ajouts minéraux en se basant directement sur les résultats expérimentaux obtenus, ceci a délaissé un petit peu les indices chimiques et minéralogiques utilisés auparavant. Babu et Prakash [60] évaluent le coefficient d'efficacité de la fumée de silice en se basant sur le principe du E/C équivalent. Cette efficacité a été obtenue à travers les données disponibles dans la littérature et a été évaluée et vérifiée par une étude expérimentale. Ces deux chercheurs présente un schéma de la relation entre la résistance à la compression et de l'eau / Liant illustré sur la Figure 2.4.

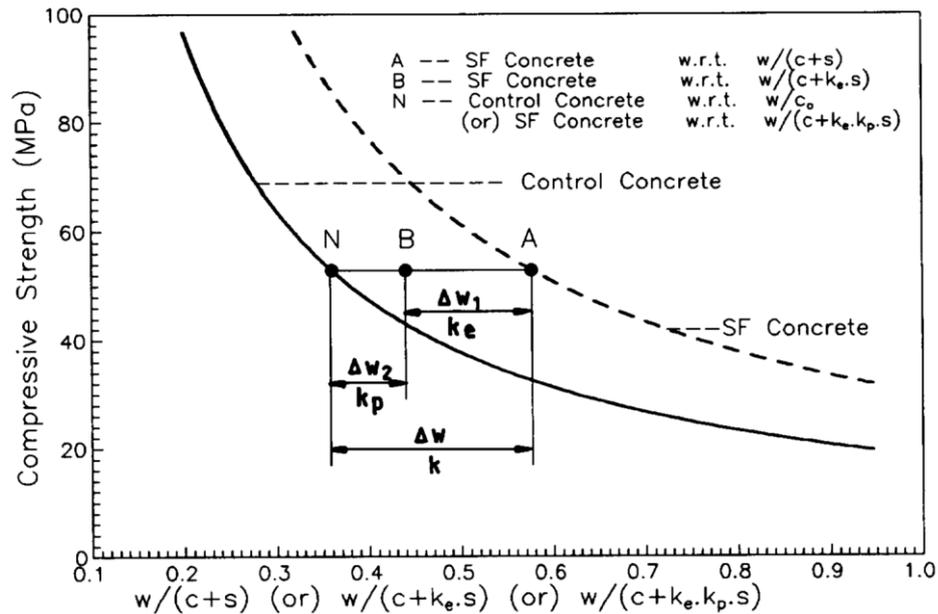


Figure 2.4. Schéma conceptuel montrant l'effet de coefficients d'efficacité. [60]

Le point «A» représente le rapport eau/ciment avec fumée de silice à un certain pourcentage de remplacement d'une résistance typique, tandis que le point «N» représente le rapport eau / ciment du béton de contrôle correspondant à la même résistance.

La méthode tente à trouver le rapport $[w / [c + s]]$ du béton avec fumé de silice à partir celui du béton de contrôle par l'application du coefficient d'efficacité à base de ciment et de la fumée de silice "k".

Pour déplacer le point A vers le point N, on doit soustraire une quantité d'eau Δw_1 correspondant à une efficacité générale et Δw_2 due à une efficacité correspondant au pourcentage de substitution. Ces deux corrections ensemble vont maintenant faire transférer le point "A" vers "N" de sorte que le rapport eau/ciment du béton de contrôle et le rapport de l'eau sur les matériaux cimentaires effectifs $[w / [c + k_e.k_p.s]]$ seront les mêmes pour une résistance donnée et quel que soit le taux de substitution. Finalement, cette méthodologie permet d'évaluer le «facteur de rendement global" $[k = k_e.k_p]$ pour tous les bétons et les taux de substitution. Ce coefficient augmente pour les faibles taux de substitution et diminue lorsque la fumée de silice est abondante. A 28 jours, il prend une valeur de 6.85 pour 5% de fumée de silice et diminue vers 5 et 3.1 pour un taux de substitution de 10 et 20%. Babu et Rao [61] appliquent ce principe sur les cendres volantes et des résultats similaires sont obtenus.

Uyan et al [62] déterminent le coefficient d'efficacité du laitier en se basant sur le principe que deux mortiers ayant la même résistance doivent avoir le même rapport E/C. Pour ce résultat. Ils ont utilisé du ciment ordinaire avec trois types de laitier et trois pourcentages différents 25, 50 et 75 %. En utilisant les résultats du ciment de référence et par l'application du principe mentionné ci-dessus, ils ont obtenu les résultats de la Figure 2.5 et par la suite ils donnent le coefficient d'efficacité par l'équation 2-26.

$$\frac{w}{c} = \frac{w}{c'} \left[\frac{1}{1 + \frac{kS}{c'}} \right]$$

Équation 2-26

Où

k ; est le coefficient d'efficacité,

W ; est la teneur en eau,

C ; est la teneur en ciment

S ; est la teneur en laitier.

Seulement la valeur inconnue de k a été déterminée à partir de l'équation 2-26 Et enfin arrivé pour modéliser ce coefficient, et de proposer un modèle logarithmique dépendant de l'âge et du taux de substitution du laitier, Figure 2.6

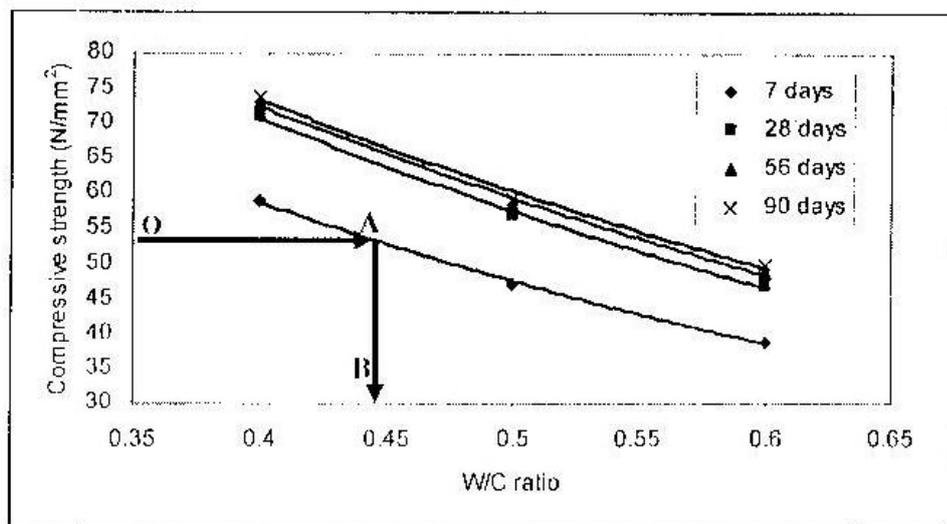


Figure 2.5. Les courbes de référence du rapport E / C et résistance à la compression. [62]

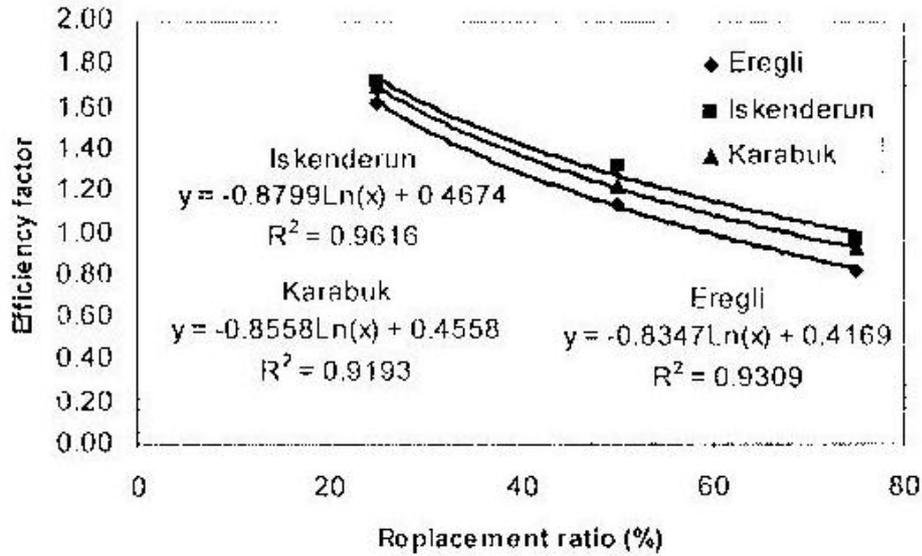


Figure 2.6. Relation entre le coefficient d'efficacité et de taux de remplacement pour 90 jours. [62]

Pekmezci et Akyuz [63] utilisent le modèle de Bolomey et Féret pour déterminer le liant équivalent pour l'obtention d'une efficacité optimale de la pouzzolane naturelle, à partir de 15 mélanges de béton produits en trois séries avec mélanges de contrôle ayant 300, 350 et 400 kg de ciment. Ces mélanges de contrôle ont été modifiés pour avoir une combinaison de 250, 300 et 350 kg de ciment correspond chacune à 40, 50, 75 et 100 kg de pouzzolane pour 1 m³ de béton. L'efficacité de la pouzzolane a été obtenue par le modèle de Bolomey et Feret sur les bétons âgés de 28 jours. Cet optimum est représenté par une parabole reliant le liant équivalent avec le taux de substitution comme le montre les Figure 2.7 et Figure 2.8.

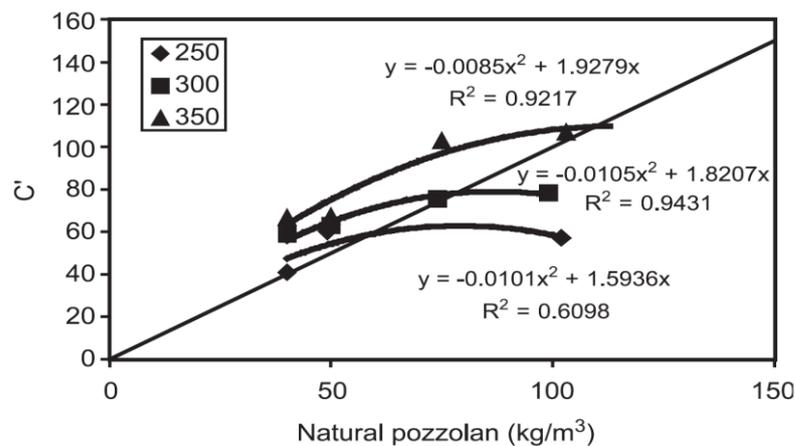


Figure 2.7. Relation entre le ciment équivalent (pour l'équation de Bolomey) et pouzzolane naturelle utilisée. [63]

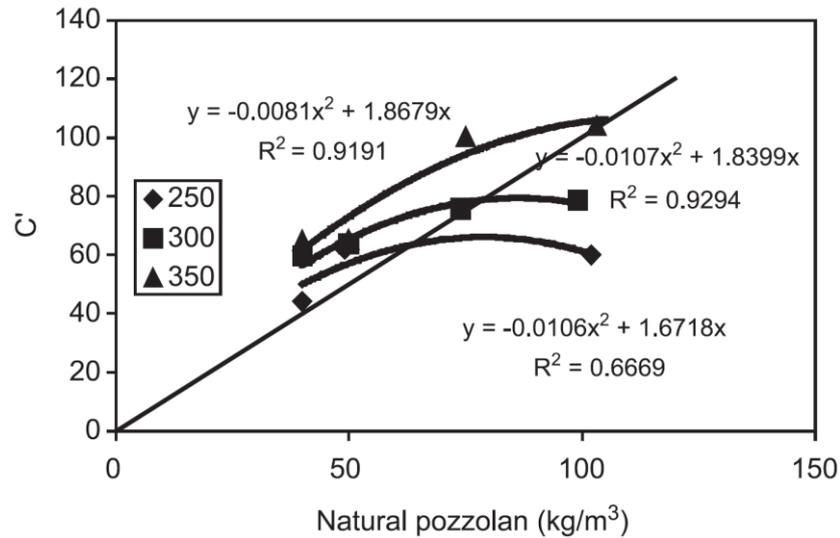


Figure 2.8. Relation entre le ciment équivalent (pour l'équation de Feret) et pouzzolane naturelle utilisée. [63]

Cette étude montre que les coefficients d'efficacité obtenus pour classe de résistance sont similaires et que ces valeurs diminuent avec l'augmentation de rapport pouzzolan/ciment.

Wong et Abdul Razak [64] développent une méthode basée sur le modèle d'Abrams pour évaluer le coefficient d'efficacité de la fumée de silice et du métakaolin. L'hypothèse de base de la méthode proposée est que la résistance d'un mélange composé est inversement proportionnelle au rapport eau/ciment effectif $(W / C)_{\text{eff}}$ où la teneur en ciment effective $C' + kP$.

Pour le mélange de contrôle:

$$S_C = K_1 \left[\frac{1}{W/C} \right] \quad \text{Équation 2-27}$$

Pour le mélange pouzzolanique:

$$S_P = K_2 \left[\frac{1}{W/C' + kP} \right] \quad \text{Équation 2-28}$$

où

S_C = la résistance du mélange de contrôle

S_P = la résistance de mélange pouzzolanique

W = eau (kg/m³)

K_1, K_2 = constante de proportionnalité

k = coefficient d'efficacité

C = ciment (mélange de contrôle) (kg/m^3)

C' = teneur en ciment (mélange de pouzzolane) (kg/m^3) et P = teneur en matières pouzzolaniques (kg/m^3).

Il est supposé que les constantes de proportionnalité K^1 et K^2 sont égaux et divisant l'équation. (2-28) par l'équation. (2-27) on obtient l'équation. (2-29)

$$\frac{s_p}{s_c} = \frac{C' + kP}{C} \quad \text{Équation 2-29}$$

Par conséquent

$$k = \frac{\frac{s_p}{s_c} C - C'}{P} \quad \text{Équation 2-30}$$

Les valeurs de k pour tous les mélanges sont présentées sur la Figure 2.9. Ce coefficient est largement dépendant du type et du taux de l'ajout utilisé ainsi que de l'âge des éprouvettes. À 28 jours, les valeurs de k varient de 1,6 à 2,3 pour MK et de 2,1 à 3,1 pour les mélanges avec SF. Par contre, à 180 jours, les valeurs de k varient de 1,8 à 4,0 pour les mélanges avec le MK et de 2,4 à 3,3 pour les mélanges avec SF. En général, les mélanges à 5% de MK ou de SF atteignent les valeurs les plus élevées du coefficient d'efficacité k .

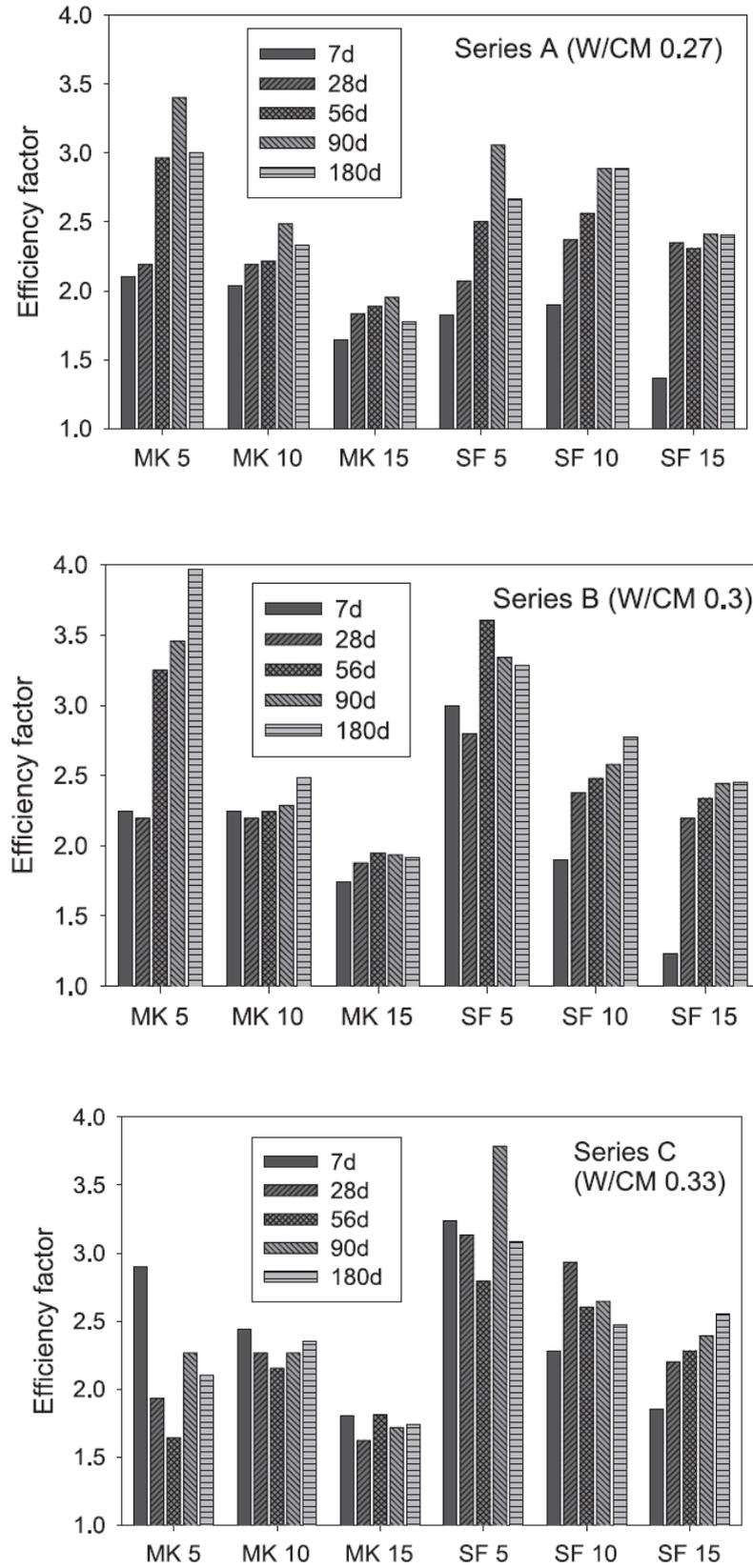


Figure 2.9. Les coefficients d'efficacité. [64]

Duval et Kadri [65] ont montré que l'efficacité de la fumée de silice peut être exprimée par une forme parabolique en fonction du rapport fumée de silice sur ciment (sf/c), ce qui a conduit à proposer un nouveau modèle, de prédiction des résistances des BHP, qui tient compte de l'efficacité de la fumée de silice et du rapport E/C. Pour ce modèle ils sont proposés une simple équation du même type que l'équation de Bolomey

$$f_{c28} = KR_{c28} \frac{1}{\rho_c} \frac{L}{E+V} \quad \text{Équation 2-31}$$

Où ρ_c est la densité relative du matériau cimentaire et L est le liant tels que

$$L = C + \alpha (sf/c)C \quad \text{Équation 2-32}$$

La fonction $\alpha (sf/c)$ représente la contribution de la fumée de silice, ou équivalent de ciment, à la résistance à la compression. Ils sont supposés que l'efficacité de la fumée de silice est liée à la présence de ciment et dépend uniquement du rapport sf/c

$$f_{c28} = KR_{c28} \frac{1}{\rho_c} \frac{C}{E+V} [1 + \alpha (sf/c)] \quad \text{Équation 2-33}$$

Pour déterminer la fonction $\alpha (sf/c)$, ils ont mesuré la résistance à la compression sur des échantillons de mortier normalisé avec des différentes teneurs de fumée de silice et ont abouti aux résultats illustrés sur la Figure 2.10.

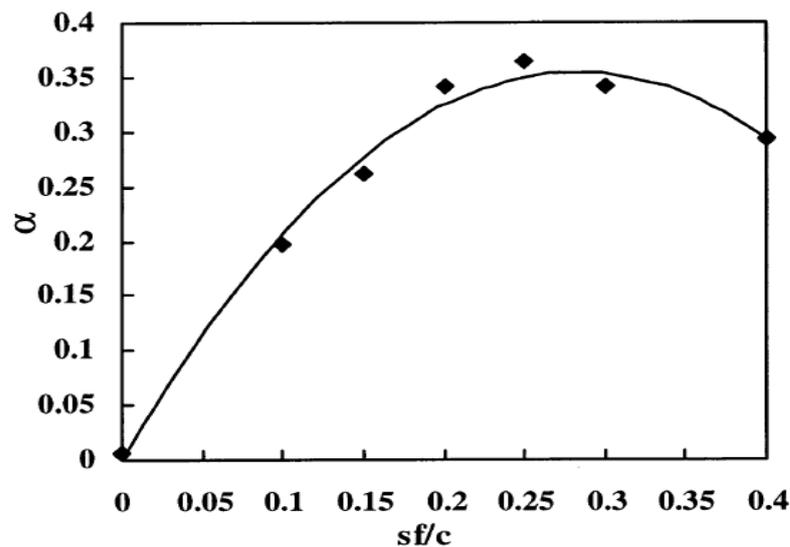


Figure 2.10. Variation de la fonction α avec la sf/c [65]

D'après la Figure 2.10 représentant la variation du coefficient α avec le pourcentage sf/c , l'équation 2-34 a été déduite avec un coefficient de corrélation de 0,989

$$\alpha\left(\frac{sf}{c}\right) = 0.36 - [2.1\left(\frac{sf}{c}\right) - 0.6]^2 \quad \text{Équation 2-34}$$

Le volume d'air de l'équation. 3 est écrit $V = yE$. Le coefficient y dépend de la consistance du béton selon les valeurs suivantes: 0,13 pour un béton ferme, 0,10 pour un béton plastique et de 0,07 pour un béton très plastique ou fluide. Et l'équation précédente devient :

$$f_c(t) = KR_{c28} \frac{c}{(y+1)E} \left[A(t) + 0.36 - [2.1\left(\frac{sf}{c}\right) - 0.6]^2 \right] \quad \text{Équation 2-35}$$

$A(t)$ est une fonction cinétique qui est déterminée à partir de la résistance à la compression du béton de référence à un temps t .

Par la suite Ezziane et al. [66] évaluent l'efficacité du laitier par un modèle qui sépare l'effet de l'âge, du taux de substitution, de la finesse et de la température de cure d'où l'aboutissement à la formule ci-dessous :

$$k_e = A + B \ln(t) \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} A &= (A_p + A_f)A_T \\ B &= (B_p + B_f)B_T \end{aligned}$$

Où A_p , A_f , A_T , B_p , B_f et B_T des coefficients dépendant respectivement du taux de substitution, de la finesse du laitier et de la température de cure.

En comparant l'efficacité des additions minérales entre plusieurs propriétés du ciment, Papakadis et Tsimas [67] concluent que les cendres volantes présentent une efficacité à la pénétration des ions chlore ($k=2.5$) supérieure à celle des résistances mécaniques ($k=1.2$). Pour ce procédé, six type d'ajouts cimentaires ont été utilisés ; deux matériaux naturels et quatre sous-produits industriels. Les matériaux naturels sont une terre de Milos, (définie comme ME) et une terre de diatomées de l'île de Samos (défini comme DE). Trois différentes cendres volantes ont été utilisées, une cendre volante avec une teneur en calcium plus bas que les autres cendres volantes (définie comme FL), une autre avec teneur en calcium élevée et une teneur en soufre normale (définie comme FH) et la troisième avec une haute teneur en calcium et une haute teneur en soufre (définie comme FHS). Enfin, un laitier de nickel a été utilisé (défini comme SL). Tous ces ajouts cimentaires ont été broyés

avant d'être utilisés jusqu'à une finesse de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. L'équation suivante a été utilisée pour estimer la résistance à la compression f_c (MPa), puis la valeur de K.

$$f_c = K \left(\frac{1}{W/C} - a \right) \quad \text{Équation 2-36}$$

Où W est la teneur en eau dans le mélange initial du béton (kg/m^3), C'est la teneur en ciment dans le béton (kg/m^3), K est un paramètre en fonction du type de ciment (MPa) et a est un paramètre dépendant principalement du temps et du durcissement.

Pour le ciment Portland utilisé dans ce travail, le K a été calculé que 38,8 MPa. En utilisant les valeurs moyennes mesurées de la résistance à la compression de l'échantillon de contrôle, la valeur de a est estimée à 1.06, 0.72, 0.5 et 0.23 respectivement pour 2, 7, 28 et 90 jours d'âge.

Dans le cas du béton avec ajouts cimentaires, l'expression pour la résistance à la compression utilise le concept du liant équivalent et introduit la valeur de k dans sa formulation :

$$f_c = K \left(\frac{1}{W/(C+kP)} - a \right) \quad \text{Équation 2-37}$$

Les valeurs k pour les des différents ajouts étudiés ont été calculées et sont présentées dans le Tableau 2-1. Une comparaison entre les résistances mesurées et celles calculées, en utilisant l'équation. (2-37) et les valeurs k du Tableau 2-1, est illustrée sur la Figure 2.11et un excellent accord est observé. Les cendres volantes pulvérisées de ce travail peuvent se substituer, de manière équivalente, avec un ciment Portland ($k = 1$).

Tableau 2-1:coefficient d'efficacité (valeur de k. [67])

Table 3

Efficiency factors (*k*-values) for various SCMs

Concrete property	FL ^a	FH ^a	FHS ^a	ME ^a	DE ^a	FZ ^b	SF ^b
Strength, 2 days	0.8	0.8	1.0	0.4	0.2	–	–
Strength, 7 days	1.0	0.9	1.0	0.3	0.2	–	–
Strength, 28 days	1.1	0.9	1.4	0.3	0.2	0.5	3
Strength, 90 days	1.2	0.9	1.2	0.3	0.2	0.7	2.4
Chloride resistance, 90 days	2.5	2	2	1	1	3	6
Carbonation resistance ^b	–	0.7	–	–	–	0.5	0.3

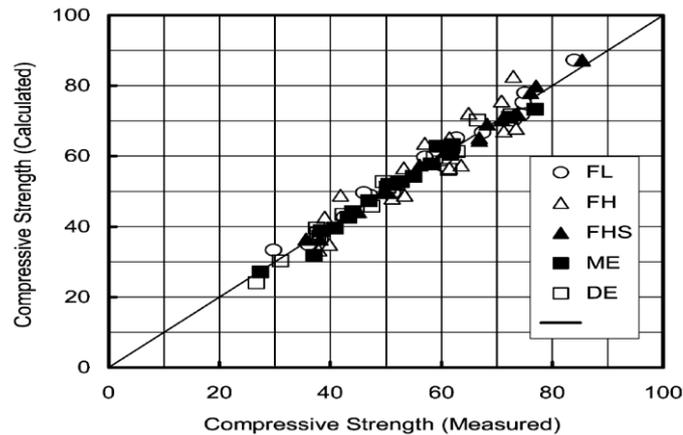


Figure 2.11. Comparaison entre les résistances à la compression mesurées et calculées. [67]

De même Boubitsas [68], a trouvé la valeur du coefficient d'efficacité du laitier à 28 jours variant de 0.7 à 1.1 pour la résistance à la compression et de 2.1 à 2.3 pour la pénétration aux ions chlore. Il est arrivé à cette conclusion à partir de l'équation et les étapes suivantes pour calculer la valeur de k pour une addition donnée:

$$k = \left(\frac{W}{\left(\frac{W}{C}\right)_{eq}} - C \right) / R \quad \text{Équation 2-38}$$

E = teneur en eau en poids (kg / m^3)

C = la teneur en poids de ciment (kg/m^3)

R = contenu de addition en poids (kg/m^3)

1. Déterminer la relation entre la propriété étudiées (résistance, la perméabilité, la résistance au gel, etc) et le rapport E/C pour le ciment utilisé, voir Figure 2.12.
2. Déterminer la valeur de la propriété, à étudier pour un mélange de béton contenant une proportion d'ajouts minéraux.
3. En utilisant la figure. 2-12 et le résultat de l'étape 2, la valeur de $(E/C)_{eq}$ peut être déterminée.
4. En utilisant les valeurs connues de E , C et R et la valeur de $(E/C)_{eq}$ déterminé à l'étape 3, la valeur k peut être Calculée aide de l'équation 2-38

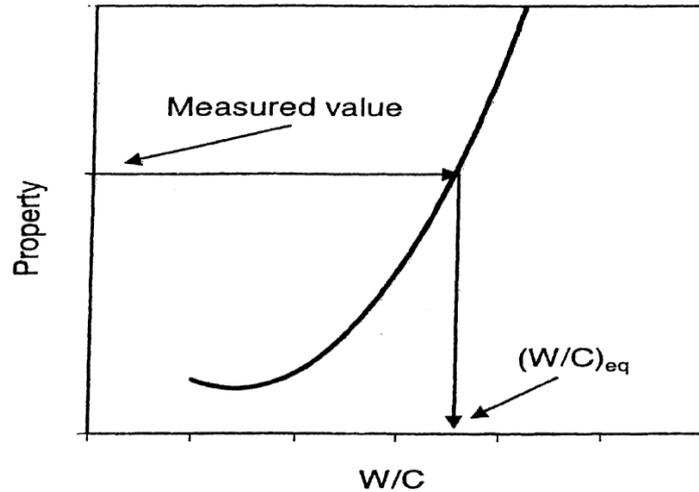


Figure 2.12: la relation entre w/c et une propriété définie (force, coefficient de migration, ... etc.). [68]

Pour le ciment portland normal. Cette relation est utilisée pour déterminer la valeur de $(w/c)_{eq}$ pour béton et mortier avec additions.

Récemment, Cyr et al. [59] ont utilisé le modèle de Bolomey et d'Abrams avec l'introduction du principe de liant équivalent et observent que plusieurs paramètres tels que la qualité de ciment, le taux de substitution, l'âge et la finesse engendrent une large variabilité de ce coefficient.

Le premier facteur est l'influence du temps. La Figure 2.13 montre l'influence de l'âge des mortiers sur le coefficient d'efficacité déterminé pour le ciment C1 avec trois additions minérales différentes (FA1, FA2 et L).

Les coefficients d'efficacité augmentent avec le temps de 1 jour jusqu'à 6 mois pour les cendres FA1 et FA2. Pour les l'addition calcaire L, k augmente jusqu'à 14 jours, puis se stabilise à une valeur comprise entre 0,25 et 0,30 ; k est donc fortement dépendant du temps.

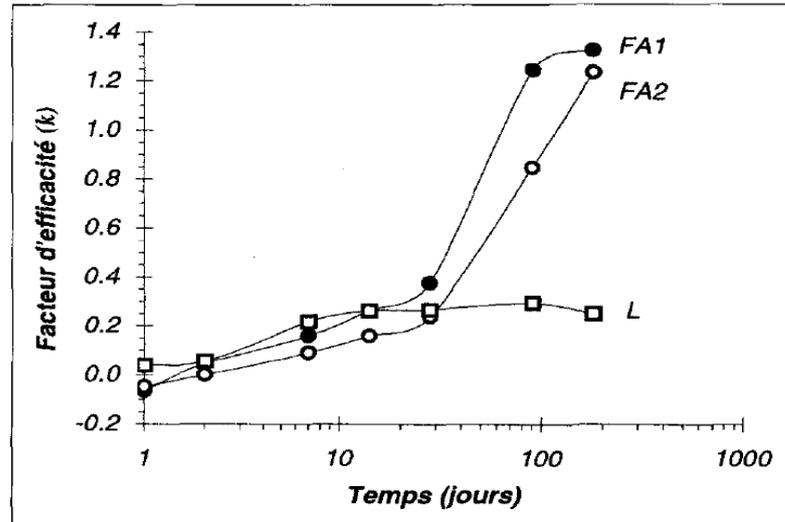


Figure 2.13: Coefficient d'efficacité (k) de deux cendres volantes (FA1 et FA2) et d'une addition calcaire (L) en fonction du temps (ciment C1). [59]

Le deuxième facteur est la Finesse de l'addition minérale. La Figure 2.14 illustre les coefficients d'efficacité k à 28 jours de mortiers contenant 25% d'addition (Q et L) de finesse variables. La finesse du quartz (Q) s'étend de 180 m^2/kg à 2000 m^2/kg (Blaine), celle du calcaire de 345 m^2/kg à 780 m^2/kg .

Les coefficients d'efficacité k augmentent de manière significative avec la surface spécifique des additions. En effet, k est égal à 0,18 avec le quartz grossier et passe à 0,90 pour le quartz fin, k est donc une fonction croissante de la finesse de l'addition.

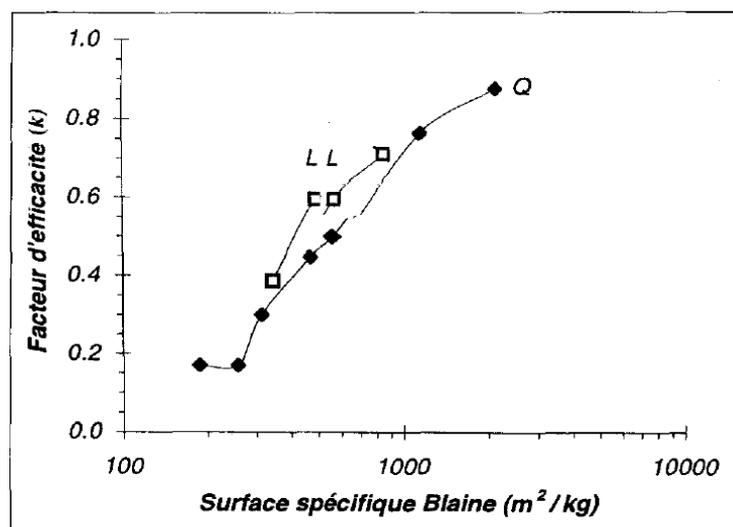


Figure 2.14. Coefficient d'efficacité (k) à 28 jours des additions calcaires (L) et quartzzeuses (Q) en fonction de leur finesse ($p=25\%$; ciment C1). [59]

Le troisième facteur est le Taux de substitution, Ils peuvent affirmer que le coefficient d'efficacité diminue lorsque la quantité d'addition augmente. Traduisant les interactions sur les résistances entre l'addition et le ciment, le coefficient d'efficacité est logiquement une fonction de la quantité relative d'addition par rapport à celle de ciment.

Le quatrième facteur est Influence du couple ciment-addition, ils ont remarqué que plus la classe du ciment est élevé, plus l'efficacité de l'addition est faible. Dans cette étude, l'effet du ciment sur le coefficient d'efficacité calculé de ces additions est représenté sur la Figure 2.15.

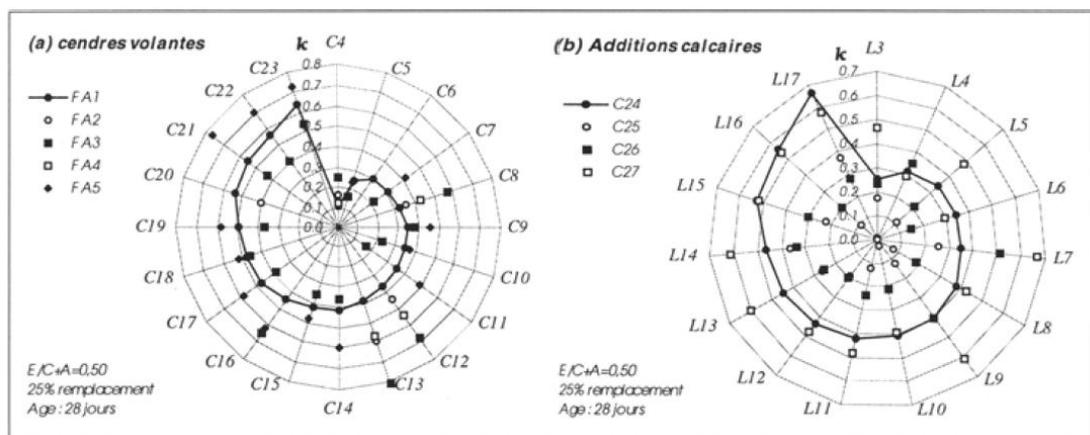


Figure 2.15. Variation du coefficient d'efficacité de (a) 5 cendres volantes et 20 ciments Portland et (b) 15 additions calcaires et 4 ciments Portland. [59]

De même, les résultats de l'efficacité dans les matériaux à matrice cimentaire sont donnés à la Figure 2.16, qui présente l'évolution du coefficient d'efficacité k en fonction du type de ciment et de son taux de substitution. Cette figure montre que la fumée de titane possède une efficacité très différente selon le ciment utilisé. Ainsi, pour 5 et 10% de remplacement, elle sera considérée comme très efficace si elle est utilisée avec le ciment C1, mais néfaste avec les ciments C2 et C3. Cette variation d'efficacité tend à s'estomper avec l'augmentation du taux de substitution, probablement par effet de dilution du ciment et également parce que le coefficient d'efficacité est de moins en moins tributaire des variations de l'indice d'activité pour de forts taux de remplacement.

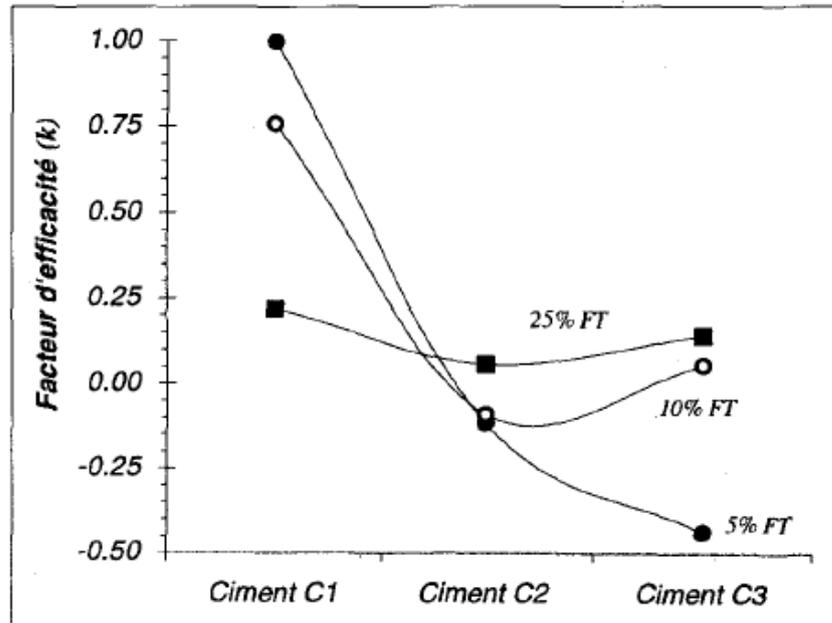


Figure 2.16. Coefficient d'efficacité (k) h 28 jours de la fumée de titane en fonction du type de ciment et du taux de substitution p . [59]

Antiohos et al. [69] ont utilisé la même méthode que Papakadis et Tsimas [67] et évaluent l'effet synergique de deux types de cendres volantes sur le coefficient d'efficacité. Pour 20% de ciment substitué, et entre 2 et 90 jours le coefficient d'efficacité des cendres volantes de classe C varie de 0.67 à 0.99 tandis que celui de la classe F varie de 0.81 à 0.97. Pour une substitution de 10% de chaque classe, un effet synergique apparaît avec un coefficient d'efficacité qui varie de 0.82 à 1.15 entre 2 et 90 jours.

Persson [70] a étudié expérimentalement et numériquement l'interaction à long terme entre les fumées de silice et le ciment Portland dans le béton. Environ 250kg de huit qualités de chacun de béton ont été étudiées à quatre âges différents chacun sur une période de 7 ans entre 1989 et 1996. Pour évaluer le coefficient d'efficacité il a utilisé le concept de liant équivalent. La Figure 2.17 montre que le coefficient d'efficacité de la silice fumée est lié à la résistance en compression. Ce coefficient a été trouvé lié à l'âge et au rapport E/C donné par la formule ci-dessous pour des valeurs de E/C compris entre 0.25 et 0.55 et pour un âge inférieur à 90 mois

$$K_e \left(t, \frac{E}{C} \right) = 0.113 - [4.44 - \ln(t)] \left(\frac{E}{C} \right)^{-0.056[\ln(t)+35]} \quad \text{Équation 2-39}$$

Ou $\ln(t)$ = logarithme de l'âge et du béton en (mois).

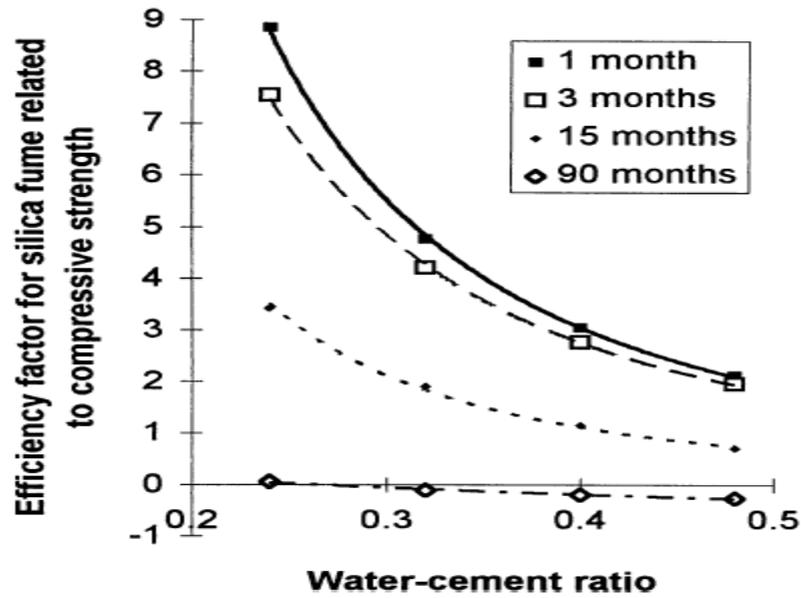


Figure 2.17: Coefficient d'efficacité de la fumée de silice liée à la résistance à la compression avec un durcissement scellé. [70]

Les résultats trouvés par Bertil Persson [70] et illustrés sur la Figure 2.18 sont en conformité avec ceux présentés par Babu et al [60]. De ceci, apparaît l'importance de tenir compte des chutes de résistance à long terme du béton à la fumée de silice. Si le gain de résistance à long terme est exigé pour des raisons de conception, la fumée de silice peut être évitée dans le béton.

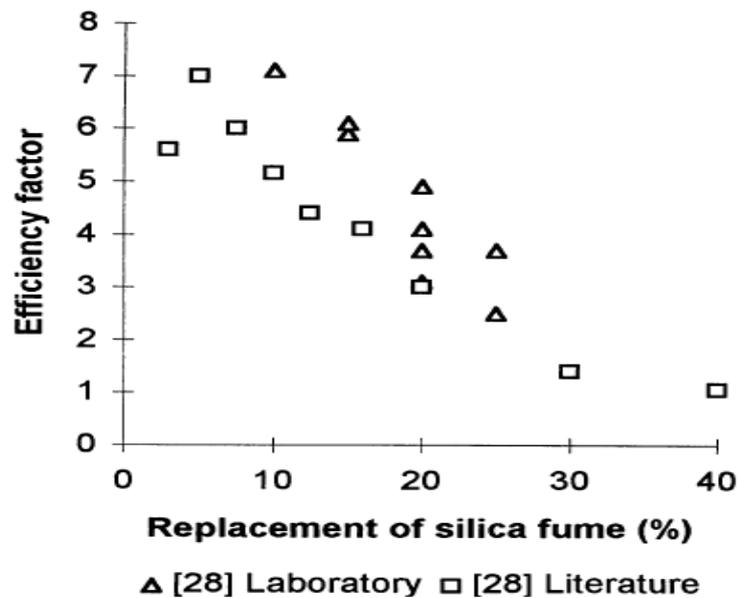


Figure 2.18: Coefficient d'efficacité pour le béton contre le remplacement du ciment par la fumée de silice [70].

Papadakis et al. [71] déterminent le coefficient d'efficacité en fonction de la silice réactive présente dans l'ajout. L'expression est validée expérimentalement pour les ajouts industriels (laitier, fumée de silice, cendres volantes) mais une surestimation des valeurs de l'efficacité est constatée pour les ajouts naturels. Cette méthode est basée sur la comparaison entre des résultats expérimentaux des résistances à la compression et les résistances liées à la quantité des hydrates CSH formés, d'où l'aboutissement à la relation suivante:

$$K_e = \left(\gamma_s \frac{f_{s,p}}{f_{s,c}} \right) \left(1 - a \frac{E}{C} \right) \quad \text{Équation 2-40}$$

Avec :

γ_s : Fraction de la silice réactive

$f_{s,p}$ et $f_{s,c}$: Fraction de la silice dans le ciment et dans l'ajout

E, C : dosage en eau et en liant

a : constante

Cette expression a été constatée expérimentalement être valable pour les ajouts cimentaires artificiels (cendres volantes, laitier), alors qu'elle surestime les valeurs de k pour les matériaux naturels. Cette exception pour les matériaux naturels peut être attribuée soit à la formation d'un plus faible composante CSH ou sur le fait que la mesure de silice active ne s'applique pas aux matériaux naturels. Ainsi, la relation analytique peut être appliquée comme une première approximation de la valeur k des ajouts cimentaires artificiels. Cette approche peut être utilisée pour une prédiction rapide de la quantité, mais surtout la qualité des ajouts cimentaires utilisés dans la formulation du béton afin que le produit final réponde à certaines exigences spécifiées.

Boukhatem et al. [72] Utilisent une approche non-paramétrique connue sous le nom de réseau de neurones artificiels pour la prédiction du coefficient d'efficacité du laitier granulé de haut-fourneau dans le béton. Ce travail est basé sur des résultats expérimentaux publiés par plusieurs chercheurs. Il a été prouvé que cette approche est très bénéfique où le modèle présenté fournit un outil plus précis pour le calcul de k_e en prenant compte les facteurs les plus importants affectant la résistance du béton. Les effets de cinq principaux paramètres tels que la composition de béton (E/L), le dosage en ciment, le taux de substitution d'ajout), l'âge et la température de cure confirment les données rapportées par l'expérimentation. Un modèle mathématique a été élaboré sur la base des résultats du

modèle du réseau de neurones artificiels pour prédire le coefficient d'efficacité k_e de laitier granulé en termes de pourcentage de remplacement (de 0 à 80%) et l'âge du béton (2 à 90 jours).

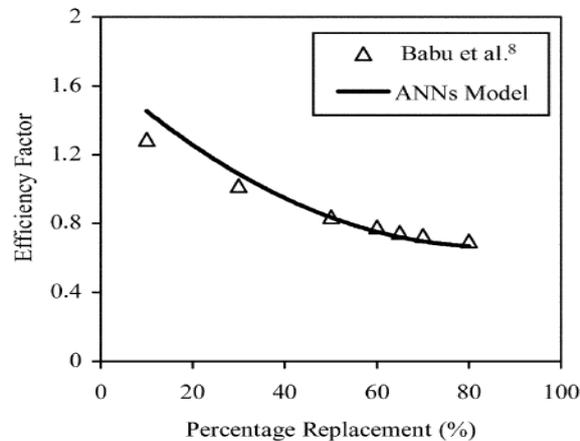


Figure 2.19: Comparaison des résultats des auteurs avec ceux de Babu et Kumar [72].

La Figure 2.19 compare la variation de l'efficacité du laitier granulé de haut-fourneau dans le béton à 28 jours avec les résultats obtenus par le modèle de réseau de neurones artificiels et les résultats obtenus par Babu et Kumar [73] qui ont été considérés comme les seuls résultats disponibles dans la littérature. Ces résultats sont en accord et montrent que le coefficient d'efficacité varie entre 1.5 et 0.79 pour un pourcentage de remplacement variant de 10 à 80% (entre 1.29 et 0.70 pour Babu et Kumar [73]). Le coefficient d'efficacité k_e diminue avec l'augmentation du taux de substitution de laitier. On peut noter qu'une plus grande proportion de substitution est nécessaire pour atteindre un effectif comparable au béton normal. Cette étude montre que dans un béton au laitier, il faudra une augmentation de la teneur totale de ciment de 10,2% et 21% pour un taux de substitution respectivement de 50% et 65% pour atteindre une résistance équivalente à celle d'un béton normal à 28 jours en plus de la réduction de la teneur en eau. Cela s'accorde bien avec les observations qui ont été précédemment signalées (8.5) comme indiqué dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 2-2: L'augmentation de pourcentage total de ciment du béton avec laitier pour atteindre la résistance équivalente à 28 jours. [72]

Replacement level, %	Swamy and Bouikni	Babu and Kumar	ANN model
50	10	8.5	10.2
65	20	19.5	21.3

Ainsi, dans cette analyse, un paramètre est varié, alors que les autres paramètres sont maintenus constants. Les relations fonctionnelles sont obtenues entre le coefficient d'efficacité et de ses facteurs correspondant. La variation du coefficient d'efficacité avec un taux de substitution variant entre 10 et 80% aux différents âges est représentée sur la Figure 2.20.

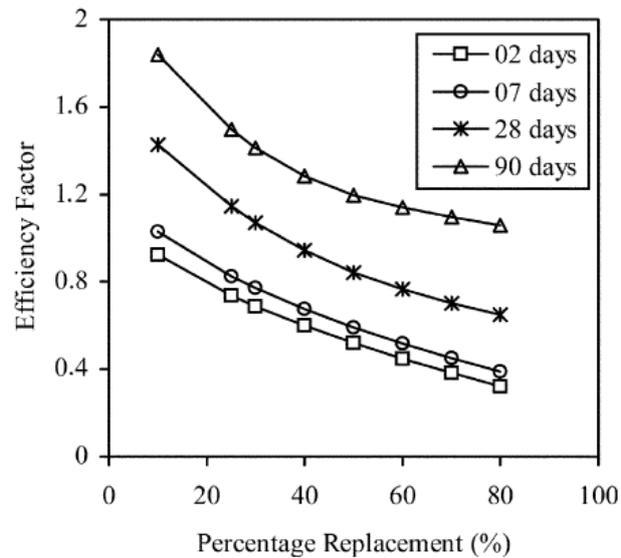


Figure 2.20: Effet du taux de remplacement sur le coefficient d'efficacité à des âges différents [72].

Cette figure montre le grand effet du taux de substitution sur le coefficient d'efficacité du laitier granulé de hauts fourneaux à des âges différents. À n'importe que l'âge, k_e généralement diminué avec l'augmentation du taux de substitution. À 28 jours, le coefficient d'efficacité du laitier est supérieur à l'unité, sauf pour le taux de substitution supérieur à 35%. Et au-delà de 28 jours, le coefficient d'efficacité est supérieur à l'unité pour les taux de substitution élevés jusqu'à 80%.

Sur la base de ce résultat, un modèle mathématique a été développé pour la prédiction du coefficient d'efficacité du laitier granulé de haut-fourneau et représenté par l'équation suivante :

$$ke(t,p) = (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 t^2) e^{a_3 \cdot p} \quad \text{Équation 2-41}$$

Où t et p sont respectivement, l'âge et le taux de substitution du laitier, et a_0 , a_1 , a_2 et a_3 sont des coefficients de régression égale à 0,857, 0,027, -0,00016, et -0,011.

CHAPITRE III :

Evaluation du coefficient d'efficacité
des résistances mécaniques

3.1 Introduction

Ce travail basé sur les résultats des travaux expérimentaux envisagés dans la thèse de Ezziane Karim et d'autres. Les résultats qui seront présentés ultérieurement s'intéressent à l'identification de certains sous-produits locaux pouvant être utilisés comme ajouts dans l'industrie cimentaire. Deux matières chimiquement actives en l'occurrence le laitier d'El-Hadjar et la pouzzolane de Beni-Saf ainsi que le calcaire, considéré comme inerte, se trouvant dans la région de Chlef en quantités abondantes.

3.2 Matériaux utilisés

La valorisation de ces ajouts dans le domaine cimentier passe inévitablement par l'approfondissement de leurs connaissances. Pour cela, il faut dégager les particularités de chaque produit, notamment la détermination des possibilités de leurs utilisations comme substituant au clinker. Ce dernier provient de la cimenterie de Oued-Sly (Chlef). Les additions utilisées sont les plus utilisées dans le pays à savoir le laitier de El-hadjar, la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et le calcaire de la région de Chlef. Ensuite, ils sont passés par un procédé de broyage à l'aide de l'appareil de Los Angeles jusqu'à l'obtention d'une poudre fine similaire à celle des ciments ordinaires.

3.2.1 Clinker

Le clinker est l'élément de base pour la fabrication du ciment qui résulte d'une cuisson vers 1450 °C d'un mélange homogène convenablement dosé en calcaire et en argile. Le clinker utilisé pour cette recherche provient de la cimenterie de Oued-Sly (ECDE), après sa sortie du four pour être broyé au niveau de laboratoire avec l'addition d'une quantité de gypse de 3% afin de régulariser la prise. La composition chimique et d'autres caractéristiques de ce produit sont représentées sur le Tableau 3-1.

Tableau 3-1: caractéristiques du clinker de Oued-Sly

Composition chimique										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	(CaO)libre	total
20.58	4.90	4.70	62.8	0.53	/	/	2.28	1.00	1.56	98.35
Caractéristiques physique et minéralogique										
Densité	Surface Spécifique		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	total			
3.14	3100 cm ² /g		43	34.2	7.5	11.35	96.05			

3.2.2 Calcaire

Le calcaire est une roche sédimentaire dont le composant principal est le carbonate de calcium CaCO₃. Ces calcaires se trouvent en grandes quantités sur l'écorce terrestre et presque toujours accompagnés de diverses substances considérées comme des impuretés d'où la rareté de trouver des calcaires purs. Des quantités abondantes recouvrent le Nord du pays sous différentes formes: roches, marnes et tufs. Le calcaire est l'élément de base de la fabrication du clinker, et pour les nouveaux ciments composés, il est introduit sans calcination pour régler certaines propriétés de prise et de durabilité. Le Tableau 3-2 illustre quelques caractéristiques de ce produit.

Tableau 3-2: caractéristiques du calcaire de la cimenterie de chlef

Composition chimique									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	total
2.5	0.6	0.9	52.6	0.5	0.02	0.05	0.5	41.9	99.57
Caractéristiques physique et minéralogique									
Densité	Surface Spécifique		pouzzolanité			Résistance Mécanique (granulat)			
/	3200 cm ² /g		/			/			

3.2.3 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques scoriacées. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer; présent respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite. En dépit d'énormes réserves de pouzzolane dans la région de Beni-Saf l'unique gisement exploité actuellement par FER PHOS demeure celui d'El Keikoul (Bouhamidi).

FER PHOS; à qui l'exploitation de ce matériau revient, ne produit que 600 à 800 tonnes/jour. La quasi-totalité de cette quantité est destinée à la cimenterie de Beni-Saf, tandis qu'une faible proportion est utilisée dans la fabrication de parpaings et d'hourdis dans le domaine du bâtiment. Suite à des directives économiques, certaines cimenteries du centre et de l'Est ont commencé à introduire cette matière dans leurs produits. Le Tableau 3-3 présente quelques caractéristiques de cette matière.

Tableau 3-3: Caractéristiques de la pouzzolane de Beni-Saf

Composition chimique									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	total
46.40	17.50	10.50	10.50	3.80	3.40	1.50	0.40	4.31	98.31
Caractéristiques physique et minéralogique									
Densité		Surface Spécifique		pouzzolanité			Résistance Mécanique (granulat)		
1.02		3100 cm ² /g		85%			33.2kg/cm ²		
CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES [71, 73]									
Feldspath	Pyroxène	Verre volcanique	Analcime	Chlorite	Hématite, Magnétite, Biotite	Autres minéraux basaltes, calcites, dolomites, argile		Total	
40	15	14	12	6	8	5		100	

La Figure 3.1 [74] présente l'analyse, par la diffraction aux rayons X, de la pouzzolane de Béni-Saf, et qui révèle la présence prédominante des feldspaths et des pyroxènes ainsi qu'une faible quantité d'hématite et d'argile.

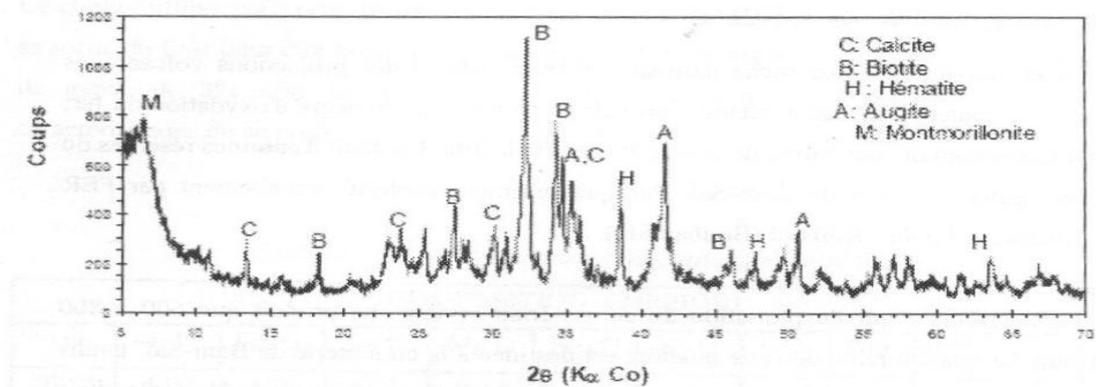


Figure 3.1: Analyse par la diffraction aux rayons X de la pouzzolane de Béni-Saf [74]

3.2.4 Laitier

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. Sa production est liée à celle des fontes à partir desquelles seront élaborés les aciers. En Algérie, le complexe sidérurgique d'El-Hadjar compte un tonnage impressionnant de laitier (700 000 tonnes/an) sous différents aspects. Ce matériau ne trouve son utilisation que dans certains domaines très restreints comme la confection des routes et en cimenterie. Les principales caractéristiques de cette matière sont représentées dans Tableau 3-4.

Tableau 3-4: Caractéristiques du Laitier d'El-Hadjar

Composition chimique									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	total
42.5	4.85	1.9	42.2	4.72	0.12	0.43	1.54	0.8	99.76
Caractéristiques physique et minéralogique									
Densité	Surface Spécifique		pouzzolanicité			Résistance Mécanique (granulat)			
0.8	3600 cm ² /g		80%			45 kg/cm ²			

L'analyse du laitier par diffraction des rayons X, présentée dans les travaux de Guettache [75], montre une zone diffuse qui caractérise la phase vitreuse et quelques raies de faible intensité représentant les composés cristallisés. La Figure 3.2 illustre bien que la principale phase cristalline identifiée correspond aux carbonates (CaCO₃).

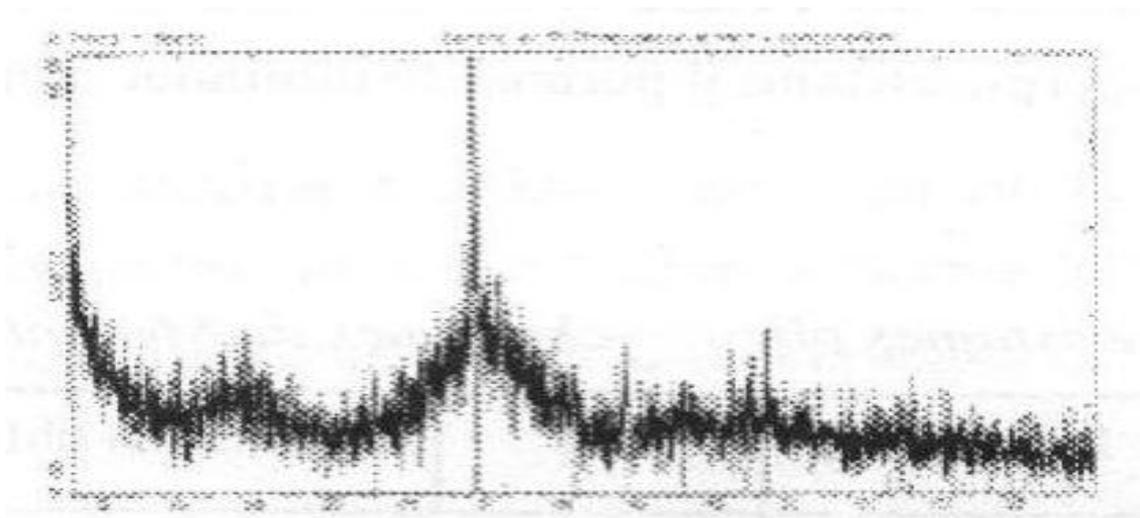


Figure 3.2: Analyse par la diffraction aux rayons X du laitier granulé d'El-Hadjar [75]

3.2.5 Sable

Le sable utilisé, pour la confection du mortier, est un sable normalisé obtenu par le mélange à part égale de deux sables de rivières, celui d'Oued Ras et celui de Chlef dont les caractéristiques physiques sont regroupées dans le Tableau 3-5. La Figure 3.3 illustre les courbes granulométriques de ces deux sables.

Tableau 3-5: Caractéristiques physiques des sables utilisés

Type de sable	Densité	Module de finesse	Equivalent de sable
Oued Rass	2.65	1.95	95 %
Oued Chlef	2.65	3.05	90 %

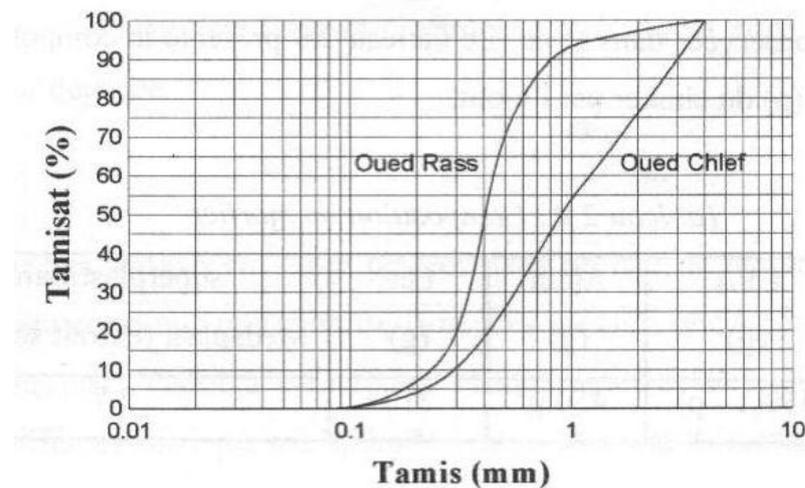


Figure 3.3: Courbes granulométriques des sables utilisés

3.2.6 Adjuvant organique

Le superplastifiant utilisé est le Médaplast SP 40 en provenance de Granitex [76] dont les caractéristiques physico-chimiques sont représentées sur le Tableau 3-6. C'est un polycondensat de résines mélamines classifié comme un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et des mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Tableau 3-6: caractéristiques physico-chimiques du Medaplast SP 40 [76]

Forme	Couleur	Densité	pH	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Marron	1.22 ±0.01	8.2	<1 g/l	65%

3.3 Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont confectionnées à base d'un mortier élaboré conformément à la Norme NF P 15-403 [77] où le ciment est substitué par 10, 30 et 50% de laitier, 10, 20 et 30 de pouzzolane et 5, 15 et 25 % de calcaire. La composition sable: liant: eau est de 3:1:0.46. On mélange à sec au moyen d'un malaxeur de 5 litres pendant une minute, au cours de laquelle ils ont ajoutée une première tranche d'eau de gâchage dans les 30 dernières secondes. Avec la deuxième tranche d'eau, on introduit une proportion du superplastifiant afin d'améliorer la maniabilité et faciliter la défloculation des grains et on mélange une deuxième fois à une vitesse rapide pendant 2 minutes. Le Tableau 3-7 présente la composition utilisée et le taux de substitution (p) du clinker par l'ajout.

Tableau 3-7: composition du mortier

Sable (g)	CEM I (g)	Ajout(g)	Eau (g)	superplastifiant Medaplast (extrait sec en g)
1350	450(1-p)	450.p	210	2.7

3.4 Essais

Le mortier obtenu après le malaxage sera testé pour trois essais différents ; un essai mécanique pour déterminer la résistance à la compression, un essai thermique pour évaluer la chaleur d'hydratation et un essai physique afin de suivre l'évolution des déformations dues au retrait.

3.4.1 Essai de compression

Le mélange est coulé dans des moules de 4x4x16 cm³ suivi d'une vibration à l'aide d'une table à secousses. Après le démoulage, Les éprouvettes sont conservées dans l'eau. Les éprouvettes de mortier subissent un essai de flexion suivi d'un essai de compression à des âges de 1, 3, 7, 28 et 90 jours. La Norme EN 196-1 [78] a été suivie pour la détermination des résistances du mortier pour chaque taux de substitution et selon le mode de cure approprié.

3.4.2 Chaleur d'hydratation

Deux boîtes Languavaut sont destinées à mesurer la chaleur d'hydratation pour les différentes compositions conservées à une température ambiante de 20°C. Selon la Norme NF 15-436 [79], la détermination de la chaleur d'hydratation sera effectuée où l'effet des ajouts minéraux est significatif sur la cinétique d'hydratation ainsi que sur les valeurs finales de la chaleur dégagée.

3.4.3 Retrait

Les éprouvettes 4x4x16 cm³ sont placées dans un bâti de mesure des déformations équipé d'un comparateur d'une précision de 1mm. Les mesures obéissent à la Norme NF 15- 433 [80] où les résultats visent à caractériser chaque ajout et sa contribution à modifier les déformations différées ainsi que son aptitude à lutter contre la dessiccation.

3.5 Etude de l'efficacité des ajouts minéraux

Le but de cette étude est de valoriser certains ajouts minéraux et d'étudier leurs activations avec le clinker. Cette étude permet de trouver le coefficient d'efficacité de chaque ajout, ce coefficient présente un outil rapide pour prédire la résistance à la compression à partir de modèles simples. L'étude expérimentale consiste à confectionner des éprouvettes de mortier normalisé, contenant différentes proportions d'ajouts minéraux substitués à un ciment ordinaire. Les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que la confection des éprouvettes sont présentées ci-dessus.

3.5.1 Evolution des résistances mécaniques

Les résistances mécaniques du mortier durcissant sous l'eau à une température ambiante progressent avec l'âge en fonction de la nature et de la quantité d'addition minérale utilisée. Généralement, il est constaté une baisse de résistance au jeune âge où les additions demeurent inertes favorisant ainsi l'effet de dilution. Après la première semaine, les conditions d'activité des ajouts sont réunies, et le déclenchement de leurs réactions rend la microstructure plus résistante. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3-8.

Tableau 3-8: Résultats de la résistance à la compression (MPa) d'un mortier contenant différentes proportions d'ajouts minéraux

Types de ciment	Taux de substitution (p)	Age en jours				
		1	3	7	28	90
CEM I	0	7,7	15,2	22,4	30,3	34,1
Calcaire	0.05	6	16,2	23,8	30,2	35,2
	0.15	4,8	13,5	21,2	28,3	29,1
	0.25	4,1	9,2	17	20,6	23,9
Pouzzolane naturelle	0.1	6,7	15,5	21,2	33,1	39,6
	0.2	5,6	14	19,8	33,3	40,2

	0.3	4,8	9	16,5	30,7	33,8
Laitier	0.1	6,1	13,2	20,2	31,2	38,5
	0.3	4	9,9	17,2	35,9	45
	0.5	2,6	6,5	14,6	29,8	39

3.5.2 Déterminations du coefficient d'efficacité

En utilisant les résultats de la résistance mécanique illustrés dans le Tableau 3-8, et à l'aide des équations 2.6, 2.6 et 2.10 nous déduisons le coefficient d'efficacité correspondant selon le modèle de Féret, Bolomey et de Abrams respectivement. Les résultats obtenus du coefficient d'efficacité sont représentés sur les figures 3.4, 3.5 et 3.6 où nous représentons la variation du coefficient d'efficacité, pour les deux modèles, en fonction de l'âge et du taux de substitution. Pour les deux modèles l'efficacité est similaire, celle du modèle de Bolomey possède un léger avantage au jeune âge et à long terme la situation s'inverse.

3.5.3 Efficacité du calcaire

La variation du coefficient d'efficacité du calcaire en fonction du l'âge pour les trois modèles est représentée sur la Figure 3.4, Figure 3.5, et Figure 3.6 pour différents taux de substitution et pour les trois modèles. Au jeune âge l'efficacité est croissante avec le temps et atteint son efficacité maximale dès le troisième jour, avec une valeur de 2.1, 2, 1.7 pour 5% de substitution respectivement pour les modèles de Féret, Bolomey, et abrams. Ensuite, l'efficacité diminue au voisinage de 28 jours. Le taux de 25% donne une efficacité nulle contrairement à celui de 5% qui donne une efficacité supérieure à l'unité. Ce taux de substitution accélère l'hydratation du ciment, ce résultat confirme l'effet inerte de ce produit et son rôle exclusivement physique au jeune âge.

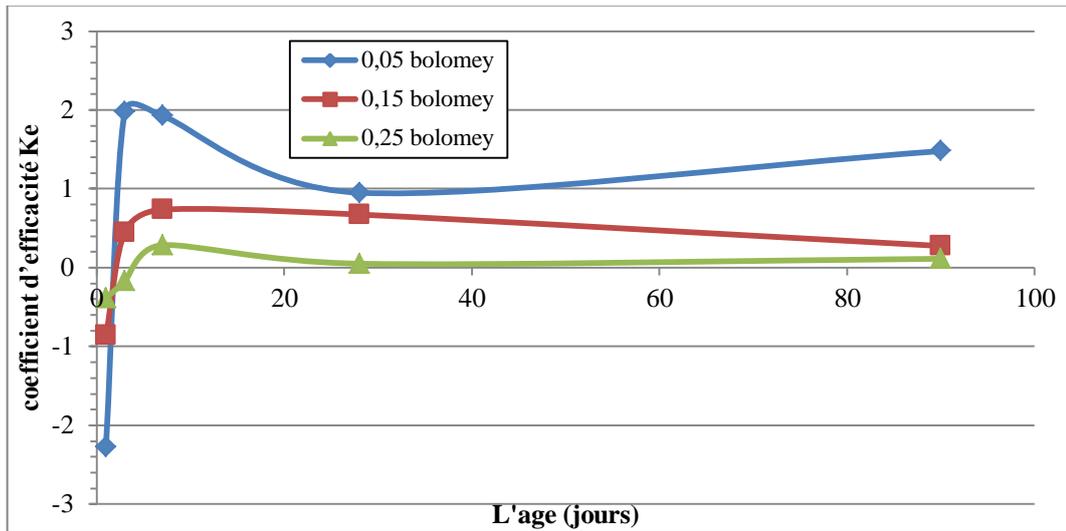


Figure 3.4: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au calcaire pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Bolomey.

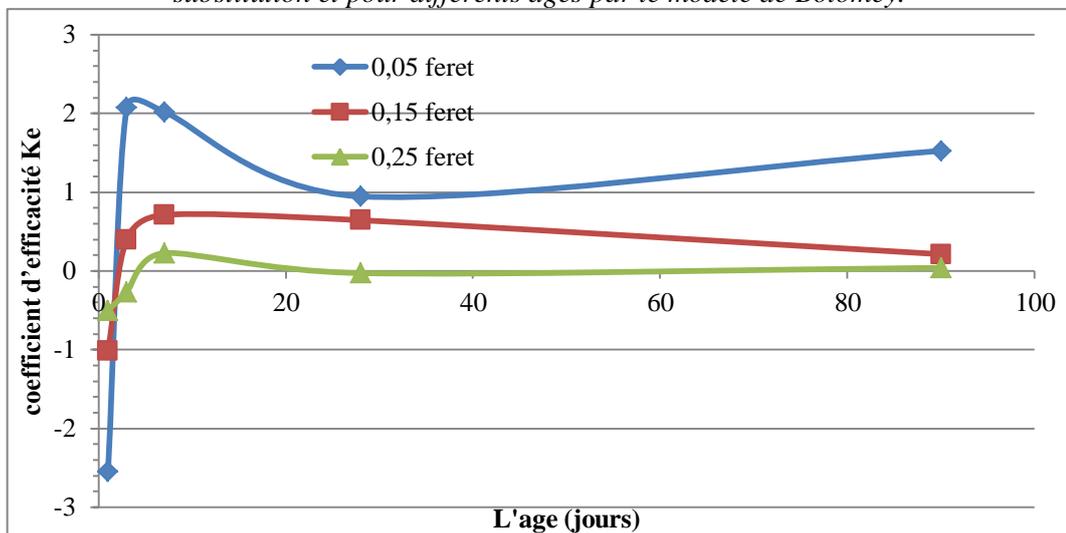


Figure 3.5: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au calcaire pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Feret.

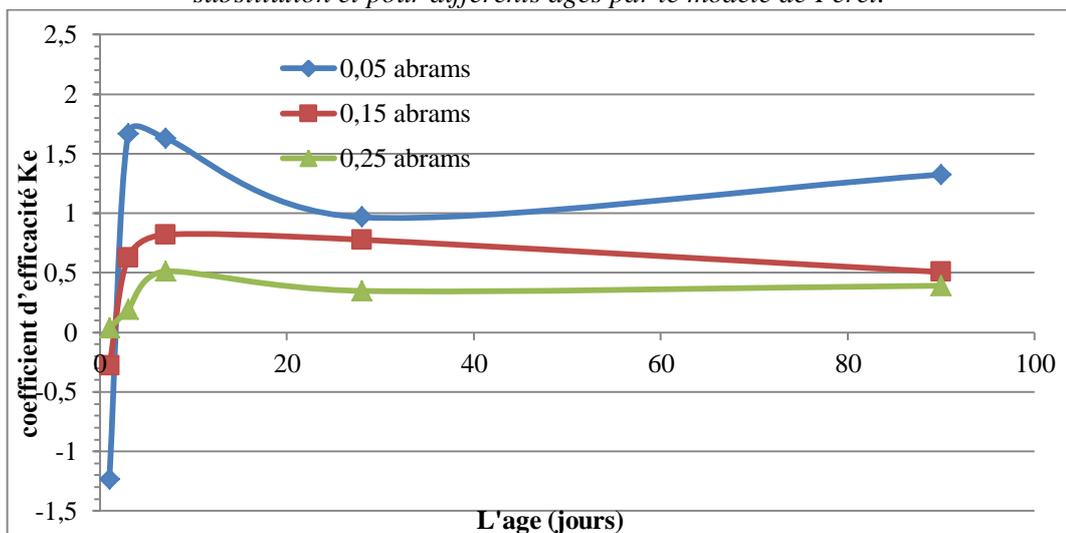


Figure 3.6: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au calcaire pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle d'Abrams

3.5.4 Efficacité de pouzzolane naturelle

Selon les trois modèles utilisés et les différents taux de substitution, nous avons représenté sur la Figure 3.7, Figure 3.8 et Figure 3.9 la variation du coefficient d'efficacité de la pouzzolane de Béni-Saf en fonction de l'âge. Au jeune âge l'efficacité de la pouzzolane semble être inférieure à 1. A partir de 15 jours, l'efficacité de la pouzzolane est croissante et supérieure à l'unité pour les proportions de 10 et 20%. L'efficacité de la pouzzolane après 90 jours, s'améliore considérablement pour les faibles proportions et reste pratiquement constante à celle de 28 jours pour des taux supérieurs à 30%.

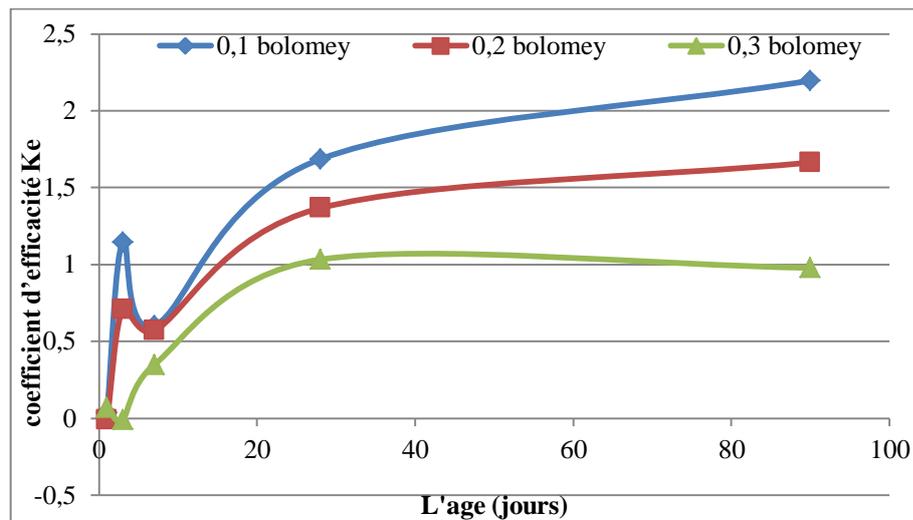


Figure 3.7: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier à la pouzzolane naturelle pour différents taux de substitution en fonction de l'âge par le modèle de Bolomey.

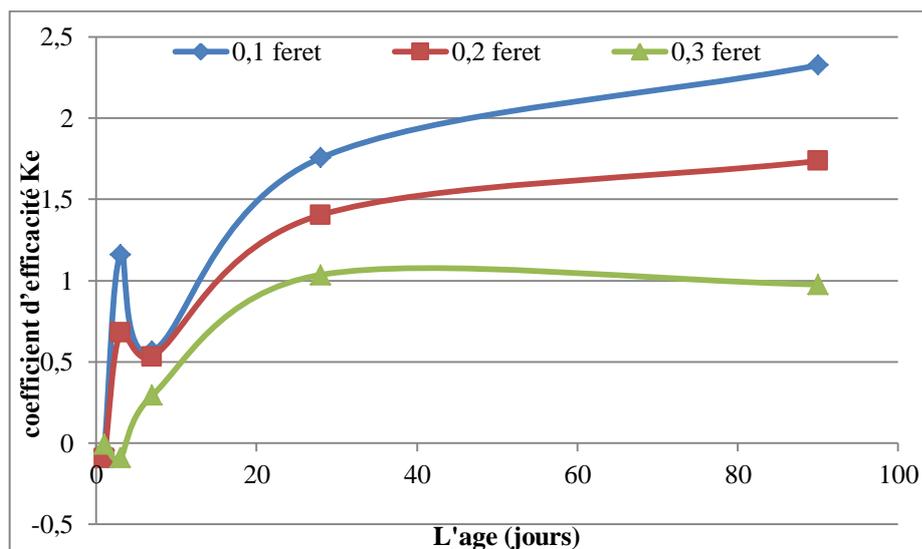


Figure 3.8: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier à la pouzzolane naturelle pour différents taux de substitution en fonction de l'âge par le modèle de Feret.

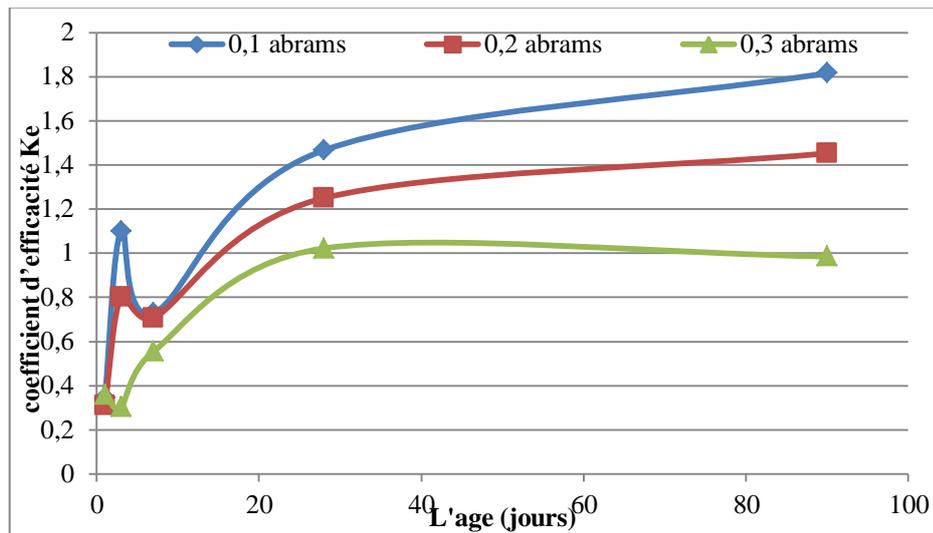


Figure 3.9: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier à la pouzzolane naturelle pour différents taux de substitution en fonction de l'âge par le modèle d'Abrams.

3.5.5 Efficacité du laitier

Les résultats du coefficient d'efficacité du laitier d'El-Hadjar sont représentés sur la Figure 3.10, Figure 3.11 et Figure 3.12 où son évolution est donnée en fonction de l'âge pour différents taux de substitution. Au jeune âge, le coefficient d'efficacité est fonction croissante avec le temps avec une action négative à 1 jour. Son action ne devient meilleure à celle du ciment qu'à partir de 28 jours où les courbes sont toutes supérieures à l'unité. Ceci explique l'effet hydraulique latent du laitier qui ne se déclenche qu'au contact d'une solution saturée de chaux libérée par l'hydratation de ciment. A 28 jours, l'efficacité pour 30% de substitution atteint les valeurs de 1.5, 1.45 et 1.3 selon respectivement les modèles de Féret, Bolomey et Abrams. A 90 jours, le coefficient d'efficacité atteint ses valeurs maximales pour 10% de substitution et prend les valeurs de 2, 1.95 et 1.65 selon respectivement les modèles de Féret, Bolomey et Abrams.

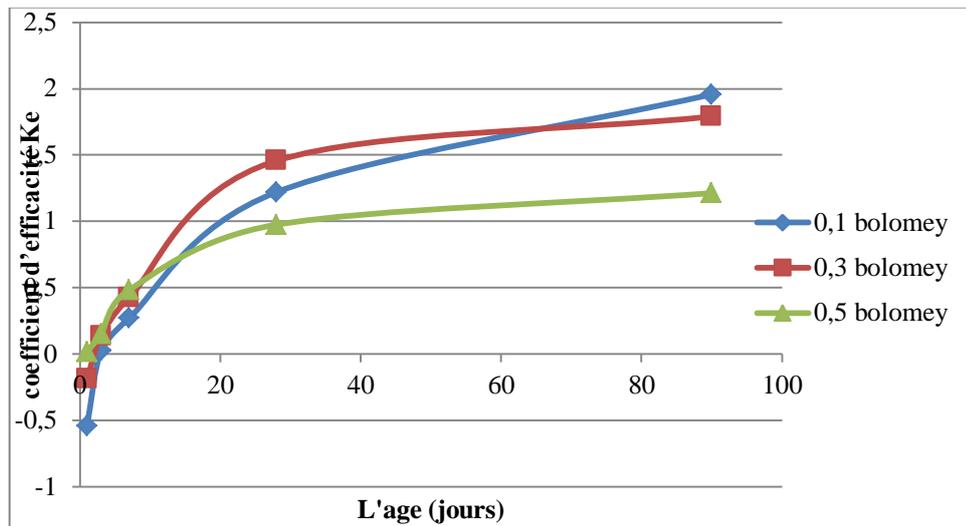


Figure 3.10: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au laitier pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Bolomey.

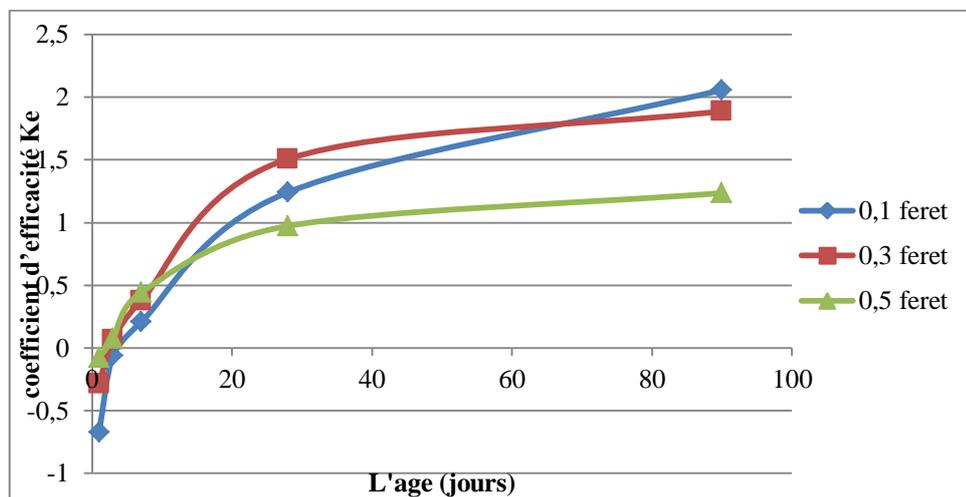


Figure 3.11: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au laitier pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle de Feret.

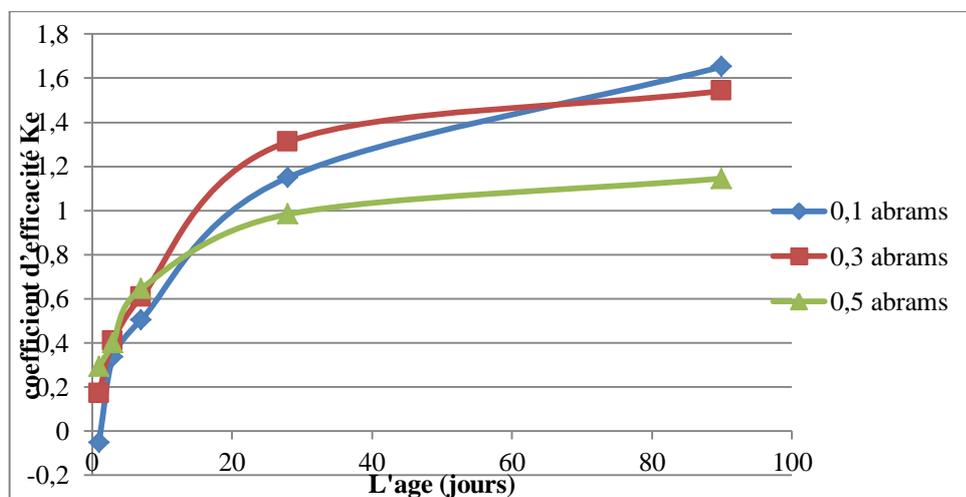


Figure 3.12: Variation du coefficient d'efficacité d'un mortier au laitier pour différents taux de substitution et pour différents âges par le modèle d'Abrams.

3.6 Comparaison des résultats

3.6.1 Comparaison entre les modèles

La Figure 3.13 présente une variation linéaire entre la formule de Féret et celle de Bolomey et Abrams, où cette dernière prend une légère avance aux valeurs négatives et inférieure à l'unité. Après l'unité, les valeurs de ce coefficient s'inversent où celles de la formule de Féret deviennent un peu supérieures. Malgré le rapprochement des valeurs avec Bolomey, donc la formule du bolomey donne des résultats plus proches de la formule de Féret, et toutes les courbes droites converge et se rejoignent au point de l'unité pour les trois formules, cela signifie que les trois formules donnent des résultats comparables quand les valeurs l'efficacité sont proches de l'unité, Et quand les valeurs diverge de l'unité que ce soit valeurs positives ou négatives, les formules donnent des résultats éloignés, en particulier la formule d'Abrams. On peut dire que 10% de laitier contenu dans un ciment prend une efficacité de 1.24, 1.22 et 1.15 respectivement selon les modèles de Feret, Bolomey et Abrams. Avec l'âge les coefficients trouvés prennent des écarts plus importants on trouve 2.05, 1.95 et 1.65.

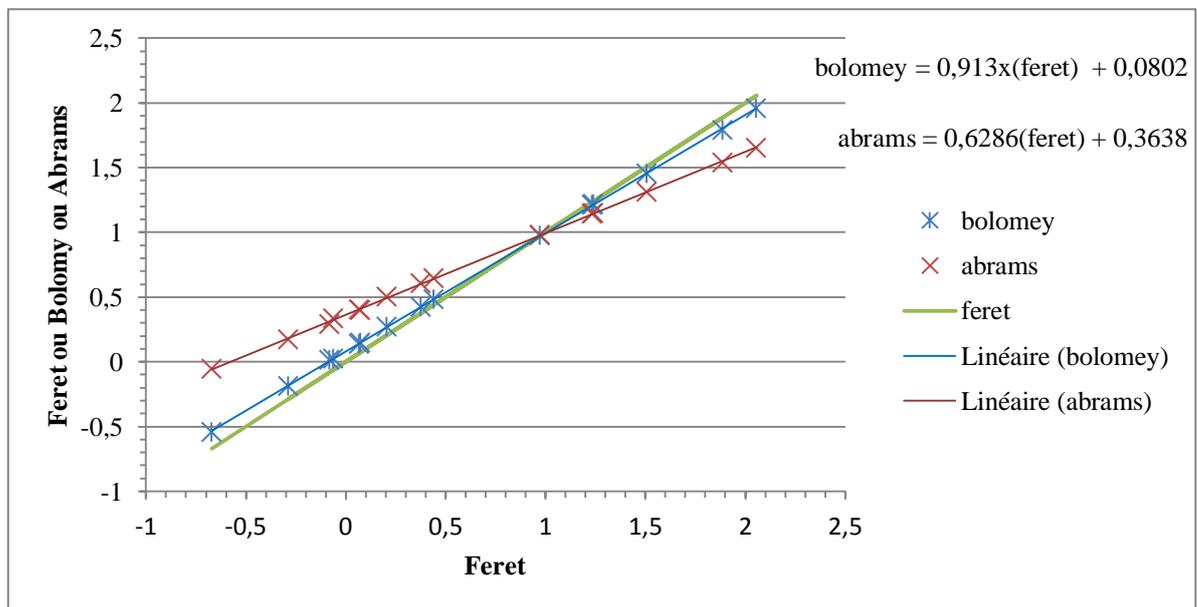


Figure 3.13 : Variation linéaire entre la formule de Féret et de Bolomey et Abrams

3.6.2 Comparaison entre les ajouts

Pour pouvoir comparer l'efficacité des trois ajouts, on a illustré la variation du coefficient d'efficacité estimée selon le modèle de Féret sur la Figure 3.14. Pour un taux de substitution faible correspondant à 10% de laitier, 10% de pozzoulane et 5% de calcaire, on remarque une très forte activité du calcaire et de la pozzoulane au jeune âge. A long terme leurs efficacités augmentent et prennent des valeurs égales ou supérieures à l'unité selon le type d'ajout. Pour des taux de substitution modérés correspondant à 30% de laitier, 20% de pozzoulane et 15% de calcaire (Figure 3.15) le coefficient d'efficacité au jeune âge augment d'une façon semblable pour les trois ajouts avec un peu plus d'avantage pour le calcaire tandis qu'après la deuxième semaine celui du calcaire chute et converge vers une valeur nulle. Ceux correspondant à la pozzoulane et le laitier croissent et deviennent meilleurs que le ciment ordinaire dès la deuxième semaine de cure.

Lorsque la présence des ajouts est abondante tel que 50% de laitier, 40% de pozzoulane et 25% de calcaire (Figure 3.16) l'efficacité du laitier au jeune âge est impressionnante suivi par la pozzoulane alors que la calcaire n'atteint qu'une efficacité de 0.2 à 7 jours. Après la deuxième semaine le laitier est très remarquable par son efficacité et dépassent l'unité après 28 jours d'âge. L'efficacité de la pozzoulane se stabilise autour de 0.8 après la troisième semaine de cure tandis que la calcaire prend des valeurs pratiquement nulle ce qui justifie son caractère neutre. Se situent entre 1 et 2.

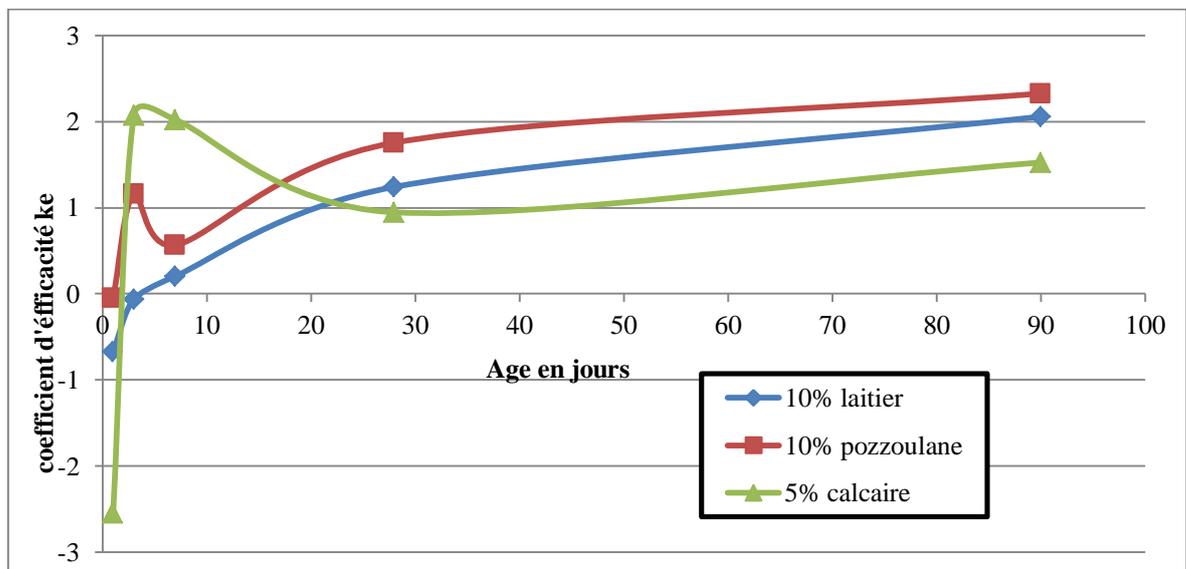


Figure 3.14: Variation du coefficient d'efficacité selon le modèle de Féret pour un taux de substitution faible

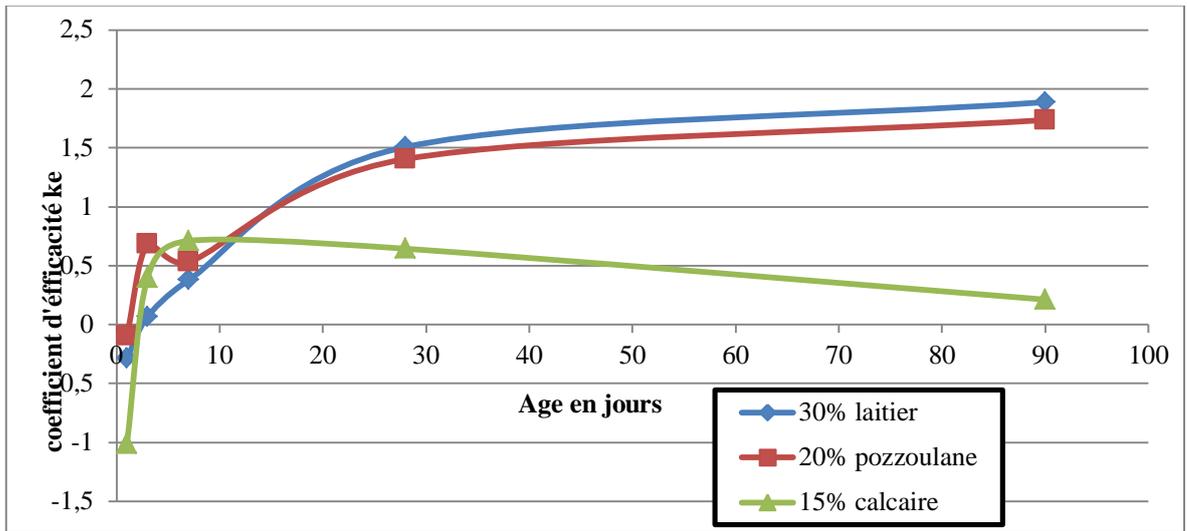


Figure 3.15: Variation du coefficient d'efficacité selon le modèle de Féret pour un taux de substitution modérés

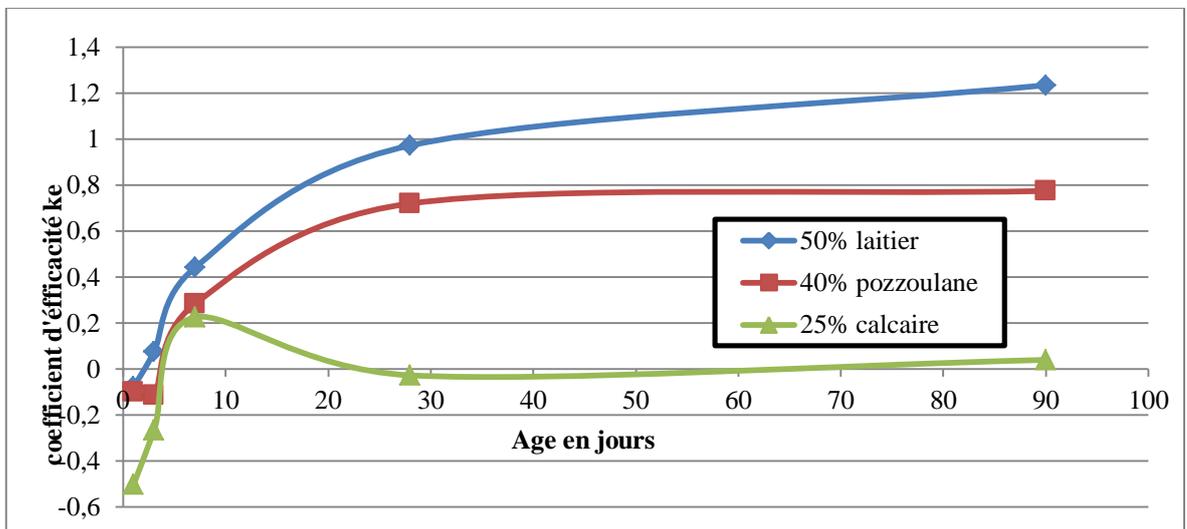


Figure 3.16: Variation du coefficient d'efficacité selon le modèle de Féret pour un taux de substitution faible

CHAPITRE IV :

Evaluation du coefficient d'efficacité
de la chaleur d'hydratation.

4.1 Introduction

Aujourd'hui, le ciment composé est largement utilisé dans les différents domaines de la construction, où il doit assurer une plus grande performance de résistance et de durabilité par rapport au ciment ordinaire tout en présentant une économie pour les industriels et une réduction de l'émission du gaz carbonique pour les écologistes.

Parmi les facteurs qui régissent la performance de ce ciment est son hydratation. Celle-ci représente la conversion de masse entre les différentes phases dans la pâte de ciment. En plus de la complexité de l'hydratation d'un ciment ordinaire, il vient s'ajouter l'interférence de la réaction des additions minérales avec celle du ciment. La plupart des réactions d'hydratation sont accompagnées par un dégagement de chaleur servant à les quantifier. La chaleur enregistrée par un calorimètre donne des valeurs de dégagement continues qui conviennent à estimer l'hydratation de ce système ciment-ajouts minéraux et eau.

4.1.1 Séquences de l'hydratation

Le suivi du flux thermique au cours du temps par calorimétrie permet de suivre l'évolution de l'hydratation des constituants. La chaleur d'hydratation dégagée dans sa courbe la plus classique peut être représentée comme celle sur la Figure 4.1, d'où on peut définir les phases suivantes [81, 82].

- a) premier pic: Le premier pic caractérise le dégagement de chaleur lors du gâchage. Cette chaleur est due à la dissolution superficielle des constituants de ciment et qui sera vite dissipée dans le malaxeur et ne peut être mesurée que si le gâchage se fait dans le calorimètre.
- b) Période dormante : Cette période suit le gâchage et dure quelques heures, elle est caractérisée par une formation très lente des hydrates accompagnée par une chaleur dégagée presque nulle.
- c) Second pic: Après la période dormante, un grand flux de chaleur apparaît représentant une formation accélérée des hydrates et principalement l'hydratation du composant principal du ciment le C.S.

d) Troisième pic: Le troisième pic vient après le second et représente un dégagement de chaleur dû à l'hydratation des composants du laitier (pic S) ou dû à la transformation de l'ettringite (AFt) au monosulfoaluminates (AFm) lorsque la teneur en C_3A dépasse 10% dans le ciment [82].

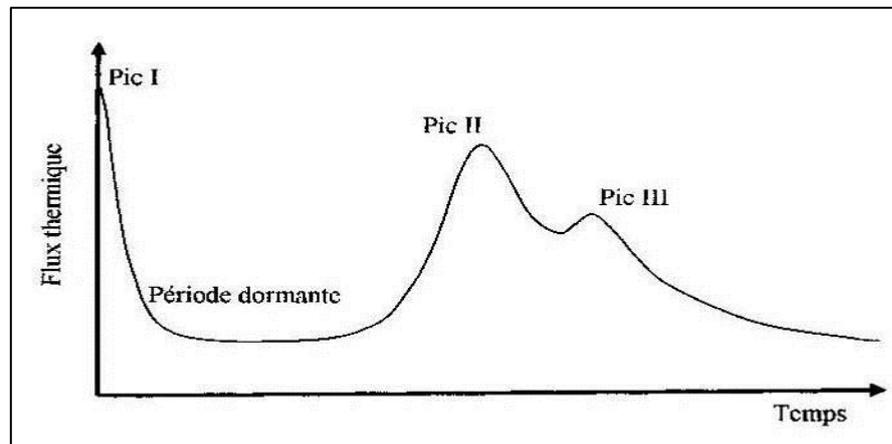


Figure 4.1: Courbe classique calorimétrique de l'hydratation d'une pâte de ciment

4.1.2 Effet de l'addition minérale

L'analyse de la chaleur d'hydratation est un moyen très fiable pour examiner la contribution des minéraux dans l'hydratation du ciment. Les travaux de Pene et Hassen [83] montrent que les ciments aux cendres volantes dégagent moins de chaleur que le ciment ordinaire, par contre ceux au laitier possèdent une chaleur finale supérieure due à son hydraulité latente. Les ciments avec la fumée de silice présentent une chaleur d'hydratation plus importante dès les premières heures à cause de sa finesse et de sa plus grande activité. D'autres travaux ont confirmé que les cendres volantes dégagent moins de chaleur que le laitier [84]. D'autre part, la chaleur d'hydratation à trois jours diminue de 53.6 J/g pour un mélange binaire de 30% de laitier et de 119.7 J/g pour un mélange ternaire avec 20% de laitier et 10% de cendres volantes [85].

La chaleur d'hydratation dégagée a été étudiée par Sanchez et Frias [86] pour plusieurs types d'ajouts. La fumée de silice et l'argile opaline provoquent une accélération similaire de l'hydratation durant les premières heures, par contre les cendres volantes dégagent une chaleur moins que le ciment à cause de leur faible activité qui ne peut pas compenser le ciment substitué. Après cinq heures, l'argile opaline (30%) se trouve avec une chaleur diminuée par rapport à celle du ciment ordinaire et suit le comportement des cendres volantes. Le flux de chaleur d'un ciment contenant 30 % de fumée de silice est

différé jusqu'à 10 heures malgré qu'il dégage toujours une chaleur supérieure à celle du ciment ordinaire. Les résultats de Sanchez et Frias [87] montrent que la substitution du ciment par 5% de fumée de silice n'a pas d'effet significatif sur la chaleur d'hydratation où la fumée de silice agit comme un filler. Pour 10% de substitution, une grande chaleur est observée à cause de la forte pouzzolanité de cet ajout, par contre pour un taux élevé de 30%, la fumée de silice ne trouve pas assez de chaux pour réagir et la chaleur d'hydratation diminue.

Alshamsi [88] observe que la fumée de silice accélère la libération de chaleur mais avec une réduction du second pic par contre le laitier réduit la valeur du second pic en retardant son apparition, de même la variation de température est moins nette dans le cas du laitier que dans le cas de fumée de silice. En incorporant 10% des particules finement broyées de différentes origines, Kadri et Duval [89] enregistrent l'apparition du second pic à 6h pour la poudre de calcite, à 7h pour la poudre d'aluminium, à 9h pour la fumée de silice et à 11h pour le quartz par contre il apparaît après 12h pour le ciment ordinaire.

L'augmentation de la température de cure engendre une accélération de dégagement de chaleur d'hydratation au très jeune âge. Cependant plusieurs études confirment [86] que sous une température élevée l'hydratation du ciment produit une grande chaleur aux premières heures mais les chaleurs ultimes sont réduites. Ma et al [82] examinent l'effet de la température de cure sur la chaleur d'hydratation en présence d'addition minérale, La fumée de silice est plus efficace sous des basses températures que sous des températures élevées, contrairement au laitier qui s'avère très actif pour l'élévation de température, par contre les cendres volantes restent pratiquement insensibles [82]. Sous des températures élevées ($>40^{\circ}\text{C}$), Garcia et Sharp [90] concluent que la chaleur d'hydratation d'un ciment contenant 60% de laitier dépasse celle du ciment ordinaire. De même le second pic est accéléré et le troisième est émergé dans le deuxième.

La présence des ajouts minéraux modifie la cinétique d'hydratation et la chaleur résultante par la diminution de la phase réactive du ciment et par la contribution de leur action pouzzolanique et hydraulique. Lorsque un ciment pauvre en C_3A est remplacé par 20% de sable broyé, le second pic se trouve repoussé par contre une accélération de son apparition est constatée pour 40% de substitution- Lorsque on substitue un ciment riche en C_3A (14%), un troisième pic apparaît et la chaleur totale dégagée dépasse celle du ciment ordinaire [91] Cette diminution de la chaleur d'hydratation et la baisse du flux de chaleur

est attribuée, par Usharov et al [92], à la diminution de la basicité du liant à cause de la substitution du ciment par les ajouts minéraux.

Pour des bétons à hautes performances avec de faible rapport E/C, l'effet de dilution peut favoriser le dégagement de chaleur, tel que Shang et al [85] enregistrent une chaleur de 326.4 et 287.1 J/g pour un ciment ordinaire et celui contenant 10% de cendres volantes mais cette chaleur augmente à 349.7 J/g pour 30% de substitution. Il a été démontré que la valeur du second pic est inversement proportionnelle au rapport E/C pour un ciment contenant 20% de laitier ou de cendres volantes avec un effet différé [93]. D'un autre côté, il est bien démontré que la chaleur d'hydratation est proportionnelle à la surface spécifique de l'ajout tel que pour 25% de laitier, la chaleur à trois jours varie de 202 à 226 J/g lorsque on passe d'une finesse de 4200 à 4600 cm^2/g [94]. Une autre différence de chaleur a été observée par Xu et Chung [94] où la fumée de silice engendre une augmentation de chaleur de 7% dans la pâte et 10% dans le mortier.

4.2 Méthode de travail

4.2.1 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont conçues avec les mêmes proportions citées dans le chapitre 3 où on substitue le ciment par 10, 30 et 50% de laitier, 10, 20 et 30% de pouzzolane et 5, 15 et 25% de calcaire. Les essais se sont déroulés dans une chambre conditionnée en température fixée à 20°C et les mesures se sont programmées durant quatre jours avec des pas de mesure variables.

4.2.2 Mesure de la chaleur dégagée

Le banc d'essai comporte deux calorimètres semi adiabatiques dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesure, multi-voies à microprocesseur, permettant de mémoriser les températures en cours d'essai. Pour calculer la chaleur dégagée on doit mesurer l'échauffement de l'éprouvette $\Delta\theta$ et connaître la capacité thermique du calorimètre vide μ et avec l'éprouvette C d'où on obtient la chaleur dégagée par l'expression suivante [95]:

$$q(t) = \frac{c}{m_c} \Delta\theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \Delta\theta dt \quad \text{Équation 4-1}$$

Avec:

m_c : Masse de ciment ou liant contenu dans l'éprouvette

$C(J/^\circ C)$: Capacité thermique du calorimètre et de l'éprouvette

$\alpha(J/^{\circ}C)$: Coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre donné par l'étalonnage.

$\Delta\theta$: Échauffement de l'éprouvette par rapport à la température ambiante.

Une fois les mesures de l'échauffement faites, on évalue la chaleur d'hydratation en utilisant l'équation 2-12 et en introduisant les différents paramètres de l'essai.

4.3 Analyse des résultats

D'après les résultats obtenus, les ciments avec différents taux de calcaire présentent une évolution de la chaleur d'hydratation continue avec des valeurs rapprochées durant le premier jour. Après le premier jour, les courbes illustrées sur la Figure 4.2, correspondant aux taux de 15 et 25%, se stabilisent par contre celle de 5% continue son évolution tout en restant inférieure à celle du ciment de référence. A quatre jours, la chaleur d'hydratation pour des ciments contenant 5, 15 et 25% de calcaire représente 80, 55 et 50% de celle du ciment ordinaire. Après cet âge, l'effet de dilution est prépondérant où l'effet accélérateur du calcaire diminue conduisant à une stabilité de la chaleur dégagée surtout pour les taux élevés.

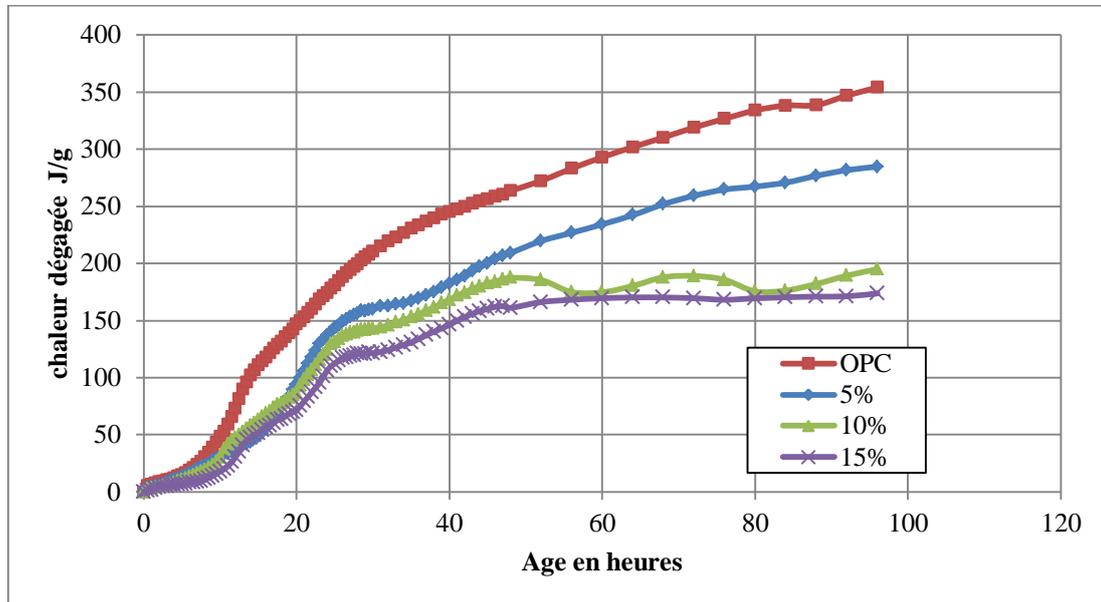


Figure 4.2: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différents taux de calcaire

Le ciment à la pouzzolane naturelle présente moins de chaleur d'hydratation à cause de l'effet de dilution et à la réaction pouzzolanique retardée. La Figure 4.3 montre une évolution croissante avec l'âge et qui se stabilise après quatre jours contrairement à

celle du laitier qui continue son augmentation. Pour les taux élevés de 30 et 40%, la stabilité de - chaleur est très rapide telle que on obtient, à trois jours, 97% de la chaleur finale alors que pour un ciment ordinaire on n'obtient que 90%.

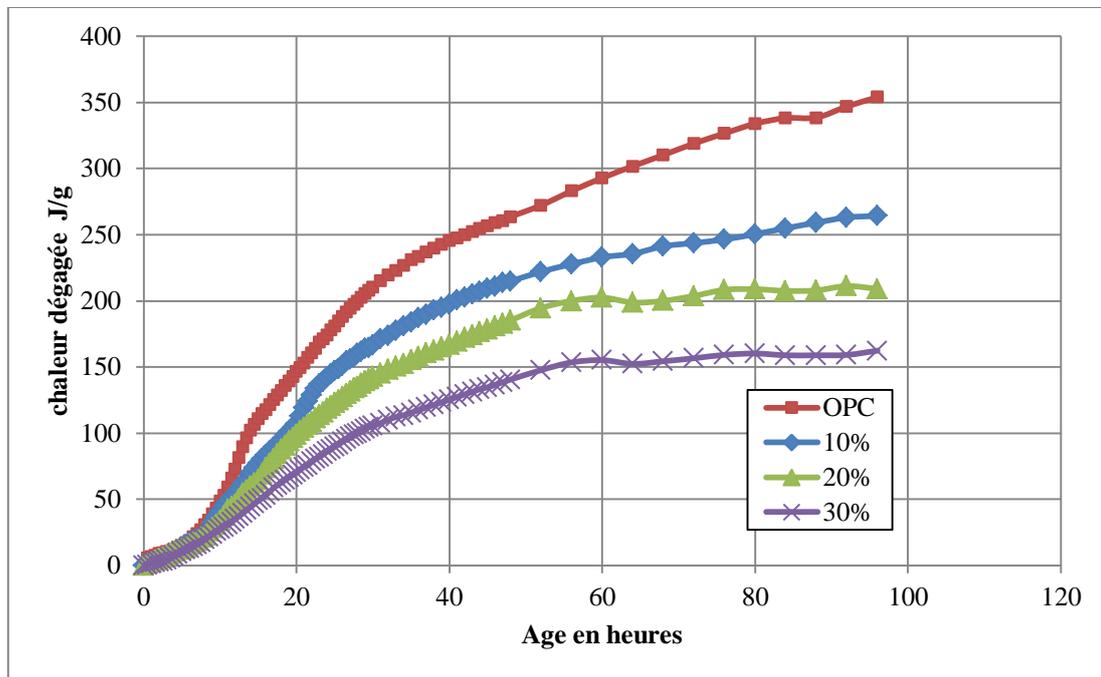


Figure 4.3: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différents taux de la pouzzolane

La présence du laitier diminue le dégagement de chaleur à cause de son hydraulicité latente. Les courbes de la chaleur dégagée présentées sur la Figure 4.4montrent un dégagement identique pendant les six premières heures quelque soit la composition du ciment. Ensuite c'est celle du ciment ordinaire qui se distingue. Après quatorze heures les différents ciments se caractérisent par une chaleur d'hydratation propre qui diminue avec le taux de substitution du ciment. A quatre jours d'âge cette réduction atteint 16, 20 et 22% par rapport au ciment témoin pour un taux de substitution de 10, 30 et 50%. La courbe représentant le taux de 50% est toujours croissante qui témoigne d'un dégagement de chaleur qui continue à augmenter au-delà de 4 jours.

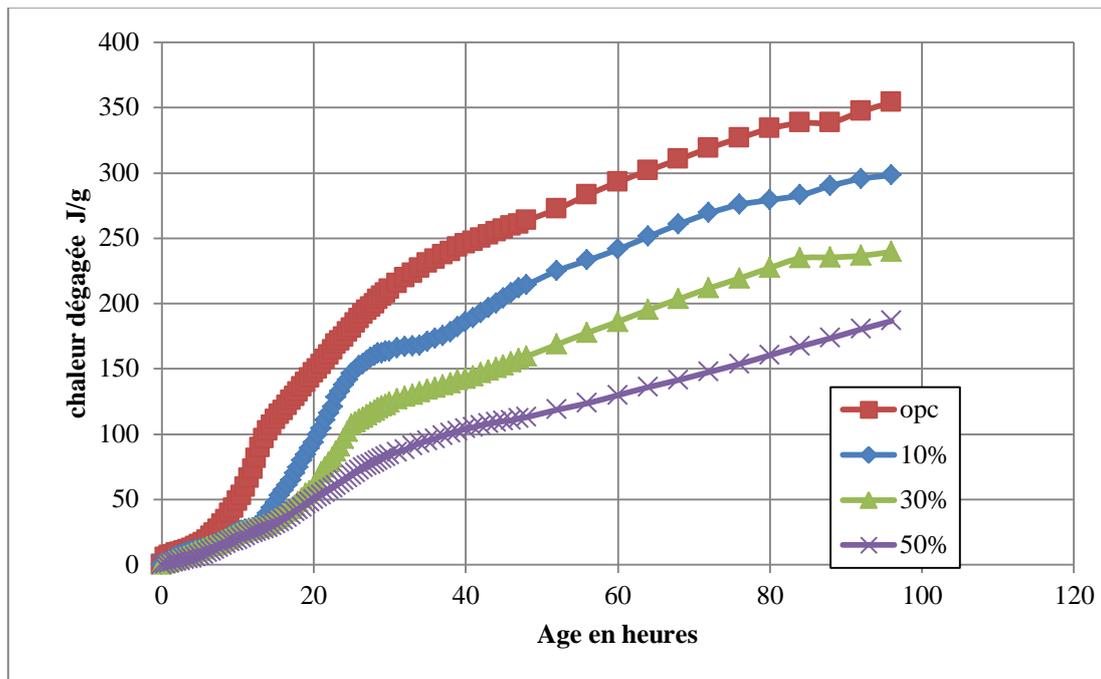


Figure 4.4: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différents taux de laitier

4.4 Evaluation du coefficient d'efficacité

Pour évaluer le coefficient d'efficacité à partir des résultats de chaleur d'hydratation, on a recouru à un calcul proportionnel en supposant que la chaleur totale dégagée est la somme de la chaleur produite par l'hydratation des grains de ciment plus celle produite par la réactivité de l'ajout. Un échantillon composé de C_0 ciment dégage une chaleur Q_0 , par contre un autre échantillon composé de $(1-p)C_0$ ciment dégage $(1-p)Q_0$ chaleur. S'il contient une substance minérale pC_0 , cette substance produira une chaleur proportionnelle à l'efficacité de la substance évaluée par $k_e p Q_0$. On peut dire qu'un mortier composé de $(1-p)C_0$ ciment et $k_e p C_0$ de substance minérale aura une chaleur dégagée évaluée comme suit :

$$Q(p) = (1-p)Q_0 + k_e p Q_0 \quad \text{Équation 4-2}$$

Le coefficient d'efficacité est évalué par :

$$k_e = \frac{Q(p) - (1-p)Q_0}{pQ_0} \quad \text{Équation 4-3}$$

Les Figure 4.5, Figure 4.6 et Figure 4.7 montres Les valeurs du coefficient d'efficacité sont évaluées pour les trois additions minérales en fonction de leurs taux de substitution et de l'âge.

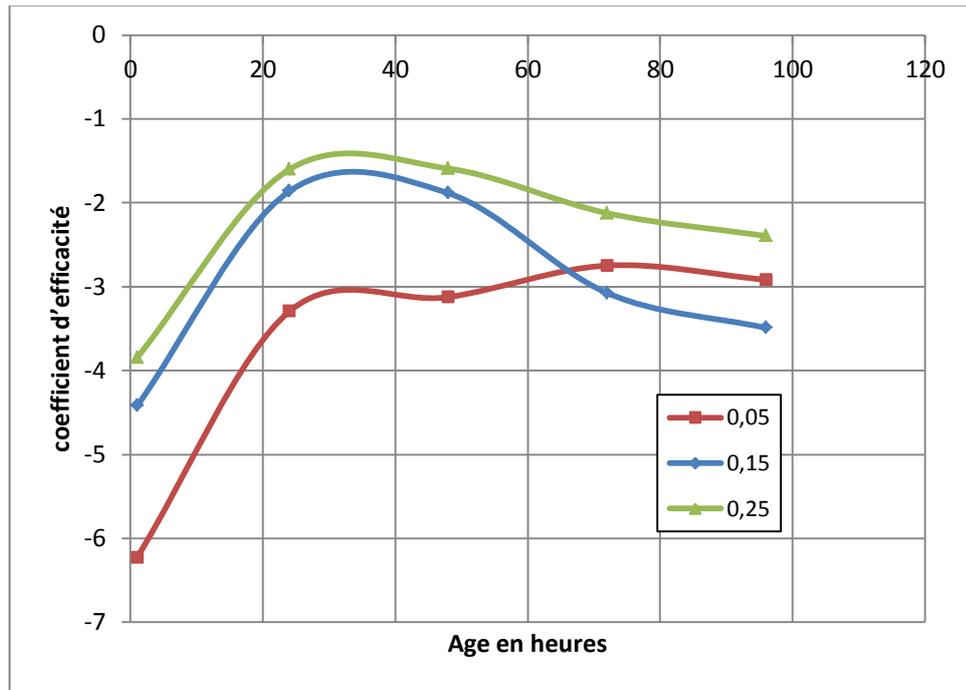


Figure 4.5: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents taux de calcaire

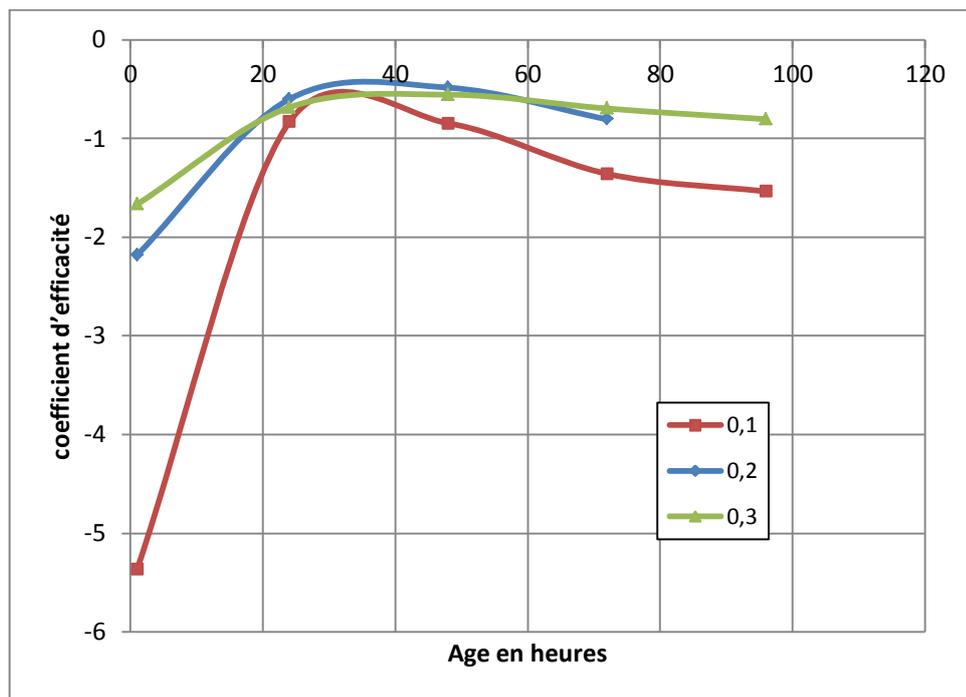


Figure 4.6: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents taux de pouzzolane

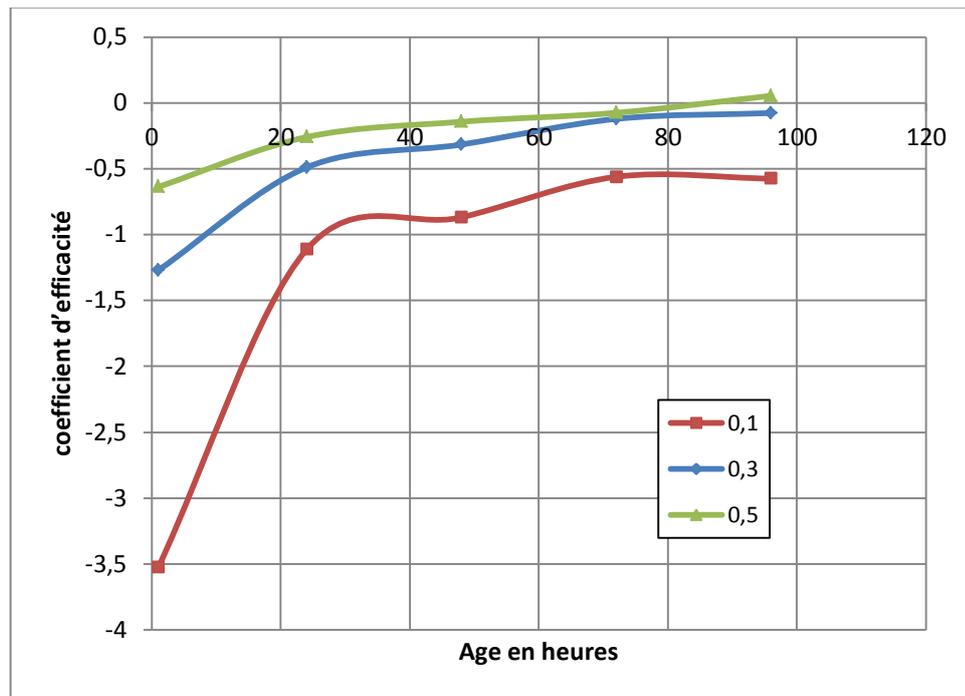


Figure 4.7: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents taux de pouzzolane laitier

4.4.1 Effet de l'âge

Le coefficient d'efficacité des différentes substances minérales issu de la chaleur d'hydratation dégagée prend des valeurs négatives durant toute la période d'essai. Des valeurs qui témoignent de la passivité de l'ajout et de son rôle de diminuer la chaleur totale dégagée. Ces valeurs progressent au cours du temps tout en restant négatives avec des valeurs plus stables après 2 jours d'observation.

4.4.2 Effet du taux de substitution

En variant le taux de substitution de chaque ajout, le coefficient d'efficacité progressent et l'ajout devient plus actif. Pour des taux de substitution un peu élevés les valeurs semblent convergées valeurs des valeurs voisine quelque soit le temps de mesure. A l'exception du calcaire qui donne des coefficients à 4 jours possédant un changement de comportement particulier dû probablement à son caractère inerte.

4.4.3 Effet du type de l'ajout

D'après les résultats illustrés sur la Figure 4.8 qui représente l'efficacité de différents type de l'ajout avec taux de substitution moyen, Le coefficient d'efficacité de ces ajouts augment au cours du temps mais toujours avec des valeurs négatives Jusqu'à deux jours avec différents pourcentages de contribution de chaque ajout, Où nous remarquons que le calcaire donne des valeurs inférieures à la pouzzolan et laitier, et ces deux derniers donnant des valeurs similaires là où le pouzzolan prend un peu moins que les valeurs du laitier, Après deux jours nous notons une descente progressive des valeurs de l'efficacité Sauf que les valeurs des e laitier continuent à augmenter progressivement et convergent vers zéro.

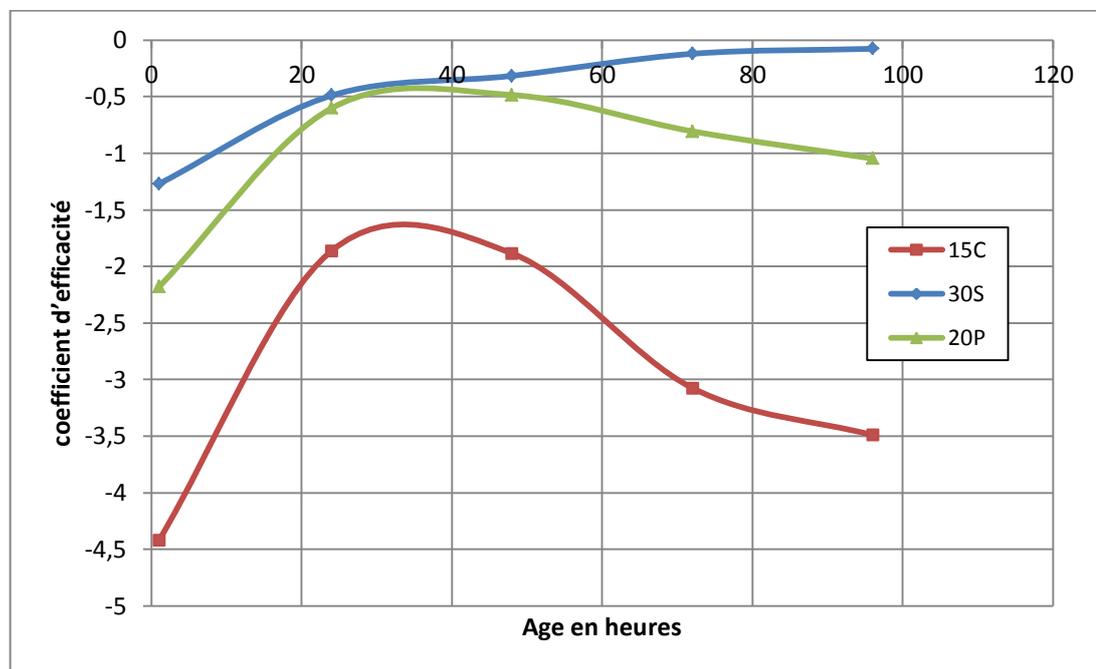


Figure 4.8: Le coefficient d'efficacité de la chaleur d'hydratation pour différents type de l'ajout

CHAPITRE V :

Evaluation du coefficient d'efficacité
de durabilité des additions
minérales.

5.1 Introduction

Les matériaux de construction essentiellement à base de ciment tels que le béton et le mortier assurent une fonction mécanique, car ils lient le squelette granulaire, mais ils sont aussi en grande partie responsables de la durabilité du matériau cimentaire. La conception d'un matériau cimentaire est extrêmement liée à l'environnement dans lequel il va être exposé durant sa durée de vie. Certains ions, dans un environnement aqueux, peuvent être néfastes pour le ciment hydraté, et par conséquent, pour l'intégrité du matériau [96]. Parmi ces ions agressifs, figurent les sulfates et les acides. L'objectif de cette partie est d'évaluer le coefficient d'efficacité des additions minérales à partir des résultats d'expansion et de perte en poids des éprouvettes de mortier contenant différentes substances minérales et soumises dans des milieux agressifs.

5.2 Durabilité du mortier et ciment

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs et les conditions climatiques ou environnementales. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. Parmi les paramètres qui agissent sur la durabilité; il y a la perméabilité aux gaz, à l'eau, aux ions chlorures et aux attaques par les sulfates et les acides.

5.2.1 Attaque par les sulfates

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans). L'eau de mer contient des sulfates en solution. On peut aussi les retrouver en solution dans les eaux souterraines, dans les eaux usées industrielles et dans certains sous-produits industriels. De même, la plupart des sols contiennent des sulfates sous la forme de gypse (généralement entre 0,01% et 0,05 % (sol sec) exprimés en SO_4^{2-}) [97]. Ces concentrations relativement faibles ne sont généralement pas agressives pour le béton. Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour assurer sa durabilité.

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive [97]. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

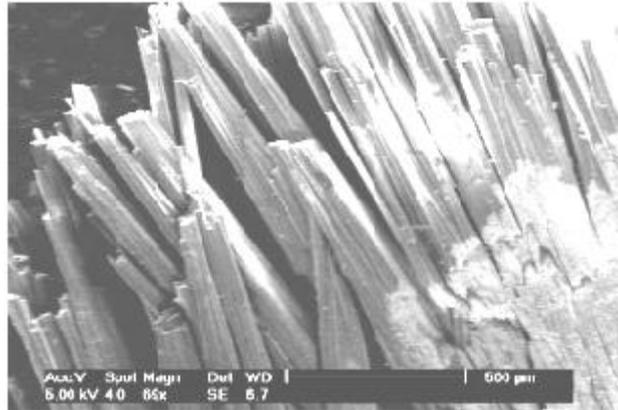
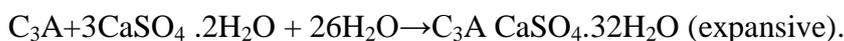


Figure 5.1: Formation de l'ettringite secondaire [98].

1. Formation de gypse dit secondaire (Figure 5.1) par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.

2. Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

Soit à partir de reliquats de C_3A anhydre.



Soit à partir de l'aluminate tétra-calcique hydraté C_3AH_13

Ou du monosulfoaluminate de calcium $C_3ASO_4H_{12}$ [99].

L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton de surface. La Figure 5.2 illustre les effets de l'attaque des sulfates qui sont dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates.

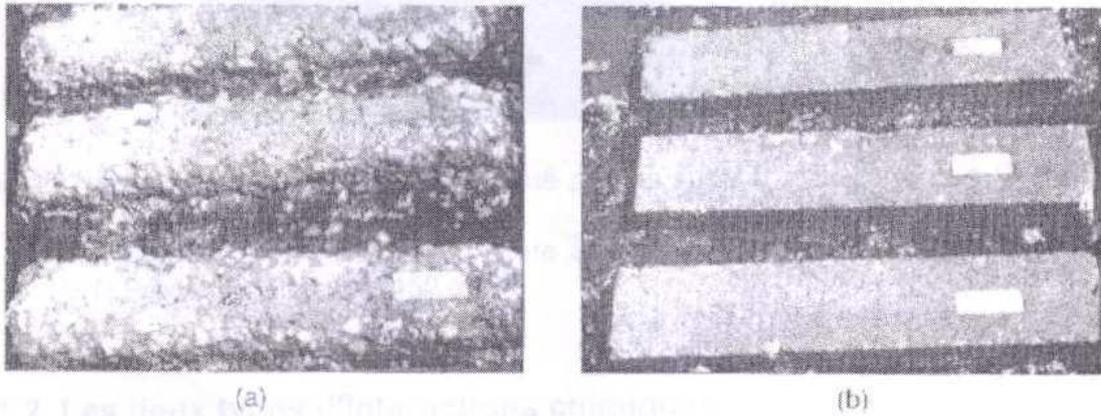


Figure 5.2: Eprouvette de béton dégradée après 5 ans de contact avec des sols riches en sulfates [100].
a) $E/C=0.5$, b) $E/C=0.39$

Les mécanismes de destruction sont en fonction de la concentration et de la source des ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs. Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive pénètre facilement, ce qui accélère le rythme de destruction. Ces expansions causent des dommages structuraux considérables. L'action des sulfates engendre une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface. Ces effets sont alors dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates. Dans le cas de l'attaque externe, les ions de sulfate pénètrent dans le béton pour déclencher une réaction. Le taux de l'attaque externe dépend du temps d'exposition. Dans le cas de l'attaque interne, les sulfates existent à l'intérieur du béton dès le mélange.

Dès les années 1950, les premières réglementations, un peu partout dans le monde, en matière de protection des ouvrages contre l'attaque sulfatique, recommandaient l'utilisation de ciment à faible rapport E/C , à taux de C_3A limité et avec certaines additions minérales tels que la pouzzolane naturelle et la fumée de silice. Ces mesures visaient à limiter la quantité d'aluminates réactifs et à ralentir la diffusion des espèces ioniques agressives depuis le milieu externe vers le milieu interne [101].

5.2.2 Attaque par les acides

Le béton est un matériau basique et se voit donc attaqué par les acides. Ceux-ci réagissent avec les corps composés à base de calcium du ciment durci: l'hydroxyde de calcium, les silicates et les aluminates de calcium hydratés. La réaction mène à la formation de sels de calcium de l'acide corrodant ainsi que de la silice(SiO_2). Ainsi, l'attaque des silicates de calcium hydratés par l'acide chlorhydrique donne le chlorure de calcium très soluble [101].

L'acide carbonique est aussi dangereux pour le béton. Même la faible quantité d'acide carbonique présente dans une eau de ruissellement pure (comme l'eau de dégel) parviendra à dissoudre très lentement le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que l'on trouve en surface des éléments en béton, délavera cette surface et entraînera une érosion superficielle. Dans le secteur agricole et dans l'industrie chimique, le béton se trouve régulièrement en contact avec des acides organiques comme les acides acétiques et lactiques ce qui peut entraîner son altération.

5.2.3 Autres types d'attaques chimiques

La plupart du temps, les attaques chimiques surviennent lorsque les agents agressifs s'associent avec l'eau pour former une solution agressive qui peut pénétrer le béton tout en entraînant d'autres substances corrosives telles que les ions. Un béton peut être exposé à d'autres agents agressifs tels que :

Gaz : Origine naturelle (CO_2) et les origines industrielles (S, N, vapeur de chlore, ...)

Liquides : Ils peuvent contenir des ions agressifs (Cl, SO_3 , ...) et Ils peuvent avoir un pH relativement faible (< 12,5)

Solides : Sols Résidus industriels

5.3 Protocole expérimental

Ce travail est basé sur les résultats des travaux expérimentaux mentionnés dans deux thèses soutenues sur la durabilité des ciments composés. La première est une thèse de doctorat d'état soutenue par Ghrici Mohamed à l'USTO (2006) [102] et dont on a sélectionné les résultats relatifs à 15% de calcaire et 30% de pouzzolane naturelle. La

deuxième thèse est celle soutenue par Boubekeur Toufik à l'UHBC (2009) [103] dans le cadre de magister et qui dont on a sélectionné les résultats relatifs à 30% de laitier.

5.3.1 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont identiques à ceux utilisés dans les précédents essais à savoir le ciment de OuedSly (Chlef), le calcaire, la pouzzolane naturelle et le laitier. Le mode de préparation et relativement semblables pour les deux travaux qui sont élaborés dans le même laboratoire.

5.3.2 Confection et préparation des mortiers

Les mortiers ont été préparés selon la norme NF EN 196-1 [104] avec une gâchée qui comporte: 450 g de ciment, 1350 g de sable et 225 g d'eau. Le rapport E/C est égal à 0.5 (constant). Les éprouvettes confectionnées sont de forme prismatiques 4x4x16 cm et comportent des combinaisons préparées à partir de différents ajouts minéraux comme le montre le Tableau 5-1.

Tableau 5-1: Composition des mortiers testés dans les essais de durabilité

	M0	M1	M2	M3
Sable (g)	1350	1350	1350	1350
Ciment (g)	450	405	315	315
Eau (g)	225	225	225	225
E/C	0.5	0.5	0.5	0.5
Calcaire (g)	0	60.75	0	0
Pozzoulane naturelle (g)	0	0	121.5	0
Laitier (g)	0	0	0	121.5

5.3.3 Déroulement des essais

5.3.3.1 Attaques des mortiers par les sulfates

Les mortiers ont été préparés dans des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm pour la détermination de l'expansion. Après le démoulage, les moules ont été conservés dans une chambre avec une température de 20°C et une humidité relative de 95 % pendant 28 jours. Après cette durée, les éprouvettes ont été placées dans une solution de 5 % de sulfate de

magnésium ($MgSO_4$) et une solution de 5 % de sulfate de sodium (Na_2SO_4). Les solutions ont été remplacées tous les 30 jours. L'expansion des éprouvettes a été évaluée chaque deux semaine où l'expansion est évaluée relativement à l'état initial de l'éprouvette.

$$\text{Expansion} = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{t_0}}{\varepsilon_{t_0}}$$

Avec:

ε_t : Dimension de l'éprouvette au temps t.

ε_{t_0} : Dimension de l'éprouvette au temps t_0 .

5.3.3.2 Attaques des mortiers par les acides

Les mortiers ont été préparés dans des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 5.2 \text{ cm}^3$. Après le démoulage, les moules ont été conservés dans une chambre avec une température de 20°C et une humidité relative de 95 % pendant 28 jours. Après cette durée, une partie des éprouvettes a été placée dans une solution de 1 % HCl et l'autre partie dans une solution de 3 % H_2SO_4 . Les solutions ont été renouvelées tous les 30 jours. La résistance chimique est déterminée selon la norme ASTM C-267-97 [105]. Chaque quinze (15) Jours d'immersion à la température ambiante, les éprouvettes sont nettoyés avec l'eau et laissées à la température ambiante pendant 30 minutes. La résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_t - M_{t_0}}{M_{t_0}} \times 100$$

M_t : masse de l'éprouvette avant l'immersion.

M_{t_0} : masse de l'éprouvette après l'immersion.

5.3.4 Détermination du coefficient d'efficacité

A partir des résultats expérimentaux de l'expansion par les sulfates et la perte de masse par les acides, on a évalué le coefficient d'efficacité de chaque substance minérale utilisée. Pour simplifier, on suppose qu'un échantillon composé de C_0 ciment donne le résultat D_0 , par contre un autre échantillon composé de $(1-p)C_0$ ciment donne $(1-p)D_0$ de résultat. S'il contient une substance minérale pC_0 , cette substance produira un résultat proportionnel à l'efficacité de la substance évaluée par $k_{ep}D_0$. On peut dire qu'un mortier composé de $(1-p)C_0$ ciment et pC_0 de substance minérale aura un résultat évalué comme suit :

$$D(p) = (1-p)D_0 + k_{ep}D_0$$

Le coefficient d'efficacité est évalué par :

$$ke = \frac{D(p) - (1-p)Do}{pDo}$$

Les valeurs du coefficient d'efficacité sont évaluées pour les additions minérales en fonction de leurs taux de substitution et de l'âge.

5.4 Résultats obtenus du coefficient d'efficacité

5.4.1 Efficacité de l'attaque par les sulfates

Les résultats de coefficient d'efficacité relatifs à l'expansion des mortiers immergés dans les solutions contenant 5 % de Na_2SO_4 et 5 % de MgSO_4 sont présentés dans les Figure 5.3et Figure 5.4. Les résultats trouvés montrent une efficacité d'expansion pour les mortiers de ciment contenant 15 % de calcaire faible est cela signifie plus d'efficacité contre l'expansion comparé à celles de 30% de pouzzolane et 30% de laitier dans les deux solutions. Cela est dû à l'influence des taux de substitution dans la formule de calcul du coefficient d'efficacité. Dans la solution A, le laitier n'engendre qu'une faible expansion par rapport au ciment et réduit l'expansion totale de la pâte, par contre la pouzzolane naturelle et le calcaire semblent être très efficace à résister contre l'expansion où cette réduction est une à deux fois l'expansion produite par le ciment.

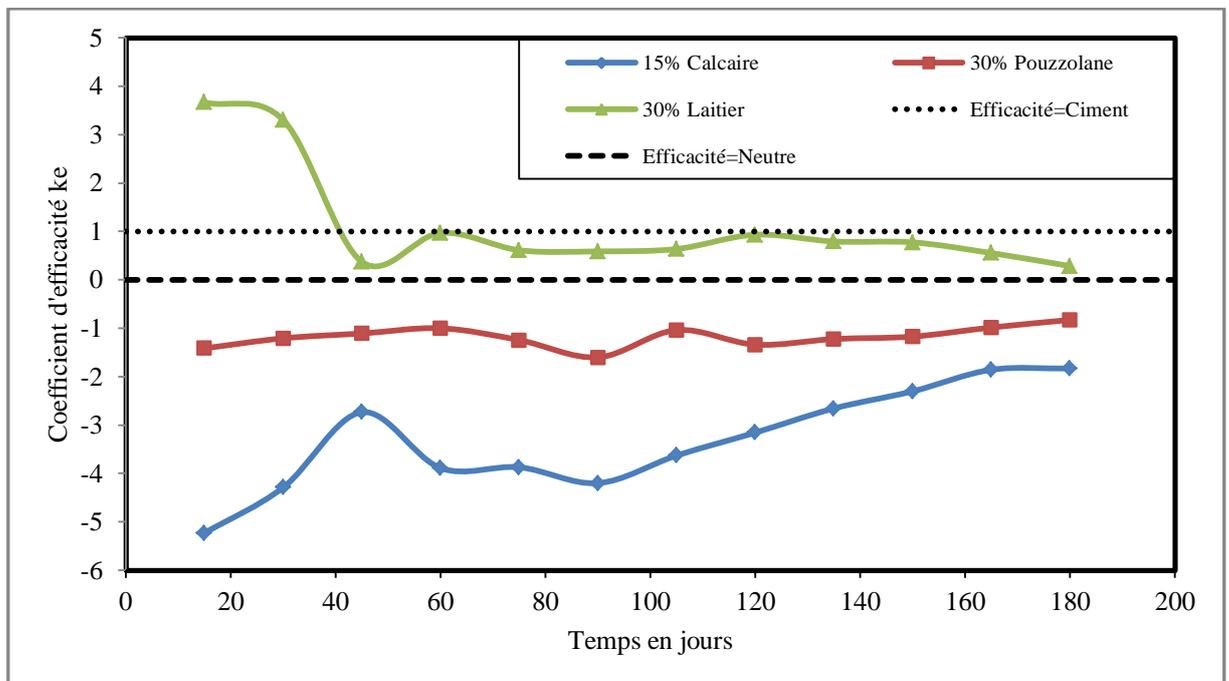


Figure 5.3: Coefficient d'efficacité d'expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion dans une solution de 5% Na_2SO_4 .

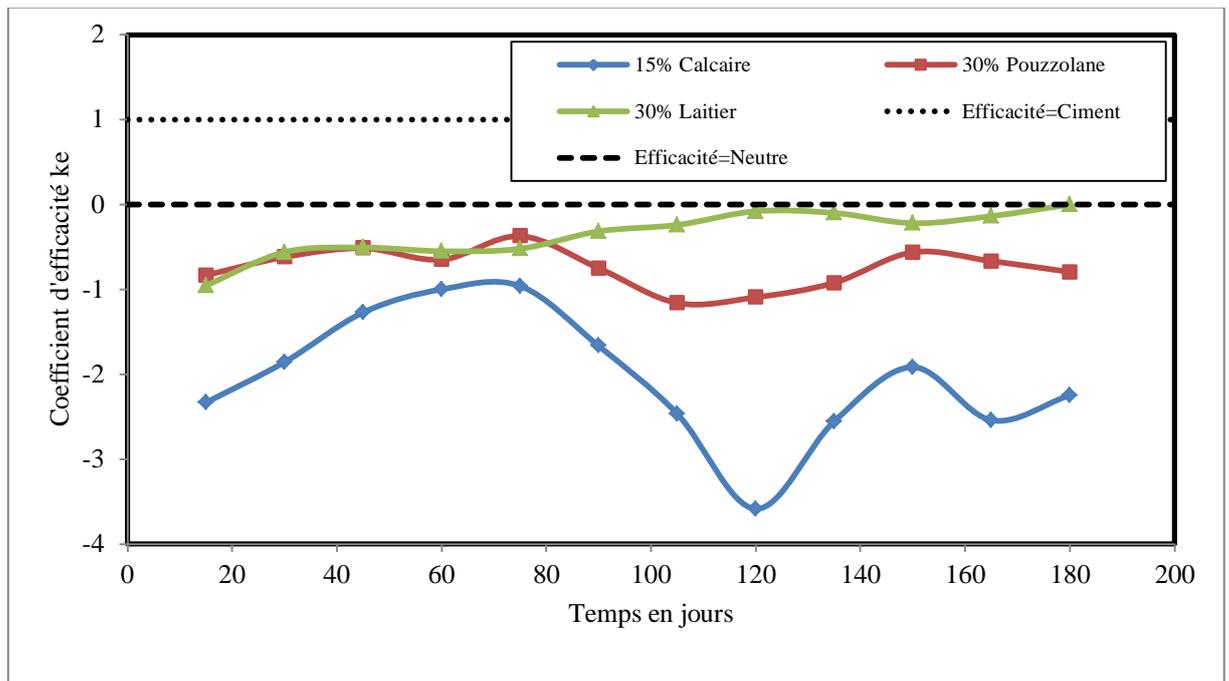


Figure 5.4: Coefficient d'efficacité d'expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion dans une solution de 5% $MgSO_4$.

Le coefficient d'efficacité à l'expansion des mortiers contenant 15% de calcaire après 180 jours d'immersion était de -1.83 dans la solution (A) et -2.24 dans la solution (B), donc l'addition de 15% de calcaire a réduit l'expansion par rapport au ciment de contrôle de 2.83 et 3.24 fois respectivement pour les solutions sulfatiques (A) et (B).

A 180 jours les mortiers de ciment contenant, 30 % de pouzzolane naturelle et 30 % de laitier présentent des coefficients d'efficacité à l'expansion respectivement de -0.82 et -0.28 placés dans la solution (A) comparé à celle placés dans la solution (B) qui présentent -0.79 et 0.00, d'où une réduction de l'expansion par rapport au mortier de contrôle de 1.82 et 1.28 pour les éprouvettes placées dans la solution (A), et l'expansion des mortiers immergées dans la solution (B) égale 1.79 et 1 fois plus par rapport au mortier de contrôle respectivement.

L'incorporation des additions minérales dans les ciments conduit à une diminution de l'expansion des mortiers immergés dans les solutions sulfatiques, en raison de la diminution de la quantité des aluminates tricalciques C_3A dans le ciment. Ces aluminates sont très sensibles à l'attaque par les sulfates [106, 107].

5.4.2 Efficacité de l'attaque par les acides

Les résultats relatifs aux attaques des mortiers des ciments contenant des différents ajouts de calcaire, de pouzzolane naturelle et de laitier dans les solutions de 1 % HCl et 3% H_2SO_4 sont présentés dans la Figure 5.5 et Figure 5.6.

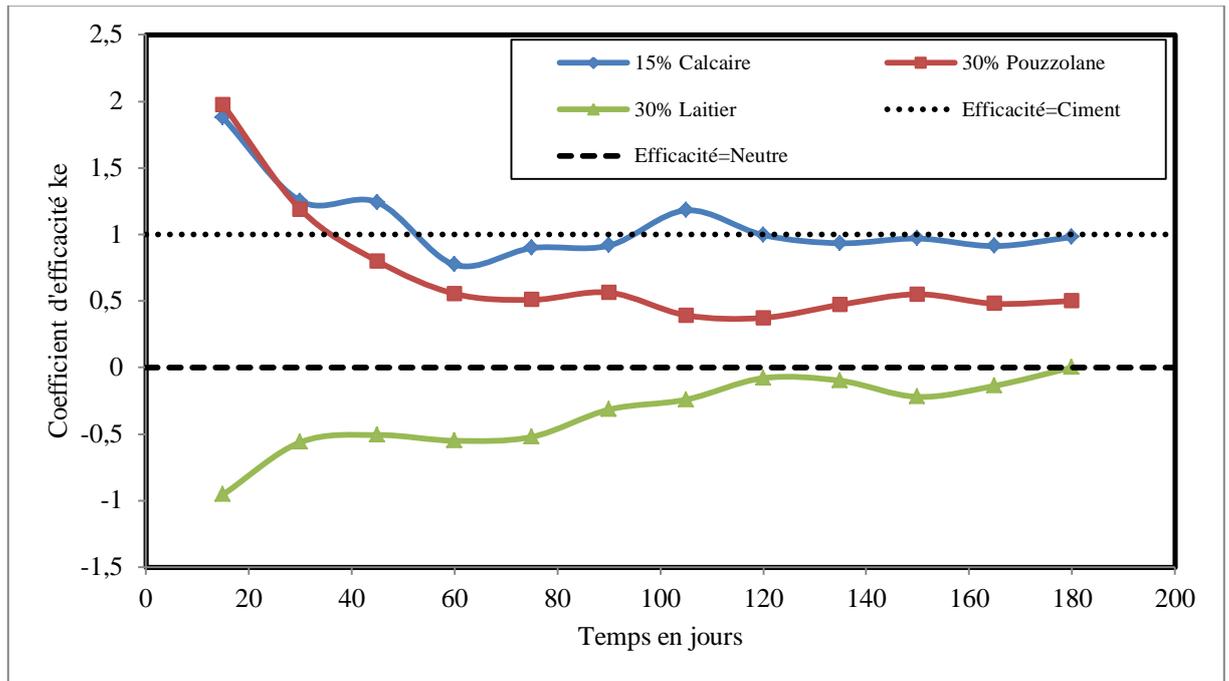


Figure 5.5: Coefficient d'efficacité de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 1 % HCl

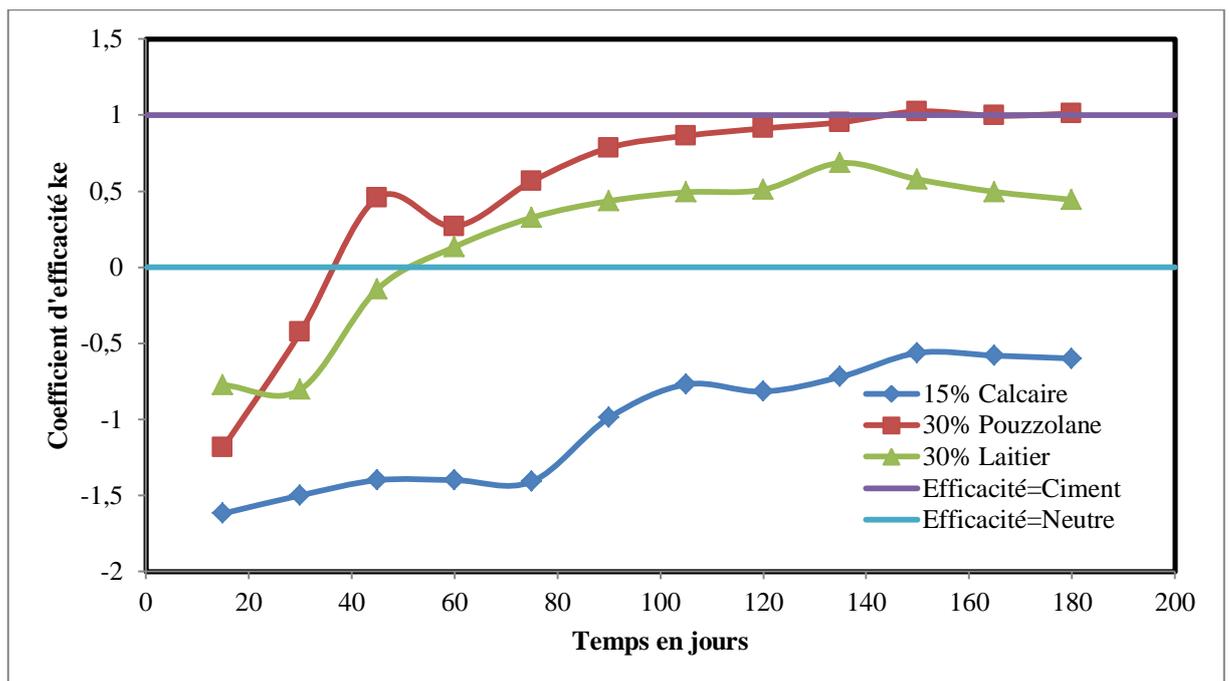


Figure 5.6: Coefficient d'efficacité de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 3 % H₂SO₄

Le coefficient d'efficacité de la perte de masse pour le ciment contenant 15 % de calcaire est presque similaire à celui du mortier de contrôle dans la solution de 1 % HCl et le coefficient diminue à -0.6 dans la solution de 3 % H₂SO₄. Cela signifie une réduction de 1.6 fois par rapport au mortier contrôle.

L'action de remplacement de 30 % de pouzzolane naturelle n'est pas importante dans la solution de 1 % HCl qui présente une réduction de -0.5 par rapport au mortier de contrôle. Elle donne des résultats presque similaires à ceux du mortier de contrôle dans la solution et de 3% H₂SO₄ ($k_e=1.01$). A 180 jours, l'incorporation de 30 % de laitier dans le ciment réduit la perte de masse par rapport au mortier de contrôle de 100 %, dans la solution de 1 % HCl, comparée à celle conservée dans la solution et de 3% H₂SO₄ qui présente 44 % de réduction.

L'action des acides consiste en une attaque sur les composants de la pâte de ciment durcie. Cette action mène à une transformation de tous les composés du calcium, résidu non réagi de C₃S et de C₂S dans les grains de ciment, à savoir hydroxyde de calcium (Ca (OH)₂), calcium de silicate hydraté et calcium d'aluminate hydraté en sel de calcium de l'acide attaquant. Comme conséquence de la transformation, la capacité de liaison du ciment durci est détruite. [106, 107].

5.4.3 Comparaison des coefficients d'efficacité

En comparant les coefficients d'efficacité trouvés selon les différentes compositions et les différentes propriétés, on aperçoit que les substances minérales agissent différemment et conduisent à des résultats divergeant. L'efficacité d'une substance minérale dépend de sa réactivité avec le clinker et de ses produits d'hydratations.

Les résultats des coefficients d'efficacité des différentes propriétés mécaniques et durabilités des mortiers avec les différents ajouts est illustrée sur la Figure 5.7.

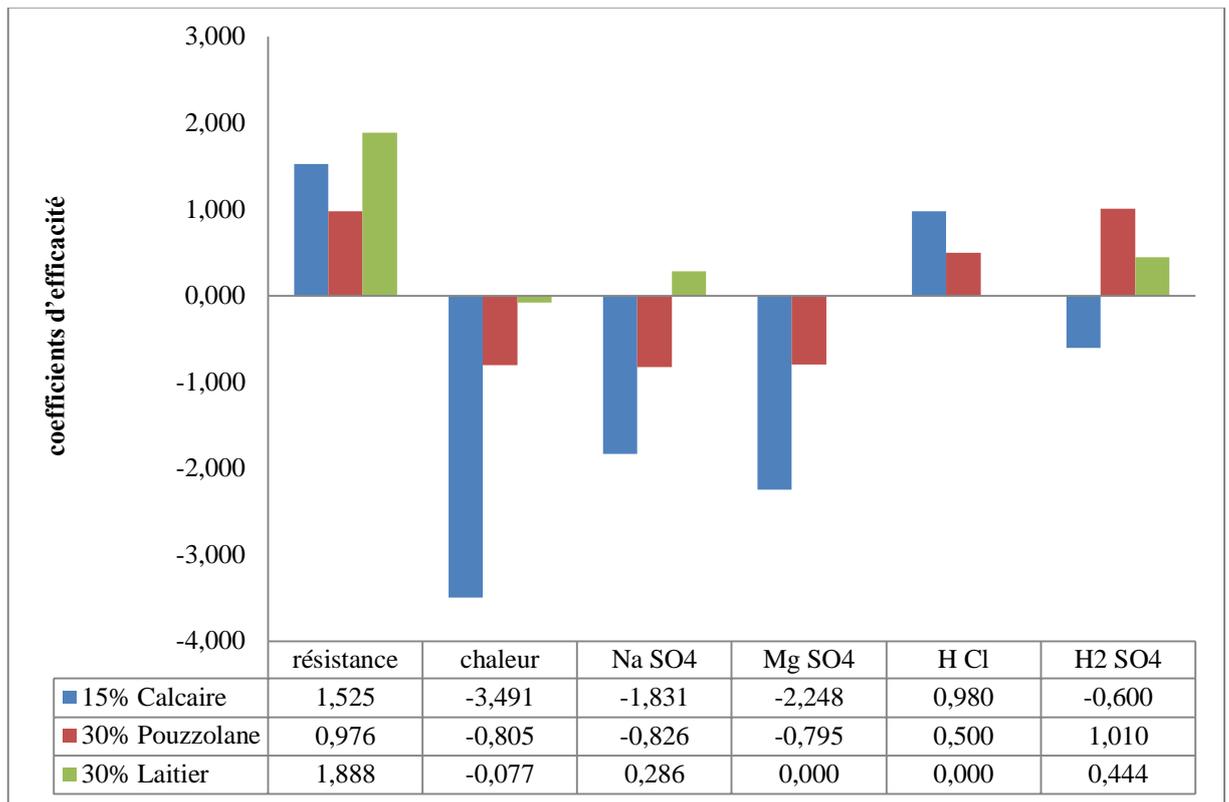


Figure 5.7: Comparaison des différents coefficients d'efficacité selon la propriété et l'addition utilisée.

A la lumière de la figure 5-7, on remarque que l'incorporation des ajouts minéraux inertes (calcaire) et actifs (Pouzzolane – Laitier) au ciment ordinaire CEM I, contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons avec ces ajouts. Ils donnent des coefficients d'efficacité de la résistance mécanique qui égalent ou surpassent ceux du mortier de contrôle, réduisent la chaleur d'hydratation et augmentent la résistivité de ces mortiers envers les attaques des milieux sulfuriques et des acides.

5.5 Conclusion

L'efficacité des différentes additions minérales est directement liée à la propriété étudiée. Le calcaire paraît le plus efficace avec une augmentation des résistances, une réduction de la chaleur et diminue l'attaque par les différentes substances agressives. Le laitier possède une durabilité modérée malgré ses performances en résistances mécaniques à long terme comparativement à la pouzzolane naturelle.

CONCLUSIONS ET
RECOMMANDATIONS

6.1 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de notre étude est d'analyser et de quantifier la contribution des additions minérales dans le développement des résistances mécaniques et l'amélioration de la durabilité. Cet objectif a été fixé suite à une analyse sur plusieurs études récentes qui ont permis de montrer que les additions minérales peuvent modifier et même améliorer les propriétés des matériaux cimentaires.

Les additions minérales choisies dans le présent travail pour évaluer le coefficient d'efficacité, sont les résidus industriels tels que le laitier d'El-Hadjar, les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane de Béni-Saf et les différents gisements de calcaire existant en Algérie et en particulier dans la région de Chlef. Ces additions présentent des intérêts incontestables du point de vue technique, économique, écologique et du point de vue durabilité envers les différentes attaques chimiques. Les résultats menés à travers cette étude permettent de dégager les conclusions générales et les perspectives pour des futurs travaux de recherche suivants.

La caractérisation des ajouts minéraux peut se faire avec la définition d'un coefficient d'efficacité qui tient compte de l'effet apporté directement sur une propriété spécifique du béton. En utilisant les résultats des résistances d'un ciment aux ajouts, nous avons pu identifier chaque ajout par un coefficient d'efficacité, qui caractérise l'apport de ce dernier, dans les formules de Féret, Bolomey et Abrams, sur les résistances mécaniques.

Les trois formules donnent des résultats comparables quand les valeurs de l'efficacité sont proches de l'unité, Et quand les valeurs diverge de l'unité que ce soit valeurs positives ou négatives, les formules donnent des résultats éloignés, mais la formule du bolomey donne des résultats plus proches de la formule de Féret,

L'analyse de ce coefficient en fonction de l'âge et du taux de substitution, nous a donné une idée très claire sur la contribution des ajouts et de leurs réactivités avec le clinker. Ainsi, nous pouvons facilement déterminer l'âge pour atteindre une efficacité similaire à celle du ciment ou une autre efficacité désirée en faisant varier les conditions de formulation des éprouvettes. Ainsi, les modèles classiques de prévision des résistances peuvent être corrigés. En introduisant le coefficient d'efficacité de l'ajout dans ces formules.

Pour les taux de substitution faible, le calcaire et la pozzolane donner une très forte activité au jeune âge. A long terme leurs efficacités augmentent et prennent des valeurs égales ou supérieures à l'unité. Pour des taux de substitution modérés le coefficient d'efficacité au jeune âge augment pour les trois ajouts avec un peu plus d'avantage pour le calcaire et après la deuxième semaine celui du calcaire chute et converge vers une valeur nulle, et d'efficacité de pozzolane et de laitier croissent et deviennent meilleurs que le ciment ordinaire dès la deuxième semaine de cure.

Pour des taux de substitution élevés l'efficacité du laitier au jeune âge est impressionnante suivi par la pozzolane alors que le calcaire n'atteint qu'une efficacité de 0.2 à 7 jours. Après la deuxième semaine efficacité de laitier est dépassée l'unité. L'efficacité de la pozzolane se stabilise autour de 0.8 après la troisième semaine de cure tandis que le calcaire prend des valeurs pratiquement nulle ce qui justifie son caractère neutre.

Aussi dans ce travail, nous avons évalué le coefficient d'efficacité à partir des résultats de chaleur d'hydratation, Et nous avons trouvé que. Le coefficient d'efficacité d'hydratation pour les trois ajouts augment au cours du temps mais toujours avec des valeurs négatives, des valeurs qui témoignent de la passivité de l'ajout et de son rôle de diminuer la chaleur totale dégagée. Pour des taux de substitution un peu élevés les valeurs semblent convergées valeurs des valeurs voisine quelque soit le temps de mesure. A l'exception du calcaire qui donne des coefficients à 4 jours possédant un changement de comportement particulier dû probablement à son caractère inerte.

L'efficacité des différentes additions minérales est directement liée à la propriété étudiée. Le calcaire paraît le plus efficace avec une augmentation des résistances, une réduction de la chaleur et diminue l'attaque par les différentes substances agressives. Le laitier possède une durabilité modérée malgré ses performances en résistances mécaniques à long terme comparativement à la pozzolane naturelle.

Ainsi que pour la durabilité, l'efficacité des différentes additions minérales donne les résultats inférieurs à l'unité, pour chacune des deux propriétés l'expansion et la perte de masse, et Par conséquent, augmentent la résistivité de ces mortiers envers les attaques des milieux sulfuriques et des acides.

Le laitier n'engendre qu'une faible expansion par rapport au ciment et réduit l'expansion totale de la pâte, par contre la pozzolane naturelle et le calcaire semblent être

très efficace à résister contre l'expansion où cette réduction est une à deux fois l'expansion produite par le ciment. L'addition de 15% de calcaire a réduit l'expansion par rapport au ciment de contrôle de trois fois pour les solutions sulfatiques. Le coefficient d'efficacité de la perte de masse pour le ciment contenant 15 % de calcaire est presque similaire à celui du mortier de contrôle dans la solution de 1 % HCl et 1.6 fois dans la solution de 3 % H₂SO₄ par rapport au mortier contrôle.

A la lumière de coefficients d'efficacité, l'incorporation des ajouts minéraux inertes (calcaire) et actifs (Pouzzolane – Laitier) au ciment ordinaire CEM I, contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers confectionnés avec ces ajouts. Le calcaire paraît le plus efficace avec une augmentation des résistances, une réduction de la chaleur et diminue l'attaque par les différentes substances agressives. Le laitier possède une durabilité modérée malgré ses performances en résistances mécaniques à long terme comparativement à la pouzzolane naturelle.

Recommandations

Le travail effectué dans cette thèse étudier certains paramètres qui influent sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers et bétons, par l'introduction de coefficient d'efficacité qui caractérisant la contribution de l'addition minérale dans le développement des résistances mécaniques et l'amélioration de sa durabilité, ce domaine peut être approfondi et enrichi en procédant des futures recherches sur les autres propriétés et pour des bétons contenant d'autres ajouts cimentaires comme la fumée de silice et les cendres volantes et la validation des résultats obtenues.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

1. FEBELCEM, "*historique de ciment*", la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, <http://www.febelcem.be>.
2. Béton[s] le Magazine, "*production mondiale du ciment*", <http://www.betons-lemagazine.fr/>.
3. Bendib A., "*historique du ciment et situation de la production du ciment en Algérie de 1962 à 2005*", Le Groupe Industriel et Commercial de Ciment ERCE-GIS.
4. Baron J., Ollivier J.P., "*Les bétons : bases et données pour leur formulation*", Edition Eyrolles, 1997, 522p.
5. NF P18-506, "*Additions pour béton hydraulique-laitier vitrifié moult de haut fourneau*", 1992, 4p
6. NF EN 206-1, "*Spécification, performances, production et conformité*", Béton partie I, 2002, 77p.
7. NF EN 450, "*Cendres volantes pour béton- définition, exigences et contrôle de qualité*", 1995
8. NF P18-508, "*Additions pour béton hydraulique- additions calcaires-spécification et critères de qualité*", 1994, 4p
9. Pierre-Discount.com, "*LaPouzzolane*", <http://www.pierre-discount.com/pouzzolane.html>.
10. Kwan A.K., "*Use of condensed silica fume for making high-strength self-consolidating concrete*", Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, Vol. 27, pp.620-627.
11. Lewandowski R., "*Versuchsreihe mit Flugasche – Ein fluss von Flugasche-Stauben unterschiedlicher Qualität auf die betoneigenschaften*", Baugewerbe, 1983, pp. 44-49.
12. Kara A.R., "*Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires*", Thèse de doctorat, l'université de Cergy-pontoise, 2002, 202p.
13. Lawrence p., "*l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires*", Thèse de doctorat de l'INSA, Toulouse, 2000.
14. Kronolof A., "*Effect of very fine aggregate on concrete strength*", Materials and Structures, Vol.27, 1994, pp. 15-25.
15. Feldman R.F., Cheng-GIM., "*Hydration reactions in Portland cement silica-fume blends*", Cement and Concrete Research, Vol.15, 1985, pp.585-592.
16. Gutteridge W.A., Daziel J.A., "*Filler cement: the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement*", Cement and Concrete Research, Vol. 20, 1990, pp. 778- 782.
17. Neville A.M., "*Les propriétés des bétons*", Edition Eyrolles, 2000, 806p.
18. Caré S., Linder R., Baroghel-Bouny V., Larrard F., Charonnat Y., "*Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons- Plan d'expérience et analyse statique*", LCPC, février 2000, 102p.
19. Jiang S., Van Damme H., "*Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C₃S*", Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans, France, 1996.
20. Benezet J.C., Benhassaine A., "*The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder*", Powder Technology, Vol. 103, 1999, pp.26-29.
21. Waller V., "*Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression*", Thèse de Doctorat, Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1999, 297p.
22. Ecocem Ireland Ltd., "*Concrete mix design using GGBS*", www.ecocem.ie, Ireland.

23. Carette G.G., Malhotra V.M., "Characterization of Canadian fly ashes and their performance in concrete", Division Report, MRP/MSL (OP&J), CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, 1984, pp. 84-137.
24. Lane R.O., Best J.F., "Properties and use of fly ash in Portland cement concrete", Concrete International, Vol. 4, 1982, pp. 81-92.
25. Davis R.E., Canson R.W., Keily J.W., Davis H.E., "Properties of cements and concretes containing fly ash", ACI Journal, Vol. 33, 1937, pp. 577-612.
26. Maage M., "Silikastovsvannebehov, storkningav pasta-prver", Report STF65 F82018, FCBSINTEF, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, March 1982.
27. Meland I., "Influence of condensed silica fume and fly ash on the heat evolution In cement pastes", Proceedings, First International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete; Montebello, Canada ; Editor : V.M. Malhotra; AGI Special Publication SP-79, 1983, pp. 665-676.
28. Beilander U., "Experiences with silica fume in ready-mixed concrete", Report BML 82.610; The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, Feb. 1982, pp. 257-264.
29. Wainwright P.J., Rey N., "The influence of ground granulated blast furnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete", Cement and Concrete Composites, Vol. 22, 2000, pp. 253-257.
30. Wan H., Shui Z., Lin Z., "Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties", Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 133-137.
31. Massazza P., Costa U., "Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements" II Cemento, Vol. 76, No. 1, 1978, pp. 3-18.
32. Mehta P.K., "Studies on blended Portland cements containing Santorum earth", Cement and Concrete Research, Vol. 11, 1981, pp. 507-518.
33. Johansen R., "Risstendersvedplastisksvinn", Report STF65 A80016, FCB/SINTEF; The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, March 1920.
34. Malhotra V.M., Carette G.G., "Mechanical properties of concrete incorporating both slag and condensed silica fume", Proceedings, ACI/RILEM Symposium on Technology of Concrete When Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures Are Used; Monterrey, Mexico, 1985, pp. 395-414.
35. Wolsiefer J., "Ultra high strength field place able concrete in the range 10,000 to 18,000 psi (69 to 124 MPa) ", presented at the 1982 Annual Convention, American Concrete Institute, Atlanta, Georgia, USA, Jan 1982.
36. Wainwright P.J., Ait-Aider H., "The influence of cement source and slag additions on the bleeding of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 25, N°7, 1995, pp. 1445-1456.
37. Olorunsogo F.T., "Particle size distribution of GGBS and bleeding characteristics of slag cement mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 28, N°6, 1998, pp. 907-919.
38. ASTM C 232, "Standard Test Methods for Bleeding of Concrete," Annual Book of ASTM Standards, Cement; Lime; Gypsum, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Vol. 04.02, 1992.
39. Nicolaidis N., "Santorin earth - an active admixture In Greek Portland cements", Athens proceedings, Thirtieth International Congress of industrial Chemistry, 1957.
40. Davis R.E., Klein A., "Effect of the use of diatomite treated with air entraining agents upon properties of concrete", ASTM, Special Technical Publication, 1950, pp. 99-108.
41. Mehta P.K., "Concrete", Structure Properties and Material Prentice-Hall Inc, 1986, 438p.

42. Raba F.Jr., Smith S.L., Mearing M., "*Subbituminous fly ash utilization in concrete*", Proceedings, Symposium on FlyAsh Incorporation in Hydrated Cement Systems; Editor, Sidney Diamond; Materials Research Society; Boston, 1981, pp. 296-306.
43. Crow R.D., Dunstan E.R., "*Properties of fly ash concrete*", Proceedings, Symposium on Fly Ash Incorporation in Hydrated Cement Systems; Editor, Sidney Diamond; Materials Research Society; Boston, 1981, pp. 214-225.
44. Philleo R.E., "*Fly ash in mass concrete*", Pittsburg: Proceedings, First International Symposium on FlyAsh Utilization; Information Circular IC 8348; U.S. Bureau of Mines, March 14-16, 1967. pp. 60-79.
45. Compton F.R., MacInnis C., "*Field trial off fly ash concrete*", Ontario Hydro Research News, Jan.-Mar. 1952, pp. 18-21.
46. ACI Committee 211.1.81., "*Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete*", ACI Manual of Concrete Practice, Vol. 211, 1984, pp. 1-81.
47. Ghosh R.S., Timusk J., "*Creep of fly ash concrete*", ACI Journal, Vol. 78, N°5, 1981, pp. 351-357.
48. Gifford P.M., Ward, M.A.I., "*Results of laboratory tests on lean mass concrete utilizing PFA to a high level of cement replacement*", Proceedings, International Symposium on the Use of PFA in Concrete; University of Leeds, England Editors, J.A. Cabrera and A.R. Cusens, 1982, pp. 221-230.
49. Buil M., Acker P., "*Creep of silica fume concrete*", Cement and Concrete Research, 1985, Vol. 15, pp. 463-466.
50. Bernhardt C.I., "*SiO₂-stof somsementtilsetning*", Betongen1 dag, Vol. 2, N°17, April 1952, pp. 29-53.
51. Pepper L., Mather B., "*Effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction*", proceedings ASTM, Vol. 59, pp. 1178-1203.
52. Jähren P., "*Use of silica fume in concrete*", Proceedings of the First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Others Mineral By-Products in Concrete, Vol. SP-79, 1983, pp. 625-642.
53. Hobbs D.W., "*Influence of fly ash upon the workability and early strength of concrete*", Proceedings of the First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Others Mineral By-Products in Concrete, Vol. SP-79, 1983, pp. 289-306.
54. Sellevold E.J., Radjy F.F., "*Condensed Silica Fume (Micro-silica) in Concrete: Water Demand and Strength Development*", Proceedings of the First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Others Mineral By Products in Concrete, 1983, pp. 677-694.
55. Warris B., "*Strength of concrete containing secondary cementing materials*", Proceedings of the First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Others Mineral By-Products in Concrete, Vol. SP-79, 1983, pp. 539-557.
56. Gopalan M.K., Haque M.N., "*Design of fly ash concrete*", Cement and Concrete Research, Vol. 15, N°4, 1985, pp. 694-702.
57. Gopalan M.K., Haque M.N., "*Mix design for optimal strength development of fly ash concrete*", Cement and Concrete Research, Vol. 19, N°4, 1989, pp. 634-641.
58. Lawrence P., Ringot E., "*Prise en compte des additions minérales dans le calcul des résistances de mortiers*", Revue française de génie civil, Vol. 4, N°4, 2000, pp. 525- 542.
59. Cyr M., Lawrence P., Ringot E., Carles G., "*Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales*", Matériaux et Constructions, Vol. 33, 2000, pp. 466-472.

60. Babu K.G., Prakash P.V.S., "Efficiency of silica fume in concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 25, N°6, 1995, pp. 1273-1283.
61. Babu, K.G., Rao G.S.N., "Efficiency of fly ash in concrete with age", Cement and Concrete Research, Vol. 26, N°3, 1996, pp. 465-474.
62. Uyan M., Pekmezci B.Y., Onat O.B., "Determination of efficiency factors of GGBS on mortar specimens", Proceedings of the 6th International congress on advances in civil engineering, Istanbul, 2004, 10 p.
63. Pekmezci B.Y., Akyuz S., "Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, N°12, 2004, pp. 2175-2179.
64. Wong H.S., Abdul-razak H., "Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement", Cement and Concrete Research, Vol. 35, N°4, 2005, pp. 696-702.
65. Duval R., Kadri E.H., "Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 28, N°4, 1998, pp. 533-547.
66. Ezziane K., Bougara A., Kassoul A., Kadri A., "Determination of the efficiency coefficient of slag under various mixing and curing conditions", Advances in Cement Research, Vol. 18, N°3, 2006, pp. 103-110.
67. Papakadis V.G., Tsimas S., "Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design", Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 1525-1532.
68. Boubitsas D., "Long-term performance of concrete incorporating ground granulated blast furnace slag", Proceedings, 8th International Conference on Fly Ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, 2004, pp. 265-279.
69. Antiohos S., Maganari K., Tsimas S., "Evaluation of blends of high and low calcium fly ashes for use as supplementary cementing materials", Cement & Concrete Composites, Vol. 27, N°4, 2005, pp. 349-356.
70. Persson B., "Seven-year study on the effect of silica fume in concrete", Advanced Cement Based Materials, Vol. 7, 1998, pp. 139-155.
71. Papadakis V.G., Antiohos S., Tsimas S., "Supplementary cementing materials in concrete Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor", Cement and Concrete Research, 2002, Vol. 32, pp. 1533-1538.
72. Boukhatem B., Ghrici M., Kenai S., Tagnit-Hamou A., "Prediction of the efficiency of GGBFS in concrete using artificial neural networks", ACI Material Journal, Vol. 11, N°108, 2011, pp. 55-63.
73. Babu V.S., Kumar R., "Efficiency of GGBS in concrete", Cement and Concrete Research, 2000, Vol. 30, pp. 1031-1036.
74. Mebrouki A., Belaribia N.B., Bouhamou N., Cyr M., "Contribution à l'étude de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers", CITDUB Bab-Ezzouar, 2004, 9p.
75. Guettache M., "Contribution à la valorisation des laitiers de haut-fourneau d'El-Hadjjar dans le domaine de la construction: caractérisation des matériaux élaborés", Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine, 2002, 210p.
76. Granitex, "Medaplast SP 40, superplastifiant, haut réducteur d'eau", Fiche technique, édition 10/01, 1p.
77. NF P 15-403, "Sable normal, mortier normal", AFNOR, Paris, 1996.
78. EN 196-1, "Méthodes d'essais de ciments, détermination des résistances mécaniques", 1987, 24p.

79. NF 15-436, "*Mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi adiabatique (méthode du calorimètre de Langavant)*", 1988, 21p.
80. NF 15-433. "*Essais de retrait et gonflement*", 1963, 2p.
81. Roy D.M., Idom G.M., "*Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag cements, Mortars, and concrete*", ACI Journal, Vol. 79, N°6, Nov-Dec 1982, pp.444- 457.
82. Ma W., Sample D., Martin R., Brown P.W., "*Calorimetric Study Of Cement Blends Containing Fly Ash, Silica Fume and Slag At Elevated Temperatures*", Cement Concrete and Aggregates, CCAGPD, Vol. 16, N°2, Dec 1994, pp.93-99
83. Pane I., Hansen W., "*Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis*", Cement and Concrete Research, Vol. 35, N°6, 2005, pp.1155-1164.
84. Douglas E., Elola A., Maihotra Y.M., "*Characterization of ground granulated blast furnace slag and fly ashes and their hydration in Portland blends*", Cement Concrete and Aggregates, Vol. 12, N°2, 1990, pp.38-46.
85. Shang Y., Sun W., Liu S., "*Study on the hydration heat of binder paste in high performance concrete*", Cement and Concrete Research, Vol. 32, N°9, 2002, pp. 1483- 1488.
86. Sanchez de Rojas M.I., Frias M., "*The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars*", Cement and Concrete Research, Vol. 26, N°2, 1996, pp.203-213.
87. Sanchez de Rojas M. I., Frias M., "*The influence of silica fume on the heat of hydration of Portland cement*", Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume slag and natural pozzolans in concrete, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1995, pp.829-843.
88. Alshamsi A.M., "*Microsilica and ground granulated blast furnace slag effects on hydration temperature*", Cement and Concrete Research, Vol. 27, N°12, pp.1851-1859.
89. Kadri E., Duval R., "*Effect of ultra-fines particles on heat of hydration of cement mortars*", ACI Materials Journal, Vol. 99, N°2, March-April, 2002, pp. 138-142.
90. Usharov-Marshak A.V., Krivenko P.V., Pershina L.A., "*The role of solid phase basicity on heat evolution during hardening of cement*", Cement and Concrete Research, Vol. 28, N°9, 1998, pp.1289-1296.
91. Escalante-Garcia J. I., Sharp J.H., "*The effect of temperature on the early hydration of Portland cement and blended cement*", Advances in Cement Research, 2000, Vol. 12, N°3, pp.121-130.
92. Rahhal R., Talero R., "*Early hydration of Portland cement with crystalline mineral additions*", Cement and Concrete Research, Vol. 35, N°7, 2004, pp. 1285-1291.
93. Hwang C.L., Shen D.H., "*The effects of blast furnace slag and fly ash on the hydration of Portland cement*", Cement and Concrete Research, Vol. 21, N°4, 1991, pp.410-425.
94. Xu Y., Chung D.D.L., "*Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement*", Cement and Concrete Research, Vol. 30, N°1, 2000, pp.59-61.
95. NF 15-436, "*Mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi adiabatique (méthode du calorimètre de Langavant)*", 1988, 21p.
96. Guillon E., "*Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles*", Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, France, 2004.
97. Vernet C., "*Stabilité chimique des hydrates, mécanisme de défense de béton face aux agressions*", La durabilité de béton, presse de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN-2-85978-184-6, Paris 1992, pp. 137-150.

98. Southanama M., "*Mécanisme proposer par les sulfates*", article-India institut of thécnology, Chanai, India, School of civil engineering, Rerche University, USA.
99. Baron J., "*Introduction à la durabilité des bétons*", La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussés, ISBN 2-85978-184-6, Paris 1992, pp : 23-40.
100. Hermann K., "*Résistance chimique*", article 2002, Internet, pp. 1-6.
101. Apers J., "*Durabilité du béton*", Technologie du béton, Groupement Belge du Béton, Bruxelles, 1998.
102. Ghric iM., "*Etude des propriétés physico Mécaniques et de la durabilité des ciments à base de pouzzolane naturelle*", Thèse de doctorat d'état en génie civil, USTMB d'Oran, Algérie, 2006.
103. Boubekour T., "*Effet des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire*", Mémoire de magistère en génie civil, UHBC à Chlef, Algérie, 2009.
104. NF EN 196-1, "*Méthodes d'essais des ciments - partie 1: Détermination de la résistance*", 1996, 31p.
105. ASTM C 267-97, "*Standard test method for chemical resistance of mortar*", Annual Book of ASTM, Vol. 04, 2005.
106. Gané R., "*Durabilité et réparations du béton GCI-714*", Cours de béton, Université de Sherbrooke, 2002, 53p.
107. Pipilikaki P., Katsioti M., "*Study of the hydration process of quaternary blended cements and durability of the produced mortars and concretes*", Construction and Building Materials, Vol. 23, N° 6, 2009, pp. 2246-2250.