



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI - CONSTANTINE
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



كلية علوم
التكنولوجيا

**Thèse de
DOCTORAT EN SCIENCES
En Génie Civil**

Option : Matériaux

TITRE:

**DURABILITÉ DES VARIÉTÉS DE BÉTONS
Carbonatation- Perméabilité- Milieu Agressif**

Présentée par : **CHIKER Tarek**

Directeur de thèse : **Pr. HOUARI Hacène**

Soutenu le 06/04/2017 devant le jury composé de:

Président :	Pr. BEROUAL Ahmed	Université des Frères Mentouri, Constantine
Rapporteur de thèse :	Pr. CHIKH Nasr Eddine	Université des Frères Mentouri, Constantine
Co-Encadreur :	AGGOUN Salima (HDR.)	Université de Cergy-Pontoise, France
Examineurs :	Pr. BENOUIS Abdelhalim	Université de Guelma
	Pr. BOUDAUD Zineddine	Université de Oum El Bouaghi
Membre invité :	Pr. HOUARI Hacène	

Résumé

L'utilisation des ajouts minéraux et des déchets industriels a marqué l'industrie moderne du béton et ciment. L'objectif majeur de cette action est de répondre aux exigences de développement soutenable et des questions écologiques. Certes, l'incorporation de ces matériaux a une influence bénéfique sur l'environnement par la diminution du taux de clinker entrant dans la fabrication des bétons et ciments. Cependant, ses qualités cimentaires et ses propriétés d'engineering doivent être étudiées avant de passer à l'adoption pratique. Dans cette étude, on a investi les propriétés mécaniques, d'hydratation et de durabilité des bétons et mortiers à base de ciment au filler calcaire (CFC). Les variables sont le type du béton/mortier (ordinaire O, autoplaçant A et compacté au rouleau R); le rapport E/C et le type d'ajout minéral, filler calcaire (FC) ou fumée de silice (FS).

Par conséquent, nous avons fabriqué 16 bétons (O0.8, O0.5, O0.3F, O0.3S ; A0.8F, A0.8S, A0.5F, A0.5S, A0.3F, A0.3S; R0.8F, R0.8S, R0.5F, R0.5S R0.3F et R0.3S), et 17 mortiers (MO0,8, MO0,5ref, MO0,5, MO0,3F, MO0,3S ; MA0,8F, MA0,8S, MA0,5L, MA0,5S, MA0,3F, MA0,3S, MR0,8F, MR0,8S, MR0,5L, MR0,5S, MR0,3F, MR0,3S). Le mortier de référence MO0.5ref a été basé sur CEM I. Les essais opérés sur béton sont la résistance mécanique à la compression, l'absorption capillaire à l'eau, le changement de masse dans les solutions de sulfates et sulfates/chlorures, la profondeur de pénétration des chlorures et les prises au MEB. En plus de ces tests, on a complété l'étude sur mortier par les essais de chaleur d'hydratation par calorimétrie, analyse thermogravimétrique et test de migration rapide des chlorures.

Les résultats majeurs de cette étude sont: Le rapport E/C est le facteur primordial pour tout type de béton/mortier; les mélanges compactés ont marqué les plus faibles performances; les mélanges ordinaires et autoplaçants ont enregistré des valeurs similaires; la fumée de silice a été bénéfique surtout pour les bétons en cas d'attaque sulfatique.

On a conclu ainsi: l'influence de la structure poreuse des mélanges est plus significative que la composition chimique de la matrice liante, surtout en cas de l'attaque sulfatique; l'absorption capillaire est un bon indicateur de la durabilité, et peut être corrélée à la résistance aux chlorures qu'aux sulfates; la présence des chlorures en alternance avec les sulfates a aggravé la détérioration des bétons, et cet effet a été inversé en cas des mortiers.

Mots clés: ciment au calcaire, filler calcaire, fumée de silice, sulfates, chlorures, hydratation.

Abstract

The use of mineral admixtures and industrial wastes has marked the modern industry of concrete and cement. The major aim of this action is to meet the requirements of sustainable development and ecological issues. Certainly, the incorporation of those materials has a beneficial influence on the environment by the decreasing the rate of incoming clinker in the manufacture of concretes and cements. However, their qualities and engineering properties must be studied before proceeding to the practice adoption. In this study, we investigated the mechanical properties, hydration and durability of concretes and mortars based on limestone cement (CFC). The variables are the type of concrete/mortar (Ordinary O, Self-consolidating, and roller compacted R); the E/C report and the type of added mineral, limestone filler (CF) or silica fume (FS).

Consequently, we have manufactured 16 concretes (O0.8, O0.5, O0.3F, O0.3S; A0.8F, A0.8S, A0.5F, A0.5S, A0.3F, A0.3S; R0.8F, R0.8S, R0.5F, R0.5S R0.3F and R0.3S), and 17 mortars (MO0,8, MO0,5ref, MO0,5, MO0,3F, MO0,3S; MA0,8F, MA0,8S, MA0,5L, MA0,5S, MA0,3F, MA0,3S, MR0,8F, MR0,8S, MR0,5L, MR0,5S, MR0,3F, MR0,3S). The reference mortar MO0.5ref has been based on CEM I. The tests made on concrete are the compressive strength, the water capillary absorption, the mass change in the solutions of sulfate and sulfate/chloride, the penetration of chloride and SEM monographs. In addition to those tests, it has completed the study on mortar by the tests of heat of hydration by calorimetry, thermogravimetric analysis and rapid test of chloride migration.

The main results of this study are: the E/C report is the overriding factor for any type of concrete/mortar; the compacted mixtures have marked the lowest performance; the ordinary and self-consolidating mixtures have recorded similar values; silica fume has been beneficial especially for concretes under sulfate attack.

Furthermore, it was concluded that: the influence of the porous structure of the mixtures is more significant than the chemical composition of the binder, especially in the case of the sulfatique attack; the capillary absorption is a good indicator of the durability, and can be correlated with the resistance to chloride than sulfates; the presence of chloride in alternation with sulfate has exacerbated the deterioration of concretes, and this effect was reversed in the case of mortars.

Key words: limestone cements, limestone filler, silica fume, sulfates, chloride, hydration.

ملخص

إن استخدام الإضافات المعدنية و النفايات الصناعية قد ميز صناعة الخرسانة و الاسمنت حديثاً. إذ أن الغاية الأساسية من هذه الخطوة هي الاستجابة لمتطلبات التنمية المستدامة و المسائل البيئية. أكد أن إدخال هذه المواد لها تأثير ايجابي على المحيط , و ذلك بما لها من اثر في تقليص حجم الكالينكر المكون الأساسي لكل من الاسمنت و الخرسانة . و لكن خصائصها الإسمنتية و الهندسية يجب أن تدرس قبل الانتقال إلى التبنّي الميداني. في هذه الدراسة تناولنا تقييم الخصائص الميكانيكية, التمييه و ديمومة الخرسانة و الملاط , التي تحتوى أساساً على إسمنت الكالكر (CFC). متغيرات الدراسة هي النسبة E/C , نوع الإضافة المعدنية (غبرة الكالكر FC أو غبار السليس FS), نوع الخرسانة/ الملاط (عادي O , ذاتية التموضع A و مدكوكة R). و عليه قمنا بتحضير 16 خلطة خرسانية :

(O0.8, O0.5, O0.3F, O0.3S ; A0.8F, A0.8S, A0.5F, A0.5S, A0.3F, A0.3S; R0.8F, R0.8S, R0.5F, R0.5S R0.3F et R0.3S)

و 17 خلطة ملاط :

(MO0,8, MO0,5ref, MO0,5, MO0,3F, MO0,3S ; MA0,8F, MA0,8S, MA0,5L, MA0,5S, MA0,3F, MA0,3S, MR0,8F, MR0,8S, MR0,5L, MR0,5S, MR0,3F, MR0,3S)

نشير أن الملاط المرجعي MO0.5ref يحتوى على CEM I. التجارب المنجزة بالنسبة للخرسانة كانت قوة تحمل الضغط, الإمتصاص الشعري للماء, تغير الكتلة بعد الغمس في محاليل السولفات و السولفات / كلورير, وعمق إختراق ايونات الكلورير , و كذلك التقاط صور بالميكروسكوب الالكتروني. بالإضافة إلى هذه التجارب استكملنا تجارب الملاط بقياس حرارة التمييه بالتجربة الكالوريمترية , التحليل الثيرموكرومفيميتري و تجربة إرتحال الايونات السريع للكروريدات.

و كانت النتائج الأساسية لدراستنا كالأتي : النسبة E/C هي العامل الأساسي المؤثر على جميع أنواع الخرسانة و الملاط , الخلطات المضغوطة سجلت أخفض المميزات , الخلطات العادية و الذاتية التموضع سجلت قيم متقاربة , كان إستعمال غبار السليس نافعا خاصة في حالة الخرسانة .

و عليه نستنتج ما يلي : تأثير الهيكل الفراغي للخلطات لديه أكثر أهمية من التكوين الكيميائي لمادة التماسك , خاصة في حالة التعرض للهجوم السولفاتي , الامتصاص الشعري هو مؤشر جيد للديمومة و يمكن ربطه مباشرة بهجوم الكلوريدات أكثر منه من السولفات , تواجد الكلوريدات بالمناوبة مع السولفات قد أزم تدهور عينات الخرسانة , على عكس ما حدث لعينات الملاط .

الكلمات الدلالية : إسمنت غبار الكالكر , غبار الكالكر , غبار السليس , السولفات, الكلوريدات, التمييه.

Remerciements

Grands remerciements à:

Mes directeurs de thèse M. Hacène HOUARI et Mme. Salima AGGOUN pour le sérieux, le savoir-faire et le caractère humanitaire. J'avoue que j'ai de la chance de les rencontrer. Franchement, ils ont sculpté mon manuscrit et ma personnalité !

Les honorables membres de Jury. Monsieur Pr. Ahmed BEROUAL qui a accepté de présider le Jury de ma thèse. Je suis vraiment reconnaissant à Monsieur Pr. Nasr Edine CHIKH qui nous a honoré en acceptant d'être Rapporteur de Thèse. J'apprécie encore nos chers examinateurs Pr. Abdelhalim BENOUI et Pr. Zinedine BOUDAUD qui ont admis son hésitation notre invitation d'examiner le manuscrit. Je vous remercie pour votre souci d'améliorer et de valoriser le travail fourni.

Notre ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique pour la bourse PNE 2014-2016.

Tous les membres du Laboratoire de Matériaux et Durabilité des Constructions et du Département de Génie Civil de l'université de Constantine.

Les staffs techniques des laboratoires de Jijel et de Cergy-Pontoise. Un grand salut à M. Yannick MELINGE, le Directeur du laboratoire L2MGC, Albert NOMOE, El-Hadj KADRI, Abdelhak KACI, Ilhem GHORBEL, George WARDEH, Annelise COUSTURE, Lilian CHRISTOFOL, Noémie CHAUMON, Isabelle COLET. Ainsi que les doctorants: Hamza SOUALHI, Zineddine Elyas TAHAR, Arthur BORDY, Olivier HELSON, Amel BOURGHIBA, Omari SAFIOULLAH, Florent FOREST, Mariem LIMAIEM, Minh Duc NGUYEN, Thanh-Ha NGUYEN, Ishak YAKOUBI, Raouf BELKADI et Oana KARASKA.

Encore je suis reconnaissant aux chercheurs du Laboratoire LMDC de l'INSA de Toulouse pour l'accueil chaleureux et l'aide précieuse sur les essais de caractérisation de la microstructure. En particulier M. Pierre Clastres, l'Ex-Directeur du Département de Génie Civil.

Ma grande et petite familles (Mère, Père, frères et sœurs, ma femme, mes fils KINANE et AMIR).

Je vous aime tous et toutes !

Table des matières

Résumé	2
Abstract	3
ملخص.....	4
Remerciements	5
Table des matières	6
Liste des abréviations.....	10
Liste des tableaux	11
Liste des figures.....	12
Chapitre 1 Présentation de la thèse.....	15
1.1 Question de recherche	15
1.2 Bibliographie sur la question de recherche	17
1.2.1 Influence du système CFC /Ajouts minéraux sur la résistance mécanique	18
1.2.2 Influence du système CFC /Ajouts minéraux sur l'action des chlorures.....	21
1.2.3 Influence du système CFC /Ajouts minéraux sur l'action des sulfates	21
1.3 Objectifs	22
1.4 Motivations.....	23
1.5 Méthodologie	24
1.6 Plan de thèse.....	25
Conclusions.....	26
Chapitre 2 État de l'Art.....	27

2.1	Le ciment Portland	27
2.1.1	Généralités	27
2.1.2	L'hydratation du ciment portland	29
2.1.3	Mécanisme de la prise de la pâte du ciment	33
2.1.4	La microstructure de la pâte de ciment durci.....	33
2.2	La durabilité des bétons.....	35
2.2.1	La durabilité	35
2.2.2	Les causes de dégradation du béton.....	36
2.2.3	Les classes d'exposition.....	42
2.3	Les ajouts minéraux	43
2.3.1	Définition	43
2.3.2	Classification.....	44
2.4	Matrices cimentaires à base du filler calcaire	45
2.4.1	Définitions.....	46
2.4.2	Historique.....	48
2.4.3	Influence du FC sur l'hydratation du ciment	49
2.4.4	Influence du FC sur la résistance mécanique.....	50
2.4.5	Influence du FC sur les paramètres de transfert.....	52
2.4.6	Influence du FC sur l'attaque sulfatique	53
2.4.7	Influence du FC sur la pénétration des chlorures.....	54
2.5	Influence de la fumée de silice.....	55
2.5.1	La fumée de silice	55
2.5.2	Influence de FS sur l'hydratation du ciment portland	56
2.5.3	Influence de FS sur la résistance mécanique	56
2.5.4	Influence de FS sur les propriétés au jeune âge.....	58
2.5.5	Influence de FS sur les propriétés du transfert.....	59
2.5.6	Influence de FS sur l'attaque sulfatique.....	59
2.5.7	Influence de FS sur l'attaque des chlorures	60
2.6	Cas de Béton Autoplaçant BAP	61
2.6.1	Le BAP.....	61

2.6.2	Influence du filler calcaire sur les propriétés du BAP	61
2.6.3	Influence de la fumée de silice sur les propriétés des BAP	63
2.7	Cas du Béton Compacté au Rouleau de Pavage BCRP	64
2.7.1	Définition	64
2.7.2	BCRP avec cendres volantes CV	65
2.7.3	Le BCRP avec la fumée de silice.....	66
2.7.4	Résistance des BCR aux sulfates	67
2.7.5	Résistance du BCR à l'action des Chlorures	67
	Conclusions.....	67
	Chapitre 3 Programme expérimental.....	69
3.1	Les mélanges bétons.....	69
3.1.1	Matériaux	69
3.1.2	Formulation, mise en place et cure	71
3.1.3	Procédures expérimentales.....	73
3.2	Les mélanges du mortier	77
3.2.1	Matériaux	77
3.2.2	Formulation et cure	80
3.2.3	Procédures expérimentales.....	81
	Conclusions.....	88
	Chapitre 4 Résultats et Discussions.....	89
4.1	Partie 1: Bétons	89
4.1.1	Résistance à la compression.....	89
4.1.2	Absorption capillaire.....	91
4.1.3	Changement de masse dans la solution sulfates	93
4.1.4	Changement de masse dans la solution sulfates/chlorures	94
4.1.5	Profondeur de pénétration des chlorures au mode sulfates/chlorures.....	97
4.1.6	Les observations au MEB des bétons avec E/C=0.8.....	99
4.2	Partie 2: Mortiers.....	101
4.2.1	Résistance à la compression.....	101

4.2.2	Calorimétrie	104
4.2.3	ATG et degré d'hydratation.....	107
4.2.4	Absorption capillaire.....	110
4.2.5	Image MEB des mortiers avant attaques chimiques	112
4.2.6	Caractéristiques des mortiers après immersion dans la solution sulfates	114
4.2.7	Caractéristiques des mortiers après immersion dans la solution sulfates/chlorures	119
4.2.8	Test de migration rapide des chlorures	122
	Conclusions.....	123
	Conclusion générale.....	127
	Liste des références.....	132

Liste des abréviations

BO ou O	béton ordinaire
BAP ou A	béton autoplaçant
BCR ou R	béton compacté au rouleau
BCRP	béton compacté au rouleau pour pavage
MO	mortier ordinaire
MAP	mortier autoplaçant
MCR	mortier compacté au rouleau
CFC	ciment au filler calcaire
FC	filler calcaire
FS	fumée de silice
C-S-H	silicates de calcium hydraté

Liste des tableaux

Tableau 1 - Composition en oxydes du ciment portland (source :Réf. ²⁴).....	28
Tableau 2 - Les caractéristiques des phases du ciment portland (source :Réf. ²⁶)	28
Tableau 3 - Domaines d'application et composition minéralogique des ciments (Source : Ref. ²¹).....	29
Tableau 4 - Composition de la pâte du ciment durci d'un CEM I avec E/C= 0.5 (source : Réf. ²⁷)	34
Tableau 5 - Classes d'exposition selon NF EN 206-1 (source : Cimbéton)	43
Tableau 6 - Classification des additifs selon la norme EN 206-1 et BS 8500 (source :Réf. ⁴⁴).....	44
Tableau 7 - Classification, composition et caractéristiques des ajouts pozzolaniques (source : Réf. ³²)	45
Tableau 8 - Composition typique du filler calcaire (source: Réf. ¹⁰)	47
Tableau 9 - Historique d'utilisation des ciments au calcaire.....	48
Tableau 10 - Composition chimique de la FS (source : Réf. ⁷²)	56
Tableau 11 - Caractéristiques des BCR (source : Réf. ¹³³)	64
Tableau 12 - Caractéristiques des fines utilisées.....	70
Tableau 13 - Caractéristiques de l'adjuvant utilisé.....	71
Tableau 14 - Composition des bétons étudiés.....	72
Tableau 15 - Caractéristiques chimiques et physiques des fines pour mortiers.....	79
Tableau 16 - Caractéristiques de l'adjuvant utilisé.....	79
Tableau 17 - Composition d'un m ³ de mortiers.....	80
Tableau 18 - Coefficient d'absorption capillaire à l'eau des bétons étudiés.....	92
Tableau 19 - Quantité de portlandite et perte de masse en décarbonatation dans les échantillons de mortier (Essai ATD/ATG).....	107
Tableau 20 - Valeurs des coefficients d'absorption capillaire à l'eau des échantillons de mortier.....	111

Liste des figures

Figure 1 – Ciments utilisés en Europe en 2000 (Cembureau data ⁸).....	17
Figure 2 – Résistance à la compression des bétons à base de CFC et de laitier.....	18
Figure 3 - Résistance à la compression à 65 jours des mortiers à base de ciment (85%) et de laitier (15%) (source : Réf. ¹⁰).....	19
Figure 4 - Influence de l'ajout de la fumée de silice sur la résistance à la compression des mortiers à base de filler calcaire (source : Réf. ¹²).....	20
Figure 5 - Influence du taux de substitution de la fumé de silice sur la résistance à la compression des mortiers à base de CFC (Source: Réf. ¹³).....	20
Figure 6 - Influence des combinaisons ajouts minéraux/CFC sur le coefficient de pénétration de chlorures (source : Réf. ¹⁶).....	21
Figure 7 - L'action des sulfates dans les bétons à base de CFC.....	22
Figure 8 - Représentation schématique des étapes de l'hydratation (source : Vernet 1965 reportée par Réf. ²⁴).....	32
Figure 9 - Microstructure de la pâte du ciment (source : Réf. ²⁷).....	35
Figure 10 - Les causes physiques de détérioration du béton (source : Réf. ³²).....	36
Figure 11 - La dégradation du béton due aux attaques chimiques (Source: Réf. ³²).....	37
Figure 12 - Les facteurs influençant la durabilité (source : Réf. ³⁵).....	37
Figure 13 - Les facteurs causant la dégradation des structures en béton armé (source : Réf. ³⁵).....	38
Figure 14 - Processus de la corrosion par piqures due aux chlorures (source : Réf. ³⁸).....	39
Figure 15 - L'attaque sulfatique classique associée à la formation d'ettringite (source : Réf. ⁴²).....	41
Figure 16 - Granulométrie de ciment et du filler calcaire (source: Réf. ⁴⁵).....	46
Figure 17 - Influence de FC sur le taux de dégagement de chaleur d'hydratation à 20°C (source : Réf. ⁴⁵).....	49
Figure 18 - Évolution de produits d'hydratation dans les CFC.....	50
Figure 19 - Influence de différents ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers (source : Réf. ⁵⁹).....	51

Figure 20 - Changement relatif de la résistance à la compression et de porosité des bétons au CFC (Source: Réf. ⁴⁸).....	52
Figure 21 - La distribution porale différentielle des mortiers de CEM I, CFC et CL (source : Réf. ⁵⁰).....	53
Figure 22 - Cubes de mortiers en FC exposés pendant un an aux sulfates de sodium et aux sulfates de magnésium (Source : Réf. ⁶⁴)	54
Figure 23 - Image au MEB de la fumée de silice (source : ACI ⁷¹).....	55
Figure 24 - Influence de la FS sur la résistance à la compression (source :Réf. ⁷⁹).....	57
Figure 25 - Influence du rapport E/C et du taux de substitution de FS sur la résistance à la flexion des béton (source: Réf. ⁷²).	57
Figure 26 - Influence du taux de substitution en FS sur l'étalement des pâtes (source: Réf. ⁸⁹).....	58
Figure 27 - Expansion due à l'attaque sulfatique de différents mortiers (source :Réf. ⁷¹)	59
Figure 28 - Influence de type de fumé de silice sur la charge passé au test de migration ASTM (source: Réf. ⁹⁴).....	60
Figure 29 - Distribution granulométrique des granulats et du filler calcaire.	70
Figure 30 - Procédure du test d'absorption capillaire.	74
Figure 31 - Immersion des échantillons de bétons dans les solutions de sulfates et sulfates/chlorures.	75
Figure 32 - Échantillons métallisés à l'or pour les observations microstructurelles de la morphologie au MEB.	76
Figure 33 - Appareil MEB du laboratoire L2MGC (Université de Cergy-Pontoise).	77
Figure 34 - Granulométrie du sable et de filler calcaire.	78
Figure 35 - Appareil et éprouvette de mortier pour essai de compression simple.	82
Figure 36 - Essais d'absorption capillaire pour éprouvettes de mortier.....	82
Figure 37 - Appareil de mesure de changement de longueur des échantillons de mortier.	83
Figure 38 - Éprouvettes de mortier immergées dans les solutions chimiques.	84
Figure 39 - Calorimètre (L2MGC: Université de Cergy-Pontoise).....	85
Figure 40 - Appareil d'analyse thermogravimétrique du Laboratoire L2MGC de l'Université de Cergy-Pontoise.....	86
Figure 41 - Exemple de perte de masse obtenu par analyse thermogravimétrique pour M0.5ref.....	87
Figure 42 - Résistance à la compression des échantillons de béton.	91
Figure 43 - Changement de masse des échantillons de béton soumis aux attaques de sulfates.	94
Figure 44 - Changement de masse des échantillons de béton en mode sulfates/chlorures.	96

Figure 45 - Profondeur de pénétration des ions chlorures dans les échantillons de béton, mesurée par nitrates d'argent.....	98
Figure 46 - Photos au MEB des échantillons de béton immergés dans la solution.....	100
Figure 47 - Résistance à la compression des échantillons de mortier.	102
Figure 48 - Chaleur d'hydratation mesurée par le calorimètre semi-adiabatique (EN 196-9).	106
Figure 49 - Flux de chaleur d'hydratation des échantillons de mortier.....	106
Figure 50 - les bondes des carboaluminates par DTG.....	108
Figure 51 - Degré d'hydratation des mortiers.	110
Figure 52 - Agrandissement de X 50 au MEB des échantillons de mortier (E/C=0.5).	112
Figure 53 - Images MEB des spécimens de mortier.....	114
Figure 54 - Variation de longueur des échantillons des mortiers dans la solution sulfates.	116
Figure 55 - Changement de masse des échantillons des mortiers dans la solution sulfates.....	117
Figure 56 - Observations visuelles des échantillons de mortier dégradés par les sulfates.....	118
Figure 57 - Changement de longueur des échantillons de mortier immergés dans la solution sulfates/chlorures.	119
Figure 58 - Changement de masse des échantillons de mortier immergés dans les sulfates/chlorures.	120
Figure 59 - Observation visuelle des échantillons de mortier dégradés par les sulfates/Chlorures. ...	121
Figure 60 - Migration des chlorures à travers les éprouvettes de mortier.	123

Chapitre 1

Présentation de la thèse

Sommaire

Nous allons procéder dans ce chapitre à la présentation de la thèse. Ce qui est considéré peut être comme une introduction générale de ce que va être détaillé dans la suite de la thèse. Ainsi, nous exposerons la problématique de notre travail, un état de l'art sur le sujet (question de recherche), les objectifs et un plan détaillé du manuscrit.

1.1 Question de recherche

La présente étude rentre dans le contexte de l'étude de la durabilité des matériaux cimentaires et le développement durable. Nous nous focaliserons en particulier sur l'influence de l'utilisation de ciment composé au filler calcaire (CFC) sur les propriétés des bétons et des mortiers dans le milieu marin (Actions de sulfates externes et chlorures).

Le ciment CEM I a été largement utilisé au 20^{ème} siècle à travers le monde. Toutefois, les exigences de durabilité et d'environnement ont limité son utilisation. En effet, la durabilité des bétons dans les environnements chimiquement agressifs est universellement connue et bien spécifiée par les classes d'exposition. Ainsi, l'introduction des ciments composés est représentée comme la solution la plus fiable dans les milieux spécifiques exposés aux attaques chimiques. En plus, l'impact environnemental de la fabrication du béton est dû essentiellement à la production de ciment. Ce dernier consomme beaucoup d'énergie lors de sa fabrication de l'ordre de 4 GJ par tonne^{1, 2}. L'extraction des matières premières réduit les ressources naturelles et nuit à la biodiversité. Ainsi la fabrication d'une tonne de ciment

provoque l'émission d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère. En effet, la production du ciment est responsable du dégagement de 7 % du CO₂ total émis dans l'air^{3,4}. D'après Mehta⁵, il est largement admis que le développement durable des constructions ne peut être résolu que par l'utilisation de taux élevés d'ajouts pozzolaniques.

Après la présentation du Rapport de Brundtland⁶ sur le développement soutenable en 1987, plusieurs sommets internationaux ont eu lieu sur l'engagement de diminuer l'émission du gaz carbonique. Ce qui a été pris au sérieux par tous les continents. De ce fait, le contrôle législatif sur les émissions des gaz à effet de serre est devenu plus stricte. Ceci a favorisé de plus en plus la fabrication du CEM II au dépit du CEM I⁷. Selon la normalisation européenne, on fabrique actuellement 18 catégories de CEM II qui couvrent l'utilisation générale et plusieurs cas spécifiques.

Selon les considérations économiques et les disponibilités locales en matière première, l'ajout minéral dominant en CEM II diffère d'un pays à l'autre. Néanmoins, l'utilisation du filler calcaire pour la fabrication du ciment au filler calcaire (CFC) ou en substitution au ciment dans la composition du béton est en augmentation croissante surtout avec l'apparition de certaines gammes spéciales de bétons (BAP, BAN...etc.). Selon les statistiques de Cembureau⁸ (Figure 1), le CFC a été le plus utilisé en 2000.

Ainsi, la question de recherche de la thèse concerne l'étude de l'influence du CFC en combinaison avec le filler calcaire ou la fumé de silice sur les propriétés mécaniques, d'hydratation et de durabilité de variétés de bétons/mortiers. Les variables d'étude adoptés sont: le type de béton/mortier (BO, BAP et BCR), le type d'ajout (FC ou FS), le rapport E/C et le mode d'exposition sulfates ou sulfates/chlorures.

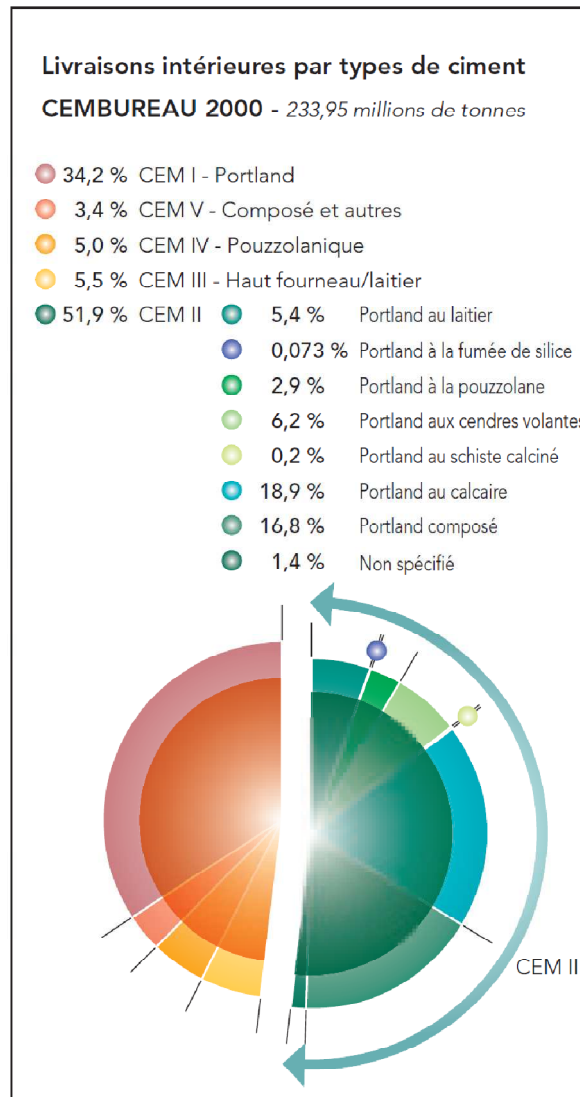


Figure 1 – Ciments utilisés en Europe en 2000 (Cembureau data⁸)

1.2 Bibliographie sur la question de recherche

Nous présentons ici seulement un état de l'art de ce qui existe en littérature et ayant un lien avec notre problématique. C'est-à-dire, l'influence des combinaisons CFC/ajouts minéraux sur les propriétés des matériaux cimentaires. A noter que l'utilisation de filler calcaire pour la fabrication du ciment CFC ou en substitution du ciment dans la fabrication du béton sera traitée dans le chapitre 2.

Il est connu dans la littérature que l'utilisation des combinaisons cimentaires (ciment+filler calcaire+ Ajout pozzolanique) apporte des améliorations sur les propriétés mécaniques et de durabilité. Cela s'explique généralement, par le fait que ces ajouts permettent la création de plus de sites de nucléation, des produits silico-alumineux et un meilleur remplissage (effet filler). Par conséquent, le taux de filler calcaire peut dépasser la marge spécifiée dans les normes (30-35 %) sans affecter les propriétés du béton. Ainsi, nous pouvons fabriquer des éco-bétons contenant des taux élevés d'ajouts minéraux.

1.2.1 Influence du système CFC /Ajouts minéraux sur la résistance mécanique

Les travaux menés sur l'influence des combinaisons CFC-laitier sur la résistance mécanique sont peu nombreux. Nous pouvons citer à cet égard ceux de Courard et Michel⁹ (Figure 2). Ces deux chercheurs ont trouvé que la résistance mécanique du béton à base de ciment CFC et de laitier diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Leurs résultats ont été confirmés par les travaux de Ramezianpour et *al.*¹⁰ menés sur des mortiers à base de ciment et 15 % de laitier (Figure 3). Ramezianpour et *al.* ont également montré une diminution de la résistance mécanique du mortier avec l'augmentation du taux de substitution en filler calcaire (à partir de 7 %).

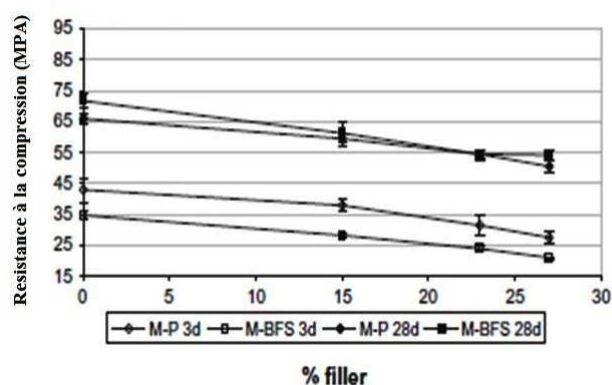


Figure 2 – Résistance à la compression des bétons à base de CFC et de laitier

(Source : Réf.⁹)

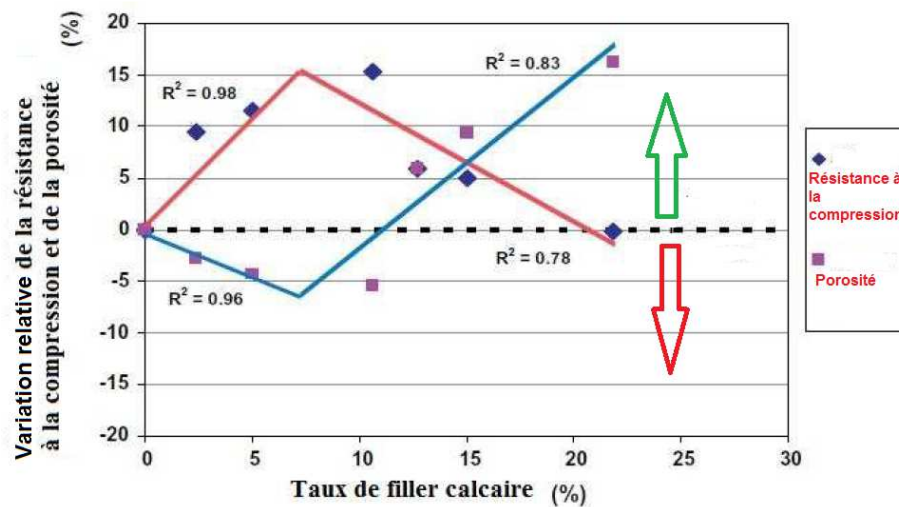


Figure 3 - Résistance à la compression à 65 jours des mortiers à base de ciment (85%) et de laitier (15%) (source : Réf. ¹⁰)

De plus, Hossack et *al.*¹¹ ont mesuré la résistance mécanique des bétons de pavage sur des carottes après trois ans de construction. Ils trouvent que l'ajout du laitier à un mélange CFC/Cendres volantes conduit à des résistances plus importantes qu'un béton à base d'un mélange ternaire CEM I + laitier + cendres volantes avec un taux de substitution inférieur à 30 %.

A noter que les résistances mécaniques d'un mélange cimentaire CFC/cendres volantes sont similaires voire supérieures à celles d'un mélange CEM I/cendres volantes¹¹.

Par ailleurs, les mélanges cimentaires à base de ciment, de filler calcaire et de la fumée de silice ont une influence positive sur la résistance mécanique comme rapporté par Nehdi et *al.*¹² (Figure 4) et Zelic et *al.*¹³ (Figure 5).

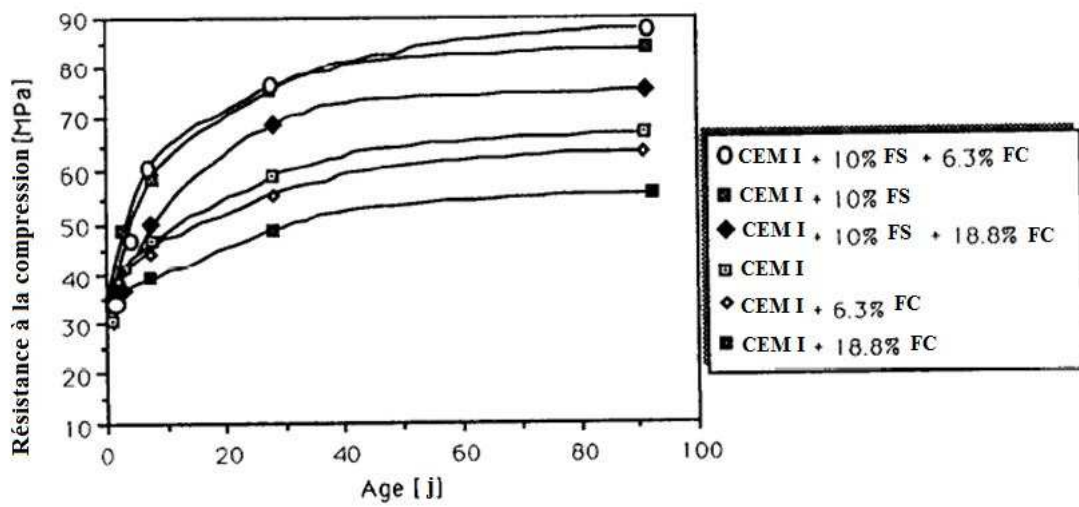


Figure 4 - Influence de l'ajout de la fumée de silice sur la résistance à la compression des mortiers à base de filler calcaire (source : Réf.¹²)

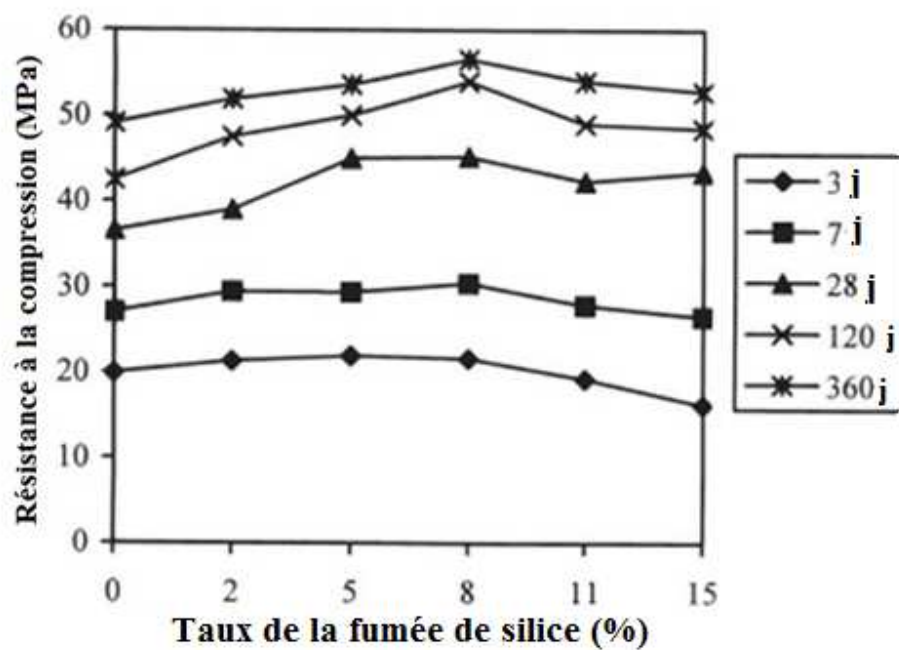


Figure 5 - Influence du taux de substitution de la fumée de silice sur la résistance à la compression des mortiers à base de CFC (Source: Réf.¹³)

1.2.2 Influence du système CFC /Ajouts minéraux sur l'action des chlorures

L'addition des cendres volantes au CFC a un effet positif sur le coefficient de pénétration de chlorures^{11, 14, 15}. Cela s'explique par l'influence de la réaction pozzolanique qui conduit à la formation de plus d'hydrates et la densification de la microstructure.

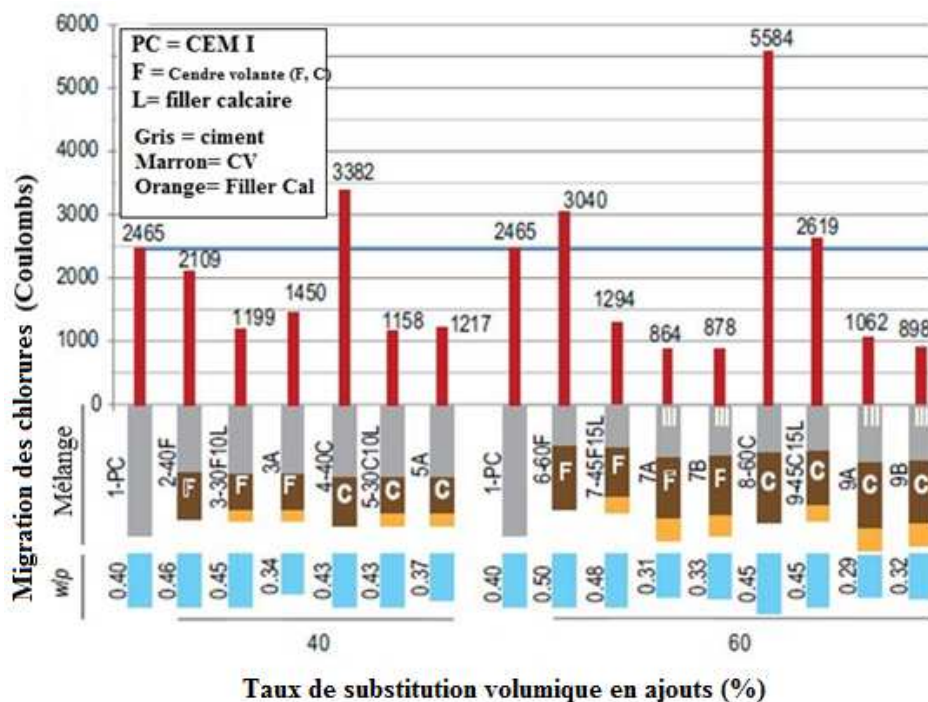


Figure 6 - Influence des combinaisons ajouts minéraux/CFC sur le coefficient de pénétration de chlorures (source : Réf.¹⁶)

1.2.3 Influence du système CFC /Ajouts minéraux sur l'action des sulfates

Il est bien connu que l'utilisation du CFC dans un milieu sulfatique n'est pas recommandée¹⁷. En effet, le ciment CFC peut conduire à la formation d'une porosité importante notamment si le taux de FC est élevé dans le ciment. Ce qui le rend plus susceptible à l'attaque des sulfates. Comme montré dans la Figure 7, on voit que l'expansion des mortiers au CFC est supérieure à celle des mortiers à base de CEM I. Cependant, l'ajout de cendres volantes ou de laitier diminue fortement le taux d'expansion des mortiers.

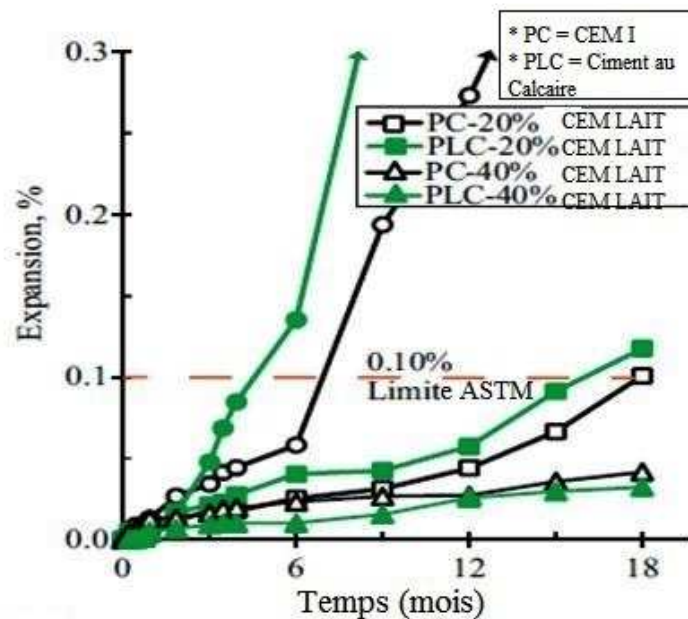


Figure 7 - L'action des sulfates dans les bétons à base de CFC

(source : Réf. ¹⁸)

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce travail de thèse est de caractériser l'apport des combinaisons de la fumée de silice ou de filler calcaire substitués au ciment au calcaire sur les propriétés des bétons et mortiers. Ceci est en étudiant les propriétés des mélanges à l'état frais, à l'état durcissant, à l'état durci et vis-à-vis des attaques sulfates/ chlorures.

Le deuxième objectif est de trouver de possibles corrélations entre les différents paramètres étudiés (Résistance mécanique, absorption, coefficient de pénétration des chlorures).

Un autre objectif: distinguer les variables les plus dominants (physiques ou chimiques).

1.4 Motivations

Ce qui a motivé le choix de cette thématique de recherche est notre espoir que les résultats de notre travail retrouvent des retombés positifs sur les plans scientifique, économique et socioculturel.

Concernant la contribution scientifique, nous souhaitons apporter une contribution sur l'utilisation de CEM II au calcaire substitué avec des ajouts minéraux. Ceci sera par l'identification de l'influence des additions de filler calcaire et de la fumée de silice. Par d'autres mots, une meilleure connaissance des mélanges cimentaires ciment au calcaire/ajouts minéraux à toutes les échelles.

De point de vue économique, la fabrication de bétons durables contribue positivement à l'économie. Ce qui encourage la fabrication de bétons spéciaux et des éco-bétons qui contiennent de plus en plus d'ajouts minéraux, de sous-produits industriels et de déchets. Ce qui va créer d'autres voies d'investissement pour les industriels (gisements d'extraction, fabrication de produits, entreprises spécialisées de bétons spéciaux, Corps d'engineering spécialisés, consultants privés...etc.) et certainement, plus d'opportunités d'emploi. Ceci ne sera possible que par l'augmentation de vie de service des constructions impliquant une diminution de budgets de nouvelles infrastructures et d'entretien.

Sur le plan socioculturel, il faut noter que les constructions d'aujourd'hui seront le patrimoine de demain. D'autres mots, augmenter la vie des constructions en respectant les traditions et la culture locale dont l'objectif est de laisser aux futures générations l'opportunité de voir et valoriser l'héritage construit par leurs ancêtres (style architecturale, matériaux et techniques de réalisation). Nous pensons que cette culture conservatrice va créer des sources de revenus pour le tourisme à long terme.

1.5 Méthodologie

Dans ce travail nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, à l'étude de la durabilité des bétons. Ensuite, nous avons abordé une étude détaillée des propriétés des mortiers extraits des bétons étudiés. Les variables d'études sont le type de béton/mortier, le rapport E/C et le type d'ajout cimentaire. Pour ce faire, nous avons confectionné trois types de bétons: ordinaires (O), autoplaçants (A) et compacté au rouleau (R). De même, trois types de mortiers : ordinaires (MO), autoplaçants (MA) et compacté au rouleau (MR) ont été également confectionnés.

Il est à noter que nous avons appliqué un nouveau mode d'immersion sulfates/chlorures. Ceci par l'application de cycles alternatifs sulfates/chlorures au lieu de l'immersion dans une solution contenant les deux à la fois.

Les propriétés étudiées sont :

- La résistance mécanique à travers l'essai de compression simple,
- L'absorption capillaire comme indicateur de durabilité,
- Le taux de changement de variation de masse dû à l'attaque sulfates/chlorures.
- La microstructure par les observations au MEB (morphologie).

De plus, nous avons effectué les tests suivants pour les mortiers:

- Mesure de la chaleur d'hydratation par calorimétrie semi-adiabatique¹⁹.
- Caractérisation de l'hydratation par analyse thermogravimétrique ATG.
- Test de migration rapide des chlorures²⁰.

1.6 Plan de thèse

La thèse est répartie en 4 chapitres comme suit :

Le chapitre 1 est dédié à la présentation de la problématique de l'étude (influence de combinaisons cimentaires de CFC+ajouts sur les propriétés des bétons et mortiers), un état de l'art sur la problématique ; objectifs du travail ; motifs et méthodologie adoptée pendant le travail expérimental.

Le chapitre 2 traite de l'état de l'art en lien avec notre étude. En effet, nous avons présenté en premier lieu les différents types de ciment et les mécanismes d'hydratation, les produits d'hydratation et le processus de la prise. En deuxième lieu, les aspects de durabilité sont présentés, à savoir, les causes de la détérioration du béton, les classes d'exposition, les paramètres de transfert, l'action des sulfates, l'action des chlorures et l'attaque des sulfates d'origine extérieure. Dans un troisième temps, l'influence du filler calcaire sur les propriétés des matériaux cimentaires a été présentée. Ainsi que l'influence de la fumée de silice. En fin, les cas particuliers des bétons autoplaçants et compactés au rouleau routier ont été abordés.

Dans le chapitre 3, une présentation du travail expérimental est fournie. En effet, nous avons présenté les matériaux utilisés ; les modes opératoires adoptés avec justificatifs du des choix de certains essais et la formulation des bétons et mortiers.

Le chapitre 4 est destiné à la présentation des résultats et discussions. En plus, nous avons présenté et discuté quelques corrélations entre les propriétés étudiées.

La thèse se termine par une conclusion générale comportant l'ensemble des conclusions élémentaires, des conclusions de synthèse et des perspectives de l'étude. Ainsi qu'une liste de références bibliographique complète le document.

Conclusions

Nous avons opéré dans ce chapitre à une présentation contextuelle du travail de thèse. On a spécifié le contexte, la problématique, les objectifs et les motifs de notre recherche.

Il semblait que le ciment composé au filler calcaire contribue fortement à la fabrication des éco-matériaux cimentaires. Ce pendant, plusieurs aspects liés aux mélanges cimentaires en présence de certains ajouts minéraux nécessitent des études de recherche plus approfondies. Ce qui constitue l'objectif du travail présenté dans les chapitres qui suivent.

Chapitre 2

État de l'Art

Sommaire

Dans ce chapitre, nous essayons de donner un état de l'art portant sur les aspects traités dans la partie expérimentale. Ainsi, ce chapitre abordera le ciment portland, l'hydratation du ciment, la durabilité des bétons, les ajouts minéraux, l'influence de l'incorporation du filler calcaire et de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires et une synthèse des travaux menés sur les BAP et BCR.

2.1 Le ciment Portland

2.1.1 Généralités

Le ciment portland est un liant hydraulique composé essentiellement de silicates et d'aluminates. Il réagit chimiquement avec l'eau pour former un matériau rigide, la pâte de ciment durci. Quand on ajoute les granulats à la pâte, le ciment a le rôle d'un liant qui colle les granulats entre eux pour former le béton. Il est le matériau de construction le plus utilisé au monde²¹. Il est fabriqué par l'échauffement d'un mélange de calcaire et d'argile et d'autres matériaux à une température d'environ 1450 °C²². Les ciments hydrauliques se classent généralement en ciment naturels, ciment portland et ciment d'aluminates²³.

La composition chimique du ciment contient en pourcentages environ 65% de CaO, 21% de SiO₂, 6% de Al₂O₃ et des alcalins (Fe₂O₃, MgO, K₂O, Na₂O et SO₃), comme indiqué dans le [Tableau 1](#)²⁴. Les phases majeures du ciment portland sont les silicates tricalcique (3CaO•SiO₂), les silicates bicalciques (2CaO•SiO₂), les aluminates tricalciques

($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), la phase ferrite ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)²⁵. Les caractéristiques de ces phases sont représentées dans le [Tableau 2](#)²⁶.

Tableau 1 - Composition en oxydes du ciment portland (source :Réf.²⁴)

Oxydes	Marges des constituants (%)	Contenu moyen (%)
CaO	60–69	65
SiO ₂	18–24	21
Al ₂ O ₃	4–8	6
Fe ₂ O ₃	1–8	3
MgO	< 5	2
K ₂ O, Na ₂ O	< 2	1
SO ₃	< 3	1

Tableau 2 - Les caractéristiques des phases du ciment portland (source :Réf.²⁶)

Mineral	Formule chimique	Code	Contenu %	Caractéristiques
Tricalcium silicate	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C ₃ S	52–63	Hydratation rapide, Chaleur d'hydratation élevé, Forte résistance mécanique
Dicalcium silicate	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C ₂ S	13–25	Taux d'hydratation: Moins Chaleur d'hydratation: faible Taux élevé de développement de la résistance mécanique aux age avancés
Tricalcium aluminate	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A	1–15	Taux d'hydratation: rapide Chaleur d'hydratation élevée Résistance mécanique: moyenne mais avec un taux rapide Retrait élevé
Tetracalcium aluminoferrite	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF	8–16	Taux d'hydratation: rapide Chaleur d'hydratation et résistance mécanique modérés Retrait faible bénéfique pour la résistance à la flexion

Il existe 5 catégories de ciment CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V. On trouve dans norme EN 206 la composition de chaque ciment. En outre, dans la norme ASTM C 150, on donne le domaine d'application de chaque catégorie ainsi que sa composition minéralogique typique (Tableau 3).

Tableau 3 - Domaines d'application et composition minéralogique des ciments (Source : Ref.²¹)

Type de ciment	Norme ASTM C 150	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Finesse m ² /kg
I	Usage général	55	19	10	7	370
II	Résistance modérée aux sulfates et moyenne chaleur d'hydratation	51	24	6	11	370
III	Résistance élevée à jeune âge	56	19	10	7	540
IV	Faible chaleur d'hydratation	28	49	4	12	380
V	Résistance aux sulfates	38	43	4	9	380

2.1.2 L'hydratation du ciment portland

Selon Gartner et al.²⁷, l'hydratation du ciment portland est une conséquence de réactions chimiques entre les composants du clinker, les sulfates de calcium et l'eau, qui conduisent à la prise et au durcissement. Plusieurs approches de l'hydratation sont données dans la littérature. Nous avons choisi de présenter celle de Vernet. Comme reportée par Aitcin²⁴. Vernet a présenté schématiquement l'hydratation en 5 étapes.

2.1.2.1 ÉTAPE 1 : Étape de Malaxage

Lors de cette étape, les différents ions des phases sont dissolus. Cette dissolution est très rapide et exothermique. La surface des grains de ciment commence à se couvrir par les hydrates de C-S-H formés par les ions Ca²⁺, H₂SiO⁻⁴ et OH⁻ qui proviennent des silicates du clinker et de l'eau, et, par l'ettringite formée par la combinaison de AlO₂, SO⁻⁴ et OH⁻ qui

proviennent de la phase interstitielle et de l'eau. Les grains peuvent être aussi couverts par les différentes formes de calcium et des alkalis de sulfates présents dans le ciment.

2.1.2.2 ÉTAPE 2 : la période dormante

Après deux heures de malaxage environs, l'augmentation rapide de pH et de Ca^{2+} de la solution aqueuse fait baisser la dissolution du clinker ; le dégagement de chaleur diminue encore considérablement mais ne s'arrête pas. De petites quantités de C-S-H et d'ettringite continuent à se former et la solution aqueuse devient saturée par les ions Ca^{2+} et marquée par une augmentation continue de la conductivité. La portlandite ne se forme pas à ce stade à cause de son taux de germination plus faible que celui des C-S-H.

2.1.2.3 ÉTAPE 3 : Prise et accélération de l'hydratation

Cette étape commence après environ 5 heures de malaxage. La prise commence brusquement par la précipitation des cristaux de la portlandite quand la concentration des silicates dans la phase aqueuse est inférieure à quelques micromoles par litre. La consommation rapide de Ca^{2+} et OH^- lors de la formation et du développement des cristaux de portlandite accélère la dissolution des phases anhydres du clinker. La conductivité se baisse soudainement, et ensuite se stabilise pendant un certain temps, et la une quantité de chaleur dégagée à ce stade est faible car la précipitation de la portlandite est endothermique.

2.1.2.4 ÉTAPE 4 : Durcissement

Cette étape commence après 9 heures de malaxage. Dans la majorité des ciments portlands la proportion molaire de calcium et des alkalis de sulfates est inférieure à celle des aluminates, en conséquence, la formation rapide de l'ettringite à la fin de la période dormante implique l'épuisement des SO_2^{-4} qui se déroule entre 9 et 15 heures après le malaxage. A ce moment, l'ettringite commence à décomposer et libère SO_2^{-4} qui doit former les cristaux de monosulfates de calcium. Cette réaction consomme 2 moles d'aluminates pour chaque mole d'ettringite décomposée. En suite, les aluminates commencent à réagir d'une façon rapide et on voit le développement d'un pic exothermique. L'intensité de ce pic dépend du taux d'hydratation de C_3A . La chaleur dégagée accélère le taux d'hydratation de la phase de

silicates. Un petit pic est observé sur la courbe de conductivité dû au passage des alkalis piégés dans le système C_3A à la solution aqueuse. La chaleur d'hydratation est dégagée rapidement mais sans développement significatif de résistance mécanique. Dans le cas d'un mortier, C'est seulement après 20 heures que la résistance à la compression commence à s'accroître.

2.1.2.5 ÉTAPE 5 : Étape de ralentissement

Les particules de ciment se couvrent par des couche plus au moins minces d'hydrates qui ralentissent la progression de l'eau à travers l'interface entre les hydrates et les constituants anhydres. L'hydratation est ralentie, mais les réactions chimiques continuent lentement. A ce moment, le retrait autogène peut devenir un facteur important qui influence fortement les variations volumétriques du béton dans les mélanges de faible rapport E/C. la conductivité électrique est très faible. Celle-ci un bon indicateur de la quantité d'eau dans le béton.

A 28 jours, la pâte du ciment est compacte, et les C-S-H sont le composant majeur du béton. Quelques cristaux de portlandite deviennent plus grands que les grains de ciment à l'état initial. Dans quelques zones imperméables, l'hydratation peut se poursuivre parce que les composants anhydres sont capables de drainer une quantité de l'eau issue de l'eau de gel, qui correspond à l'auto-dessiccation de la pâte de ciment comme indiqué par Powers.

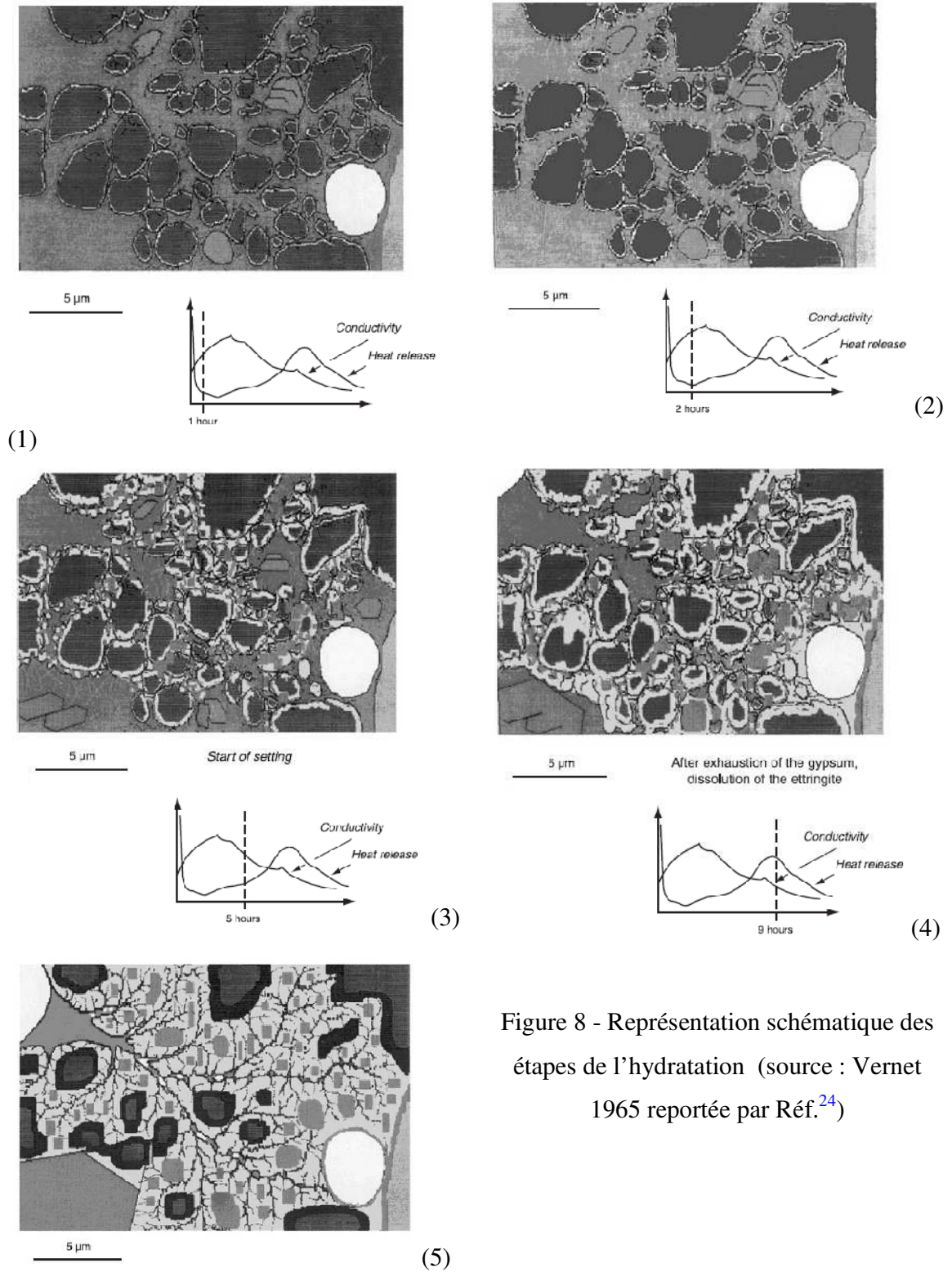


Figure 8 - Représentation schématique des étapes de l'hydratation (source : Vernet 1965 reportée par Réf.²⁴)

2.1.3 Mécanisme de la prise de la pâte du ciment

Dans la littérature, il existe plusieurs théories expliquant ce mécanisme. En effet, Reh binder²⁸ a souligné que la prise est due à la formation de structures thixotropiques coagulées issues de la dispersion des composants anhydres. Cette dispersion est due à l'hydratation colloïdale initiale des produits des phases d'aluminates.

D'autres part, Odler²⁹ a attribué la prise à la l'augmentation du volume des produits d'hydratation. Ce volume est le résultat de la diminution des distances entre les particules. Ainsi, la fluidité de la pâte diminue avec l'augmentation progressive des forces de cohésion.

En revanche, Locher³⁰ explique que la prise n'est pas le résultat de réactions chimiques, mais c'est la forme et la taille de produits d'hydratation cristallisés. L'aspect physique de ces produits dépend de la disponibilité relative d'aluminates, sulfates et ions de calcium dans la solution.

D'après Gartner²⁷, la prise normale est la conséquence de la formation des C-S-H, issues de l'hydratation de C_3S . La formation de l'ettringite en grains fins est désirable afin de maintenir la fluidité de la pâte. Cette fluidité diminue avec la formation des C-S-H.

Il est clair que les explicitations données dans la littérature sont des propositions scientifiques et logiques. Néanmoins, il semble que le mécanisme est compliqué parce que le processus est physico-chimique au lieu d'être chimique ou physique. Certes, la formation de produits d'hydratation est un processus chimique, mais il a un aspect physique. Ce dernier est lié à la recristallisation des produits initiaux en hydrates.

2.1.4 La microstructure de la pâte de ciment durci

Connaitre la microstructure de la pâte du ciment est indispensable pour l'explication du comportement du béton à l'échelle macrostructurelle. L'évolution des techniques de caractérisation a permis une meilleure interprétation. Parmi ces techniques, le Microscope Electronique à Balayage (MEB), le spectre de dispersion et les techniques pétrographiques.

Par définition, la pâte de ciment durci est un matériau composite dont ces propriétés dépendent des propriétés de ses constituants²⁷. Gartner a présenté dans le [Tableau 4](#) les composants de la pâte de ciment durci. On voit que le C-S-H est le composant majeur avec 50 %, suivi par la portlandite avec 12 %.

Tableau 4 - Composition de la pâte du ciment durci d'un CEM I avec E/C= 0.5 (source : Réf.²⁷)

Constituant	volume %	Remarques	Constituant	Densité	Morphologie Typique	Dimensions Typiques	Détecté Par:
C-S-H	50	Amorphe, microporosité incluse	C-S-H	1.9-2.1	Variable	~0.1 μm	SEM, TEM
CH	12	Crystallin	CH	2.24	Equant prisms or thick plates	0.01-0.1 mm	OM, SEM
AFm*	13	Crystallin	AFt	~1.75	Prismatic needles	10 × 1 μm	OM, SEM
Ciment non Réagi	5	Depend à l'hydratation	AFm	1.95	Thin hexagonal platelets or irregular 'rosettes'	1 × 0.1 μm	SEM
Pores Capillaires	20	Depend au w/c					

* Considered to be the final hydration product of C₃A and C₄AF.

* SEM: scanning electron microscopy; TEM: transmission electron microscopy; OM: optical microscopy.

Dans la [Figure 09](#), on présente une image de la pâte observée au MEB en mode rétrodiffusé. Les particules larges représentent les grains de ciment anhydres, entourés par les C-S-H. Le tout est intégré dans une masse poreuse, constituée de la portlandite, de gel de C-S-H, d'ettringite et de porosité capillaire.

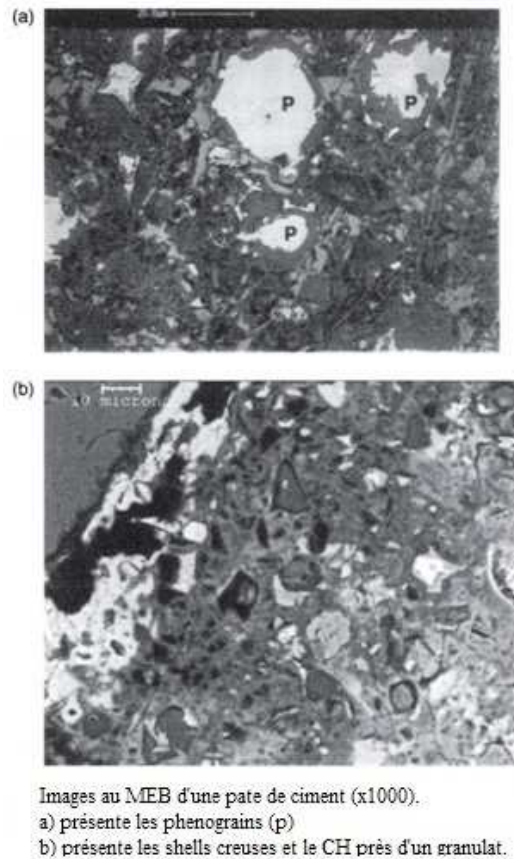


Figure 9 - Microstructure de la pâte du ciment (source : Réf.²⁷)

2.2 La durabilité des bétons

2.2.1 La durabilité

Il y a un accord universel sur la définition de la durabilité du béton. Selon Neville³¹ ' *je définie la durabilité comme suit: chaque construction doit continuer à accomplir ses fonctions espérées, c'est ça, maintenir sa résistance et serviciabilité exigées pendant la vie de service souhaitée sous les conditions dans lesquelles la structure doit être exposée.*'

Nous nous intéressons à la question de durabilité parce qu'elle gouverne la qualité de nos structures et infrastructures. En effet, construire durablement est l'un des piliers principaux du

développement durable. En d'autres termes, l'augmentation de la vie de service d'ouvrages en respectant les spécifications de la durabilité. Cela permettra de minimiser le budget total alloué à de nouvelles constructions ou à la réparation des ouvrages dégradés. D'après Mehta⁵, c'est en associant la durabilité, l'économie et l'impact environnemental que l'on arrive à construire durablement en béton.

2.2.2 Les causes de dégradation du béton

On trouve dans la littérature plusieurs causes de dégradation des constructions en béton^{23, 32, 33, 34}. Ces causes sont classées selon différents critères. Certains auteurs adoptent un classement selon l'origine (intérieur ou extérieur au matériau) et d'autres selon la nature du désordre (physique ou chimique). Nous avons choisi de présenter ici la classification de Mehta et Monteiro³². Nous présentons les causes physiques dans la Figure 10 et les causes chimiques dans la Figure 11.

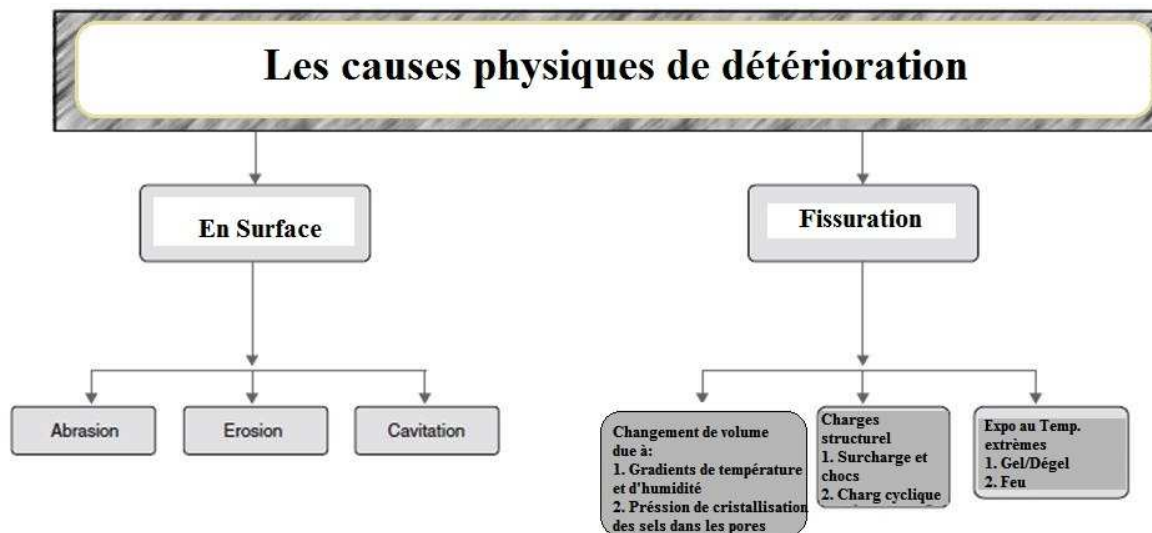


Figure 10 - Les causes physiques de détérioration du béton (source : Réf.³²)

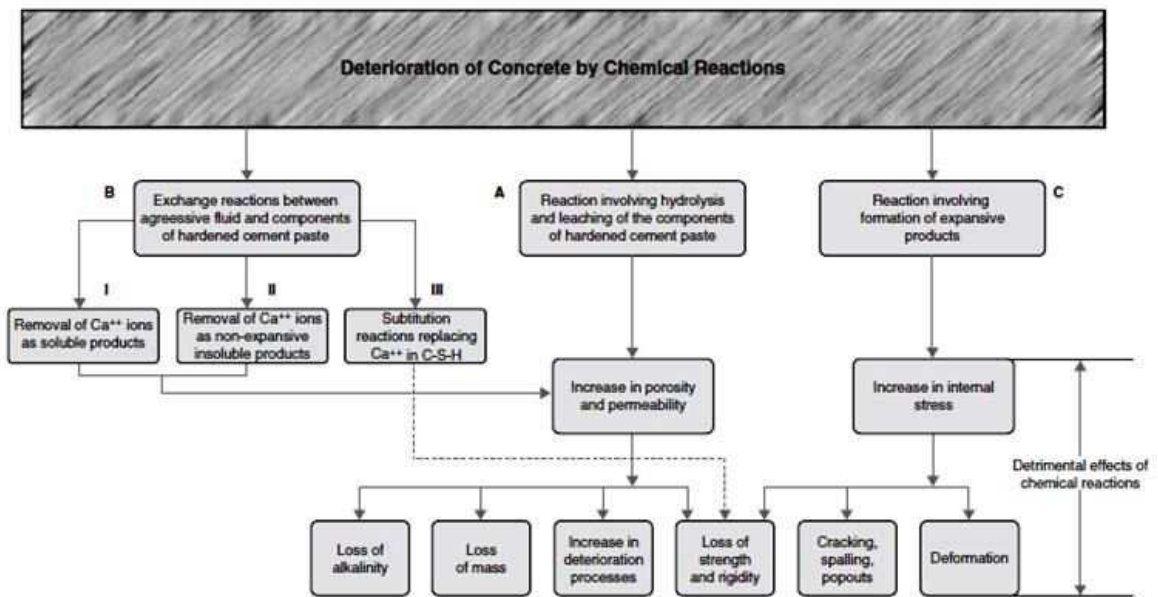


Figure 11 - La dégradation du béton due aux attaques chimiques (Source: Réf.³²)

Selon Basheer et Barbuiya³⁵, à part les causes de dégradation des structures, il y a d'autres facteurs affectant la durabilité du béton (Figure 12).

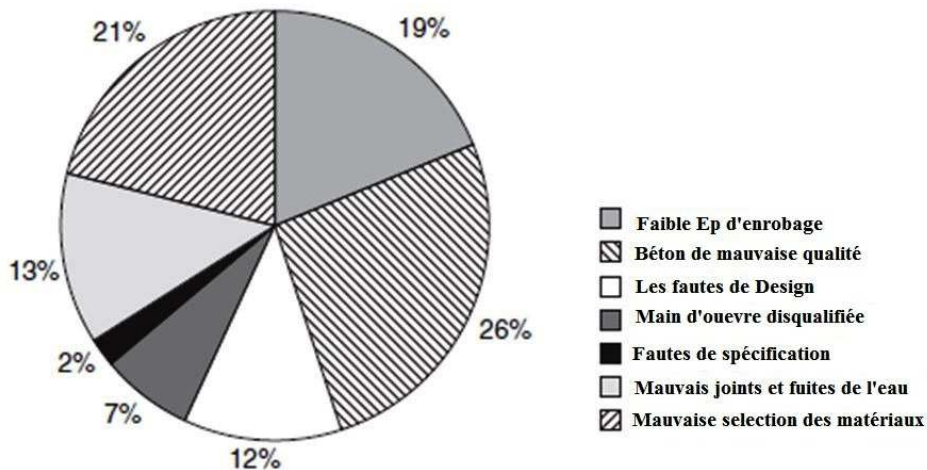


Figure 12 - Les facteurs influençant la durabilité (source : Réf.³⁵)

Selon ces auteurs, les chlorures sont la première cause de dégradation, suivi par la carbonatation comme représenté dans la Figure 13

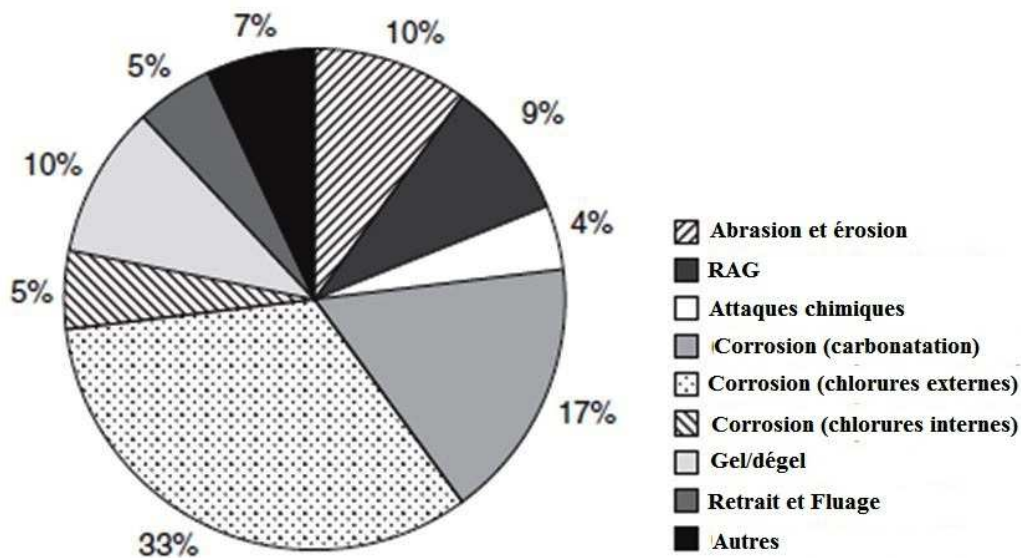


Figure 13 - Les facteurs causant la dégradation des structures en béton armé (source : Réf.³⁵)

2.2.2.1 L'influence des chlorures

Les chlorures sont la première cause de la corrosion des structures en béton armé en milieux marins. La source des chlorures peut être interne venant des constituants du béton, ou bien d'origine extérieure. Selon Broomfield³⁶, les chlorures peuvent se trouver dans le béton et ils sont dues à :

- Type d'adjuvant (Na Cl₂ a été largement utilisé jusqu'aux années 70s);
- L'utilisation de l'eau de mer comme eau de gâchage ;
- La contamination des granulats.

Ou bien, venant du milieu extérieur, ils diffusent dans le béton par :

- Les embruns marins ou bien l'immersion directe dans l'eau de mer ;

- Les sels de deverglassage ;
- L'utilisation de produits chimiques dans la construction (ex : Stockage).

Les chlorures pénètrent dans le béton par diffusion. C'est le résultat d'un gradient différentiel de concentration. En effet, ce gradient de pression cause l'écoulement de la solution saturée en chlorures à travers les pores³⁷. D'après Page et Page³⁴, le mécanisme de pénétration des chlorures est compliqué, et dépend de plusieurs paramètres dont les conditions d'humidité du matériau au moment d'exposition. Le transport des chlorures dans le béton se fait sous plusieurs formes (diffusion, convection/mouvement capillaire, succion et migration) couplées avec les effets d'interactions à la surface du béton de ion/ion et ion/pore.

La couche passive protégeant l'acier devient inefficace dans des circonstances particulières. C'est quand le niveau de chlorures dans le béton, autour des armatures, dépasse un niveau critique de concentration. Ce niveau s'appelle le seuil critique de concentration³⁸.

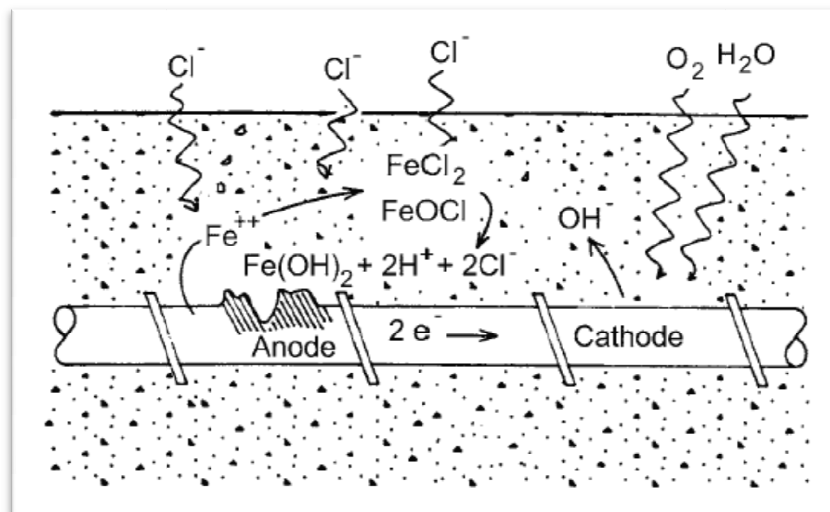


Figure 14 - Processus de la corrosion par piqures due aux chlorures (source : Réf.³⁸)

Plusieurs valeurs du seuil ont été proposées dans la littérature. Dans une étude menée par Vassie³⁹ sur la corrosion des ponts, il a conclu que 76 % des ponts se corrodent lorsque le seuil de chlorures dépasse 1,5 %. D'après Broomfield³⁶, le seuil correspond à 0.4% de chlorures par masse de ciment si les chlorures sont inclus dans le béton, et 0.2% si l'origine est l'environnement. Cette variation n'est pas encore bien expliquée, et seulement la variation dans la composition chimique du liant est l'hypothèse proposée³⁴. Broomfield³⁶ a détaillé quelques paramètres qui peuvent engendrer cet aspect de variabilité du seuil critique de chlorures :

- Le pH du béton varie avec le type de ciment et la formulation du béton. Un changement de pH implique un grand changement de concentration de OH^- ;
- Les chlorures peuvent être fixés chimiquement par les aluminates dans le béton et physiquement par l'absorption dans les parois des pores;
- Dans un béton très sec, la corrosion ne s'amorce pas même avec une concentration élevée de Cl^- . Tant que l'eau est absente il n'y a pas de réaction de corrosion ;
- Dans un béton scellé, polymérisé ou saturé, la corrosion ne s'amorce pas même avec une grande concentration de Cl^- . En effet, il n'y a pas assez d'oxygène pour alimenter la réaction de corrosion.

2.2.2.2 L'influence des sulfates

L'attaque sulfatique a attirée l'attention des chercheurs depuis des décennies. Elle reste encore l'objet de débats scientifiques à nos jours. D'après la terminologie de l'ACI⁴⁰, l'attaque par sulfates est une réaction chimique, physique ou chimico-physique entre les sulfates (issus du sol ou de l'eau souterraine) et le béton ou mortier. Cette réaction chimique se passe principalement avec les hydrates d'aluminates de calcium dans la pâte de ciment'. Elle est composée d'une série de réactions chimiques entre les ions de sulfates sous forme gazeuse ou liquide et les composants du béton durci, principalement la pâte de ciment⁴¹.

D'après la littérature, il existe trois formes d'attaque sulfatique, à savoir, la forme classique (conventionnelle), l'attaque sulfatique avec la formation de Thaumasite, la formation différée de l'ettringite. Nous rappelons que pour notre étude, nous nous limitons à la présentation de la première forme de l'attaque qui conduit à la formation d'ettringite expansive. La réaction chimique dans ce cas cause l'expansion du béton, impliquant une fissuration irrégulière (Figure 15). Ce qui facilite la pénétration d'agents agressifs.

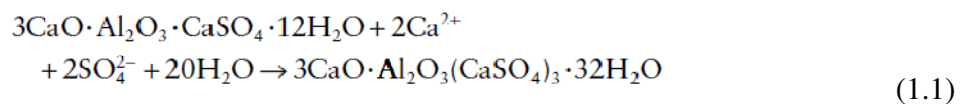


Figure 15 - L'attaque sulfatique classique associée à la formation d'ettringite (source : Réf.⁴²)

Pour la formation de l'ettringite, les sulfates entrent en contact avec la source d'aluminates et de calcium dans le béton. Dans une pâte de ciment durcie, l'aluminium est présent sous forme d'ettringite $Al_2O_3-Fe_2O_3$ -mono (AFm), ou bien substitué dans le gel de C-S-H²². L'aluminium de la phase AFm est généralement plus soluble que celui du gel de C-S-H. Donc, la phase AFm présente est le monosulfate $(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O)$. Les

constituants de la pâte et les conditions environnementales donnent les phases AFm, le sel de Friedel ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$), le monocarbonate ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$) et l'hemicarbonate ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 1/2\text{CaCO}_3\cdot 1/2\text{CaO}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$)³⁷.

La réaction avec le monosulfate est comme suit⁴²:



En pratique, les principaux paramètres influençant l'expansion sont :

- Les conditions d'exposition (sévérité de l'attaque) ;
- L'accessibilité (perméabilité du béton) ;
- La susceptibilité du béton (type de ciment et quantité de la matière attaquable) ;
- La quantité de l'eau (l'humidité).

2.2.3 Les classes d'exposition

C'est une notion basée sur le principe de classification des différentes catégories d'environnements et des micro-climats qui peuvent entourés un structure selon des critères définis (la concentration et l'origine des agents destructifs, l'humidité relative, la distance de la mer, les cycles d'alternances d'humidification/séchage...etc.). Elles comportent des spécifications pour chaque sous classe (la composition du béton en termes de classe de résistance minimale, le rapport E/L maximum, le dosage en ciment minimum, des limitations sur le type d'ajout minéral et sa quantité...etc.). En Europe, cela est consigné dans la norme [EN 206-1](#). L'Annexe Nationale française de la norme NF EN 206-1 définit des valeurs limites spécifiques relatives au béton en fonction de chaque classe d'exposition.

La norme NF EN 206-1, en conformité avec l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1), définit (article 4.1 : Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement) 18

classes d'exposition regroupées par niveau de risque de corrosion (XC, XD, XS) et d'attaques (XF, XA) dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton est soumis. La norme décrit, pour chaque classe d'exposition, l'environnement et le type de béton concerné et donne à titre informatif des exemples d'ouvrages ou de parties d'ouvrages.

Tableau 5 - Classes d'exposition selon NF EN 206-1 (source : [Cimbéton](#))

Classes d'exposition		
	XD	Aucun risque de corrosion ou d'attaque
Risque de corrosion	XC	Corrosion induite par carbonatation
	XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine
	XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
Attaques	XF	Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
	XA	Attaques chimiques

2.3 Les ajouts minéraux

2.3.1 Définition

Selon Ramanchandran⁴³, les ajouts minéraux sont des produits fins, ajoutés aux mortiers et bétons afin d'obtenir des propriétés spécifiques. Contrairement aux ajouts chimiques (adjuvants), ils sont incorporés avec un taux relativement élevé. Ils sont introduits lors de la

fabrication des ciments, ou bien ajoutés en substitution massive au ciment dans la composition des bétons.

2.3.2 Classification

D'après la norme européenne EN 206-1, on distingue deux types d'additifs, Type I et Type II (selon le degré de réactivité de l'ajout exprimé par la valeur du coefficient d'équivalence k). Le type I englobe les ajouts inertes et semi-inertes, et le type II les ajouts pozzolaniques et Hydrauliques. Le tableau 6 présente cette classification et les ajouts entrant dans chaque type.

Tableau 6 - Classification des additifs selon la norme EN 206-1 et BS 8500 (source :Réf.⁴⁴)

TYPE I	Inerte ou semi-inerte	Cendres volantes pulvérisées	BS 3892 Part 2
		Filler mineral (calcaire, dolomite...)	BS EN 12620
		Filler granulé vitreux	(needs to be tested for conformity)
		Pigments	BS EN 12878
TYPE II	Pozzolanique	Cendres volantes	BS EN 450
		Cendres volantes pulvérisées	BS 3892 Part 1.
		Fumée de silice	prEN 13263
	Hydraulique	Laitier granulé de haut fourneau	BS 6699

Mehta et Monteiro³² ont fourni une classification des pozzolanes basée sur les critères de degré de pozzolanité et de caractère cimentaire (Tableau 7). Selon ces auteurs, il y'a 4 types, *les ajouts cimentaires et pozzolaniques* (le laitier, cendres volantes avec taux de calcium élevé) ; *les pozzolanes de forte activité* (la fumée de silice condensée, cendres de riz) ; *les pozzolanes d'activité normale* (cendres volantes de faible taux de calcium, matériaux naturels) ; *les pozzolanes faibles* (le laitier de refroidissement lent, cendres marginales, laitier boilé, cendre de riz brulé sur place).

Tableau 7 - Classification, composition et caractéristiques des ajouts pozzolaniques (source : Réf.³²)

Classification	Chemical and mineralogical composition	Particle characteristics
Cementitious and pozzolanic		
Granulated blast-furnace slag (cementitious)	Mostly silicate glass containing mainly calcium, magnesium, aluminium, and silica. Crystalline compounds of melilite group may be present in small quantity.	Unprocessed material is of sand size and contains 10–15% moisture. Before use it is dried and ground to particles less than 45 µm (usually about 500 m ² /kg Blaine). Particles have rough texture.
High-calcium fly ash (cementitious and pozzolanic)	Mostly silicate glass containing mainly calcium, magnesium, aluminium, and alkalis. The small quantity of crystalline matter present generally consists of quartz and C ₂ A; free lime and periclase may be present; C ₂ S and C ₄ A ₃ S may be present in the case of high-sulfur coals. Unburnt carbon is usually less than 2%.	Powder corresponding to 10–15% particles larger than 45 µm (usually 300–400 m ² /kg Blaine). Most particles are solid spheres less than 20 µm in diameter. Particle surface is generally smooth but not as clean as low-calcium fly ashes.
Highly active pozzolans		
Condensed silica fume	Consist essentially of pure silica in noncrystalline form.	Extremely fine powder consisting of solid spheres of 0.1 µm average diameter (about 20 m ² /g surface area by nitrogen adsorption).
Rice husk ash	Consist essentially of pure silica in noncrystalline form.	Particles are generally less than 45 µm but they are highly cellular (40–60 m ² /g surface area by nitrogen adsorption).
Normal pozzolans		
Low-calcium fly ash	Mostly silicate glass containing aluminum, iron, and alkalis. The small quantity of crystalline matter present generally consists of quartz, mullite, sillimanite, hematite, and magnetite.	Powder corresponding to 15–30% particles larger than 45 µm (usually 200–300 m ² /kg Blaine). Most particles are solid spheres with average diameter 20 µm. Cenospheres and plerospheres may be present.
Natural materials	Besides aluminosilicate glass, natural pozzolans contain quartz, feldspar, and mica.	Particles are ground to mostly under 45 µm and have rough texture.
Weak pozzolans		
Slowly cooled blast-furnace slag, bottom ash, boiler slag, field burnt rice husk ash	Consist essentially of crystalline silicate materials, and only a small amount of noncrystalline matter.	The materials must be pulverized to very fine particle size in order to develop some pozzolanic activity. Ground particles are rough in texture.

2.4 Matrices cimentaires à base du filler calcaire

Dans ce chapitre, nous présentons les différents aspects de l'influence de l'incorporation du filler calcaire (soit incorporé lors de la fabrication du ciment dans le type CEM II/L ou bien comme ajout minéral en substitution partielle au ciment lors de la confection des mélanges cimentaires. Il est à rappeler que les propriétés des mélanges cimentaires dans les deux situations ne sont pas identiques. C'est-à-dire que le mode d'action de filler calcaire dans un

système CEM I + FC est différent de celui d'un système CEM II/L (le ciment CEM II/L est optimisé lors de sa fabrication en usine pour avoir de performances identiques à celles du CEM I).

2.4.1 Définitions

Selon The New Shorter Oxford English Dictionary, un filler est *une substance inerte ajoutée aux composants chimiques pour obtenir une certaine densité, texture, résistance...etc.* Cependant, dans le domaine de la construction, un filler est un ajout minéral de type I (qui n'est pas de la famille des ajouts pozzolaniques). Il peut être obtenu après traitement de calcaire (broyé spécialement pour l'utilisation comme ajout minéral) ; ou bien co-broyé avec le clinker pour fabriquer les ciments au calcaire³⁷. Sa distribution granulométrique dépend du processus de fabrication et des exigences de l'application souhaitée. La taille moyenne de la majorité des grains est légèrement inférieure à celle du ciment portland, ou bien de même taille²³. Le filler calcaire est composé essentiellement de CaCO_3 , et d'autres minéraux (Tableau 8).

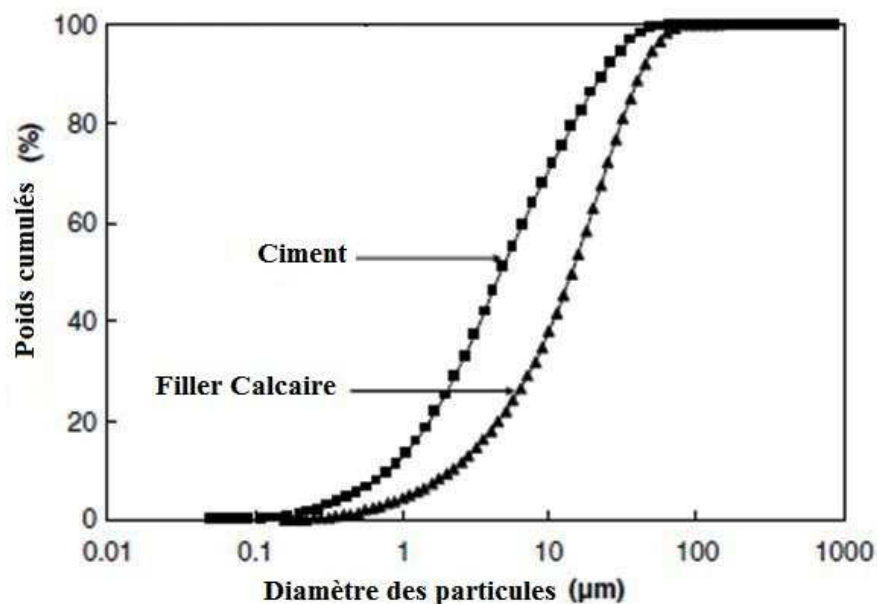


Figure 16 - Granulométrie de ciment et du filler calcaire (source: Réf.⁴⁵)

Tableau 8 - Composition typique du filler calcaire (source: Réf.¹⁰)

Filler	A	B	C	D	E
SiO ₂	4.00	13.60	2.00	12.05	2.96
Al ₂ O ₃	0.77	2.50	0.80	3.19	0.79
Fe ₂ O ₃	0.30	0.90	0.20	1.22	0.30
CaO	51.4	43.4	52.9	43.5	52.3
MgO	1.30	3.20	0.90	1.68	1.30
SO ₃	0.10	0.10	0.20	0.56	0.03
PAF	42.0	35.6	42.5	36.21	42.18
Na ₂ O	0.01			0.12	0.04
K ₂ O	0.02	0.60	0.20	0.72	0.23

Le filler calcaire a été considéré pendant longtemps comme inerte (ne réagit pas avec le ciment). Car, il ne participe pas au développement des résistances mécaniques à travers une réactivité chimique³⁷. En revanche, certains auteurs ont rapporté récemment qu'il n'est pas complètement chimiquement inerte. Il peut contribuer au développement de la microstructure du béton, en particulier quand il est co-broyé avec le clinker¹⁵. Cette contribution a été étudiée par plusieurs auteurs :

Tsivilis et al.⁷ expliquent que le filler calcaire plus fin que le ciment lorsqu'il est broyé avec ce dernier, et qu'il améliore le squelette granulaire et lui confère un meilleur remplissage. Tandis que Soroka et Setter⁴⁶ montrent que les grains fins de filler calcaire créent de nouveaux sites de nucléations. Bonavetti et al.⁴⁷ avancent que le filler calcaire provoque une augmentation du taux d'hydratation des silicates de calcium au jeune âge et un perfectionnement de la distribution des hydrates. De leur côté Matschei et al.⁴⁸ expliquent que le CaCO₃ réagit chimiquement avec les phases d'aluminates pour former les carboaluminates.

Dans les normes, on trouve des exigences portant sur la qualité du filler calcaire (EN 197-1, ASHTO et ASTM). Selon ces dernières, il doit contenir de 70-75 % de CaCO₃, moins de 1,2 % d'argiles et moins de 0,5 % de carbone organique total. En effet, ils existent deux types de filler en fonction de leur taux en carbone organique : LL (≤0.20 %) et L (≤0.50 %).

D'après Barcelo et al.⁴⁹, le CFC est un ciment hydraulique fabriqué par une combinaison de filler calcaire, de clinker et de sulfates de calcium.

Selon la normalisation européenne (EN 197-1), le CFC est un CEM II de type A ou B en fonction du taux de clinker et du filler calcaire. Le CEM II A contient un taux de clinker compris entre 80 et 94 % et un taux de filler calcaire compris entre 6 et 20 %. Alors que le CEM II B a des taux de filler respectivement de 65-79 % et 21-35 %. Dans les normes américaines [ASTM C595-12](#) et [AASHTO M240-12](#), le taux d'ajout en filler calcaire compris entre 5 et 15 %. Selon Barcello et al.⁴⁹ il y'a deux types de CFC, le type IL qui contient le clinker et le filler calcaire et le type IT (ternaire) qui contient le clinker, le filler calcaire et un ajout minéral. Les norme canadiennes ont permis depuis 2008 l'ajout de filler calcaire jusqu'à 15 %^{18,50}. En 2009, la norme [CSA A23.1](#) a été révisée afin de permettre l'utilisation des CFC couvrant toutes les classes du ciment.

2.4.2 Historique

Dans les pays européens l'utilisation du CFC date des années 60s, alors que son utilisation en Amérique du Nord est récente et limitée à 15 %. Le [Tableau 9](#) résume l'histoire d'utilisation de CFC :

Tableau 9 - Historique d'utilisation des ciments au calcaire.

1965	Heidelberger fabrique un ciment substitué à 20 % de calcaire en Allemagne pour des applications spécifiques.
1979	Les normes françaises permettent l'addition de filler calcaire comme additif.
1983	La norme canadienne CSA A5 permet l'ajout de % dans le Type 10 de ciment (GU).
1990	Des ciments ayant à 5-15 % de substitution en Allemagne.
1992	La norme BS 7583 permet 20 % de substitution en FC.
2000	EN 197-1 permet 5 % de FC dans la fabrication de tous les 27 ciments de cette norme.
2000	EN 197-1 a créé le CEM II/A-L (6-20%) et CEM II/B-L (21-35%).
2004	ASTM C 150 permet 5% de FC dans le type IV.
2006	CSA A3001 permet 5% dans d'autres types que le type GU.
2007	AASHTO M85 permet 5 % dans le type IV.

2.4.3 Influence du FC sur l'hydratation du ciment

Pera et *al.*⁵¹ ont montré que le filler calcaire réagisse beaucoup avec le C_3A et conduit à une augmentation du taux de dégagement de chaleur d'hydratation. De leur côté, Ye et *al.*⁴⁵ ont confirmé ce résultat en comparant le taux de dégagement de chaleur lors de l'hydratation des pâtes autoplaçantes contenant du filler calcaire et des pâtes normales qui n'en contiennent pas. Ils ont trouvé une différence d'environ 150 mW/g (Figure 17).

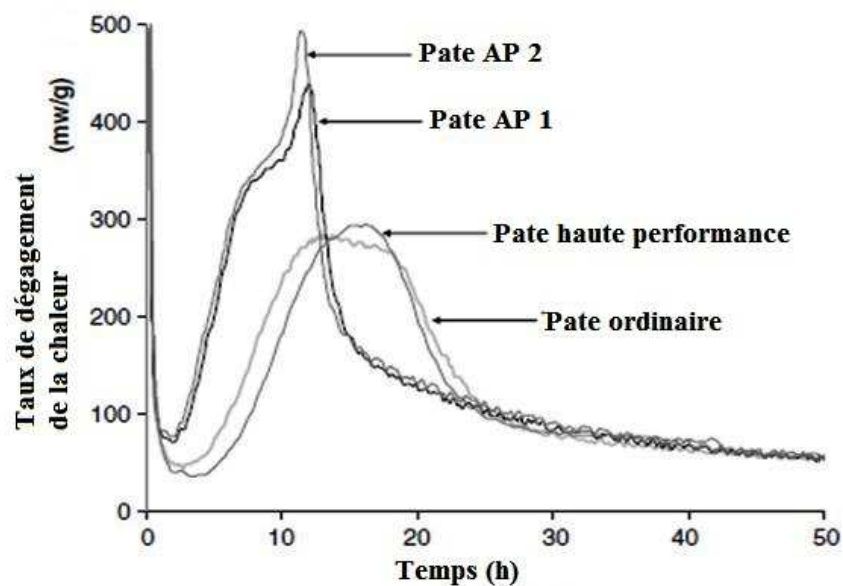


Figure 17 - Influence de FC sur le taux de dégagement de chaleur d'hydratation à 20°C
(source : Réf.⁴⁵)

Concernant les produits hydratés, des chercheurs^{45, 52, 53} ont montré qu'après 2 jours, le taux de la portlandite dans les pâtes à base de FC est moins important que celui des pâtes à base de CEM I. Ceci est dû à la différence du taux de clinker présent dans les deux matériaux cimentaires. La même remarque a été faite par Ye et *al.*⁴⁵ concernant la présence des C-S-H dans les matériaux à base de CFC.

Bonavetti et *al.*⁵⁴ ont représenté l'évolution des produits d'hydratation pour les CFC en signalant la présence importante des monocarboaluminates (Figure 18).

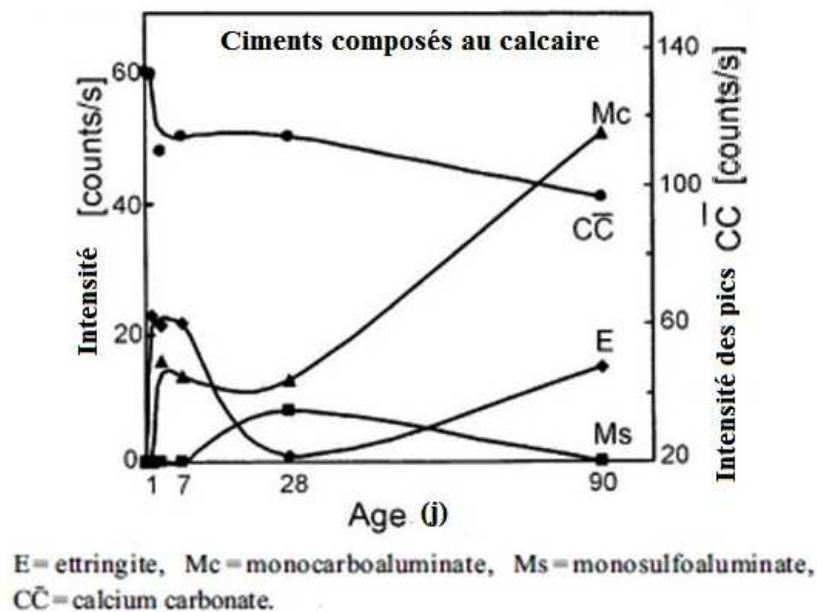


Figure 18 - Évolution de produits d'hydratation dans les CFC

E: ettringite, MC: monocarboaluminate, Ms: monosulfoaluminate, CC: carbonate de calcium
 (source :Réf.⁵⁴)

Par ailleurs, Borcelo et *al.*⁵⁵ expliquent que la quantité de C_3A et le taux de filler calcaire sont les facteurs les plus importants dans la formation des produits d'hydratation des matériaux à base de CFC.

El-Didamony et *al.*⁵⁶ montrent qu'au delà de 5 % en FC, le temps de prise diminue avec l'augmentation du taux de calcaire. cette influence de FC sur l'accélération du temps de prise a été également confirmé par d'autres auteurs^{47,57}.

2.4.4 Influence du FC sur la résistance mécanique

Il existe un certain consensus en littérature entre l'augmentation du taux de substitution en filler calcaire et la baisse des résistances mécaniques. En effet, Bonavetti et *al.*⁵⁴ trouvent que la résistance mécanique des bétons diminue avec l'augmentation du taux de substitution en

FC de 0 à 20 %. Dhir et *al.*⁵⁸ remarquent qu'une diminution de la résistance mécanique des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution de 15 à 45 % pour un rapport E/C= 0,6. En 2010, Ezziane et *al.*⁵⁹ en étudiant les performances des mortiers avec un CEM I et des substitutions de 15 % de FC, 20 % de pozzolane naturelle et 30 % de laitier, ils confirment que les mortiers à base de FC donnent la valeur la plus faible (Figure 19).

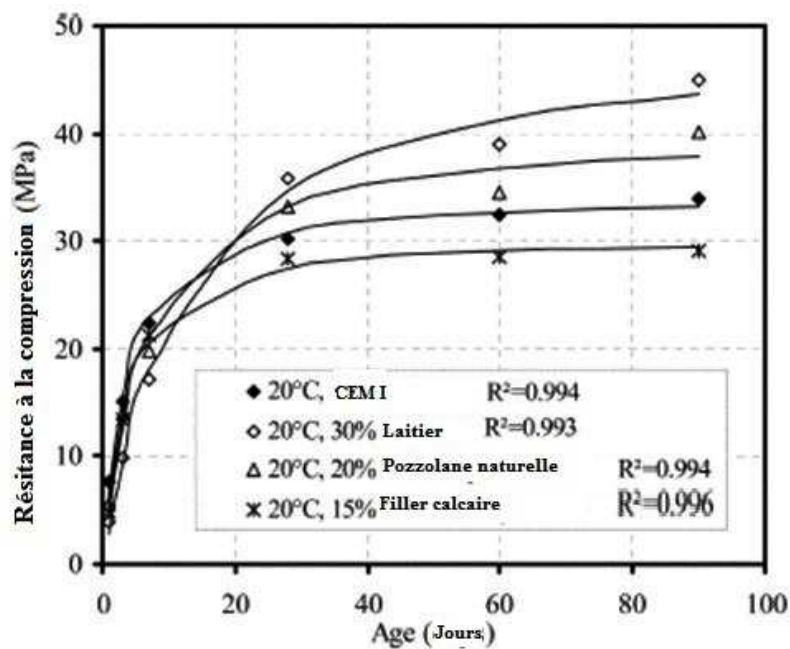


Figure 19 - Influence de différents ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers (source : Réf.⁵⁹)

Par contre, Hornain et *al.*⁶⁰ mentionnent qu'un béton avec 15 % de fine calcaire présente une résistance plus importante qu'un béton sans ajout.

Les équipes de Thomas et de Bentz rapportent que les ciments CFC ont été élaborés pour conduire à des performances identiques à celles d'un CEM I dans la limite d'un taux de substitution ne dépassant pas 15 %. Cette valeur adoptée par les normes américaines et canadiennes se base sur les travaux de Matschei et *al.*⁴⁸. Ces derniers ont établi une corrélation entre la résistance mécanique et la porosité des bétons à base de CFC (Figure 20)

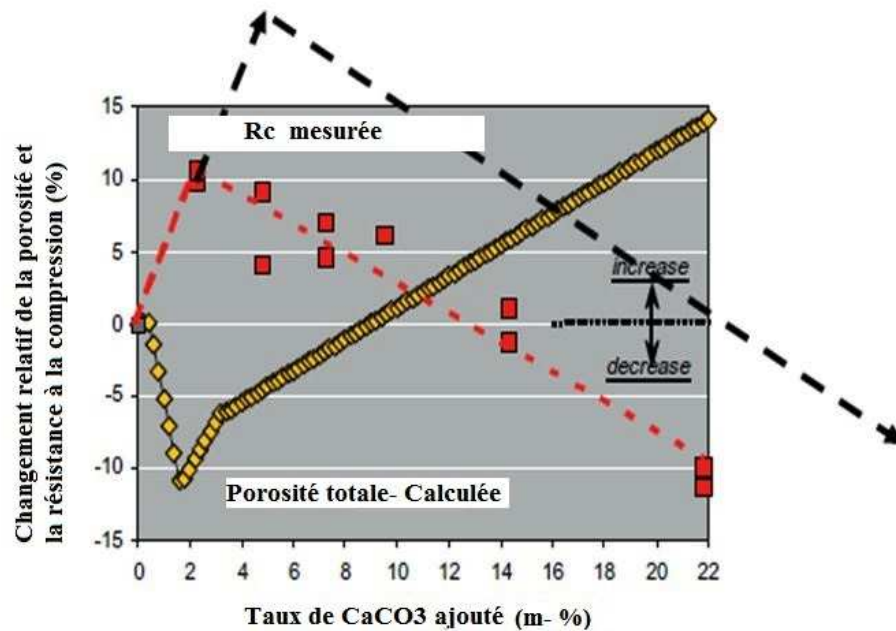


Figure 20 - Changement relatif de la résistance à la compression et de porosité des bétons au CFC (Source: Réf.⁴⁸)

Et effectivement, Thomas et *al.*⁶¹ ont testé des échantillons de béton de pavage et trouvé des valeurs similaires des résistances à la compression pour les bétons à base de CEM I, et ceux à base de CFC pour différents âges et différents taux de substitution en FC.

2.4.5 Influence du FC sur les paramètres de transfert

Les paramètres de transfert des bétons à base de CFC ont été peu étudiés. Les travaux de Ye et *al.*⁴⁵ ont trouvé que les BAP avec FC ont moins de volume cumulé de pores par rapport les bétons ordinaires sans FC avec une différence de 0,05 %. En 2007, Matschei et *al.*⁴⁸ ont trouvé une augmentation de la porosité des bétons à base de CFC à partir d'un taux de FC de 9 %. Une étude récente⁵⁰ montre que les mortiers à base de CFC présentent une distribution de pore capillaire similaire à celle des mortiers à base de CEM I, mais une légère augmentation a été marqué pour les mortiers à base de CFC concernant les pores de diamètre compris entre 3 à 6 nm (pores de gel). (Figure 21)

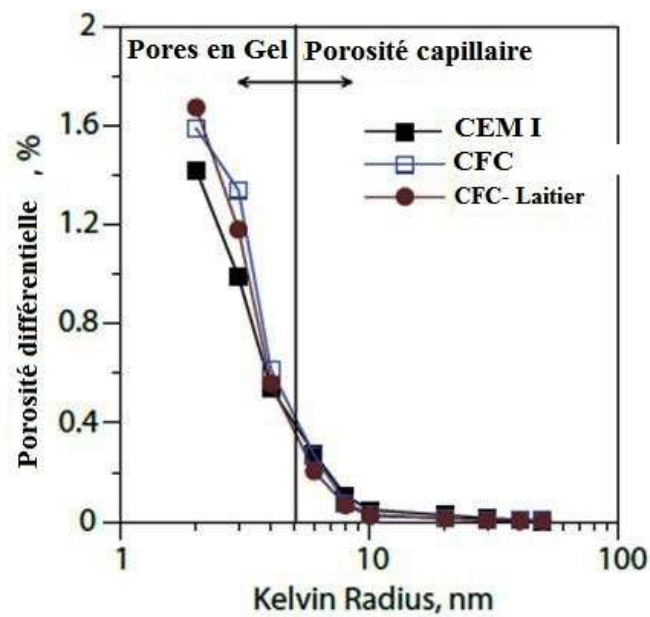


Figure 21 - La distribution porale différentielle des mortiers de CEM I, CFC et CL (source : Réf.⁵⁰)

De plus, Rameznianpour et *al.*⁶² ont trouvé que l'absorption capillaire des bétons de rapports E/C de 0,37 – 0,45 – 0,55 augmente avec le taux de substitution en FC.

2.4.6 Influence du FC sur l'attaque sulfatique

Il est rapporté dans la littérature que l'incorporation de FC engendre une diminution de la résistance à la pénétration de sulfates⁶³, surtout avec l'augmentation du taux de substitution^{64, 65}. Ce fait est plus important en cas des sulfates de magnésium (Figure 22).

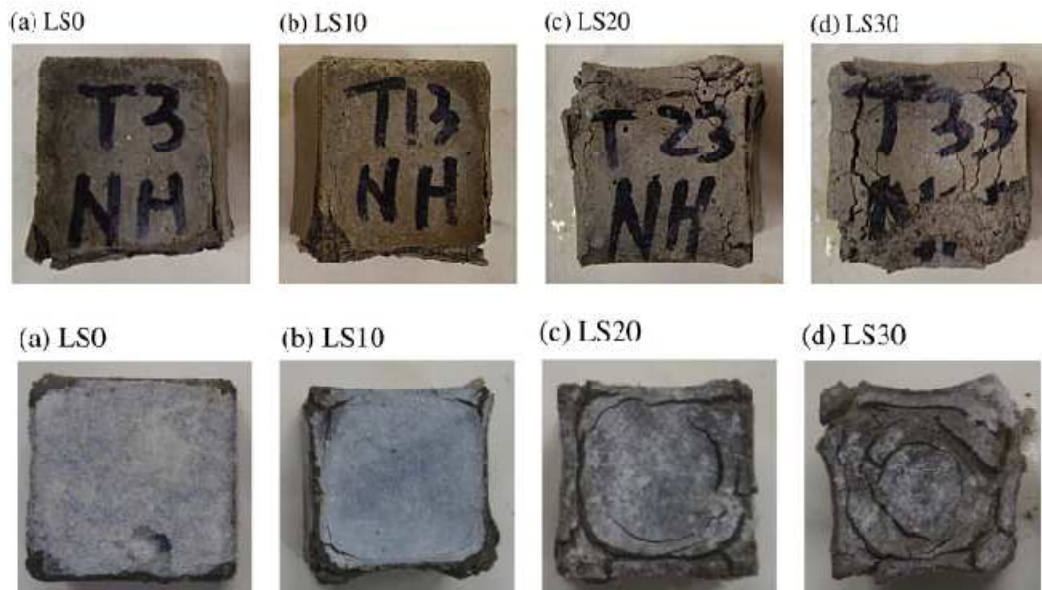


Figure 22 - Cubes de mortiers en FC exposés pendant un an aux sulfates de sodium et aux sulfates de magnésium (Source : Réf.⁶⁴)

Pour les CFC, Irassar et ses collaborateurs confirment la résistance faible des CFC aux sulfates avec l'augmentation du taux de substitution en filler calcaire¹⁷.

2.4.7 Influence du FC sur la pénétration des chlorures

Les travaux publiés sur l'action des chlorures en présence de FC sont contradictoires. Lorsque le FC est un ajout de substitution, les travaux des années 90s^{60, 66, 67} rapportent son effet faible sur la pénétration des chlorures dans béton. Par contre, Rameznianpour et *al.*⁶² trouvent une diminution de la résistance des bétons aux chlorures diminue avec l'ajout de FC. Ainsi que les résultats de Tsvilis et *al.*⁷ indiquent que la résistance aux chlorures des bétons ayant 10 à 15 % en FC est supérieure à celle d'un béton sans ajout, mais cela s'inverse avec des taux de substitution en FC de 25 et 35 %.

Pour les matériaux à base de CFC, on peut noter en littérature les mêmes controverses. En effet, les travaux de Bonavetti et *al.*⁴⁷ et Dhir et *al.*⁵⁸ montrent que les bétons à base de CFC présentent moins de résistance aux chlorures par rapport aux bétons à base de CEM I.

Cependant, Matthews⁶⁸ et Thomas et *al.*⁶¹ trouvent des valeurs similaires de résistance aux chlorures.

2.5 Influence de la fumée de silice

2.5.1 La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium. Elle est considérée comme l'ajout le plus efficace et le plus utilisé au monde⁶⁹. Ses grains ont une forme sphérique avec une taille de 0.03-0.3 μm ²³ (comme représenté dans la Figure 23), une surface spécifique d'environ 20 000 m^2/kg ⁷⁰. Il existe plusieurs types de la fumée de silice, la plus répandue est la fumée de silice densifiée avec une densité de 500-700 kg/m^3 . Chimiquement, la fumée de silice est composée essentiellement de silice à environ 95 % et d'autres composants (Tableau 10).

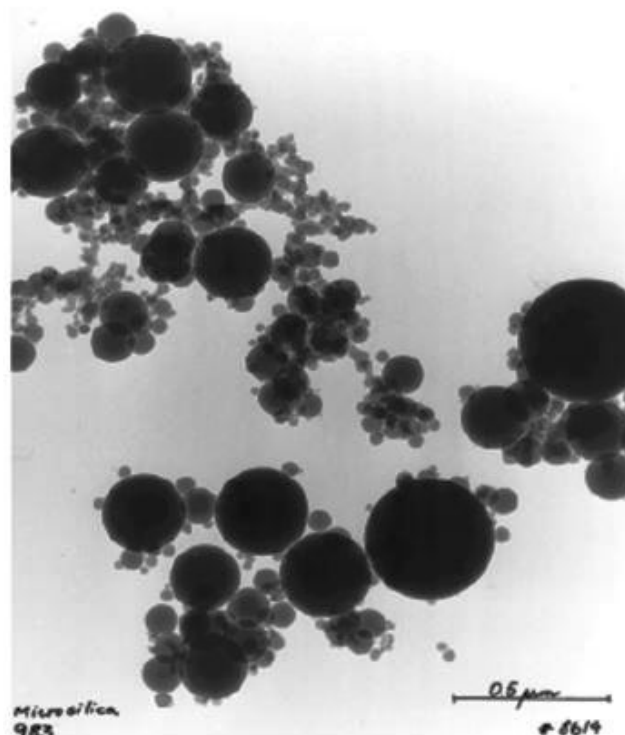


Figure 23 - Image au MEB de la fumée de silice (source : ACI⁷¹)

Tableau 10 - Composition chimique de la FS (source : Réf.⁷²)

Composition chimique	Constituants chimiques	% massique
	SiO ₂	95.75
	Al ₂ O ₃	0.35
	Fe ₂ O ₃	0.21
	CaO	0.17
	MgO	0.09
	SO ₃	0.42
	Na ₂ O	0.51
	PAF	1.44
Propriétés physiques	Densité	2.25
	Taille moyenne des grains	0.1 microns
	Densité apparente	2247 kg/m ³

2.5.2 Influence de FS sur l'hydratation du ciment portland

Comme indiqué dans la littérature, la fumée de silice influence l'hydratation du ciment à toutes les étapes. Elle réagit avec la portlandite pour former les C-S-H (réaction pozzolanique)⁷³. Plusieurs chercheurs^{74, 75, 76} montrent que le taux de dégagement de la chaleur d'hydratation diminue dans les premières heures du processus d'hydratation et augmente à environ 12 h (moment où la formation des C-S-H s'accélère). Ensuite, le taux de dégagement de chaleur diminue de nouveau, ce qui explique le processus long de la formation des C-S-H, qui contribue à la résistance mécanique à longs termes (après 15 jours).

2.5.3 Influence de FS sur la résistance mécanique

Concernant la FS, il y'a un consensus général confirmant son efficacité de vis-à-vis l'augmentation des résistances mécaniques des bétons et mortiers^{77, 78, 79}. Bien que le taux de substitution de la FS autorisé dans les normes ne dépasse pas 10 %, celle-ci donne de meilleures résistances par rapport à d'autres ajouts pozzolaniques. Ce qui conduit à son utilisation dans la fabrication des bétons hautes performances où les résistances exigées

dépassent par fois 100 MPa⁸⁰. La résistance à la compression augmente avec la diminution du rapport E/C^{79, 81}.

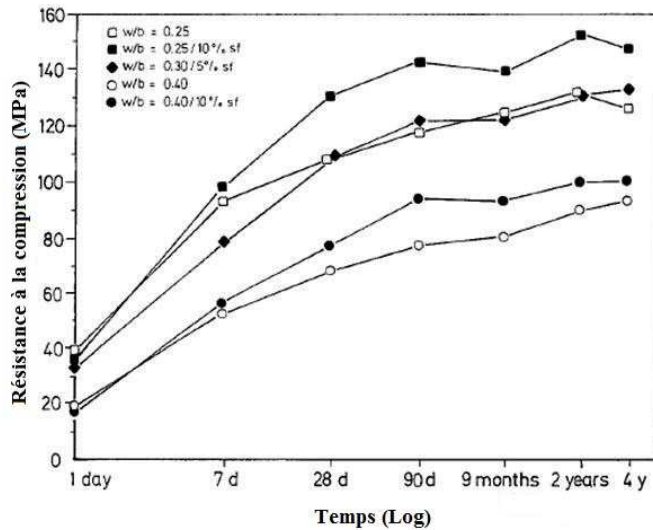


Figure 24 - Influence de la FS sur la résistance à la compression (source :Réf.⁷⁹)

D'autres chercheurs^{72, 82} ont également montré les bonnes performances de FS sur la résistance à la flexion des bétons

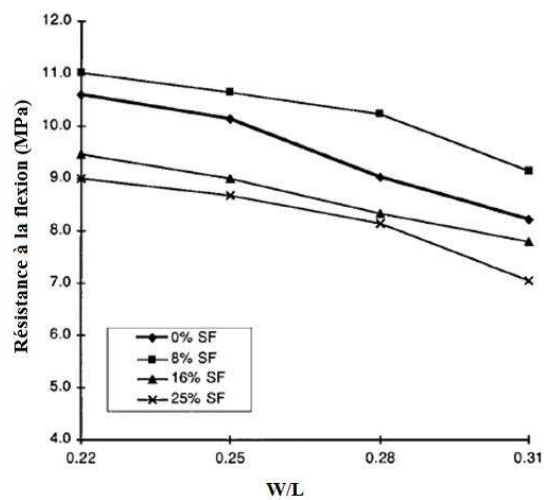


Figure 25 - Influence du rapport E/C et du taux de substitution de FS sur la résistance à la flexion des béton (source: Réf.⁷²).

Concernant l'explication du mécanisme d'action de la fumée de silice et sa contribution sur l'augmentation de la résistance mécanique les avis divergent. Certains chercheurs attribuent ce fait à la performance de la zone interfaciale pâte/granulat^{83, 84}. D'autres expliquent cela par l'amélioration apportée par la FS à la pâte de ciment⁷⁶. Une troisième catégorie estime que cela est dû simultanément aux deux visions précédentes⁸⁵.

2.5.4 Influence de FS sur les propriétés au jeune âge

Plusieurs travaux ont montré l'influence négative de la fumée de silice sur le retrait au jeune âge notamment en conditions de température élevées^{82, 86, 87}. Néanmoins, l'utilisation d'un adjuvant adéquat peut éviter cet effet négatif^{80, 88}.

Sur les propriétés à l'état frais, Agulo et *al.*⁸⁹ ont trouvé que l'incorporation de la fumée de silice augmente l'étalement des pâtes de ciment (Figure 26).

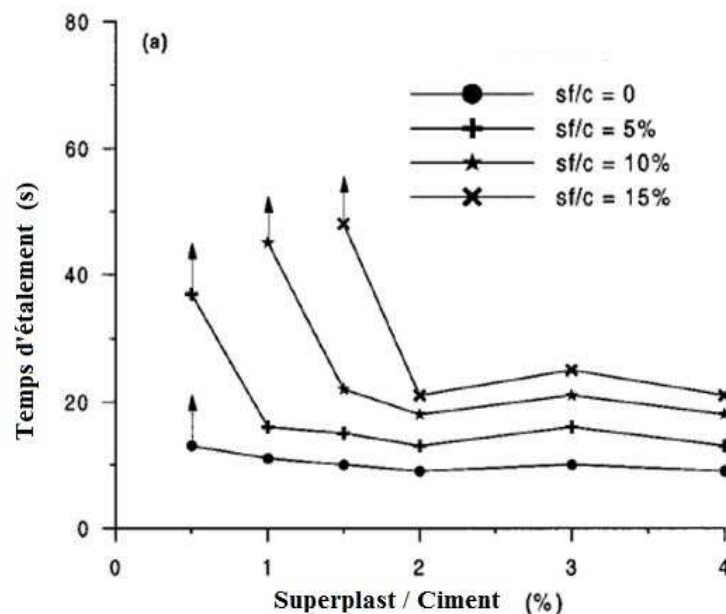


Figure 26 - Influence du taux de substitution en FS sur l'étalement des pâtes (source: Réf.⁸⁹)

2.5.5 Influence de FS sur les propriétés du transfert

Sur la porosité capillaire, les travaux de Nehdi et *al.*¹², Yajun et Kahyadi⁸⁷ et Folagbade⁹⁰ ont montré que la fumée de silice contribue positivement à la diminution des pores capillaires.

2.5.6 Influence de FS sur l'attaque sulfatique

La majorité des travaux publiés jusqu'à présent confirment l'efficacité de la fumée de silice dans les milieux sulfatiques^{71, 91, 92}.

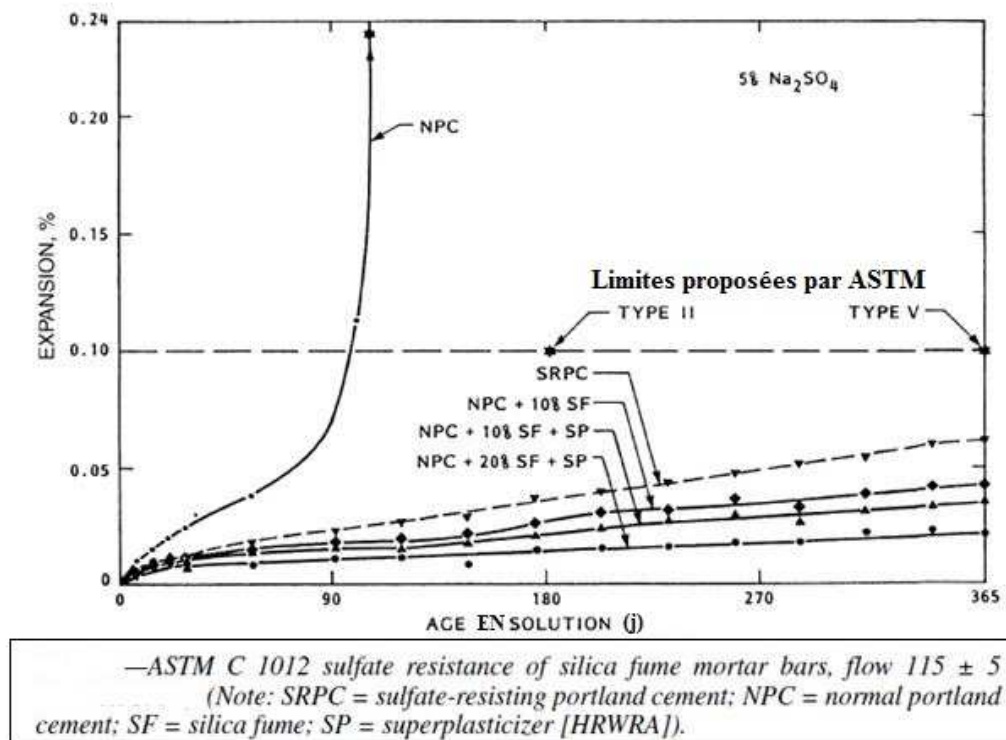


Figure 27 - Expansion due à l'attaque sulfatique de différents mortiers (source :Réf.⁷¹)

Ce fait est expliqué par la réaction pozzolanique assez forte qui consomme la portlandite qui est l'hydrate attaqué par les sulfates.

2.5.7 Influence de FS sur l'attaque des chlorures

Le consensus sur l'influence positive de la fumée de silice sur l'augmentation de la résistance à la pénétration des chlorures existe. En effet, Costa et Apleton⁹³ ont trouvé une grande diminution de la pénétration des chlorures avec l'augmentation du taux de substitution en fumée silice. Cohen et olek⁹⁴ ont remarqué les bonnes performances de tous les types de la fumée de silice (densifiée, non densifiée, liquide) par rapport un béton à base de CEM I sans FS (Figure 28).

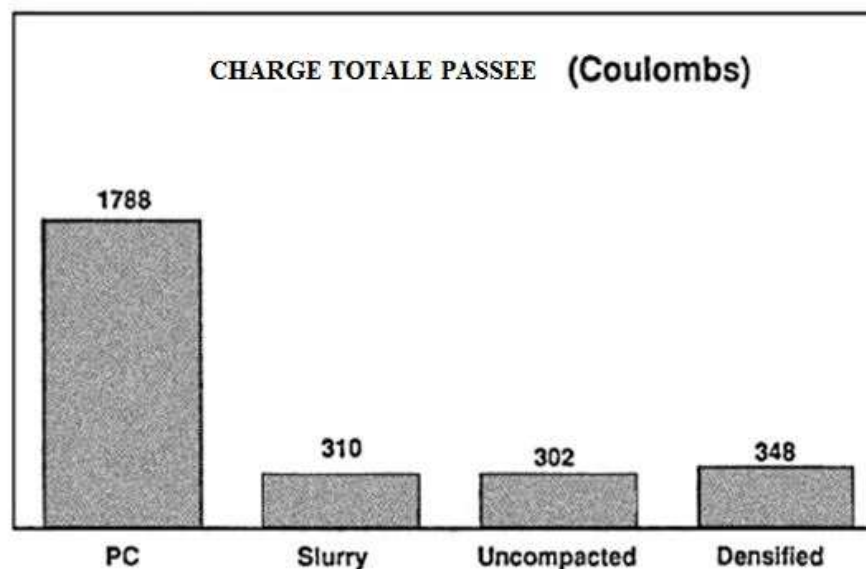


Figure 28 - Influence de type de fumé de silice sur la charge passé au test de migration ASTM (source: Réf.⁹⁴)

Des résultats similaires ont été publiés par Boubitsas et Paulo⁹⁵, Person⁹⁶ et Casimir et *al.*⁹⁷ sur des bétons autoplaçants avec fumée de silice et cendres volantes ou laitier. Ces chercheurs signalent de bonnes performances des bétons à base de fumée de silice, laitier ou cendres volantes par rapport à un béton de référence ne contenant pas d'ajout minéral.

2.6 Cas de Béton Autoplaçant BAP

Dans cette partie, on se limite à la présentation de l'influence de l'utilisation de filler calcaire et de la fumée de silice sur les BAP.

2.6.1 Le BAP

Le BAP est parmi les innovations relativement récentes de la technologie du béton. C'est un béton généralement de hautes performances et de fort écoulement. Il peut se placer et compacter sous son propre poids, sans aucune vibration, et atteint une bonne consolidation sans ségrégation, même à travers des éléments structuraux très confinés^{98, 99}. Le BAP est obtenu par l'adoption d'un faible rapport E/C, l'incorporation d'un taux élevé de fines (ciment et ajouts minéraux), l'introduction d'un superplastifiant efficace, l'augmentation du rapport sable/gravier, et éventuellement l'utilisation d'un agent de viscosité^{100, 101, 102, 103}.

2.6.2 Influence du filler calcaire sur les propriétés du BAP

Universellement le filler calcaire est l'ajout le plus utilisé pour la composition des BAP. Il influe sur les propriétés à l'état frais, à l'état durci et vis-à-vis de la durabilité du BAP.

2.6.2.1 Hydratation et microstructure

Comme pour les bétons ordinaires, le filler calcaire influe sur l'hydratation du béton. A la différence avec les bétons ordinaires, les BAP contiennent un taux assez élevé de filler calcaire. Selon Ye et *al.*⁴⁵ et Pope¹⁰⁴, l'hydratation des BAP avec le filler calcaire implique une accélération de l'hydratation et une modification de la microstructure. Ce fait est expliqué par la nucléation et le développement de produits d'hydratation à la surface des grains de calcaire¹⁰⁵. D'après Tragardh¹⁰⁶, le BAP a une faible porosité par rapport au BO, et présente une couche de portlandite (de 3-5 μm) moins importante que celle dans du BO (5-10 μm).

2.6.2.2 Résistance mécanique

Quelques auteurs ont trouvé que le FC influence positivement la résistance mécanique du BAP au jeune âge¹⁰⁷, et conduit à une structure plus dense dû à l'effet de remplissage¹⁰⁸. Par contre, Uysal et Yilmaz¹⁰⁹ trouvent une diminution de la résistance mécanique du BAP avec un remplacement partiel du ciment par le FC. En outre, Assié et *al.*¹¹⁰ trouvent des résistances similaires des bétons de classe 20 MPa (BAP avec CEM II/L+FC et BO). La contradiction de ces résultats est expliquée par la différence du FC utilisé par les auteurs et son mode d'introduction. En effet, si le filler calcaire est ajouté en remplacement partiel au ciment, il peut avoir peu d'influence sur la résistance. Par contre, s'il est introduit dans la fabrication du ciment CFC, et comme il est co-broyé avec ce dernier, il favorise le phénomène de nucléation et contribue à la résistance mécanique. Ceci est expliqué par Desnerck et *al.*¹¹¹ par l'effet de finesse du filler calcaire.

2.6.2.3 Attaque sulfatique

Les facteurs améliorant la résistance à l'attaque sulfatique externe sont les mêmes pour les bétons ordinaires que pour les BAP¹¹². Néanmoins, vu la diversité des types d'attaque sulfatique et de la variété de la composition chimiques des liants, les résultats des études menées dans ce domaine sont difficilement corrélables. Ainsi Al Tamimi et Sonebi¹¹³ ont testé l'influence de FC sur la résistance à l'attaque de 1 % de H₂SO₄ (en immersion) sur les BAP, pendant 18 semaines à 20 °C. Ils ont trouvé des pertes de masses similaires entre le BAP et le BO. Toutefois, ils ont détecté la présence de thaumasite associée à l'ettringite seulement dans le cas des BAP. Ce résultat est contradictoire avec ce que l'on connaît dans la littérature sur les conditions de formation de thaumasite dans les BO (Températures mois – 5 °C). Ce qui confirme, selon De Schutter¹¹², que les BAP contenant un taux de FC de 10-12 % sont susceptibles à la formation de thaumasite (même sous température modérée).

Plus encore, Poppe et De Schutter¹¹⁴ ont signalé que l'incorporation du FC dans le BAP compromet une augmentation de la chaleur d'hydratation, qui peut impliquer la formation de l'ettringite différée dans une température dépassant 65 °C. Par contre, Tragardh et

Bellman¹¹⁵ démontrent que le risque de formation de l'ettringite différée est minimisé en cas d'application de concept de performance équivalente.

Il apparaît alors que l'effet de FC sur les propriétés du BAP n'est pas encore bien maîtrisé dans le cas d'attaque sulfatique externe. L'action des sulfates reste toujours un sujet assez ouvert, notamment dans le cas des BAP à base de filler calcaire où les avis peuvent être contradictoires.

2.6.2.4 Action des Chlorures

Compte tenu de la composition particulière du BAP, son comportement est différent vis-à-vis la pénétration de chlorures est différent de celui d'un BO^{116, 117}. Avec des rapports E/C similaires, certains chercheurs trouvent des performances similaires entre BAP et BO^{106, 118}. D'autres trouvent plus d'avantage pour le BAP: Raghaven et al.¹¹⁹ ont enregistré des valeurs de 1100-1500 coulombs pour l'essai de migration de chlorures dans le BAP, contre 4000 coulombs pour le cas du BO. En revanche, Persson¹²⁰ a trouvé que la migration des chlorures était 60 % supérieure dans le cas des BAP.

2.6.3 Influence de la fumée de silice sur les propriétés des BAP

Contrairement au filler calcaire, l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des BAP est limitée. Néanmoins, il semblerait que son influence sur les propriétés de celui-ci est similaire à celle sur le BO. Pour ce dernier, il y a un consensus sur l'effet positif de la fumée de silice sur ses propriétés mécaniques, ses paramètres de transfert, ainsi que sur la diffusion de chlorures et de sulfates.

Pour les BAP, l'utilisation de la fumée de silice permet d'améliorer les résistances mécaniques^{69, 121} et la résistance à la pénétration des chlorures¹²². Concernant les propriétés à l'état frais, la FS permet d'augmenter la viscosité et la demande en superplastifiant et en eau¹²³. Mais, elle est efficace pour limiter le ressuage et la ségrégation²¹.

2.7 Cas du Béton Compacté au Rouleau de Pavage BCRP

Dans cette partie nous faisons un état de l'art lié à la technologie de BCRP. Ainsi, présentons une définition du matériau et ses caractéristiques distinctives, les méthodes de formulation, ainsi que les effets d'utilisation d'ajouts minéraux tels que: cendres volantes, laitiers et fumé de silice.

2.7.1 Définition

Keifer¹²⁴ définit le BCR comme un béton sec, qui se consolide par l'utilisation d'une vibration externe au moyen d'un rouleau vibrant lourd, ou d'un équipement similaire. C'est un mélange de granulats denses de bonne granulométrie, de liant et d'eau¹²⁵. Il se distingue d'un béton ordinaire par son affaissement nul, son taux élevé de granulats et sa faible quantité de la pâte cimentaire¹²⁶. Il est généralement compacté en deux passes avec un rouleau de 10 tonnes pour avoir une densité humide élevée dépassant 95 %^{127, 128, 129}.

Le BCRP se distingue d'un BCR de masse par plus de liant ($200-350 \text{ Kg/m}^3$) ; un diamètre maximum des granulats de 19 mm ¹³⁰ et une résistance minimal à la compression exigée de $28-41 \text{ MPa}$ ^{131, 132}. Dans le **Tableau 11**, nous présentons les caractéristiques du BCR de masse et de pavage.

Tableau 11 - Caractéristiques des BCR (source : Réf.¹³³)

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
Teneur en liant (kg/m^3)	60-250	200-350
Rapport eau/liant	0,40-0,80	0,30-0,40
Diamètre maximal des granulats (mm)	75	20
Résistance à la compression 28 j (MPa)	15	45
Temps Vebe (s)	10-25	30-60

De plus, le BCR a une surface exposée rigoureuse¹³⁴, et n'est pas soumis aux problèmes de ségrégations ni de ressuage¹³⁵.

2.7.2 BCRP avec cendres volantes CV

Les cendres volantes sont les fines les plus utilisées pour la composition des BCRP, particulièrement celles de la classe F^{132, 136}. En effet, la majorité des travaux de la littérature traite des BCRP à base de Cendres Volantes. Cela peut être dû en premier lieu à l'avantage économique que présente cet ajout dans les pays d'Amérique du Nord. Certains chercheurs rapportent que ce dernier procède les caractères pozzolanique et cimentaire¹³¹.

L'incorporation de CV dans les BCR conduit à une augmentation du temps de prise. Les CV peuvent avoir un rôle de retardateur de prise¹³⁷. Ce qui peut représenter un avantage pour le transport et la mise en place du matériau sur site.

Concernant les propriétés mécaniques, il est établi que les CV améliorent la résistance à la compression de ces matériaux cimentaires. En effet, BOck¹²⁷ trouve de bonnes résistances avec un taux en CV de 25 %. De leur côté Hazaree et al.¹³⁸ signalent un taux de substitution optimum en CV compris entre 25 et 65 %. Par ailleurs, il est à noter que le BCRP possède une résistance similaire ou supérieure à celle d'un béton ordinaire de pavage une résistance similaire ou supérieure à celle d'un béton ordinaire de pavage^{124, 139, 140}.

La consistance sèche du BCR implique une mauvaise distribution de la pâte autour des granulats, et provoque ainsi des pores de compactage. Ce fait influe négativement sur la perméabilité du béton. Selon Banthia et al.¹⁴¹, la perméabilité des BCR à base de cendres volantes est supérieure à celles des BO. D'après Pigeon et Marchand¹⁴², la perméabilité du BCR est dû à l'interconnectivité des pores, et la mauvaise interface pâte/granulats. Quant à l'absorption capillaire, la performance des BCR est similaires à celle des BO¹⁴³. En outre, Mardani-Aghabaglu et al.¹⁴⁴ confirment la faible absorption des BCR en cas de substitution des granulats par les CV. De leur côté, Yerramala et Babu¹⁴⁰ signalent de bonnes propriétés de transfert des BCR (Absorption, perméabilité et diffusion de chlorures).

La propriété la plus abordée en littérature est la résistance des BCR aux cycles de gel/dégel avec la possibilité d'entraînement d'air. Néanmoins, les résultats publiés sont contradictoires. Quelques auteurs rapportent la difficulté de création d'un réseau d'air entraîné dans le béton^{124, 126, 127, 134, 145, 146}. D'autres confirment la possibilité d'entraînement de l'air. Pigeon et Malhotra¹⁴⁷ ont testé des BCR (63 % de CV), ils concluent que l'entraînement de l'air dans un BCR est faisable, mais en appliquant un mode spécifique de malaxage (mélanger une partie de granulats avec la fraction mortier, et par la suite mélanger l'autre partie). Ragan¹⁴⁸ parle de la possibilité d'entraînement d'air sans application de procédures spécifiques.

La résistance du BCR au gel/dégel semble être liée au réseau d'air entraîné. En effet, Pigeon et Serne¹⁴⁹ ont trouvé de bons résultats sur site. Pigeon et Malhotra¹⁴⁷ confirment que le BCR est résistant au gel/dégel. Cependant, Naik et al.¹³⁴ trouvent de faible résistance du BCR saturé vis-à-vis du gel/dégel.

2.7.3 Le BCRP avec la fumée de silice

Comme pour les bétons ordinaires, la fumée de silice permet d'augmenter les résistances mécaniques du béton. Ce fait est largement reconnu, et expliqué par la forte pozzolanité de cet ajout minéral, qui conduit à la création de gel de silice constitué principalement de C-S-H, augmentant la résistance du béton. En effet, quelques chercheurs trouvent des résistances élevées des BCR à base de la fumée de silice^{126, 150, 151, 152, 153}. En outre, la fumée de silice influe positivement sur la perméabilité du béton^{141, 142, 151}. Un autre avantage de son incorporation dans le BCR de pavage est l'amélioration de la résistance à l'abrasion^{146, 153}. De plus, le BCR avec la fumée de silice est plus résistant au gel/dégel qu'avec les cendres volantes¹⁵⁴. Toutefois, il apparaît que la fumée de silice diminue la maniabilité du béton¹⁵⁵. Ceci peut faire diminuer le temps de transport et de mise en place du BCR sur chantier¹⁵⁶.

Ainsi, il semble que l'utilisation de la fumée de silice dans la composition du BCR a plusieurs avantages en termes de résistances mécaniques et de durabilité. Son seul inconvénient c'est qu'elle réduit la maniabilité de ces matériaux. Cette dernière peut être améliorée par l'utilisation d'un adjuvant retardateur de prise, et par l'adoption de systèmes cimentaires ternaires.

2.7.4 Résistance des BCR aux sulfates

Peu de travaux traitent la durabilité du BCR vis-à-vis du milieu sulfatique. Ghafoori et Cai¹⁵⁷ affirment que le BCR à base de cendres volantes sèches de lignites sont résistants aux sulfates. De plus, Ghafoori et Zhang¹⁵⁸ concluent que les BCR à base de ciment résistant aux sulfates ont une meilleure résistance au sulfates. Ce qui est confirmé par Sarsam et al.¹⁵⁹

2.7.5 Résistance du BCR à l'action des Chlorures

Comme le BCR n'est pas ferrailé, le risque de corrosion est négligeable et n'est pas abordée par les chercheurs. Ainsi, les travaux de Yerramala et al.¹⁴⁰ rapportent un faible coefficient de diffusion des chlorures dans les BCR (moins 1000 coulombs). Selon Khayat¹³², l'étude de l'influence des chlorures n'est pas importante dans le cas d'un BCR. Ce pendant, il est connu que le béton en réalité n'est pas exposé à un seul facteur destructeur mais à plusieurs facteurs pouvant se présenter simultanément ou bien alternativement. C'est ce que l'on appelle couplage des phénomènes. Il est possible alors que les chlorures se combinent avec les sulfates, et rendent le mécanisme plus compliqué. En effet, peu de travaux traitent des problèmes de couplage pour les BO¹⁶⁰ et à ce jour, nous n'avons pas rencontré de travaux de couplage dans le cas de BCR.

Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sélectif lié à l'ensemble des axes abordé dans la thèse. Nous avons mis l'accent en particulier sur les propriétés des bétons à base de le filler calcaire et sur l'influence de la fumée de silice sur les propriétés des bétons. De plus, nous, nous sommes focalisés sur le cas des BAP et des BCRP. D'où nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

L'influence du filler sur les propriétés des bétons n'est pas similaire dans les cas se substitution partielle, et comme ajout minéral de la fabrication du ciment au calcaire. Il semble que les ciments aux filler calcaire sont adaptés, lors de la phase de fabrication, afin

qu'ils présentent de propriétés égales au CEM I (en termes de résistances mécaniques et de durabilité).

L'incorporation de la fumée de silice dans les systèmes cimentaires influe de la même manière sur les caractéristiques de différents bétons. Elle augmente les résistances mécaniques, améliore la durabilité et les paramètres de transfert. Par contre, les travaux antérieurs rapportent sa grande demande en eau et en plastifiant, la diminution de la maniabilité du béton ainsi que son retrait à jeune âge. Ce qui est défavorable en cas des BAP et des BCR. C'est pour ça qu'il est préférable d'associer d'autres ajouts avec la fumée de silice dans les systèmes ternaires, ce qui est le cas de notre étude.

C'est pour ces raisons, qu'on adopte le choix des paramètres de cette étude. Ainsi, nous analysons les améliorations apportées par l'incorporation de FC et de la FS aux différents mélanges à base de ciment au calcaire.

Chapitre 3

Programme expérimental

Sommaire

Dans ce chapitre, sont présentés les détails de la campagne expérimentale menée sur les bétons et mortiers, les matériaux utilisés, la méthodologie appliquée pour la formulation et la cure des deux matériaux cimentaires ainsi que les procédures expérimentales des essais.

3.1 Les mélanges bétons

3.1.1 Matériaux

Nous avons utilisé un sable siliceux local de classe granulaire 0/3, avec un module de finesse de 3.22. Deux fractions de gravier de granit concassé ont été incorporés 3/8 et 8/20. Le diamètre maximum est $D_{\max}=20\text{mm}$.

Le ciment utilisé est un ciment composé au calcaire CEMII/B-L (CFC). Ce ciment a été fabriqué par Lafarge Algérie. Deux ajouts minéraux, le filler calcaire (FC) et la fumée de silice (FS) ont été substitués partiellement au ciment. Le filler calcaire a une granulométrie de 0/0.4 mm. La fumée de silice utilisée est une Condensil S95 DP de la société Sika.

La granulométrie des granulats et du filler calcaire est présentée dans la [Figure 29](#). Les caractéristiques physiques et chimiques des fines sont reportées dans le [Tableau 12](#).

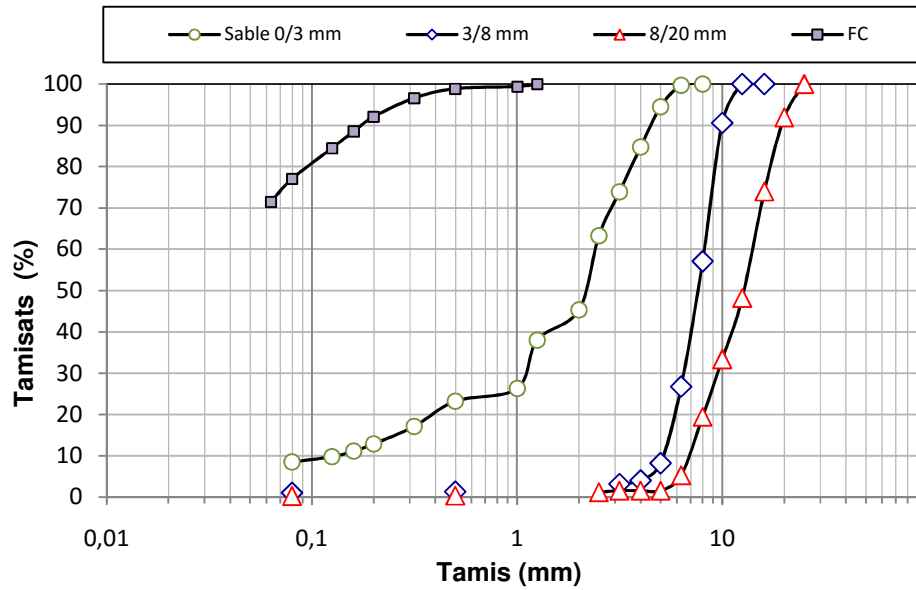


Figure 29 - Distribution granulométrique des granulats et du filler calcaire.

Tableau 12 - Caractéristiques des fines utilisées.

Composition chimique			
	CFC*	FC	FS
Si O ₂	18,52	0,58	95
Fe O ₃	3,05	0,02	-
Al ₂ O ₃	4,65	0,06	-
Ca O	62,2	55,85	1
Mg O	2,01	0,06	-
SO ₃	2,7	0,07	2
K ₂ O	0,63	0,25	-
Na ₂ O	0,12	0,31	0,6
LI **	-	43,58	-
Cl ⁻	0,24	-	0,1
Caractéristiques physiques			
SG***	3,15	2,7	2,24
Blaine (m2/Kg)	410	450	25000
* Composition minéralogique (%) : C ₃ S=63; C ₂ S=17; C ₃ A=8; C ₄ AF=12			
** Perte au feu		*** densité	

En plus, nous avons utilisé un superplastifiant de nouvelle génération à base de polycarboxylates modifiées (Cimfluid Allegro 3010). Il a une forme liquide et une couleur marron. Ses caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 13](#).

Tableau 13 - Caractéristiques de l'adjuvant utilisé.

Densité	pH	Cl -	Na ₂ O Eq.	Extrait Sec
1,08	4,8	0,1	0,2	32%

3.1.2 Formulation, mise en place et cure

Pour les bétons ordinaires (O), quatre formules ont été mise en place. Elles sont dénommées comme O0.8, O0.5, O0.3F et O0.3S. Les bétons ayant un rapport E/C de 0.8 et 0.5 ont été formulé par la méthode ACI 211-1¹⁶¹, les autres bétons avec un rapport E/C=0.3 (béton haute performances) ont été formulé selon la méthode de l'Université de Sherbrooke⁸⁰.

Concernant les bétons autoplaçants (A), six bétons ont été formulé en appliquant la méthode proposée par Kheder et Al Jadiri¹⁶² (A0.8F, A0.8S, A0.5F, A0.5S A0.3F, A0.3S). Il est important de noter que cette méthode a été conçue pour la composition des BAP à base de filler calcaire. Ainsi, nous avons ajusté la méthode pour les formules contenant de la fumée de silice.

Pour les bétons compactés au rouleau routiers (R), six formules ont été composés. Les bétons sont dénommés R0.8F, R0.8S, R0.5F, R0.5S R0.3F et R0.3S. Nous avons utilisé la méthode de formulation publiée par Gagné¹⁶³. Il est à noter que ce type de béton est différent de celui d'un BCR utilisé pour barrages. Il a un faible D_{max} (20mm) et contient plus de liant¹³¹.

Les formules de béton sont ajustées par des gâchées d'optimisation afin d'obtenir la fluidité souhaitée. Nous avons visé un affaissement de 70-90 mm pour les bétons ordinaires (béton plastique). Pour les bétons autoplaçants, nous avons ciblé une marge d'étalement de 660 - 750

mm (La classe SF2 selon les recommandations EFNARC¹⁶⁴). Dans le **Tableau 14** nous présentons les compositions des bétons étudiés.

Tableau 14 - Composition des bétons étudiés.

	G (Kg/m ³)	S (Kg/m ³)	C (Kg/m ³)	E (l)	FC (Kg/m ³)	FS (Kg/m ³)	Ajout (%)	SUP	E/C	L_{EO}	E/L_{EO}
O0,8	1239	1068	203	175	0	0		0	0,86	214	0,82
O0,5	1239	975	325	180	0	0		0	0,55	325	0,55
O0,3F	1068	704	370	114	120	0	24,49	16	0,31	400	0,29
O0,3S	1068	688	430	135	0	60	12,24	18	0,31	550	0,25
A0,8F	645	998	220	185	175	0	44,30	4,7	0,84	263,75	0,70
A0,8S	735	1141	208	180	0	15	6,73	6	0,87	223	0,81
A0,5F	644	995	335	180	155	0	31,63	6,5	0,54	373,75	0,48
A0,5S	692	1080	330	185	0	25	7,04	7	0,56	355	0,52
A0,3F	644	1000	510	160	80	0	13,56	17	0,31	530	0,30
A0,3S	644	1000	520	170	0	52	9,09	20	0,33	624	0,27
R0,8F	960	1173	110	90	90	0	45,00	0,8	0,82	132,5	0,68
R0,8S	981,6	1200	133	106	0	8	5,67	0,9	0,80	141	0,75
R0,5F	942,5	1152	174	97	95	0	35,32	1	0,56	197,75	0,49
R0,5S	1192	947	190	108	0	15	7,32	1,2	0,57	205	0,53
R0,3F	1134	928	278	95	60	0	17,75	1,4	0,34	293	0,32
R0,3S	1158	947,5	297	114	0	33	10,00	1,6	0,38	363	0,31

Les bétons ordinaires ont été mis en place par vibration selon les recommandations de la norme **ASTM C39¹⁶⁵**. Les bétons autoplaçants ont été placés dans les moules sans vibration. Par contre, vu leur très faible consistance, les bétons compactés au rouleau ont été placés avec une vibration puissante. Pour cela nous avons utilisé la méthode Proctor modifiée¹⁶⁶. Dans cette méthode, le béton est placé dans son moule en 5 couches. Chaque couche subit 25 coups d'une charge de 44.5 N en tombant d'une hauteur de 475 mm. On détermine par la suite la teneur en eau qui correspond au poids unitaire sec optimum.

Concernant le béton, des éprouvettes de dimensions 160×320 mm ont été utilisées pour l'essai de compression; les éprouvettes 70×70×300 mm ont servi pour le test d'immersion en solutions chimiques. En plus, des cubes de 100 mm ont été utilisés pour les tests de chlorures et d'absorption capillaire à l'eau.

Les différents échantillons de béton ont été démoulés après l'âge de 24 h, et immergés immédiatement dans l'eau et conservés dans les conditions de laboratoire jusqu'à les échéances d'essais (Période de cure humide).

3.1.3 Procédures expérimentales

L'essai de résistance à la compression a été fait sur des éprouvettes de 160×320 mm selon les recommandations de la norme [ASTM C39](#). Les échéances de l'essai sont 3, 14, 28 et 91 jours.

Le test d'absorption capillaire à l'eau a été effectué sur des échantillons cubiques en béton de 100 mm (coupés dans des éprouvettes de 100×100×500 mm). Nous avons suivi les procédures du test appliqué par Gonen et *al.*¹⁶⁷ et Tasdemir¹⁶⁸. Premièrement, les éprouvettes sont laissées une semaine dans les conditions de laboratoire afin que leur humidité soit stabilisée. Ensuite, elles sont passées à l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Ensuite, les échantillons cubiques sont placés sur des petites boules d'acier inoxydable dans un récipient rempli jusqu'à 1 cm de leur hauteur d'eau (comme présenté dans la [Figure 30](#)). Pour y avoir un flux unidirectionnel de l'eau, on a recouvert les parois latérales des échantillons par l'aluminium adhésif (ou bien la paraffine). on mesure la masse de chaque échantillon après 0,5,10,20,30,60,180,360, et 1440 minutes. Le coefficient d'absorption capillaire (k) est obtenu par la formule suivante:

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (3.1)$$

Avec: k = Coefficient d'absorption capillaire (cm/s^{1/2}); Q = Le volume absorbé de l'eau (cm³); A = La section de l'éprouvette en contact avec l'eau (cm²); t = le temps de mesure (s).

Le coefficient k se calcule graphiquement en traçant Q/A en fonction de \sqrt{t} .

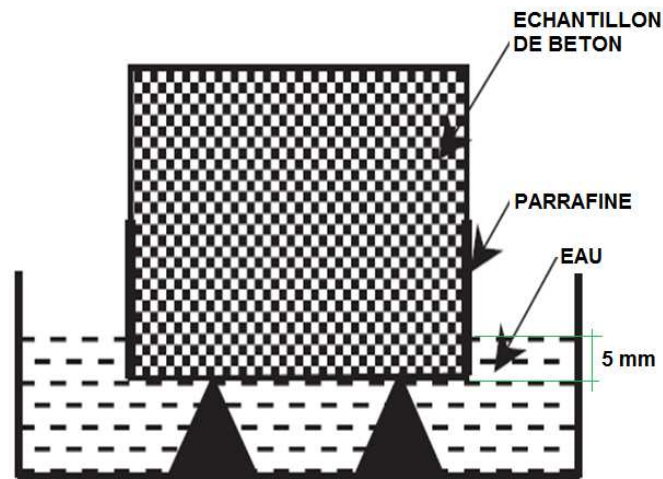


Figure 30 - Procédure du test d'absorption capillaire.

L'essai de résistance à l'attaque chimique de sulfates et sulfates/chlorures est inspiré des travaux de Zhang et *al.*¹⁶⁰. Cependant, on a appliqué un cycle d'immersion différent. Bien que Zhang ait immergé les échantillons dans une solution mélangée de sulfates et chlorures, nous avons immergé alternativement nos échantillons dans les deux solutions (sulfates et chlorures). Donc, on a adopté deux modes d'immersion: Le premier mode dans une solution de sulfates de sodium (5 % Na_2SO_4), et dans le deuxième les échantillons sont successivement immergés dans les deux solutions sulfates et chlorures (5 % NaCl). En plus, on a appliqué un cycle d'immersion différent: 3 jours immersion dans la solution chimique agressive, 30 minutes de séchage, mesure de changement de masse, 20 minutes dans l'étuve à 50 °C et 10 h de refroidissement à température ambiante. Pour le deuxième mode, on a fait un cycle sulfate+un cycle chlorures. Après chaque cycle, le changement de masse a été enregistré.

Il est à noter que les échantillons destinés pour ce test sont de dimensions 70×70×300 mm. Cependant, les échantillons dédiés aux mesures de profondeur de pénétration de chlorures font 100 mm de coté. La [Figure 31](#) montre les éprouvettes immergées dans les solutions agressives.



Figure 31 - Immersion des échantillons de bétons dans les solutions de sulfates et sulfates/chlorures.

Pour la mesure de la profondeur de pénétration des chlorures (spécimens de mode 2), les recommandations de la norme nordique NT BUILD 492²⁰ ont été adoptées. Ainsi, une

solution de 0.1 M de nitrates d'argent a été directement répandue sur les demi-éprouvettes fondues. La profondeur de la surface ayant une couleur argentée est ensuite mesurée.

Les spécimens sélectionnés pour les observations au MEB sont des fractures des échantillons immergé dans la solution sulfates/chlorures (avec un rapport E/C=0.8). On a métallisé les spécimens à l'or dans un évaporateur (on fait un passage de 30s à deux reprises afin que la couche de l'or ne soit pas assez épaisse (Figure 32). En suite, on a introduit nos spécimens dans l'appareil MEB (Figure 33). Par ces observations, des captures de la morphologie de la surface des échantillons à l'échelle micron sont faits. L'objectif ici est de détecter les hydrates de ciment ou bien la présence de nouveaux produits résultant de l'attaque chimique.



Figure 32 - Échantillons métallisés à l'or pour les observations microstructurelles de la morphologie au MEB.

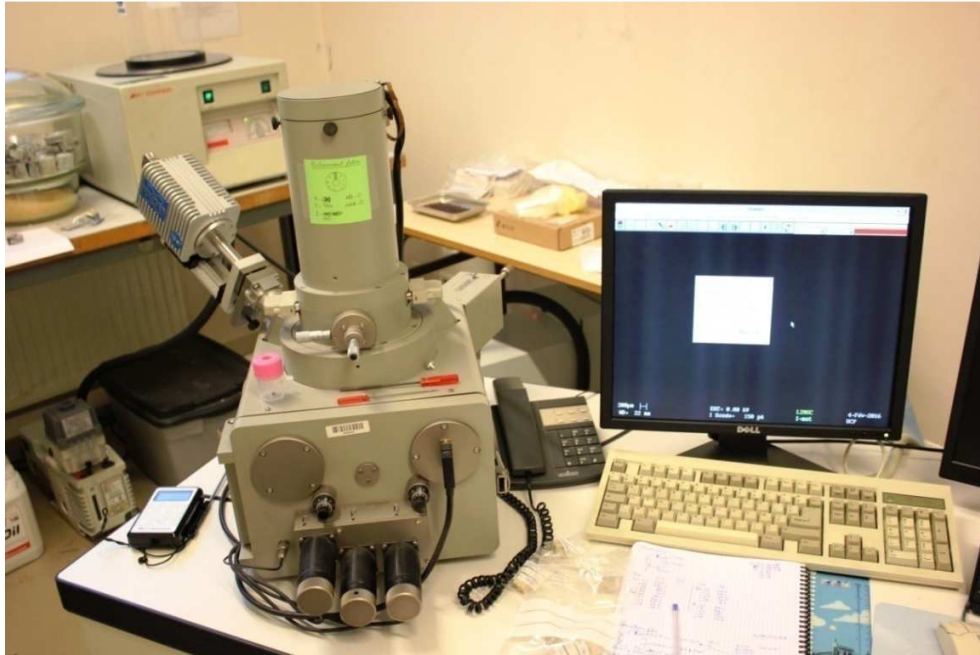


Figure 33 - Appareil MEB du laboratoire L2MGC (Université de Cergy-Pontoise).

3.2 Les mélanges du mortier

3.2.1 Matériaux

Nous avons utilisé un sable silico-calcaire de classe granulaire 0/4 mm, avec un module de finesse de 2.82.

Deux ciments sont utilisés: Le premier est un ciment courant CEM I, utilisé dans la composition du mortier de référence. Le deuxième ciment est un ciment au calcaire CEM II/B-M(LL-S) 42.5 N de Lafarge. Il a été utilisé pour la majorité des mélanges de mortier. Ces deux ciments satisfont les exigences de la norme européenne EN 197-1¹⁶⁹. De plus deux ajouts minéraux, le filler calcaire (FC) et la fumée de silice (FS) ont été substitués partiellement au ciment. Le filler calcaire a une granulométrie de 0/0.4 mm. La fumée de silice utilisée est le Condensil S95 DP de la société Sika.

La granulométrie du sable et de filler calcaire est présentée sur la [Figure 34](#). Les caractéristiques physiques et chimiques des fines sont reportées dans le [Tableau 15](#).

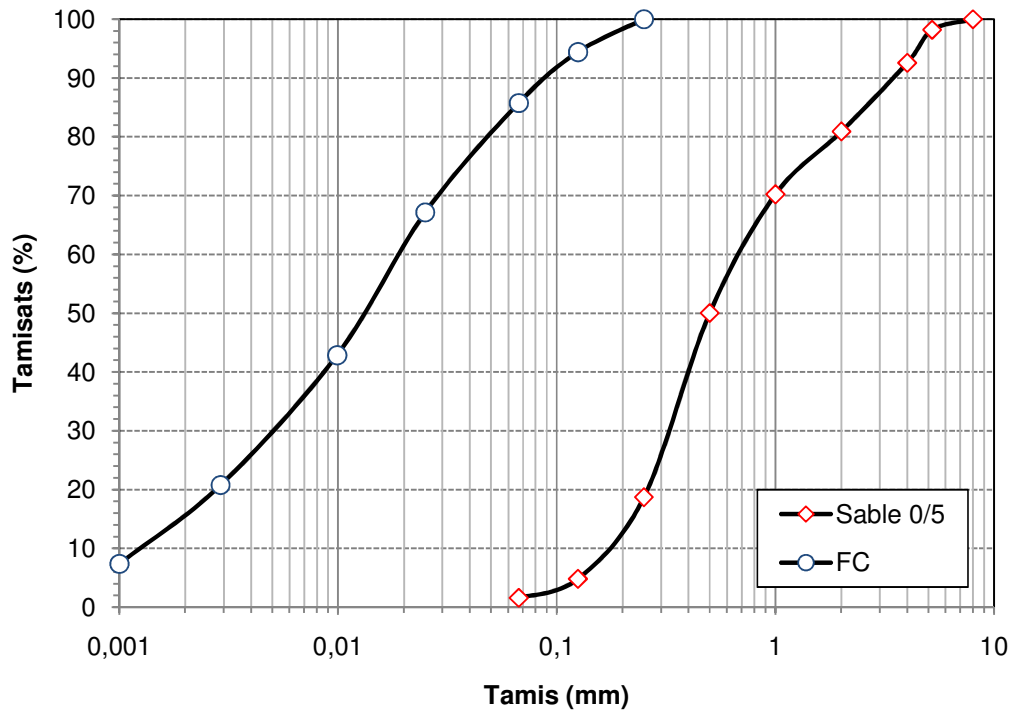


Figure 34 - Granulométrie du sable et de filler calcaire.

Tableau 15 - Caractéristiques chimiques et physiques des fines pour mortiers.

Composition chimique				
	<i>CEMI</i>	<i>CFC clinker (75 %)</i>	<i>FC</i>	<i>FS</i>
Si O ₂	20.6	21.54	-	95
Fe O ₃	2.4	2.62	-	-
Al ₂ O ₃	4.5	4.91	-	-
Ca O	63.4	66.77	96.3	1
Mg O	1.9	-		-
SO ₃	3.2	2.9	0.003	2
K ₂ O	0.76	-	-	-
Na ₂ O	0.11	-	-	0.6
LI **	0.024	0.071	-	-
Cl ⁻	0.04	0.03	0.002	0.1
Caractéristiques physiques				
SG ***	3.16	3.1	2.7	2.24
Blaine (m ² /Kg)	425	-	435	25000
* Composition minéralogique (%) :				
CEM I: C ₃ S=68;C ₂ S=10; C ₃ A=8; C ₄ AF=8				
CFC : C ₃ S=66.7;C ₂ S=11.6; C ₃ A=8.6; C ₄ AF=8				
** Perte au feu *** densité				
Filler calcaire dans CFC (17%)		Laitier dans CFC (8%)		
CaCO ₃ (%) = 90.8		(CaO+MgO)/SiO ₂ > 1		
		CaO+MgO+SiO ₂ > 66		
		Vitreous slag (%) > 66		

En plus, nous avons utilisé un superplastifiant de nouvelle génération à base de polycarboxylates modifiées (Cimfluid Allegro 3010). Il a une forme liquide et une couleur marron. Ces caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 16](#).

Tableau 16 - Caractéristiques de l'adjuvant utilisé.

Densité	pH	Cl -	Na ₂ O Eq.	Extrait Sec
1,08	4,8	0,1	0,2	32%

3.2.2 Formulation et cure

Trois types de mortiers ont été formulés. Ainsi, ces mortiers ont été extraits des bétons correspondants cités dans la partie précédente. Le gravier des mélanges de béton a été remplacé par l'équivalent en sable et ciment. Comme pour bétons, les variables d'étude dans le cas de mortiers sont le rapport initial E/C et le type de mortier.

Ainsi, 5 mortiers ordinaires (MO); Six mortiers autoplaçants (MA), et six mortiers compactés au rouleau (MR) ont été mis en place. Nous signalons que seulement le MO0.5Ref est à base de CEMI (comme référence). Les rapports initiaux de E/C sont 0.8, 0.5 et 0.3, les rapports finaux sont obtenus après optimisation des mortiers (en ajoutant de l'eau ou bien le superplastifiant). L'ensemble des formulations de ces mortiers est présenté dans le [Tableau 17](#).

Tableau 17 - Composition d'un m³ de mortiers.

	Sable (Kg)	Ciment (Kg)	S/C	FC (Kg)	FS (Kg)	Addition (%)	Eau (l)	Sup. (l)	Eeff/C	Leq=C+kA	E/Leq
MO0,8	1577	315	5,01				251		0,80	315	0,80
MO0,5ref	1440	480	3				275		0,57	480	0,57
MO0,5	1440	480	3				260		0,54	480	0,54
MO0,3F	1160	605	1,92	197		25	180	10	0,30	654,25	0,28
MO0,3S	1133	740	1,53		82	10	220	18	0,30	904	0,24
MA0,8F	1300	270	4,81	260		49	230	7	0,85	335	0,69
MA0,8S	1560	290	5,38		25	7,9	240	9	0,83	315	0,76
MA0,5L	1302	442	2,95	208		32	225	9	0,51	494	0,46
MA0,5S	1448	453	3,20		34	7	260	9,5	0,57	487	0,53
MA0,3F	1309	694	1,89	175		20	210	20	0,30	737,75	0,28
MA0,3S	1309	694	1,89		69	9,0	215	24	0,31	832	0,26
MR0,8F	1810	165	10,97	154		48,28	140	1	0,85	203,5	0,69
MR0,8S	1872	210	8,91		7,8	3,6	170	1,1	0,81	217,8	0,78
MR0,5L	1760	267	6,59	130		33	150	1,2	0,56	299,5	0,50
MR0,5S	1825	300	6,08		25	8	175	1,3	0,58	325	0,54
MR0,3F	1718	460	3,73	100		18	160	1,51	0,35	485	0,33
MR0,3S	1773	490	3,62		51	9	177	2,29	0,36	541	0,33

Les mortiers ordinaires ayant une consistance plastique ont été fabriqués et vibrés selon la norme EN 196-1¹⁷⁰. Cependant, nous avons ajouté un temps additionnel (4 min) de malaxage pour les mortiers avec substitution en FC, suivi d'une minute de malaxage à haute vitesse pour éviter la fausse prise^{23,74}. En outre, les mortiers autoplacants sont ajustés pour maintenir une valeur d'étalement dans la marge de 240-260 mm¹⁷¹, et placés dans les moules sans vibration. Concernant les mortiers compactés, ils sont préparés et vibrés en appliquant la norme ASTM D 1557 décrit dans la partie béton. Ils ont alors un affaissement nul.

Les éprouvettes de dimensions 40×40×160 mm sont fabriquées dont les quelles, ensuite, sciées des cubes de 40×40×40 mm pour le test de compression et des échantillons de 40×40×50 mm pour le test d'absorption à l'eau. Par ailleurs, des éprouvettes cylindriques de 52×101 mm pour le test de migration rapide des chlorures, des éprouvettes prismatiques de 40×40×160 mm munies de goujons métalliques pour les mesures du changement de longueur (Échantillons immergés dans les solutions agressives) sont préparées.

3.2.3 Procédures expérimentales

L'essai de résistance à la compression a été réalisé sur des éprouvettes de 40×40×160 mm (Figure 35) selon la norme EN 196-1 à des échéances de mesures de 3,7,28,56 et 90 jours.

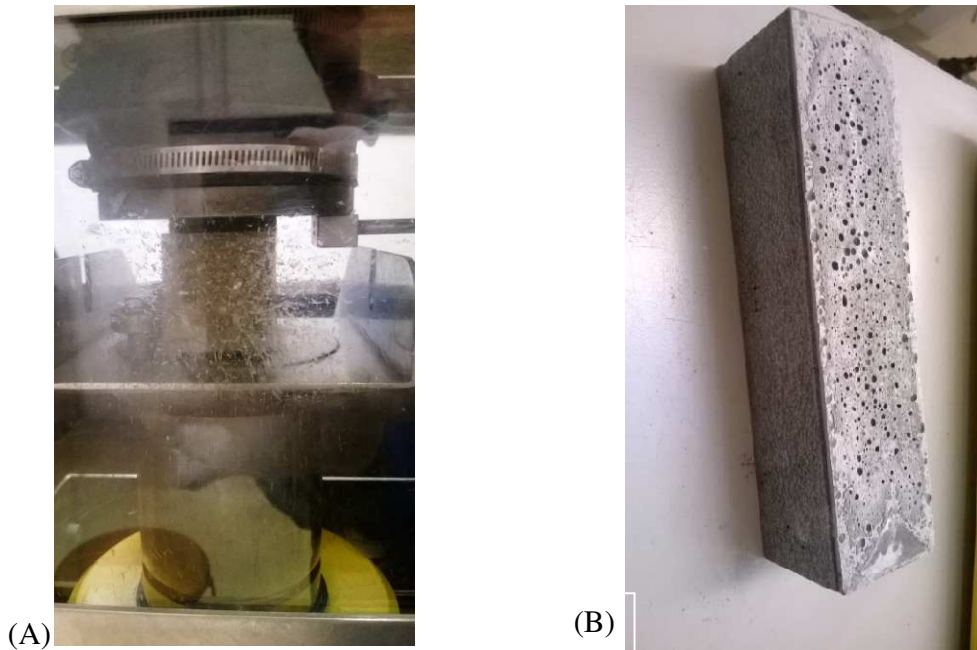


Figure 35 - Appareil et éprouvette de mortier pour essai de compression simple.

Pour l'essai d'absorption capillaire à l'eau, les mêmes procédures décrits pour les bétons ont été suivies sur des éprouvettes de dimensions 40×40×50 mm (Voir [Figure 36](#)).



Figure 36 - Essais d'absorption capillaire pour éprouvettes de mortier.

Pour la caractérisation de l'influence des sulfates et/ou chlorures, nous avons mesuré la variation de masse, la variation de longueur et les changements microstructuraux sur les spécimens dégradés après immersion.

La méthodologie d'immersion est la même que celle appliquée sur bétons. Les éprouvettes utilisées sont de dimensions différentes: 40×40×160 mm avec goujons métalliques pour les mesures de la variation de longueur (par l'appareil présenté dans la [Figure 37](#)); et 40×40×40 mm pour mesurer les variations de masse.



Figure 37 - Appareil de mesure de changement de longueur des échantillons de mortier.

De plus, nous avons immergé de petits échantillons cubiques de 10 mm de côté pour les observations visuelles et microstructurales. La [Figure 38](#) montre l'immersion des échantillons de mortier dans les solutions sulfates/chlorures.



Figure 38 - Éprouvettes de mortier immergées dans les solutions chimiques.

Concernant l'observation de la microstructure au MEB, la méthodologie appliquée pour la préparation des échantillons est la même que celle précédemment décrite pour béton.

Pour la caractérisation de l'hydratation au jeune âge, nous avons effectué l'essai de calorimétrie semi-adiabatique selon la norme [EN 196-9¹⁹](#). Cette méthode consiste à mesurer le dégagement de la chaleur durant 7 jours d'hydratation du ciment. Des bouteilles de Lagavant contenant les boîtes remplies en mortier ont été utilisées. L'essai est effectué à une température de $20^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ et à une humidité relative de $50 \% \pm 5\%$. De ce fait, les

bouteilles de Lagavant ont été conservées dans une chambre climatisée. Le développement de la température est défini comme la différence entre la température du mortier testé et celle d'un mortier de référence (âgé de plus de trois mois). Selon la norme EN 196-9, la chaleur d'hydratation égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et la chaleur dispersée dans l'environnement. Dans un instant t , la chaleur d'hydratation Q mesurée par gramme de liant est obtenue par la formule suivante:

$$Q = \frac{c}{Mc} \Delta\theta + \frac{1}{Mc} \int_0^1 \alpha \Delta\theta dt \quad (3.2)$$

Avec: C = la capacité thermique totale de la bouteille de Lagavant ($J/^\circ C$); Mc = la masse du ciment ou liant (g); $\Delta\theta$ = la différence de température entre le mortier et l'environnement ambiant ($^\circ C$); α = le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre ($J/h \ ^\circ C$).

Le flux de chaleur se calcule en appliquant la formule suivante:

$$R = \frac{(Q_{i-1} - Q_i)}{(t_{i-1} - t_i)} \quad (3.3)$$



Figure 39 - Calorimètre (L2MGC: Université de Cergy-Pontoise).

Pour l'analyse thermogravimétrique ATG, un spécimen en poudre pour chaque échantillon de mortier est préparé. Dans le four de l'appareil (STA 44 F Jupiter - [Figure 40](#)) 100 mg du spécimen, on chauffe la poudre de 20°C à 1000 °C avec un taux de 20°C/min. La poudre est mise dans un creuset (voir la photo à droite de la [Figure 40](#)) , et l'autre creuset reste vide est sert de référence. Cette technique d'analyse nous permet: d'obtenir le développement de la quantité de la portlandite, la perte de masse due à la décarbonatation et la détection du pic de carboaluminates (dans la courbe DTG à 180 °C).



Figure 40 - Appareil d'analyse thermogravimétrique du Laboratoire L2MGC de l'Université de Cergy-Pontoise.

La quantité de la portlandite et la perte de masse de décarbonatation sont mesurées à 3,28 et 90 jours. Les calculs de ces caractéristiques sont faits suivant les travaux d'El Jazairi et Illson¹⁷² comme suit:

$$p (\%) = \frac{W_{550} - W_{430}}{W_{1000}} \times 100 \quad (3.4)$$

$$C (\%) = \frac{W_{1000} - W_{550}}{W_{1000}} \times 100 \quad (3.5)$$

$$P (\%) = 4.11.p + 1.68.C \quad (3.6)$$

Avec: p = perte de masse dans la courbe TG à 430-550 °C; C = perte de masse à 550-1000; P = la quantité de la portlandite dans l'échantillon de mortier (%). (Voir exemple de perte de masse pour le mortier de référence dans la [Figure 41](#)).

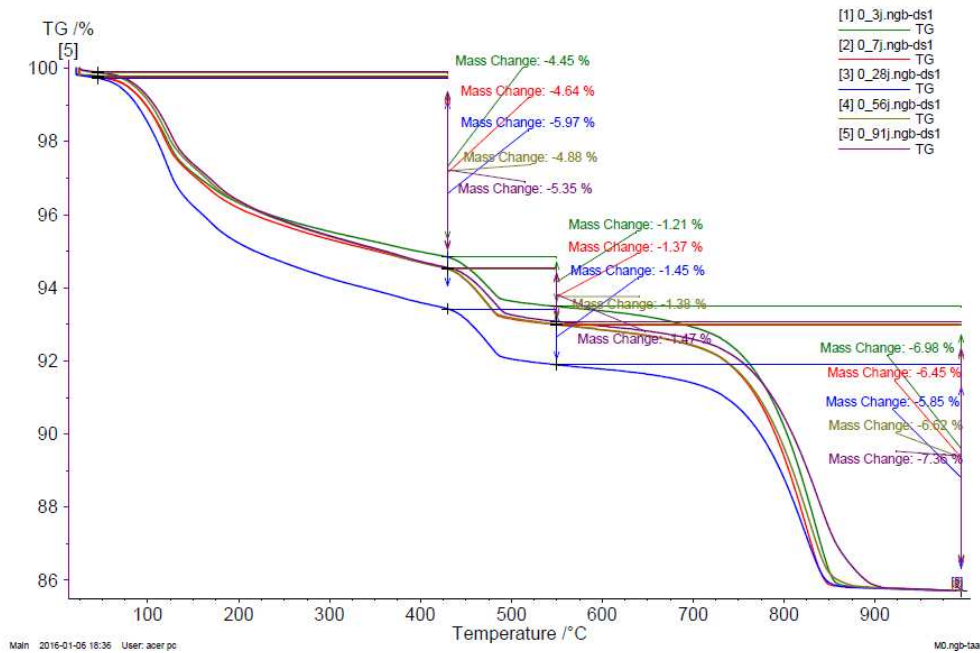


Figure 41 - Exemple de perte de masse obtenu par analyse thermogravimétrique pour M0.5ref.

Concernant le calcul du degré d'hydratation du liant, plusieurs formules existent dans la littérature^{173, 174, 175, 176}. Cependant, tenant compte de la complexité de nos combinaisons cimentaires, nous nous sommes inspiré des travaux de Seki et *al.*¹⁷⁷, nous avons ajusté leurs formules afin de prendre en considération la résistance à la compression du mortier et le rapport E/L au lieu de E/C.

$$\alpha_i = 1.8 \cdot \left(\frac{\delta_i + 281.2}{431.97} \right) \cdot \frac{E}{Leq} \quad (3.7)$$

Avec: α_i = le degré d'hydratation (% en masse du liant); δi = la résistance à la compression du mortier dans les différentes échéances de mesure (MPa); $\frac{E}{Leq}$ = Le rapport eau sur liant équivalent.

Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté les démarches expérimentales appliquées dans notre étude. En effet, dans la partie traitant les bétons, nous avons décrit les matériaux utilisés, les compositions des bétons et les essais adoptés (résistance à la compression, absorption capillaire, profondeur de pénétration de chlorures, variation de masse dans les solutions sulfates et sulfates/chlorures, et observations de la microstructure au MEB des échantillons de bétons immergés dans la solution sulfates/chlorures). De plus, pour les échantillons de mortier, nous avons réalisé des essais complémentaires (la calorimétrie, ATD/ATG, le degré d'hydratation, et les variations de longueurs).

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats obtenus dans les deux parties de notre travail (bétons et mortiers).

Chapitre 4

Résultats et Discussions

Sommaire

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus sur bétons et mortiers. De plus, une discussion des tendances trouvées est fournie pour chaque test, est un positionnement par rapport aux travaux de la littérature est donné.

4.1 Partie 1: Bétons

4.1.1 Résistance à la compression

Sur la [Figure 42](#) nous présentons les résultats de l'essai de résistance mécanique à la compression à 3, 14, 28 et 90 jours.

Pour les bétons ordinaires (O), il est clair que la résistance à la compression augmente avec la diminution du rapport E/C à toutes les échéances de mesure. Cependant, avec $E/C = 0.3$, les bétons à base de FC que ceux à base de la FS. Ce fait est inversé pour les échéances de 28 et 90 jours. En effet, en présence du FC, le développement rapide de la résistance à la compression au jeune âge est attribué au rôle du filler. La présence des carbonates fait accélérer l'hydratation, et fournit plus de sites de nucléation permettant le développement des C-S-H¹⁷⁸. D'autre part, l'influence observée de la fumée de silice est généralement plus significative aux âges avancés d'hydratation^{88, 179}.

Pour les bétons autoplaçants (A), la résistance à la compression augmente avec la diminution du rapport E/C. De plus, tous les BAP à base de fumée de silice et à toutes les échéances montrent de meilleures résistances que ceux à base de filler calcaire.

Ainsi, pour les BAP, il semblait que l'influence du rapport E/C est plus significative que l'influence de type d'ajout (FS ou FC). Cependant, la fumée de silice conduit généralement à de bonnes résistances mécaniques.

De même pour les BCRP, la diminution du rapport E/C engendre un accroissement de la résistance à la compression. Néanmoins, les résistances des BCRP à base de FS sont légèrement inférieures à celles des BCRP à base de FC¹⁵⁵.

En comparant les trois types de béton, nous remarquons que les BAP ont des résistances similaires aux bétons ordinaires¹⁸⁰. Dans le cas des bétons ordinaires, la résistance mécanique est attribuée beaucoup plus au squelette granulaire (environ 70 %). Pour le cas des BAP, la résistance améliorée est grâce au volume élevé en liant. Par contre, Les BCRP ont de faible résistance surtout aux jeunes âges. Ceci est du à la présence des pores de compactage (mélange sec impliquant une faible solubilité du liant).

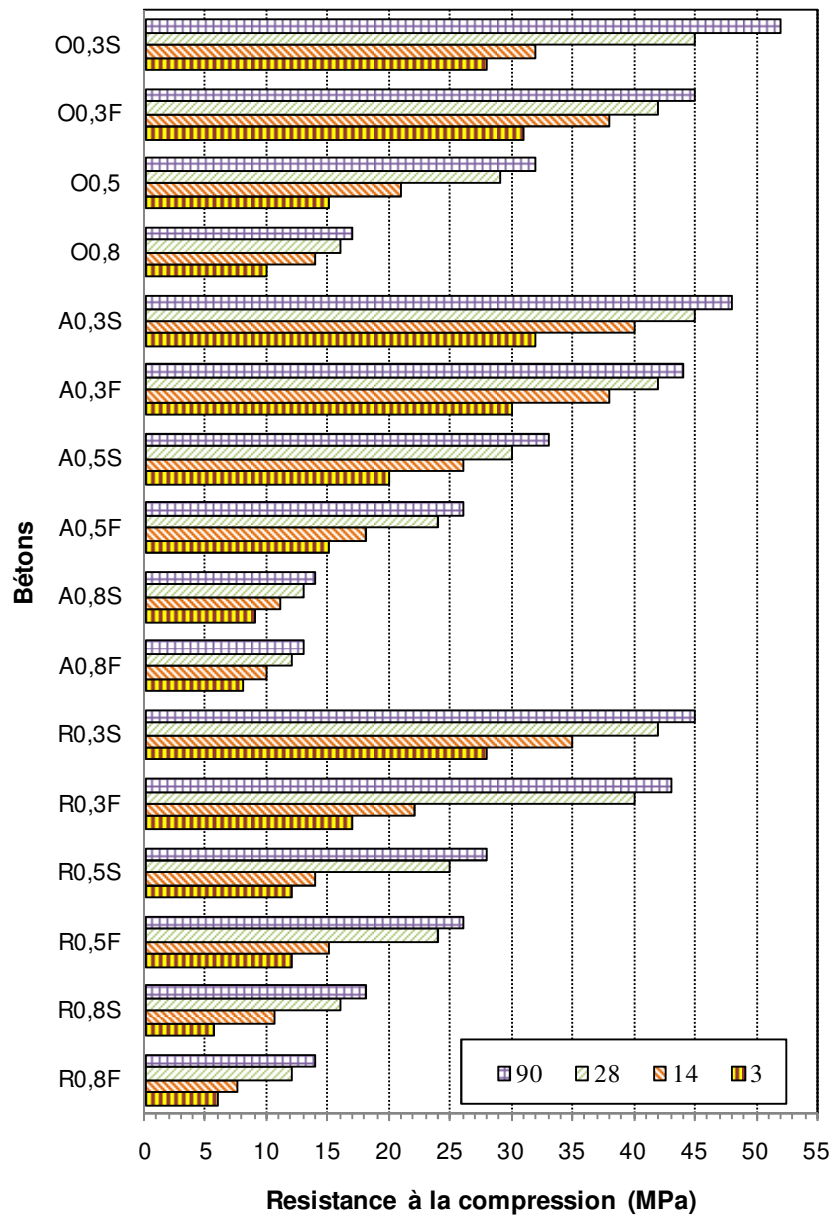


Figure 42 - Résistance à la compression des échantillons de béton.

4.1.2 Absorption capillaire

Le [Tableau 18](#) présente les valeurs de l'absorption capillaire à l'eau pour les trois types de bétons.

Tableau 18 - Coefficient d'absorption capillaire à l'eau des bétons étudiés.

Bétons	Coeff d'Absorption ($\times 10^{-3}$ cm/s $^{1/2}$)
O0,8	2,5
O0,5	2,1
O0,3F	0,9
O0,3S	0,7
A0,8F	1,7
A0,8S	1,3
A0,5F	1,5
A0,5S	1,2
A0,3F	1,1
A0,3S	0,7
R0,8F	4,01
R0,8S	3,06
R0,5F	3,23
R0,5S	2,48
R0,3F	2,07
R0,3S	1,53

D'une manière générale, nous constatons une augmentation de l'absorption capillaire à l'eau avec l'augmentation du rapport E/C. Ce fait est classiquement connu dans le cas du béton. En effet, l'augmentation du rapport E/C conduit à une augmentation de la porosité (surtout capillaire). Par contre un béton plus compact, avec un rapport E/C faible, présente un réseau poreux faible et moins interconnecté.

Par ailleurs, quelque soit le rapport E/C, on peut observer l'ordre des coefficients d'absorption capillaire suivant : BCR > BO > BAP. Pour les BCR, comme connu, les grandes valeurs de l'absorption enregistrées sont attribuées à l'aspect physique de ce type de béton. Ce dernier est caractérisé par une forte porosité ouverte due aux pores de compactage. Par contre, l'absorption faible des BAP montrée par d'autres chercheurs¹¹⁷, est expliquée par le grand volume de la pâte vis-à-vis du volume des granulats. En plus, avec l'utilisation des ajouts minéraux, la pâte devient plus compacte et moins poreuse. Le faible taux de la fraction des granulats en outre implique moins de pores à l'interface pâte/granulats.

Concernant l'influence du type d'ajout sur l'étendue de l'absorption capillaire des bétons, on remarque que les valeurs des mélanges à base de filler calcaire sont supérieures à celles des mélanges à base de fumée de silice. L'aspect bénéfique de l'incorporation de la fumée de silice est du à l'action pozzolanique (traduit par la formation d'un gel de silice qui colmate les pores). En particulier dans le cas des BAP, les faibles valeurs d'absorption sont justifiées par l'homogénéité des BAP et par la bonne adhérence au niveau de l'interface pâte/granulats¹⁸¹.

4.1.3 Changement de masse dans la solution sulfates

La Figure 43 montre les résultats enregistrés de la variation de masse des échantillons de béton. On rappelle que cette variation est due à l'action des sulfates présents dans la solution de saturation ($\text{Na}_2 \text{SO}_4$).

Il est à noter que les bétons compactés subissent plus de variation de masse que les bétons ordinaires et les bétons autolpaçants. Comme discuté dans la partie précédente, il semblerait que le réseau poreux ouvert des BCR cause un mouvement rapide des liquides et des agents agressifs de l'extérieur vers l'intérieur du béton¹⁸².

Pour les bétons ordinaires, la plus grande augmentation de masse est celle du mélange O0.8 (2.7%); suivit par O0.5 (1.3%), O0.3S (0.5%) et O0.3F (0.25%). Ces résultats montrent que le rapport E/C est le paramètre prédominant dans le cas des bétons ordinaires au regard de l'attaque sulfatique externe¹⁶⁰.

Pour les BAP, l'ordre de variation de masse est le suivant: A0.8F > A0.8S > A0.5F > A0.5S > A0.3F > A0.3S. Nous remarquons que les mélanges à base de la fumée de silice conduisent à moins de variation de masse que les mélanges à base de filler calcaire.

Pour les BCR, l'ordre de grandeur de variation de masse observé est: R0.8F > R0.5F > R0.8S > R0.5S > R0.3F > R0.3S. Nous remarquons une fois de plus les bonnes performances des mélanges à base de fumée de silice via leurs résistances aux sulfates de sodium.

En effet, la présence de la fumée de silice conduit à de meilleures performance vis-à-vis de la résistance à l'action sulfatique externe en comparant au filler calcaire¹⁸³.

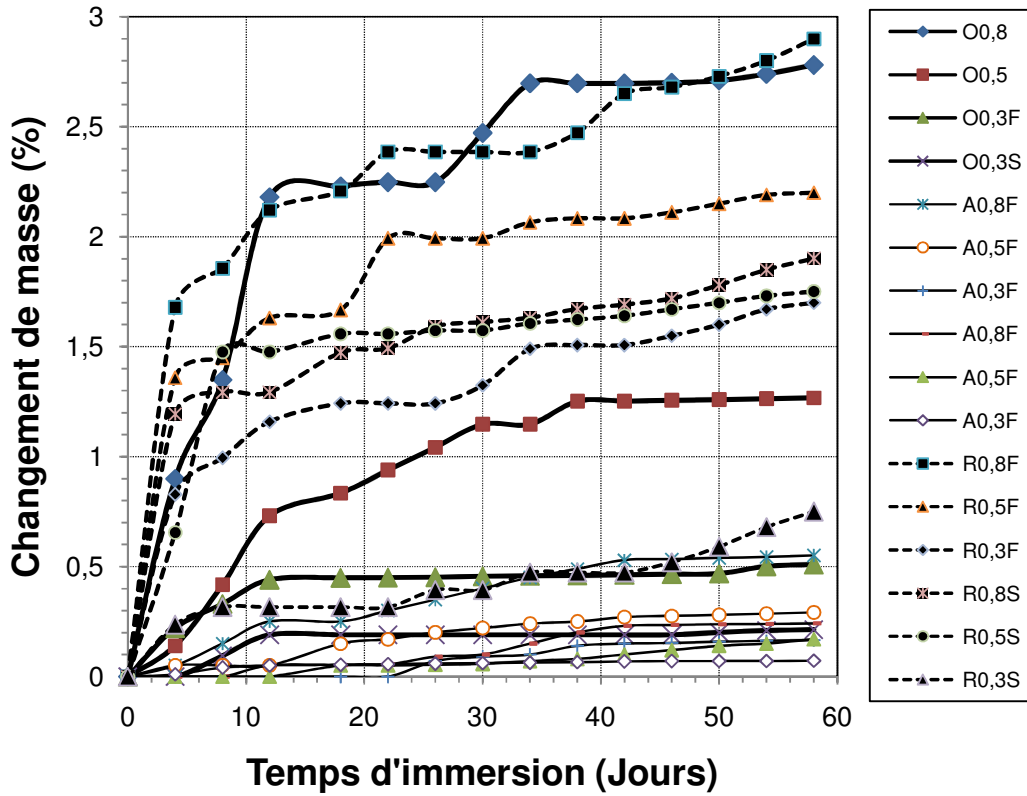


Figure 43 - Changement de masse des échantillons de béton soumis aux attaques de sulfates.

4.1.4 Changement de masse dans la solution sulfates/chlorures

La Figure 44 présente la variation de masse des échantillons de béton immergés dans la solution sulfates/chlorures.

Nous constatons d'une manière générale une faible diminution des variations de masse en fonction de la diminution du rapport E/C.

Par ailleurs:

- Lorsque $E/C=0.8$, l'ordre de variation de masse est le suivant: $R0.8S > A0.8F > A0.8S > R0.8F$.
- Pour $E/C=0.5$, c'est le béton ordinaire a qui présente la variation la plus importante.
- Pour $E/C= 0.3$, la variation de masse est similaires pour tous les bétons.

On comparant bétons autoplçants et bétons ordinaires, on observe une bonne résistance au sulfates des BAP avec des rapports E/C moyen et faible. Cependant, pour un rapport élevé E/C , les BO résistent mieux.

Pour les BCR, l'ordre suivant de changement de masse: $R0.8S > R0.8F > R0.5F > R0.5S > R0.3S; R0.3F$.

Encore, on a marqué l'influence bénéfique de la substitution par la fumée de silice sur la résistance aux sulfates de sodium.

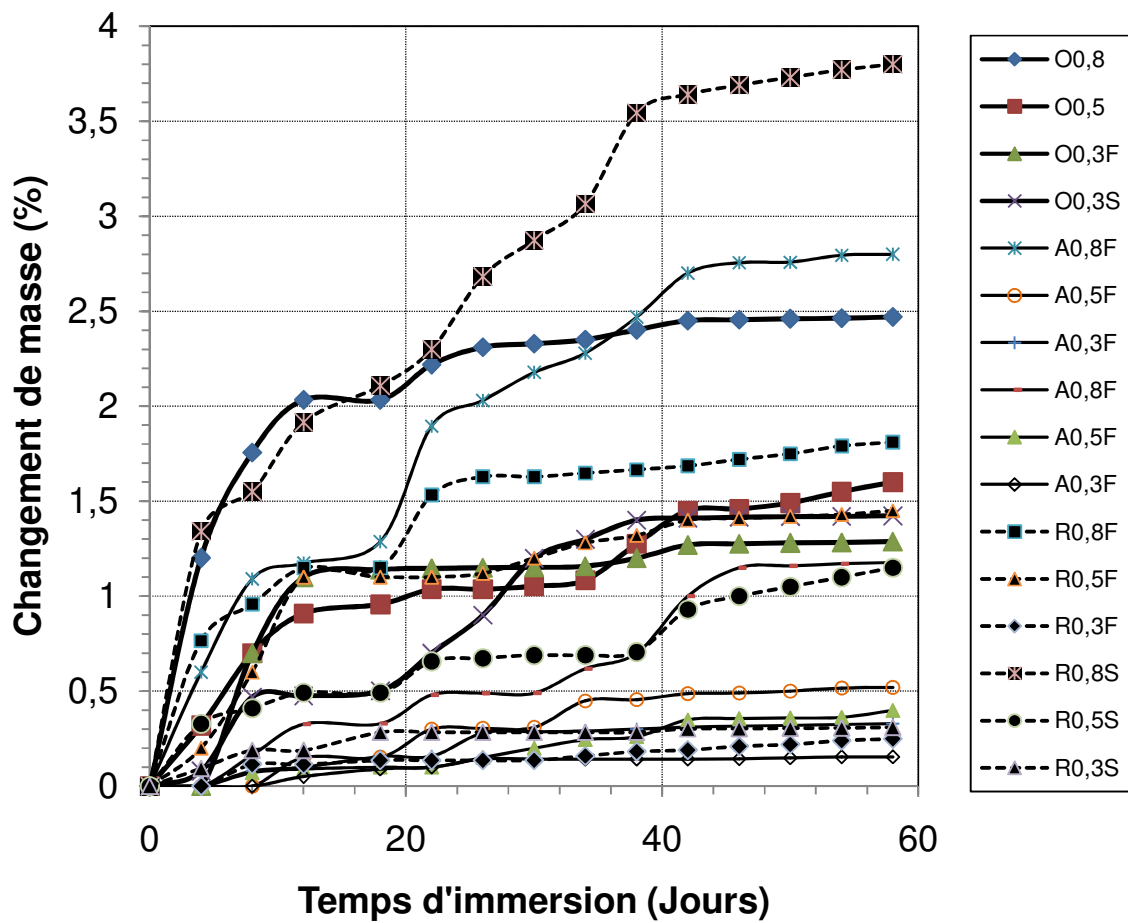


Figure 44 - Changement de masse des échantillons de béton en mode sulfates/chlorures.

En comparant le changement de masse dans les deux modes d'immersion, on peut avancer les points suivants:

- Pour les échantillons de béton ordinaire: Le changement de masse dans la solution mixte SO_4/Cl est supérieur à celui des échantillons dans la solution de sulfates uniquement.
- Pour les échantillons de BAP: un changement de masse important est observé dans le cas des échantillons immergés dans la solution mixte quand $E/C=0.8$.

En général, la variation de masse des échantillons de béton par l'attaque sulfatique externe en présence des ions chlorures est plus sévère que les bétons immergés dans la solution de sulfates seuls. Ce qui est également signalé dans la littérature^{184, 185, 186}.

L'action principale menée dans cette étude est l'application de cycles alternatifs sulfates/chlorures au lieu de mettre les échantillons de béton dans une solution mixte de sulfates et chlorures. Ainsi, nous pensons que cette manière d'immersion peut engendrer plus de détérioration du béton, c'est une approche plus réaliste qui peut simuler l'action sulfatique réelle sur site (en présence des chlorures). En fait, la présence des chlorures est un facteur favorisant la recristallisation des sels dans la solution poreuse et dans la zone interfaciale pâte/granulats. Dans les conditions d'exposition naturelle, certains chercheurs rapportent la formation de gypse comme la cause de dégradation du béton¹⁸⁷, et que sa formation se manifeste à la surface du béton¹⁷.

4.1.5 Profondeur de pénétration des chlorures au mode sulfates/chlorures

Les mesures de la profondeur de pénétration des ions chlorures sont présentées dans la [Figure 45](#). On note ici que l'essai est dédié à la mesure des profondeurs de pénétration de chlorures dans la solution mixte, comme influencées par la présence des sulfates.

La première constatation que nous pouvons faire est la profondeur importante de la pénétration de chlorures dans BCR par rapport à celle des BO et BAP. Ceci est dû à la structure poreuse de ce type de béton¹⁴¹.

Deuxièmement, le rapport E/C est le variable le plus significatif pour tous les types de béton. En effet, on voit la diminution de la profondeur de pénétration avec la diminution du rapport E/C.

D'autre part, les bétons avec substitution en filler calcaire ont montré une faible résistance à la pénétration des ions chlorures par rapport ceux substitués avec la fumée de silice. Ceci

confirme une autre fois l'efficacité de la FS comme ajout minéral comme matériau inhibiteur à la pénétration des agents destructifs du milieu extérieur. Comme connu dans la littérature, la

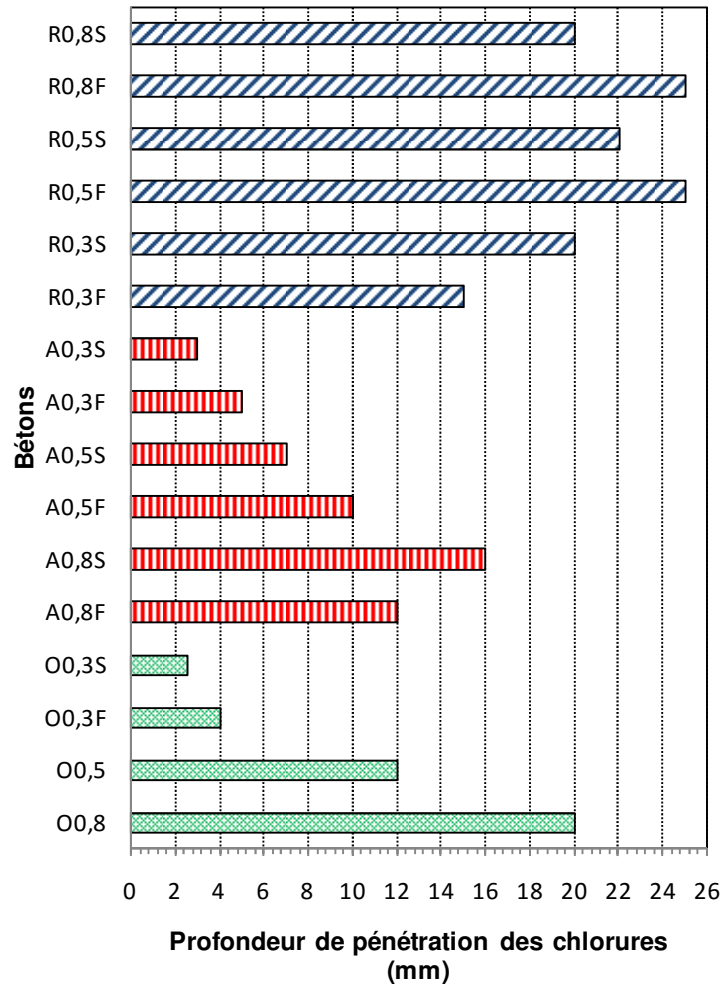


Figure 45 - Profondeur de pénétration des ions chlorures dans les échantillons de béton, mesurée par nitrates d'argent.

présence de la fumée de silice dans la matrice cimentaire conduit à une consommation rapide de la portlandite (l'hydrate attaqué par les ions chlorures et sulfates), et un perfectionnement de la microstructure de la pâte de ciment (par la formation d'un gel de silice). De plus, en comparant nos résultats avec ceux de la littérature, nos profondeurs

enregistrées sont plus grandes. Ce qui est expliqué par l'influence des sulfates sur la porosité du béton, influençant à son tour la diffusivité et la vitesse de pénétrabilité des ions chlorures.

4.1.6 Les observations au MEB des bétons avec E/C=0.8

Dans les manographes suivants nous présentons des observations au MEB de la microstructure des échantillons de béton ayant un rapport E/C=0.8.

La photo (a) pour *O 0.8* montre la présence d'une forme d'ettringite faiblement cristallisée en grande quantité, cette forme a été également observée par Mehta¹⁸⁸. De plus, une faible présence de gypse a été observée. Ceci peut être à cause de la transformation du gypse formé en ettringite¹⁸⁹. En outre, on observe des petites masses de sels moyennement cristallisés. Ce qui correspond, peut être à la formation des sels de Friedel.

Sur la photo (b) pour *A0.8F*, on observe moins d'ettringite et de gypse, mais plus de sels cristallisés. Ceci peut être expliqué par le faible taux de transformation des sels de Friedel à ce stade en ettringite.

Concernant la photo (c) pour *A0.8S*, on peut voir la présence de l'ettringite, du gypse et des sels de Friedel. Dans ce béton le taux de substitution de la fumée de silice est seulement de 5%. Cette fumée de silice réagit avec la portlandite pour former les hydrates de C-S-H. Cependant, un excès en clinker peut entrer en réaction avec les sulfates/chlorures du milieu extérieur. Ce qui implique la formation d'ettringite, gypse et sels de Friedel.

Pour la photo (d) de *R0.8F*, On observe la formation de gypse et des sels cristallisés. Par contre, on n'a pas détecté la présence de l'ettringite sur cet échantillon.

Sur la photo (d) pour *R0.8S*, on observe la formation de gypse et d'ettringite, et le manque des sels. Dans cet échantillon le taux de substitution de la fumée de silice est juste de 5 %. Cette portion entre en réaction avec la portlandite pour former les C-S-H, mais l'excès de ciment a réagit avec la solution intersticielle chargée en chlorures et sulfates pour former l'ettringite, le gypse et les sels de Friedel.

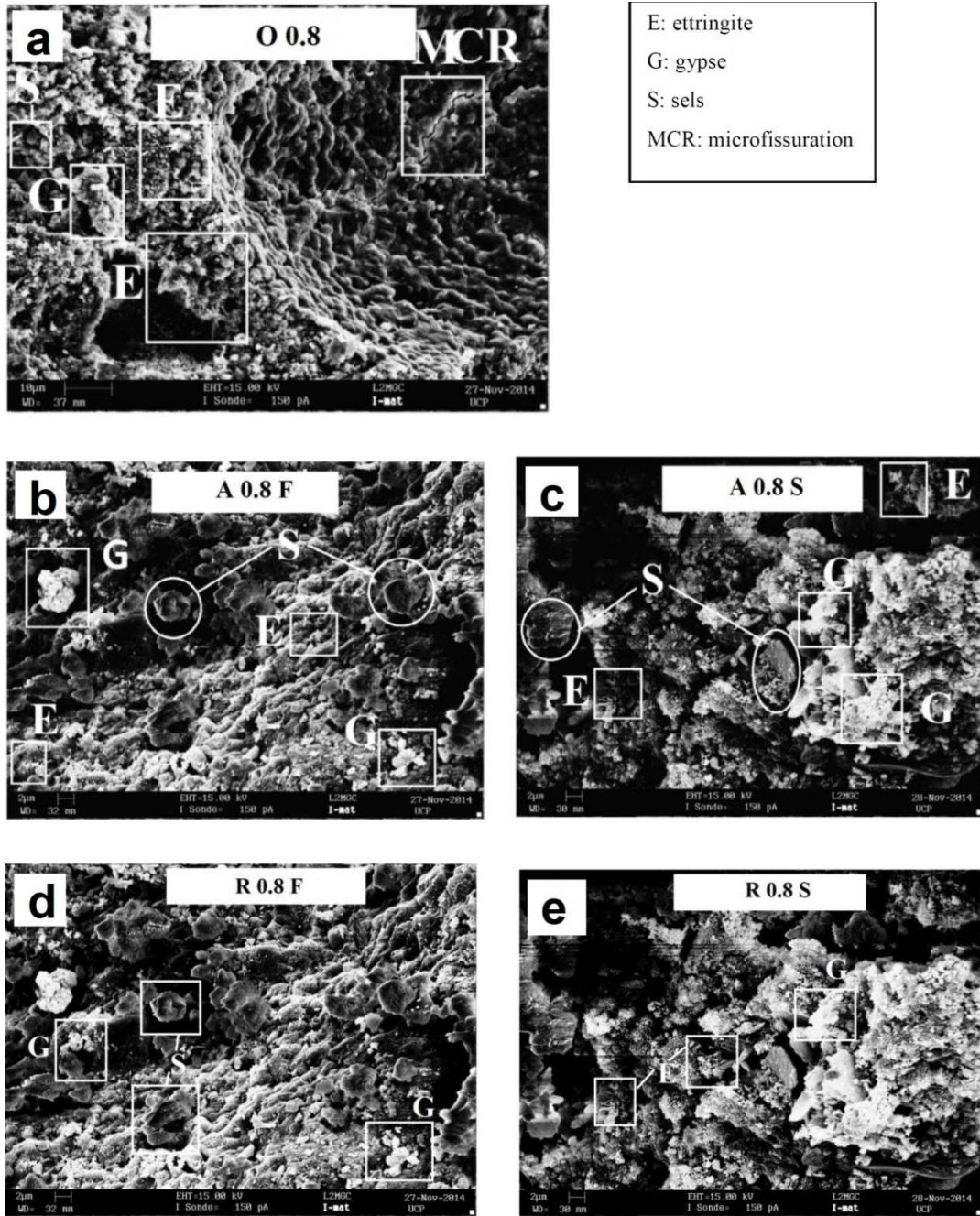


Figure 46 - Photos au MEB des échantillons de béton immergés dans la solution Sulfates/Chlorures (E/C=0.8).

4.2 Partie 2: Mortiers

4.2.1 Résistance à la compression

La [Figure 47](#) montre les résultats de la résistance à la compression des mortiers étudiés.

On remarque l'importance du rapport E/C comme variable significatif qui gouverne l'étendue de la résistance à la compression des mortiers. En effet, la résistance mécanique des trois types de mortier étudiés augmente avec la diminution du rapport E/C.

On constate encore de faibles valeurs de la résistance mécanique des MCR par rapport aux MAP et MO. Les résistances mécaniques des MAP sont similaires à celles des MO. On peut expliquer cela par le volume élevé de la pâte des mortiers autoplaçants, et par l'effet dispersant du superplastifiant (qui rend le mélange plus homogène).

Pour les mortiers ordinaires: Les résistances sont similaires entre MO0.5 et MO0.5 ref. Par contre, aux échéances avancées, une légère amélioration est marquée pour MO0.5. Ceci peut être dû à l'action tardive de la réaction pozzolanique du laitier présent dans le ciment. Concernant l'influence de type d'ajout, dans les mortiers avec un rapport E/C=0.3,

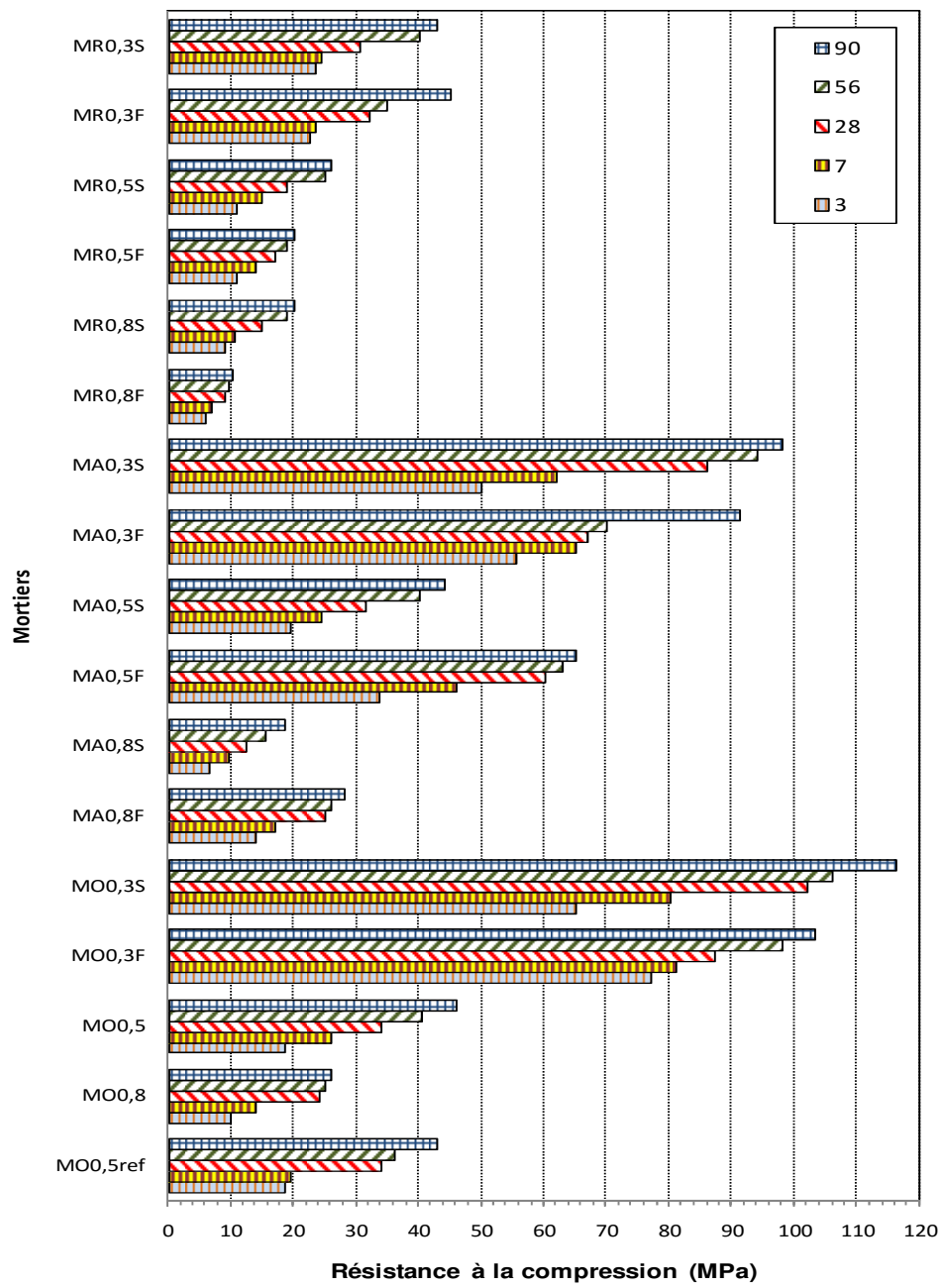


Figure 47 - Résistance à la compression des échantillons de mortier.

au jeune âge le filler calcaire conduit à plus de résistance mécanique. Ce fait est inversé à 28 et 90 jours.

En comparant MO0.5ref et MO0.5 (CFC), on observe des résistances similaires à 3 et 14 jours. Cependant, à 7 et 91 jours, le mortier à base de ciment au calcaire est plus résistant. D'une part, 27 MPa pour MO0.5 contre 17 MPa pour MO0.5ref à 7 jours peuvent être attribuées à l'influence chimique du filler broyé avec le clinker (CFC) accélérant ainsi l'hydratation. D'autre part, les résistances améliorées à plus long terme peuvent être dues à la réaction pozzolanique retardée provoquée par la présence du laitier.

Pour les MAP:

- MA0.5F donne de bonnes résistances à tous âges par rapport MO0.5ref et MO0.5.
- Concernant le type d'ajout, le filler donne de meilleures résistances avec les mortiers ayant un rapport E/C fort ou moyen. Toutefois, La fumée de silice conduit à plus de résistance pour les mortiers avec un faible rapport E/C. On peut également observer la pertinence d'ajouter 30 % de filler calcaire. Ce dernier donne des résistances supérieures à celles des mortiers avec 7 % de fumée de silice. En effet, l'ajout de filler calcaire améliore la granulométrie des mélanges cimentaires et augmente leurs performances. Ainsi, l'ajout du filler calcaire en substitution partielle au ciment lui permet de jouer un rôle physique en améliorant la compacité des mélanges. Par contre, introduit dans la composition du ciment, le filler calcaire a une action plus chimique. Celle-ci est démontrée par la formation des carboaluminates et la multiplication des sites de nucléation à l'échelle microstructurelle.

Pour les MCR:

- Les mortiers compactés sont moins résistants à tout âge par rapport aux MO et MAP. Cela peut être expliqué par les pores créés lors du compactage de ce type de mortier. Cependant, 7 % de fumée de silice dans le mélange MR0.5S a donné plus de résistance que 30 % de filler calcaire présent dans le mortier MR0.5F. C'est peut

être le résultat de la réactivité de la fumée de silice comparé au filler calcaire (particulièrement dans les mélanges secs).

- La présence de la fumée de silice implique plus de performance par rapport au filler calcaire, sauf avec un rapport E/C=0.3 où les résistances sont similaires.

4.2.2 Calorimétrie

Les [Figures 48 et 49](#) représentent respectivement la chaleur d'hydratation en mode semi-adiabatique (pendant 72 heures, selon la norme EN 196-9), et le flux de la chaleur d'hydratation des mortiers avec un rapport E/C=0.5 (pendant 28 heures).

Nous pouvons constater le faible dégagement de chaleur d'hydratation des mélanges à base de ciment calcaire par rapport au mélange de référence. Ainsi, la présence des ajouts minéraux conduit à moins de dégagement de la chaleur d'hydratation. Pour tous les types de mortier, nous observons que l'incorporation du filler calcaire augmente le dégagement de la chaleur d'hydratation que l'introduction de la fumée de silice.

Dans la [Figure 49](#), le deuxième pic du mélange MO0.5 a une valeur 43% moins que MO0.5ref. Cependant, la période d'accélération dans l'échantillon de MO0.5 commence à 1 h seulement contre 2 heures enregistrée pour MO0.5ref. Cette observation est en accord avec les résultats montrés dans la littérature, qui attribuent l'accélération du flux de la chaleur d'hydratation au jeune âge à la présence des carbonates^{190, 191}. Toutefois, dans notre étude en présence de laitier, le temps de la fin de la période d'accélération n'est pas réduit par rapport le mortier de référence MO0.5ref, ce qui est contradictoire aux résultats publiés par d'autres chercheurs¹⁹².

En plus nous avons obtenu des valeurs similaires pour MO0.5ref et MO0.5 (11h). Ce qui est peut être lié à l'influence du laitier combiné avec le filler calcaire au stade de fabrication du ciment composé. En effet, le laitier a une structure vitreuse qui a un effet retardant sur l'hydratation¹⁹³, qui peut neutraliser l'influence du filler calcaire.

Concernant les MAP, nous observons des périodes dormantes retardées (5h pour MA0.5F et 6h pour A0.5S), et un timing du 2^{ème} pic aussi retardé (12h pour MA0.5F et 13h pour MA0.5S). Ces résultats sont contradictoires par rapport les travaux de Maage⁷⁴ qui a montré l'accélération de l'hydratation en présence du filler calcaire ou de la fumée de silice. Par ailleurs, ces résultats sont en accord avec ceux de Poppe¹¹⁴. En effet, la période dormante retardée et le timing du 2^{ème} pic peuvent être expliqués par l'effet de combinaisons cimentaires utilisées (contiennent le clinker, le laitier, le filler calcaire ou la fumée de silice); et aussi à l'utilisation du superplastifiant.

Concernant les MCR, nous constatons un faible retardement de la période dormante (3h) et du timing du 2^{ème} pic (9h pour MR0.5F et 10h pour MR0.5S). Bien que la période dormante retardée soit expliquée par l'influence du superplastifiant, la diminution du début de la période d'accélération soit due à la petite quantité du liant dans la composition des mortiers compactés, et leur fluidité ferme.

En reliant les résultats de la calorimétrie avec ceux des résistances mécaniques, on peut conclure que l'augmentation de la résistance mécanique peut être liée au retardement de la période d'accélération. En effet, il est connu que la formation des C-S-H et les produits de silicates est accélérée à ce stade d'hydratation^{194, 195}.

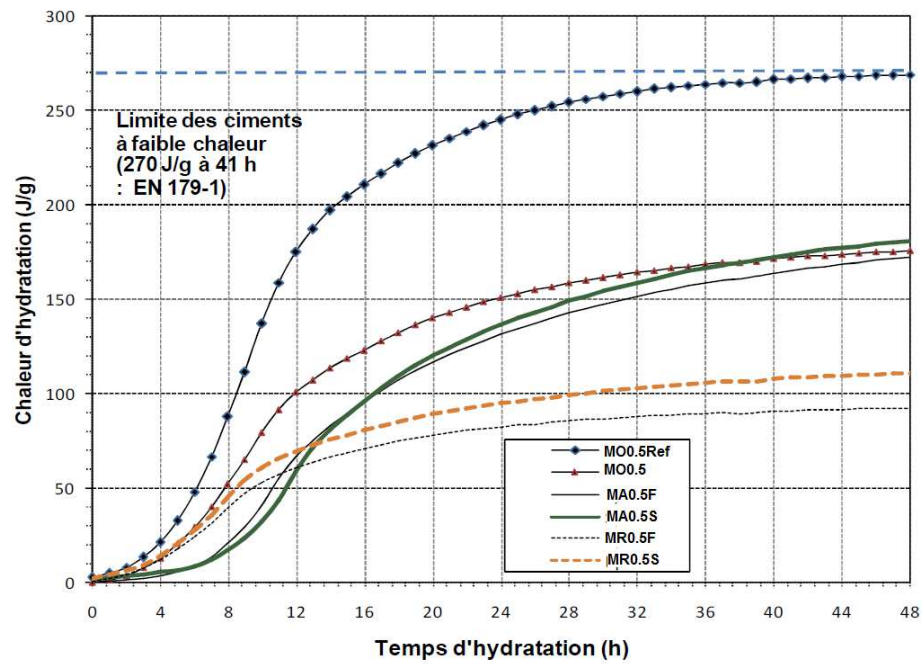


Figure 48 - Chaleur d'hydratation mesurée par le calorimètre semi-adiabatique (EN 196-9).

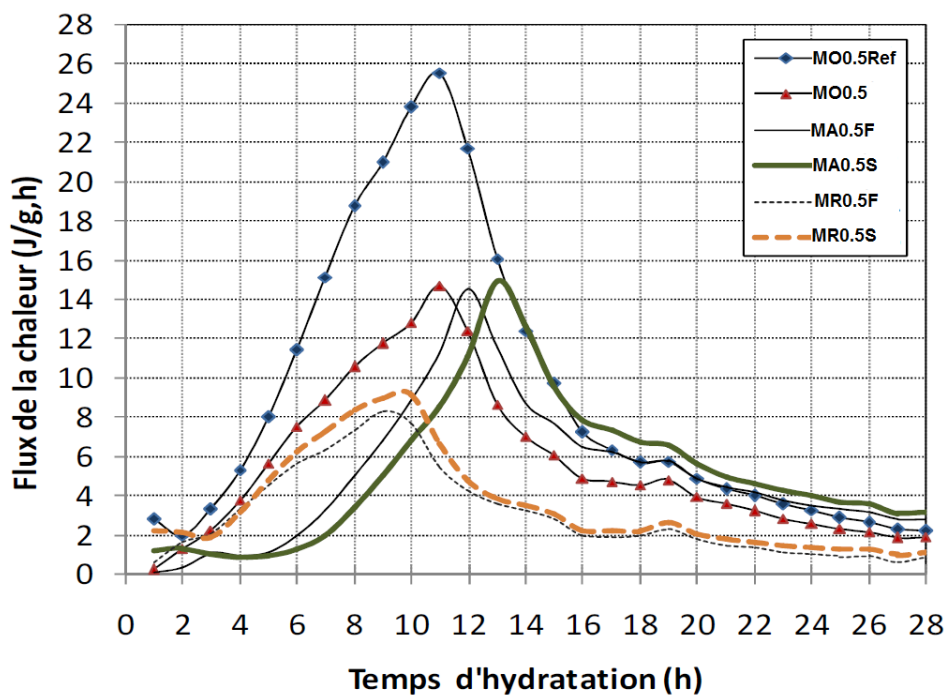


Figure 49 - Flux de chaleur d'hydratation des échantillons de mortier.

4.2.3 ATG et degré d'hydratation

Dans le [Tableau 19](#) nous présentons les quantités calculées de la portlandite (P), et celles des pertes de masse enregistrées dans la phase de décarbonatation (C).

Avec la présence du filler calcaire, nous constatons de grandes pertes de masse en phase de décarbonatation et de taux de portlandite (pour les mortiers MA0.5F, MR0.5F et MO0.5). Ce qui a été étudié précédemment¹⁹⁶, et expliqué par la formation de CaO.

Tableau 19 - Quantité de portlandite et perte de masse en décarbonatation dans les échantillons de mortier (Essai ATD/ATG).

	3 jours		28 jours		90 jours	
	P (%)	C (%)	P (%)	C (%)	P (%)	C (%)
MO0.5ref	16,70	6,98	15,78	5,85	18,32	7,36
MO0.5	18,32	8,09	20,46	8,93	17,74	7,58
MA0.5F	22,07	11,08	21,70	10,96	22,97	11,08
MA0.5S	16,87	8,11	21,32	9	15,04	6,9
MR0.5F	18,00	9,27	19,85	10,52	20,98	10,85
MR0.5S	17,59	8,83	14,25	7,09	17,79	9,05

Dans les mélanges à base de FS, la portlandite est consommée à partir de 28 jours. Ce fait est dû à la réaction pozzolanique en présence de la fumée de silice et de laitier. Il est important de noter que la coexistence du laitier et de la fumée de silice peut provoquer une consommation irrégulière de la portlandite. Quelques auteurs expliquent cela par la compétition entre les ajouts minéraux à la consommation de la portlandite^{197, 198}.

Dans la [Figure 50](#), on a tracé l'apparition des carboaluminates dans les échantillons de mortier, traités dans l'essai de DTG. Ces valeurs ont été enregistrées à 3 jours. D'après la littérature la température à laquelle les carboaluminates apparaissent est d'environ 180 °C. Sur cette figure, on peut observer un pic assez marqué pour l'échantillon MO0.5. Cependant, pour les mortiers MA0.5F et MR0.5F on voit la formation de petits pics. On peut expliquer cela par la présence de filler calcaire qui n'a pas réagit, dû à sa grande finesse. Ainsi, le filler dans ce cas a un rôle plutôt physique que chimique.

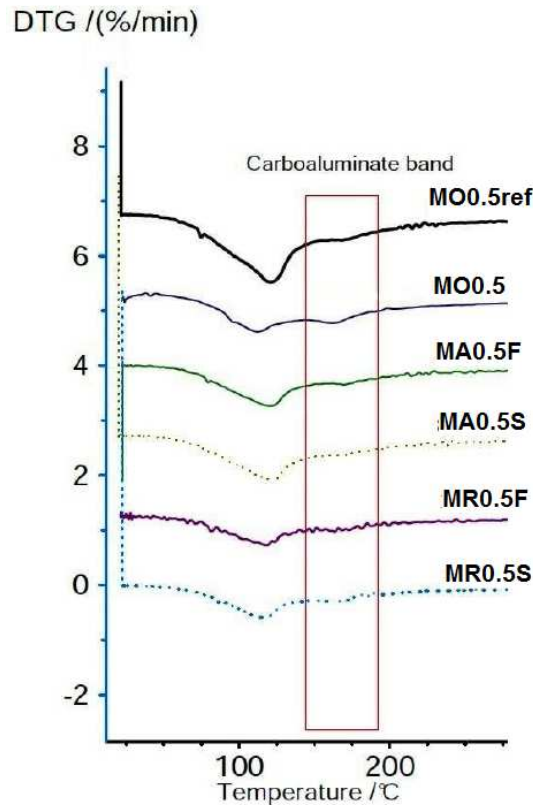


Figure 50 - les bandes des carboaluminates par DTG.

Comme présenté dans chapitre 3, le degré d'hydratation a été calculé selon la formule proposée. Les résultats sont présentés dans la [Figure 51](#).

Comme on pouvait s'y attendre les mortiers à base de ciment calcaire et ceux avec substitution d'ajouts minéraux ont de faible degré d'hydratation par rapport au mortier de référence. Il semble que la présence des ajouts minéraux (Quelque soit leur activité) implique une diminution du degré d'hydratation. Ceci veut dire que l'existence des ajouts minéraux fait diminuer le taux de dégagement de la chaleur d'hydratation. Cependant, ils ont un rôle de création de sites de nucléation, favorisant la formation des C-S-H¹⁹⁵ et des hydrates comportant des silicoaluminates.

En comparant la progression du degré d'hydratation à 3 jours et à 7 jours, on voit que MO0.5 montre moins d'évolution par rapport aux autres mortiers avec le ciment au calcaire.

Au jeune âge, la présence du filler calcaire ou de fumée de silice contribue à l'accélération de l'hydratation. Par conséquent, plus de performance mécanique peut être obtenue¹⁹⁹.

Pour les mortiers autoplçants, MA0.5F présente un degré d'hydratation plus fort que celui de MA0.5S. Il semble que la combinaison de filler calcaire/laitier (dans les mélanges à base de ciment composé au calcaire) a une influence physico-chimique sur l'hydratation du liant. Quand l'aspect chimique est traduit par la formation des carboaluminates, silicoaluminates et carbo-silicate; l'aspect physique est expliqué par le rôle de remplissage joué par les grains du filler calcaire substitué. En outre, la présence de 7% de fumée de silice semble avoir une faible influence sur l'hydratation et sur les propriétés mécaniques dans le cas des mortiers autoplçants. Peut être un tel faible taux de substitution n'est pas suffisant pour la formation des C-S-H et de gel de silice.

Dans le cas des mortiers compactés, le degré d'hydratation est plus faible. Peut être dû au faible taux du liant dans ces mélanges. Toutefois, contrairement aux mortiers autoplçants, la fumée de silice ici a entraîné une augmentation de l'hydratation par rapport au FC. Cela peut être attribué à la grande solubilité de SF dans les milieux secs par rapport au FC, conduisant à plus d'hydratation et de résistance à la compression.

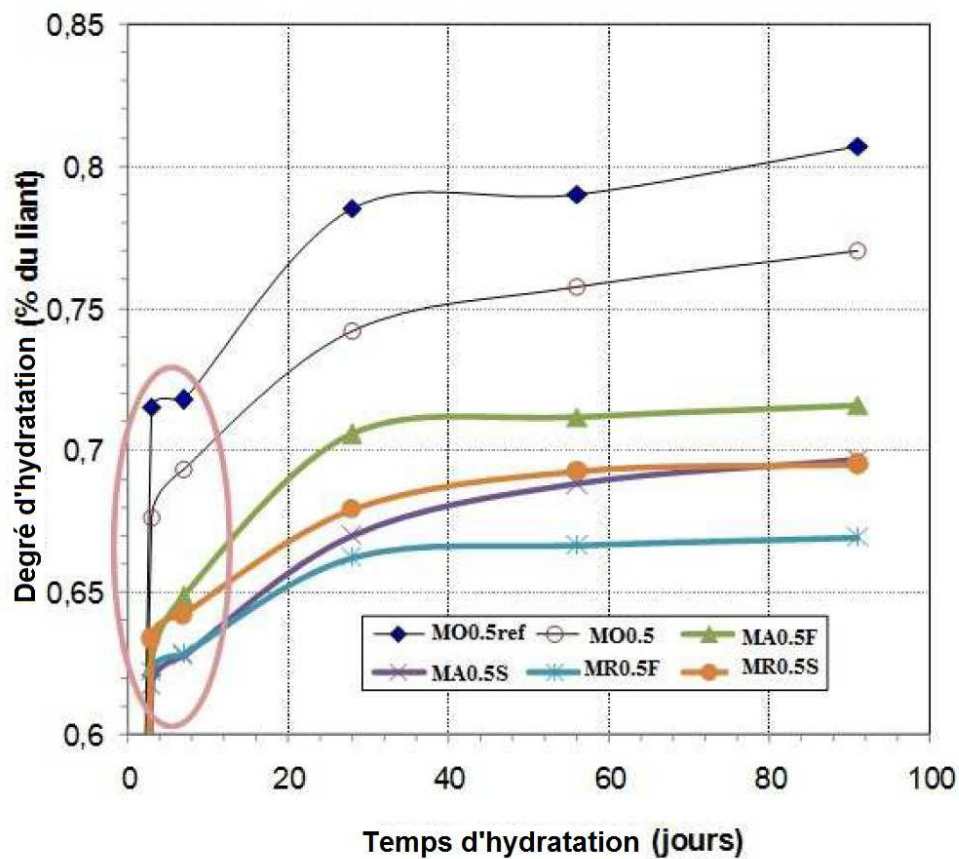


Figure 51 - Degré d'hydratation des mortiers.

4.2.4 Absorption capillaire

Dans le [Tableau 20](#) nous présentons les valeurs calculées des coefficients d'absorption capillaire des échantillons de mortier. Les valeurs sont calculées selon la formule 3.1 décrite dans le chapitre 3.

Nous observons que les mortiers compactés présentent les plus fortes valeurs d'absorption par rapport aux mortiers ordinaires et autoplaçants. Comme discuté précédemment, la tendance des MCR à absorber de grandes quantités d'eau s'explique par leur structure poreuse ouverte, qui permet plus de remontée capillaire de l'eau (voir la [Figure 52](#)).

Nous pouvons également voir des valeurs similaires d'absorption entre les mortiers ordinaires et mortiers autoplçants pour les mélanges à E/C=0.5 et 0.3. Ce qui est contradictoire avec les résultats obtenus par Hall et Thomas²⁰⁰ qui ont montré que l'addition du superplastifiant diminue l'absorption.

Concernant l'influence de type d'ajout sur l'étendue de l'absorption capillaire, il est évident que le filler calcaire conduit à de bonnes performances pour les mortiers ordinaires et autoplçants, et que la fumée de silice est bénéfique pour les MCR.

Tableau 20 - Valeurs des coefficients d'absorption capillaire à l'eau des échantillons de mortier.

Code Mortier	Coeff d'Abs. X 10 ⁻³ cm/s ^{0,5}
MO0,8	1,78
MO0,5ref	1,76
MO0,5	1,56
MO0,3F	0,85
MO0,3S	1,02
MA0,8F	2,27
MA0,8S	3,4
MA0,5L	1,42
MA0,5S	1,9
MA0,3F	0,91
MA0,3S	1,02
MR0,8F	3,3
MR0,8S	3,13
MR0,5L	2,8
MR0,5S	2,58
MR0,3F	1,87
MR0,3S	1,56

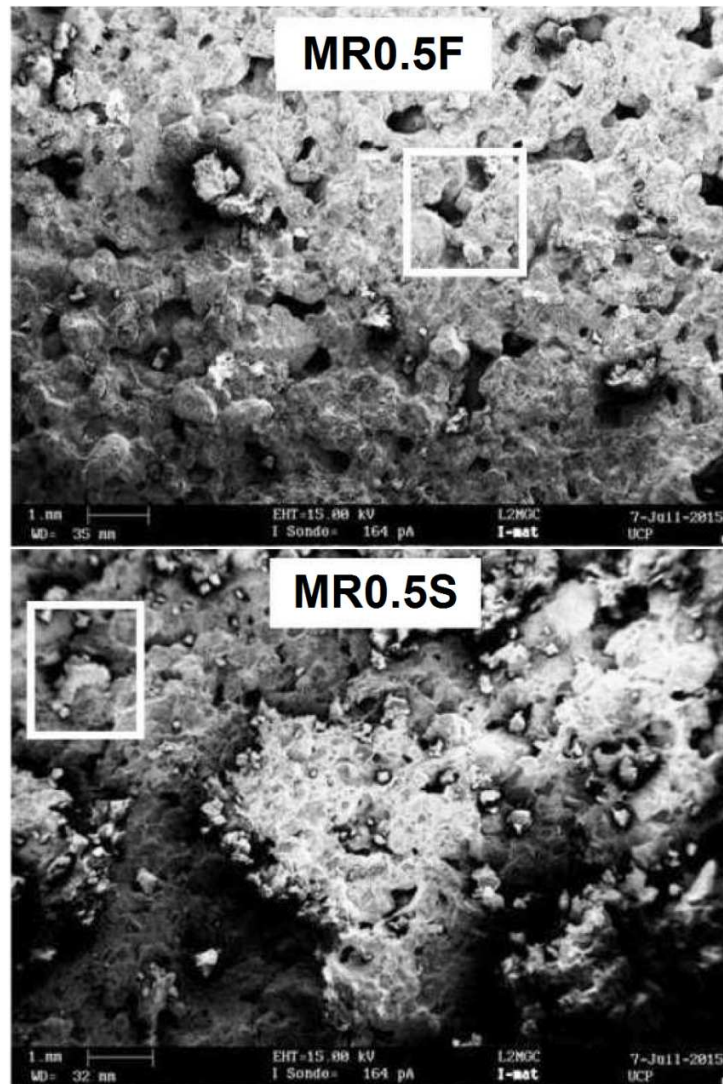


Figure 52 - Agrandissement de X 50 au MEB des échantillons de mortier (E/C=0.5).

4.2.5 Image MEB des mortiers avant attaques chimiques

La [Figure 53](#) montre les observations au MEB des échantillons de mortiers ayant un rapport E/C=0.5 à 28 jours.

-*Pour MO0.5ref*: la présence des aiguilles d'ettringite (5 μm) a été observée. On voit la dominance des hydrates de C-S-H²⁰¹ qui occupent la majorité de la pâte. En plus, la présence

de certaines particules de clinker anhydre peut être vue. En raison de sa taille plus grossière ($> 10 \mu\text{m}$), la portlandite était partiellement recouverte par de plus petites particules des C-S-H ou d'ettringite. Nous notons que les phases anhydres apparaissent dans toutes les étapes d'hydratation et peuvent demeurer dans cet état avec l'étroussure d'espace autorisé²⁰². Toutefois, lorsque les observations morphologiques au MEB sont effectuées, ces matières sont généralement couvertes par les C-S-H, ettringite ou portlandite.

- *Pour MO0.5*: Comme prévu et détecté par les analyses TG, la présence de la portlandite en raison d'excès des carbonates dans le mélange était excédentaire. En outre, plus de C-S-H ont été observés confirmant les résultats de la littérature concernant leur croissance en présence des carbonates²⁰³. D'ailleurs, de plus petites quantités d'ettringite en aiguilles ont été remarquées. Ceci peut être expliqué par la formation préférentielle d'hydrate carboaluminate pendant la phase de décélération versus la formation de l'ettringite.

- *Pour MA0.5F*: La présence des plaques de portlandite et des C-S-H était observée dans la monographie. Toutefois, aucune forme d'ettringite n'a été détectée. Peut être en raison de sa conversion à cet âge (28 jours) en monosulfate ou monocarbonate

- *Pour MA0.5S*: Comme détecté par les courbes TG, la portlandite est observée. Ce qui signifie que la réaction pouzzolanique de la fumée de silice à ce stade n'a pas consommé la totalité de la portlandite. Nous pouvons interpréter les faibles valeurs de la résistance à la compression et du degré d'hydratation pour ce mortier par la quantité insuffisante de la fumée de silice (qui ne provoque pas une réaction pouzzolanique marquée). En outre, des C-S-H couvrant le clinker anhydre ont été observées. Il est supposé dans la littérature qu'avec la présence de SF une forme faible de C-S-H se forme (ayant un ratio C/S d'environ 0,8)²⁰⁴. Des aiguilles bien cristallisées d'ettringite ont été également détectées, créant des inter-ponts entre les grains de ciment.

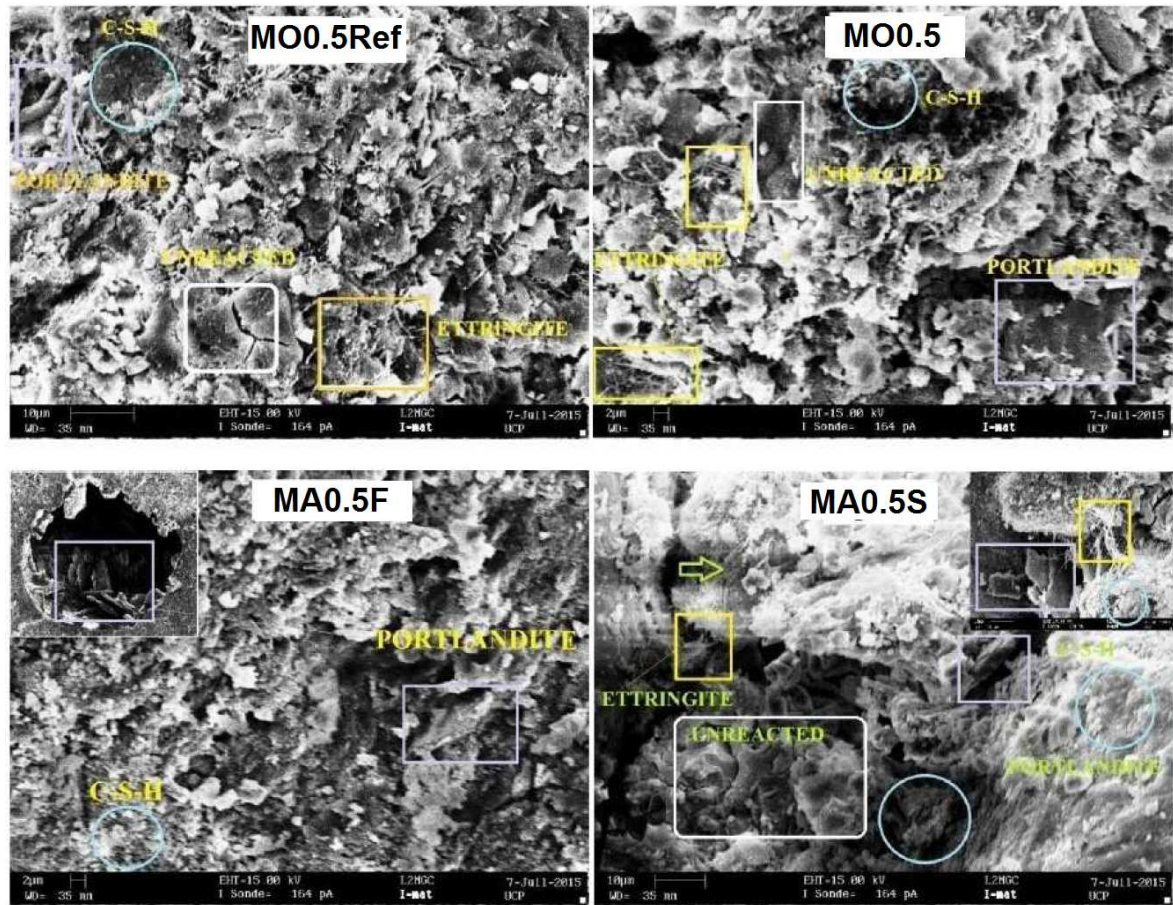


Figure 53 - Images MEB des spécimens de mortier.

4.2.6 Caractéristiques des mortiers après immersion dans la solution sulfates

Nous présentons dans la [Figure 54](#) les résultats de variation de la longueur des échantillons de mortier, immergés dans la solution de sulfates.

Afin de simplifier la lecture et l'interprétation des résultats on appliquera la limite de prolongation proposée par ASTM C150 (0.1 %). Par conséquent, les valeurs au dessous de cette limite seront considérées comme négligeables. Par contre, les taux d'allongement dépassant cette limite seront pris en considération.

L'ordre de changement de masse des échantillons au dessus de la limite ASTM est:

$$MO0.5 > MA0.5S=MA0.8S= MR0.5F=MR0.3F=MR0.8S=MA0.5F > MR0.5ref$$

On peut voir que tous les échantillons de mortier ayant un rapport E/C=0.5 ont subi une expansion considérable. La plus grande valeur d'expansion est celle du MR0.5 (le mortier ordinaire à base de CEM II). Elle est encore plus importante que celle du MR0.5ref (à base de CEM I). Ces résultats sont cohérents par rapport à ce qu'on trouve en littérature². Ce peut être expliqué par l'influence de la quantité de la portlandite formé par les deux types de ciment²⁰⁵.

Le taux de changement de longueurs des autres échantillons est considéré négligeable.

De même, l'expansion des MAP ayant un rapport E/C=0.5 est supérieure à celle du mortier de référence. C'est peut être l'utilisation de CEM II à base de ciment au calcaire qui conduit à plus d'expansion par rapport au CEM I (quelque soit le type d'ajout minéral incorporé).

En plus, l'expansion des échantillons avec un rapport E/C=0.3 est négligeable sauf pour le MR0.3F. Ce peut être expliqué par la compacité des mélanges et leur faible porosité.

Pour les échantillons avec un rapport E/C=0.8, on voit que seule l'expansion des échantillons MA0.8S et MR0.8S est significative.

Sur l'influence de type d'ajout sur l'étendue de l'expansion, on peut observer des valeurs similaires dans le cas des rapports E/C faibles et moyens.

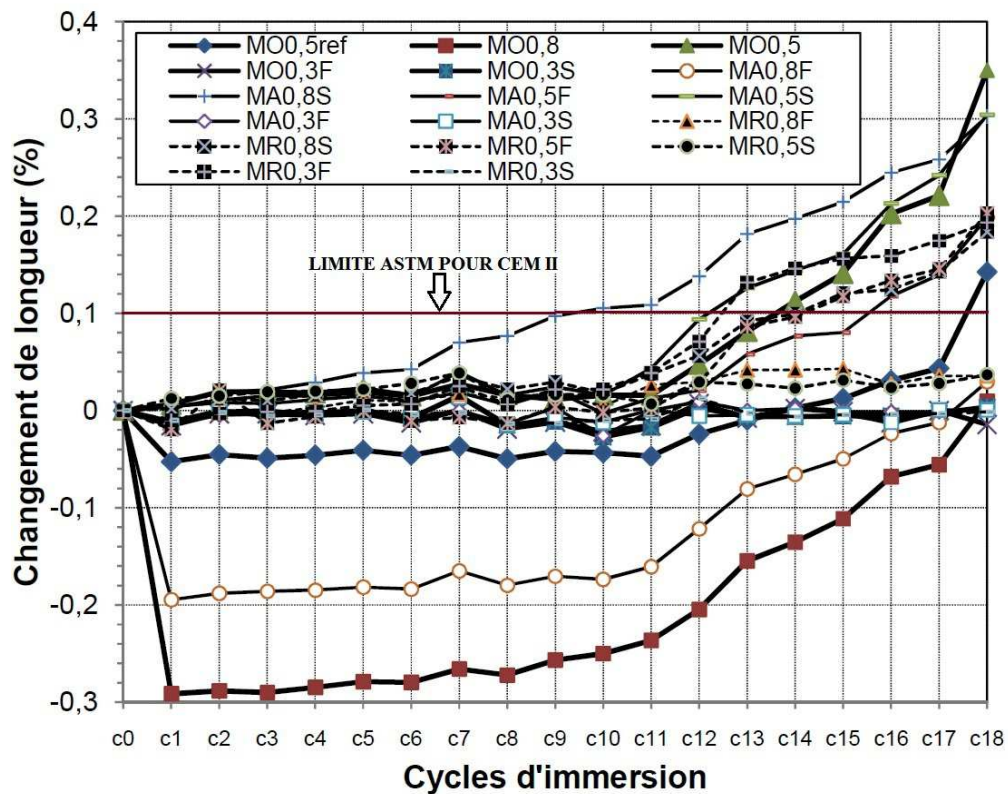


Figure 54 - Variation de longueur des échantillons des mortiers dans la solution sulfates.

La Figure 55 montre les valeurs enregistrées des changements de masse des mortiers dans la solution sulfates.

- Pour les MO: MO0,5 > MO0,5ref > MO0,8 > MO0,3F ≈ MO0,3S.

- Pour les MAP: MA0,8F > MA0,8S > MA0,5S > MA0,5F > MA0,3F > MA0,3S.

- Pour les MR: MR0,3F > MR0,8S ≈ MR0,8F > MR0,5S > MR0,3S.

Si on compare les mortiers entre eux, on voit que: Pour E/C=0,3, MA et MO ont moins de changement de masse. Cependant, pour E/C=0,5, MA > MR > MO.

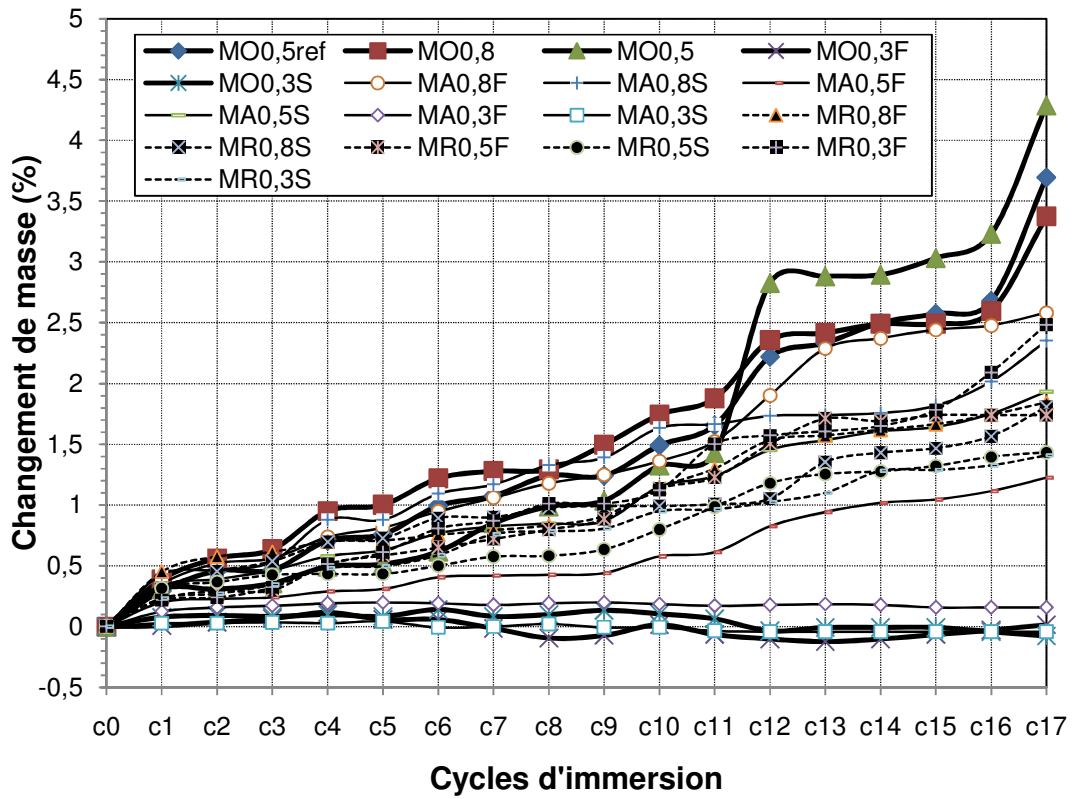


Figure 55 - Changement de masse des échantillons des mortiers dans la solution sulfates.

Nous présentons dans la [Figure 55](#) des photos qui représentent l'état de dégradation des échantillons de mortiers immergés dans la solution de sulfates. On peut distinguer visuellement un état de désintégration des échantillons ayant un rapport E/C=0.8 et la fissuration des échantillons avec un rapport E/C=0.5. Par contre, les échantillons avec un faible rapport E/C (0.3) sont restés intacts.

Il semble que la nature de l'ajout minéral n'a qu'une influence minimale sur l'état de dégradation à l'échelle visuelle.

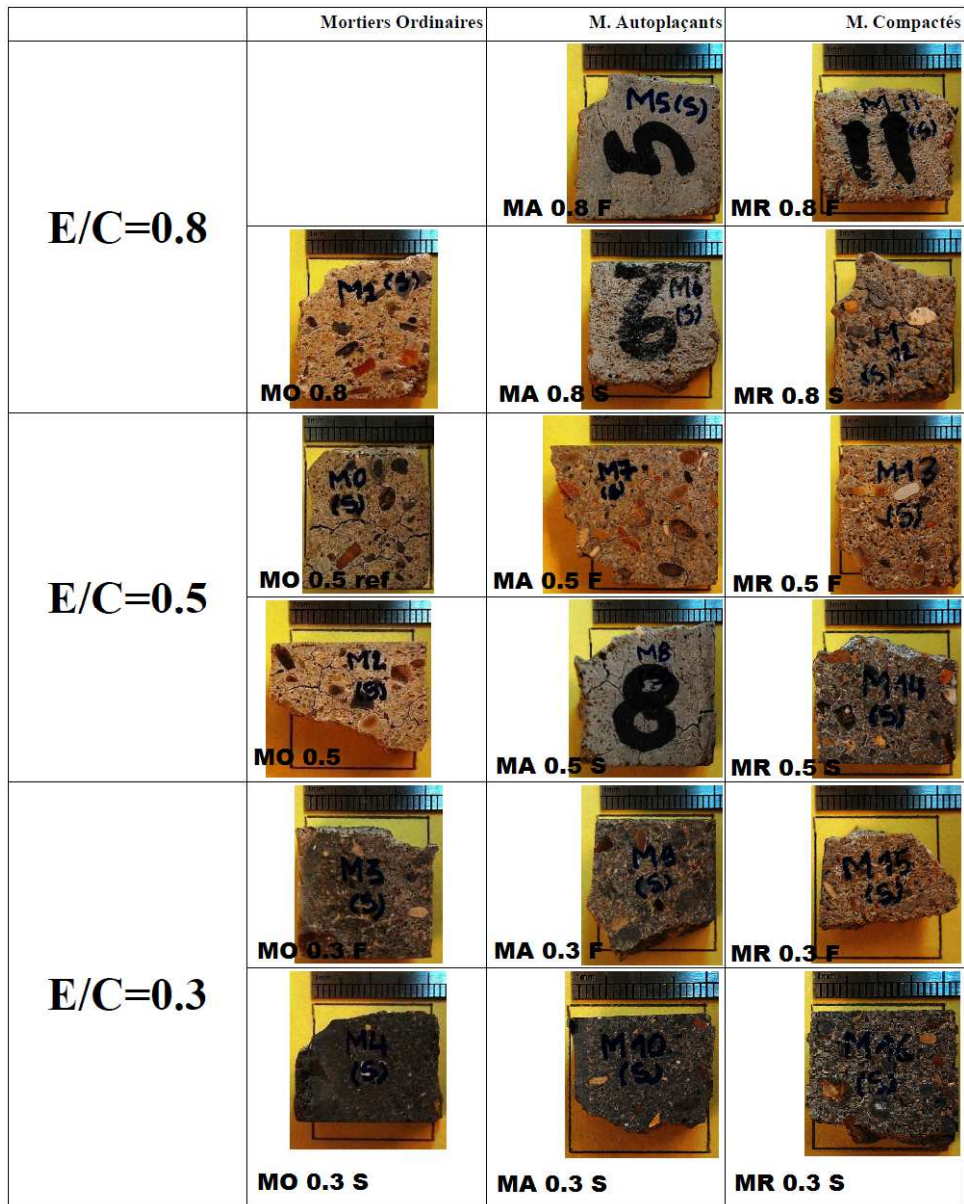


Figure 56 - Observations visuelles des échantillons de mortier dégradés par les sulfates.

4.2.7 Caractéristiques des mortiers après immersion dans la solution sulfates/chlorures

Nous présentons graphiquement les résultats des variations de longueur des échantillons de mortier dans la solution mixte sulfates/chlorures (Figure 57).

Considérons encore la limite de 0.1 % du changement de masse proposée par ASTM, on peut observer que seulement MA0.8S et MR0.3S ont dépassé cette limite (mais n'ont atteint que 0.145 %). Alors, nous pouvons considérer par conséquence que le taux de variation de longueur des échantillons de mortier dans la solution sulfates/chlorures comme négligeable.

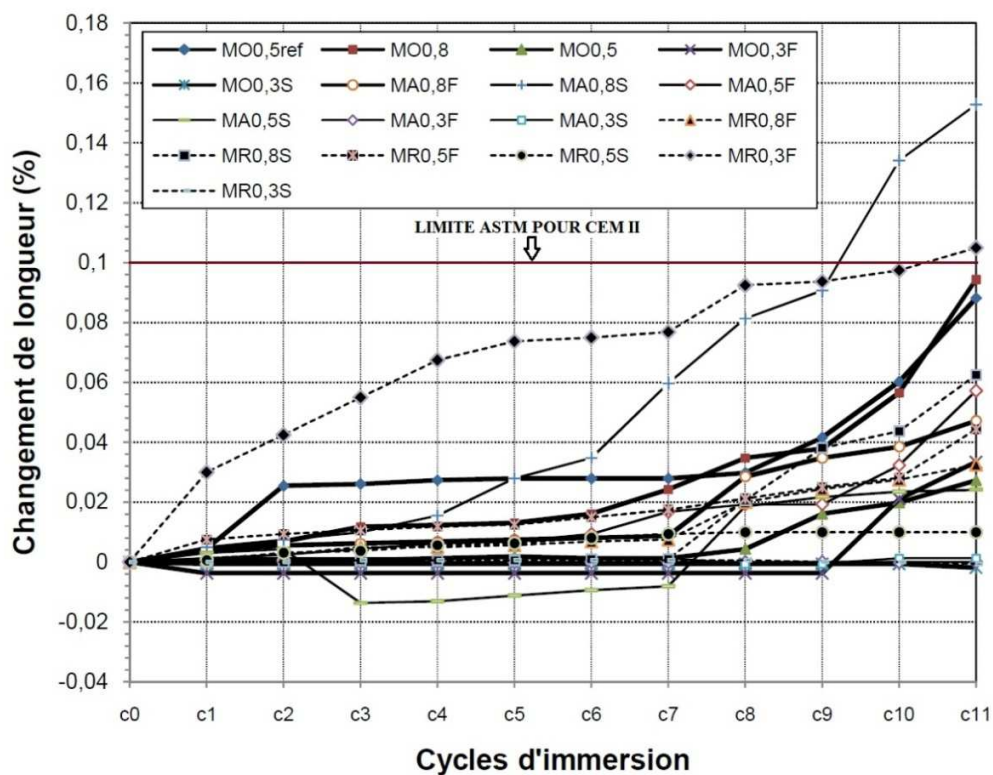


Figure 57 - Changement de longueur des échantillons de mortier immergés dans la solution sulfates/chlorures.

Dans la [Figure 58](#) nous présentons les résultats de changement de masse des échantillons de mortier immergés dans la solution sulfates/chlorures en fonction de cycles d'immersion.

On remarque que l'expansion des échantillons avec un rapport E/C=0.3 est négligeable (inférieur à 0.5 %). En plus, MO0.5 et M0.5ref ont des taux similaires de changement de masse. Ce qui veut dire que l'influence de type de ciment n'a pas une influence marquante pour ce régime d'immersion.

En observe également que les mortiers ordinaires avec E/C= 0.5 et 0.8 présentent plus d'expansion que les MAP et MCR (ces deux derniers mortiers des valeurs similaires de changement de masse). Sur la [Figure 59](#), on peut distinguer clairement l'apparition des fissures pour les échantillons ayant un rapport E/C moyen.

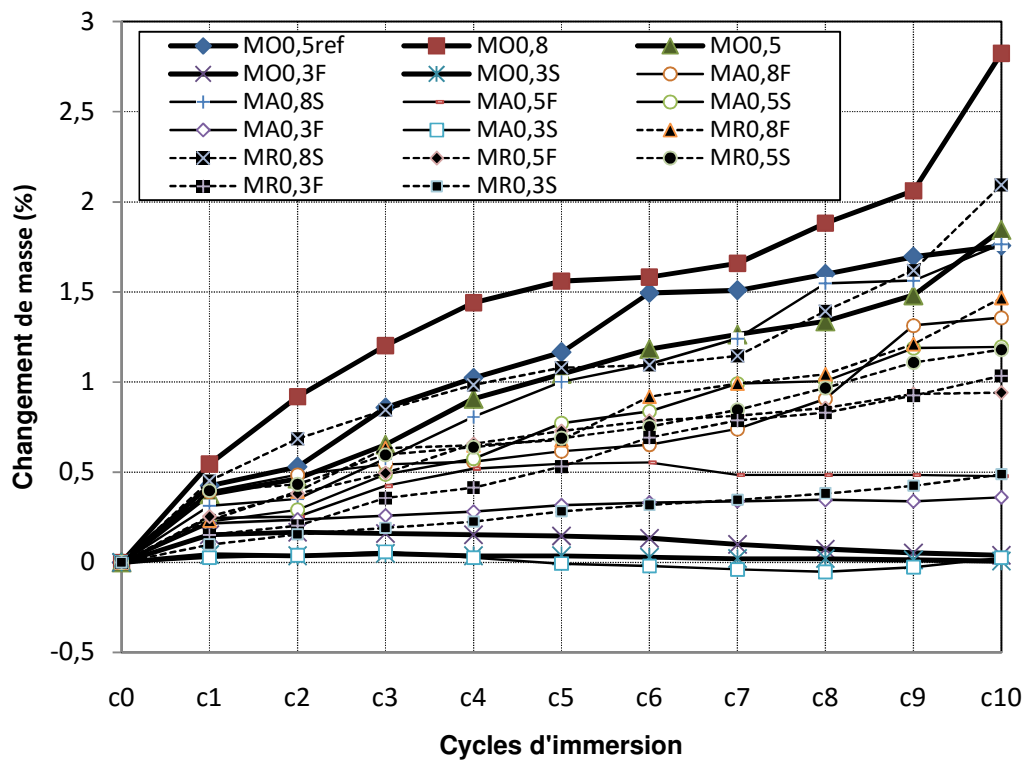


Figure 58 - Changement de masse des échantillons de mortier immergés dans les sulfates/chlorures.

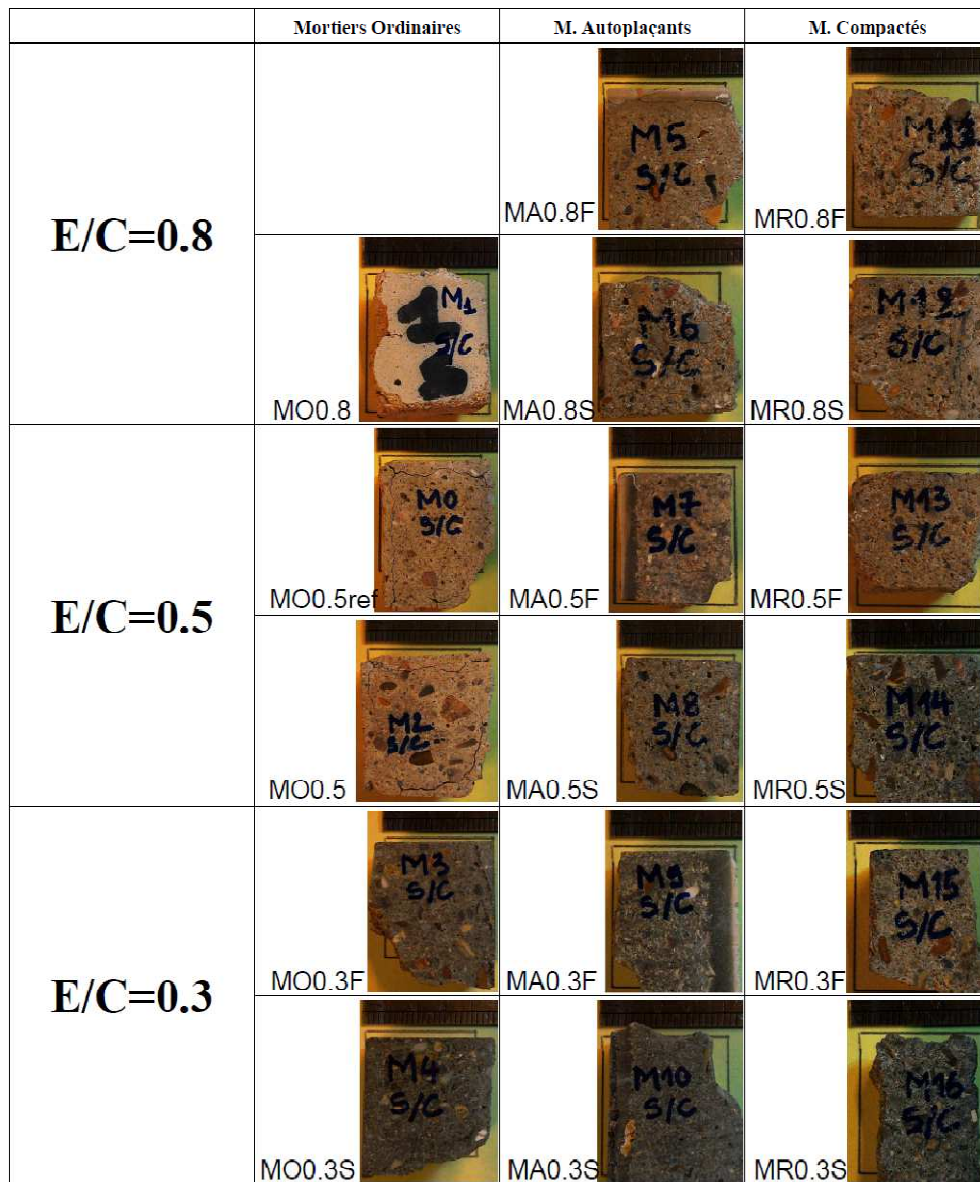


Figure 59 - Observation visuelle des échantillons de mortier dégradés par les sulfates/Chlorures.

Ainsi, on conclut que l'étendue de l'action sulfatique externe est plus sévère dans le cas de régime d'immersion dans la solution sulfates seule. Ainsi, l'existence des chlorures a un effet adoucissant sur l'action des sulfates. Et peut être la formation d'un calcium oxychlorure est un facteur dominant réduisant la pénétration des fluides à travers le réseau poreux²⁰⁶.

4.2.8 Test de migration rapide des chlorures

Nous présentons dans la [Figure 60](#) les résultats obtenus de la migration rapide des chlorures dans les échantillons de mortier. On note que nous avons appliqué la méthodologie de la norme [ASTM C1202](#) afin d'analyser la pénétration des chlorures.

Il est évident que l'influence du rapport E/C est significative pour tous les types de mortier. L'attaque des chlorures augmente avec l'augmentation du rapport E/C. En fait, une diminution du rapport signifie l'obtention d'un mélange plus compacte, bloquant ainsi la pénétration des agents agressifs.

On voit encore que les MCR ont subi plus de pénétration des chlorures que les MO et MAP. Comme obtenu dans le cas du test d'absorption. Ce fait s'explique par la qualité ouverte du réseau poreux de ces mortiers. De plus, nous pouvons observer des valeurs similaires de pénétration de chlorures pour les MAP et MO. Ce qui nous amène à avancer l'explication suivante: Dans le cas des MAP, on a un volume élevé de pâte contenant plus d'ajouts minéraux mais aussi plus de pores ayant une taille inférieure à 15 nm²⁰⁷, ce qui forme un chemin pour la migration des chlorures. Par contre dans le cas des MO, moins de pâte et plus d'interface fragile pâte/sable. Dans ce cas les chlorures passent à la fois à travers la pâte et l'interface.

Sur l'influence du type d'ajout, il est clair que la présence de la fumée de silice a joué un rôle crucial sur la diminution de la pénétration des chlorures. Ceci est dû à la formation des produits d'hydrations contenant des silicates, qui ont un rôle important dans la diminution des pores à l'échelle microscopique²⁰⁸. L'influence de l'incorporation du filler calcaire n'est pas significative au regard de l'attaque des chlorures²⁰⁹.

De plus, les valeurs obtenues dans ce test de migration peuvent être liées à celles de l'absorption capillaire. Ce qui a été fait avec les travaux de Zhang et Zong²¹⁰.

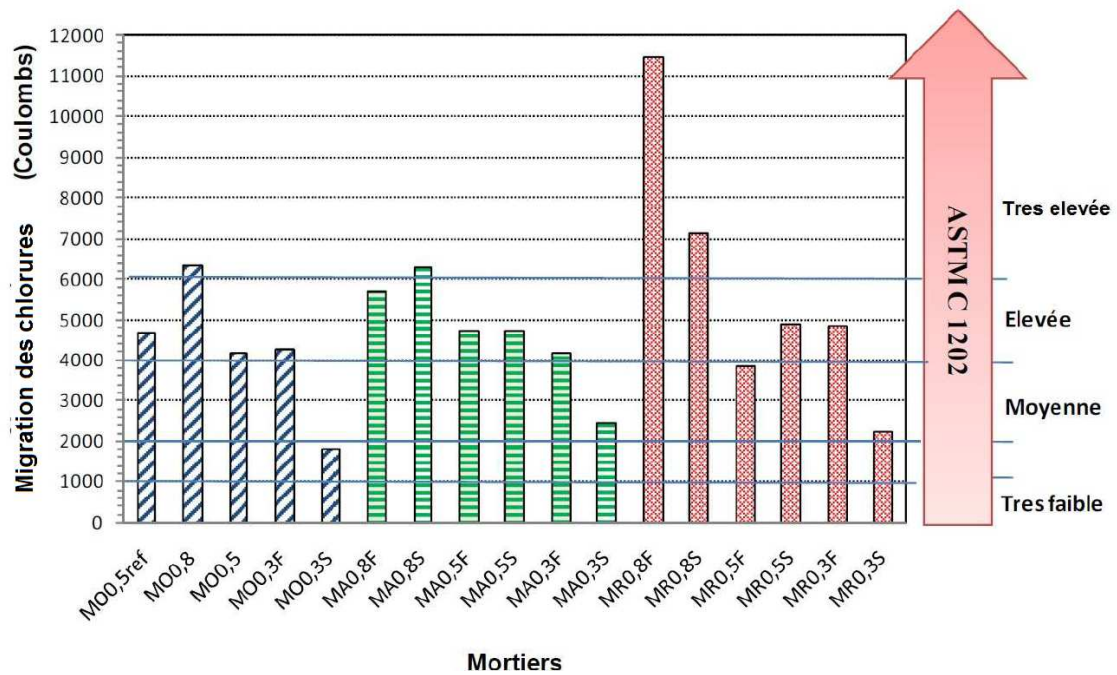


Figure 60 - Migration des chlorures à travers les éprouvettes de mortier.

Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats expérimentaux des essais effectués sur bétons et mortiers. On peut conclure alors ce que suit:

Pour bétons:

- Le rapport E/C est le facteur le plus dominant, affectant les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité des bétons étudiés. En fait, en diminuant le rapport E/C, on obtient de bonnes performances;
- Pour la résistance mécanique à la compression, on obtient des résultats similaires entre bétons ordinaires et BAP; Les BCR sont moins résistants, la présence de la fumée de silice conduit à plus de résistance par rapport au filler calcaire;

- Pour les tests de durabilité (absorption, taux de changement de masse dans les deux solutions et profondeur de pénétration de chlorures dans la solution mixte), on peut dire que ces propriétés sont influencées par les mêmes facteurs régissant la résistance mécanique. En d'autres termes, une bonne durabilité est obtenue avec la diminution du rapport E/C, l'incorporation de la FS plutôt que FC. Nous constatons toujours que les BCR ont de faibles performances par rapport aux BO et BAP;
- En comparant avec les modes opératoires publiés dans la littérature avec le mode adopté pour cette étude (pour caractériser le taux de changement de masse dans les deux solutions adoptées) il est évident que la présence des chlorures dans la solution mixte provoque plus de détérioration des échantillons de béton par rapport à la solution de sulfates de sodium;
- Les photos de MEB faites sur des échantillons immergés dans la solution mixte révèlent la formation d'ettringite, de gypse et de sels de Friedel.

Pour mortiers:

- Quelque soit le type du mortier ou bien la nature de l'ajout minéral, le rapport E/C a une grande influence sur les grandeurs des propriétés mécaniques, d'hydratation et de durabilité des mortiers. On constate de bonnes performances pour toutes ces propriétés avec la diminution de ce rapport;
- A cause de leur porosité ouverte, les mortiers compactés présentent de faibles performances par rapport aux mortiers ordinaires et mortiers autoplaçants.
- L'incorporation du filler calcaire conduit à des résistances mécaniques élevée avec des mortiers ayant des rapports E/C moyen et faible, surtout aux jeunes âges;

- Des valeurs similaires d'absorption capillaire entre MAP et MO ont été constaté pour $E/C = 0.3 - 0.5$. En plus, le filler calcaire a été bénéfique pour les MAP et MO, mais l'utilisation de la FS a été bénéfique dans le cas des MCR;
- Le mortier M0.5 à base de CEMII a des résistances similaires à celles du mortier de référence. Cependant, il a enregistré moins de dégagement de la chaleur, une période dormante courte et un faible degré d'hydratation;
- Les mortiers autoplaçants ont moins de dégagement de la chaleur et un degré d'hydratation faible. Néanmoins ce sont les mortiers compactés qui présentent les valeurs les plus faibles de ces deux paramètres. Alors, la structure physique du mortier (porosité et volume de la pâte) a une influence majeure sur leurs propriétés mécaniques et d'hydratation;
- Les taux du clinker et du superplastifiant sont les facteurs dominant le mécanisme d'hydratation. Plus il y a de clinker dans la matrice cimentaire plus l'augmentation de la chaleur d'hydratation est importante. Ajouter plus de superplastifiant influence positivement les propriétés rhéologiques et mécaniques, mais engendre une plus grande période dormante, et un retard de prise;
- Le filler calcaire ajouté au ciment au calcaire a influencé positivement les propriétés mécaniques, en particulier dans le cas des MAP. Ceci est dû à l'effet dispersant du superplastifiant. Cependant, il n'a qu'une influence mineur sur l'augmentation de la chaleur d'hydratation et du degré d'hydratation;
- La combinaison du filler calcaire ajouté en substitution avec celui introduit dans la fabrication du CEM II améliore les propriétés physiques (packing), la formation des carboaluminates (FC incluse dans le ciment) créant plus de site de nucléation pour l'évolution des C-S-H. Cependant, cet influence positive est réduite en cas des mélanges secs due à la faible solubilité du filler calcaire;

- La substitution de FS est plus bénéfique pour les MCR que pour les MAP à cause de sa compétition avec le laitier existant dans le ciment à la consommation de la portlandite;
- Dans la solution sulfate, la détérioration des mortiers ayant un rapport $E/C=0.5$ a été plus forte, et l'influence de type d'ajout a été moins significative. Par contre, la détérioration des mortiers dans la solution sulfates/chlorures a été négligeable (sauf pour les formules avec un rapport $E/C=0.5$);
- Les observations visuelles (Photos) de l'état de dégradation des échantillons de mortier ont confirmé la fissuration des échantillons ayant un rapport E/C moyen, le maintien des échantillons avec un rapport faible et la désintégration des échantillons avec un rapport fort;
- Contrairement aux résultats trouvés pour bétons, les échantillons de mortiers immergés dans la solution sulfates/chlorures ont montré plus de détérioration par rapport à ceux immergés dans la solution sulfates;
- La tendance des valeurs enregistrées de migration des chlorures des échantillons de mortier suit celle trouvée dans le test d'absorption. On peut corrélérer alors les deux tests.

Conclusion générale

La problématique traitée dans ce travail de thèse concerne l'influence de l'incorporation du ciment au calcaire (CFC) sur les propriétés de quelques types de bétons et mortiers. Pour ce faire, nous avons choisi d'étudier l'effet de trois paramètres à savoir : le type de béton/mortier (ordinaire, autoplaçant, compacté au rouleau), le rapport E/C (0.3-0.5-0.8) et la nature de l'ajout minéral à substituer partiellement au ciment (filler calcaire et fumée de silice). Les propriétés testées pour bétons sont la résistance mécanique, l'absorption capillaire, le changement de masse dans des solutions des sulfates/chlorures. Pour les mortiers, en plus des essais cités précédemment, nous avons étudié l'hydratation et la durabilité vis-à-vis de l'attaque sulfatique.

Nous tenons à rappeler que l'objectif principal du présent travail est l'étude de la durabilité des mélanges cimentaires cités ci-dessus en favorisant le mode d'immersion alternative sulfates/chlorures.

Ainsi, concernant le matériau béton, nous pouvons avancer les conclusions suivantes :

- Comme nous pouvons s'y attendre, le rapport E/C est le facteur dominant, influençant pratiquement toutes les des propriétés mécaniques, physiques et de durabilité des bétons étudiés. En effet, la diminution du rapport E/C, conduit à l'obtention d'un mélange compact, moins poreux avec de bonnes performances;
- Concernant les résistances mécaniques en compression, les bétons ordinaires et les BAP à base du ciment CFC ont des résistances similaires. Par contre, les BCR présentent des valeurs plus faibles. L'incorporation de la fumée de silice a conduit à des résistances plus importantes que celles obtenues avec le filler calcaire;

- Pour la durabilité, les résultats d'essais d'absorption, de taux de perte en masse dans les différentes solutions agressives et de profondeur de pénétration des chlorures ont montré que ces paramètres sont affectés par les mêmes facteurs et de la même manière que ceux régissant la résistance mécanique. Ainsi, la diminution du rapport E/C et l'incorporation de la FS conduisent au meilleur comportement vis-à-vis de la durabilité des bétons étudiés. IL est à noter que les BCR présentent toujours de faibles performances par rapport aux BO et aux BAP;
- En comparant les modes opératoires de la littérature avec le mode adopté pour cette étude (pour caractériser le taux de variation en masse dans les deux solutions agressives adoptées) il apparaît que la présence des chlorures dans la solution mixte a provoqué plus de détérioration des échantillons de béton par rapport la solution composée uniquement de sulfates de sodium;
- les observations au MEB des échantillons immergés dans la solution mixte révèlent la formation de l'ettringite, de gypse et de sels de Friedel.

Il semble, alors que le type de béton a une grande influence sur les propriétés mécaniques et de durabilité du matériau. Ceci est certainement lié à la procédure de formulation et de mise en œuvre de chaque type de béton conduisant, notamment à la formation d'un réseau poreux différent d'un matériau à un autre. La taille et le degré de connectivité des pores gouvernent alors la majorité des propriétés étudiées. Plus ce réseau est ouvert, moins le matériau est performant.

Concernant notre étude sur mortiers et les résultats obtenus, nous pouvons en conclure que :

- Quelque soit le type du mortier ou la nature de l'ajout minéral, le rapport E/C a une grande influence sur les grandeurs des propriétés mécaniques, de la chaleur d'hydratation dégagée et vis-à-vis de la durabilité de ces matériaux. La diminution de ce paramètre conduit généralement à des mortiers de meilleures performances.

- A cause de leur porosité ouverte, les mortiers compactés présentent de faibles performances par rapport aux mortiers ordinaires et aux mortiers autoplaçants.
- L'incorporation du filler calcaire conduit à des résistances mécaniques élevées des mortiers ayant des rapports E/C moyen et faible, notamment aux jeunes âges;
- Les mortiers MAP et MO possèdent des absorptions capillaires similaires pour des rapports E/C = 0.3 - 0.5. De plus et dans ce sens, le filler calcaire est bénéfique pour les MAP et MO et la FS pour le MCR;
- Plus le taux de clinker est élevé dans la matrice cimentaire plus la chaleur d'hydratation dégagée est importante. Néanmoins, la présence de superplastifiant en dosage élevé engendre une augmentation de la période dormante et un retard de prise;
- La présence du filler calcaire substitué partiellement au ciment (CEM II) rajouté à celui déjà existant dans la composition du ciment (CEM II) conduit à l'amélioration de la granulométrie, et la formation des carboaluminates. Ce phénomène n'a pas été observé dans le cas des mélanges secs (mortiers MCR) dû à la faible solubilité du filler calcaire;
- Des observations visuelles des échantillons de mortier immergés dans les solutions salines montrent que ceux à fort rapport E/C se désintègrent, ceux à E/C moyen se fissurent alors que ceux à faible E/C se maintiennent.
- Contrairement aux résultats obtenus sur bétons, les mortiers immergés dans la solution sulfates/chlorures montrent plus de détérioration que ceux immergés dans la solution sulfates. Cela signifie que la recristallisation des sels de chlorures se manifeste dans les interfaces larges pâte/granulats, plus grands dans le cas du béton;
- Les valeurs du test de migration des chlorures dans les mortiers suivent la même tendance que celles trouvées dans le test d'absorption. On pourrait, certainement trouver une corrélation entre ces deux tests.

En fin, Nous estimons que sur le plan scientifique, les résultats obtenus dans ce travail de recherche ont permis de montrer que :

- La structure physique du mélange (structure granulaire) est plus significative que la composition chimique du liant ou la nature de l'ajout minéral vis-à-vis toutes les propriétés du matériau.
- Le filler calcaire a une influence physique (effet filler) lorsque sa granulométrie est plus fine que celle du ciment et une influence chimique conduisant à la formation des carboaluminates.
- Les résistances aux sulfates des bétons et mortiers ne sont pas corrélables.
- L'essai d'absorption capillaire est plus un bon indicateur vis à vis de la résistance à l'attaque des chlorures que vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe.

Sur le plan pratique :

- Il semblerait que la substitution en fumé de silice est efficace au-delà de 10 %,
- Il est important de bien choisir le type de superplastifiant adéquat pour une meilleure solubilité.
- De plus, le filler substitué partiellement au ciment composé rajouté à celui existant dans la composition du même ciment est une voie prometteuse, pour la fabrication des éco-bétons et pour l'environnement.

Nous proposons comme travaux futurs et complémentaires ce qui suit :

En gardant les mêmes compositions adoptées dans notre travail, nous proposons les actions suivantes:

- La caractérisation de la pâte par des analyses à la diffraction des rayons X (DRX), et par infrarouge (FTIR);

- Renforcer les résultats de l'essai de migration des chlorures par les essais de caractérisation des profils de chlorures (ASTM C1152 / C1152M ,ASTM C1218 / C1218M);
- Tester l'influence de sulfates de magnésium, surtout avec le mode d'immersion partielle.

De plus, avec un ciment au calcaire, on peut suggérer les travaux suivants:

- Lors de la fabrication du ciment (CFC) dans les cimenteries, d'adopter comme variable le taux du laitier (10-20-30 %).
- Dans un contexte algérien, et vu la disponibilité de la pouzzolane naturelle dans l'Ouest du pays, on propose de tester les combinaisons du ciment au calcaire + pozzolanes (pour la fabrication du ciment ou bien comme matériau de substitution partielle).

Concernant mes perspectives dans le domaine:

En se limitant sur la recherche et la valorisation des mélanges cimentaires à base du ciment au filler calcaire, le lecteur de ce manuscrit a compris que l'incorporation d'un ajout minéral contenant des aluminates conduit à plus de diminution du clinker dans le liant sans perdre les propriétés du mélange. Donc, la recherche d'autres sources plus écologiques d'aluminates peut constituer un axe fructueux (cendres volantes, pozzolanes, métakaolin...etc.).

En plus, dans le cadre d'une approche pratique et performantielle, il est important de créer des bases de données accessibles par la communauté de Génie Civil et de Travaux Publics. Ceci sera par l'actualisation des recommandations d'utilisation des ciments au filler calcaire dans les différents environnements.

Liste des références

1. V. M. Malhotra, "Reducing CO₂ emissions," *Concrete international*, 28[9] 42-45 (2006).
2. E. Guneyisi, M. Gesoglu, T. Ozturan, K. Mermerdas, and E. Ozbay, "Properties of mortars with natural pozzolana and limestone-based blended cements," *ACI Materials Journal*, 108[5] (2011).
3. C. Meyer, "The greening of the concrete industry," *Cement and Concrete Composites*, 31[8] 601-05 (2009).
4. P. Mehta, "Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development," *Concrete International*, 24[7] (2002).
5. P. K. Mehta, "Concrete technology at the crossroads--problems and opportunities," *ACI Special Publication*, 144 (1994).
6. G. H. Brundtland, "Brundtland Report. Our Common Future," *Comissão Mundial* (1987).
7. S. Tsvilis, E. Chaniotakis, G. Kakali, and G. Batis, "An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete," *Cement and Concrete Composites*, 24[3] 371-78 (2002).
8. Cembureau, "Rapport Annuel 2001," pp. 40. in. Association Européenne de ciment, 2001.
9. L. Courard and F. Michel, "Limestone fillers cement based composites: Effects of blast furnace slags on fresh and hardened properties," *Construction and Building Materials*, 51 439-45 (2014).
10. A. M. Ramezani pour and R. D. Hooton, "A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs," *Cement and Concrete Composites*, 51 1-13 (2014).
11. A. Hossack, M. Thomas, L. Barcelo, B. Blair, and A. Delagrave, "Performance of Portland Limestone Cement Concrete Pavements," *Concrete International*, 36[1] 40-45 (2014).
12. M. Nehdi, S. Mindess, and P.-C. Aïtcin, "Optimization of high strength limestone filler cement mortars," *Cement and Concrete Research*, 26[6] 883-93 (1996).
13. J. Zelic, R. Krstulovi, E. Tkalcec, and P. Kroloa, "The properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars," *Cement and Concrete Research*, 30 145-52 (2000).
14. J. Tanesi, D. Bentz, and A. Ardani, "Enhancing High Volume Fly Ash Concretes Using Fine Limestone Powder," *Special Publication*, 294 1-14 (2013).
15. M. Thomas, R. Hooton, K. Cail, B. Smith, J. De Wal, and K. Kazanis, "Field Trials of Concrete Produced with Portland Limestone Cement," *Concrete International*, 32[01] 35-41 (2010).
16. D. Bentz, J. Tanesi, and A. Ardani, "Ternary Blends for Controlling Cost and Carbon Content," *Concrete International*, 35[8] 51-59 (2013).
17. E. Irassar, V. Bonavetti, and M. Gonzalez, "Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature," *Cement and Concrete Research*, 33[1] 31-41 (2003).
18. M. D. Thomas, A. Delagrave, B. Blair, and L. Barcelo, "Equivalent durability performance of portland limestone cement," *Concrete International*, 35[12] 39-45 (2013).
19. AFNOR, "EN 196-9: Standard : Methods for testing cements. Part 9. Heat of Hydration-Semi Adiabatic Method," *AFNOR* (2010).
20. N. Build, "492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments," *Nordtest method*, 492[10] (1999).
21. S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, and W. C. Panarese, "Design and Control of Concrete Mixtures." Portland Cement Association, (2002).
22. H. F. Taylor, "Cement chemistry." Thomas Telford, (1997).
23. A. M. Neville, "Properties of Concrete," 5 ed. Trans-Atlantic Publications, Indian International Ed., (2011).
24. P.-C. Aïtcin, "Binders for durable and sustainable concrete." CRC Press, (2007).
25. V. S. Ramachandran, R. M. Paroli, J. J. Beaudoin, and A. H. Delgado, "Handbook of thermal analysis of construction materials." William Andrew, (2002).

26. W. Yang, "The Issues and Discussion of Modern Concrete Science." Springer Berlin Heidelberg, (2015).
27. E. M. Gartner, J. F. Young, D. A. Damidot, and I. Jawed, "Hydration of Portland Cement," pp. 57-113. in *Structure and Performance of Cements*. Edited by J. Bensted and P. Barnes. Spon Press, London, 2002.
28. P. A. Rehbinder, "Physico-Chemical Concepts of the Mechanism of Setting and Hardening of Mineral Binders " pp. 138-53. in *Symposium on the Chemistry of Cement*, Moscow, 1956.
29. I. Odler, "Hydration, setting and hardening of Portland cement," *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4 241-97 (1998).
30. F. Locher, "Stoichiometry of tricalcium silicate hydration," *Highway Research Board Special Report*[90] (1966).
31. A. Neville, "The question of concrete durability the answer: we can make good concrete today," *Concrete International*, 22[7] 21-26 (2000).
32. P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials." McGraw-Hill Education, (2013).
33. S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin, "Concrete." Prentice Hall, (2003).
34. C. L. Page and M. M. Page, "Durability of concrete and cement composites." Elsevier, (2007).
35. P. A. M. Basheer and S. Barbuiya, "Durability of Concrete ". in *ICI Manual of Construction*. Institution of Civil Engineers, London, 2009.
36. J. P. Broomfield, "Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair." CRC Press, (2006).
37. T. Dyer, "Concrete Durability." CRC Press, (2014).
38. M. G. Richardson, "Fundamentals of durable reinforced concrete." CRC Press, (2003).
39. P. Vassie, "Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges," in *Institution of Civil Engineers, Proceedings*, Pt 1. Vol. 76.
40. A. C. 116, "Cement and Concrete terminology." in. American Concrete Institute, 2005.
41. J. Marchand, I. Odler, and J. P. Skalny, "Sulfate Attack on Concrete." CRC Press, (2003).
42. CEB, "Durable Concrete Structures: Design Guide. Comité euro-international du béton." Thomas Telford, (1992).
43. V. S. Ramachandran, "Concrete Admixtures Handbook, 2nd Ed.: Properties, Science and Technology." Elsevier Science, (1996).
44. C. Society, "Mortars for masonry." in. concrete Society, 2005.
45. G. Ye, X. Liu, G. De Schutter, A.-M. Poppe, and L. Taerwe, "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes," *Cement and Concrete Composites*, 29[2] 94-102 (2007).
46. I. Soroka and N. Setter, "The effect of fillers on strength of cement mortars," *Cement and Concrete Research*, 7[4] 449-56 (1977).
47. V. Bonavetti, H. Donza, G. Menendez, O. Cabrera, and E. Irassar, "Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy," *Cement and Concrete Research*, 33[6] 865-71 (2003).
48. T. Matschei, B. Lothenbach, and F. P. Glasser, "The role of calcium carbonate in cement hydration," *Cement and Concrete Research*, 37[4] 551-58 (2007).
49. L. Barcelo, B. Blair, A. Delagrave, A. Innis, G. Knight, M. D. Thomas, and W. Weiss, "The Five Ws and One H of Portland Limestone Cement," *Concrete international*, 35[11] 37-40 (2013).
50. T. Barrett, H. Sun, C. Villani, L. Barcelo, and J. Weiss, "Early-Age Shrinkage Behavior of Portland Limestone Cement," *Concrete international*, 36[2] 51-57 (2014).
51. J. Péra, S. Husson, and B. Guilhot, "Influence of finely ground limestone on cement hydration," *Cement and Concrete Composites*, 21[2] 99-105 (1999).
52. N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis, and S. Tsivilis, "Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements," *Cement and Concrete Composites*, 27[2] 191-96 (2005).
53. T. Vuk, V. Tinta, R. Gabrovšek, and V. Kaučič, "The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement," *Cement and concrete Research*, 31[1] 135-39 (2001).
54. V. Bonavetti, V. Rahhal, and E. Irassar, "Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements," *Cement and Concrete Research*, 31[6] 853-59 (2001).

55. L. Barcelo, M. D. Thomas, K. Cail, A. Delagrave, and B. Blair, "Portland Limestone Cement Equivalent Strength Explained," *Concrete international*, 35[11] 41-47 (2013).
56. H. El-Didamony, T. Salem, N. Gabr, and T. Mohamed, "LIMESTONE AS A RETARDER AND FILLER IN LIMESTONE BLENDED CEMENT," *Ceramics-Silikáty*, 39[1] 15-19 (1995).
57. M. Heikal, H. El-Didamony, and M. S. Morsy, "Limestone-filled pozzolanic cement," *Cement and Concrete Research*, 30[11] 1827-34 (2000).
58. R. Dhir, M. Limbachiya, M. McCarthy, and A. Chaipanich, "Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction," *Materials and Structures*, 40[5] 459-73 (2007).
59. K. Ezziane, E.-H. Kadri, A. Bougara, and R. Bennacer, "Analysis of mortar long-term strength with supplementary cementitious materials cured at different temperatures," *ACI Materials Journal*, 107[4] (2010).
60. H. Hornain, J. Marchand, V. Duhot, and M. Moranville-Regourd, "Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars," *Cement and Concrete Research*, 25[8] 1667-78 (1995).
61. M. D. Thomas, D. Hooton, K. Cail, B. A. Smith, J. de Wal, and K. G. Kazanis, "Field Trials of Concrete Produced with Portland Limestone Cement," *Concrete International*, 32[01] (2010).
62. A. A. Ramezaniapour, E. Ghiasvand, I. Nickseresht, M. Mahdikhani, and F. Moodi, "Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes," *Cement and Concrete Composites*, 31[10] 715-20 (2009).
63. T. Vuk, R. Gabrovšek, and V. Kaučič, "The influence of mineral admixtures on sulfate resistance of limestone cement pastes aged in cold MgSO₄ solution," *Cement and Concrete Research*, 32[6] 943-48 (2002).
64. S. T. Lee, R. D. Hooton, H.-S. Jung, D.-H. Park, and C. S. Choi, "Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature," *Cement and concrete research*, 38[1] 68-76 (2008).
65. T. Schmidt, B. Lothenbach, M. Romer, J. Neuenschwander, and K. Scrivener, "Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements," *Cement and Concrete Research*, 39[12] 1111-21 (2009).
66. G. Cochet and B. Jesus, "DIFFUSION OF CHLORIDE IONS IN PORTLAND CEMENT FILLER MORTARS," in BLENDED CEMENTS IN CONSTRUCTION. PAPERS PRESENTED AT THE INTERNATIONAL CONFERENCE, UNIVERSITY OF SHEFFIELD, UK, 9-12 SEPTEMBER 1991.
67. R. Ranc, M. Moranville-Regourd, G. Cochet, and G. Chaudouard, "Durability of cements with fillers," *ACI Special Publication*, 126 1239-58 (1991).
68. J. Matthews, "Performance of limestone filler concrete." in Euro-cements: Impact of ENV 197 on concrete construction. E FN Spon, London, 1994
69. A. A. Hassan, M. Lachemi, and K. M. Hossain, "Effect of metakaolin and silica fume on rheology of self-consolidating concrete," *ACI Materials Journal*, 109[6] (2012).
70. V. M. Malhotra and G. G. Carette, "Silica fume - A pozzolan of new interest for use in some concretes " pp. 443-46. in Concrete Construction, Vol. May. 1982.
71. ACI, "ACI 234R Guide for the use of silica fume in concrete." in. ACI, 2006.
72. H. Toutanji, L. Liu, and T. El-Korchi, "The role of silica fume in the direct tensile strength of cement-based materials," *Materials and Structures*, 32[3] 203-09 (1999).
73. B.-W. Jo, C.-H. Kim, G.-h. Tae, and J.-B. Park, "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles," *Construction and building materials*, 21[6] 1351-55 (2007).
74. M. Maage, "Strength and heat development in concrete: Influence of fly ash and condensed silica fume," *ACI Special Publication*, 91 923-40 (1986).
75. E. H. Kadri and R. Duval, "Effect of Silica Fume on the Heat of Hydration of High-Performance Concrete," *ACI Special Publication*, 199 635-44 (2001).
76. X. Cong, S. Gong, D. Darwin, and S. L. McCabe, "Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar, and Concrete," *ACI Materials Journal*, 89[4] (1992).
77. V. M. Malhotra, V. Ramachandra, R. Feldman, and P.-C. Aitcin, "Condensed silica fume in concrete." in., 1987.

78. A. Bentur, A. Golden, and M. D. Cohen, "The contribution of the transition zone to the strength of high quality silica fume concrete " pp. 97-103. in *Bonding in Cementitious Composites*, Vol. 114. Materials Research Society, Pittsburgh, 1978.
79. K. Kjellsen, O. Wallevik, and M. Hallgren, "On the compressive strength development of high-performance concrete and paste—effect of silica fume," *Materials and Structures*, 32[1] 63-69 (1999).
80. P. C. Aïtcin, "High Performance Concrete," 1 ed. CRC Press: Boca Raton, (1998).
81. E.-H. Kadri, R. Duval, S. Aggoun, and S. Kenai, "Silica Fume Effect on Hydration Heat and Compressive Strength of High-Performance Concrete," *ACI Materials Journal*, 106[2] (2009).
82. I. Pane and W. Hansen, "Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions," *ACI Materials Journal*, 99[6] (2002).
83. H. Cheng-Yi and R. F. Feldman, "Hydration reactions in Portland cement-silica fume blends," *Cement and Concrete Research*, 15[4] 585-92 (1985).
84. A. Bentur and M. D. Cohen, "Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars," *Journal of the American Ceramic Society*, 70[10] 738-43 (1987).
85. F. De Larrard, "Influence of Mix Composition on Mechanical Properties of High-Performance Silica-Fume Concrete," *ACI Special Publication*, 132 (1992).
86. H. Al-Khayat, M. Haque, and N. Fattuhi, "Concrete carbonation in arid climate," *Materials and Structures*, 35[7] 421-26 (2002).
87. J. Yajun and J. Cahyadi, "Simulation of silica fume blended cement hydration," *Materials and Structures*, 37[6] 397-404 (2004).
88. M. V. Carette GG, "Mechanical properties, durability, and drying shrinkage of Portland cement concrete incorporating silica fume," pp. 3-13. in *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 5. ASTM International, 1983.
89. L. Agullo, B. Toralles-Carbonari, R. Gettu, and A. Aguado, "Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer—a study based on the Marsh cone test," *Materials and Structures*, 32[7] 479-85 (1999).
90. S. O. Folagbade, "Strength and hydration properties of cement combinations," *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5[8] 1593 (2013).
91. R. Oberholster, "Alkali-aggregate reaction in South Africa. Some recent developments in research," pp. 77-82 in *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction* (Eds. K. Okada, S. Nishibayashi and M. Kawamura), Kyoto.
92. M. H. Shehata, G. Adhikari, and S. Radomski, "Long-term durability of blended cement against sulfate attack," *ACI Materials Journal*, 105[6] (2008).
93. A. Costa and J. Appleton, "Chloride penetration into concrete in marine environment—Part I: Main parameters affecting chloride penetration," *Materials and Structures*, 32[4] 252-59 (1999).
94. M. D. Cohen and J. Olek, "Silica Fume in PCC: The Effects of Form on Engineering Performance," *Concrete International*, 11[11] 43-47 (1989).
95. D. Boubitsas and K. Paulou, "Self Compacting Concrete for Marine Environment," *TVBM-5048. LTH Byggnadsmaterial. Lund*, 55 (2000).
96. B. Persson, "Assessment of the chloride migration coefficient, internal frost resistance, salt frost scaling and sulphate resistance of self-compacting concrete: with some interrelated properties," *Report TVBM* (2001).
97. M. P. W. C. B. Casimir J. Bognacki and M. Joseph, "Rapid Chloride Permeability Testing," *Concrete International*, 32[05] (2010).
98. K. H. Khayat, P. Paultre, and S. Tremblay, "Structural performance and in-place properties of self-consolidating concrete used for casting highly reinforced columns," *ACI Materials Journal*, 98[5] (2001).
99. A. Hassan, K. Hossain, and M. Lachemi, "Behavior of full-scale self-consolidating concrete beams in shear," *Cement and Concrete Composites*, 30[7] 588-96 (2008).
100. H. Okamura, "Self-compacting high-performance concrete," *Concrete international*, 19[7] 50-54 (1997).
101. P. Bartos, M. Sonebi, and A. Tamimi, "Workability and rheology of fresh concrete: compendium of tests, Report of Rilem TC 145-WSM, Workability of special concrete mixtures." in. ISBN 2-912143-32-2, 2002.

102. M. Lachemi, K. Hossain, V. Lambros, P.-C. Nkinamubanzi, and N. Bouzoubaâ, "Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures," *Cement and Concrete Research*, 34[6] 917-26 (2004).
103. W. Grunewald, "The effect of viscosity agents on the characteristics of SCC," pp. 9-15 in Second North American Conference and Fourth International RILEM Symposium SCC., USA.
104. A. Poppe, "Influence of fillers on hydration and properties of self-compacting concrete," *Doctoral Thesis, Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University, Belgium* 240 (2004).
105. V. Ramachandran and C. Zhang, "Influence of CaCO₃ on hydration and microstructural characteristics of tricalcium silicate," *Il Cemento*, 83[3] 129-52 (1986).
106. J. Tragardh, "Microstructural features and related properties of self-compacting concrete," pp. 175-86 in *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm, Sweden 13-14 September 1999*.
107. P. Domone, "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete," *Cement and Concrete Composites*, 29[1] 1-12 (2007).
108. V. Boel, K. Audenaert, and G. De Schutter, "Chemical attack of SCC: Immersion tests and X-ray CT."
109. M. Uysal and K. Yilmaz, "Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete," *Cement and Concrete Composites*, 33[7] 771-76 (2011).
110. S. Assie, G. Escadeillas, and V. Waller, "Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability," *Construction and Building Materials*, 21[10] 1909-17 (2007).
111. P. Desnerck, V. Boel, B. Craeye, and P. Itterbeeck, "Mechanical Properties," pp. 15-71. in *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete*. Edited by H. K. Khayat and G. De Schutter. Springer International Publishing, Cham, 2014.
112. G. De Schutter, J. Gibbs, P. Domone, and P. J. Bartos, "Self-compacting concrete." Whittles Publishing, (2008).
113. A. Al-Tamimi and M. Sonebi, "Assessment of self-compacting concrete immersed in acidic solutions," *Journal of materials in civil engineering*, 15[4] 354-57 (2003).
114. A.-M. Poppe and G. De Schutter, "Cement hydration in the presence of high filler contents," *Cement and Concrete Research*, 35[12] 2290-99 (2005).
115. J. Trägårdh, F. Bellmann, G. De Schutter, and K. Audenaert, "4.3 Sulphate attack," *Durability of Self-Compacting Concrete-State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 205-DSC* 89-118 (2007).
116. R. Loser and A. Leemann, "Chloride resistance of conventionally vibrated concrete and self-compacting concrete," pp. 747-52 in *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Ghent.
117. W. Zhu and P. J. Bartos, "Permeation properties of self-compacting concrete," *Cement and Concrete Research*, 33[6] 921-26 (2003).
118. P. Rougeau, J. Maillard, and C. Mary-Dippe, "Comparative study on properties of self-compacting and high performance concrete used in precast construction," pp. 251-61 in *International RILEM symposium on self-compacting concrete*.
119. K. Raghavan, S. Sarma, and D. Chattopadhyay, "Creep, Shrinkage and Chloride Permeability Properties of Self-Consolidating Concrete," pp. 307-12 in *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete 12-13 November 2002*.
120. B. Persson, "Chloride migration coefficient of self-compacting concrete," *Materials and Structures*, 37[2] 82-91 (2004).
121. Y. Senhadji, G. Escadeillas, M. Mouli, and H. Khelafi, "Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar," *Powder Technology*, 254 314-23 (2014).
122. R. T. Committee, "Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete," *Materials and Structures*, 41[2] 225-33 (2008).
123. M. Cyr and M. Mouret, "Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: consequences on self-compacting concrete design," *ACI Special Publication*, 217 (2003).
124. O. J. Keifer, "Paving with Roller Compacted Concrete," *Concrete Construction* 287-97 (1986).

125. G. E. Halsted, "Roller compacted concrete pavements for Highways and streets " pp. 15. in Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada- Transportation in a Climate of Change. 2009.
126. J. Marchand, R. Gagne, E. Ouellet, and S. Lepage, "Mixture proportioning of roller compacted concrete-a Review," *ACI Special Publication*, 171 (1997).
127. B. Bock, "RCC paving record set.Publication N C890373," pp. 3. in The Aberdeen Group. 1989.
128. Synergie, "BCR et transport routier- Le souci de l'excellence " pp. 1-8. in, Vol. 3(3) 2004.
129. C. R. Tull, " RCC live! Continues to impress. From: Concrete Construction. WOC Digital. In: <http://www.concreteconstruction.net>. Consulted March 2015. ," (2014).
130. W. S. Adaska, "Roller compacted concrete pavements- Fifty years of progress," *Concrete Construction* (2006).
131. ACI, "ACI 325.10R95 State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements American Concrete Institute." in Manual of Concrete Practice, Part 1. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1995.
132. H. K. Khayat, "Roller compacted concrete- Field evaluation and mixture performance. NUTC R363 Report," pp. 118. in. Missouri University, 2014.
133. N. Pouliot, T. Sedran, F. de Larrard, and J. Marchand, "Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire," *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*[233] 23-36 (2001).
134. T. R. Naik, Y.-M. Chun, R. N. Kraus, S. S. Singh, L.-L. C. Pennock, and B. W. Ramme, "Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 6[4] 154-65 (2001).
135. W. R. Malish, "(1988) Roller compacted concrete pavements- Watch for more use in highways and streets. Publication N C880013," pp. 3. in. The Aberdeen Group, 1988.
136. K. L. Saucier, "Roller compacted concrete," pp. 567-76. in ASTM STP 169C- Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials. ASTM, 1994.
137. W. D. Palmer, "RCC- Then and now. From: Concrete Construction Road Building. In: <http://www.theconcreteproducer.com>," (2014).
138. C. Hazaree, H. Ceylan, K. Wang, and I. Al-Kadi, "Optimizing mix proportions of roller compacted concrete for pavement applications in Indian conditions " pp. 443-556 in Proceedings of the 2006 Airfield and Highway Pavements.
139. PCA, "Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements." Portland Cement Association, (1987).
140. A. Yerramala and K. G. Babu, "Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete," *Cement and Concrete Composites*, 33[10] 1057-62 (2011).
141. N. Banthia, M. Pigeon, J. Marchand, and J. Boisvert, "Permeability of roller compacted concrete," *Journal of materials in civil engineering*, 4[1] 27-40 (1992).
142. M. Pigeon and J. Marchand, "Frost resistance of roller-compacted concrete," *Concrete International*, 18[7] (1996).
143. C. Hazaree, H. Ceylan, and K. Wang, "Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC," *Construction and Building Materials*, 25[1] 313-19 (2011).
144. A. Mardani-Aghabaglou, Ö. Andiç-Çakir, and K. Ramyar, "Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method," *Cement and Concrete Composites*, 37 259-66 (2013).
145. W. Palmer, "Roller Compacted Concrete Shows Paving Potential," *Roads & Bridges, Scranton Gillette Communications Inc., Des Plaines, IL, USA, Sept* 40-43 (1987).
146. J. Marchand, M. Pigeon, J. Boisvert, H. Isabelle, and O. Houdusse, "Deicer salt scaling resistance of roller-compacted concrete pavements containing fly ash and silica fume," *ACI Special Publication*, 132 (1992).
147. M. Pigeon and V. M. Malhotra, "Frost resistance of roller-compacted high-volume fly ash concrete," *Journal of materials in civil engineering*, 7[4] 208-11 (1995).
148. S. Ragan, "THE USE OF AIR ENTRAINMENT TO ENSURE THE FROST RESISTANCE OF ROLLER-COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS. IN: DURABILITY OF CONCRETE.

- SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE. AUGUST 4-9, 1991, MONTREAL, CANADA. VOLUME I," in DURABILITY OF CONCRETE. SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE. Vol. 1.
149. R. Piggott and R. Serne, "Roller Compacted Concrete—A Permanent Pavement for Today and the Future,," pp. 115-28 in Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Supplementary Papers
 150. D. M. Brett, "RCC pavements in Tasmania, Australia," in International Workshop on Roller Compacted Concrete Pavements, 1988, Melbourne, Australia.
 151. D. B. Rindal and G. Horrigmoe, "High quality roller compacted concrete pavements," pp. 913-20 in Utilization of High Strength Concrete. Vol. 2.
 152. É. Ouellet, "Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau " . in, Vol. Mémoire de maîtrise ès sciences. Université Laval, Canada, 1999.
 153. M. Nili and M. Zaheri, "Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements," *Construction and Building Materials*, 25[4] 1671-76 (2011).
 154. D. R. Luhr, "Frost durability of roller compacted concrete pavements- Research synopsis. www.cement.org/pavements " 4 (2006).
 155. F. Vahedifard, M. Nili, and C. L. Meehan, "Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement," *Construction and Building Materials*, 24[12] 2528-35 (2010).
 156. J. P. Donegan, " Roller compacted concrete " pp. 481-85. in ICE manual of highway design and management. Institution of Civil Engineers, 2011.
 157. N. Ghafoori and Y. Cai, "Laboratory-Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash: Part II? Long-Term Durability," *ACI Materials Journal*, 95[3] (1998).
 158. N. Ghafoori and Z. Zhang, "Sulfate resistance of roller compacted concrete," *ACI Materials Journal*, 95[4] (1998).
 159. S. I. Sarsam, A.-R. Abeer, and S. D. Tawfeek, "Assessing the Impact of Cement Content and Type on the Durability of Roller Compacted Concrete Using NDT," *Article Author (s) page* 48 (2014).
 160. M. Zhang, J. Chen, Y. Lv, D. Wang, and J. Ye, "Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate-chloride ions," *Construction and Building Materials*, 39 26-32 (2013).
 161. ACI, "ACI 211: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete," *American Concrete Institute* (1991).
 162. G. F. Kheder and R. S. ALJadiri, "New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements," *ACI materials journal*, 107[5] 490-97 (2010).
 163. R. Gagné, "Proportioning for Non-Air-Entrained RCCP," *Concrete International*, 21[5] 37-41 (1999).
 164. EFNARC, "The European guidelines for self compacting concrete-Specification, Production and Use " (2005).
 165. AASHTO/ASTM, "AASHTO T 22-14 ASTM C39/C39M-05: Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." in. The American Association of State Highway and Transportation Officials., 444 North Capitol Street N.W., Suite 249 Washington, D.C. 20001, 2014.
 166. ASTM, "ASTM D 1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), " pp. 124-30. in. ASTM, 1991.
 167. T. Gonen and S. Yazicioglu, "The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete," *Construction and Building Materials*, 21[5] 1040-45 (2007).
 168. C. Tasdemir, "Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete," *Cement and Concrete Research*, 33[10] 1637-42 (2003).
 169. AFNOR, "EN 197-1: Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements " *AFNOR* (2000).
 170. AFNOR, "EN 196-1: Méthodes d'essais des ciments—Partie 1: détermination des résistances mécaniques " *AFNOR* (2006).
 171. T. Sedran, "Rheologie et rheometrie des betons: Application aux betons autonivelants," *Doctorate Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées* (1999).

172. B. El-Jazairi and J. Illston, "A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes," *Cement and Concrete Research*, 7[3] 247-57 (1977).
173. E. H. Atlassi, "Nonevaporable water and degree of cement hydration in silica fume-cement systems," *ACI Special Publication*, 153 (1995).
174. J. I. Bhatti and K. J. Reid, "Use of thermal analysis in the hydration studies of a type 1 portland cement produced from mineral tailings," *Thermochimica acta*, 91 95-105 (1985).
175. Y. Cao, "Hydration and microstructure of cements containing silica fume or slag cured at different temperatures," (1994).
176. I. Pane and W. Hansen, "Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis," *Cement and concrete research*, 35[6] 1155-64 (2005).
177. S. SEKI, K. Kasahara, T. Kuriyama, and M. Kawasumi, "RELATIONSHIP BETWEEN COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE AND THE EFFECTIVE CEMENT-WATER RATIO CALCULATED FROM THE HYDRATION RATE OF CEMENT," *Am Concrete Inst Journal & Proceedings* (1969).
178. K. Ingram, M. Poslusny, K. Daugherty, and W. Rowe, "Carboaluminate reactions as influenced by limestone additions," pp. 14-23. in Carbonate additions to cement, ASTM STP 1064. Edited by R. D. P.Klieger and Hooton. American Society of Testing and Materials, philadelphia, 1990.
179. E. A. Kishar, D. A. Ahmed, and M. R. Mohammed, "Hydration of Portland cement in presence of silica fume," *Advances in Cement Research*, 22[3] 143-48 (2010).
180. S. Assié, "Durabilité des bétons auto-plaçants." in. Toulouse, INSA, 2004.
181. L. A. P. De Oliveira, J. P. de Castro Gomes, and C. N. G. Pereira, "Study of sorptivity of self-compacting concrete with mineral additives," *Journal of civil engineering and management*, 12[3] 215-20 (2006).
182. N. Ghafoori and Z. Zhang, "Sulfate resistance of roller compacted concrete," *Materials Journal*, 95[4] 347-55 (1998).
183. R. Hooton, "Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity," *ACI Materials Journal*, 90[2] 143-51 (1993).
184. O. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, and S. Abduljauwad, "Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements," *Magazine of Concrete Research*, 46[167] 113-23 (1994).
185. L. Heller and M. Ben-Yair, "Effect of sulphate solutions on normal and sulphate-resisting portland cement," *Journal of Applied Chemistry*, 14[1] 20-30 (1964).
186. F. Locher, "Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulphate attack," pp. 328-35 in Proceedings of 5th international symposium on the chemistry of cement, supplementary paper III-124. . Vol. 3.
187. B. Tian and M. D. Cohen, "Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?," *Cement and Concrete Research*, 30[1] 117-23 (2000).
188. P. Mehta, "Mechanism of expansion associated with ettringite formation," *Cement and Concrete Research*, 3[1] 1-6 (1973).
189. I. Sirisawat, L. Baingam, W. Saengsoy, P. Krammart, and S. Tangtermsirikul, "Sodium and Magnesium Sulfate Resistance of Mortars with Interground Limestone and Limestone Powder Replacing Cements," *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12[10] 403-12 (2014).
190. R. Hooton, "Effects of carbonate additions on heat of hydration and sulfate resistance of Portland cements," pp. 73-81. in Carbonate additions to cement, 1064 ASTM STP. Edited by P. Klieger and R. Hooton. American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
191. E. H. Kadri and R. Duval, "Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars," *ACI Materials Journal*, 99[2] 138-42 (2002).
192. V. Rahhal, E. Irassar, M. Trezza, and V. Bonavetti, "Calorimetric characterization of Portland limestone cement produced by intergrinding," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109[1] 153-61 (2012).
193. D. M. Roy and G. M. Idorn, "Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete," *ACI Journal*, 79[6] 444-57 (1982).
194. D. Double and A. Hellawell, "The Solidification of Cement," *Scientific American*, 237 82-90 (1977).
195. A. Bazzoni, K. Scrivener, and M. Cantoni, "Study of Early Hydration Mechanisms of Cement by Means of Electron Microscopy," *Ph.D. Thesis, EPFL* (2014).

196. R. Hooton, M. Nokken, and M. Thomas, "Portland-limestone cement: state-of-the-art report and gap analysis for CSA A 3000," *Cement Association of Canada. University of Toronto* (2007).
197. R. Bleszynski, R. Hooton, M. Thomas, and C. Rogers, "Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies," *ACI Materials Journal*, 99[5] 499-508 (2002).
198. M. Baalbaki, S. Sarker, P. Aitcin, and H. Isabelle, "Properties and microstructure of high-performance concretes containing silica fume, slag and fly ash," *ACI Special Publication*, 132 921-42 (1992).
199. T. Sato and J. Beaudoin, "Effect of nano-CaCO₃ on hydration of cement containing supplementary cementitious materials," *Advances in cement research*, 23[1] 33-43 (2011).
200. C. Hall and T. K.-M. Tse, "Water movement in porous building materials—VII. The sorptivity of mortars," *Building and Environment*, 21[2] 113-18 (1986).
201. H. M. Jennings, "A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste," *Cement and Concrete Research*, 30[1] 101-16 (2000).
202. P. Barnes and J. Bensted, "Structure and performance of cements." CRC Press, (2002).
203. E. Berodier and K. Scrivener, "Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H," *Journal of the American Ceramic Society*, 97[12] 3764-73 (2014).
204. K. L. Scrivener and A. Nonat, "Hydration of cementitious materials, present and future," *Cement and concrete research*, 41[7] 651-65 (2011).
205. Z. Liu, X. Li, D. Deng, G. De Schutter, and L. Hou, "The role of Ca(OH)₂ in sulfate salt weathering of ordinary concrete," *Construction and Building Materials*, 123 127-34 (2016).
206. Y. Farnam, T. Washington, and J. Weiss, "The Influence of Calcium Chloride Salt Solution on the Transport Properties of Cementitious Materials," *Advances in Civil Engineering*, 2015[Article ID 929864] 1-12 (2015).
207. M. S. Meddah and A. Tagnit-Hamou, "Pore Structure of Concrete with Mineral Admixtures and Its Effect on Self-Desiccation Shrinkage," *Materials Journal*, 106[3] 241-50 (2009).
208. A. Kanellopoulos, M. F. Petrou, and I. Ioannou, "Durability performance of self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, 37 320-25 (2012).
209. A. Pavoine, D. Harbec, T. Chaussadent, A. Tagnit-Hamou, and L. Divet, "Impact of Alternative Cementitious Material on Mechanical and Transfer Properties of Concrete," *Materials Journal*, 111[3] 251-62 (2014).
210. S. Zhang and L. Zong, "Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 (2014).