

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de
la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Sciences et Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Civil



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة حسيبة بن بوعلي بالشلف
كلية العلوم و علوم الهندسة
قسم الهندسة المدنية

Mémoire de Magister

Spécialité : Génie Civil

Option : construction

Evaluation des Performances Des Ciments Portland au Calcaire -Exemple de la cimenterie de Chlef-

Présenté et soutenu publiquement par :

Toufik BOUBEKEUR

Le 05/12/2009 devant les membres du jury :

Dr. Belkacem LAMRI	Maître de Conférences "A", Université de Chlef	Président
Dr. Mohamed Nadjib OUGDIT	Maître de Conférences "A", USTHB, Alger	Examinateur
Dr. Karim EZZIANE	Maître de Conférences "A", Université de Chlef	Examinateur
Dr Ali MAKHELOUF	Maître de Conférences "A", Université de Chlef	Encadreur
M. Bensaid BOULEKBACHE	Maitre Assistant "A", Université de Chlef	Co-encadreur

Promotion : 2009

Remerciements

Ce travail a été réalisé sous la supervision de *Dr Ali MAKHELOUF*, Maître de Conférence à l'université Hassiba Benbouali de Chlef et *M Bensaid BOULEKBACHE*, Maître Assistant à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.

En cette fin de thèse, je voudrais adresser mes vœux de remerciements à mes encadreurs qui ont été attentifs à l'évolution de mes recherches et ont apporté toute leur contribution pour mener à bien mes travaux.

Je remercie sincèrement *Dr Belkacem LAMRI* Maître de Conférences à l'université Hassiba Benbouali de Chlef, Qui a bien voulu accepter de présider ce Jury.

J'adresse mes plus vifs remerciements à *Dr Karim EZIANE*, Maître de Conférences à l'université Hassiba Benbouali de Chlef et *Dr Mohamed Nadjib OUDJIT*, Maître de Conférences à l'université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene d'Alger qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier profondément le Directeur de la cimenterie de Oued Sly de Chlef et tout particulièrement le chef de service du laboratoire *Mme N. KEROUZI* et *M. ALI BENAMARA* responsable de la qualité, *Salah BACHA*, *AEK TOUIL*, *CHEKELAM* ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire de contrôle de la cimenterie, où j'ai effectué mon travail expérimental.

Mes remerciements chaleureux à *M. Said NOURI*, chef de département de Génie Civil, qui m'a facilité l'accès sans conditions au laboratoire MDC sans oublier *M. Berkane GUIDOUNE*.

A tous les enseignants du département de Génie Civil de l'Université de Chlef.

A mes parents, mon frère *Smail*, et mes sœurs, qui sont restés à mes côtés pour me soutenir pendant les trois années de thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes collègues *Habib*, *Yacine*, *Brahim*, qui m'ont encouragé et soutenu au cours de la thèse.

A tous mes amis de la promotion de post-graduation (2006 - 2009).

ملخص

تعمل مخابر البحث على تطوير و تجديد مكونات إسمنتية جديد و هذا بهدف تحسين الخواص الميكانيكية و الفيزيائية للإسمنت. إن ديمومة الإسمنت تتغير مع مكوناتها.

يهدف هذا البحث إلى دراسة الخواص الفيزيائية و الميكانيكية و ديمومة الإسمنت الذي يحتوى على الكلس. دراسة إضافة خبث أفران مصنع على الخواص الميكانيكية و ديمومة الإسمنت الذي يحتوى على الكلس، مما يسمح لنا باختبار الخلطات المثلثي من خبث الأفران و الكلس

أثبتت النتائج التأثير الايجابي لاستعمال مضافين في نفس الوقت (10 % كلس + 30 % خبث الأفران) على تحسين المقاومة الميكانيكية على المدى البعيد و مقاومة الأحماض الكيماوية للإسمنت الذي يحتوى على الكلس.

Résumé

Les laboratoires de recherche travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des ciments. La durabilité du ciment change en fonction de sa composition.

Cette étude a pour but d'évaluer les performances des ciments à base d'ajout binaire (calcaire+laitier), du point de vue résistances mécaniques et durabilité. Ceci permettra de sélectionner les couples optimums « calcaire/laitier » les plus efficaces.

Les résultats montrent que les ciments à base de calcaire présentent des résistances mécaniques à long terme faible et de mauvaises résistances aux attaques par les agents agressifs. L'incorporation de 30 % de laitier dans les ciments contenant du calcaire contribue à l'amélioration de la résistance à long terme. De même, la résistance aux attaques par les sulfates et les acides a été nettement améliorée

Abstract

The research laboratories work on the development of new cementitious composites with an aim of improving the mechanical and physical properties of cement. The durability of cement changes according to its composition.

The aim of this study is to examine the performances of cements containing limestone and the effects of the slag on from performances of cements containing limestone the mechanical resistances point of view and durability. This will make it possible to select the optimum couples "limestone-slag" most effective.

The results show that the incorporation of 30 % of slag in cements containing limestone contributes to the improvement of resistance at long term. In the same way, resistance to the attacks by sulphates and the acids were clearly improved.

Table des matières

Chapitre I

I.1 Introduction	01
------------------	----

Chapitre II

Microstructure et propriétés fondamentales des pâtes de ciments

II.1 Historique	05
II.2 Fabrication de ciment	06
II.2.1 Extraction et concassage	06
II.2.2 Préparation du cru	07
II.2.3 Cuisson ou calcination	08
II.2.4 Broyage	10
II.2.5 Les expéditions	10
II.3 Propriétés du ciment	11
II.3.1 Propriétés physiques	11
II.3.1.1 Finesse de mouture	11
II.3.1.2 La consistance	11
II.3.1.3 La prise	11
II.3.1.4 Retrait	11
II.3.1.5 Expansion	11
II.3.2 Propriétés mécaniques	12
II.3.3 Spécifications des ciments	12
II.3.3.1 Classification des ciments	12
II.3.3.2 Spécifications physiques et mécaniques	14
II.4 Hydratation du ciment	14
II.4.1 Hydratation des silicates	14
II.4.2 Hydratation des aluminates	15

Chapitre III

Utilisations des ajouts dans le ciment

III.1 Classification des ajouts cimentaires	18
III.1.1 Additions de type I	18
III.1.2 Additions de type II	19
III.2 Utilisation des ajouts dans la fabrication du ciment en Algérie	21
III.2.1 Introduction	21
III.2.2 Cimenterie de Chlef	22

Chapitre IV

Propriétés des ciments avec ajouts

IV.1 Hydratation des ciments avec ajouts	24
IV.1.1 Hydratation du ciment portland	24
IV.1.2 Action du calcaire sur l'Hydratation du ciment portland	25
IV.1.2.1 L'hydratation de C_3A	26
IV.1.2.2 L'hydratation de C_3S	27
IV. 2 Propriétés mécaniques des ciments avec ajouts	28
IV.3 La durabilité du ciment avec ajouts	34
IV.3.1 Introduction	34
IV.3.2 La perméabilité	34
IV.3.3 L'absorption	37
IV.3.4 L'attaque par les ions chlores	38
IV.3.4.1 Mécanisme de l'attaque par les chlorures	38
IV.3.4.2 Effet des ajouts cimentaires sur la perméabilité aux ions chlores	39
IV3.5 L'attaque par les sulfates	40
IV.3.5.1 Les sources des sulfates	41
IV.3.5.2 Mécanisme de l'attaque par les sulfates	41
IV.3.5.3 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance aux sulfates	42
IV.3.6 L'attaque par les acides	46
IV.3.6.1 Mécanisme de l'attaque par les acides	46

IV.3.6.2	L'effet des ajouts cimentaires sur la résistance aux acides	46
IV.3.7	L'attaque par les alcalis réaction	47
IV.3.7.1	Le mécanisme de l'attaque par l'alcali réaction	47
IV.3.7.2.	Effet des ajouts cimentaires sur la résistance aux alcalis réaction.	48
IV.4	Conclusion	50

Chapitre V

Matériaux et méthode d'essai

V.1	Introduction	52
V.2	Matériaux utilisés	52
V.2.1	Ciment	52
V.2.2	Le calcaire	53
V.2.3	Le laitier	53
V.2.4	Le sable	54
V.2.5	L'eau	54
V.3	Essais mécaniques	54
V.3.1	Confection et préparation des mortiers	54
V.3.2	Essai de la résistance à la traction par flexion	55
V.3.3	Essai de la résistance à la compression	56
V.4	la durabilité	57
V.4.1	Attaque des mortiers par les sulfates	57
V.4.2	Attaque des mortiers par les acides	58

Chapitre VI

Analyse Des Résultats Expérimentaux

VI.1	Propriétés physiques	61
VI.1.1	Consistance normale	62
VI.1.1.1	Effet du calcaire	62
VI.1.1.2	Effet du laitier	63
VI.1.1.3	Effet des couples calcaire/laitier	64

VI.1.2 Temps de prise	65
VI.1.2.1 Effet du calcaire	65
VI.1.2.2 Effet du laitier	65
VI.1.2.3 Effet des couples calcaire/laitier	66
VI.1.3 Expansion à chaud	67
VI.2 Essais mécaniques	68
VI.2.1 Résistance à la compression	68
VI.2.1.1 Effet du calcaire	69
VI.2.1.2 Effet du laitier	71
VI.2.1.3 Effet des couples calcaire/laitier	72
VI.2.2 Résistance à la flexion	74
VI.2.2.1 Effet du calcaire	74
VI.2.2.2 Effet du laitier	75
VI.2.2.3 Effet des couples calcaire/laitier	76
VI.2.3 Comparaison entre les différents couples	78
VI.2.4 Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion	78
VI.3 Durabilité	80
VI.3.1 Attaque des mortiers par les sulfates	80
VI.3.2 Attaque des mortiers par les acides	84
VI.4 Etude Technico-économique et écologique	88
VI.5 Conclusions	89

Chapitre VII

Conclusion	91
Perspectives	92
Références Bibliographiques	93

Liste des figures

Figure II.1: Etapes de fabrication du ciment portland	06
Figure II.2: Extraction de la matière première	07
Figure II.3 : Méthode de préparation du cru	07
Figure II.4: Le four cylindrique rotatif	09
Figure II.5 : Les modes d'expédition du ciment	10
Figure. II.6 : L'évaluation des résistances des différents produits d'hydratation du ciment	12
Figure II.7: Ettringite $[\text{Ca}_3 (\text{AL}, \text{Fe}) (\text{OH})_6 (\text{H}_2\text{O})_{12}]_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ la structure en cristal de Ettringite	16
Figure IV.1 : Volume de phases hydratées du ciment en fonction de durés d'hydratations	27
Figure IV.2 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des quantités de calcaire	28
Figure IV.3 : Relation entre la résistance à la compression et le pourcentage de la fume de silice	29
Figure IV.4 : Relation entre la résistance à la traction par fendage et le pourcentage de la fumée de silice	29
Figure IV.5 Relation entre la résistance à la flexion par flexion à 28 jours et le pourcentage de la fumée de silice	29
Figure IV.6 : Relation entre la résistance à la traction aux différents âges et le pourcentage de méta kaolin	30
Figure IV.7 : Résistances à la compression des ciments mélangés avec du PA et les ciments Portland de référence	30
Figure IV. 8 : Résistances à la compression des ciments mélangés avec du PB et les ciments Portland de référence	30
Figure IV.9 : Les résistances des différents mortiers en fonction des dosages de pouzzolane et de calcaire	31
Figure IV.10 : Résistances à la compression en MPa des ciments ternaires différents âge	32
Figure IV.11 : Les résistances des différents mortiers en fonction des dosages des cendres volantes	33
Figure IV.12 : Les résistances des différents mortiers en fonction des dosages des cendres volantes et du calcaire	33
Figure IV. 13 : Effet du calcaire sur la perméabilité du béton	35
Figure IV.14 : Volume des pores en fonction du dosage de fumée de silice	36
Figure IV.15 : La perméabilité de l'eau dans le béton	36
Figure IV.16 : Profondeur de la pénétration de l'eau dans les différents bétons	36
Figure IV.17 : Effet du laitier et la durée de cure sur l'absorption d'eau des bétons	37
Figure IV.18a : Coefficient de sorptivité des différents mortiers à 28 jours	38
Figure IV.18b : Coefficient de sorptivité des différents mortiers à 90 jours	38
Figure IV.19a : Perméabilité aux chlorures des différents mortiers à 28 jours	39
Figure IV.19b : La perméabilité aux chlorures des différents mortiers à 90 jours	39
Figure IV.20 : L'effet de Meta kaolin sur la résistance aux ions en chlore [46]	40
Figure IV.21 : L'effet de la fumée de silice sur la résistance aux ions en chlores [47]	40
Figure. IV.22a: Spécimens traités dans une solution de 1,8% de MgSO_4 à 5°C	42
Figure. IV.22b : Spécimens traités dans une solution de 1,8% de MgSO_4 à 25°C	42
Figure IV.23a: Spécimens traités dans une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) à 360 jours	42
Figure IV.23b: Spécimens traités dans une solution du sulfate de magnésium (MgSO_4) à 360 jours	43
Figure IV.24a: L'expansion des mortiers Exposés dans une solution de 5 % (Na_2SO_4)	44
Figure IV.24b: L'expansion des mortiers Exposés dans une solution de 5 % (MgSO_4)	44
Figure IV.25: L'effet des ajouts sur la résistance aux sulfates	44
Figure IV.26: L'effet de méta kaolin sur la résistance aux attaques par les sulfates	45
Figure IV.27 : Expansion des mortiers en fonction de l'âge d'immersion	45

Figure IV.28a: Diminution des poids des mortiers exposés dans la solution de 1% d'HCl	47
Figure IV.28b: Diminution des poids des mortiers exposés dans la solution de 3% d'H ₂ SO ₄	47
Figure IV.29 : L'effet des cendres volantes sur la résistance aux alcalines réactions	48
Figure IV.30 : L'expansion des mortiers due à l'attaque par les alcalines réactions	49
Figure V.1 : Enceinte climatique pour conservation des éprouvettes	54
Figure. V.2 : Schéma de calcul de la flexion	55
Figure. V.3 : Essai de compression simple	56
Figure V.4 : Immersion des éprouvettes dans les solutions de sulfates	57
Figure V.5 : Mesure de l'expansion dans les sulfates	58
Figure V.6 : Des éprouvettes immergées dans la solution contenant 1 % HCl et 3 % H ₂ SO ₄	58
Figure. VI.1 : Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage du calcaire	62
Figure. VI.2 : Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage de laitier	63
Figure. VI.3 : Consistance normale des ciments élaborés en fonction du taux du laitier	63
Figure. VI.4 : Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage d'ajout	64
Figure. VI.5 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de calcaire	65
Figure. VI.6 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de laitier	66
Figure. VI.7 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage d'ajout	66
Figure. VI.8 : Evolution du temps de prise élaborés en fonction du taux du laitier	67
Figure.VI.9 : Evolution de l'expansion à chaud en fonction du pourcentage d'ajout	68
Figure.VI.10 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire	70
Figure.VI.11: Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression	71
Figure.VI.12 : Variation de la résistance à la compression pour les différentes combinaisons	73
Figure.VI.13 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire	75
Figure.VI.14 : Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la flexion	76
Figure.VI.15 : Variation de la résistance à la compression pour les différentes combinaisons (calcaire+laitier)	77
Figure VI.16/ Corrélation entre la résistance a la compression et le module de rupture	79
Figure VI.17: Comparaison entre les différentes prédictions	80
Figure.VI.18 : Expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersions dans les environnements (a) 5% N ₂ SO ₄ et (b) 5% MgSO	82
Figure.VI.19 : Variation de la masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans la solution de 1% HCl et dans la solution de 3% H ₂ SO ₄ .	85
Figure.VI.20 : Etat des sections des mortiers après 180 jours d'immersion dans la solution de 1% HCl	86
Figure.VI.21 : Etat des sections des mortiers après 180 jours d'immersion dans la solution de 3% H ₂ SO ₄	86

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Composition chimique de clinker	10
Tableau II.2 : Types de ciments et leur composition [3]	13
Tableau II.3 : Spécification physiques et mécaniques des ciments selon EN 197 – 1[4]	14
Tableau III.1 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	22
Tableau IV.1 : Dégagement de chaleur (joules/g) des constituants du ciment	25
Tableau IV.2 : Quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des composantes de Bogue	25
Tableau IV.3 : Les différentes combinaisons des mortiers	33
Tableau IV.4 : Caractéristiques des ciments testés	35
Tableau IV.5 : La perméabilité aux chlorures des différents spécimens	40
Tableau IV.6 : Inspection visuelle des différents mortiers	43
Tableau V.1 : Composition chimique du ciment du clinker d'après le fabriquant	52
Tableau V.2. : Composition minéralogique du ciment d'après le fabriquant	53
Tableau V.3 : Analyse chimique du calcaire	53
Tableau V. 4 : Analyse chimique du laitier	53
Tableau V.5: Les différentes combinaisons "CEM I + Calcaire + Laitier"	55
Tableau VI.1 : Résultats des essais physiques	61
Tableau VI.2 : Résultats des résistances à la compression	69
Tableau VI.3 : Résultats des résistances à la flexion	74
Tableau VI.4 : Comparaison entre le ciment Portland et les ciments avec ajout	88

Chapitre I

Introduction

Introduction

L'environnement des ouvrages en béton armé, en particulier dans les milieux agressifs, ainsi que la nature des constituants du ciment jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques des ciments. Pour cela, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des ciments et de réduire la consommation d'énergie, qui se traduit par la diminution du taux de gaz carbonique dégagé par les fours industriels. La production de ciment dans le monde a tendance à augmenter. Entre 2006 et 2009, la production du ciment a augmenté de plus de 10 %, sachant qu'en 2006 la production mondiale de ciment était de 2565 millions de tonnes. Une partie de gaz à effet de serre provient de l'industrie du ciment, à cet effet, il est souhaitable d'incorporer des ajouts dans la fabrication des ciments.

L'Algérie est un pays en voie de développement et ses besoins en infrastructure sont importants. De grands projets de logements et d'infrastructures sont lancés. Ces projets exigent la disponibilité, la qualité et la durabilité des matériaux cimentaires. L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie. Il existe quatorze cimenteries avec une capacité de production annuelle d'environ 16 millions de tonnes. L'utilisation des ajouts est très efficace pour augmenter la production du ciment.

Actuellement, les travaux de recherche cherchent à améliorer la résistance mécanique et la durabilité du ciment portland par l'incorporation des ajouts cimentaires.

L'objectif de notre étude axe sur l'effet de l'incorporation d'une addition minérale active (laitier d'El-Hadjar) sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité des ciments contenant un ajout minéral inerte (calcaire). Ceci permettra de sélectionner la combinaison (calcaire/laitier)

la plus efficace, aussi bien du point de vue résistance mécanique que du point de vue durabilité.

Pour faire cette étude, Les matériaux utilisés proviennent de la cimenterie de Chlef. Le laitier provient de l'usine Arcelor d'El-Hadjar.

Les essais de durabilité et de résistance ont été réalisés au niveau du Laboratoire de la Cimenterie de Chlef,

Le broyage des matériaux a été effectué au niveau du Laboratoire de matériaux de Construction du Département de Génie Civil de l'université Hassiba Benbouali de Chlef.

Ce mémoire se compose des chapitres suivants :

- Chapitre I : Introduction.
- Chapitre II : Microstructure et propriétés fondamentales des pâtes de ciments.
- Chapitre III : Utilisations des ajouts dans le ciment.
- Chapitre IV : Propriétés des ciments avec ajouts.
- Chapitre V : Méthodes et matériaux utilisés.
- Chapitre VI : Analyse des résultats expérimentaux.
- Chapitre VII : Conclusion et recommandations.

Chapitre II

Microstructure et propriétés fondamentales des pâtes de ciments

Microstructure et propriétés fondamentales des pâtes de ciments

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur la fabrication des ciments portland. Tout d'abord des notions générales sur le ciment, sa composition, sa fabrication sont présentées. Par la suite, les différentes propriétés mécaniques et physiques sont décrites. En fin du chapitre, les différentes étapes de la réaction d'hydratation du ciment sont abordées.

II.1 Historique

Les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir la chaux éteinte et des cendres volcaniques. La recherche sur l'hydraulicité des chaux a commencé à la fin du 18^e siècle, pour aboutir vers 1840 à la fabrication des ciments modernes. En 1796, James Parker découvre sur l'Île de Shepp Ey (Grande Bretagne) le ciment prompt (chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900°C comme les chaux naturelles ordinaires), qu'il baptise le ciment romain. Ce ciment a connu de 1820 à 1920 une grande réputation. Il est fabriqué dans toute l'Europe et sert à faire des moulages au gabarit et à fabriquer des pierres factices de ciment moulé.

Au début du 19^e siècle, toute l'Europe s'active, la France surtout, pour ne rien devoir aux Britanniques ni à la pouzzolane italienne. Le Français Louis Vicat découvre en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux -concernant la proportion d'argile et la température de cuisson- et publie ses travaux sans prendre de brevet. En 1824, le Britannique Joseph Aspdin dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appelle le ciment Portland. En 1840, Louis Vicat découvre les principes d'hydraulicité des ciments Portland, par une cuisson à une température de 1450°C qui permet d'obtenir le clinker.

II.2 Fabrication du ciment

Le ciment Portland est une poudre minérale dont la propriété est de durcir sous l'eau, formant une pâte qui durcit suivant une réaction et un processus d'hydratation.

La fabrication de ciment passe par les opérations suivantes:

1. Extraction et concassage,
2. Préparation du cru,
3. Cuisson ou calcination,
4. Broyage,
5. Expéditions.

Le constituant principal du ciment est le clinker, obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de 80 % de calcaire et 20% d'argile. La figure II.1 montre les étapes de fabrication du ciment portland.

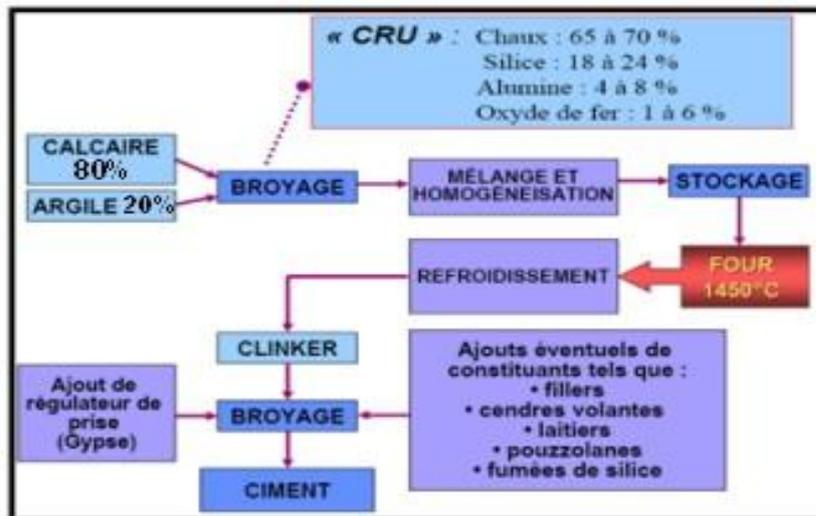


Figure II.1: Etapes de fabrication du ciment portland

II.2.1 Extraction et concassage

Cette étape consiste à extraire les matières premières (calcaire et argile), à partir de carrières naturelles à ciel ouvert (figure II.2). Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique.

Les blocs de roches obtenus sont transportés et broyés en éléments de dimensions maximales de 50 mm. Les matières premières sont échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice).



Figure II.2: Extraction de la matière première

II.2.2 Préparation de cru

Les grains de calcaire et d'argile sont infiniment mélangés par broyage et délayage, dans les proportions définies, en un mélange très fin appelé "cru". Des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts en faible proportion comme l'oxyde de fer. Le cru est préparé automatiquement sous forme de poudre (préhomogénéisation).

La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches. Cette poudre de cru, est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation, corrigée si nécessaire puis stockée en silo avant l'introduction au four (figure. II.3).

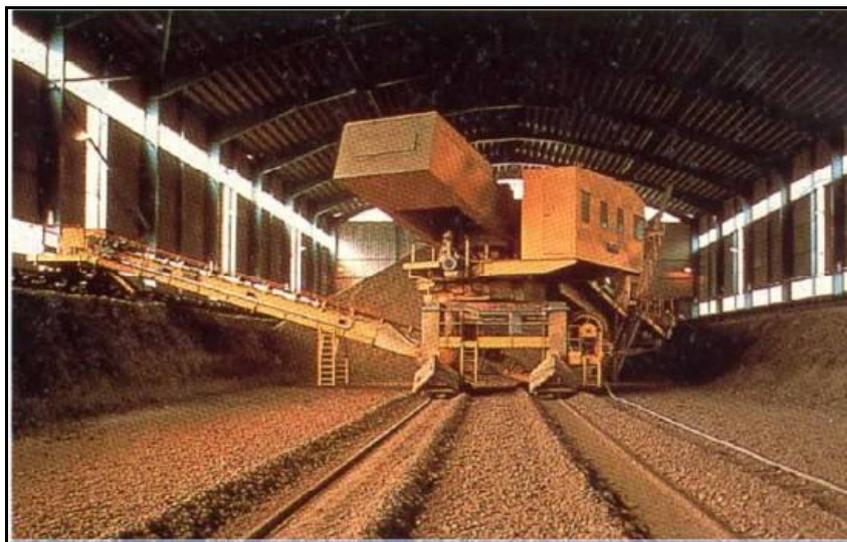


Figure II.3 : Méthode de préparation du cru

II.2.3 Cuisson ou calcination

Les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties : un échangeur de chaleur, comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four, qui se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie.

La deuxième partie est la cuisson dans un four cylindrique ayant 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour/mn (figure II.4). Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C). Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.

La cuisson se déroule selon 4 grandes étapes :

1^e étape : décarbonatation

Le calcaire (CaCO_3) est décomposé entre une température de 900 à 1000 °C en oxyde de calcium (CaO) et de gaz carbonique (CO_2). Ce dernier est évacué par la cheminée.

Pour 1 tonne de CaCO_3 , on évacue à la cheminée 440 kg de CO_2 , du simple fait de la décarbonatation.

2^e étape : phase de transition

Combinaison de CaO avec :

- la silice pour former du silicate bi calcique C_2S ;
- L'alumine pour former une solution solide d'aluminates de calcium C_3A .

Les réactions ont lieu à l'état solide.

3^e étape : phase de cuisson

La température de la matière monte jusqu'à 1450 °C.

A partir de 1300 °C, le silicate bicalcique se transforme en silicate tricalcique en réagissant avec une partie du CaO non combiné. La réaction est fortement endothermique et nécessite un rapport d'énergie important.

L'alumine et le fer, combinés au CaO , sont sous forme liquide : c'est la phase interstitielle, qui sert de fondant.

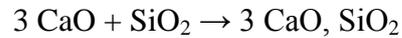
4^e étape : trempe

La matière est refroidie brusquement de 1450 °C à environ 100 °C en quelques minutes. On obtient des granules de diamètre variant de 10 à 30 mm "le clinker".

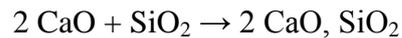
La trempe a pour but de figer les espèces minérales qui seraient instables à la température ambiante : le silicate tricalcique se décompose en silicate bi calcique et en chaux (CaO).

Le clinker est composé de 4 principaux minéraux :

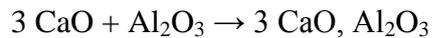
- Silicate tricalcique C₃S Alite (3CaO, SiO₂):



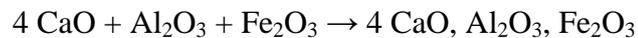
- Silicate bicalcique C₂S Bélite (2CaO, SiO₂):



- Aluminate tricalcique C₃A Célite (3CaO, Al₂O₃):



- Aluminoferrite tetracaclique C₄AF Célite (4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃):



Les silicates représentent environ 80 % du clinker et les aluminates 20 %.

La cuisson est une opération de forte consommation d'énergie. A titre indicatif, à la cimenterie de Chlef, la consommation de l'énergie électrique est estimée à 94 kWh/t. Le montant de la facture de l'énergie électrique est estimé à 11 milliards de centimes par an.



Figure II.4: Le four cylindrique rotatif

II.2.4 Broyage

Le clinker obtenu est véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé et mélangé avec 3 à 5% de gypse, qui sert de régulateur de prise. Dans certains cas, on ajoute d'autres constituants tels que le laitier, la pouzzolane, les cendres volantes et les fillers calcaires pour l'obtention de divers types de ciment.

Les compositions chimiques du clinker sont mentionnées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Composition chimique de clinker

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O + K ₂ O
%	62 - 67	19 - 25	2 - 9	1 - 5	0 - 3	0 - 1,5

En industrie, il existe deux modes de broyage :

- Le broyage en circuit ouvert où le clinker traverse trois compartiments contenant des agents broyant de tailles différentes
- Le broyage à circuit fermé où le clinker traverse deux compartiments. A la sortie, le produit est envoyé dans un séparateur qui élimine les grains trop gros. Chacun des broyeurs, est alimenté par deux ou plusieurs doseurs qui permettent de régler les proportions de clinker, du gypse et des ajouts.

II.2.5 Les expéditions

Les grains de ciment sont récupérés à la sortie du broyeur et expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont de forme cylindriques et de capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes (figure II.5).



Figure II.5 : Les modes d'expédition du ciment

II.3 Propriétés du ciment

II.3.1 Propriétés physiques

II.3.1.1 Finesse de mouture

L'hydratation du ciment commence sur la surface des grains, donc c'est la superficie totale des grains qui représente le matériau disponible pour l'hydratation. La vitesse d'hydratation dépend donc de la finesse des grains de ciment. Pour avoir une hydratation rapide et une résistance élevée à court terme, une finesse importante du ciment est exigée. La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique du ciment est la méthode de Blaine [1].

II.3.1.2 La consistance

La consistance est le pourcentage optimal d'eau qui permet d'obtenir une pâte de ciment de consistance normale. On utilise généralement l'appareil de "Vicat" pour mesurer cette consistance, NF EN 196-3 [2].

II.3.1.3 La prise

C'est le terme employé pour décrire le raidissement de la pâte de ciment. La prise est définie comme étant le changement d'un état fluide à un état solide. Le début de prise correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. Pour mesurer le temps de début et de fin de prise, on utilise généralement l'essai de "Vicat", NF EN 196-3 [2].

II.3.1.4 Retrait

Le retrait est la diminution du volume apparent de la matière ; il est mesuré sur des éprouvettes 4×4×16cm, conservées à l'air de température $T = 20\text{ °C}$ et d'humidité relative .

II.3.1.5 Expansion

Les volumes des pâtes de ciment, les mortiers et les bétons gonflent en présence d'humidité ou d'eau. Les principales causes de l'expansion sont :

- excès de gypse,
- excès de la chaux libre CaO.
- excès de magnésium libre MgO.

L'expansion est mesurée selon NF EN 196-3 [2].

II.3.2 Propriétés mécaniques

Les résistances mécaniques, en traction et en compression des ciments, sont déterminées sur des éprouvettes 4x4x16 cm en mortier normal à 28 jours d'âge. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. La figure II.6 montre l'évolution des résistances des différents produits d'hydratation du ciment.

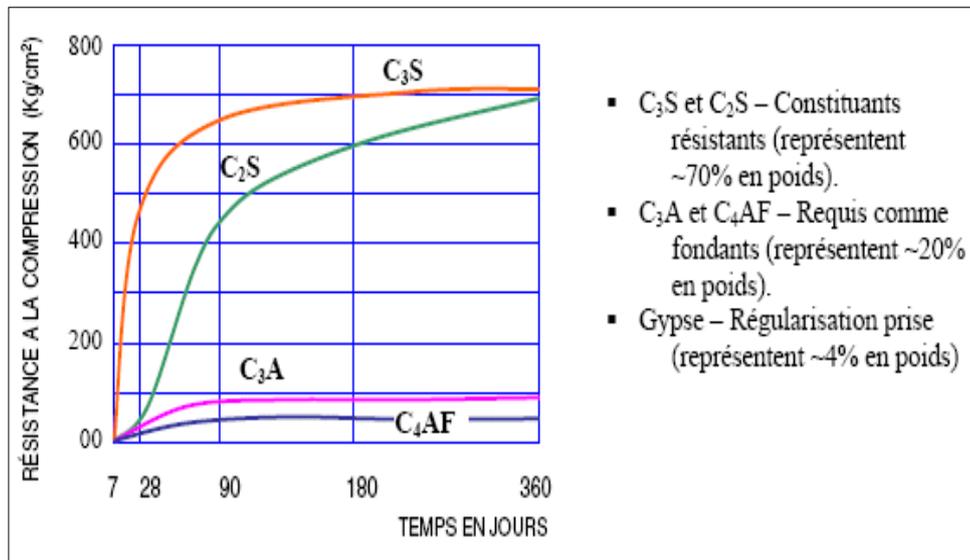


Figure. II.6 : L'évolution des résistances des différents produits d'hydratation du ciment.

II.3.3 Spécifications des ciments

II.3.3.1 Classification des ciments

Les normes NA 442 et EN 197-1 [3] définissent cinq types de ciments. Ils sont classés en fonction de leur composition :

- CEM I : Ciment Portland artificiel,
- CEM II : Ciment portland composé,
- CEM III : Ciment de haut fourneau,
- CEM IV : Ciment pouzzolanique,
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres.

La composition des ciments est définie dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Types de ciments et leur composition [3]

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

II.3.3.2 Spécifications physiques et mécaniques.

- Trois classes de résistance normale sont couvertes: 32,5, 42,5 et 52,5
- Pour chaque classe de résistance normale, une sous-classe de résistance aux jeunes âges est définie (R).
- Pour tous les types de ciments, la résistance à la compression, déterminée selon EN196-1 [4] doit satisfaire aux spécifications du tableau II.3.

Tableau II.3 : Spécification physiques et mécaniques des ciments selon EN 197–1 [3]

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			Temps de début de prise min	Stabilité (expansion) mm
	Résistance à court terme		Résistance courante		
	2 jours	7 jours	28 jours		
32,5 N	---	= 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	---			
42,5 N	≥ 10,1	---	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	---			
52,5 N	≥ 20,1	---	≥ 52,5	---	≥ 45
52,5 R	≥ 30,0	---			

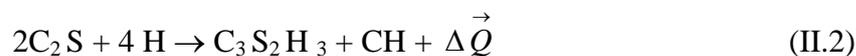
II.4 Hydratation du ciment

Les constituants du ciment Portland sont hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils réagissent avec l'eau pour former des composés nouveaux : les hydrates. La réaction chimique entre l'eau et le ciment Portland est appelée hydratation. C'est un phénomène complexe qui contrôle à la fois la prise et le développement des résistances mécaniques de la pâte de ciment.

L'hydratation se caractérise par une dissolution des solides anhydres suivie d'une précipitation en hydrate. Avec le temps, ceux-ci s'organisent pour former une structure rigide mécaniquement stable.

II.4.1 Hydratation des silicates

Les équations générales traduisant l'hydratation des silicates tricalcique (C_3S) et des silicates bicalciques (C_2S) sont:



Les principaux produits de l'hydratation des silicates sont :

- Les silicates de calcium hydratés, habituellement appelés C-S-H. Leur composition chimique est. $C_3S_2H_3$.
- La chaux hydratée CH ($Ca(OH)_2$) appelée souvent la portlandite.

II.4.2 Hydratation des aluminates

Les aluminates sont moins abondants que les silicates dans un ciment Portland. L'hydratation du C_3A avec l'eau peut être schématisée de la manière suivante :



Le C_2AH_8 est métastable et se présente sous forme de cristaux hexagonaux. Il est éventuellement converti en C_3AH_6 , plus stable et de forme cubique. Des formes différentes d'aluminates de calcium hydratés peuvent également apparaître, même les aluminates de calcium sont moins stables, tel que le produit C_4AH_{19} [5].



Dans le ciment, l'hydratation du C_3A est contrôlée par l'ajout au clinker de 3 à 5% de gypse, qui joue le rôle de régulateur de prise. Avec l'eau, une partie de gypse se dissout et conduit à la réaction suivante [6] :



Le résultat de la réaction (II.5) est l'ettringite minérale (figure II.7). Elle se présente sous forme de fibres à base hexagonale qui se précipitent à la surface des grains d'aluminate tricalcique. La structure en cristal de l'ettringite est établie (a) des colonnes de : (des octaèdres d'Al, de Fe) $(OH)_6^{3-}$ (rouge), Ca^{2+} (bleu), et H_2O (gris) (b) l'eau de SO_4^{2-} et les (jaunes) sont posés dans des canaux entre les colonnes, vues sur le long.

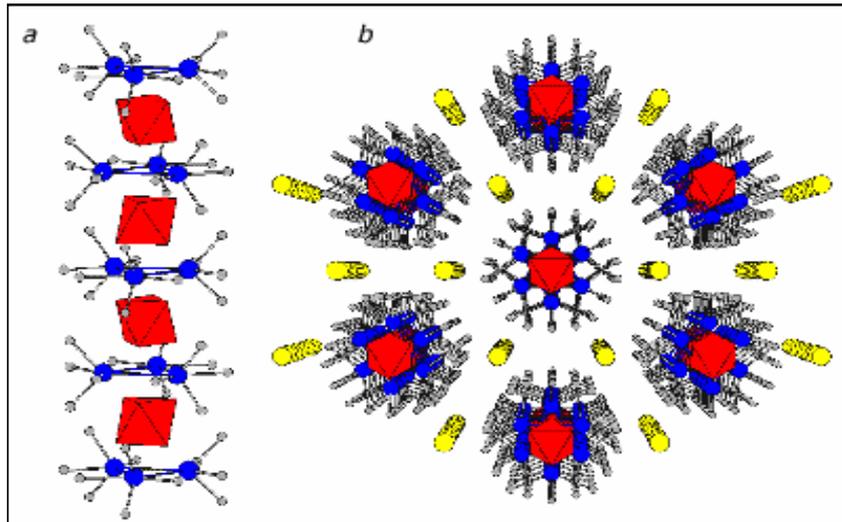
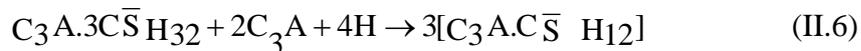
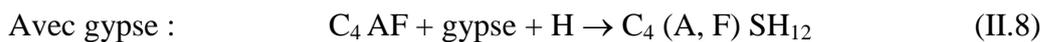


Figure II.7: Ettringite $[\text{Ca}_3 (\text{Al}, \text{Fe}) (\text{OH})_6 (\text{H}_2\text{O})_{12}]_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

S'il y a excès d'aluminate et manque de gypse, l'ettringite peut être utilisée pour former du monosulfoaluminate de calcium hydraté en plaquettes hexagonales contenant moins de sulfate pour la même quantité d'aluminate:



L'hydratation du C_4AF est similaire à celle du C_3A au sens où elle conduit d'abord à la formation de trisulfoaluminoferrite de calcium hydraté et de monosulfoaluminoferrite de calcium hydraté après épuisement du gypse. Cependant l'hydratation de ce composé demeure moins connue que celle du C_3A . La mesure dans laquelle le fer et l'aluminate C_4AF réagissent demeure imprécise. Les réactions mises en jeu lors de l'hydratation sont les suivantes :



Chapitre III

Utilisations des ajouts dans le ciment

Utilisation des ajouts dans le ciment

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui présentent une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment et au béton. Le rôle des ajouts est d'améliorer les caractéristiques du béton. Les ajouts existent sous forme de produits naturels ou résultent de processus industriels sous forme de déchets ou de sous produits.

Aujourd'hui, les ajouts sont très utilisés pour des raisons écologiques. En effet les ajouts permettent de diminuer les émissions du CO₂ dans l'industrie cimentaire et l'élimination de leurs effets négatifs sur la nature.

En plus de ces avantages écologiques, les ajouts influent positivement sur certaines propriétés du béton comme la durabilité et la résistance. De plus, certains bétons (bétons teintés, bétons à faible chaleur d'hydratations) ne pourraient pas être fabriqués sans ajouts.

III. 1 Classification des ajouts cimentaires

Selon la norme ENV 206 [7], il existe deux types d'additions :

III.1.1. Additions de type I

Les additions de type I sont des matériaux quasiment inertes, organiques ou naturels spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment. Parmi ces additions, il y a :

III.1.11. Les fillers

Les fillers sont des produits obtenus par broyage de certaines roches (calcaires, Basaltes, laitiers, Bentonites, ...). Les fillers agissent grâce à une granulométrie appropriée sur certaines qualités du ciment. Les roches dures, comme le quartz, produisent généralement des particules plus anguleuses, dont la demande en eau est supérieure à celle demandée par les fillers calcaires.

Les fillers présentent une certaine activité physico-chimique. Ils jouent tout d'abord un rôle de nucléation vis-à-vis de l'hydratation du clinker. Cet effet n'est cependant notable qu'aux jeunes âges. A long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique, alors qu'en présence d'aluminates, les fillers calcaire conduisent à une formation rapide de composés appelés carbo-aluminates, ayant un certain pouvoir liant.

Les additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508 [8] sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de la norme NF P18-305 [9].

III.1.1.2. Additions calcaire

Le calcaire (CaCO_3) appartient aux roches carbonatées riches en chaux (CaO). Il est contenu dans la calcite, l'aragonite ou la marne. Le calcaire constitue une matière première pour la fabrication du ciment. Des études ont montré certains avantages de l'utilisation du calcaire comme ajout en remplacement du gypse [10].

Les deux principales caractéristiques du calcaire normalisé sont :

- la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure ou égale à 75 % en masse;
- une valeur faible de l'indice d'activité.

III.1.2. Additions de type II

Ces additions sont des matériaux finement broyés à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et en oxyde d'aluminium combiné. Parmi ces additifs, on distingue : la fumée de silice, le laitier, les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles.

III.1.2.1 Les cendres volantes

Les cendres volantes résultent de la combustion du charbon dans les centrales thermiques; elles sont récupérées au moyen de séparateurs pneumatiques et électrostatiques puis humidifiées pour faciliter la manutention. Selon la norme NF EN 450 [11]. Les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses sous forme sphériques. Les compositions chimiques des cendres volantes dépendent des impuretés contenues dans le charbon utilisé.

Du point de vue minéralogique, les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO selon la norme ASTM C 618-94 [12] :

- classe F: les cendres volantes contenant moins de 10 % de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux,
- classe C : les cendres volantes contenant entre 15 % et 35 % de CaO produit de la combustion du lignite.

III.1.2.2 les fumées de silice

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines, ayant une très haute teneur en silice amorphe. Leur très grande finesse ($20 \text{ m}^2/\text{g}$) provoque, dans le béton frais, une agglomération importante, ou l'utilisation des super plastifiants est impératif pour dé flocler cette agglomération. On restaure ainsi une partie de la finesse originelle des particules, qui ont alors la capacité de se déplacer dans les interstices des grains de ciment, diminuant la demande en eau du mélange (effet filler) lors de l'hydratation, le processus pouzzolanique prend place, avec une intensité et une cinétique très grande à celle que l'on rencontre en présence des cendres volantes. La proportion de fumée de silice dans le ciment est limité à 10 % en masse, selon NA 442 et EN 197-1 [3].

III.1.2.3 Le laitier des hauts fourneaux

Les laitiers des hauts fourneaux sont des sous produits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. Le laitier des hauts fourneaux est utilisé généralement dans les ciments et dans les travaux routiers.

La composition minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement, plus le refroidissement est rapide plus le laitier est vitreux. Le laitier refroidi est en forme de granules ou boulettes et demande un broyage pour être utilisé comme ajout minéral.

Les particules de laitier, dont le diamètre est inférieur à $10 \text{ }\mu\text{m}$, contribuent à la résistance du béton aux jeunes âges (jusqu'à 28 jours). Les particules dont les diamètres sont compris entre 10 et $45 \text{ }\mu\text{m}$ contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules de laitier dont le diamètre est supérieur à $45 \text{ }\mu\text{m}$ ont de la difficulté à s'hydrater.

III.1.2.4 Les Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes sont des roches naturelles formées par des projections volcaniques scoriacées. Leur couleur est généralement noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer.

Les pouzzolanes sont utilisées pour la fabrication du ciment. En Algérie, la pouzzolane est extraite de la carrière de Bouhamidi à Béni-Saf (Ain té mouchent).

Selon la norme algérienne NA 442 et la norme européenne EN 197-1 [3], les pouzzolanes naturelles se présentent en deux sortes :

- Des substances d'origine volcanique (verre volcanique, ponce, rhyolite, tuf, zéolite) ou des roches sédimentaires (terre à diatomées, diatomites, gaize) ayant une composition chimique et minéralogique appropriée;
- Des argiles et des schistes activés thermiquement.

III.1.2.5 Le métakaolin

Le métakaolin est obtenu par calcination d'argile kaolinitique à une température comprise entre 650 et 850 °C, suivie d'un broyage permettant d'atteindre une finesse très élevée.

La formation du métakaolin est sensiblement influencée, par la présence d'impuretés ou par l'état de cristallisation du minéral de départ. Le matériau obtenu présente une pouzzolanité élevée et peut être considéré comme une addition très active.

III.2. Utilisation des ajouts dans la fabrication du ciment en Algérie

III.2.1 Introduction

L'industrie cimentaire est d'une grande importance pour l'Algérie. Il existe douze cimenteries avec une capacité annuelle de production d'environ 16 millions de tonnes. Parmi les moyens efficaces pour augmenter la production du ciment est l'utilisation des ajouts, peu onéreux et disponibles en grandes quantités en Algérie. Parmi ces ajouts, on peut citer le laitier d'El-Hadjar, la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et le calcaire. Le tableau III.1 montre l'utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.

Tableau III.1 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajout utilisé	Production annuelle (tonnes) *
ERCE	Ain Touta (Batna) Ain El Kebira (Sétif) Hamma Bouziane (Constantine) Hadjar Essoud (Skikda) Tébessa	Pouzzolane Pouzzolane Pouzzolane Laitier Calcaire	4 901 106
ERCC	Meftah (Blida) Rais Hamidou (Alger) Sour El-Ghozlane (Médéa)	Calcaire Poussière Calcaire	1 712 479
ECDE	Chlef	Calcaire	2 440 510
ERCO	Beni-Saf (Ain Temouchent) Zahana (Mascara) Saida	Pouzzolane Pouzzolane Pouzzolane	2 414 903
ACC	M'Sila	Calcaire	4 000 000
Total			15 468 998

* données de l'année 2008

III.2.2 Cimenterie de Chlef

La cimenterie de Chlef est une entreprise créée par décret n°02/325 et suite à la restructuration de l'ex-Société Nationale des Matériaux de Constructions (SNMC). Le neuf octobre 1989, la cimenterie de Chlef est devenue une entreprise publique autonome. La cimenterie de Chlef est située dans la zone industrielle de Oued-Sly à 10 km de la ville de Chlef. Sa capacité maximale de production est de l'ordre de 2,4 millions de tonnes/an. Cette production a été atteinte grâce à l'acquisition de deux fours modernes (long de 100 m chacun et d'un diamètre de 5,5 m). La matière première du ciment (l'argile, le calcaire et le gypse) est extraite à 3 km au sud de l'usine. Le calcaire est utilisé comme ajout à un pourcentage qui varie entre 5 et 15 %. Les réserves de la cimenterie de Chlef sont estimées à 173 millions de tonnes, qui correspondent théoriquement à 70 ans d'exploitation. La cimenterie de Chlef est l'entreprise phare de la région, elle fait travailler 1000 employés et permet la création de petites et moyennes entreprises.

La cimenterie de Chlef utilise dans la fabrication de ciment portland composé CEM II/A 42.5, 82 à 92 % de clinker, 5 à 15 % de calcaire (limestone) et 3,5 % de gypse.

Chapitre IV

*Propriétés des ciments
avec ajouts*

Propriétés des ciments avec ajouts

Le ciment est un liant hydraulique; il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Ce chapitre présente l'hydratation des ciments portland et des ciments au calcaire. Ainsi les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers contenant des différents pourcentages d'ajouts cimentaires (calcaire/ laitier) seront étudiées.

IV.1 Hydratation des ciments avec ajouts

IV.1.1 Hydratation du ciment portland

Les différentes phases d'hydratation des composantes du ciment (C_3S , C_2S , C_3A) sont dépendantes les unes des autres. Par exemple, l'hydratation des aluminates tricalciques (C_3A) est modifiée par la présence des silicates tricalciques (C_3S), car la production d'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) renforce l'effet régulateur du gypse [13]. La réaction des silicates bicalciques (C_2S) est accélérée par la présence de C_3S [14].

De plus, les principaux composants du ciment Portland incorporent des impuretés qui peuvent modifier les cinétiques et la composition des produits formés, à cause de la présence de ces impuretés, les produits de l'hydratation ne sont pas purs. Par exemple, les C-S-H incorporent des quantités limitées d'aluminium, magnésium, fer, soufre ou alcalins [15].

L'hydratation de chacun des composants du ciment Portland s'accompagne d'un dégagement de chaleur (réaction exothermique). Ceci constitue d'ailleurs un moyen pour caractériser l'état d'hydratation. Les chaleurs provenant des quatre principales composantes du ciment sont reprises dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Dégagement de chaleur (joules/g) des constituants du ciment

Les constituants du ciment portland	Quantité de chaleur à 1 jour	Quantité de chaleur à 28 jours	Quantité de chaleur à 6 mois
C ₃ S	460	502	502
C ₂ S	84	189	251
C ₃ A	773	857	865
C ₄ AF	168	209	213

Il est également possible de comparer le comportement des quatre différents composants en terme de vitesse d'hydratation. Dans l'ordre croissant de rapidité, on trouve le C₃A, C₃S, C₂S et finalement C₄AF (C₃A > C₃S > C₄AF > C₂S).

Il existe toujours un débat sur la quantité d'eau nécessaire pour hydrater totalement 1 g de ciment. De nombreux auteurs considèrent que 25 g d'eau sont nécessaires pour hydrater 100 g de ciment. Le tableau IV.2 indique la quantité approximative d'eau nécessaire à l'hydratation complète de chaque composé du ciment portland.

La réactivité de C₃A et la présence des sulfates de calcium dans le ciment ont une influence sur la prise, en raison des larges différences de solubilité du gypse semi hydraté et de l'anhydrite soluble.

Tableau IV.2 : Quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des composantes de Bogue

Constituant du ciment	Quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des composantes (mg/g).
C ₃ S	24
C ₂ S	21
C ₃ A	40
C ₄ AF	37

IV.1.2 Action du calcaire sur l'hydratation du ciment portland

L'utilisation du calcaire dans le ciment portland fournit beaucoup d'avantages mécaniques et économiques au ciment. Parmi les avantages mécaniques, la réduction de la demande d'eau, une bonne résistance à court terme et l'amélioration de sa mise en œuvre. Du point de vue écologique, une réduction des émissions des gaz carboniques dans l'air affecte l'environnement.

La norme européenne EN 197-1 [4] identifie deux types de ciment portland au calcaire : le premier est un ciment qui contient 6-20% de calcaire de type (II/A-L). Le deuxième est un ciment portland contenant 21-35% de calcaire (II/B-L).

L'addition du calcaire peut avoir plusieurs effets, comme l'augmentation des propriétés mécaniques, la réduction de la demande d'eau et de la correction de la courbe granulométrique du ciment déficient en grains fins. En outre, l'hydratation du ciment diminue la présence des pores capillaires, ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau [16].

L'addition de fillers calcaires peut se faire à deux moments : au moment de la fabrication du ciment lui-même, et au moment de la réalisation du mélange cimentaire. Des études ont montré que le calcaire utilisé, comme substituant de ciment, augmente l'hydratation des ciments [17, 18, 19].

IV.1.2.1 L'hydratation de C_3A

L'addition du calcaire dans le ciment portland contribue à l'accélération de l'hydratation de l'aluminate tricalcique ainsi que la formation de l'ettringite [19].

Dans le ciment portland sans ajout, l'effet du carbonate de calcium sur l'hydratation de l'aluminate tricalcique est d'entourer les grains d'aluminates par la forme de monocarboaluminate de calcium hydraté. La présence du calcaire dans le ciment contribue à la formation du monocarbonate et la stabilisation de l'ettringite au dépend du monosulfate. Tandis que le monocarbonate d'aluminate de calcium se forme à la place du monosulfate [20].

L'effet stabilisateur de la calcite dans l'ettringite est présent dans les composantes des aluminates tricalcique (C_3A), la chaux (CaO), gypse, calcite et dans les ciments Portland contenant la calcite [21, 22, 23, 24, 25].

Le carbonate de calcium diminue la transformation de l'ettringite en monosulfoaluminate et favorise la formation du monocarboaluminate [24, 26], cela est dû à la grande insolubilité et à la grande stabilité du carbonate.

Le carbonate de calcium réagit avec le clinker. La formation de carbo-aluminates de calcium hydratés est analogue à celle de l'ettringite [27]. La formation aux jeunes âges du carboaluminate de calcium hydraté est reliée à une forte concentration de $CaCO_3$ dans le ciment et conduit à l'augmentation des résistances mécaniques.

IV.1.2.2 L'hydratation de C_3S

L'addition de calcaire au ciment portland accélère la réaction du silicate tricalcique [20, 30]. Des observations au microscope électronique à balayage ont montré que les produits d'hydratation se forment sur les particules C_3S et aussi sur le $CaCO_3$ [29]. Une quantité d'étringite est observée également aux jeunes âges avec l'augmentation de la quantité d'addition calcaire [30].

Une étude sur un mélange de grains monominéraux de C_3S et C_3A (plus l'hémihydrate) a montré qu'il y a un bon contact entre les grains de C_3S et le produit d'hémihydrate pendant un jour. Cependant, il a été constaté qu'il y a des séparations énormes entre les grains de C_3A et leurs coquilles d'hydratation [31].

Des études ont montré une réduction du volume des phases hydratées en absence du calcaire comparé au ciment portland au calcaire [19]. Ces différences en volume sont bien démontrées à la figure IV.1.

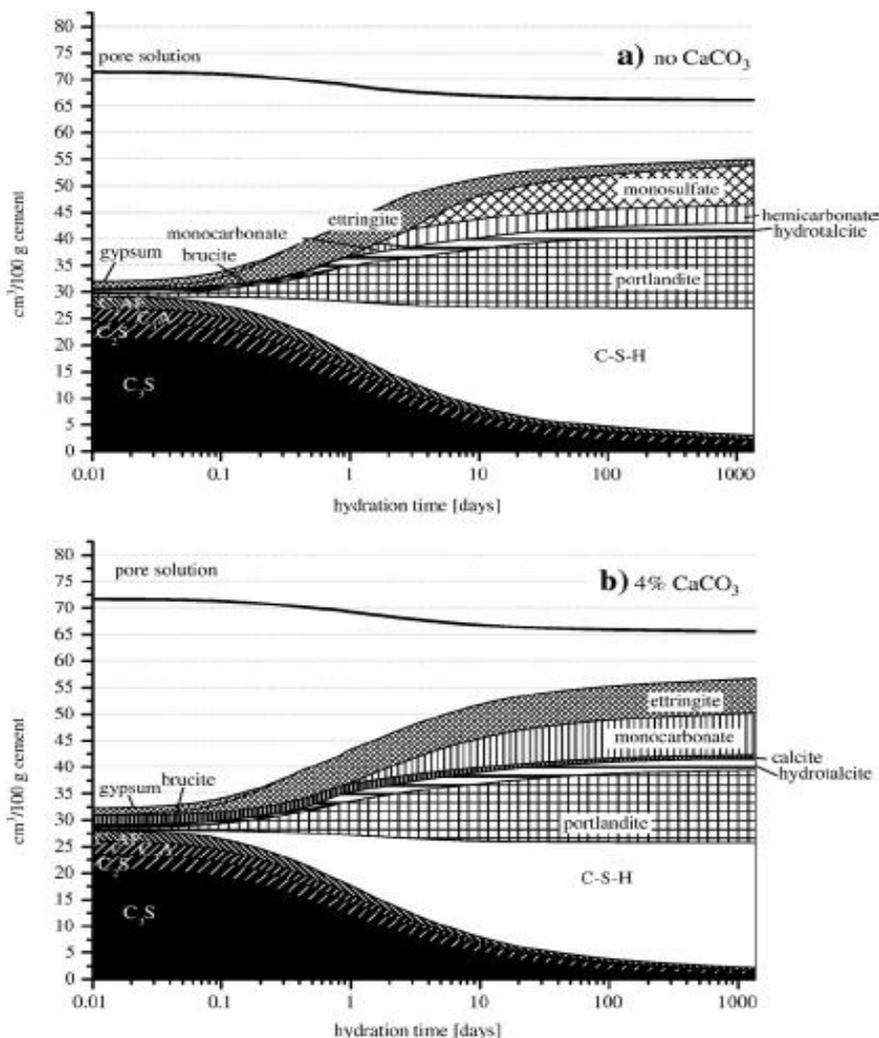


Figure IV.1 : Volume des phases hydratées du ciment en fonction de durées d'hydratation [19]

IV. 2 Propriétés mécaniques des ciments avec ajouts

L'incorporation de 10 % du calcaire a un effet bénéfique sur l'augmentation de la résistance à la compression. Une quantité supérieure à 10 % du calcaire diminue la résistance à la compression. Pour une quantité de calcaire de 20 %, la diminution de la résistance est de l'ordre de 13 %, pour 30 % de calcaire elle est de l'ordre de 29 % (figure IV.2) [26].

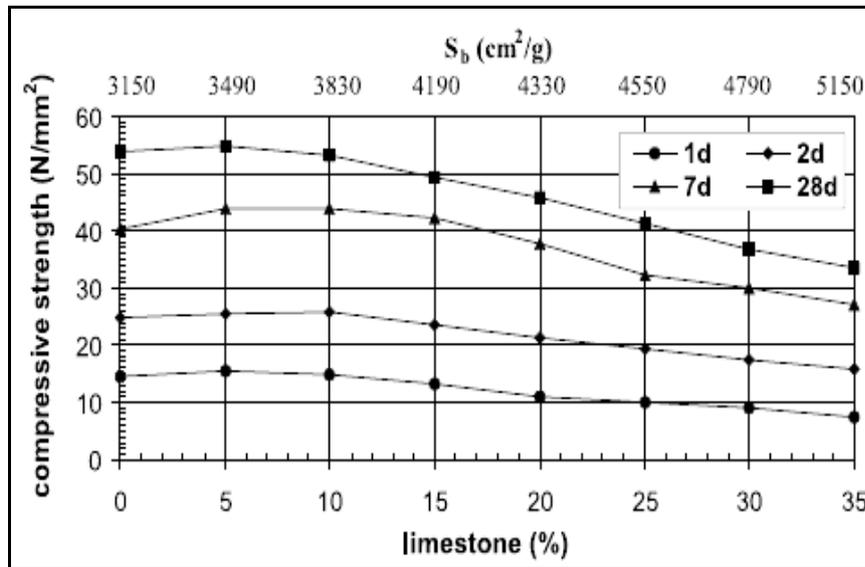


Figure IV.2 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des quantités de calcaire [26]

D'autre part, La valeur maximale de la résistance à la traction par fendage est obtenue pour un dosage de fumée de silice de 5 % à 10 % de la masse du ciment, de la même manière que la résistance à la compression (figures IV.3 et IV.4). Pour la résistance à la flexion, le dosage optimal varie entre 15 % et 25 %, (figure IV.5) [32]. Il faut rappeler que le dosage optimal de la fumée de silice dépend du rapport E/L.

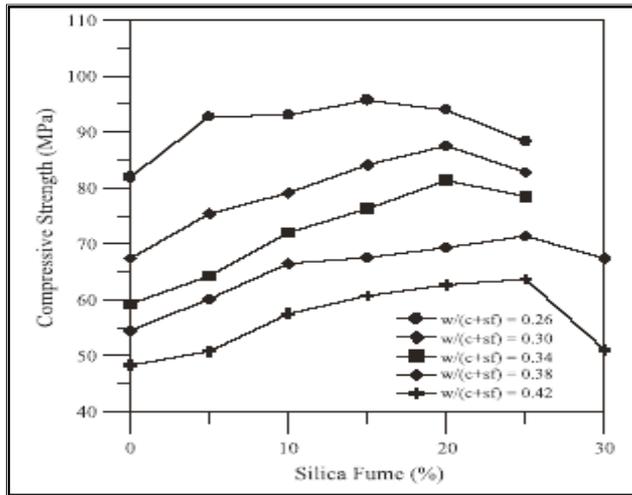


Figure IV.3 Relation entre la résistance à la compression et le pourcentage de la fumée de silice [32]

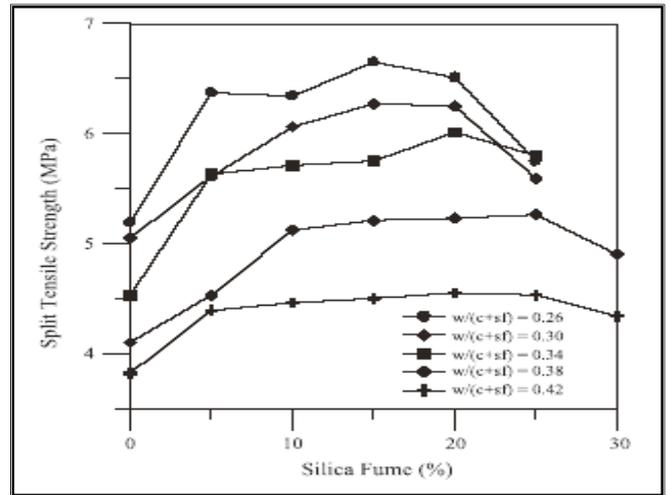


Figure IV.4 Relation entre la résistance à la traction par fendage et le pourcentage de la fumée de silice [32]

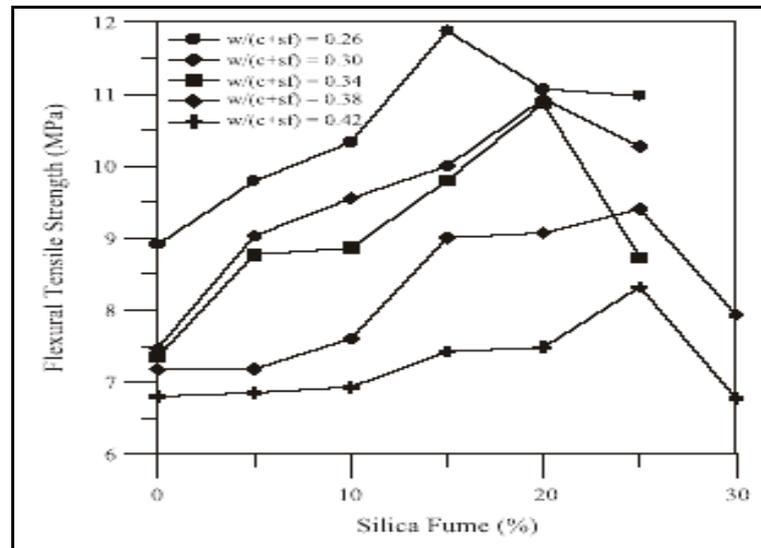


Figure IV.5 Relation entre la résistance à la flexion et le pourcentage de la fumée de silice.

L'effet du métakaolin sur les propriétés mécaniques des ciments a été l'œuvre de plusieurs travaux de recherches. L'incorporation du métakaolin induit une légère diminution de 9 % de la résistance à la flexion aux jeunes âges et 15.5 % de la résistance à la compression, (figure IV.6). En revanche, à 28 jours le rendement d'addition de 10 % du méta kaolin est remarquable sur l'augmentation de la résistance mécanique pour [33].

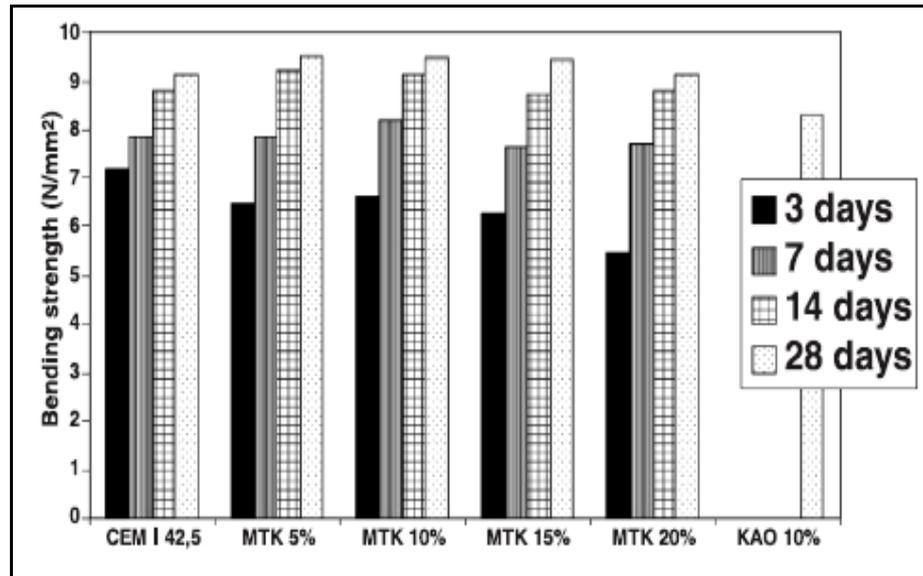


Figure IV.6 - Relation entre la résistance à la traction aux différents ages Et le pourcentage de métakaolin [33].

Une étude faite sur deux types de pouzzolanes (PA et PB) montre que la résistance à la compression, jusqu'à l'âge de 91 jours, de mortiers à base de ciment mélangé avec les deux pouzzolanes était inférieure à celle du ciment de référence, (Figure IV.7 et 8) [34].

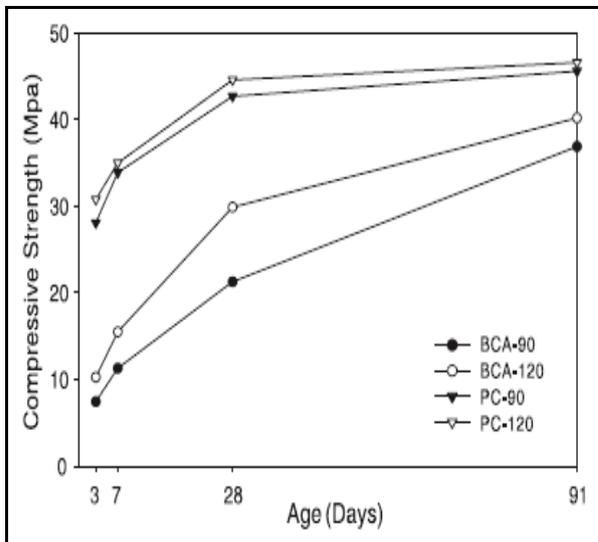


Figure IV.7- Résistances à la compression des ciments mélangés avec du PA et les ciments Portland de référence [34].

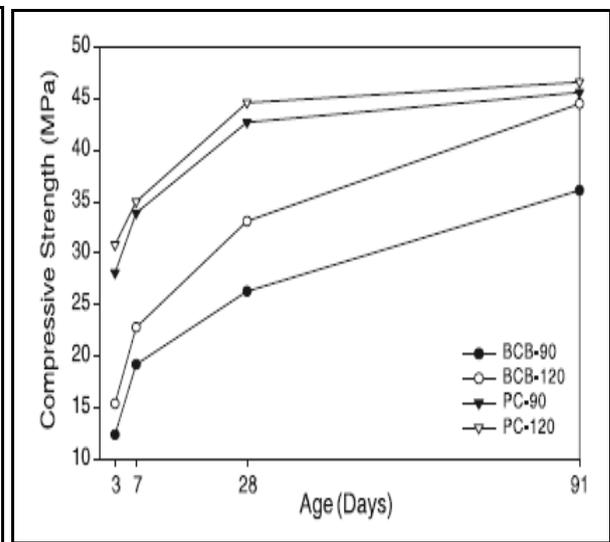


Figure IV. 8- Résistances à la compression des ciments mélangés avec du PB et les ciments Portland de référence [34].

L'ajout de 10 % calcaire et des petites quantités de pouzzolane naturelle (0-10 %) donne des résistances maximales à la compression aux jeunes âges (2, 7 et 28 jours). Dans ce cas, la résistance à la compression augmente de 16 % par rapport à celle du mortier de contrôle. Cependant, à long terme (90 jours), la résistance à la compression est maximale pour une combinaison de 10 % de calcaire et 20 % de pouzzolane, la résistance est améliorée de 7 % par rapport à celle du mortier de contrôle, (figure IV.9) [35].

Le calcaire donne une bonne résistance aux jeunes âges, tandis que la pouzzolane augmente la résistance à long terme.

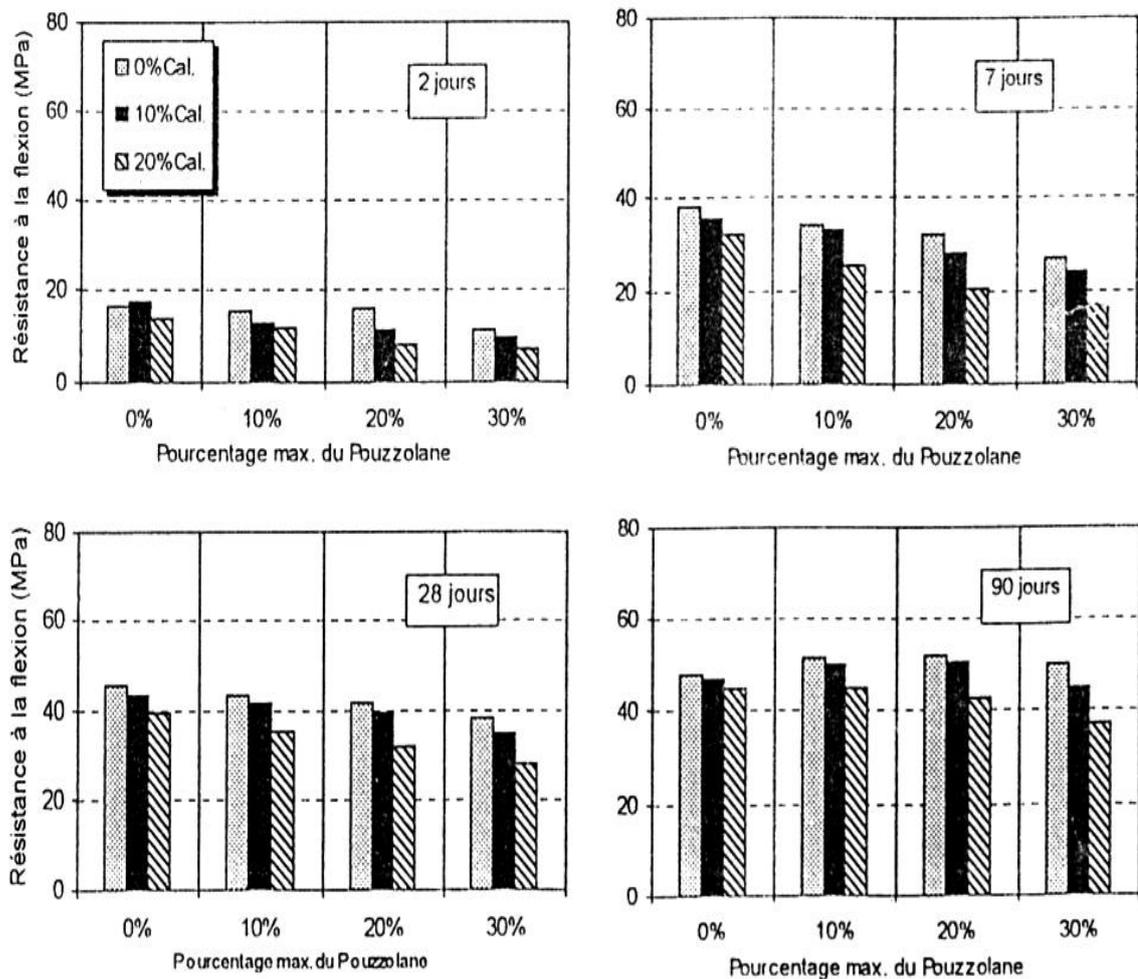


Figure IV.9 : les résistances des différents mortiers en fonction Des dosages de pouzzolane et de calcaire [35].

Aux jeunes âges une addition de 10 % calcaire et de très petites quantités de laitier (0-12 %) donne des résistances à la compression maximales. Dans ce cas, une augmentation de 16% de la résistance à la compression a été obtenue par rapport au mortier de contrôle.

Cependant, à partir de 28 jours, la résistance à la compression change significativement en fonction des combinaisons, elle est maximale pour une combinaison de 7,5 % de calcaire et 35 % de laitier. L'amélioration est de 7 % par rapport à celle du mortier de contrôle à 90 jours (figure IV.10), [36].

Le calcaire donne une bonne résistance aux jeunes âges, tandis que le laitier augmente la résistance à long terme.

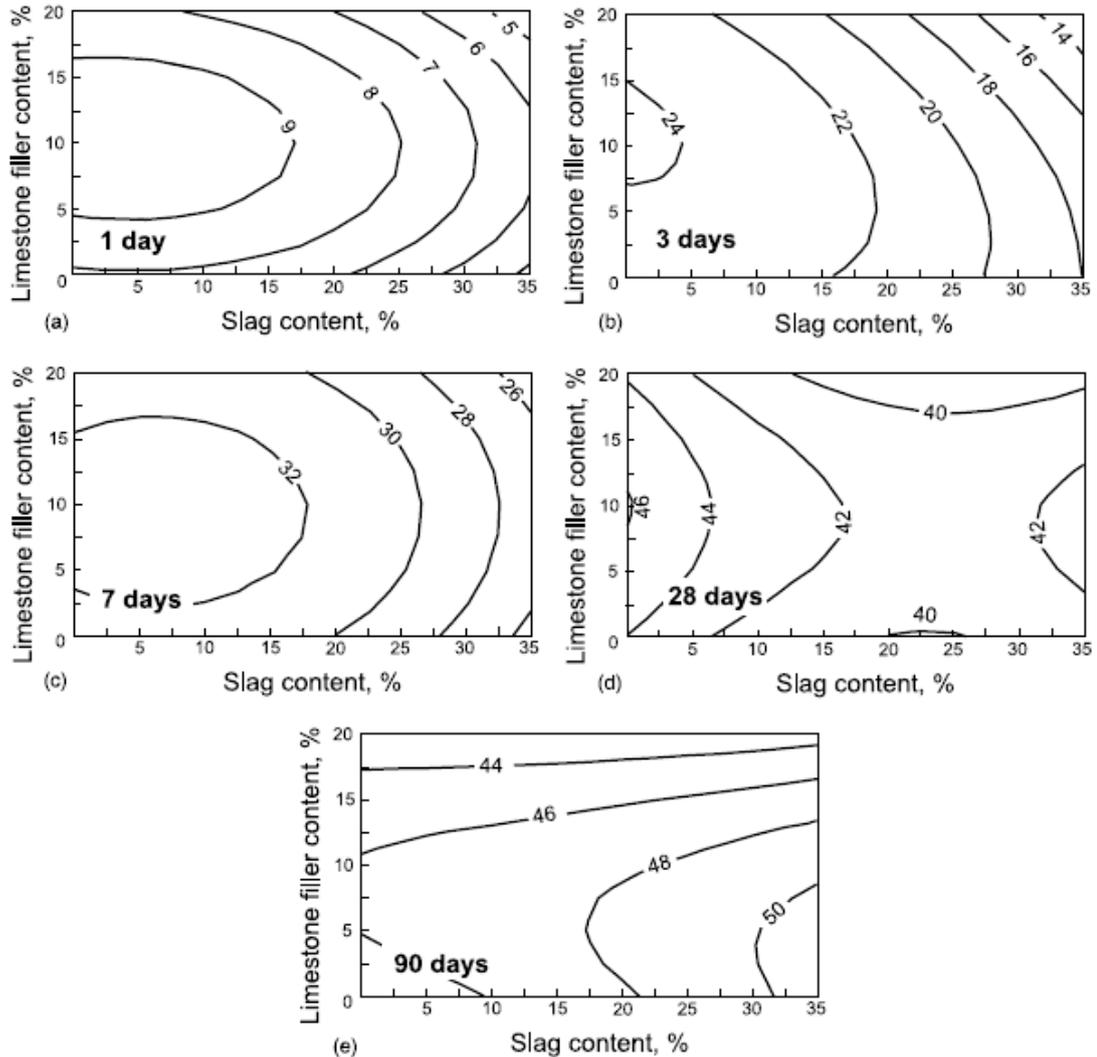


Figure IV.10 : Résistances à la compression en MPa des ciments ternaires différents âge [36].

La résistance à la compression des mortiers diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage des cendres volantes (figures IV.11). Cette diminution est due à l'effet de l'activité pouzzolanique des cendres volantes. L'augmentation du pourcentage de calcaire et diminution des cendres volantes (tableau IV.3.) diminue la résistance des mortiers à 28 jours (figure IV.12) Bulent [37].

Tableau IV.3 : les différentes combinaisons des mortiers.

Symbol	Cement mixes
P	5% G + 95% PC
FA ₁	5% G + 5% FA + 90% PC
FA ₂	5% G + 10% FA + 85% PC
FA ₃	5% G + 20% FA + 75% PC
FA ₄	5% G + 40% FA + 55% PC
LS ₁	5% G + 15% FA + %5 LS + 75% PC
LS ₂	5% G + 10% FA + %10 LS + 75% PC
LS ₃	5% G + 5% FA + %15 LS + 75% PC
DLS ₁	5% G + 15% FA + %5 DLS + 75% PC
DLS ₂	5% G + 10% FA + %10 DLS + 75% PC
DLS ₃	5% G + 5% FA + %15 DLS + 75% PC

La réaction pouzzolanique des cendres volantes est lente et dépend de la quantité et de la solubilité de l'ajout. Une longue durée est nécessaire pour avoir un effet positif des cendres volantes [37].

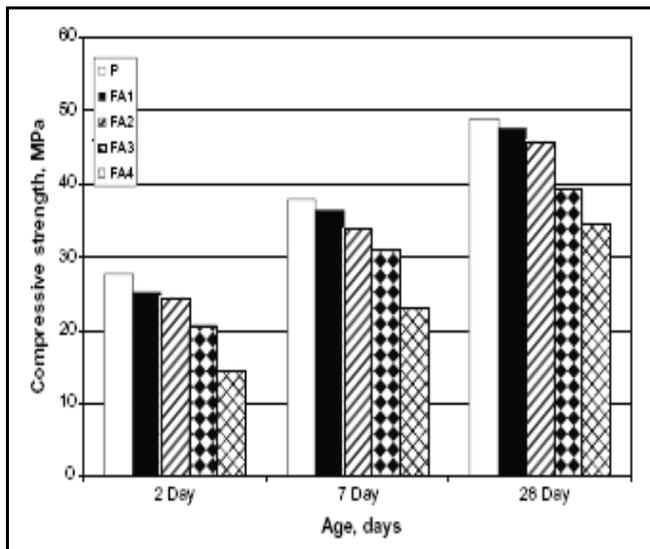


Figure IV.11- les résistances des différents mortiers en fonction des dosages des cendres volantes

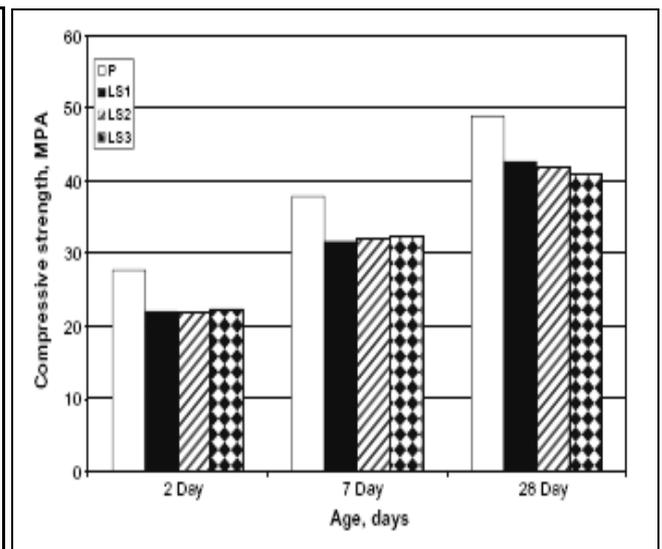


Figure IV.12- les résistances des différents mortiers en fonction des dosages des cendres volantes et du calcaire

IV.3 La durabilité du ciment avec ajouts

IV.3.1 Introduction

La durabilité des ouvrages en béton est améliorée avec la durée d'exposition aux conditions climatiques ou environnementales. Néanmoins, il arrive que des défauts de conception, de mise en oeuvre ou de causes accidentelles soient la cause de détérioration préliminaire. Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité de l'ouvrage dépend essentiellement de la tenue des armatures à la corrosion.

La durabilité est définie comme étant la durée de la persistance de certaines caractéristiques et leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs. La durabilité traduit la résistance du matériau à la dégradation, qui cause généralement des modifications physiques et chimiques. Parmi les paramètres qui agissent sur la durabilité; il y a la perméabilité aux gaz, à l'eau, aux ions chlores et aux attaques par les sulfates et les acides.

IV.3.2 La perméabilité

Les paramètres de transfert sont la perméabilité et la diffusivité (hydrique et ionique). La perméabilité et la diffusivité sont deux propriétés déterminantes qui sont dépendantes de la porosité du milieu poreux considéré. Mais qui sont bien différentes dans leur principe :

- La perméabilité traduit l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression totale d'un fluide.
- La diffusivité traduit l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par une espèce chimique sous l'effet d'un gradient de concentration ou de pression partielle.

La perméabilité du matériau béton contrôle généralement la durabilité des structures. Les causes principales de la mauvaise performance du béton sont liées à la porosité du béton. La perméabilité du béton est un facteur fondamental de la durabilité des structures, elle est utilisée pour évaluer la capacité de pénétration de l'eau, de gaz ou d'ion. Plus la valeur de la perméabilité est élevée, plus le matériau est perméable. Le coefficient de sorption est évalué d'après la formule suivante [38.39]:

$$Q/A = S \sqrt{t}$$

Q : quantité d'eau adsorbée, A : section de l'éprouvette en contact de l'eau.

t : temps, S : coefficient de sorptivité en (m.s^{-0.5})

L'addition de calcaire dans le ciment provoque une grande perméabilité aux gaz par rapport au béton ordinaire. La figure IV.13 montre que la perméabilité aux gaz (K_g) varie de 2.65×10^{-17} à $3.03 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ avec l'augmentation de la quantité de calcaire de 10 % à 25 % où le béton témoin a une perméabilité de $2.26 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, par contre, le béton contenant 35 % de calcaire a une perméabilité au gaz de $2.10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$. Cependant, le calcaire a un effet positif sur la perméabilité à l'eau, la performance maximale est obtenue avec l'addition de 20 % de calcaire, où la perméabilité à l'eau diminue de 24 % par rapport au béton témoin [40].

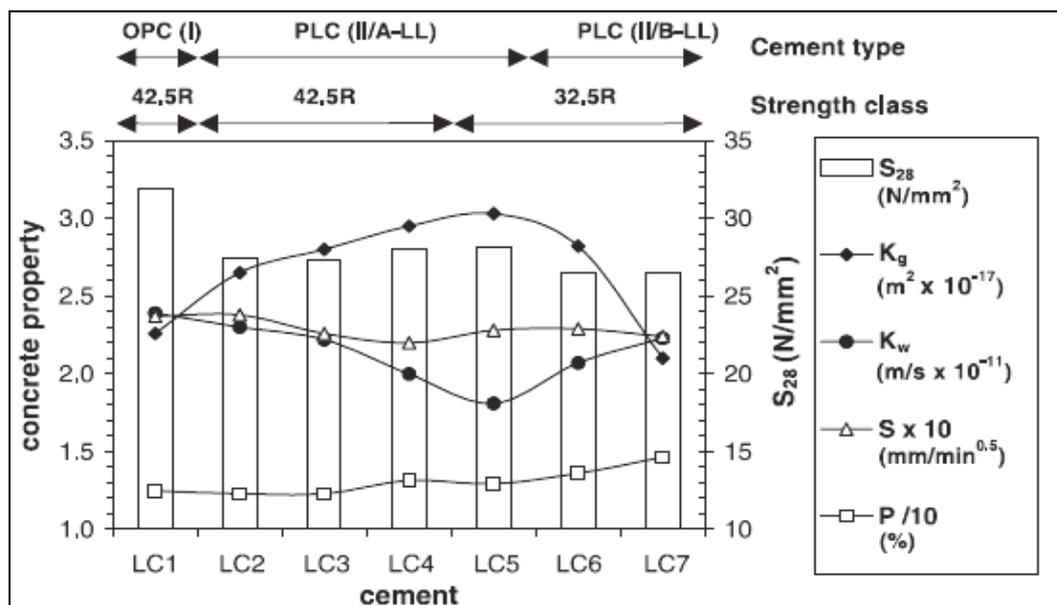


Figure IV. 13 : Effet du calcaire sur la perméabilité du béton

(S_{28} = résistance à la compressive à 28 jours; K_g = perméabilité au gaz;

K_w = perméabilité à l'eau; S = sorptivité; P = porosité totale)

Les désignations des corps d'épreuves sont expliquées dans le Tableau IV.4

Tableau IV.4 : Caractéristiques des ciments testés

	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
% Calcaire	0	10	15	20	20	25	35
Surface Spécifique (cm^2/g)	2600	3400	3660	4700	3250	3800	5300

Les cendres volantes diminuent la perméabilité aux gaz, si le taux de substitution du ciment est inférieur à 20 %; pour des taux de substitution plus élevés (30 % à 50 %), les cendres volantes ont plutôt tendance à augmenter la perméabilité [41].

L'addition de 8 % de fumée de silice au ciment diminue la perméabilité du béton [42]. Pour une quantité supérieure à 8 % de fumée de silice, l'augmentation de la perméabilité est importante, comme montre la figure IV.14.

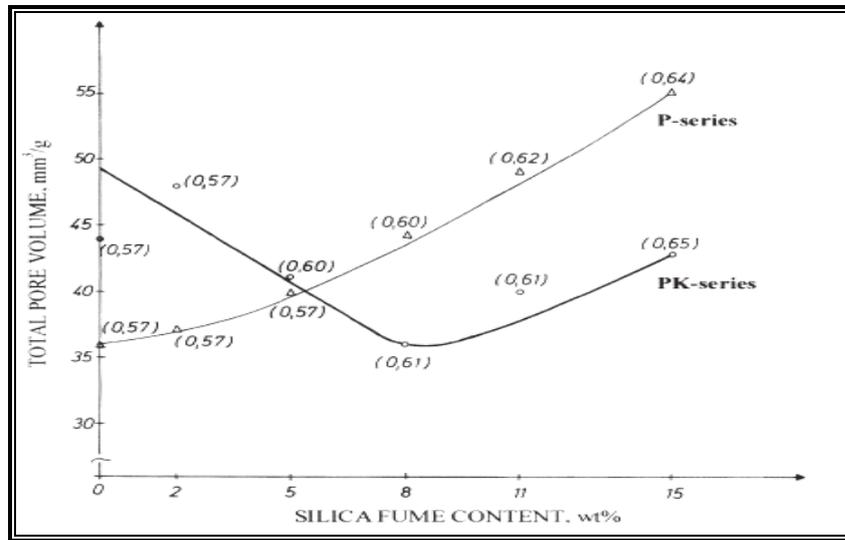


Figure IV.14 : Volume des pores en fonction du dosage de fumée de silice [42].

La perméabilité à l'eau du béton avec calcaire (0 à 15 %) diminue considérablement (14 % pour une pression de 7 bars, 14 % et 23 % pour une pression de 10 bars), [43] (figure IV.15).

La profondeur de la pénétration d'eau pour les bétons contenant du marbre et du calcaire est considérablement faible par rapport à celle des bétons sans ajouts, [44] (figure IV.16).

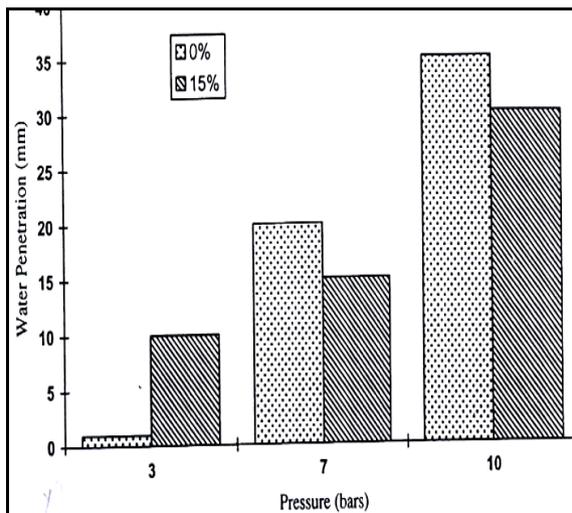


Figure IV.15-La perméabilité à l'eau dans le béton [44]

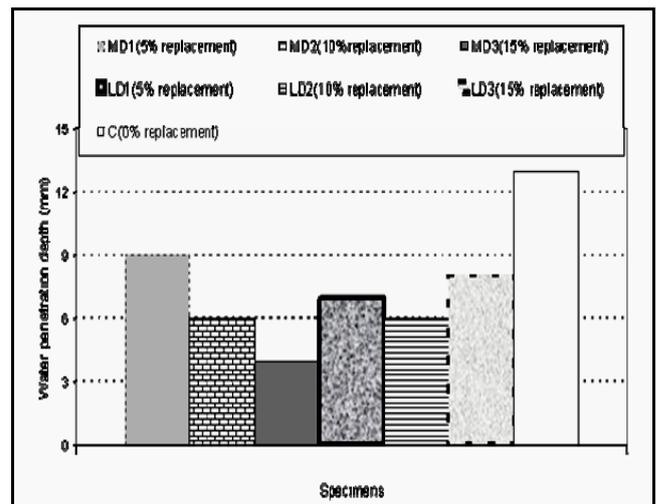


Figure IV.16- Profondeur de la pénétration de l'eau dans les différents bétons [44]

IV.3.3 L'absorption

L'absorption est la capacité du béton à aspirer l'eau, ceci se produit généralement dans les pores capillaires. Ce phénomène est le mécanisme principal par lequel le béton durci absorbe l'eau. L'absorption du béton dépend de la porosité du béton, plus les pores sont petits plus l'aspiration est importante.

L'incorporation du calcaire a tendance à diminuer l'absorptivité de l'eau du béton [41]. L'ajout de 30 % de calcaire réduit la l'absorptivité de 0,237 à 0,220 mm/min^{-0.5} par rapport au béton avec ciment sans ajout (figure IV.13).

L'addition d'une quantité de moins de 50 % de laitier réduit jusqu'à 25 % l'absorption capillaire du béton quelque soit le type de cure. Au-delà de 50 %, l'effet du laitier sur l'absorption est faible, comme le montre la figure IV.17, [45].

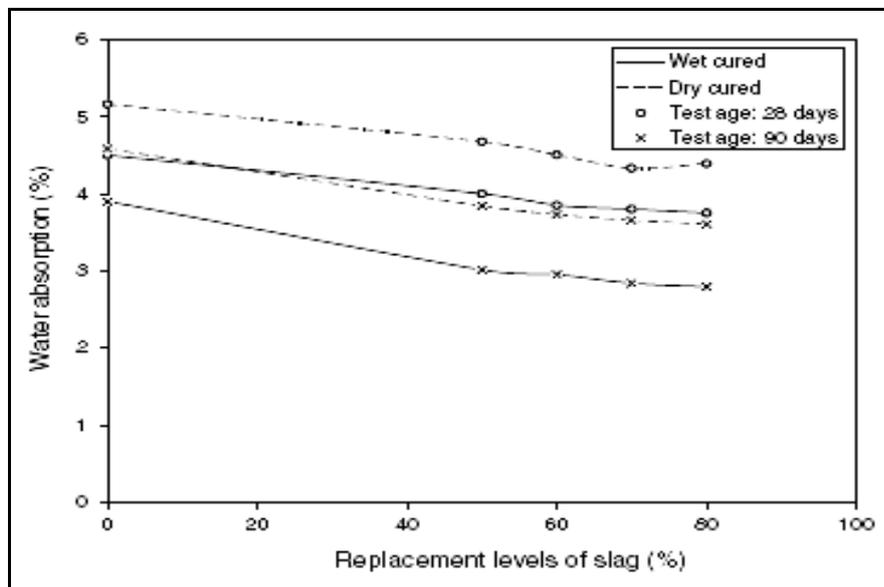


Figure IV.17 : Effet du laitier et la durée de cure sur l'absorption d'eau des bétons [45].

L'ajout de la pouzzolane naturelle diminue considérablement la sorptivité du béton. Tandis que l'influence de l'ajout du calcaire est moins importante. L'addition de 15 % de calcaire diminue la sorptivité du béton de 2 % à 28 jours et de 9 % à 90 jours pour un rapport E/C égal à 0,6. Les bétons contenant 30 % de pouzzolane diminuent la sorptivité de 57 % à 28 jours et de 47 % à 90 jours [35].

L'addition des pouzzolanes avec le calcaire en même temps (20 % de pouzzolane naturelle + 10 % de calcaire) influe d'une manière positive sur la diminution de la sorptivité du bétons (figures.IV.18a et IV.18b).

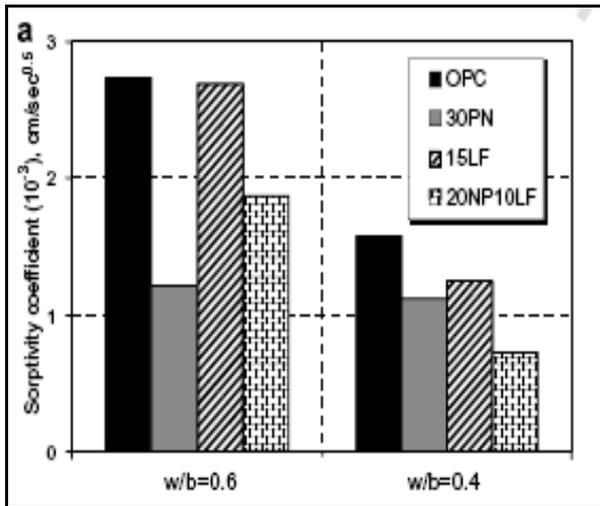


Figure IV.18a : Coefficient de sorptivité des différents mortiers à 28 jours [35].

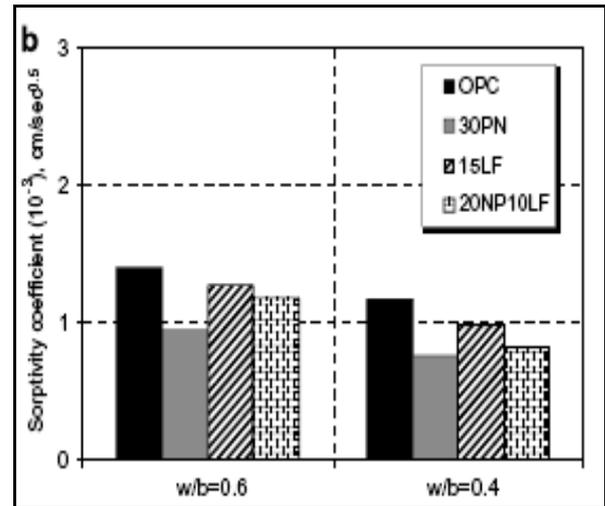


Figure IV.18b : Coefficient de sorptivité des différents mortiers à 90 jours [35].

IV.3.4 Attaque par les ions chlore

Les produits corrosifs sont expansifs, ils provoquent dans un premier temps la fissuration du béton de peau puis son éclatement. Deux agents extérieurs contribuent à l'altération des aciers: le dioxyde de carbone (CO_2) et les ions chlore (Cl^-).

IV.3.4.1 Mécanisme de l'attaque par les chlorures

La corrosion des armatures générée par les ions chlore est la principale cause de dégradation des structures en béton armé. Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en dominant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion, en altérant la couche superficielle. Les chlorures existent sous deux formes dans le béton :

- 1- les chlorures dissous dans la solution interstitielle,
- 2- Les chlorures liés et combinés à des hydrates de ciment et à des agrégats, ou adsorbés physiquement sur la paroi des pores.

Les chlorures peuvent pénétrer de la surface du béton par deux mécanismes de transport : La Sorptivité capillaire et la diffusion en phase liquide.

1- Sorptivité capillaire

Les chlorures liquides sont d'abord entraînés dans la porosité en même temps que l'eau absorbée (lors des cycles de mouillage et séchage par exemple).

2- Diffusion en phase liquide

En l'absence de gradient de pression s'exerçant sur le système, le transport de la matière à travers un matériau poreux saturé se fait principalement selon le mécanisme de diffusion. La diffusion est définie comme le mouvement des particules causé par une différence de potentiel chimique entre deux points. Ces particules se déplacent pour rétablir l'équilibre chimique dans le milieu. Les ions chlore, qui pénètrent dans le béton peuvent réagir chimiquement avec l'aluminate tricalcique en formant des nomochloroaluminates hydratés ($C_3A.CaCl_2.10H_2O$), relativement stable dans le béton.

IV.3.4.2 Effet des ajouts cimentaires sur la perméabilité aux ions chlores

L'addition de calcaire dans le ciment présente de faibles résistances à la perméabilité aux ions chlore. L'incorporation de 15 % de calcaire dans le béton augmente la concentration des ions chlores de 67 % et 135 % à 28 et 90 jours respectivement, alors que la pouzzolane naturelle tend à diminuer cette concentration de 10 à 15 % comme le montre les figures IV.19a et IV.19b, [35].

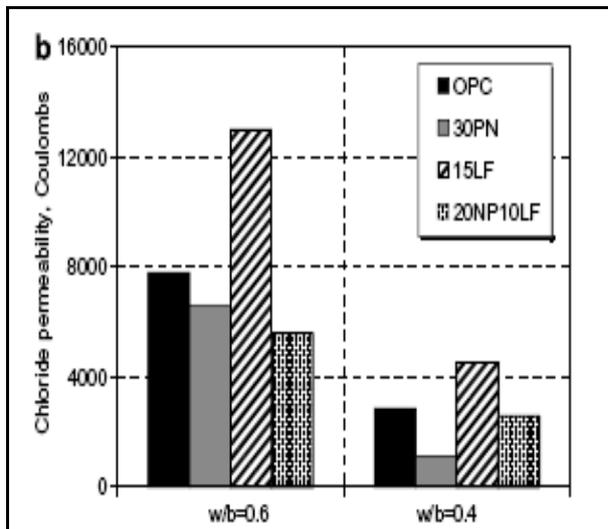


Figure IV.19a : La perméabilité aux chlorures des différents mortiers à 28 jours

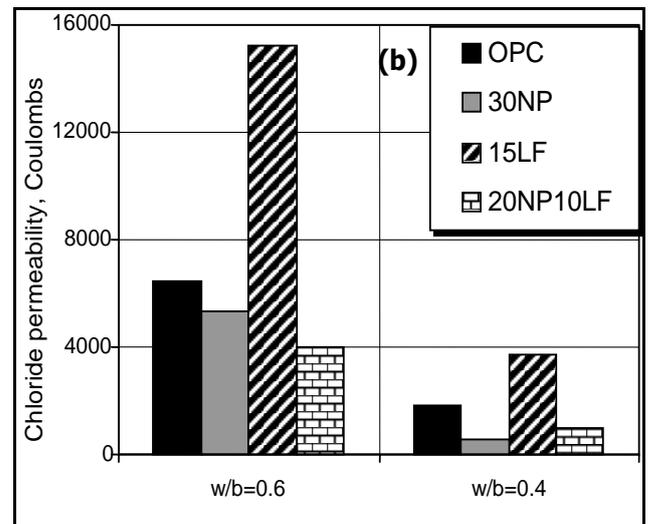


Figure IV.19b : La perméabilité aux chlorures des différents mortiers à 90 jours [35].

D'autres part L'addition de 10 % et 15 % de calcaire dans le béton à diminuer légèrement la perméabilité aux ions chlores, comparé au béton ordinaire (tableau IV.5) [40].

Tableau IV.5: La perméabilité aux chlorures des différents spécimens

Spécimens	LC1 0% calcaire	LC2 10% calcaire	LC3 15% calcaire	LC4 20% calcaire	LC5 35% calcaire
Charge (C)	6100	5800	6000	6400	6600

L'utilisation du métakaolin comme ajout cimentaire améliore d'une façon remarquable la résistance aux ions en chlore. L'action de l'addition est plus favorable lorsque leur dosage atteint 20 % (figure IV.20) [46].

L'influence de la fumée de silices sur la résistance aux attaques par les chlorures est importante. La profondeur de pénétration des chlorures dans la matrice du béton diminue avec la substitution de 10 % de la fumée de silice (figure IV.21) [47].

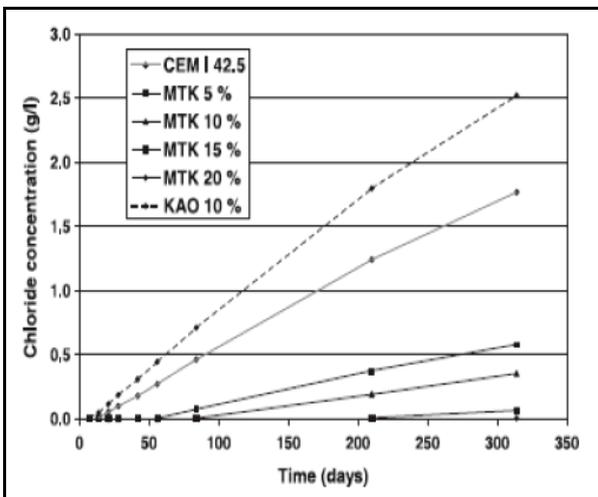


Figure IV.20 : L'effet de Metakaolin sur la résistance aux ions en chlore [46]

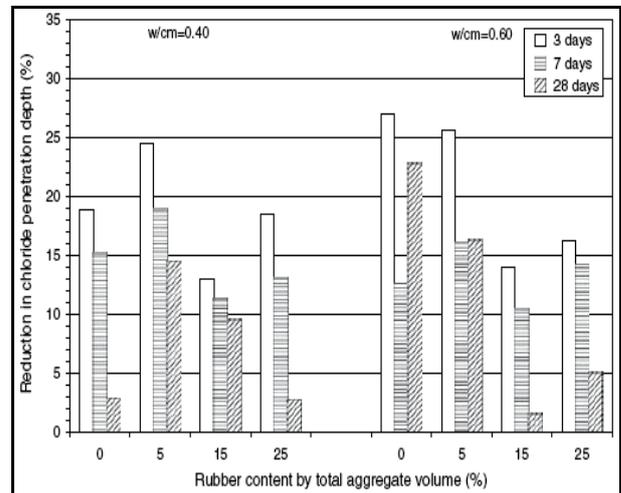


Figure IV.21 : L'effet de la fumée de silice sur la résistance aux ions en chlorures [47]

IV.3.5 L'attaque par les sulfates

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour assurer sa durabilité. Les sulfates réagissent avec les aluminates en formant des complexes sulfoaluminates de calcium par décomposition des chloroaluminates de calcium.

IV.3.5.1 Les sources des sulfates

Les sources des produits sulfatés sont externes ou internes au béton. Dans le premier cas, les sulfates proviennent de:

1- Les sols : Les sulfates constituent un élément nutritif des plantes. La concentration des sulfates est généralement assez faible (entre 0.01 et 0.05 % du sol sec), les valeurs peuvent être bien plus élevées (supérieures à 5 %) dans certaines régions où le sous-sol contient du gypse. Les sols alluviaux et argileux sont également susceptibles de contenir des pyrites (FeS), qui peuvent s'oxyder en sulfates au contact de l'air et de l'humidité.

2- Les eaux souterraines séléniteuses : Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols sulfatiques se chargent en ions SO_4^{-2} . La concentration en ions de l'eau dépend de la solubilité du sulfate qui dépend de la température et de la présence d'autres sels. Les sulfates présents sont souvent des sulfates alcalins ou de magnésium (les concentrations élevées en sulfates dans des eaux souterraines peuvent aussi être la conséquence de pollutions industrielles).

3- L'eau de mer : L'eau de mer renferme des ions variés. L'action du sulfate de magnésium entraîne plus de désordres d'origine chimique dans un béton.

Dans le second cas, les sulfates sont apportés par les constituants du béton et par le ciment en particulier, une réaction sulfate interne est envisageable. Les granulats contiennent des sulfates, comme le cas des granulats contenant des pyrites et des granulats gypseux. Les sulfates sont présents sur les granulats suite à une pollution accidentelle (déchets de plâtre).

IV.3.5.2 Mécanisme de l'attaque par les sulfates

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.

IV.3.5.3 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance aux sulfates

L'utilisation de calcaire dans le ciment à des températures ambiantes (25°C) améliore la résistance aux attaques par les sulfates de magnésium ($MgSO_4$). Part contre, l'utilisation du calcaire dans le ciment à des basses températures (5°C), n'a aucune influence sur la résistance aux attaques par les sulfates de magnésium, comme le montre les figures IV.22a et IV.22b, Kakali et al [48].

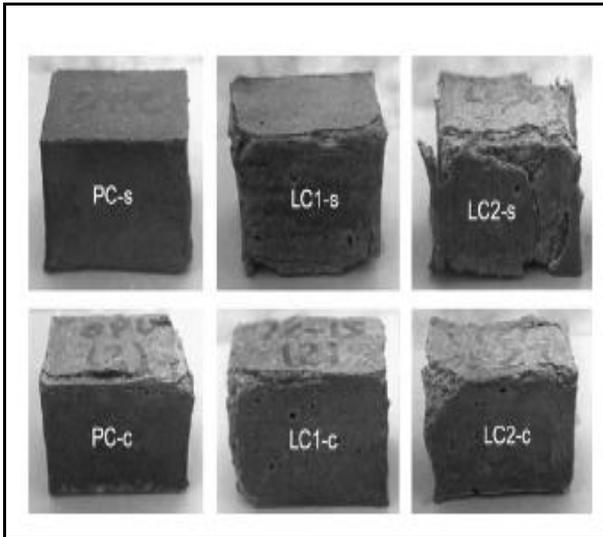


Figure IV.22a: Spécimens traités dans une solution de 1,8 % de $MgSO_4$ à 5°C [48].

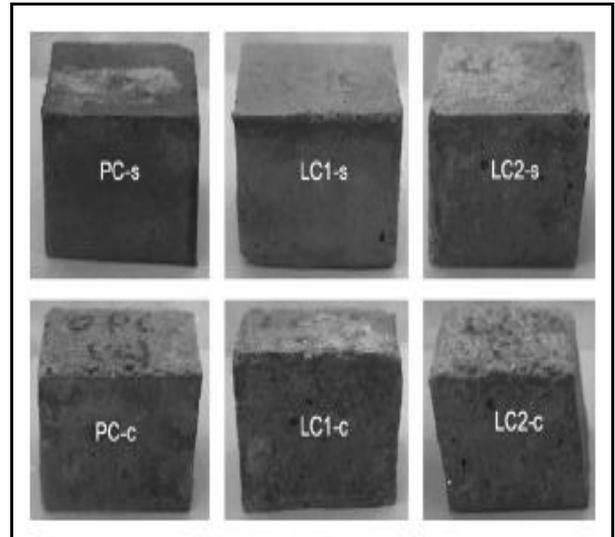


Figure IV.22b : Spécimens traités dans une solution de 1,8 % de $MgSO_4$ à 25°C [48]

La résistance aux sulfate dans les températures ambiantes diminue avec l'augmentation du dosage en calcaire (figures IV.23a et IV.23b) Seung et al [49].



Figure IV.23a : Spécimens traités dans une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) à 360 jours [49].

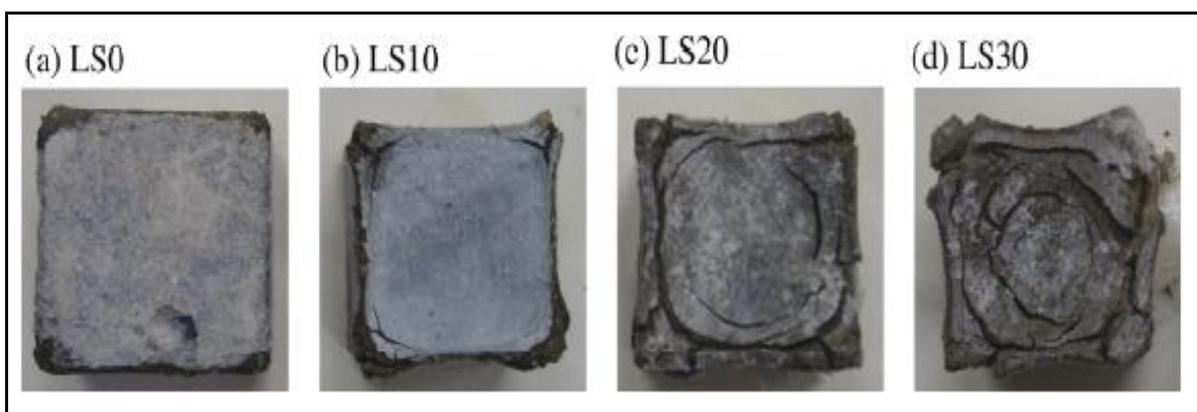


Figure IV.23b : Spécimens traités dans une solution du sulfate de magnésium ($MgSO_4$) à 360 jours [49].

L'addition de pouzzolane naturelle, fumée de silice, laitier et méta kaolin à un ciment à base de calcaire retarde la formation de la thaumasite. Les différentes observations des différents spécimens sont montrées dans le tableau IV.6, [50].

Tableau IV.6 : Inspection visuelle des différents mortiers

Agés (mois)	LC1-s, LC1-c	LPC-s, LPC-c	LFC-s, LFC-c	LMC-s, LMC-s LSC-s, LSC-c
7	Aucune détérioration visible	Quelques détériorations aux coins	Aucune détérioration visible	Aucune détérioration visible
8	détérioration aux coins	détériorations aux coins et des fissures le long de la surface	Aucune détérioration visible	Aucune détérioration visible
9	Quelques fissures le long de la surface	Fissures et expansion extensive	Aucune détérioration visible	Aucune détérioration visible
10	Fissures et expansion	Expansion extensive et éclatement	Aucune détérioration visible	Aucune détérioration visible
11	Fissures et expansion	Expansion extensive et éclatement	Quelques fissures le long de la surface	Aucune détérioration visible

L'expansion des mortiers contenant 15 % de calcaire exposés à une solution de 5 % de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et de 5 % de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) a été réduite de 36 % comparé au mortier témoin dans les températures ambiante ($23 \pm 2^\circ C$) (figures IV.24a et IV.24b), [35].

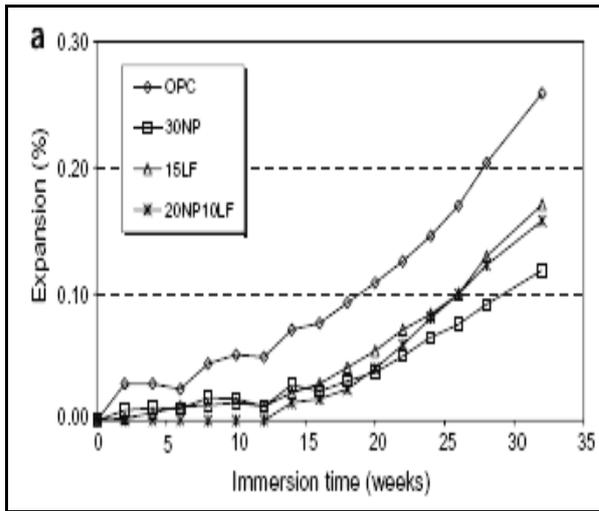


Figure IV.24a : L'expansion des mortiers Exposés dans une solution de 5 % (Na_2SO_4).

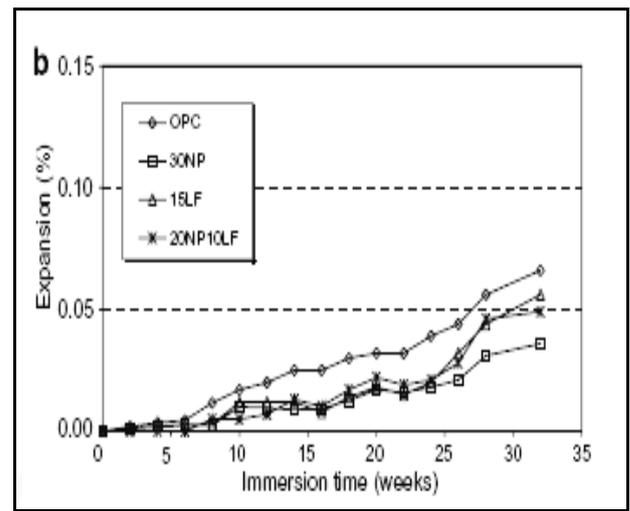


Figure IV.24b : L'expansion des mortiers Exposés dans une solution de 5 % (MgSO_4) [35].

L'addition de 20% de calcaire dans le ciment améliore la concentration des sulfates de sodium et de magnésium des mortiers contenant des différents types d'ajouts, calcaire, fumée de silice, cendre volante et laitier (figure IV.25), Vuk et al [51].

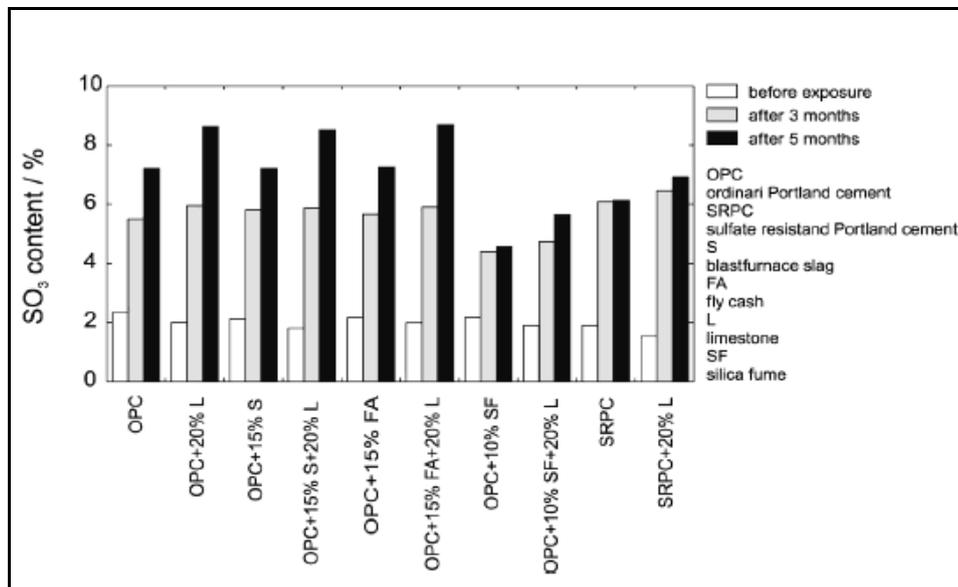


Figure IV.25: L'effet des ajouts sur la résistance aux sulfates [51].

L'addition du métakaolin au ciment augmente considérablement la résistance aux attaques par les sulfates. L'incorporation de 10 % à 15 % de métakaolin diminue la pénétration des sulfates dans le béton (figure IV.26), [46].

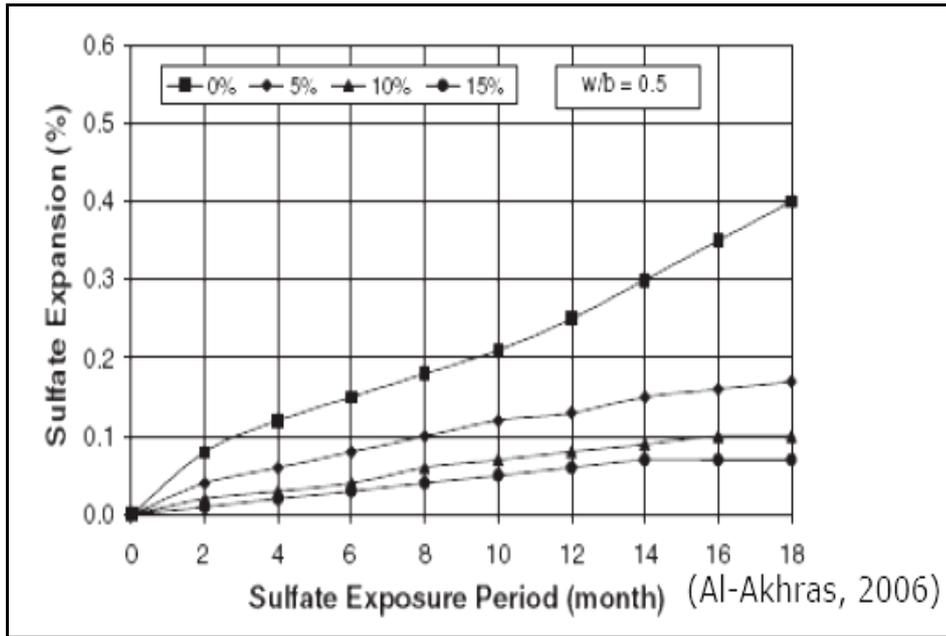


Figure IV.26: L'effet de méta kaolin sur la résistance aux attaques par les sulfates [46].

L'ajout de la pouzzolane à un ciment améliore l'expansion des mortiers. En 36 semaines d'immersion en sulfate, l'expansion des mortiers a été réduite de 50 %, 60 % et 68 % pour des ajouts de 35 %, 45 % et 55 % respectivement de pouzzolane comparée au ciment témoin, figure IV.27, [52].

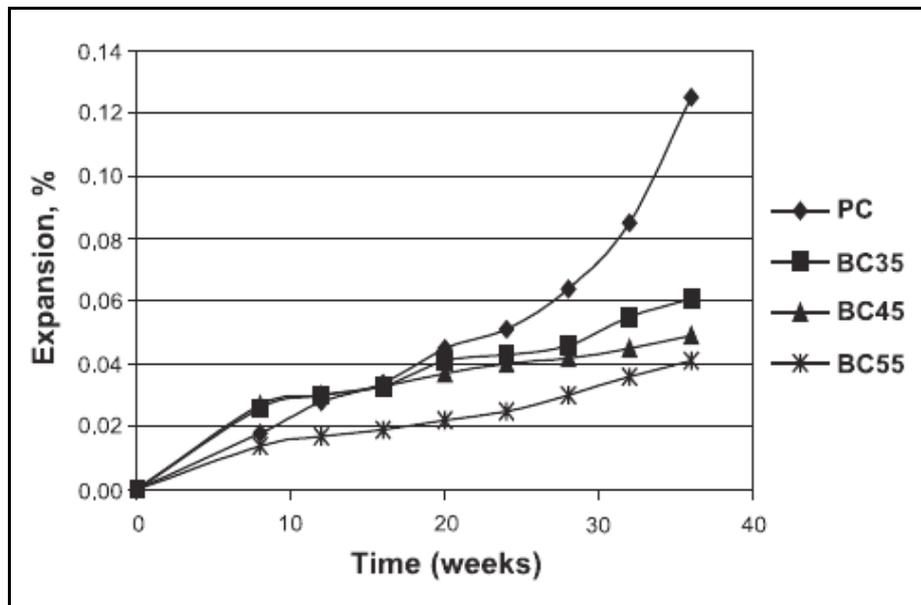


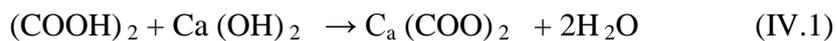
Figure IV.27 : Expansion des mortiers en fonction de l'âge d'immersion [52].

IV.3.6 L'attaque par les acides

Les acides représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton. Pendant la fabrication du ciment, les effluents des fours de cuisson, utilisant des combustibles riches en soufre et les effluents de l'industrie chimique, contiennent de l'acide sulfurique.

IV.3.6.1 Mécanisme de l'attaque par les acides

Les attaques acides, sont dans leur principe, similaires au phénomène de lixiviation, En effet, l'acide réagit avec la portlandite qui est dissoute, puis avec les autres hydrates qui sont décalcifiés. On mettra de coté ici l'action des acides forts, comme l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique, qui dissolvent entièrement le béton, conduisent à un recul de l'interface matériau acide, et pour lesquels une protection de surface du béton est absolument nécessaire La nocivité de l'attaque acide dépend essentiellement de la solubilité du sel formé par réaction avec la portlandite. Par exemple, pour l'acide oxalique on a :



L'attaque par les acides est provoquée par la réaction d'un acide et la partie d'hydroxyde de calcium ($\text{C}_a(\text{OH})_2$) de la pâte de ciment, qui produit le sel de calcium fortement soluble.

La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque des acides se fait en deux phases : la première phase est la réaction acide hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment, la deuxième phase est la réaction acide silicate de calcium hydraté. La dissolution des silicates de calcium hydratés, dans le stade le plus avancé de l'attaque par l'acide, endommage considérablement le béton.

La résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse des spécimens immergés dans les acides.

Les paramètres de formulation influents sont les mêmes que pour la lixiviation : un E/C faible est favorable, tout comme l'incorporation de fumée de silice, [53].

IV.3.6.2 L'effet des ajouts cimentaires sur la résistance aux acides

La résistance chimique du ciment s'améliore mieux avec l'ajout de la fumée de silice qu'avec le métakaolin. Par contre, le métakaolin donne une meilleure résistance comparée aux cendres volantes, [54].

Les mortiers immergés dans la solution de 1 % d'acide hydrochlorique HCl présentent des pertes de poids un peu plus faibles que celle immergés dans la solution de 3 % d'acide sulfurique (H_2SO_4). Un mortier contenant 15 % de calcaire immergé dans 1 % de HCl à une perte de masse de 35 % (figures IV.28a et 28b), [35].

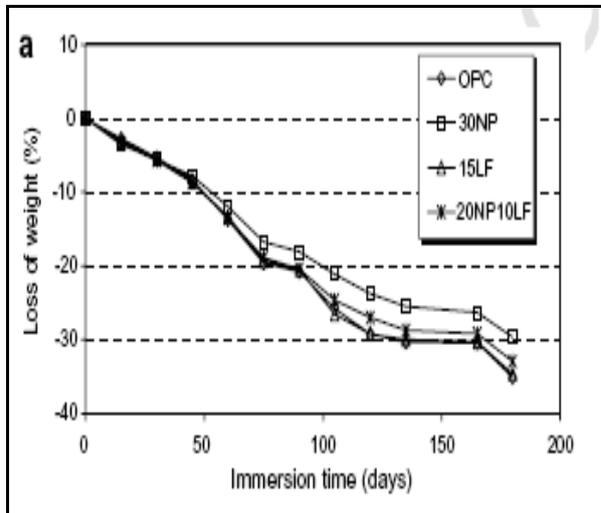


Figure IV.28a : Diminution des poids des mortiers exposés dans la solution de 1% d'HCl

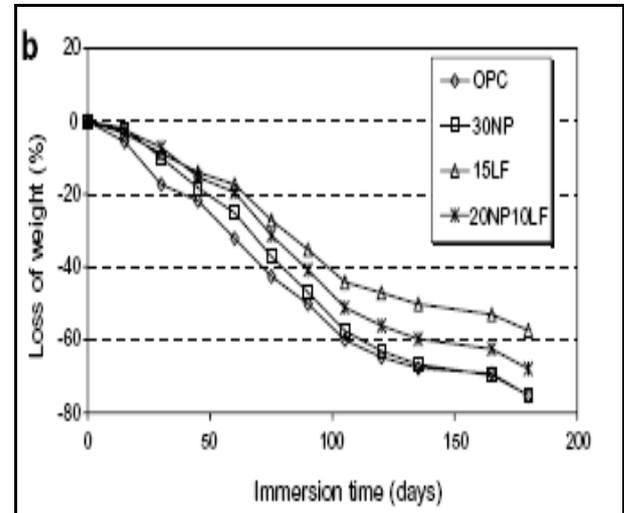


Figure IV.28b : Diminution des poids des mortiers exposés dans la solution de 3% d' H_2SO_4

La résistance des mortiers aux acides sulfuriques s'améliore de manière significative avec l'incorporation des cendres volantes, [55].

IV.3.7. L'attaque par les alcalis réaction

Le terme d'alcali réaction désigne un ensemble de réactions chimiques, qui peuvent se produire entre, d'une part, les alcalins apportés principalement par les ciments et, d'autre part, certaines constituants minéraux présents dans les granulats. L'alcali réaction provoque à long terme des désordres dans les bétons, tels que les fissurations, l'expansion et la chute des résistances mécaniques.

IV.3.7.1. Le mécanisme de l'attaque par l'alcali réaction

Trois conditions doivent être réunies pour que l'alcali réaction se développe dans un béton :

- 1- La présence d'un granulat potentiellement réactif,
- 2- La concentration élevée en alcalins dans la solution interstitielle ($PH > 12,5$),
- 3- L'humidité relative importante (80-85%).

Il existe trois types de réaction alcali granulats :

- 1- La réaction alcali carbonate : elle implique des granulats contenant des inclusions argileuses. Le mécanisme de gonflement est lié à l'absorption d'eau par les argiles.
- 2- La réaction alcali silice : c'est la réaction la plus fréquente ; elle se déroule en deux séquences, la première est une réaction acide base, qui se produit entre les groupes silanols et les ions hydroxité (formation d'un gel), la seconde est l'attaque des ponts siloxanes par les ions OH⁻.
- 3- La réaction alcali silicate, semblable à la réaction alcali silice mais de cinétique plus lente, cette réaction est très rare.

IV.3.7.2. Effet des ajouts cimentaires sur la résistance aux alcalis réaction

Les déformations des bétons dues aux attaques par les alcalines réactions sont très faibles comparés aux déformations causées à un béton sans cendres volantes l'addition de 17% des cendres volantes, fait diminuer les déformations dues aux attaques par les alcalins de 51 % par rapport aux bétons sans ajout comme indiqué dans la figure IV.29, [56].

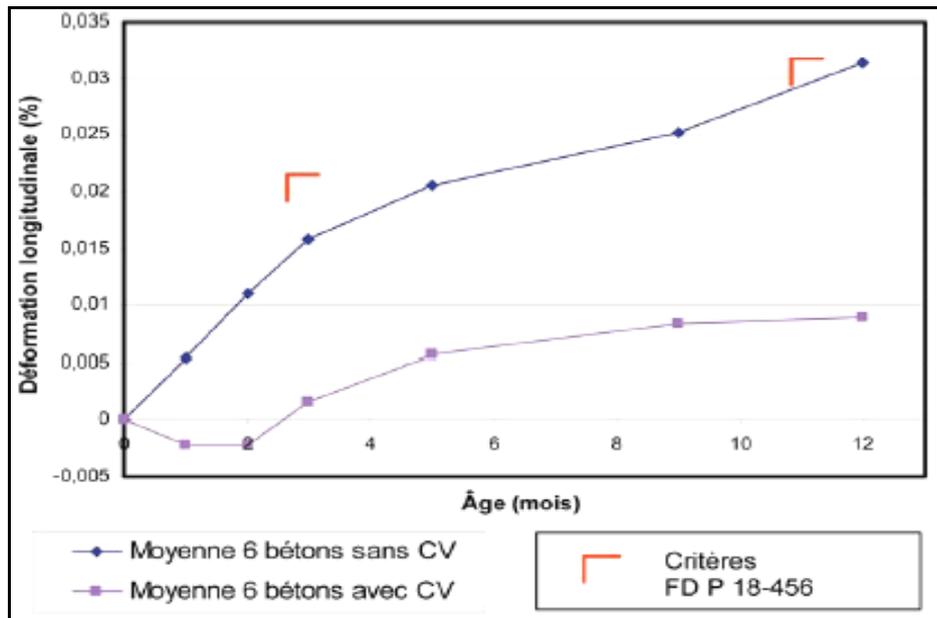


Figure IV.29- Effet des cendres volantes sur la résistance aux alcalines réactions [56].

Par ailleurs, Les mortiers contenant différentes quantités de pouzzolanes (35 %, 45 % et 55 %) présentent une excellente résistance face à la réaction d'alcali silice, comme montre la figure IV.30, [52].

L'addition de 15 % de fumée de silice par masse du ciment au béton contenant une pierre calcinée (3.5 kg/m^3) est suffisante pour empêcher l'expansion due à la réaction alcali silice, [37].

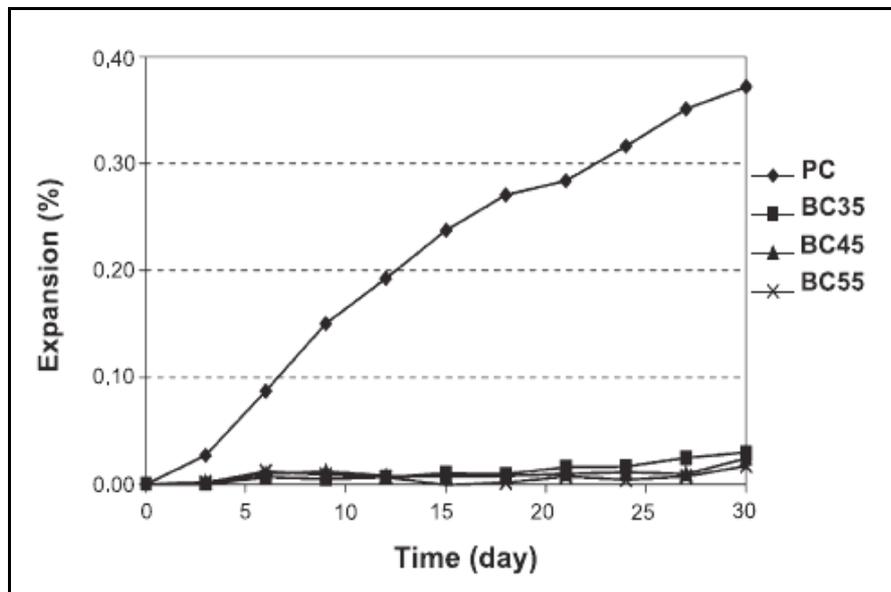


Figure IV.30 : Expansion des mortiers due à l'attaque par les alcalines réactions [37].

IV.4 Conclusion

La recherche bibliographique sur l'effet des ajouts cimentaires nous permet de tirer des conclusions sur leur contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du ciment.

- L'addition de calcaire dans le ciment améliore la résistance à la compression aux jeunes âges, car son incorporation dans le ciment permet d'accélérer la vitesse d'hydratation des ciments portland. De même le laitier et la pouzzolane permettent de donner une bonne résistance à long terme.
- L'effet des ajouts cimentaires sur la durabilité du ciment varie en fonction du dosage et du type d'ajout. La fumée de silice, le laitier et la pouzzolane ont de bonnes performances sur la résistance aux agents agressifs.

Donc, il vaut mieux se pencher vers des ciments contenant du laitier et du calcaire, vu les effets complémentaires que jouent chacun des deux ajouts, pour obtenir de bonnes résistances mécaniques, permettant d'avoir des matériaux plus durables et résistants aux différents agents agressifs tels que, les sulfates, les acides, les alcalines réactions ainsi que la perméabilité aux ions chlores.

Chapitre V

Matériaux et méthodes d'essais

Matériaux et méthodes d'essais

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, une description détaillée sur les essais expérimentaux, la préparation des mélanges et des variables d'étude sont exposés.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Oued Sly Chlef et au laboratoire des Matériaux de Construction du département de Génie de Civil de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.

V.2 Matériaux utilisés

V.2.1 Ciment

Le clinker utilisé dans les ciments provient de la cimenterie de Oued Sly -Chlef-, mélangé avec du gypse pour régulariser la prise, qui varie avec la composition chimique du ciment. Le CEM I a une finesse de 2950 cm²/g et une masse volumique absolue de 3160 kg/m³. La composition chimique du clinker et du gypse est donnée dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : Composition chimique du ciment du clinker d'après le fabricant

Composante chimique	Chaux (CaO)	Silice (SiO ₂)	Alumine (Al ₂ O ₃)	Oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃)	Magnésié MgO	CaO libre
Clinker	66,76	22,34	5,13	3,78	0,47	0,75
Gypse	35	0.49	1.03	0.32	1.19	/

La composition minéralogique du ciment est déterminée selon les formules de bogue.

Tableau V.2. : Composition minéralogique du ciment d'après le fabricant

Notation symbolique	Nom	Formule chimique	% en poids moyen
C ₃ S	silicate tricalcique ou alite	3CaO, SiO ₂	57,79
C ₂ S	silicate bicalcique ou bélite	2CaO, SiO ₂	20,47
C ₃ A	aluminat tricalcique ou célite	3CaO, Al ₂ O ₃	7,20
C ₄ AF	alumino-ferrite tétracalcique	4CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	11,49

V.2.2 Le calcaire

Le calcaire utilisé dans les essais est celui employé comme matière première dans la fabrication du ciment de Chlef (carrière de Ouled Ben Abdelkader); il est broyé à une finesse d'environ 3400 cm²/g. L'analyse chimique du calcaire est donnée dans le tableau V.3.

Tableau V.3. Analyse chimique du calcaire.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF
(%)	0,55	0,40	0,17	53,47	1,02	1,50	0,03	43,13

V.2.3 Le laitier

Le laitier utilisé, extrait des déchets de l'usine d'El Hadjar (Annaba), est broyé à l'aide de l'appareil los Angeles jusqu'à avec une finesse d'environ 3900 cm²/g. La composition chimique du laitier de El-Hadjar est donnée dans le tableau V.4.

Tableau V. 4. Analyse chimique du laitier.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
(%)	42,20	5,85	1,90	20,42	4,72	1,54	0,43	0,12	0,80

V.2.4 Le sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable normalisé CEN EN 196-1[4].

V.2.5 L'eau

L'eau utilisée est l'eau potable du robinet. Cette eau ne contenant pas d'impuretés nuisibles aux mélanges.

V.3 Conservation

Les éprouvettes sont conservées dans une enceinte climatiques (figure V.1) avec :

- La température de la salle est de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,
- L'humidité relative est de $90 \% \pm 5 \%$.



Figure V.1 : Enceinte climatique pour conservation des éprouvettes.

V.3.1 Confection et préparation des mortiers

Pour la détermination de la résistance à la traction en flexion et en compression, on a utilisé des éprouvettes de forme prismatiques $4 \times 4 \times 16$ cm.

Les mortiers ont été préparés selon la norme NF EN 196-1[4] 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).

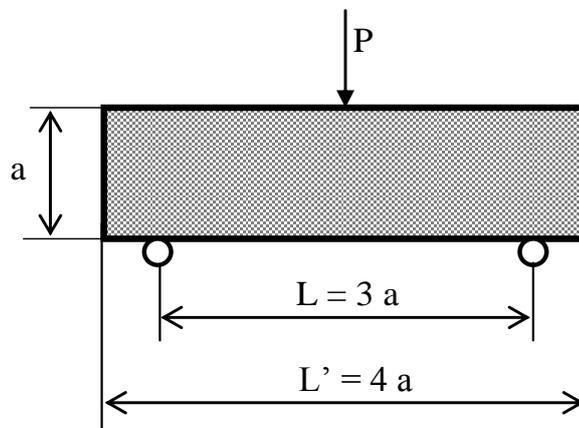
Seize (16) combinaisons ont été préparées à partir de différents pourcentages d'ajouts calcaire et du laitier comme le montre le tableau. V.5.

Tableau V.5 : Les différentes combinaisons "CEM I + Calcaire (C) + Laitier (L)"

Notation	CEM I	Calcaire (C)	Laitier (L)
C0L0	100	0	0
C10L0	90	10	0
C20L0	80	20	0
C30L0	70	30	0
C0L10	90	0	10
C0L20	80	0	20
C0L30	70	0	30
C0L40	60	0	40
C10L10	80	10	10
C10L20	70	10	20
C10L30	60	10	30
C10L40	50	10	40
C20L10	70	20	10
C20L20	60	20	20
C20L30	50	20	30
C20L40	40	20	40

V.3.2 Essai de la résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été évaluée par des essais de flexion 3 points effectués sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, avec une vitesse de chargement de 50 N/s.

**Figure V.2** : Schéma de calcul de la flexion

La formule de la RDM pour le calcul de la contrainte de flexion est donnée comme suit :

$$R_f = \frac{M}{I} y$$

Avec :

M : moment de flexion, $M = \frac{PL}{4}$ ($L = 3a$)

I : moment d'inertie de la section transversale, $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{a^4}{12}$

Y : distance de la fibre la plus éloignée à l'axe neutre, $y = \frac{a}{2}$ d'où :

$$R_f = \frac{9P}{2a^2}$$

Où :

R_f : est la résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré (MPa);

a : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

V.3.3 Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les six demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion. Ces essais ont été effectués selon la norme NF EN 196-1 [4]. La contrainte de compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{MPa})$$

Avec :

F_c : Charge maximale de rupture (N).

A : l'aire de la section d'application de la force de compression (1600 mm²).

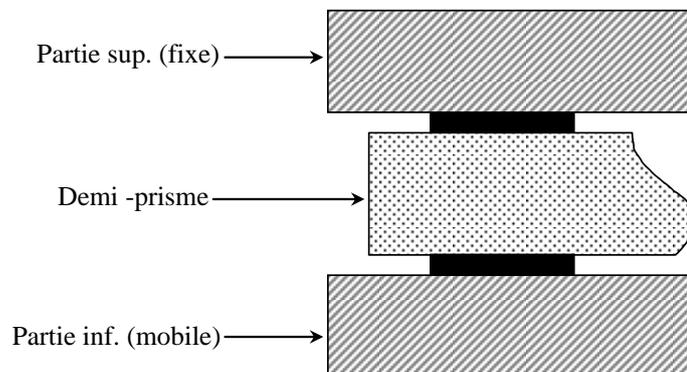


Figure V.3 : Essai de compression simple

V.4 la durabilité

Les essais de la durabilité ont été réalisés sur des mortiers normalisés. En se basant sur des résultats des essais mécaniques. Sept (7) combinaisons sont sélectionnées :

- Un ciment de contrôle contenant 100 % de CEM I (sans ajouts).
- Un ciment contenant 90 % de CEM I et 10 % de calcaire.
- Un ciment contenant 70 % de CEM I et 30 % de laitier.
- Un ciment contenant 60 % de CEM I et 40 % de laitier.
- Un ciment contenant 70% de CEM I, 10% de calcaire et 20% de laitier.
- Un ciment contenant 60% de CEM I, 10% de calcaire et 30% de laitier.
- Un ciment contenant 50% de CEM I, 10% de calcaire et 40% de laitier.

V.4.1 Attaques des mortiers par les sulfates

Les mortiers ont été préparés dans des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ 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) (figure V.4). Les solutions ont été remplacées tous les 30 jours. L'expansion des éprouvettes a été évalué chaque deux semaines (figure V.5).



Figure V.4 : Immersion des éprouvettes dans les solutions de sulfates



Figure V.5 : Mesure de l'expansion dans les sulfates

V.4.2 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 (figures V.6). Les solutions ont été renouvelées tous les 30 jours.



Figure V.6 : Des éprouvettes immergées dans la solution contenant 1 % HCl et 3 % H_2SO_4

La résistance chimique est déterminée selon la norme ASTM C-267-97 [58]. Chaque quinze (15) jours d'immersion à la température ambiante, les éprouvettes sont nettoyées 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 :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

M_1 : masse de l'éprouvette avant l'immersion.

M_2 : masse de l'éprouvette après l'immersion.

Chapitre VI

*Analyse des résultats
expérimentaux*

Analyse des résultats expérimentaux

Dans ce chapitre nous présentons l'analyse et la discussion des résultats obtenus à partir des différents essais effectués dans le chapitre V. Ils permettent de donner des interprétations sur les propriétés mécanique des ciments au calcaire et sur l'effet d'addition des laitiers sur les propriétés physiques, mécaniques et sur la durabilité des mortiers dans les milieux agressifs, telles que les sulfates de sodium et sulfates de magnésium ainsi les acides chlorhydrique et les acides hydrochloriques.

VI.1 propriétés physiques

Les résultats des essais physiques à savoir, la consistance normale et le temps de début et de fin de prise ainsi que l'expansion à chaud, pour les différents mortiers testés sont présentées dans le tableau VI.1.

Tableau VI.1: Résultats des essais physiques.

Notation	Consistance normale (%)	Temps de début de prise (mn)	Temps de fin de prise (mn)	Expansion à chaud (mm)
C0L0	27	275	345	0.3
C10L0	26.2	250	315	0.5
C20L0	25.5	210	285	0.7
C30L0	25.2	165	247	1.00
C0L10	26.7	285	358	0.5
C0L20	26.3	298	374	0.5
C0L30	25.8	312	389	1.00
C0L40	25.4	325	398	1.00
C10L10	25.8	260	321	0.2
C10L20	25.4	271	334	0.5
C10L30	25.1	278	347	1.00
C10L40	24.8	289	360	2.00
C20L10	24.8	226	298	0.4
C20L20	24.6	236	312	0.6
C20L30	24.4	252	325	1.00
C20L40	24.2	264	333	2.00
Norme		≥ 60 mn	/	≤ 10 mm

VI.1.1 Consistance normale

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Cet essai est nécessaire pour déterminer les temps de début et fin de prise, ainsi que l'expansion. Les mesures de la consistance normale sur la pâte du ciment sont déterminées, selon la norme EN 196-3 [2].

VI.1.1.1 Effet du calcaire

On constate d'après la figure VI.1 que l'addition de 10 % à 30 % du calcaire diminue la quantité d'eau de 26.2 % à 25.2 % respectivement. Les mêmes constatations ont été faites par Tsvilis et al [59], où une diminution de 24 % à 22.5 % pour une substitution de 10 % à 35 % de calcaire comparant au ciment contrôle.

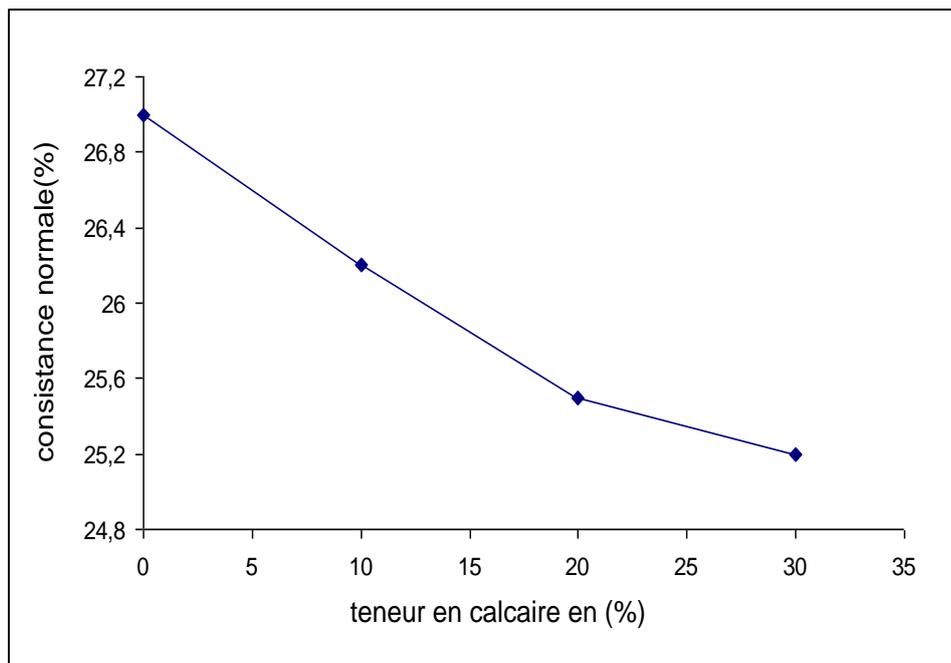


Figure VI.1 : Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage du calcaire

VI.1.1.2 Effet du laitier

On constate d'après la figure VI.2 que l'addition de 10 % et 40 % du laitier diminue la quantité d'eau de 26.7 % et 25.4 % respectivement. La diminution de la quantité de l'eau demandée avec l'accroissement du laitier dans la composition du ciment est probablement due à la grande surface spécifique du laitier.

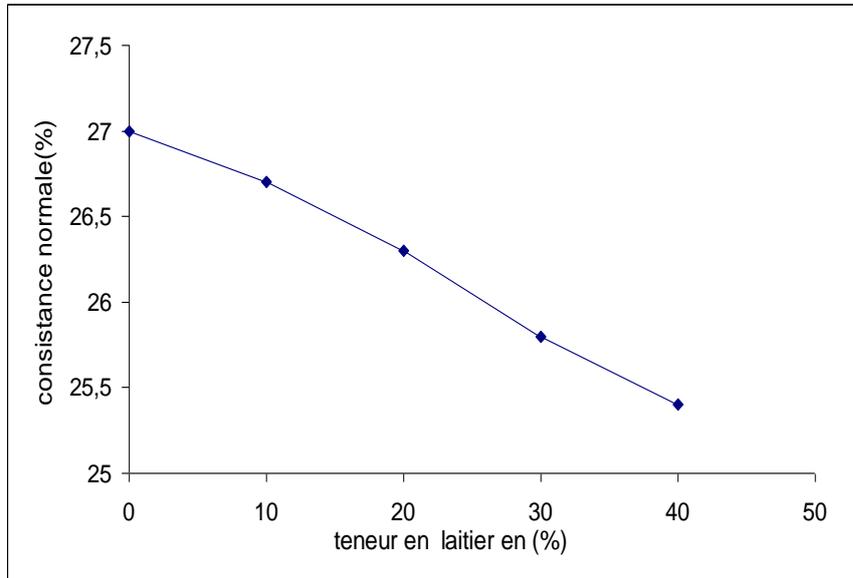


Figure VI.2 : Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage de laitier.

Des constatations identiques que celles de notre étude, ont été observées par des chercheurs, ces constatations indiquent que la consistance normale diminue, avec l'augmentation du laitier (figure VI.3), [60].

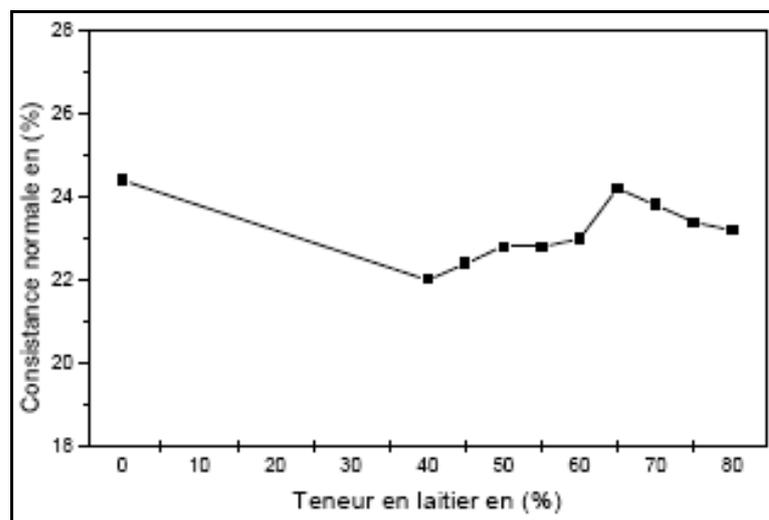


Figure VI.3 : Consistance normale des ciments élaborés en fonction du taux du laitier [60].

VI.1.1.3 Effet des couples calcaire/laitier

D'après la figure VI.4, on constate que l'addition de 10 % à 40 % du laitier au ciment contenant 10 % de calcaire diminue le pourcentage d'eau de 25.8 % à 24.8 % respectivement. En comparant avec des d'autres ajouts, on remarque que, l'addition de 10 % à 30 % de pouzzolane naturelle nécessite une augmentation du pourcentage d'eau de 24.2 % à 26.8 % respectivement [61].

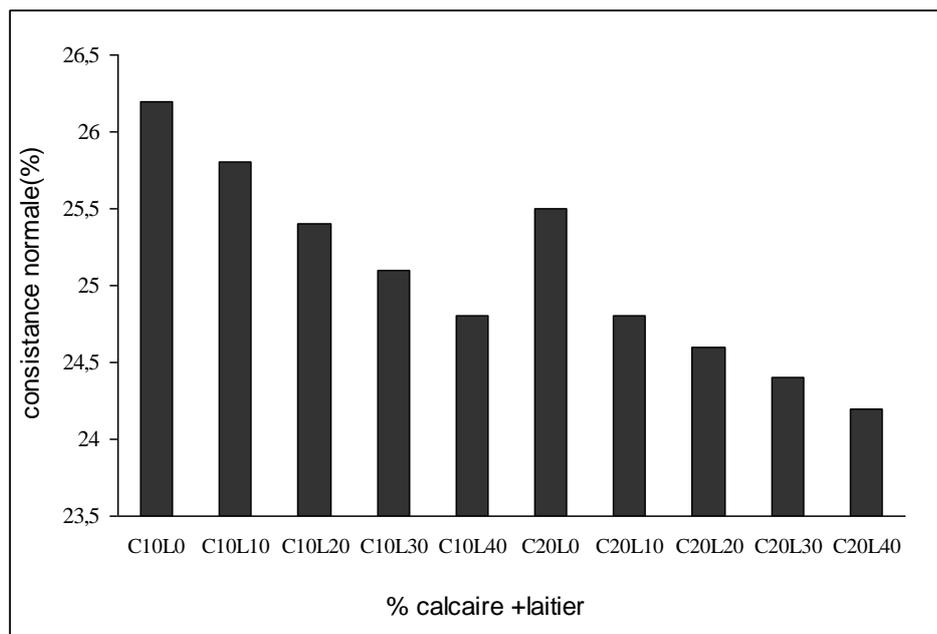


Figure. VI.4 : Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage d'ajout

VI.1.2 Temps de prise

VI.1.2.1 Effet du calcaire

On constate d'après la figure VI.5, que le temps de début de prise diminue avec l'augmentation du pourcentage de calcaire.

Cependant, le début de prise est dans la norme qui exige un minimum de 60 minutes pour le début de prise.

Notons que l'effet accélérateur que joue le calcaire est d'environ 25 minutes pour 10 % d'ajout, et de 110 minutes pour 30 % d'ajout par rapport au ciment CEMI. La réduction du temps de début de prise avec l'augmentation de la quantité de calcaire est due à l'effet combiné l'augmentation du taux d'hydratation et l'augmentation de la fraction solide [17].

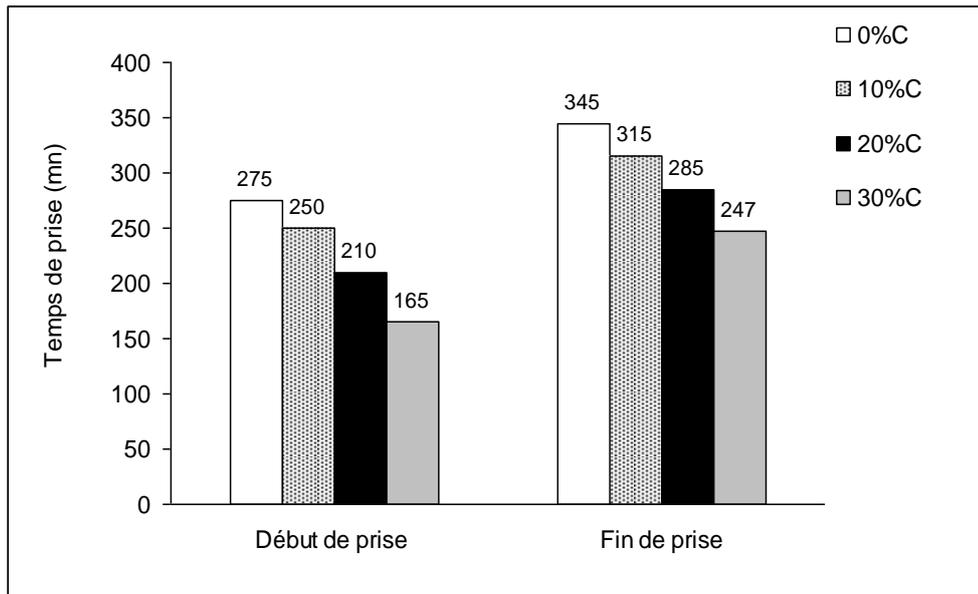


Figure VI.5 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de calcaire

VI.1.2.2 Effet du laitier

La figure VI.6 montre l'augmentation du temps de prise avec le taux de substitution du laitier. Cette augmentation est justifiée par la nature des réactions d'hydratation des ciments au laitier qui se déroulent plus lentement, à cause de la diminution du pourcentage des aluminates tri-calciques et l'augmentation des silicates bi-calciques, accompagné d'une diminution des silicates tricalciques dans la composition minéralogiques des ciments (figure VI.6).

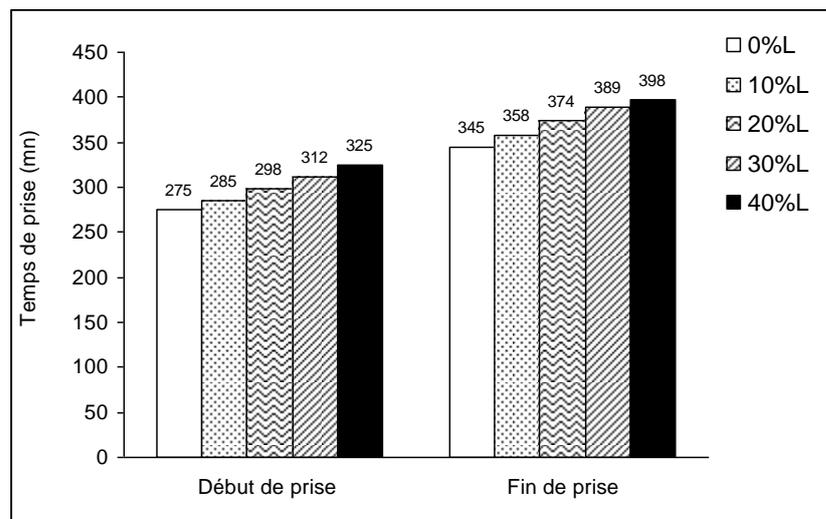


Figure VI.6 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de laitier

VI.1.2.3 Effet des couples calcaire/laitier

On constate d'après la figure VI.7. Que le temps de prise augmente avec l'accroissement du pourcentage d'ajout laitier dans le ciment contenant 10 % du calcaire. On constate que l'incorporation de 40 % de laitier présente une augmentation de 15,6 % pour le début de prise et 14,28 % pour la fin de prise.

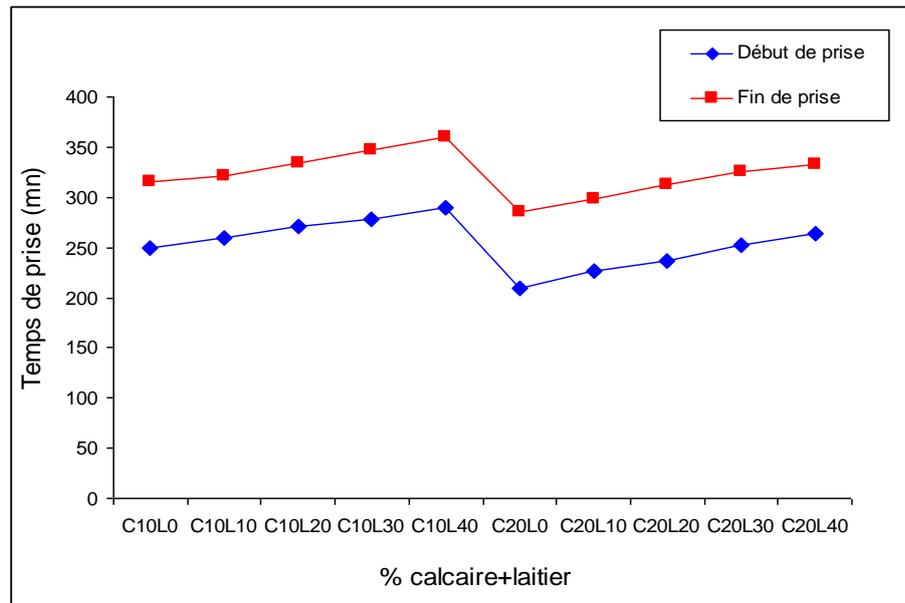


Figure VI.7 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage d'ajout

Ceci est comparable aux résultats trouvés par d'autres chercheurs, où l'augmentation du temps de prise en fonction du taux du laitier est justifiée par la nature des réactions d'hydratation des ciments au laitier, qui se déroulent lentement, à cause de la diminution du pourcentage des aluminates tricalciques C_3A et l'augmentation des silicates bicalciques C_2S accompagné d'une diminution des silicates tricalciques C_3S dans la composition minéralogiques des ciments (figure VI.8), [60].

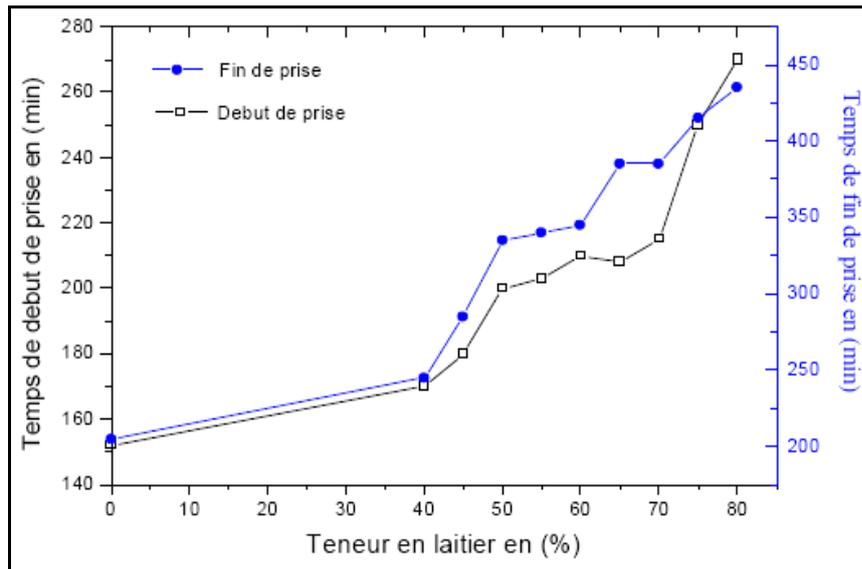


Figure VI.8 : Evolution du temps de prise élaborés en fonction du taux du laitier

VI.1.3 Expansion à chaud

Les résultats de l'expansion à chaud sont résumés dans la figure VI.9. On remarque que l'augmentation du pourcentage de laitier, donne des résultats aléatoires. Ce comportement peut être produit par la présence de la chaux libre (CaO), le sulfate de calcium et d'autres éléments comme l'oxyde de magnésium MgO.

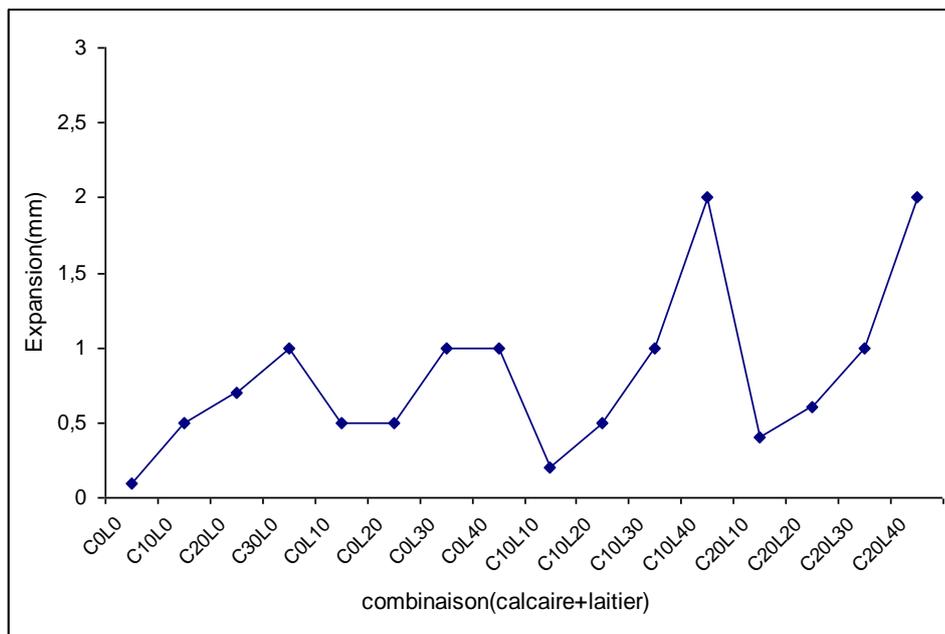


Figure VI.9 : Evolution de l'expansion à chaud en fonction du pourcentage d'ajout

Rappelons que les résultats des valeurs de l'expansion restent inférieurs à la limite maximale imposée par la norme NA 442 [63].

VI.2 Essais mécaniques

VI.2.1 Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression sont regroupés dans le tableau VI.2

Tableau VI.2 : Résultats des résistances à la compression.

Notation	Résistance à la compression R_c (MPa)						
	2j	7j	28j	60j	90j	R*	R**
C0L0 (CEM I)	16.47	40.18	58.05	63.22	65.50	1	1
C10L0	16.6	40.41	51.58	57.90	59.83	0.89	0.91
C20L0	10.37	36.93	46.25	50.32	52.43	0.79	0.80
C30L0	10.05	24.87	34.23	41.53	45.34	0.59	0.69
C0L10	16.00	39.22	55.46	60.83	65.94	0.96	1.01
C0L20	15.96	37.67	55.83	59.89	67.20	0.96	1.02
C0L30	13.00	30.21	53.54	64.58	68.29	0.92	1.04
C0L40	12.80	25.73	51.05	59.16	67.39	0.88	1.03
C10L10	14.08	35.58	53.63	57.12	60.10	0.92	0.92
C10L20	11.08	32.67	49.58	57.60	62.52	0.85	0.95
C10L30	8.17	26.05	43.45	49.17	61.13	0.75	0.93
C10L40	7.56	24	40.91	52.92	59.12	0.70	0.90
C20L10	12.80	30.10	45	48.86	50.20	0.78	0.77
C20L20	9.96	26.77	45.73	52.63	56.50	0.79	0.86
C20L30	9.79	20.63	36.46	50.73	53.17	0.63	0.81
C20L40	6.48	16.15	34.38	44.06	44.98	0.59	0.69

R* : rapport entre la résistance à la compression de la combinaison par rapport au mortier CEM I à 28 jours,

R** : rapport entre la résistance à la compression de la combinaison par rapport au mortier CEM I à 90 jours,

VI.2.1.1 Effet du calcaire

La figure VI.10 montre le développement de la résistance à la compression des mortiers contenant du calcaire à l'âge de 2, 7, 28, 60 et 90 jours pour un rapport de E/C égal à 0,5.

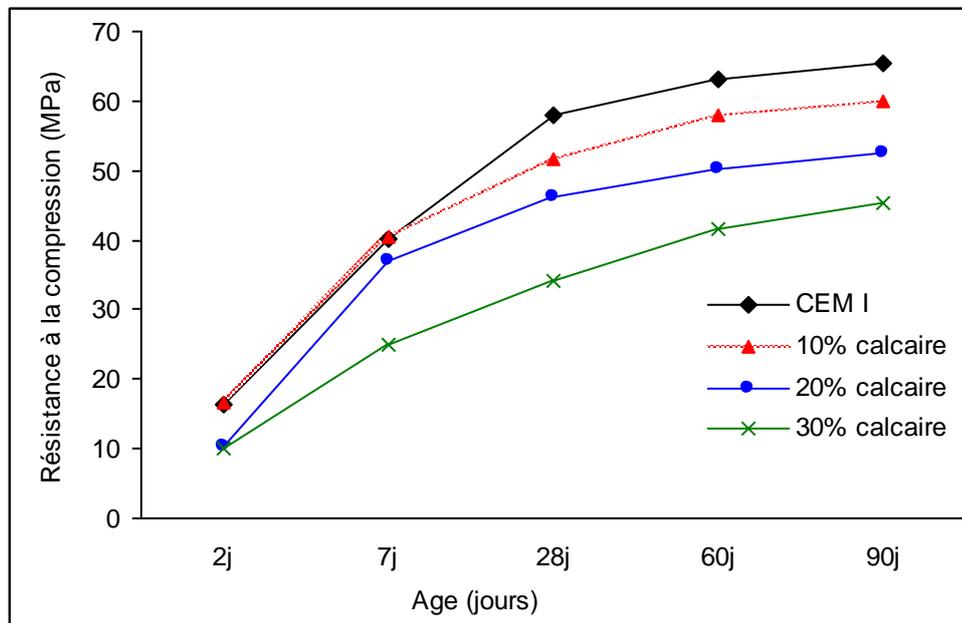


Figure VI.10 : Evolution de la résistance à la compression
En fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire

D'après cette figure, on remarque que la résistance à la compression est similaire à celle du mortier contrôle pour une substitution de 10 % de calcaire à 2 jours, ensuite elle diminue de 37 % et 39 % pour une substitution de 20 % et 30 % respectivement. A l'âge de 28 jours, la résistance à la compression diminue de 11 % et de 41 % avec l'augmentation du pourcentage du calcaire de 10 % à 30 % respectivement. Une étude [35] a prouvé que la résistance à 2 jours d'un mortier contenant 10 % de calcaire est similaire à la résistance du mortier de contrôle, par contre elle diminue de 18 % pour une substitution de 20 % de calcaire.

Sueng et al [49] ont trouvé que la résistance à 28 jours des mortiers diminue de 5.83 % et 27.16 % avec l'augmentation du pourcentage du calcaire de 10% à 30% de calcaire respectivement.

La poudre de pierre de chaux ne participe pas à la réaction chimique, mais elle agit en tant qu'accélérateur pendant l'hydratation du ciment [64].

VI.2.1.2 Effet du laitier

La présence du laitier dans la composition du ciment modifie considérablement ces propriétés mécaniques. Les résultats de la résistance à la compression des mortiers contenant du laitier sont présentés dans la figure VI.11.

La substitution du ciment par du laitier a donné des résistances à la compression faibles au jeune âge (2 à 7 jours). Ceci est dû à la faible activité hydraulique du laitier granulé d'El Hadjar [65].

Cependant, la résistance à la compression des ciments au laitier est similaire à celle du CEM I à 90 jours d'où les résistances à la compression des ciments avec 20 % et 30 % de laitier dépassent celle du CEM I de 3 % et 4 % respectivement.

Des études [65] sur des pâtes contenant du laitier ont trouvé que la substitution du ciment par du laitier a donné des résistances à la compression faibles à jeune âge (2 à 7 jours). Cependant, la résistance des ciments au laitier se rapproche à celle du CEM I à 90 jours, particulièrement pour les ciments avec 20 % et 30 % de laitier (6 % à 8 % de différence).

D'autres chercheurs ont constaté que les résistances finales sont obtenues pour une addition de 30 % du laitier avec une température de cure de 20 °C, [66].

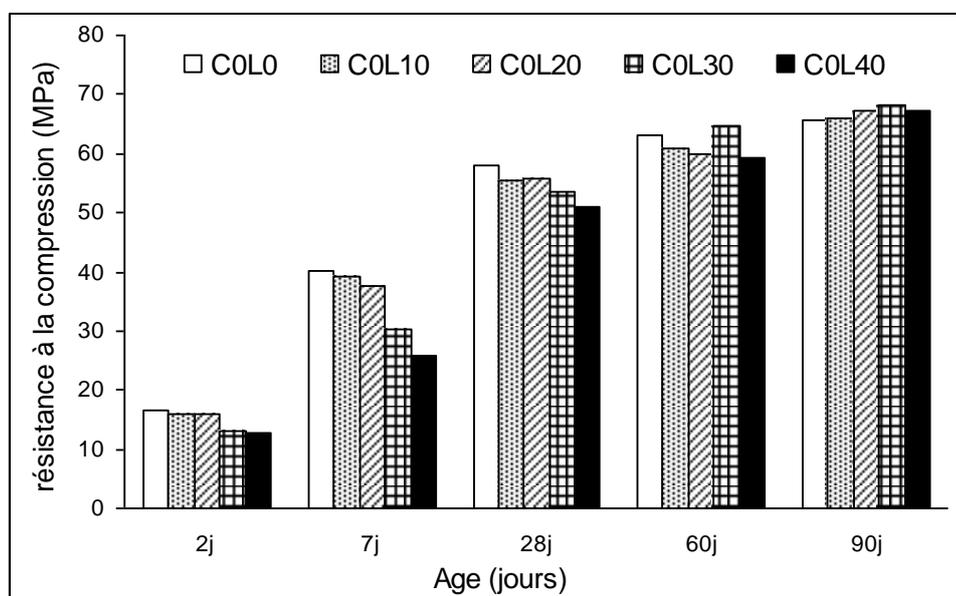


Figure VI.11 : Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression.

VI.2.1.3 Effet des couples calcaire/laitier

La figure VI.12 montre l'influence des différentes combinaisons calcaire/laitier sur la résistance à la compression. On remarque qu'au jeune âge (2 et 7 jours), une diminution de la résistance avec l'augmentation du pourcentage du laitier sur les mortiers contenant du calcaire. Ce phénomène est dû à l'accélération de l'hydratation par le calcaire aux jeunes âges.

Cependant, à long terme (90 jours), l'incorporation de 20 % jusqu'au 30 % du laitier dans le ciment contenant 10 % de calcaire contribue à l'amélioration de résistances de 4.5 % et 2.17 % respectivement comparant par rapport au ciment de contrôle (ciment contenant 10% de calcaire).

Menedez et al [36] ont fait les mêmes constatations. L'addition de 10 % calcaire et de très petites quantités de laitier (0-12 %) donne des résistances à la compression maximales au jeune âge (1, 3 et 7 jours). Dans ce cas, une augmentation de 16 % de la résistance à la compression a été obtenue par rapport au mortier de contrôle. Cependant, à partir de 28 jours, la résistance à la compression change significativement en fonction des combinaisons, elle est maximale pour une combinaison de 7,5 % de calcaire et 35 % de laitier. L'amélioration est de 7 % par rapport à celle du mortier de contrôle à 90 jours.

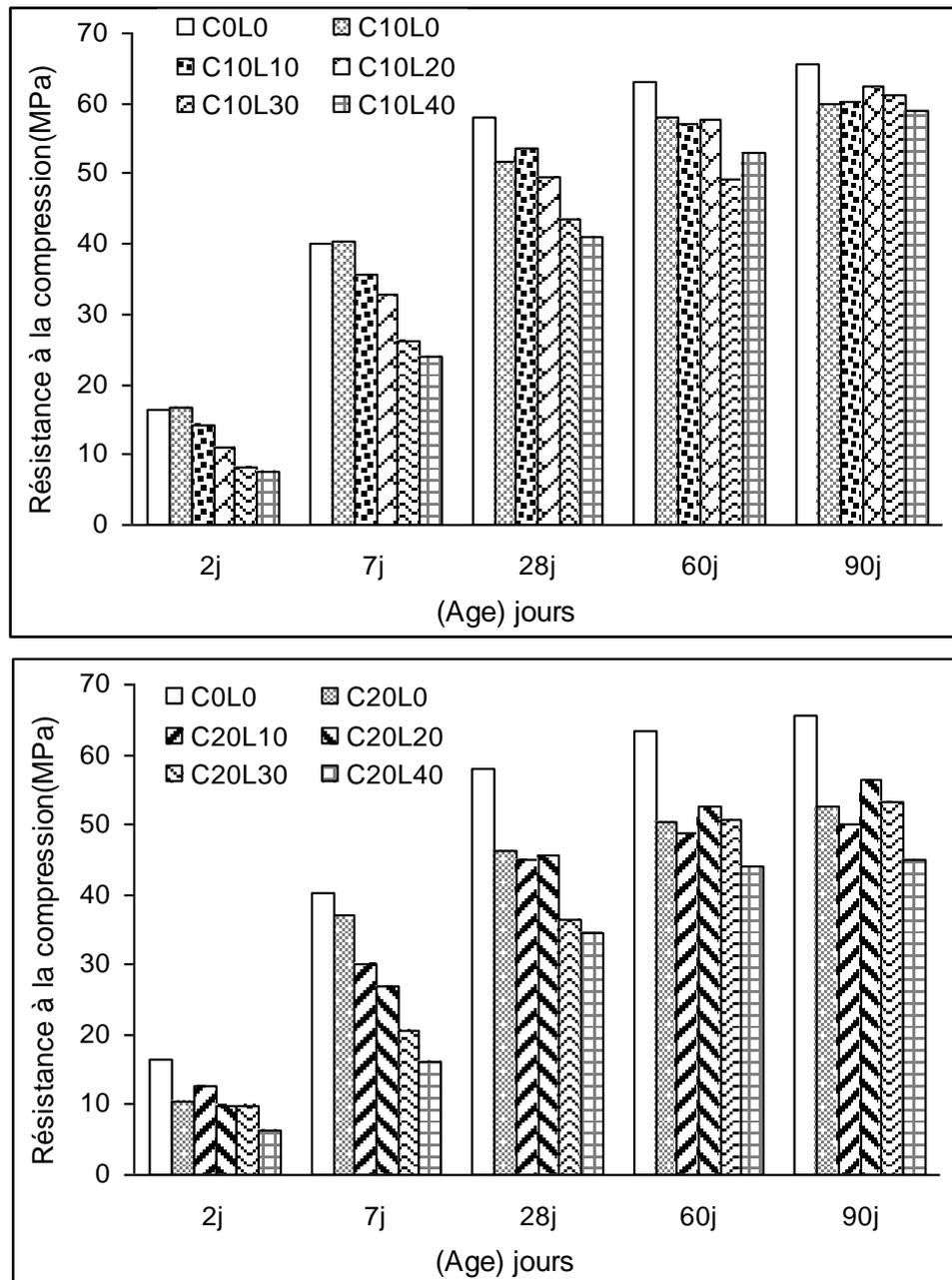


Figure VI.12 : Variation de la résistance à la compression pour les différentes combinaisons

VI.2.2 Résistance à la flexion

Les résultats des résistances à la flexion sont regroupés dans le tableau VI.3

Tableau VI.3 : Résultats des résistances à la flexion.

Notation	Résistance à la flexion R_f (MPa)				
	2j	7j	28j	60j	90j
C0L0 (CEM I)	3.20	5.84	6.19	7.44	7.53
C10L0	3.10	5.55	6.37	6.83	7.47
C20L0	1.73	5.44	5.85	6.76	7.10
C30L0	1.6	4.97	5.8	6.05	6.85
C0L10	3.44	5.64	7.01	7.23	7.39
C0L20	2.93	5.73	6.47	6.54	7.45
C0L30	2.38	5.00	6.97	7.28	7.68
C0L40	2.56	4.37	7.00	7.14	7.39
C10L10	2.98	5.08	6.71	6.36	7.15
C10L20	2.75	4.96	6.60	7.17	7.24
C10L30	1.99	4.5	6.45	7.18	7.42
C10L40	1.75	4.20	6.05	7.25	7.82
C20L10	2.56	5.25	6.32	6.84	7.19
C20L20	1.81	4.84	6.64	7.03	7.31
C20L30	2.25	3.59	6.28	7.47	7.74
C20L40	1.73	2.89	5.96	7.42	7.53

L'écart type des résultats des résistances varie de 0.12 à 1.95 % pour les résistances à la compression et de 0.02 à 1.01 % pour les résistances à la flexion.

VI.2.2.1 Effet du calcaire

D'après la figure VI.13 et le tableau VI.3 On remarque, l'influence du calcaire sur la résistance à la flexion des mortiers à l'âge de 2, 7, 28, 60 et 90 est insignifiante. Après 7 et 28 jours la résistance à la flexion du mortier contenant 10 % de calcaire diminue par rapport au mortier contrôle de 5 % et 6 % respectivement.

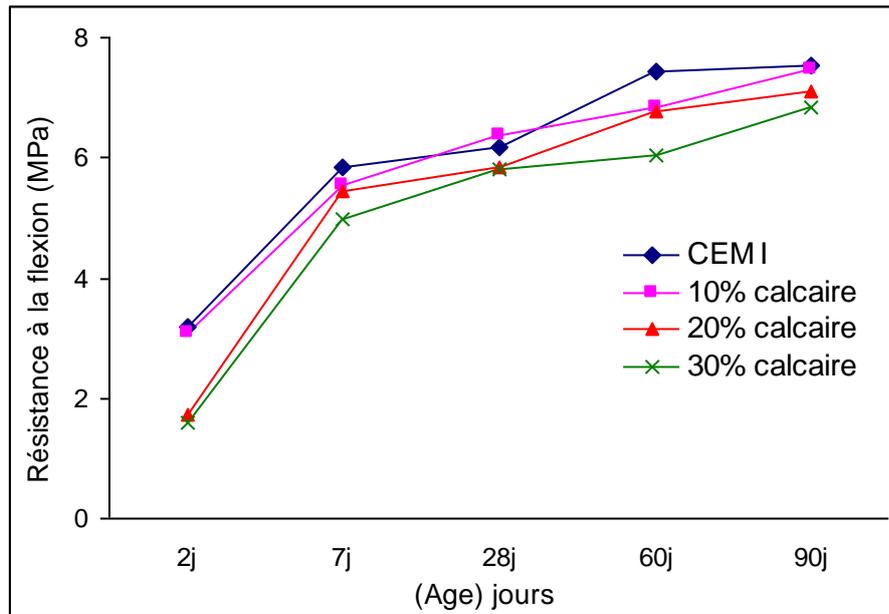


Figure VI.13 : Evolution de la résistance à la flexion
En fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire

VI.2.2.2 Effet du laitier

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers à l'âge de 2, 7, 28, 60 et 90 jours en fonction du pourcentage de laitier, sont donnés dans la figure VI.14. On observe des réductions systématiques de la résistance à 2 et 7 jour lorsque le pourcentage du laitier dépasse 10%. Cependant à 28 jours; les mortiers développent des résistances peu importantes, que celle du mortier de contrôle. A long terme (60 et 90 jours), l'augmentation du pourcentage de laitier de 20 à 30 % développe des résistances proches de celle du mortier contrôle.

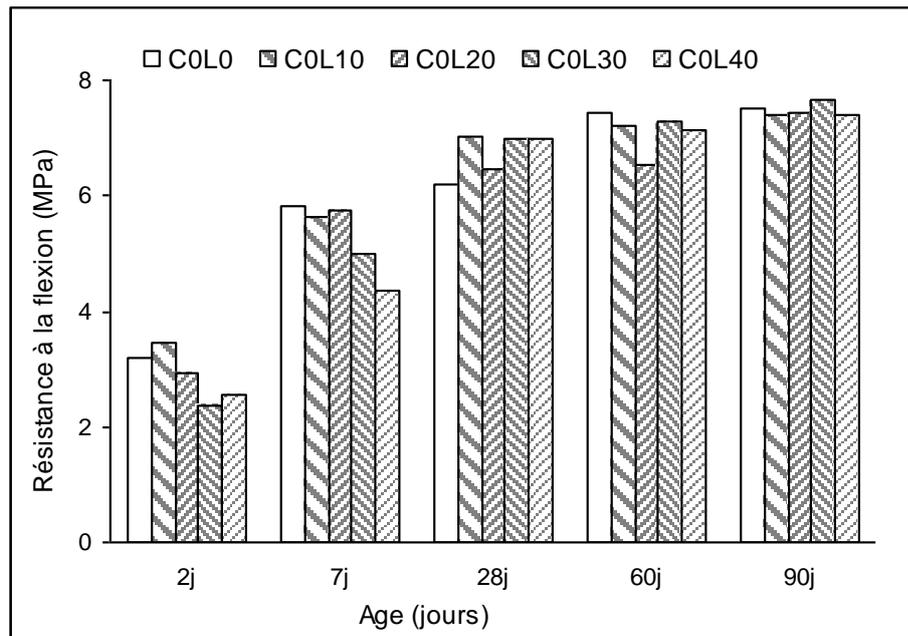


Figure VI.14 : Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la flexion

VI.2.2.3 Effet des couples calcaire/laitier

La figure VI.15, représente l'influence des différentes combinaisons CEMI/Calcaire/Laitier sur la résistance à la flexion. Aux jeunes ages (2 et 7 jours). On remarque que l'addition du laitier réduit la résistance à la flexion des mortiers contenant le calcaire. A 7 et 28 jours, la combinaison (10 % calcaire et 10 % laitier) donne une résistance plus proche à celle du mortier de contrôle. De même pour 28 jours. A long terme la combinaison (10 % calcaire et 20 % laitier) donne une meilleure résistance par rapport à celle des autres combinaisons.

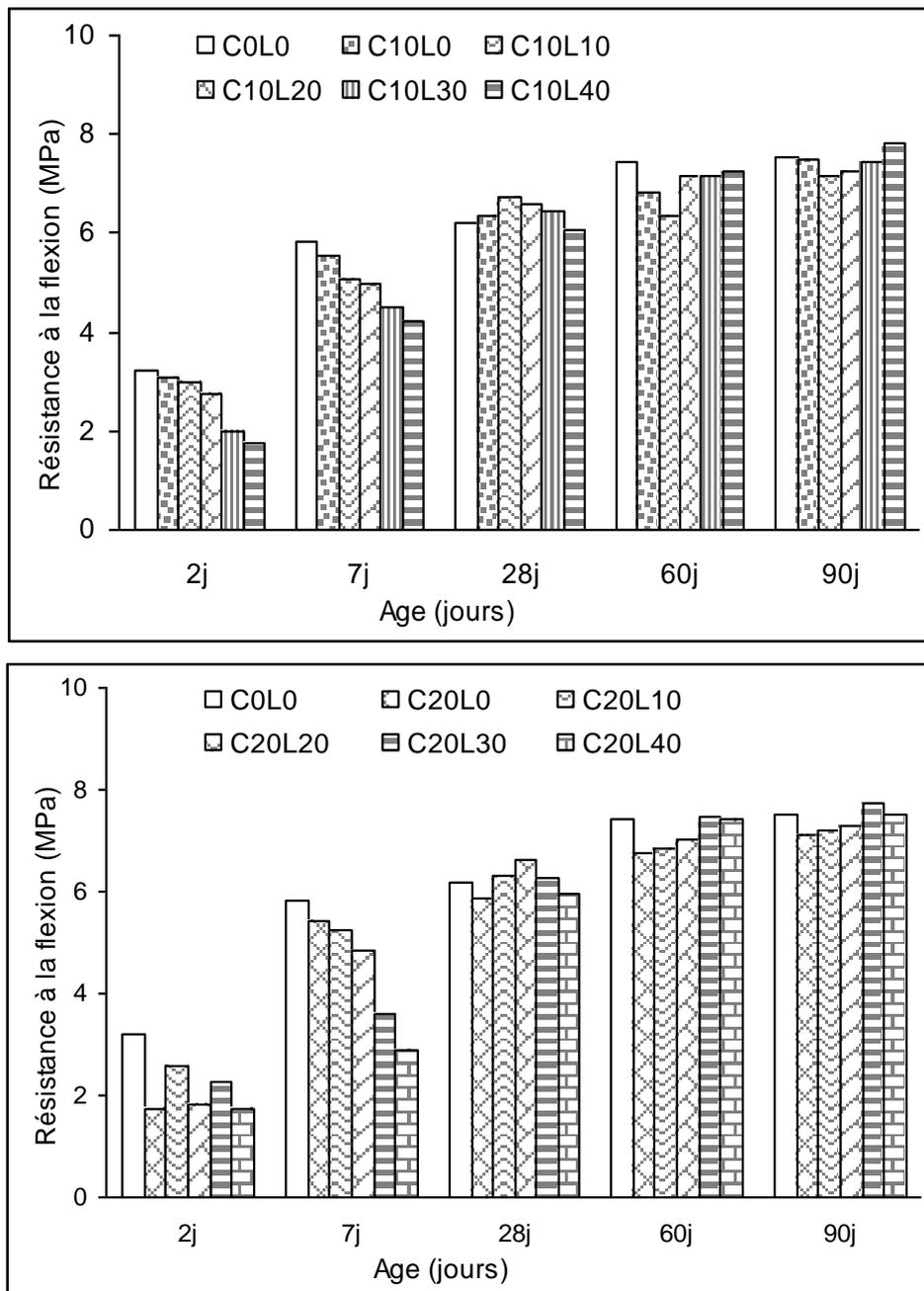


Figure VI.15 : Variation de la résistance à la flexion pour les différentes combinaisons (calcaire + laitier)

VI.2.3 comparaison entre les différents couples

Les combinaisons qui semblent donner les meilleures résistances mécaniques pour les différents ajouts sont :

- 10% du calcaire : cette combinaison donne de bonnes résistances à court terme.
- 30% du laitier donne de bonnes résistances à long terme.

Les combinaisons qui donnent les meilleures résistances mécaniques pour les couples calcaire/laitier.

- 10% du calcaire et 20% de laitier.
- 10% du calcaire et 30% de laitier.
- 10% du calcaire et 40% de laitier.

VI.3.4 Corrélation entre les résistances à la compression et à la flexion

Une corrélation entre la résistance à la flexion et à la compression des ciments contenant du laitier et du calcaire est proposée et comparée avec d'autres prédictions.

L'approche empirique traditionnelle pour estimer le module de rupture f_r consiste à déduire cette propriété de la résistance à la compression f_c , selon une loi de puissance de type :

$$f_r = m(f_c)^n \quad (\text{MP a}) \quad (\text{VI.1})$$

Où m et n sont deux paramètres d'ajustement. Des valeurs de n variant entre 0.5 et 0.75 ont été proposées.

D'après nos essais, une corrélation entre le module de rupture f_r et la résistance à la compression f_c est représentée sur la figure VI.16, et peut être déduite avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0,96 comme suit :

$$f_r = 0,47(f_c)^{0,676} \quad (\text{MP a}) \quad (\text{VI.2})$$

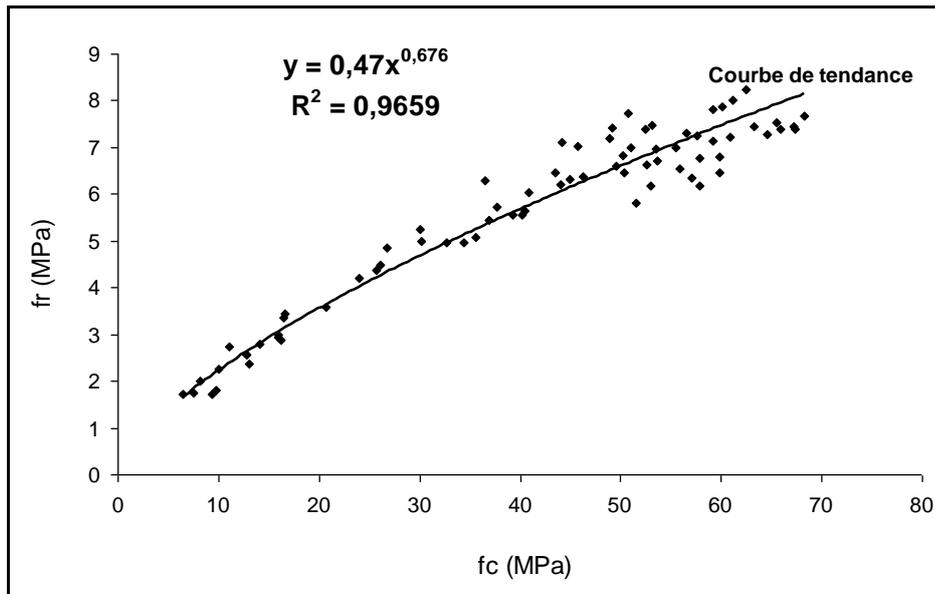


Figure VI.16 : Corrélation entre la résistance à la compression et le module de rupture

En pratique, il existe souvent plusieurs couples (m, n) qui peuvent satisfaire un ensemble de résultats expérimentaux. Cependant, par souci de simplification, plusieurs auteurs proposent des modèles généralisés ayant des paramètres constants.

Un certain nombre de formules empiriques reliant le module de rupture f_r et la résistance à la compression f_c ont été proposés par différents codes, entre autres:

- Code français BAEL 91/99 : $f_r = 0,6 + 0,06 f_c$ (MPa)
- Code américain ACI 318-99 : $f_r = 0,62(f_c)^{0,5}$ (MPa)
- Code canadien CSA A-23.3 : $f_r = 0,6(f_c)^{0,5}$ (MPa)
- Code néo-zélandais NZS 3101 : $f_r = 0,8(f_c)^{0,5}$ (MPa)
- Code hollandais : $f_{ctk} = 0,7(3 + 0,02 f_{cck})$ (MPa)
- Modèle de Shuaib : $f_r = 0,44(f_c)^{2/3}$ (MPa)

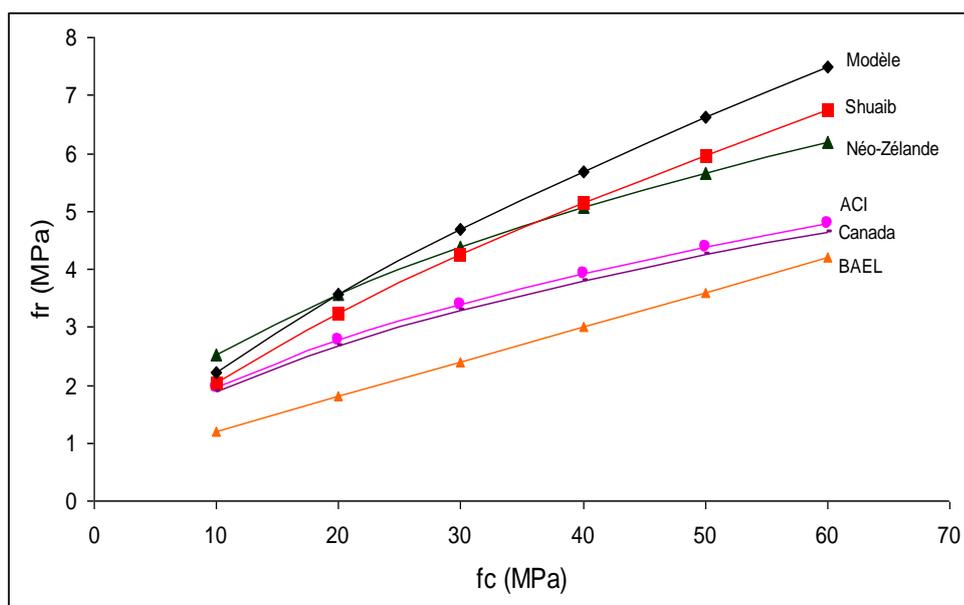


Figure VI.17: Comparaison entre les différentes prédictions

L'analyse de la figure VI.17 montre que le règlement américain ACI318-99, le règlement français BAEL 91/99 et règlement canadien CSA A-23.3 sous-estiment le module de rupture. En revanche, le code néo-zélandais, le modèle de Shuaib et le modèle proposé semblent mieux modéliser le module de rupture.

VI.3 Durabilité

VI.3.1 Attaques des mortiers par les sulfates

Les résultats relatifs à l'expansion des mortiers immergés dans les solutions contenant 5 % de Na_2SO_4 (A) et 5 % de MgSO_4 (B) sont présentés dans la figure VI.18.

Les résultats trouvés montrent une expansion plus élevée dans les éprouvettes immergées dans la solution de sulfate de sodium comparé à celles immergées dans la solution de sulfate de magnésium, Des résultats similaires ont été observés sur des pâtes contenant du laitier, [65]. Ces constatations ont été confirmées sur les ciments contenant des différents pourcentages d'ajout calcaire, [49].

Pour un ciment sans ajout (mortier de contrôle), l'expansion, après 180 jours d'immersion dans la solution (A) est 2.38 %. Par contre, l'expansion est de 1.4 % pour les éprouvettes placées dans la solution (B).

Les mortiers de ciment contenant, 30 % et 40 % de laitier présentent une expansion respectivement de 1.87 % et 1.72 % placés dans la solution (A) comparé à celle placés dans la solution (B) qui présentent 0.98 % et 0.81 %, d'où une réduction de l'expansion par rapport au mortier de contrôle de 21 % et 28% pour les éprouvettes placés dans la solution (A), et l'expansion des mortiers immergées dans la solution (B) égale 30 et 42 % respectivement.

Hadj Sadok et al. [65] ont fait les mêmes constatations : pour un ciment avec 10 % du laitier, l'expansion après 120 jours d'immersion, est de 0,795 %, pour les éprouvettes placées dans la solution de Na_2SO_4 comparée à 0,159 % pour le mortier conservé dans la solution de MgSO_4 .

L'expansion des mortiers contenant 10 % de calcaire après 180 jours d'immersion était de 1.64 % dans la solution (A) et 1.26 % dans la solution (B), donc l'addition de 10 % de calcaire a réduit l'expansion par rapport au ciment de contrôle de 31 % et 10 % dans les solutions sulfatiques (A) et (B) respectivement. Les mêmes remarques ont été constatées par [67].

La combinaison de 30 et 40 % de laitier avec 10 % de calcaire a réduit l'expansion des mortiers placés dans les solutions (A) de 31.09 % et de 49.39 %. Pour mortiers placés dans la solution (B) l'expansion est de 42 % et 44 % respectivement.

En outre, la résistance aux attaques sulfatiques pour les ciments contenant du laitier dépend du pourcentage de l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 contenu dans le laitier. Moins de Al_2O_3 dans le laitier donne une bonne résistance au sulfate, [68].

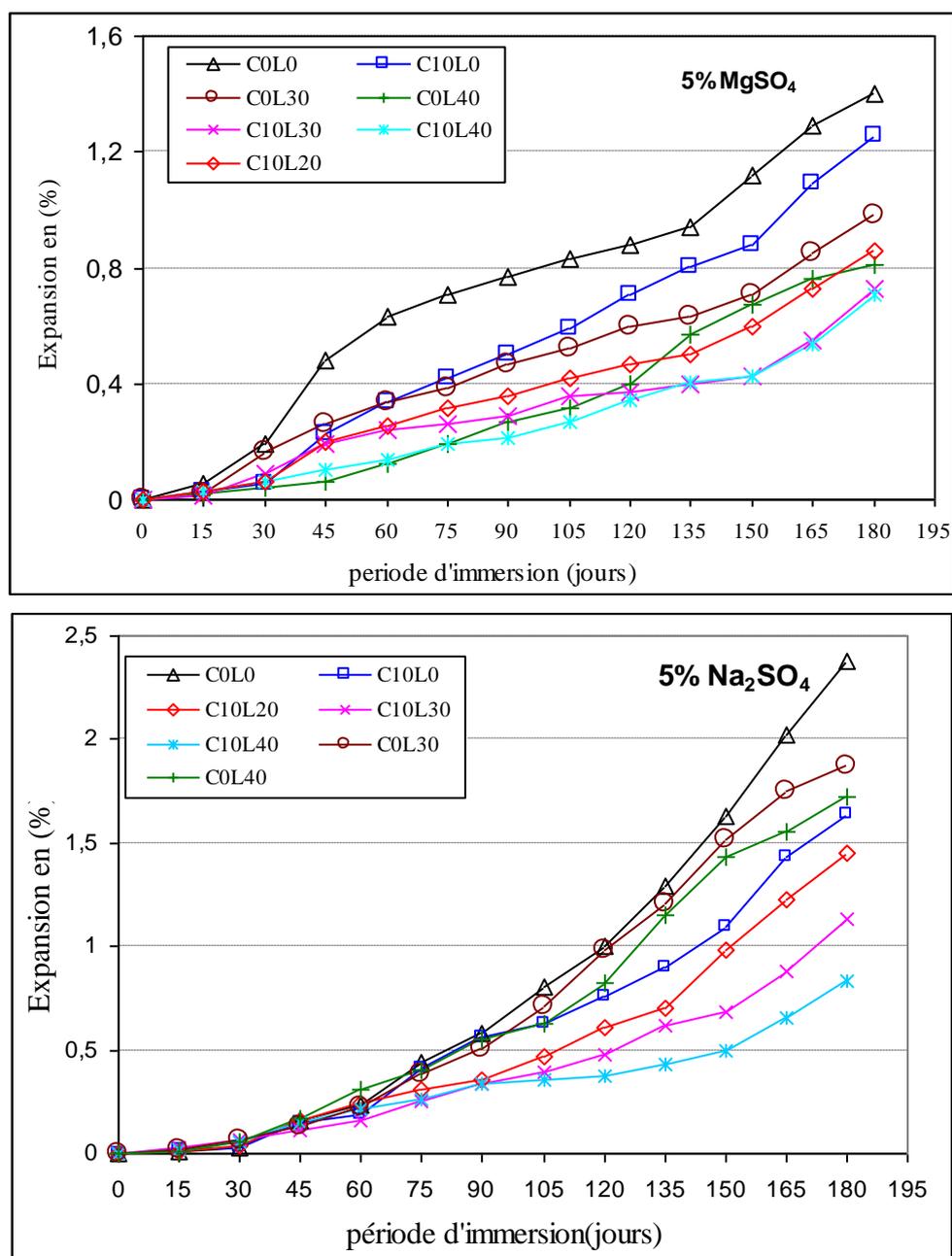
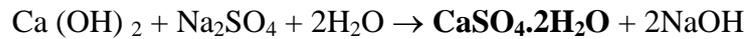


Figure VI.18 : Expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion dans les environnements (a) 5% Na_2SO_4 et (b) 5% MgSO_4 .

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, [69, 70].

Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates). Dans le cas du sulfate de sodium :



$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

L expansion est le résultat de la formation d'ettringite secondaire ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) :

- à partir du C_3A anhydre résiduel :



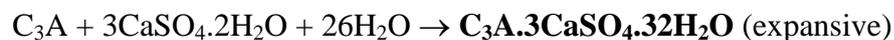
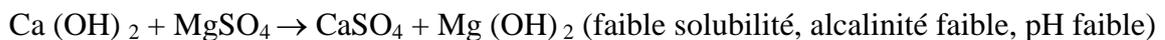
- à partir des aluminates hydratés :



- dépendant de la composition de la solution interstitielle, (particulièrement de la concentration en portlandite), la cristallisation de l'ettringite secondaire peut être expansive.

- La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieur (suivant qu'il s'agit du C_3A ou du C_4AH_{13}) au volume du solide initial.

Le sulfate de magnésium est très agressive (double action)

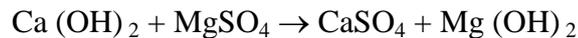


Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



• L'attaque par le sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou CaSO_4 dans les sols) est plus lente en raison de sa faible solubilité. Elle conduit à la formation d'ettringite expansive.

Rarement et sous certaines conditions climatiques (à base température), les C-H-S peuvent réagir avec les sulfates et peuvent former de thaumasite (CaCO_3 , CaSiO_3 , CaSO_4 , $15\text{H}_2\text{O}$) entraînant des phénomènes expansifs analogues et surtout une désagrégation et perte de l'ensemble des propriétés liantes des C-H-S. [70, 71, 72]. L'incorporation des laitiers de haut fourneau dans le ciment contribue d'une façon positive à l'amélioration des résistances aux attaques par les acides, [73].



Les paramètres influençant les réactions sulfatiques sont [71] :

- La basicité, l'humidité relative, la température et la teneur en sulfates du milieu environnant ;
- La finesse et la composition du ciment (teneur en SO_3 , en Al_2O_3 , en alcalis et rapport $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$).
- Les conditions de cure du béton.

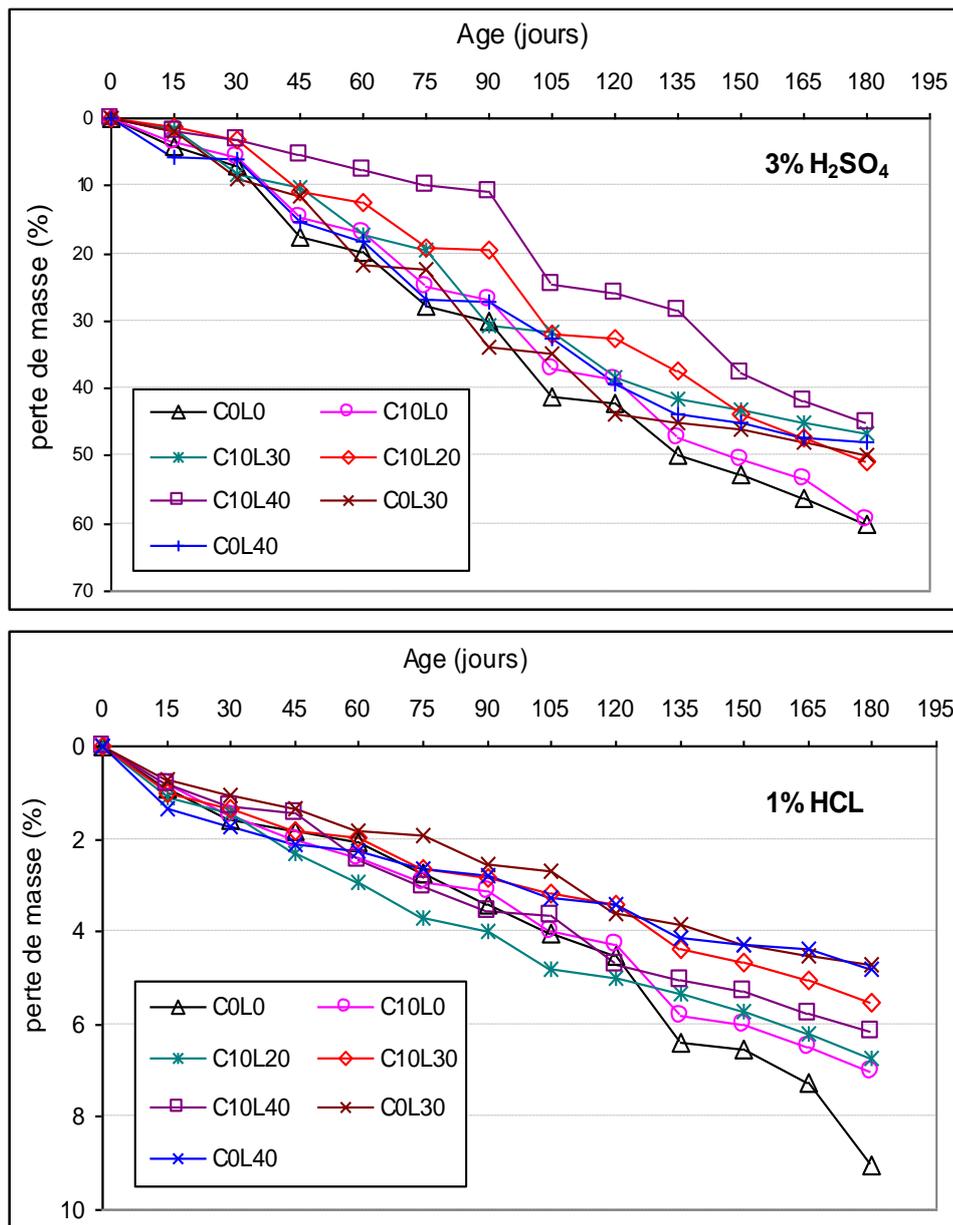
On peut constater aussi d'autres paramètres prépondérants qui peuvent influencer comme :

- Pour les pâtes de ciment sans additions, les dégradations augmentent avec la teneur en C_3A (paramètres déterminant vis-à-vis de la résistance aux sulfates).
- Pour les ciments au laitier, la résistance aux sulfates augmente avec la teneur en laitier.
- Pour une teneur donnée en laitier, les dégradations augmentent avec la teneur en Al_2O_3 du laitier.

Les cendres volantes ne sont en principe efficaces pour réduire l'expansion qu'à de très fortes teneurs (40 %).

VI.3.2 Attaques des mortiers par les acides

Les résultats relatifs aux attaques des mortiers des ciments contenant des différents pourcentages des ajouts de calcaire et de laitier dans les solutions de 1 % HCl et 3 % H_2SO_4 sont présentés dans la figure VI.19. La perte de la masse après 180 jours d'immersion pour le mortier sans ajout est de 9.05 % et 60.04 % pour 1 % HCl et 3 % H_2SO_4 respectivement.



FigureVI.19: Variation de la masse des mortiers en fonction de la période d’immersion dans a)1 % d’HCl et b) 3 % H₂SO₄

A 180 jours, l’incorporation de 30 % et 40 % de laitier dans le ciment réduit la perte de masse par rapport au mortier contrôle de 17 % et de 20 %. Dans la solution de 3% H₂SO₄. Comparé à celle conservés dans la solution et de 1 % HCl qui présente 48 % et 47 % respectivement. Des résultats similaires sur des coulis de bétons contenant du laitier ont été observés par [74].

La perte de masse pour le ciment contenant 10 % de calcaire est presque similaire à ceux du mortier de contrôle dans la solution de 3 % H_2SO_4 et la perte de masse augmente de 22 % dans la solution de 1 % HCl.

L'incorporation de 30 % et 40 % de laitier dans le ciment contenant 10% de calcaire réduit la perte de masse par rapport au mortier de contrôle de 22 % et 24 % dans la solution 3 % H_2SO_4 (voir la figure 20) et de 21 % et 12.5 % dans la solution 1 % HCl (voir la figure 21).

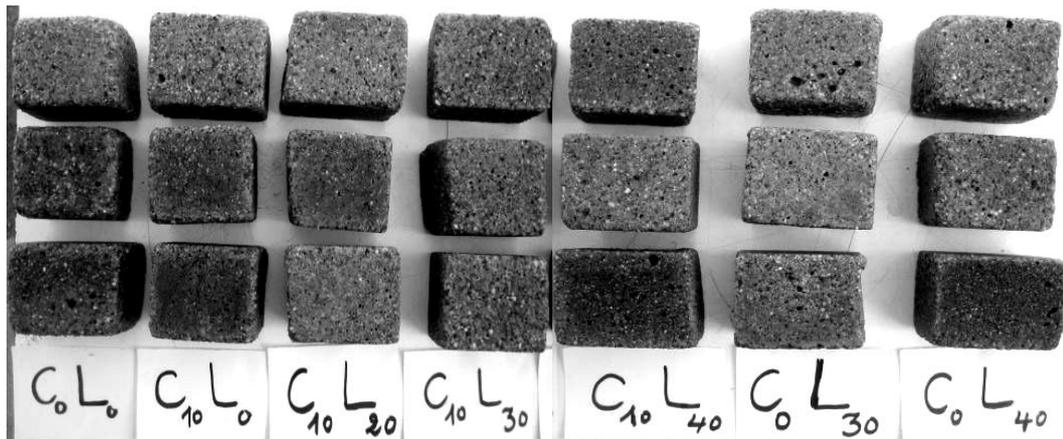


Figure VI.20 : Etat des sections des mortiers après 180 jours d'immersion dans la solution de 1 % HCl

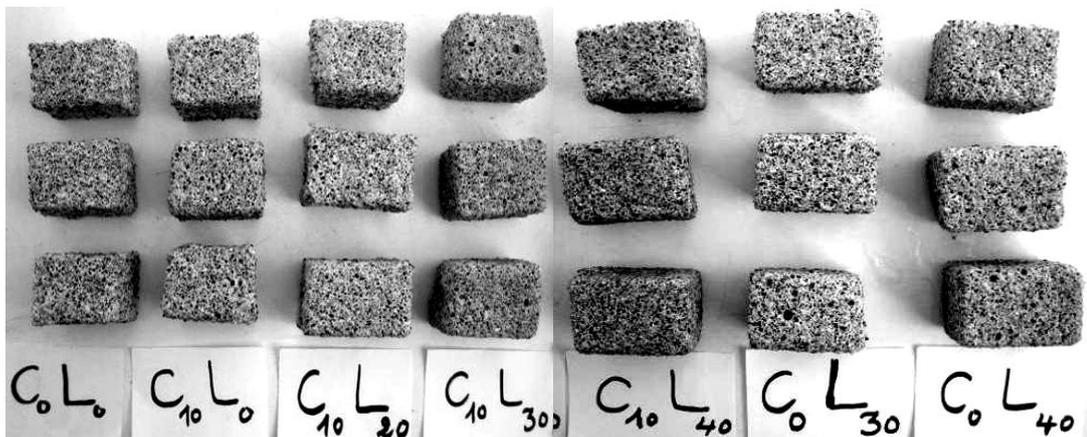


Figure VI.21 : Etat des sections des mortiers après 180 jours d'immersion dans la solution de 3% H_2SO_4

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 C_3S et de C_2S 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. Le taux d'attaque dépend de la qualité et de la perméabilité du béton, et également de la solubilité du sel résultant du calcium [74].

La perte de masse est due au fait que le ciment portland, après hydratation, libère une partie d'hydroxyde de calcium libre ($Ca(OH)_2$) qui peut être lixivier à l'extérieur quand elle est soumise aux attaques par les acides. Pour le mortier en contact avec l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide sulfurique pour former le sulfate de calcium. Ensuite tous les composants du ciment seront décomposés et lixiviés. En outre le sulfate de calcium constitué par la première réaction va réagir avec la phase d'aluminate de calcium pour former le sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite), qui après cristallisation peut causer l'expansion du mortier [75].

VI.4 Etude Technico-économique et écologique

L'addition des ajouts minéraux joue un rôle prédominant en augmentant le taux de la production du ciment. Si on prend comme exemple la cimenterie de Chlef, sa capacité de production est de l'ordre de 2,4 millions de tonnes/an, l'ajout d'une quantité de 30 % de laitier augmentera la production à 3.12 millions de tonnes/an, soit un gain de 720 000 tonnes.

L'environnement ainsi que le bien-être social et économique sont étroitement liés. Devant ce constat, la plupart des pays du monde sont engagés à produire chaque année un rapport sur les indicateurs nationaux de la qualité de l'air, relié à la qualité des émissions de gaz à effet de serre et celle dégager par les fours des cimenteries.

Lors de la décarbonatation d'une tonne de calcaire (CaCO_3), une quantité de 440 kg de gaz carbonique (CO_2) est dégagé dans la nature. La substitution de 30 % de laitier dans le ciment permet la diminution du taux de gaz carbonique de 174 Kg dégagé par les fours industriels (voir le tableau VI.4).

Tableau VI.4 : Comparaison entre le ciment Portland et les ciments avec ajout.

Classe de ciment	CEM II ^a	CEM II ^b
Quantité dégagée de CO_2 (kg/tonne)	396	264
Taux de production (tonnes/an).	$2.4 \cdot 10^6$	$3.1 \cdot 10^6$
Gain de production	/	30 %

^a : ciment avec 10% de calcaire

^b: ciment avec 10% de calcaire et 30% de laitier.

VI.5 Conclusion

On peut tirer les conclusions suivantes :

- 1- Le calcaire a un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment, néanmoins un pourcentage de 10 % est optimal pour aboutir à des performances maximales (résistances et durabilité) du ciment composé. Au-delà de ce pourcentage, son effet est néfaste.
- 2- La substitution de 10 % à 30 % du calcaire diminue la quantité d'eau de 26.2 % à 25.2 % respectivement.
- 3- La réduction du temps de début de prise avec l'augmentation de la quantité de calcaire est due à l'effet combiné de l'augmentation du taux d'hydratations et de l'augmentation de la fraction solide.
- 4- la substitution de 20 % à 30 % du laitier dans un ciment portland contenant 10 % de calcaire améliore la résistance à la compression à long terme.
- 5- Les variations des masses des mortiers, montrent que le ciment contenant 10% de calcaire a une mauvaise résistance aux agents agressives. L'incorporation de 20 % à 30% du laitier améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H₂SO₄.
- 6- L'expansion des mortiers dans une solution contenant 5 % de MgSO₄ nous indique que la substitution de 30 % de laitier dans les ciments à base de calcaire donne une meilleure résistance aux sulfates. Par contre dans celle de 5 % de Na₂SO₄, la meilleure résistance est obtenue avec l'incorporation de 40 % du laitier.

Chapitre VII

Conclusion

Conclusion

La cimenterie de Chlef utilise comme ajout le calcaire à un pourcentage qui varie entre 5 % et 15 %. L'addition de calcaire dans le ciment améliore la résistance à court terme mais sa résistance mécanique à long terme est faible. La substitution du laitier de haut fourneau avec de grandes quantités dans les ciments à base de calcaire contribue à l'amélioration de la résistance à long terme, améliorer ses résistances vis-à-vis aux attaques par les agents agressifs tels que les sulfates et les acides et augmenter le taux de la production du ciment.

Les conclusions qui peuvent être tirées à partir de cette étude sont les suivantes :

- un pourcentage optimal de 10 % de calcaire a un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment.
- La substitution de 10 % à 30 % du calcaire diminue la quantité d'eau de 26.2 % à 25.2 % respectivement Cela est dû à la finesse très élevée du calcaire (matériau tendre).
- l'addition de 10 % à 40 % du laitier au ciment contenant 10 % du calcaire diminue le pourcentage de la demande d'eau de 25.8 % à 24.8 % respectivement. est probablement due à la grande surface spécifique du laitier.
- La réduction du temps de début de prise avec l'augmentation de la quantité de calcaire est due à l'effet combiné l'augmentation du taux d'hydrations et l'augmentation de la fraction solide.
- le temps de prise augmente avec l'accroissement du pourcentage d'ajout laitier dans le ciment contenant 10 % du calcaire, d'où l'incorporation de 40 % de laitier présente une augmentation de 15.6 % pour le début de prise et 14.28 % pour la fin de prise.
- La substitution de 20 % à 30 % du laitier dans un ciment portland contenant 10 % de calcaire améliore la résistance à la compression à long terme.

- Le laitier de haut fourneau d'El Hadjar améliore la durabilité des mortiers vis-à-vis aux attaques par les agents agressifs tels que les sulfates et les acides. Cette amélioration se traduit par une faible expansion des éprouvettes et des petites pertes de masse des mortiers.
- L'introduction de 40 % de laitier dans le ciment contenant 10 % de calcaire réduit l'expansion des mortiers immergés dans la solution de sulfates de sodium H_2SO_4 et de 49.39 % par rapport au ciment contrôle et pour les mortiers placés dans la solution de sulfates de magnésium; l'expansion diminue de 44 %.
- L'incorporation de 30% et 40% de laitier dans le ciment contenant 10 % de calcaire, réduit la perte de masse par rapport au mortier de contrôle de 22 % et 24 % dans la solution 3% H_2SO_4 et de 21 % et 12.5 % dans la solution 1% HCl.

Perspectives

Le bilan des travaux réalisés nous permet à présent d'évoquer, les principales perspectives envisagées :

- La durabilité des mortiers et des bétons contenant des ciments à base de calcaire et les ciments ternaires (calcaire + laitier) à long terme (plus de 360 jours).
- Effet de la durée de cure sur les propriétés des mortiers et bétons contenant les ciments ternaires (calcaire+laitier).
- Effet de la conservation des mortiers contenant les ciments ternaires (calcaire + laitier) dans les différents environnements de cure simulant les différents environnements des différentes régions de notre pays (climat chaud et froid.....).
- L'effet d'addition de la pouzzolane naturelle de Beni Saf sur les propriétés mécaniques et physiques des ciments ternaires (calcaire + laitier).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] NF EN 196-6, "Méthodes d'essais des ciments – partie 6 : détermination de la finesse", 1996, 17 p.
- [2] NF EN 196-3, "Méthodes d'essais – partie 3 : détermination du temps de prise et de stabilité", 1996, 13 p.
- [3] EN 197-1, "Ciment : Composition, spécifications et critères de conformité- partie 1 : ciments courants", 1996, 27 p.
- [4] NF EN 196-1, "Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : Détermination de la résistance", 1996, 31 p.
- [5] H.F.W. Taylor, "Cement chemistry", Academic press limited, London, 1990.
- [6] J. Stark and K. Bolimann, "Delayed ettringite formation". Nordic Concrete Research, vol.23, n°2, 2000, 25 p.
- [7] NF EN 206-1, Béton Partie 1 : "Spécification, performances, production et conformité" 2002, 77 p.
- [8] NF P 18-508: " Addition pour béton hydraulique – Additions calcaires" : Spécifications et critères de conformité.
- [9] P 18-305, "Bétons prêt à l'emploi", 1996, 48 p.
- [10] E. EL-Alfi, H. Danweesh and H. EL-Diamony, "Addition of limestone in the low heat Portland cement", Ceramics- Silikaty, vol. 44, n° 03, 2000, pp.109-113.
- [11] NF EN 450, "Cendres volantes pour béton-Définitions, exigences et contrôle de qualité", 1995, 20 p.
- [12] ASTM C 618-94, " coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete", ASTM Standards, 3 p.
- [13] G. Verbeck, "Cement hydration reactions at early ages", journal of Portland cement Association research and development laboratories, Vol. 7, n° 3, 1965, pp. 57-63.
- [14] J.S. Odler, J. Schüppstuhl, "Combined hydration of tricalcium silicate and β -dicalcium silicate ". Cement and Concrete Research, Vol. 12, n° 1, 1982, pp. 13-20.
- [15] LEA, "Chemistry of Cement and concrete", édité par P.C Hewlett, 4^{ème} édition, Arnold 1998.

- [16] C.S. Neto, V.C. Campitelli, "The influence of limestone additions on the rheological properties and water retention value of Portland cement slurries, tire de carbonate additions to cement", Klieger P. et Hooton D. Editeurs, 1990, STP 1064, ASTM.
- [17] M. Bouasker, P. Mounanga, P. Turcry, A. Loukili, A. Khelidj, "Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effet of limestone filler and granular inclusions" Cement and Concrete Composites, vol. 30, n° 1, 2008, pp.13-22.
- [18] L. Montanaro, A. Negro, & M. Regourd, "Action de C_aCO_3 , C_aSO_4 et $C_aSO_4 \cdot 2H_2O$ sur l'hydratation de C_3S ". Cement and Concrete Research, vol. 18, n° 3, 1988, pp. 431-437.
- [19] B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gllucci, K. Scrivener, "Influence of limestone on the hydration of Portland cements". Cement and Concrete Research, vol. 38, n° 6, 2008, pp. 848-860.
- [20] G. Kakali, S. Tsivilis, E. Aggeli, M. Bati, "Hydration products of C_3A C_3S and Portland cement in the presence of C_aCO_3 ". Cement and Concrete Research, Vol. 30, n° 7, 2000, pp. 1073-1077.
- [21] H.-J. Kuzel, H. Pöllmann, "Hydration of C_3A in the presence of $C_a(OH)_2$, $C_aSO_3 \cdot 2H_2O$ and C_aCO_3 ". Cement and Concrete Research, Vol. 21, n° 5, 1991, pp.885-895.
- [22] H.J. Kuzel, H. Baier, "Hydration of calcium aluminate cements in the presence of calcium carbonate, Evr.j. Mineral", Vol. 8, 1996, pp.129-141.
- [23] H-J. Kuzel, "Initial hydration reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements". Cement and Concrete Composites, vol. 18, n° 3, 1996, pp.195-203.
- [24] V.L. Bonavetti, V.F. Rahhal, E.F. Irrasar, "Studies on the carboaluminate formation in limestone filler- blended cements". Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 6, 2001, pp. 853-859.
- [25] Y. Zhang, X. Zhang, "Research on effect of limestone and gypsum on C_3A , C_3S , and Pc clinker system", Construction and Building Materials, Vol. 22, n° 8, 2008, pp. 1634-1642.
- [26] S. Tsivilis, E. Chaniotakis, G. Kakali and G. Batis, "An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete", Cement and Concrete Composites, vol. 24, n° 3-4, 2002, pp.371-378.
- [27] P. Longuet, L. Beuglen, A. Zelwer, "La phase liquide du ciment hydrate", publication technique CERILH n° 219, 1982.
- [28] W.A. Klemm, L.D. Adams, "An investigation of the formation of carboaluminates, tire de carbonate additions to cement", Klieger P .ET Hooton.D. éditeurs, STP 1064, ASTM, 1990.
- [29] V.S. Ramachadran, "Dependence of fineness of calcium carbonate on the hydration behaviour of tricalcium silicate", Durability of Building Materials, vol. 4, 1986, pp. 45-66.

- [30] G. Cochet and F. Sorrentino, "Limestone filled cements: properties and uses in mineral admixtures in cement and concrete", 1st ed. India: ABI Book Private Limited, 1993pp.226-265.
- [31] K.L. Scriviner, "Micro structural studies of the hydration of C_3A and C_4AF independently in cement paste", G. Glasser FP. Editor British. Ceramic proceeding n° 35 stoke –on-Trent British ceramic society, 1984. pp. 207-219.
- [32] S. Bhanja, B. Sengupta, "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete". Cement and Concrete Research, vol. 35, n° 4, 2005, pp.743-747.
- [33] L. Courard, A. Darimont, M. Shonterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre. "Durability of mortars modified with metkaolin". Cement and Concrete Research, vol. 33, n° 9, 2003, pp.1473-1479.
- [34] B. Uzal. L.Turanli; "Studies on blended cements containing a high volume of natural pouzzolans". Cement and Concrete Research, vol. 33, n° 11, 2003, pp. 1777-1781.
- [35] M. Said Mansour, "Etude des Propriétés des Mortiers et Bétons à Base de Ciments Ternaires", thèse de Magister, Université de Blida, 2003, 125 p.
- [36] G. Menédez, V. Bonavetti, E.F. Irassar, "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and ballast-furnace slag". Cement and Concrete Composites, Vol. 25, n° 1, 2003, pp. 61-67.
- [37] B. Yilmaz, A. Olgun. "Studies on cement and mortars containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone". Cement and Concrete Composites, Vol. 30, n° 3, 2008, pp.194-201.
- [38] R. Dhri, P. Hewlett, Y.Chan, "Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability", Magazine of Concrete Research, vol. 41, 1989, pp. 87-96.
- [39] A.M. Neville, "Properties of concrete", 4 th and final Ed, Addison Wesley Longman, England, 1996.
- [40] S. Tsivilis, J. Tsantilas, G. Kakali, E. Chaniotakis, and A. Sakellariou. "The permeability of Portland limestone cement concrete". Cement and Concrete Research, vol. 33, n° 9, 2003, pp. 1465- 1471.
- [41] S. Nagataki and I. Ujike, "Air permeability of concrete mixed with fly ash and condensed silica fume", ACI Materials Journal, vol. 91, 1986, pp. 1049-1068.
- [42] J. Zelic, R. Krstulovic, E.Tkalcec, P.Krolo, "The properties of Portland cement – limestone-silica fume mortars". Cement and Concrete Research, vol. 30, n° 1, 2000, pp. 145-152.
- [43] S. Kenai, W. Soboyejo and A. Soboyejo, "Some engineering properties of limestone concrete". Materials and manufacturing processes. vol 19, n° 5, 2004, pp 949-961.
- [44] H. Binici, H. Kaplan, S. Yilmaz. "Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete". Scientific research and essay, vol 2, 2007, pp. 372-379.

- [45] E. Güneyisi and M. Gesoğlu, "A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag". *Materials and Structures*, vol. 41, n° 3, 2008, pp. 479-493.
- [46] Mc Kormick. "Metkaolin", CEE 8813-Materials science of concrete, Dr Kimberly Kurtis.04/04/2007.
- [47] M. Gesoğlu and E. Güneyisi, "Strength development and chloride penetration in rubberized concretes without silica fume". *Materials and Structures*, vol. 40, n° 9, 2007, pp. 953-964.
- [48] G. Kakali, S. Tsivilis, A. Skaropoulou, J.H. Sharp, and R.N. Swamy. "Parameters affecting thaumasite formation in limestone cement mortar". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, n° 8, 2003, pp.977-981.
- [49] S. Tae Lee, R.D. Hooton, Ho-S. Jung, D-H. Park, C.S. Choi, "Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulphate solutions at ambient temperatures". *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, n° 1, 2008, pp. 68-76.
- [50] S. Tsivilis, G. Kakali, A. Skaropoulou, J.H. Sharp and R.N. Swamy, "Use of mineral admixtures to prevent thaumasite formation in limestone cement mortar". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, n° 8, 2003, pp. 969-976.
- [51] T. Vuk, R. Gabrovesk, and V. Kaucic. "The influence of mineral admixtures on sulphate resistance of limestone cement pastes aged in cold $MgSO_4$ solution". *Cement and Concrete Research*, vol 32, n° 6, 2002, pp. 943-984.
- [52] L. Turanli, B. Uzal, F. Bektas. "Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements". *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 6, 2005, pp. 1106-1111.
- [53] V. Pavlik, S.Uncik, "The rate of corrosion of hardened cement pastes and mortars with additives of silicate fume in acids", *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 11. 1997, pp. 1731-1745.
- [54] D.M. Roy, P. Arjunan and M.R. Silsbee, "Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete ", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, n° 12, 2001, pp. 1809-1813.
- [55] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanon, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 7, 2004, pp. 1087-1092.
- [56] P. Fasseu. B. Lebon, J. Vecoven, "Utilisation de l'essai de performance sur béton pour la prévention du risque lié de la réaction alcali silice", *Bulletin du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées*, n° 266, janv./fév./mars 2007.
- [57] A.M. Dunster, H. Kawano, P.J. Nixon, "The effect of silica fume to reduce expansion due to alkali-silica reaction in concrete", in *durability of building materials and component; sous la direction de Bacher (J.M) et Nixon (P.J): proceedings of the fifth international conference held in brighten UK, 1990*, pp. 193-199.

- [58] ASTM C 267-97, "Standard test method for chemical resistance of mortar", Annual Book of ASTM, vol. 04.05.
- [59] S. Tsivilis, E. Chaniotakis, E. Badogiannis, G. pahoulas, A. Ilias, "A Study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements". Cement and Concrete Composites, vol. 21, n° 2, 1999, pp.107-116.
- [60] G. Nigri, R. Nemamcha, M. Guenfoud, "Valorisation du laitier d'El-Hadjar dans la fabrication du ciment", Séminaire National de Génie Civil (SNGC08), Chlef 15-16 décembre 2008.
- [61] A. Ali Aichouba, "Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire", Mémoire de magister, Université Mohamed Boudiaf – Oran-, 2005, 97 p.
- [62] I. Elkhadiri, A. Diouri, A. Boukhari, J. Aride, F. Puertas, "Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in Moroccan Portland cement", Cement and Concrete Research, Vol. 32, n° 10, 2002, pp. 1597-1603.
- [63] NA 442, Norme Algérienne, "Liants hydrauliques- Ciments courants : Compositions, spécifications et critère de conformité ", IANOR, Alger, 2000, 30 p.
- [64] G. Ye a,b,*, X. Liu c, G. De Schutter a, A.-M. Poppe a, L. Taerwe a, "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes", Cement and Concrete Composites 29 (2007) 94–102.
- [65] A. Hadj Sadok, S. Kenai, B. Menadi, "Résistances aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier", Colloque International -Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures-, 16, 17 et 18 novembre 2008, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.
- [66] A. Bougara, K. Ezziane, A. Kadri, "Prédiction des résistances du ciment au laitier durcissant sous une température", Can. J. Civ. Eng. vol.28, 2001.
- [67] S.M. Torres, J.H. Sharp, R.N. Swamy, C.J. Lynsdale, S.A. Huntley, "Long term durability of portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack", Cement and Concrete Composites, vol. 25, n° 8, 2003, pp. 947-954.
- [68] R. Doug Hooton and John J. Emery. "Sulfate Resistance of a Canadian slag cement", ACI Materials Journal, vol. 87, n° 6, 1990, pp. 547-555.
- [69] R. Gané, "Durabilité et réparations du béton GCI-714", cours de béton, Université de Sherbrooke, 2002, 53 p.
- [70] P. Pipilikaki, M. Katsioti, "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.
- [71] F. De Larrard, "Construire en Béton : l'essentiel sur les matériaux", collection du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, 2002.

- [72] D.E. Macphee, S.J. Barnett, "Solution properties of solids in the ettringite–thaumasite solid solution series", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 9, 2004, pp. 1591-1598.
- [73] P.W. Brown, R.D. Hooton, B.A. Clark , "The co-existence of thaumasite and ettringite in concrete exposed to magnesium sulfate at room temperature and the influence of blast-furnace slag substitution on sulfate resistance", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, n° 8, 2003, pp. 939-945.
- [74] T. Bakharev, J.G. Sanjayan, Y.-B. Cheng, "Resistance of alkali-activated slag concrete to acide attack". *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 10, 2003, pp.1607-1611.
- [75] S. Sayamipuk, "Strength and durability of mortars containing met kaolin from Thailand". PhD thesis, School of civil Engineering, Asian Institute of Technology,1999,201 page.