

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique

Département : Génie civil
Laboratoire Construction et Environnement



MEMOIRE DE MAGISTER

Option : Matériaux

Présenté Par

Mr : Zakaria SKENDER
Ingénieur d'état en génie civil de C. U. Médéa

Thème

**DURABILITE DU BETON A BASE DE
SABLE DE CONCASSAGE**

Devant le jury composé de :

Mr : BOUABDALLAH Mabrouk	Professeur, ENSP	Président
Mr: BALI Abderahim	Professeur, ENSP	Directeur
Mr: KENAI Said	Professeur, U. Blida	Directeur
Mme : KETTAB Ratiba	Maître de conférence, ENSP	Examineur
Mr : MENADI Bellkacem	Maître de conférence, U. Blida	Examineur
Mr :BOUTEMEUR Ramdane	Chargé de cours, ENSP	Examineur
Mr SAYAH Djellil Mohamed	PDG, ENG	Invité

Alger, 2009

ملخص

عرفت الجزائر في العشرية الأخيرة تطورا هاما في ميدان بناء العمارات و الأشغال العمومية، الأمر الذي أدى إلى زيادة ملحوظة في استهلاك المواد الحجرية، زيادة على ذلك منع استعمال رمال الشواطئ و الأودية لأسباب تقنية و بيئية، الشيء الذي ساهم إلى فقر في مادة الرمل وخاصة في المنطقة الوسطى للبلاد، إن استعمال رمال المحاجر باستطاعة المساهمة في تغطية العجز المطروح في مادة الرمل، لكن هذا الأخير يحتوي على نسبة عالية (من ٨ % إلى ٣٠ %) من المواد الناعمة (التي يقل قطرها عن ٨٠ μm) أي تفوق ما تقبله المواصفات التقنية. هناك بعض الدراسات السابقة بينت إمكانية استعمال رمل المحاجر لتصنيع الخرسانة مع إضافة المواد الناعمة تصل إلى ١٥% بدون تأثير على الخصائص الميكانيكية. في حين القليل من الدراسات التي أنجزت على ديمومة الخرسانة المصنوعة برمل المحاجر. إن الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هي تحليل ديمومة الخرسانة مصنوعة برمل المحاجر وهذا عن طريق تجارب النفاذية (الماء و الغاز و شوارد الكلور) إضافة لمقاومته ضد الكبريتات و الأحماض، الدراسة التطبيقية خصت باستعمال نوع واحد فقط من رمل المحاجر مع إضافة نسب مختلفة من المواد الناعمة (٠ %، ٥ %، ١٥ % و ٢٥ %) و خلطه باستعمال ثلاثة أنواع من الاسمنت.

إن نتائج هذه الدراسة قد أكدت نتائج الدراسات السابقة في إمكانية استعمال رمل المحاجر لصنع الخرسانة الموجهة لإنجاز منشآت عادية مع إضافة المواد الناعمة بنسبة تصل إلى 15% بدون تأثير على الخصائص الميكانيكية، لكن دراسة الديمومة قلصت من إمكانية استعمال رمل المحاجر و خاصة بالنسبة للمنشآت الموجهة لأوساط القاسية.

مفاتيح: مواد ناعمة كلسية، رمل المحاجر، مقاومة الضغط، الديمومة، النفاذية، الكبريتات، الاحماض.

RESUME

L'Algérie a connu un développement considérable dans le domaine de la construction du bâtiment et des travaux publics durant la dernière décennie, ceci a engendré un accroissement important de la consommation de granulats. En plus, l'interdiction d'utilisation des sables alluvionnaires pour des raisons techniques et environnementales, a contribué au manque de sable principalement dans la région centre du pays. L'utilisation du sable de concassage peut contribuer à combler le déficit en sable. Cependant le sable de concassage contient un pourcentage élevé (8 à 30 %) de fines (éléments inférieurs à 80 μm), qui dépasse les exigences des normes en vigueur. Des études antérieures ont montré la possibilité d'utilisation du sable de concassage contenant jusqu'à 15% de fines pour la fabrication du béton sans affecter ses performances mécaniques. Cependant, quelques études seulement ont été réalisées sur la durabilité d'un tel béton. L'objectif principal de cette étude est l'analyse de la durabilité de ce béton par des essais de perméabilité (eau, gaz et ions chlorés) ainsi que l'étude de sa résistance aux sulfates et aux acides. L'étude expérimentale est basée sur un sable concassé contenant différents pourcentages de fines de 0%, 5%, 15% et 25 % et testé avec trois types de ciment.

Les résultats obtenus à partir de cette étude ont confirmé les résultats antérieurs sur la possibilité d'utilisation du sable de concassage pour la confection du béton destiné à la réalisation des ouvrages ordinaires avec un taux de fines allant jusqu'à 15 % sans affecter ses propriétés mécaniques, mais l'analyse de la durabilité a limité son utilisation particulièrement pour les ouvrages en environnements agressifs.

Mots clés : Fines calcaires, Sable concassé, Résistance à la compression, Durabilité, Perméabilité, sulfates, acides.

ABSTRACT

Algeria experienced a considerable development in the field of the building construction and public works during the last decade; this generated a considerable increase in the consumption of aggregates. Moreover, the prohibition of use of the stream sands for technical and environmental reasons, contributed to the lack of sand mainly in the center region of the country. The use of the crushed sand can contribute to make up the sand deficit. However the crushed sand contains a high percentage (8 to 30 %) of fines (elements lower than 80 μm), which exceed the requirements of the existing standards. Former studies showed the potential use of the crushed sand up to 15% of fines for the manufacture of concrete without affecting its mechanical performances. However, few studies were realized on the durability of the concrete based on the crushed sand. The main objective of this study is the analysis of the durability of the concrete containing crushed sand using permeability tests (water, gas and ions chlorines) as well as the study of its resistance to sulphates and acids. The experimental study is based on a crushed sand containing various percentages of fines of 0%, 5%, 15% and 25 % and tested with three types of cement.

The results obtained from this study confirmed the former results on the potential use of the crushed sand for the production of concrete for the realization of the ordinary works with a rate of fine up to 15 % without affecting its mechanical properties, but the analysis of durability limited its use particularly for the works in an aggressive environment.

Key words: Fine limestone, Sand crushed, Compressive strength, Durability, Permeability, sulphates, acids.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené au sein du laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à mes promoteurs Dr Bali Abderahim, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique et Dr KENAI Said, Professeur à l'université SAAD DAHLEB de Blida, pour m'avoir dirigés dans ces travaux de recherche, je les remercie également pour leurs remarques pertinentes et constructives.

Je souhaite ensuite remercier mes examinateurs de mémoire qui m'ont fait honneur d'accepter d'être membres de jury :

Monsieur BOUABDALLAH Mabrouk, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique président de jury.

Madame KETTAB Ratiba Maître de conférence à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique examinatrice.

Monsieur MENADI Bellkacem Maître de conférence, Université de Blida examinateur

Monsieur BOUTEMEUR Ramdane Chargé de cours à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique examinateur.

Monsieur SAYAH Djellil Mohamed Président Directeur Général de L'Entreprise Nationale de granulats d'avoir accepté notre invitation.

Je remercie sincèrement les enseignants du département de Génie civil de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, particulièrement l'équipe de recherche du Laboratoire de Construction et Environnement

Je tiens à remercier également, Monsieur Chemlal noureddine chef de département du Génie civil de l'université de Blida de m'avoir autorisé à accéder au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil, Fortas Abdelkader laborantin du LGM de l'université de Blida pour m'avoir aidé dans mes travaux,

Je ne saurais oublier de saluer mes collègues de travail à la direction technique de l'A.P.C de Médéa, ainsi toute l'équipe de Génie civil de l'Université de Médéa.

J'exprime mes remerciements à l'ensemble des enseignants qui m'ont guidé durant ma carrière de formation.

Merci à tous.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très cher regretté père et ma très chère mère, qui n'ont cessé de m'aider, et de m'encourager dans toute ma vie

A ma très chère femme selma.

A ma très chère regrettée sœur Wahiba et son mari Mohamed.

A mes deux chers neveux Abdenour et Omar.

A tout mes frères et sœurs, Samia et son mari Mohamed et leur fille Ahlem.

A Djamila, Fatima, Abdelhafid et sa femme Fadila et leurs garçons et filles (Abderaouf, Hacem, Zineb, Romaissa et Baha-Eddine).

A Brahim et sa femme Leila et leurs petits Ismail et Bilal.

A Kamel et sa femme Amina et leurs petites (leila, Imane et Inass).

A Abdelhak et sa femme Nadia.

A Ayoub.

A tous mes amis.

A tous les scientifiques qui ont sacrifier leur vie pour la science.

SOMMAIRE

Résumé.	
Remerciements	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

Introduction Générale

Généralités	1
But de travail	2
Plan de travail	2

Chapitre. I Les ajouts cimentaires

I.1 Introduction	4
I.2 les ajouts cimentaires	4
I.2.1 Fumée de silice (D)	4
I.2.2 Les cendres volantes	5
a siliceuses (V)	5
b calcique (W)	5
I.2.3 Le laitier granulé du haut fourneau (S)	6
I.2.4 Schistes calcinées (T)	6
I.2.5 pouzzolanes naturelles (Z)	7
I.2.6 Les fillers	7
I.3 Les fillers calcaires (L)	8
I.4 Effet des fillers calcaire sur le béton à l'état frais	8
1.4.1 Ouvrabilité	8
1.4.2 Compacité	11
I.5 Effet des fillers calcaires sur le béton à l'état durci	12
I.5.1 Résistance à la compression	12
I.5.2 la résistance à traction	17

I.5.3 Module d'élasticité E	19
I.5.4 Retrait	21
I.6 Effet des fillers calcaire sur la durabilité	22
I.6.1 Porosité	23
I.6.2 Perméabilité à l'eau	24
I.6.3 Perméabilité au Gaz	26
I.6.4 Perméabilité aux ions de chlores	28
I.6.5 L'absorption	29
I.6.6 Résistance aux sulfates	29
I.7 Conclusion	33

Chapitre. II Matériaux Et Essais

II.1 Généralités	34
II.2 Matériaux Utilisés	34
II.2.1 Le Ciment	34
II.2.2 Les Granulats	36
a) Le Sable	36
b) Le Gravier	36
II.2.3 Caractérisation des matériaux	37
a) Granulométrie	37
b) Masse Volumique	37
c) Propreté du sable	38
d) Analyse chimique du sable	38
II.2.4 Eau de Gâchage	39
II.3 Composition et confection des éprouvettes	39
II.3.1 Composition et dosage du Béton	39
II.3.2 Préparation du béton	40
II.3.3 Confection des éprouvettes et conditionnement	40
II.4 Essais	41
II.4.1 Essais d'ouvrabilité	41
II.4.2 Essai de résistance à la compression	42
II.4.3 Essai de perméabilité à l'eau	42

II.4.4 Essai de perméabilité aux ions chlores	43
II.4.5 Essai de perméabilité au Gaz	46
II.4.6 Essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité)	47
II.4.7 Essai de résistance aux sulfates	48
II.4.8 Essai de résistance aux acides	49
II.5 Variables étudiées	50

Chapitre. III Analyse et interprétation des résultats Expérimentaux

III.1 Introduction	52
III.2 Béton frais	52
a) Ouvrabilité	52
III.3 Béton durci	53
III.3.1 Résistance à la compression	53
III.3.2 Perméabilité des bétons à l'eau	57
III.3.3 Perméabilité des bétons aux ions chlore	59
III.3.4 Perméabilité des bétons au Gaz	62
III.3.5 L'absorption des bétons (sorptivité)	65
III.3.6 Résistance aux sulfates	66
III.3.6.1 Aspect visuel	66
a) Eprouvettes conservées dans les sulfates de magnésium 5 %	
MgSO ₄	66
b) Eprouvettes conservées dans les sulfates de sodium 5%	
Na ₂ SO ₄	67
III.3.6.2 Perte de masse	71
III.3.7 Résistance aux acides	73
III.3.7.1 Aspect visuel	73
a) Eprouvettes conservées dans l'acide sulfurique 3% (H ₂ SO ₄)	
et l'acide chlorhydrique 3% (HCL)	73
III.3.7.2 Perte de masse	75
III.3.8 Conclusion	78
Conclusion Générale et perspectives	79
Références Bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Résistance à la compression des ciments avec ajout de laitier.	6
Figure 1.2 : Perméabilité aux ions chlore à 28 jours.	7
Figure 1.3 : Influence des Fillers calcaires sur la maniabilité des bétons.	9
Figure 1.4 : Compacité du mélange ciment / micro-filler calcaire.	11
Figure 1.5 : Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.	12
Figure1.6 : Résistance relative à la compression des mortiers avec fines calcaires.	13
Figure1.7 : Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie grosse, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S : Argile/Sable).	14
Figure1.8 : Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie fine, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S : Argile/Sable).	14
Figure1.9 : Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines	15
Figure1.10 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de l'ajout calcaire (100% H.R, 20°C).	15
Figure1.11 : Principe du comportement de l'ajout calcaire.	16
Figure1.12 : Variation de la résistance à la traction à 7 et 28 jours.	17
Figure1.13 : Résistance relative à la traction des mortiers avec fines calcaires.	18
Figure1.14 : Résistance à la traction des mortiers (dosage 250 kg/m ³).	18
Figure1.15 : Résistance à la traction des mortiers (dosage 325 kg/m ³).	19
Figure1.16 : Module d'élasticité du béton en fonction de l'âge.	20
Figure1.17 : Retrait des mortiers avec fines calcaires en fonction de l'âge.	21
Figure1.18 : Variation de retrait des mortiers et bétons en fonction des fines calcaires.	22
Figure I.19: Représentation schématique d'un solide poreux interconnecté perméable et un solides poreux imperméable	22
Figure1.20 : La porosité et l'absorption d'eau des mortiers.	23
Figure1.21 : Profondeur de la pénétration d'eau des différents bétons a 90jours	25
Figure1.22 : Effet d'ajout calcaire sur la perméabilité et la porosité du béton.	26
Figure1.23 : Effet d'ajout calcaire sur les propriétés du béton.	27
Figure1.24 : Pénétration des ions chlores des bétons après 45 jours d'immersion dans une solution avec 3% de NaCL.	28
Figure1.25 : Echantillons après 150 jours d'immersion dans une solution avec 5% de Na ₂ SO ₄	30
Figure1.26 : Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5 % de sulfate de sodium (Na ₂ SO ₄).	31

Figure 1.27 : Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5 % de sulfate de magnésium ($MgSO_4$).	31
Figure 1.28 : Expansion des mortiers après 360 jours d'immersion dans une solution de sulfate.	32
Figure 1.29 : Résistance à la compression des éprouvettes dans la solution de sulfate.	33
Figure 2.1 : Tamiseuse électrique utilisée pour la récupération des fines	36
Figure 2.2 : Courbes granulométriques des différents agrégats utilisés	37
Figure 2.3 : Proportions des granulats utilisés	39
Figure 2.4 : Malaxeur à béton de capacité 55 Litres	40
Figure 2.5 : Les éprouvettes préparées dans les moules sur la table vibrante	41
Figure 2.6 : Essai de l'ouvrabilité (Slump-Test)	41
Figure 2.7 : Essais de compression sur éprouvettes cubiques	42
Figure 2.8 : Essai de perméabilité de béton à l'eau	43
Figure 2.9 : Schéma représentatif du principe de fonctionnement de l'essai de perméabilité aux ions chlore	44
Figure 2.10: Photo de l'essai de perméabilité de béton aux ions chlore	45
Figure 2.11: Photo du spécimen soumis à la saturation	45
Figure 2.12: Photo de l'essai de perméabilité de béton au gaz	46
Figure 2.13: Schéma de l'essai d'absorption d'eau	47
Figure 2.14: Détermination de la sorptivité	48
Figure 2.15: Immersion des éprouvettes dans une solution sulfate de sodium 5% (Na_2SO_4)	49
Figure 2.16: Immersion des éprouvettes dans une solution sulfate de magnésium 5% ($MgSO_4$)	49
Figure 2.17: Organigramme récapitulatif des différents essais réalisés	51
Figure 3.1 : Effet des fines calcaires sur l'affaissement	53
Figure 3.2: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 60 jours	54
Figure 3.3: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 90 jours	54
Figure 3.4: Effet des fines calcaires et de l'âge sur la résistance à la compression des différents ciments utilisés	56
Figure 3.5: Effet des fines calcaires sur la pénétration d'eau relative des différents ciments utilisés	58

Figure 3.6: Effet des fines calcaires sur la pénétration d'eau des différents ciments utilisés	59
Figure 3.7: Effet de fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlores des différents ciments utilisés	60
Figure 3.8: Effet de fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlores relative des différents ciments utilisés	61
Figure 3.9 : Effet des fines calcaires sur le coefficient de perméabilité au gaz des différents ciments testés	62
Figure 3.10 : 10 Effet de fines calcaires sur la perméabilité au gaz relative des différents ciments testés	63
Figure 3.11 : Effet des fines calcaires sur le coefficient de sorptivité des différents ciments utilisés	65
Figure 3.12 : Etat des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% $MgSO_4$ pour les trois ciment utilisés	68
Figure 3.13 : Etat des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na_2SO_4 pour les trois ciment utilisés	69
Figure 3.14 : Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% $MgSO_4$	72
Figure 3.15 : Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na_2SO_4	72
Figure 3.16 : Eprouvettes après 90 jours d'immersion dans une solution d'acide sulfurique 3% (H_2SO_4)	73
Figure 3.17 : Eprouvettes après 90 jours d'immersion dans une solution d'acide chlorhydrique 3% (HCL)	74
Figure 3.18 : Effet des fines calcaires sur la perte de masse relative des différents ciments utilisés	76
Figure 3.19 : Effet des fines calcaires sur la perte de masse relative des différents ciments utilisés	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Influence des fines calcaires sur la maniabilité de béton.	8
Tableau 1.2: Les caractéristiques des fillers K, L, M.	9
Tableau 1.3: Affaissement des bétons en fonction du pourcentage de fines calcaires.	10
Tableau 1.4: Module d'élasticité relatif.	20
Tableau 1.5: La porosité et la taille moyenne des pores.	24
Tableau 1.6: Variation du coefficient de perméabilité à l'eau.	25
Tableau 2.1 : Essais physiques sur les ciments.	34
Tableau 2.2 : Composition chimique des ciments utilisés.	35
Tableau 2.3 : Composition minéralogique des ciments utilisés.	35
Tableau 2.4 : Masses volumiques des granulats utilisés	38
Tableau 2.5 : Equivalent de sable et Module de finesse du sable utilisé	38
Tableau 2.6 : Analyse chimique du sable utilisé	38
Tableau 2.7 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau	43
Tableau 2.8 : Echelle de Whiting pour l'essai de perméabilité aux ions chlorures tirée de la norme AASHT T277-831	44
Tableau 2.9 : Tableau récapitulatif de la formulation du béton et les différentes variables étudiées	50

Introduction générale

Introduction Générale

Généralités

L'Algérie, est un pays en voie de développement, connaissant une expansion démographique considérable qui a induit un besoin important dans le domaine de la construction, notamment les logements, les infrastructures et les équipements. En outre cette nécessité dans la construction des ouvrages de génie civil et travaux publics a provoqué durant les deux dernières décennies, un accroissement considérable concernant la demande et la consommation des granulats. Les entreprises de réalisation et notamment celles exerçant dans la région Centre, sont confrontées à une forte tension en matière d'approvisionnement en sable de construction. Cette tension constitue une véritable contrainte au développement de la construction et elle est due essentiellement à la raréfaction du matériau, la fermeture de certaines sablières, l'épuisement de certains gisements d'exploitation et la dégradation des sites d'exploitation. [47].

En conséquence, le gouvernement a promulgué deux décrets en 1991 et 1999 [48, 49] interdisant l'exploitation abusive des sables de mer et alluvionnaires, car l'exploitation anarchique de ces sables influe négativement sur les ressources naturelles, à savoir l'érosion des berges d'oueds.

Face à cette situation préoccupante, et devant la nécessité de mettre à la disposition du secteur de la construction les quantités de sable demandées, qui sont estimées à 25,1 millions de tonnes par an dont 9,1 millions de tonnes destinées au secteur des travaux publics pour la réalisation des routes et ouvrages d'art et 16 millions de tonnes destinées au secteur du bâtiment [3, 8]. Les sables de concassage issus des roches calcaires ont des propriétés mécaniques et physiques satisfaisantes et peuvent substituer partiellement ou totalement les sables alluvionnaires.

Il existe en Algérie, environ 1000 carrières de granulats avec une capacité de production allant de 10 à 400 tonnes par heure et une production annuelle totale de 68 millions de tonnes dont 47 % est destinée pour le secteur du bâtiment, 33 % pour le secteur des travaux publics. Ces carrières produisent 15 millions de tonnes de sable de concassage (sous-production ou déchets) qui représente 20 % de la production. [3, 8].

Ce sable n'est utilisé que partiellement dans la construction des routes comme les bordures de trottoirs, les dalles, les carreaux de carrelage et les tuyaux d'assainissement et rarement dans le béton, provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Ce type de sable contient un taux élevé de fines (éléments inférieurs à 80 μ m) qui varie entre 8 % et 30 % limitant ainsi son utilisation pour la fabrication du béton. Les normes internationales limitent le pourcentage des fines calcaires issues du sable concassé de 4% à 16% selon la norme.

Des études ultérieures [8, 12, 15, 22, 46] sur les propriétés mécaniques du béton à base de sable de concassage ont montré que la performance du béton n'est pas affectée négativement si le pourcentage des fines est limité à 15%. Cependant la durabilité du béton à base de sable de concassage dans des environnements agressifs (sulfates, acides,...) reste à étudier.

But de travail

La présente étude fait partie d'un projet global sur la valorisation des sables de concassage visant à analyser le comportement du béton à base de sable de concassage.

Cette étude a pour but de compléter les études ultérieures sur les propriétés mécaniques du béton à base de sable de concassage par une analyse de durabilité à court et à long terme. La durabilité du béton à base de sable de concassage est étudiée par des essais de perméabilité à l'eau, au gaz et aux ions chlorures ainsi que par des essais de résistance du béton aux sulfates et aux acides.

Le sable choisi d'origine calcaire provient de la carrière d'El hachimia (Bouira), il a été tamisé préalablement pour la séparation des fines. Le sable est substitué au laboratoire par des fines calcaires à des pourcentages de (0, 5, 15 et 25 %).

Trois types de ciment ont été utilisés dans cette étude : le premier est un ciment composé avec ajout calcaire provenant de la cimenterie de M'sila, le deuxième est un ciment également composé avec ajout calcaire provenant de la cimenterie de Chlef et le dernier est un ciment portland artificiel sans ajout provenant de la cimenterie de M'sila.

Plan travail

Après une introduction générale, le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les différents types d'ajouts et l'influence des fillers calcaires sur les

propriétés de durabilité du béton. Les matériaux utilisés et les essais effectués sont présentés dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre présente et discute les résultats expérimentaux obtenus. Enfin, des conclusions générales avec quelques recommandations pour de futurs travaux sont données.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique (les ajouts)

Chapitre. I Les ajouts

I.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente une synthèse bibliographique sur les différents types d'ajouts utilisés, et en particulier les fillers calcaire dans le sable de concassage et dans le ciment et leurs influences sur les propriétés du béton à l'état frais et durci. L'effet des fines calcaires sur la durabilité du béton sera aussi examiné.

I.2 les ajouts

Les ajouts sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment et parfois au béton dans le but de modifier certaines de leurs propriétés [1].

Selon la norme ENV 206 [37], il existe deux types d'additions :

- **Les additions de type I:** Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau...). Parmi ces additifs on distingue le calcaire et la poussière.
- **Les additions de type II:** Matériaux finement divisés à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés.

I.2.1 Fumée de silice (D)

La fumée de silice est un sous produit des usines de fabrication d'alliage de silicium et de ferrosilicium obtenu dans un four à arc électrique à partir de quartz de grande pureté et de charbon [2]. La fumée de silice est constituée de particules très fines, environ 100 fois plus petites que les grains de ciment ($SSB=2000 \text{ m}^2/\text{kg}$) [1]. La plupart ayant un diamètre compris entre 0.03 et 0.3 μm le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0.1 μm [2]. La fumée de silice présente des propriétés pouzzolaniques en raison de sa forte teneur en silice amorphe (vitreuse) et en raison de sa finesse, qui complète la granulométrie des ciments. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique de la fumée de silice.

L'ajout de la fumée de silice diminue la perméabilité et augmente la résistance aux sulfates [1, 2].

I.2.2 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont appelées cendres pulvérisées de combustible. Elles sont recueillies à partir des installations de dépoussiérage électrostatique ou mécanique des fumées de centrale thermique de charbon.

Les particules de cendres volantes sont sphériques et par conséquent avantageuses du point de vue de la demande en eau. Elles ont une finesse très élevée avec un diamètre compris entre (1 et 100 μm). Leurs surfaces spécifiques de Blaine sont généralement comprises entre 250 et 600 m^2/kg . Elles sont composées essentiellement de SiO_2 et Al_2O_3 [2]. Les principales exigences de la norme ASTM C 618 [38] concernent une teneur maximale de 70 % de silice, d'alumine, et d'oxyde de fer pris tous trois dans leur ensemble ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Le mélange avec le ciment donne un véritable liant car le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se combine avec le SiO_2 et Al_2O_3 des cendres. La présence des cendres volantes dans le béton réduit la quantité d'eau ce qui induit une amélioration de l'ouvrabilité cette dernière est habituellement attribuée à la forme sphérique des cendres volantes [2]. Les cendres volantes peuvent être siliceuses ou calciques.

a/ siliceuses (V)

Elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante faisant prise et durcissant par hydratation. Elles sont constituées de Silice SiO_2 réactive entre 40 et 50 % proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 % et d'alumine Al_2O_3 entre (20-30 %) environ, la proportion de la chaux réactive doit être inférieure à 5 % [1].

b/ calciques (W)

Ce sont des cendres volantes riches en chaux, c'est à dire ayant une teneur élevée de la chaux réactive supérieure à 5 % et elles peuvent parfois présenter une teneur en chaux allant jusqu'à 24 % [2]. En outre, leurs propriétés pouzzolaniques peuvent présenter des propriétés hydrauliques intrinsèques qui sont moins souvent utilisées [1].

Leur mélange avec le ciment donne un véritable liant; car le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se combine avec le SiO_2 et Al_2O_3 des cendres [2].

I.2.3 Le laitier granulé de haut fourneau (S)

Le laitier granulé de haut fourneau est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidie par aspersion d'eau. C'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de silice entre 25 et 35%, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. Tous ces éléments sont pratiquement les mêmes que ceux du clinker [1].

La présence du laitier dans le mélange de mortier de ciment ou béton permet d'avoir :

- un temps de prise plus long
- une faible chaleur d'hydratation
- une meilleure ouvrabilité
- une faible résistance à jeunes âges et une bonne résistance à long terme (Figure I.1).

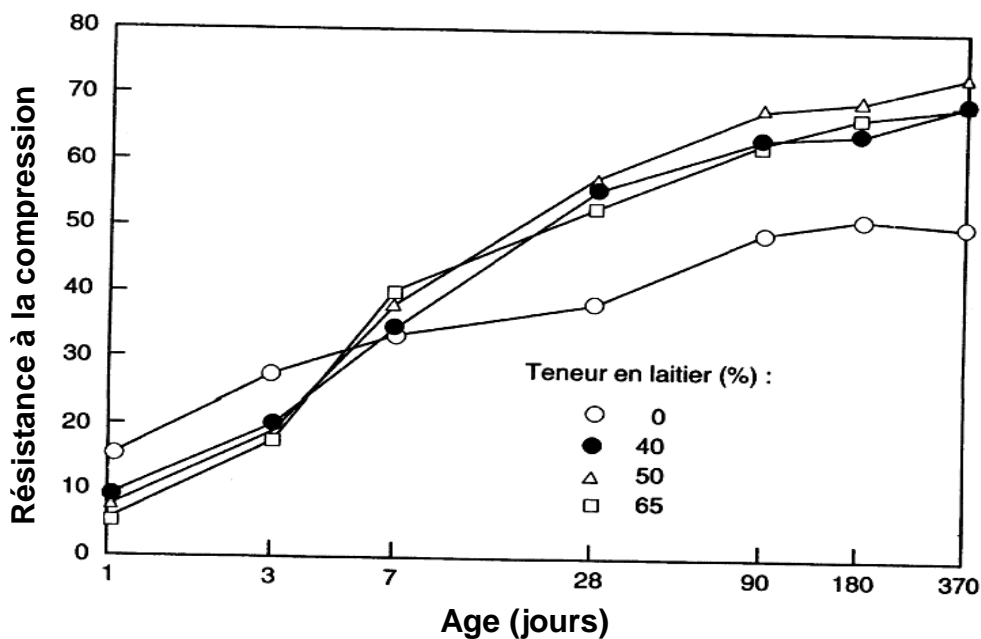


Figure I.1: Résistance à la compression des ciments avec ajout de laitier [13].

I.2.4 Schistes calcinés (T)

Les schistes calcinés sont issus de roches sédimentaires ou métamorphiques obtenus à des températures de l'ordre de 800°C. En outre leurs propriétés pouzzolaniques; présentent des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés [1].

I.2.5 pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont des produits naturels issus des roches volcaniques ou des roches sédimentaires, composés essentiellement de Silice $\text{SiO}_2 \geq 25\%$, Alumine Al_2O_3 , et oxyde ferrique Fe_2O_3 , La somme des trois oxydes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) doit être supérieure à 70% selon la norme ASTM C 618 [38]. Elles sont employées en cimenterie pour leurs propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire l'aptitude à fixer la chaux à la température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques pouvant faire prise et durcir par hydratation [2]. La pouzzolane permet d'améliorer l'imperméabilité des bétons aux ions chlores (Figure I.2) et une amélioration de la résistance aux acides et aux sulfates [7].

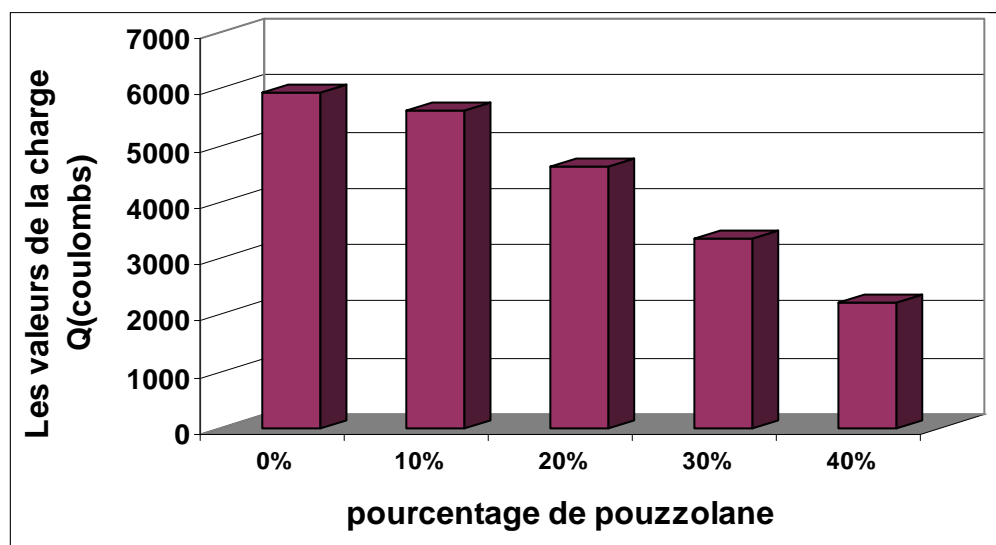


Figure I.2: Perméabilité aux ions chlore des bétons à 28 jours [7].

I.2.6 Les fillers

Les fillers sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, kieselguhr, bentonites, ...). Les fillers sont des matériaux généralement inertes; c'est-à-dire ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ils peuvent améliorer la maniabilité du ciment ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton [1]. Dans ce chapitre, une revue bibliographique détaillée est présentée sur les fillers calcaires.

I.3 Les fillers calcaires (L)

Le calcaire est utilisé dans la majorité des cimenteries algériennes, pour ses propriétés avantageuses; telles que la réduction du coût de fabrication, la protection de l'environnement et la réduction des émissions de CO₂. Dans cette partie on présente l'influence des fillers calcaires sur les propriétés du mortier et du béton.

Les fillers calcaires ajoutés au ciment doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO₃ supérieur à 75% en masse, une teneur en argile telle que l'absorption de bleu méthylène soit au plus de 1.2 g pour 100 g et une teneur en matière organique (T.O.C) au plus égale à 0.5 % [1].

I.4 Effet des fillers calcaires sur le béton a l'état frais

I.4.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton. Elle peut être définie comme la facilité offerte à sa mise en œuvre dans les ouvrages. Plusieurs appareils peuvent être utilisés pour mesurer l'ouvrabilité tels que le cône d'Abrams, l'essai d'étalement et le maniabilimètre LCPC [1].

De nombreuses études [10, 12, 15 et 16] ont montré que l'incorporation des fillers calcaires influe sur la maniabilité. Selon l'étude faite par KENAI et al [8] en variant le pourcentage des fillers calcaires dans le sable de concassage de 0, 5, 10, 15, 20 et 25 %, ils ont remarqué que l'eau de gâchage est proportionnelle à l'augmentation du pourcentage de fines calcaires (tableau I.1). Ils ont attribué cet effet à la grande surface spécifique, à la forme et à la texture des fines calcaires. Le même phénomène a été observé sur les mortiers testés par BONAVENTI, et al [5].

Tableau I.1: influence des fines calcaires sur la maniabilité de béton [8].

% des fines	0 %		5%		10%		15%		20%		25%	
	300	350	300	350	300	350	300	350	300	350	300	350
Ciments (kg/m³)	300	350	300	350	300	350	300	350	300	350	300	350
Sand (kg)	708	674	656	623	621	590	570	542	522	496	476	452
Fines (kg)	0	0	34	33	69	66	101	96	131	123	159	151
Gravel (kg)	1152	1145	1170	1163	1170	1163	1189	1181	1207	1200	1225	1216
W/C ratio	0.69	0.62	0.71	0.63	0.73	0.64	0.73	0.64	0.73	0.67	0.73	0.67
Slump (mm)	80	110	110	110	110	120	110	110	85	110	85	110

BERTRANDY, R [9] a effectué des essais sur trois bétons confectionnés avec trois types de fillers K, L et M. Le filler K est un filler de défillérisation de sable calcaire concassé; le filler L est obtenu artificiellement en incorporant au filler K des produits de broyage de calcaire argileux, et le filler M est un produit de broyage de roches marno-calcaires. Les caractéristiques de ces fillers sont résumées dans le tableau (I.2).

Tableau I.2: les caractéristiques des fillers K, L, M [9].

Caractère	Filler K	Filler L	Filler M
Surfaces spécifiques cm ² /g	4800	4200	5300
coefficient d'activité (C. A)	0.5	1	2

Le coefficient d'activité (C.A) de ces fillers ont été défini par la variation de l'équivalent de sable mesuré au piston d'un sable témoin lavé a fond en fonction de la quantité de fillers qui lui est incorporée. BERTRANDY a incorporé les fines avec un pourcentage de 0, 4 et 8 %, et la maniabilité a été mesurée par un maniabilimètre L C P C. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure I.3. .

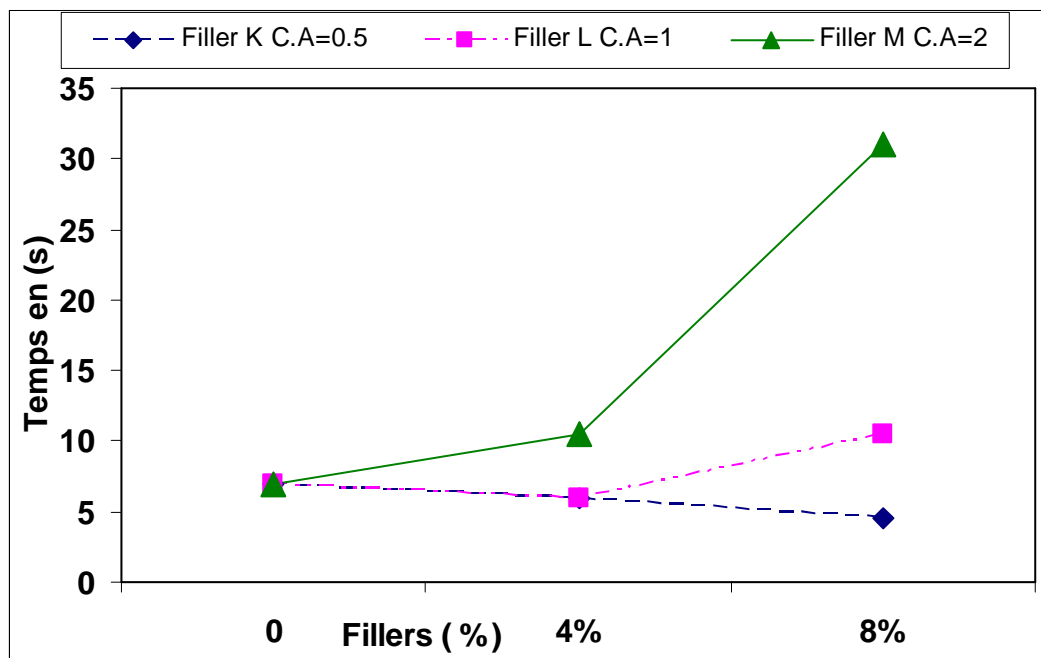


Figure I.3: Influence des Fillers calcaires sur la maniabilité des bétons [9].

Une amélioration de l'ouvrabilité du béton a été observée pour les fillers avec un coefficient d'activité $CA = 0.5$ et $CA = 1$ pour des taux de fines de 8 % et 4 % respectivement. Pour les fines avec $CA = 2$, il a été observé une diminution systématique de l'ouvrabilité avec l'augmentation du pourcentage des fines.

BERTRANDY, R [9] a conclu qu'avec des bétons de granulats calcaires concassés, il est indispensable d'avoir dans les sables une certaine proportion de fillers, car un lavage à fond les éliminera tous et donnera des produits médiocres conférant aux bétons une mauvaise maniabilité. L'étude effectuée sur mortiers et bétons a montré que pour un filler non actif ($CA=0.5$), l'optimum de la teneur en filler dans le béton se situe au delà de 8 %.

HABBOUCHE, A [22] a effectué des essais sur des bétons confectionnés avec trois types de sables de concassage et deux types de ciments. Il a incorporé les fines calcaires dans les sables avec un pourcentage de 0, 10, 15 et 20 %, et il a conclu que l'eau de gâchage varie proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage des fines calcaires.

MENADI et al [46] ont effectué des essais sur des bétons confectionnés avec du sable concassé contenant des fines calcaires, ils ont utilisé quatre types de ciments. Le premier ciment (A) est un ciment sans ajout dont le clinker a été broyé au laboratoire. Le deuxième ciment (B) est un ciment sans ajout provient de la cimenterie; Le troisième (C) et quatrième (D) ciments sont des ciments avec 15 % d'ajout calcaire. Ils ont observé une diminution systématique de l'affaissement pour les bétons contenant 15 % de fines calcaires substituées au sable de concassage par rapport aux bétons sans fines pour tous les types de ciments (Tableau I.3).

Tableau I.3: Affaissement des bétons en fonction du pourcentage de fines calcaires [46].

	Ciment A		Ciment B		Ciment C		Ciment D	
Mélange du béton	0%	15%	0%	15%	0%	15%	0%	15%
Slump (mm)	7.5	5.5	6	5.5	6.5	5.5	6	4

I.4.2 Compacité

La compacité est définie par le rapport de la densité apparente au poids spécifique. Plusieurs chercheurs [10, 13, 14 et 17], ont observé que l'incorporation des fines dans le mélange améliore la compacité par effet granulaire; c'est-à-dire l'aptitude de combler les vides laissés par les granulats. En 1996, CHANVILLARD et BASUYAUX [11] ont étudié les caractéristiques physiques d'un mélange ciment-microfiller calcaire. Ils ont montré que l'ajout de micro-filler calcaire permet d'augmenter la compacité de la pâte (Figure I.4).

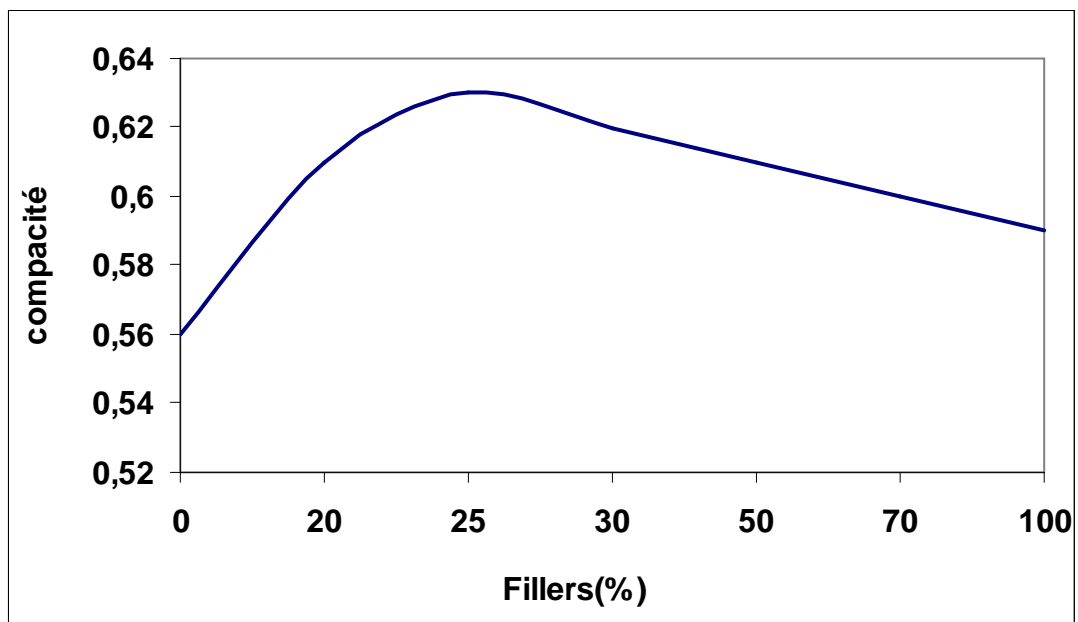


Figure I.4: Compacité du mélange ciment / micro-fillers calcaire [11].

Les essais effectués par BENNA, Y [12] ont montré que la masse volumique augmente rapidement pour un taux de fines allant de 0 % à 10 % puis s'accroît très faiblement entre 10 % et 25 %. Il a constaté que la compacité optimale est obtenue pour des pourcentages de fines allant de 10 % à 25 % (Figure I.5).

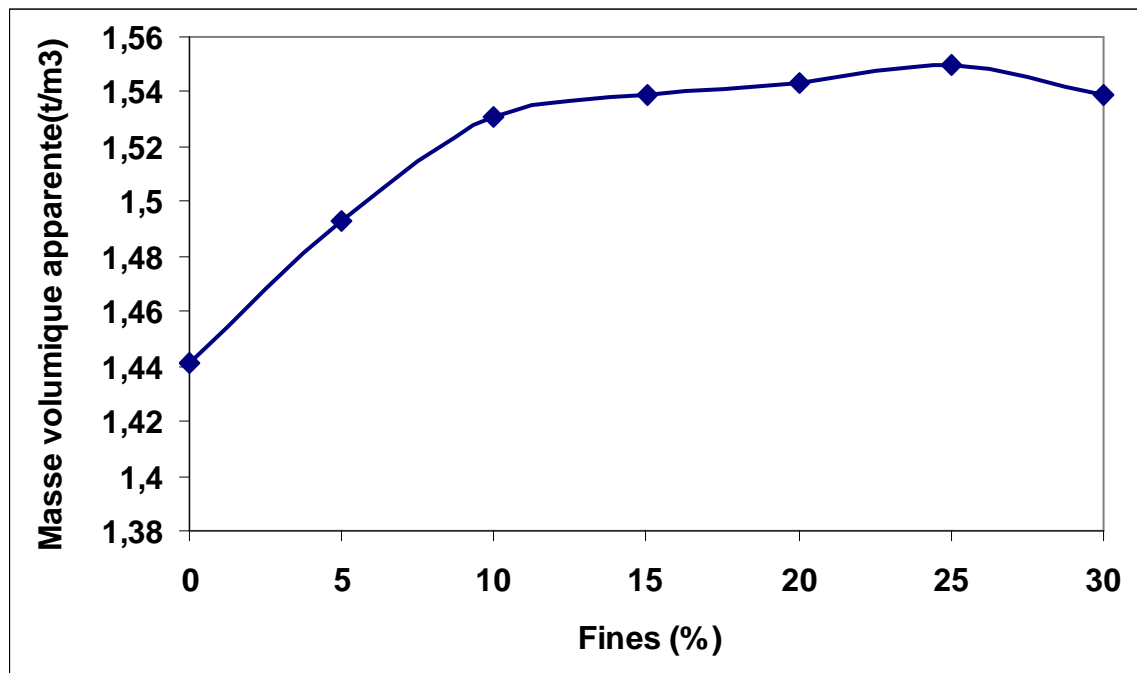


Figure I.5: Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines [12].

I.5 Effet des fillers calcaires sur le béton à l'état durci

I.5.1 Résistance à la compression

La présence des fines calcaires dans les mortiers et les bétons comme ajout dans le ciment peut modifier considérablement leurs résistances mécaniques. BONAVETI, et al [5] ont effectué des essais sur trois mortiers confectionnés avec trois types de fines (Quartz Q), (Granite G), et (Calcaire L) avec l'incorporation des pourcentages de 5, 10, 15 et 20 % en poids de ciment. Ils ont remarqué que les mortiers contenant des fines calcaires, présentent une augmentation de la résistance à la compression de 44 % à 72 % à jeunes âges (7 jours) (Figure I.6).

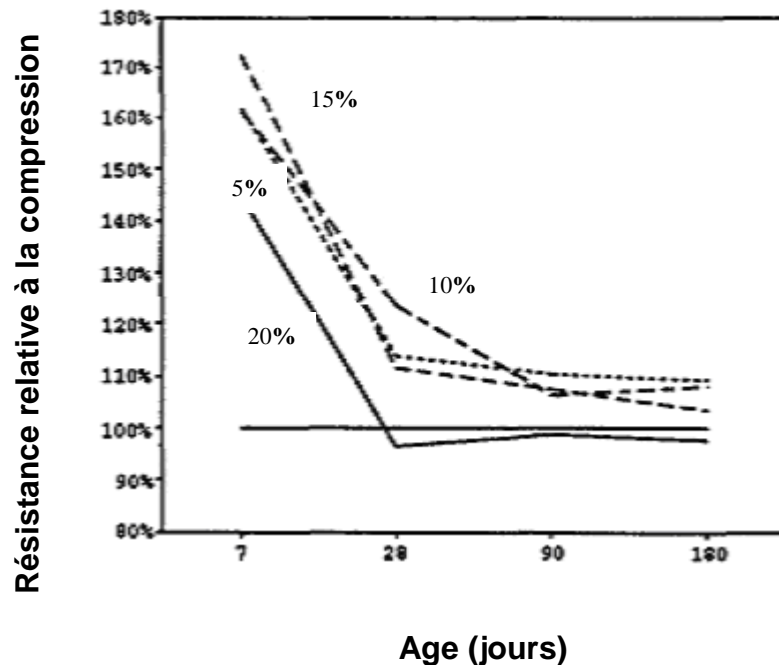


Figure I.6: Résistance relative à la compression des mortiers avec fines calcaires [5].

RAMIREZ et al [19] ont effectué des essais sur des mortiers confectionnés avec des sables de granulométrie grossière et fine avec un pourcentage de fines de 3 %, 5 %, 8 %, 12 % et 15 % ou 3 %, 8 %, 12 %, 15 % et 20 %, respectivement avec des teneurs d'argile dans le sables (A/S) de 0, 2, 4 et 6 %. Ils n'ont remarqué, pour un pourcentage de fines de 20 %, aucun changement de tendance. Par contre un accroissement de la résistance à la compression en présence des fines variant entre 3 % et 20 % en absence d'argile pour les deux types de granulométrie grossière et fine. L'augmentation de la proportion d'argile dans le sable a induit une chute de la résistance à la compression des mortiers de façon importante (Figures I.7 et I.8).

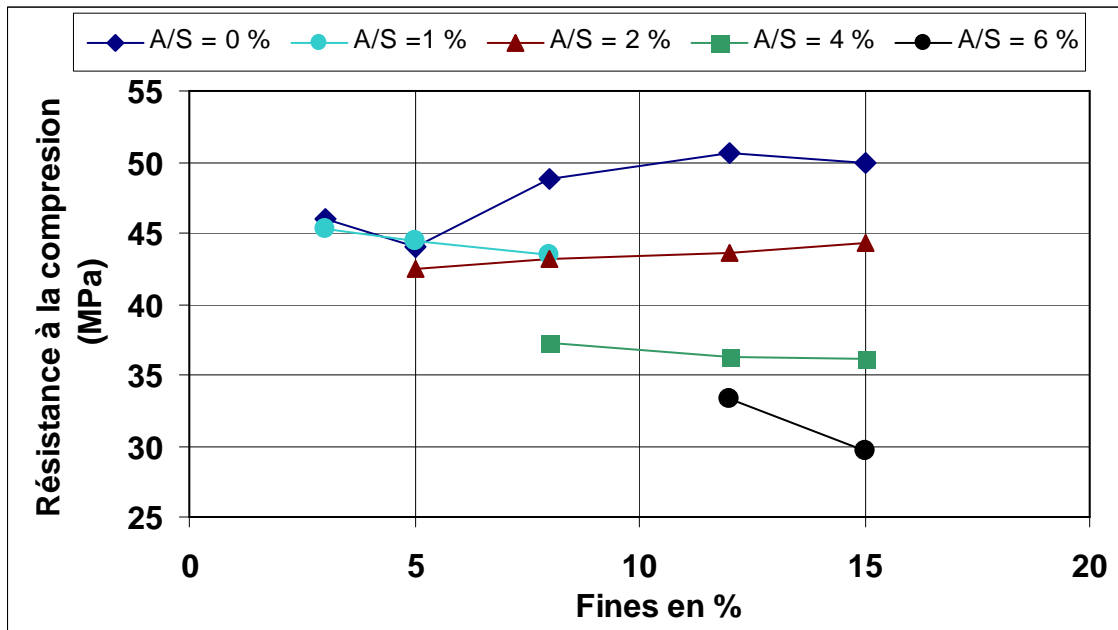


Figure I.7: Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie grosse, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S : Argile/Sable) [19].

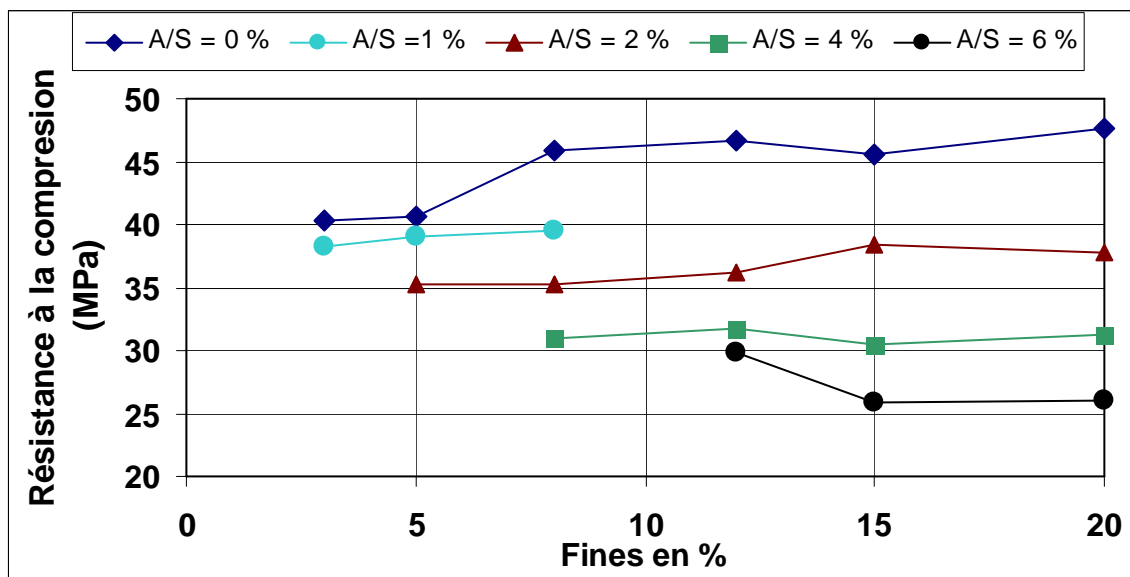


Figure I.8: Variation de la résistance a la compression pour une granulométrie fine, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S :Argile/Sable) [19].

KENAI et al [8] ont réalisé des essais sur deux bétons confectionnés avec du sable concassé contenant des fines calcaires, le premier avec un dosage en ciment de $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ et le deuxième avec un dosage de $300 \text{ kg} / \text{m}^3$. Ils ont introduit les fines calcaires à des pourcentages de 0, 5, 10, 15, 20 et 25 % en poids de ciment. La variation de la résistance à la compression à 28 jours des bétons avec le pourcentage des fines est représentée sur la Figure I.9.

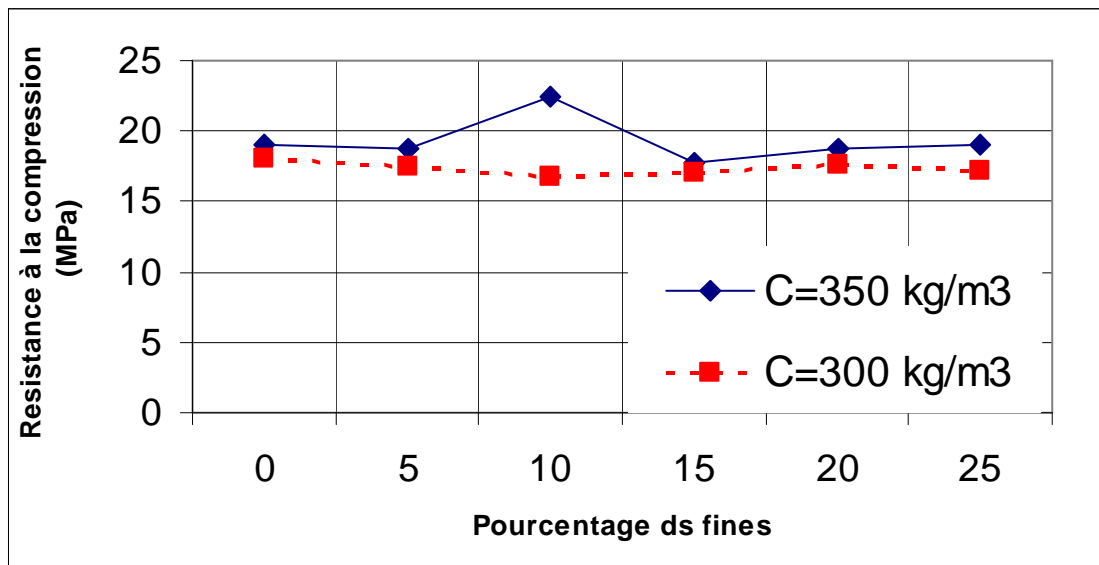


Figure I.9: Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines [8].

D'après les résultats obtenus, ils ont conclu qu'il est possible d'utiliser des sables de concassage pour béton et mortier contenant 15 % à 20 % de fines calcaires sans affecter la performance du béton [8].

L'étude faite par HADJ SADOUK, A [21] sur les mortiers confectionnés avec des ciments contenant de l'ajout calcaire, a montré qu'avec une cure humide, la résistance à la compression est améliorée à jeune âge avec 5 % et 10 % d'ajout. A long terme, l'augmentation du pourcentage d'ajout calcaire conduit à une diminution de la résistance à la compression (Figure I.10).

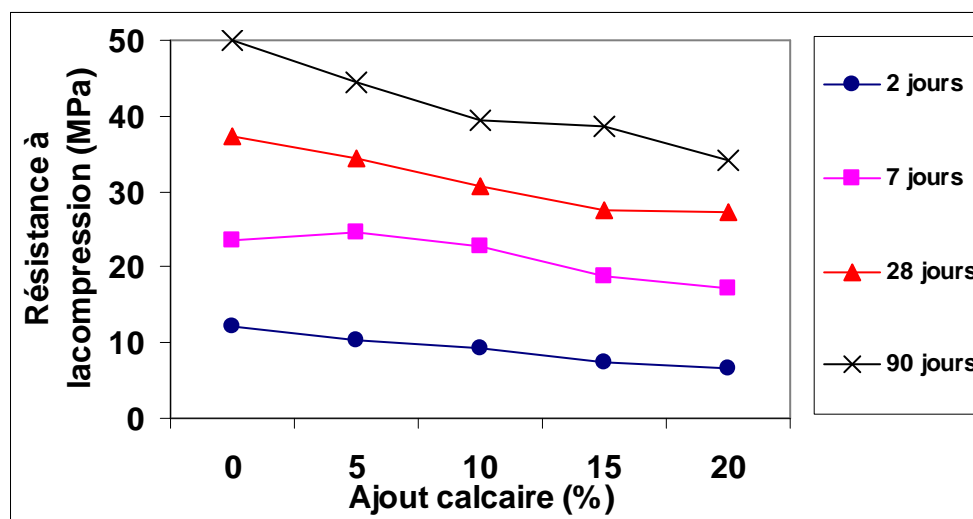


Figure I.10: Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de l'ajout calcaire (100% H.R, 20°C) [21].

MENADI et al [46] ont trouvé qu'après 90 jours de cure, le béton contenant 15 % de fines calcaires substituées au sable de concassage présente une réduction de la résistance à la compression de 6 % à 15 % par rapport au béton de référence. Ils ont conclu que cette diminution de résistance est indépendante du type de ciment.

HABBOUCHE, A [22] a effectué des essais sur des bétons confectionnés avec trois types de sable de concassage et deux compositions (A et B). Il a varié le pourcentage des fines à (0 %, 10 %, 15 %, et 20 %) pour la composition A et (0 %, 8 %, 12 % et 15 %) pour la composition B. Il a remarqué que le béton (A) et pour tous les sables donne une augmentation de la résistance à la compression de 20 % pour un optimum de fines de l'ordre 15 %. Une augmentation de résistance à la compression de 7 % est observée pour le béton (B) pour un optimum de fines de 12 %.

La figure I.11, montre le développement de la résistance avec la finesse et le pourcentage de l'ajout calcaire dans le ciment selon COCHET et al [20]. Ils ont remarqué que le ciment contenant du calcaire développe également la même résistance à la compression de 48 MPa à 28 jours que le ciment sans ajout produit à partir du même clinker. Cependant, la résistance initiale à la compression est plus élevée pour le ciment avec ajout que celle du ciment sans ajout de faible finesse. La diminution de la finesse du clinker mène à une diminution identique de la résistance à tout âge. L'addition du calcaire a comme conséquence une diminution de la résistance proportionnelle à l'addition du filler mais indépendante de l'âge.

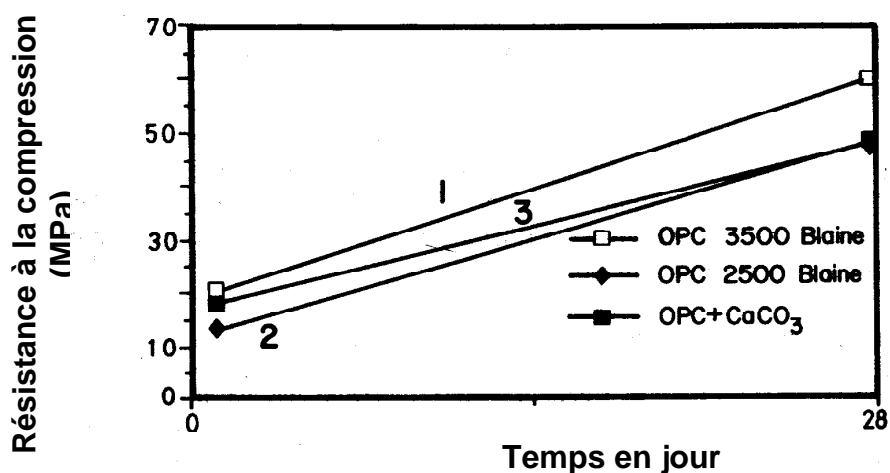


Figure I.11: Principe du comportement de l'ajout calcaire [20].

I.5.2 la résistance à traction

BERTRANDY [10] a remarqué une chute importante de la résistance à la traction après des essais qu'il a effectués sur des échantillons de béton confectionnés avec trois types de fillers K, L et M. Le filler K est un filler de défillérisation de sable calcaire avec un coefficient d'activité (CA=0.5) et de surface spécifique Blaine de (5320 cm²/g); le filler L est obtenu artificiellement en mélangeant des fillers calcaires de défillérisation a des fillers calcaires marneux rouges, son coefficient d'activité (CA=1) et sa surface spécifique Blaine est de (3200 cm²/g); et le filler M d'origine marno-calcaire, son coefficient d'activité (CA=2) et sa surface spécifique Blaine est de (4800 cm²/g).

Les résistances à la traction sont beaucoup plus groupées que les résistances à la compression et elles sont moins influencées par les fillers calcaires [10] (Figure I.12).

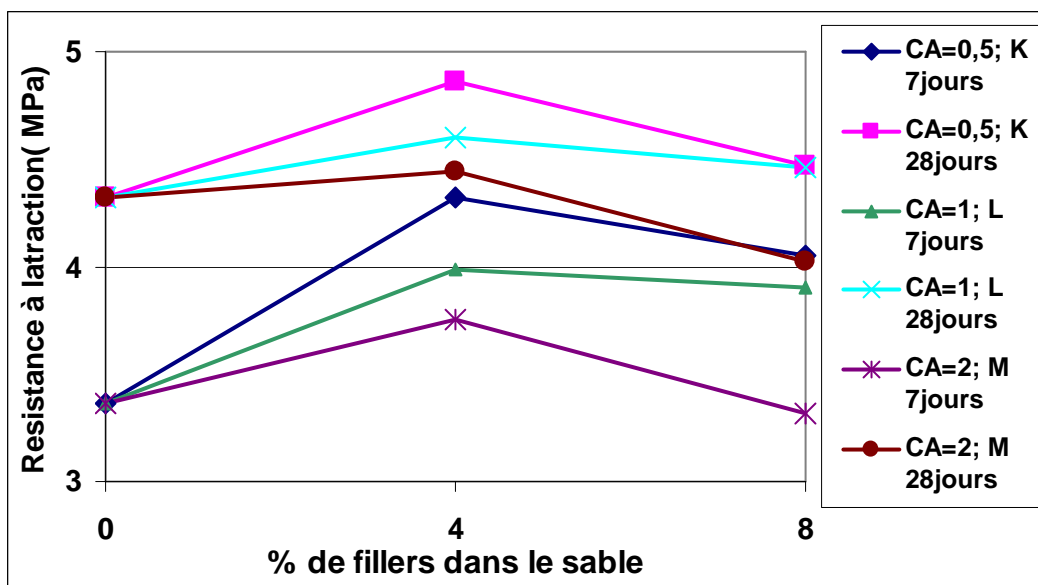


Figure I.12 : Variation de la résistance à la traction à 7 et 28 [10].

Par contre BONAVENTI V, L et al [5] ont montré que L'incorporation des fines a amélioré la résistance à la traction par flexion pour tous les âges. Cette résistance a une tendance semblable à celle observée pour la résistance à la compression des mortiers correspondants. L'augmentation était plus prononcée à jeune âge. Après 28 jours, l'effet de toutes les fines de pierres était essentiellement le même indépendamment de leurs compositions et leurs quantités dans le mélange (Figure I.13).

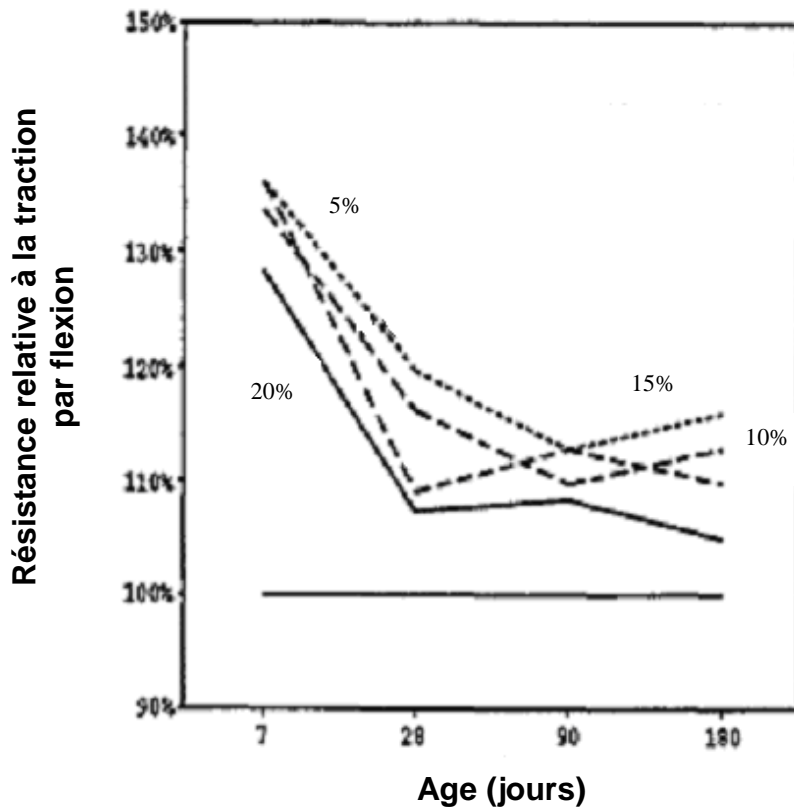
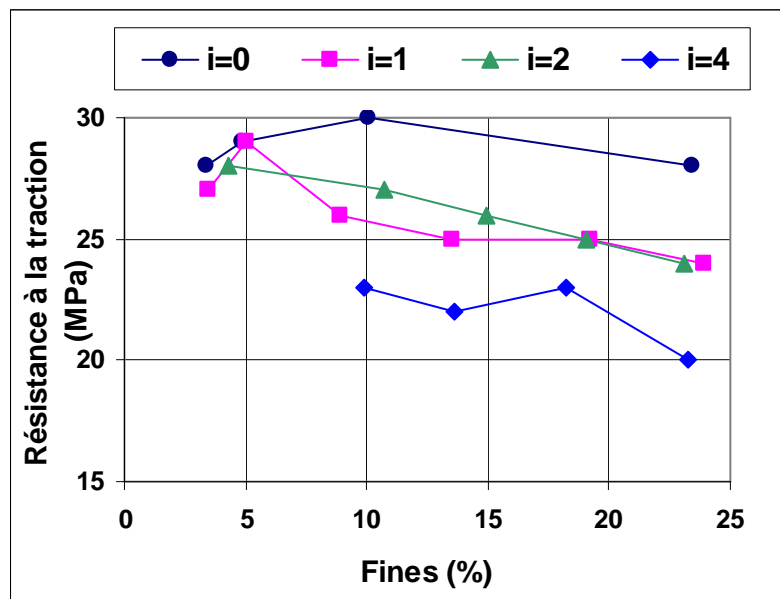
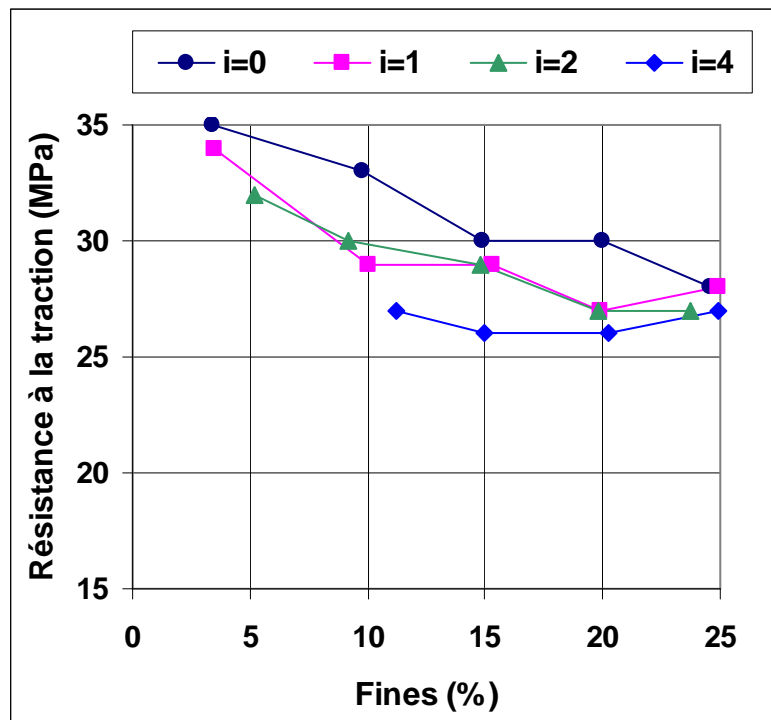


Figure I.13: Résistance relative à la traction des mortiers avec fines calcaires [5].

RAMIREZ et al [16,19] ont aussi obtenu le même résultat que BONAVETI et les tendances observées pour la résistance à la traction par flexion sont similaires à celles de la résistance à la compression (Figures I.14 et I.15).



Figures I.14 : Résistance à la traction des mortiers (dosage 250 kg/m3) [16].



Figures I.15 : Résistance à la traction des mortiers
(dosage 325 kg/m^3) [16].

I.5.3 Module d'élasticité E

Le module d'élasticité du béton dépend fortement de la valeur du module d'élasticité des granulats qui occupent environ 70 % du volume du béton, mais l'incorporation des fines dans le mélange peut affecter le module d'élasticité.

DONZA et al [23] ont effectué des essais sur des bétons confectionnés avec différents granulats (siliceu, granite, calcaire, et dolomite). Ils ont montré que pour les bétons de sable de concassage, quel que soit l'origine des fines, le module d'élasticité à jeune âge a tendance à diminuer. Ce comportement peut être attribué au volume important des vides des sables de concassage et au faible remplissage du squelette granulaire. Cependant, à l'âge de 360 jours ces différences sont atténuées et les modules d'élasticité atteignent environ 40 GPa. (Figure I.16).

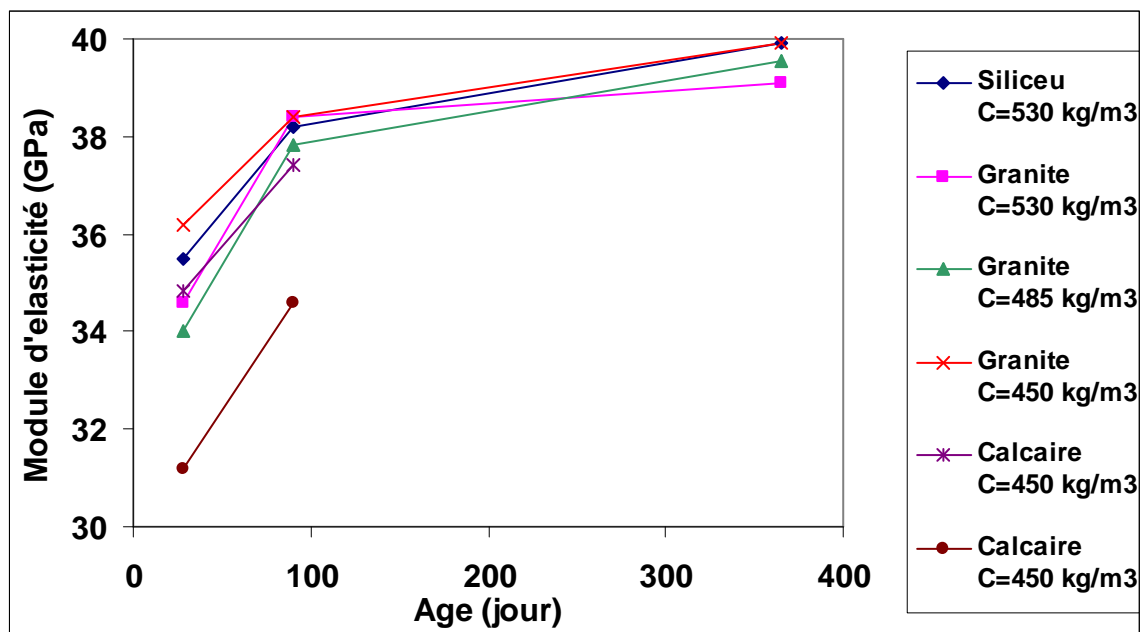


Figure I.16: Module d'élasticité du béton en fonction de l'âge [23].

BONAVETTI, V et al [18] ont étudié l'influence initiale de cure sur les propriétés mécaniques des bétons contenant des ciments au calcaire, et ils ont remarqué, pour une cure humide, une faible chute du module d'élasticité à jeune âge pour les bétons de sable de concassage (38.6 GPa à 3 jours et 37 GPa à 7 jours) par rapport au béton de référence (39.8 GPa). Pour la cure dans l'air, ils ont remarqué de meilleurs résultats pour les bétons aux calcaires à tous les âges. A 28 jours, la valeur du module d'élasticité de ce béton a augmenté de 8 % à 13 % par rapport au béton de référence. Tableau I.4.

Tableau I.4: Module d'élasticité relatif [18].

Age du béton	Cure complète			Cure humide			Cure dans l'air		
	C0	C10	C20	C0	C10	C20	C0	C10	C20
3 jours	1.00	1.11	1.14	-	-	-	0.95	1.08	1.09
7 jours	1.00	1.07	1.09	-	-	-	0.88	0.94	0.97
28 jours	1.00	0.97	0.93	0.91	0.89	0.88	0.75	0.80	0.84

Le module d'élasticité d'un béton contenant 75 % et 100 % de sable de concassage est inférieur au module d'élasticité du béton contenant du sable naturel de rivière [23].

I.5.4 Retrait

D'après les travaux de BONAVETTI, V et al [5] ont remarqué qu'il y a une augmentation du retrait pour les mortiers contenant des fines calcaires et cela à partir de 10% par rapport au mortier de référence (Figure I.17). Ils ont conclu que le retrait des mortiers à base de sable de concassage est directement associé à l'eau présente dans les petits pores de 3 à 30nm. L'augmentation du retrait des mortiers avec plus de 10% de fines peut être aussi attribué à la formation des carboaluminates ou du retrait élevé de carbonatation [19,55 et 56].

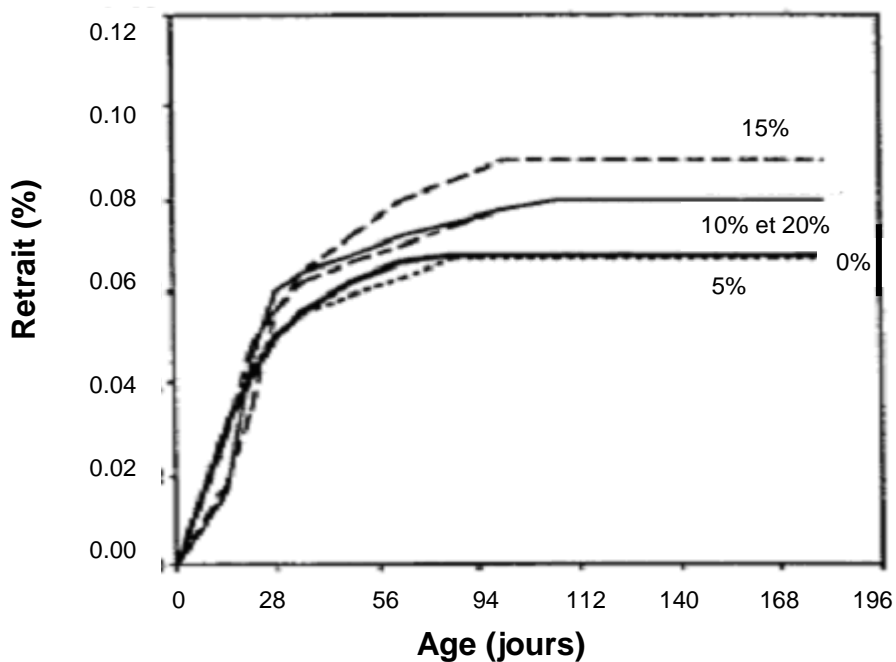


Figure I.17: Retrait des mortiers avec fines calcaires en fonction de l'âge [5].

BENNA [12] a rapporté que les proportions des fines contenues dans les sables ont une influence directe sur le retrait. En effet, le retrait croît en fonction de l'augmentation du taux de fines en raison du rapport Eau/Ciment plus élevé mais cet accroissement est relativement faible que ce soit pour les mortiers ou les bétons (Figure I.18).

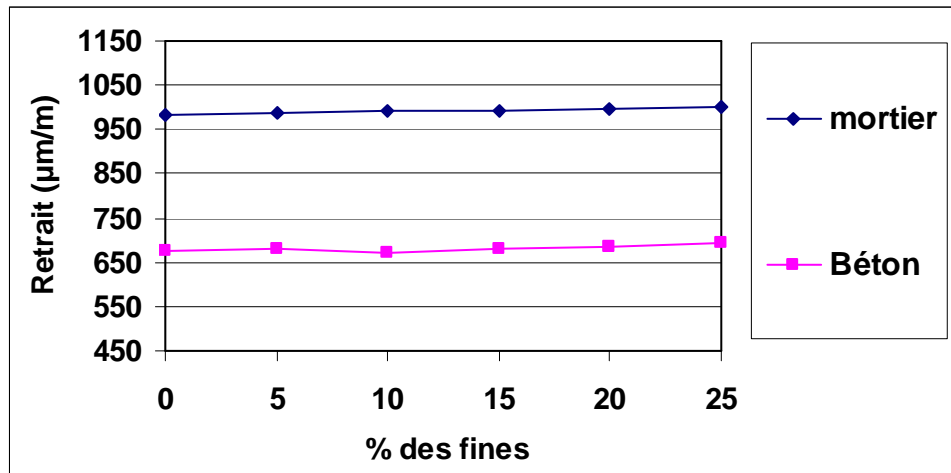


Figure I.18: Variation de retrait des mortiers et bétons en fonction des fines calcaires [12].

I.6 Effet des fillers calcaire sur la durabilité

La durabilité des matériaux cimentaires dépend largement de sa résistance à l'intrusion d'espèces agressives dans ces pores. Ces agents agressifs peuvent être présents sous forme liquide ou gazeuse, leurs transports dans le béton se fait par l'intermédiaire du réseau des pores dans la matrice du ciment ou par les microfissures. La perméabilité de ces agents dans le béton est fortement influencée par le volume, la dimension et la continuité des pores (Figure I.19). Le mouvement des gaz, liquides et les ions chlorures dans le béton est très important parce que leurs interactions avec les constituants du béton et les pores d'eau peuvent modifier directement ou indirectement l'intégrité du béton et provoquent la détérioration des structures.

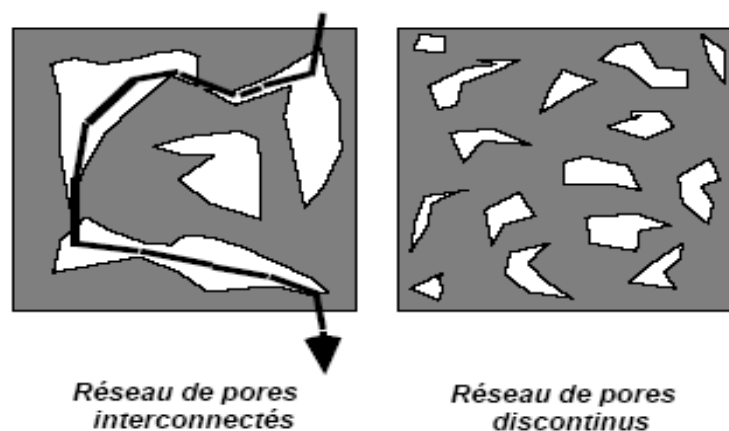


Figure I.19: Représentation schématique d'un solide poreux interconnecté perméable et un solide poreux imperméable [52].

I.6.1 Porosité

La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés. La porosité du béton et de la pâte de ciment hydratée gouverne de nombreuses propriétés du béton comme les caractéristiques mécaniques et la durabilité.

La figure 1.20 montre la variation du rapport Eau/Ciment en fonction de la porosité et l'absorption des mortiers à 7 et à 28 jours. BONAVETI et al [5] ont trouvé que la tendance des courbes est la même pour tous les types de fines. La porosité du mortier augmente avec la teneur en fines et cette augmentation est due principalement à l'augmentation du rapport eau/ciment. Mais la porosité du mortier est inférieure à celle du mortier correspondant sans fines au même rapport Eau/Ciment.

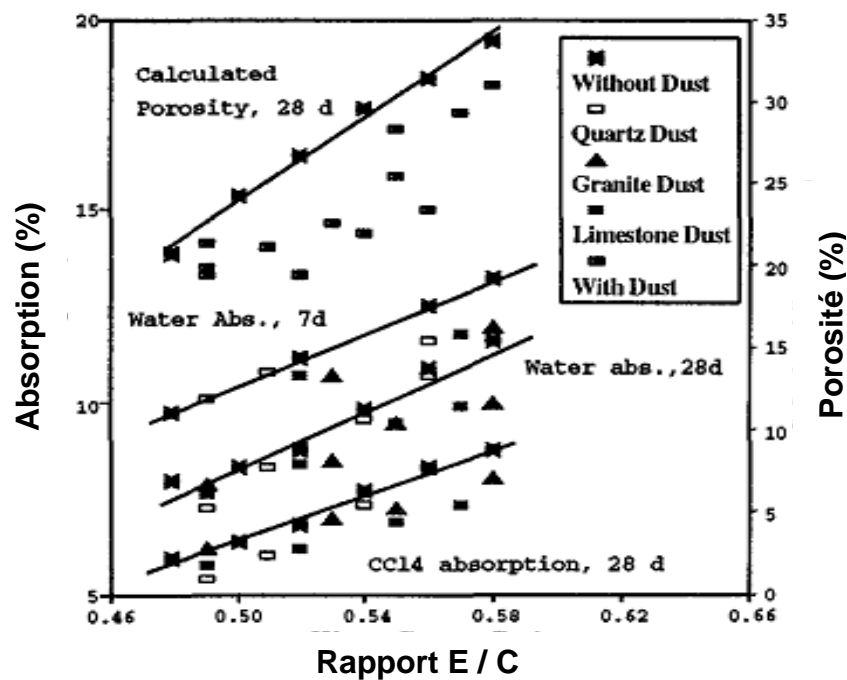


Figure I.20: la porosité et l'absorption d'eau des mortiers [5].

TSIVILIS et al [25] ont effectué des essais sur des bétons confectionnés avec deux types de ciment (C1 et C2) dont les compositions chimiques et minéralogiques sont différents, et trois types de fillers calcaires (L1, L2 et L3) avec un taux élevé de CaO. Ils ont trouvé que les bétons à base de ciment avec ajout calcaire ont une porosité inférieure à celle comparée avec les bétons avec des ciments purs, et la taille moyenne des pores semble être affectée par le contenu de l'ajout calcaire. Les ciments contenant 10 % de

calcaire ont une taille moyenne des pores inférieurs comparée à celle des ciments purs. L'augmentation de la quantité d'ajout calcaire donne une augmentation relative de la taille moyenne des pores. Avec 35 % d'ajout calcaire, des valeurs extrêmement élevées de taille moyenne de pores sont obtenues. Cette dernière ne semble pas être liée à la qualité du calcaire tandis qu'elle est affectée par la finesse du ciment (Tableau I.5).

Tableau I.5 La porosité et la taille moyenne des pores [25].

code	clinker		calcaire		Porosité %	Taille moyenne des pores dm μm
	Qualité	%	Qualité	%		
LC1	C1	100	-	0	17.1	0.142
LC2	C1	90	L1	10	10.1	0.117
LC3	C1	80	L1	20	10.0	0.153
LC4	C1	65	L1	35	12.7	0.242
LC5	C1	80	L2	20	15.7	0.186
LC6	C1	80	L3	20	15.1	0.152
LC7	C2	100	-	0	15.6	0.141
LC8	C2	90	L1	10	15.0	0.116
LC9	C2	80	L1	20	14.0	0.194
LC10	C2	80	L1	20	13.5	0.153
LC11	C2	80	L1	20	14.9	0.151
LC12	C2	65	L1	35	16.9	0.254
LC13	C2	80	L2	20	15.0	0.150
LC14	C2	80	L3	20	15.0	0.153

I.6.2 Perméabilité à l'eau

La perméabilité caractérise l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) soumis à un gradient de pression. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide. La durabilité du béton dépend principalement de sa perméabilité. NEVILLE [2] a suggéré que l'importance d'éliminer les capillaires continus pourrait être considérée comme une condition nécessaire que le béton soit classé de bonne qualité.

TSIVILIS et al [26] ont étudié la perméabilité des bétons confectionnés avec des ciments au calcaire. ils ont utilisé deux classes de ciment et une variante d'ajout calcaire. L'étude a montrée que les bétons confectionnés avec les ciments au calcaire présentent des valeurs inférieures de la perméabilité à l'eau comparées à celles des bétons confectionnés avec des ciments sans ajout. Le béton avec 20 % d'ajout calcaires présente la plus faible valeur de la perméabilité à l'eau. Ils ont conclu que l'ajout calcaire a un effet positif sur la perméabilité à l'eau des bétons (Tableau I 6 et Figure I .22).

Tableau I.6 : Variation du coefficient de perméabilité à l'eau [26].

Classe de résistance	Code	% d'ajout calcaire	Perméabilité a l'eau kw (m/s $\times 10^{-11}$)
42.5R	LC1	0	2.39
	LC2	10	2.30
	LC3	15	2.22
	LC4	20	2.00
32.5R	LC5	20	1.81
	LC6	25	2.07
	LC7	35	2.23

MENADI et al [46] ont observé la pénétration d'eau maximale pour tous les bétons confectionnés avec le ciment A avec et sans fines calcaires, tandis que les plus faibles valeurs de la pénétration d'eau sont observées pour les bétons fabriqués avec les ciments C et D dont la teneur en C_3A est 7.7% et 5.65% respectivement. Ils ont aussi montré que l'incorporation de 15 % des fines calcaires substituées au sable de concassage pour ces deux types de ciment ont donné des pénétrations similaires et l'incorporation des fines calcaires substituées au sable de concassage jusqu'au 15 % dans les bétons pour tous les types de ciment, peut améliorer la structure des pores dans la zone de transition et réduire la perméabilité à l'eau (Figure I.21).

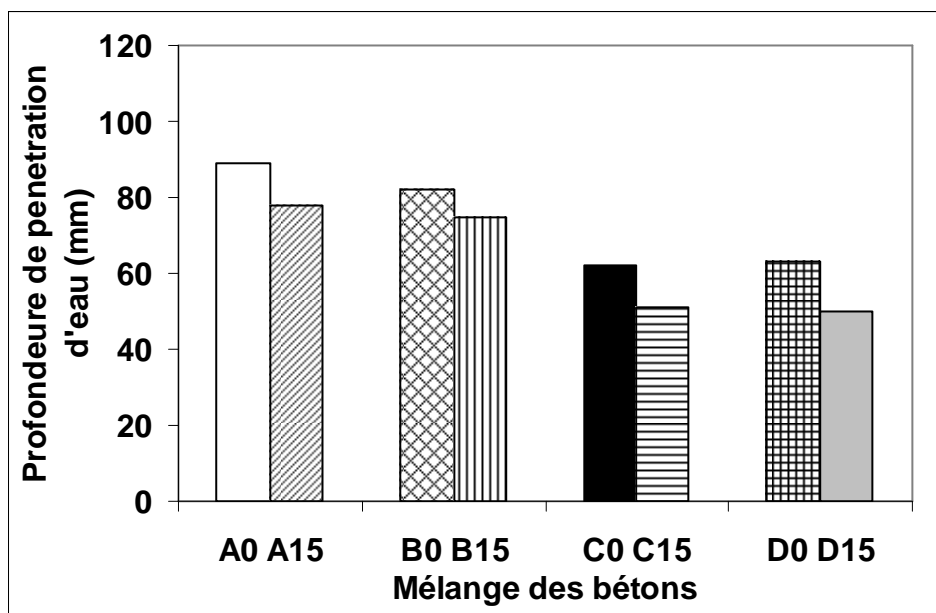


Figure I.21: Profondeur de la pénétration d'eau des différents bétons à 90 jours [46].

I.6.3 Perméabilité au gaz

Selon l'étude faite par TSIVILIS et al [26] sur la perméabilité au gaz, les bétons confectionnés avec des ciments au calcaire présentent des valeurs plus élevées de perméabilité au gaz comparées à celles confectionnés avec des ciments ordinaires, à l'exception du béton contenant 35 % d'ajout calcaire qui donne la plus faibles valeur (Figure I.22).

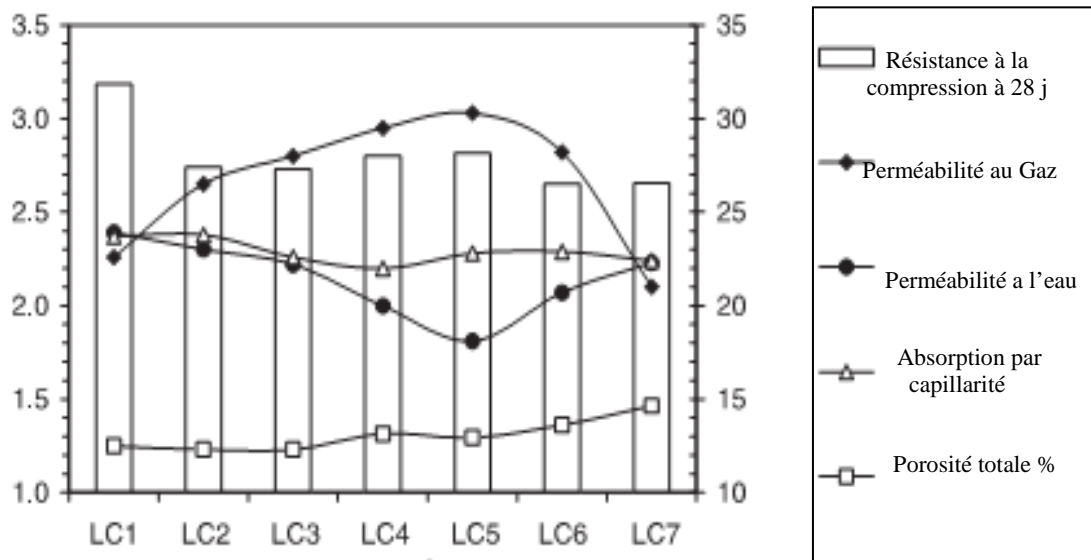
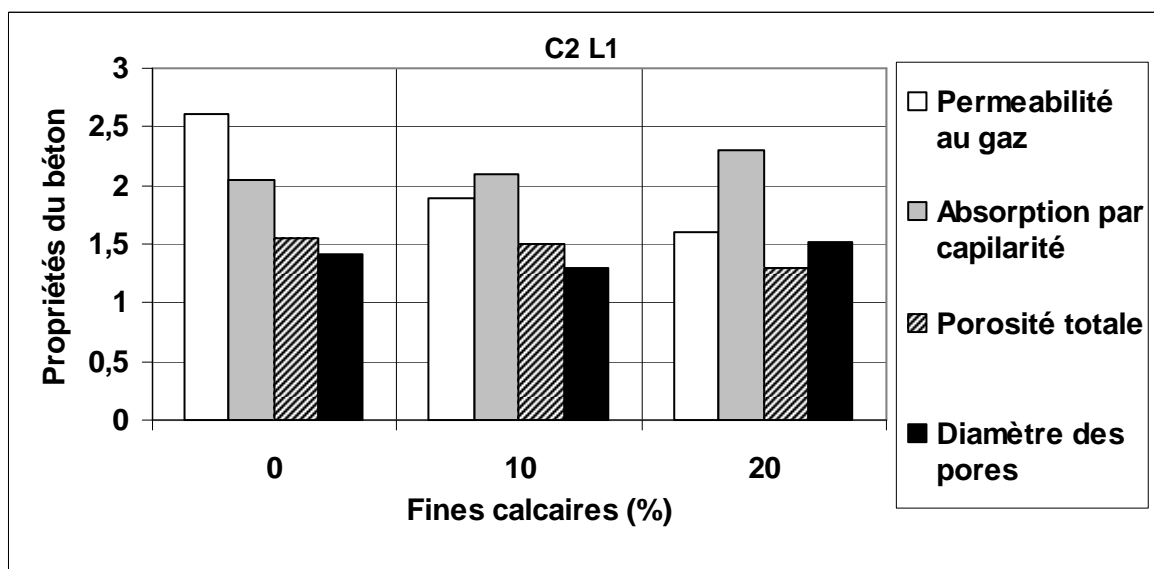
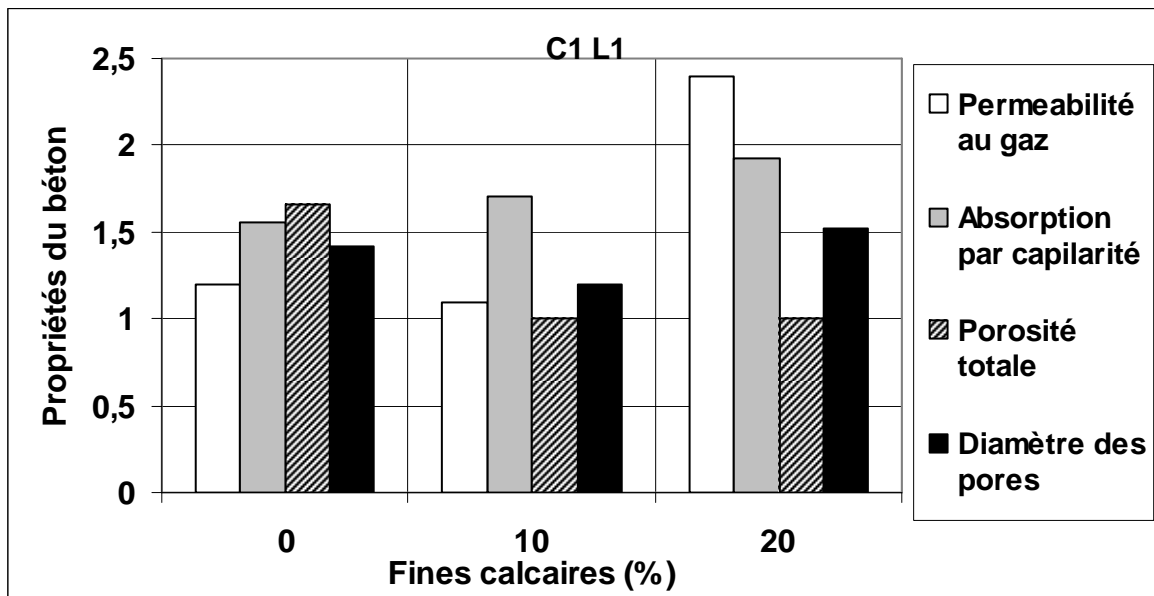


Figure I.22: Effet d'ajout calcaire sur la perméabilité et la porosité du béton [26].

MENADI et al [46] ont remarqué que les bétons sans fines calcaires confectionnés avec les ciments A ou B ont des valeurs élevées de la perméabilité au gaz comparés à ceux confectionnés avec les ciments C et D sans ou contenant des fines calcaires. Ceci peut être dû à la faible finesse des ciments A et B comparée à celle des ciments C et D. L'augmentation de la perméabilité au gaz de tous les bétons contenant 15 % de fines peut être due à l'effet de dilution des fillers.

TSIVILIS et al [25] ont montré que pour les échantillons de béton composés avec deux types de ciment (Tableau I.4), la qualité de l'ajout calcaire a un effet sur la perméabilité au gaz tantôt négatif tantôt positif (Figure I.23). Ils ont conclu aussi que la qualité du ciment affecte de manière significative la perméabilité au gaz, et l'addition du calcaire peut réduire la perméabilité du béton et particulièrement pour les ciments contenant un pourcentage de C_3A élevé. De toute façon, selon la qualité du clinker et la finesse du ciment, le béton à base du ciment au calcaire avec une teneur optimale de

calcaire, donne une perméabilité au gaz inférieure comparée à celle du béton avec du ciment sans ajout calcaire[25].



C 1 L1 : Ciment type 1, Filler calcaire type 1
 C 2 L1 : Ciment type 2, Filler calcaire type 1

Figure I.23: Effet d'ajout calcaire sur les propriétés du béton [25].

I.6.4 Perméabilité aux ions chlores

Tout comme la perméabilité, la diffusion est liée à la structure poreuse des bétons. En fait, les transferts par diffusion et par perméabilité sont très différents. Selon BUIL et OLIVIER [54], la diffusion représente un transport d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Elle dépend que de l'interconnexion des pores et non de leurs tailles.

La pénétration des ions chlores dépend principalement de la résistance du béton et de sa perméabilité. La microfissuration et les pores ouverts sont les chemins préférés pour la migration des ions chlores. Pour un béton peu perméable, et avec une compacité élevée, les réactions chimiques entre les ions chlore et la pâte de ciment sont négligeables [20]. La présence des fillers calcaires dans le mélange n'a que très peu d'influence sur le coefficient de diffusion des ions chlores [20, 27, 28, 66]. Tandis que, BONAVETTI et al [18] ont montré que la profondeur de la pénétration des ions chlores augmente avec l'augmentation du pourcentage de calcaire (0%, 10% et 20%). Cette augmentation est due à la prépondérance de l'effet de dilution sur l'accélération d'hydratation due à la présence des fillers calcaires (Figure I.24).

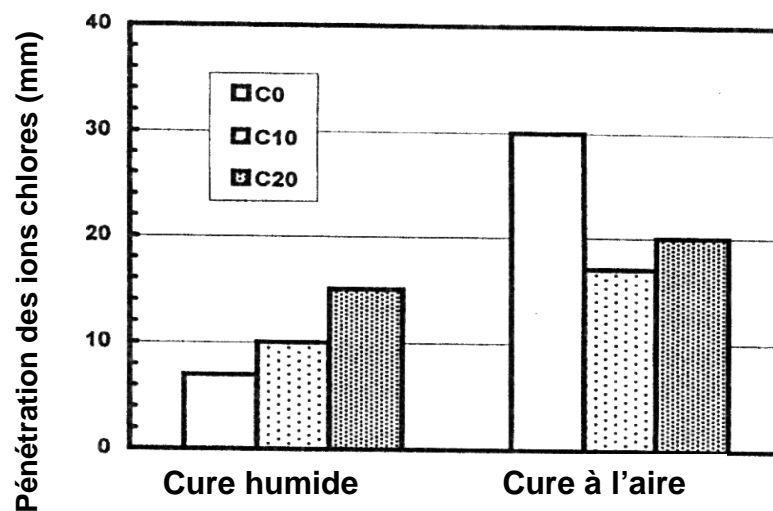


Figure I.24: Pénétration des ions chlores des bétons après 45 jours d'immersion dans une solution avec 3% de NaCl [18].

L'étude faite par SAID MANSOUR. M [32] a montré que la perméabilité aux ions chlores pour le béton contenant 15 % d'ajout calcaire substitué au ciment est supérieure à celle du béton de référence. MENADI et al. [46] ont rapporté que tous les bétons

confectionnés avec les différents types de ciments avec et sans fines calcaires substituées au sable de concassage, donnent des valeurs élevées des charges passées au-dessus de 4000 coulomb, qui indique la faible résistance à la pénétration des ions chlorures. Cela peut être attribué au rapport élevé de (E/C =0.65). Ils ont conclu que l'utilisation des bétons à base de sable concassé contenant 15 % de fines pour les ouvrages exposés dans des environnements marins devra être limitée.

I.6.5 L'absorption

TSIVILIS et al [25] ont trouvé une faible augmentation de la sorptivité (remontée capillaire) pour les bétons contenant des ajouts calcaires. Des valeurs maximales (0.257 et 0.275 mm/min^{0.5}) de la sorptivité ont été enregistrées pour les bétons contenant 35% de fines calcaires pour les deux types de ciments. (Figure I.23).

TSIVILIS et al [26] ont montré que la sorptivité des bétons fabriqués avec de ciments contenant des fines calcaires varient de (0.220 et 0.238mm/min^{0.5}) est légèrement inférieure en comparaison avec celle des bétons sans fines calcaires (0.237 mm/min^{0.5}). Ils ont conclu que l'ajout calcaire a un effet positif sur la sorptivité (Figure I.21). SAID MANSOUR. M [32] a montré que la sorptivité pour le béton contenant 15 % d'ajout calcaire a un effet négligeable en comparaison avec le béton de référence. MENADI et al [46] ont obtenu un effet négligeable des fines calcaires sur l'absorption capillaire pour tous les bétons confectionnés avec les quatre types de ciments utilisés.

I.6.6 Résistance aux sulfates

L'attaque aux sulfates se produit généralement dans les structures exposées à des environnements riches en solution de sulfates comme eau de mer, eau de rivière et eaux souterraines. Ces ions de sulfates pénètrent dans le mortier ou béton et réagissent avec certains produits hydratés du ciment. Plusieurs chercheurs [29, 60, 61, 63, 64] ont conclu que l'ajout calcaire semble augmenter la résistance aux sulfates du ciment. Cependant, d'autres chercheurs [30, 62] ont trouvé une baisse de la résistance aux sulfates de ces ciments, selon le taux de substitution du clinker par les fillers calcaires. Plusieurs paramètres tels que la solution utilisée, la concentration, la durée d'immersion et la dimension d'éprouvette peuvent influencer sur les résultats obtenus.

L'attaque des sulfates est principalement régie par le contenu du ciment en C_3A . Cependant KARPINSKI [63] a trouvé que l'addition des fines calcaires a eu comme conséquence un béton de résistance aux sulfates améliorée. Il a expliqué que cette amélioration est due à la diminution de la perméabilité du béton provoquée par l'utilisation des fillers calcaires. CHATTERJI et JEFTERY [64] ont suggéré que, bien que l'addition du $CaCO_3$ (carbonate de calcium) n'affecte pas la formation de l'ettringite, elle diminue cependant la quantité de monosulfate, réduisant ainsi l'expansion du ciment portland.

SOROKA et al [29] ont montré qu'un ciment avec filler $CaCO_3$ (carbonate de calcium) saturé, immergé dans une solution contenant 5 % Na_2SO_4 commence à se fissurer après 10 à 16 semaines au lieu de 6 semaines pour un filler à base de fluorure de calcium. Après 150 jours d'immersion, la fissuration est restée très fine et à peine évidente, alors que le mortier de référence atteignait une étape avancée de détérioration (Figure I.25).

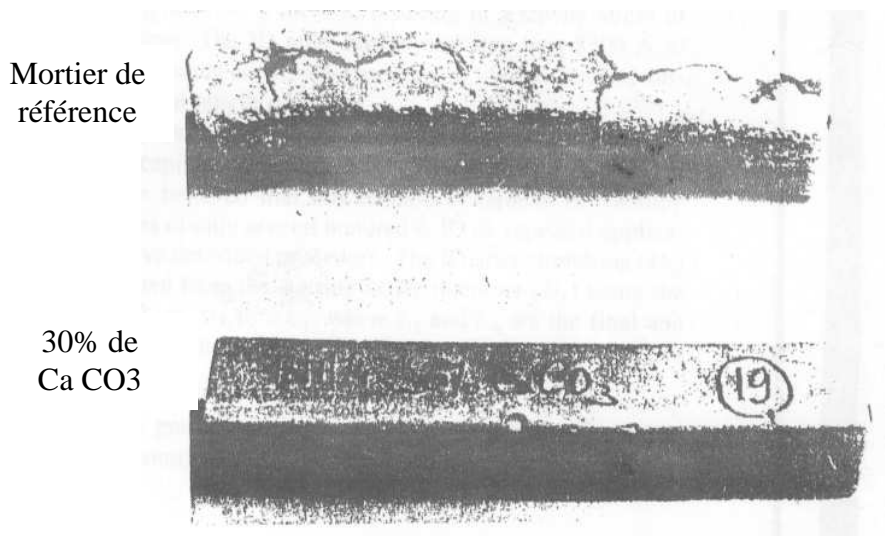


Figure I.25: Echantillons après 150 jours d'immersion dans une solution avec 5% de Na_2SO_4 [29].

HADJ SADOK. A [21] a conclu que l'incorporation de 10 et 15 % d'ajout, conduit à une diminution de l'expansion et à aucune réduction de la résistance à la compression des éprouvettes immergées pendant 180 jours dans 5 % de sulfate de sodium. Tandis que les ciments sans ajout calcaire et avec 20 % d'ajout ont montré une faible résistance aux sulfates de sodium qui s'est traduite par une expansion élevée et une perte de résistance à

la compression. Les ciments avec 5 et 10 % d'ajout calcaire dans un environnement de sulfate de magnésium, ont montré une performance comparable ou meilleure que celle des ciments sans ajouts. Cependant, l'incorporation de 15 et 20 % d'ajout conduit à une faible résistance aux sulfates de magnésium, qui s'est traduite par une perte considérable de résistance à la compression après 180 jours d'immersion (Figures I.26 et I.27).

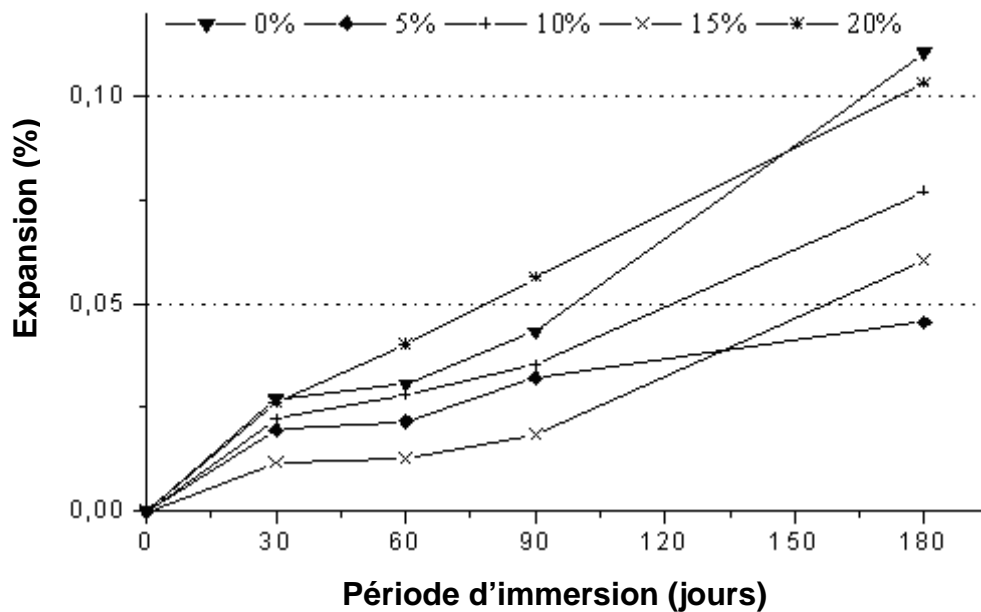


Figure I.26: Expansion des éprouvettes immergées dans une solution contenant 5 % de sulfate de sodium ($\text{Na}_2 \text{SO}_4$) [21].

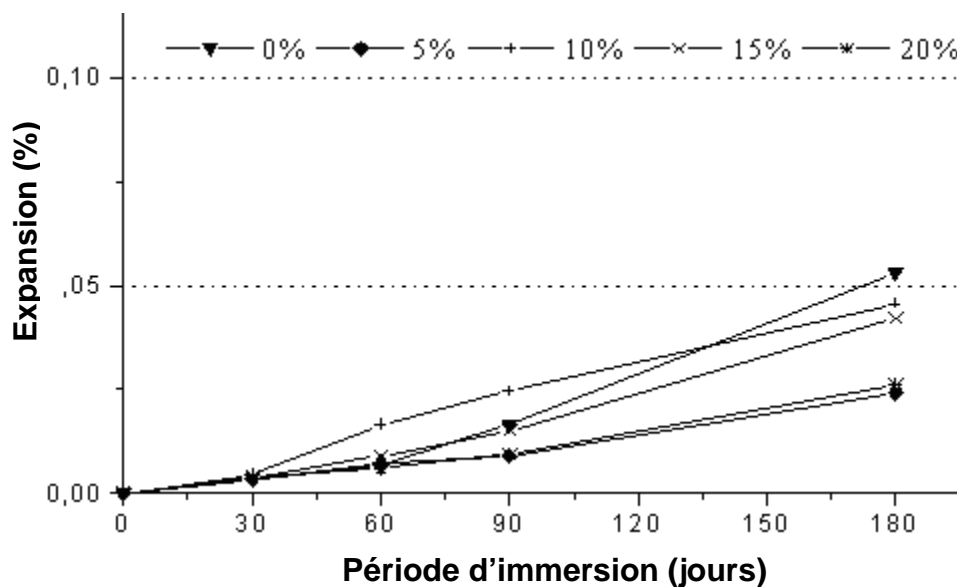


Figure I.27: Expansion des éprouvettes immergées dans une solution contenant 5 % de sulfate de magnésium (Mg SO_4) [21].

La température de conservation des mortiers pourrait influencer le mécanisme d'attaques des sulfates. BARKER et al [31] ont montré qu'un ciment Portland de type II et un ciment contenant 15 % d'ajout calcaire ont la même vulnérabilité à l'attaque des sulfates à 5°C. Néanmoins le mode d'attaque était différent.

GONZALEZ et IRASSAR [30] ont étudié l'effet de variation du type du ciment et en particulier la composition chimique du clinker (C₃S et C₃A) et le pourcentage de l'ajout calcaire sur l'expansion et la résistance mécanique des éprouvettes de mortier, immergé dans une solution de 5 % de Na₂SO₄ (Figure I.28 et I.29). Ces résultats montrent que l'ajout de 10 % de calcaire conduit à une amélioration de la performance des ciments à l'attaque des sulfates. Tandis que 20% d'ajout calcaire cause des effets néfastes sur la résistance aux sulfates. Ce comportement peut être expliqué par les changements du degré d'hydratation, de la porosité capillaire, et du type des produits d'hydratation produits en présence du calcaire.

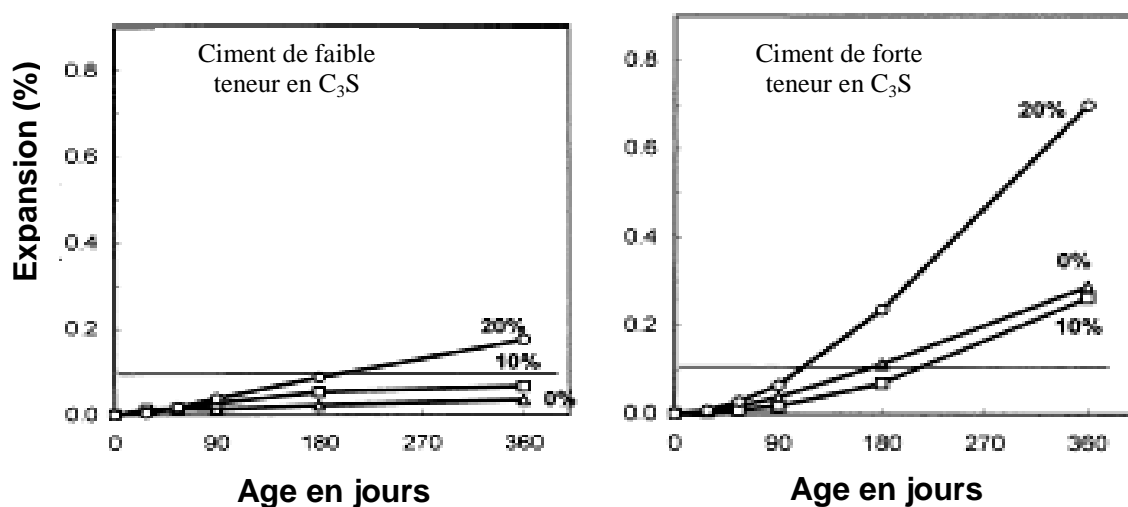


Figure I.28: Expansion des mortiers après 360 jours d'immersion dans une solution de sulfate [30].

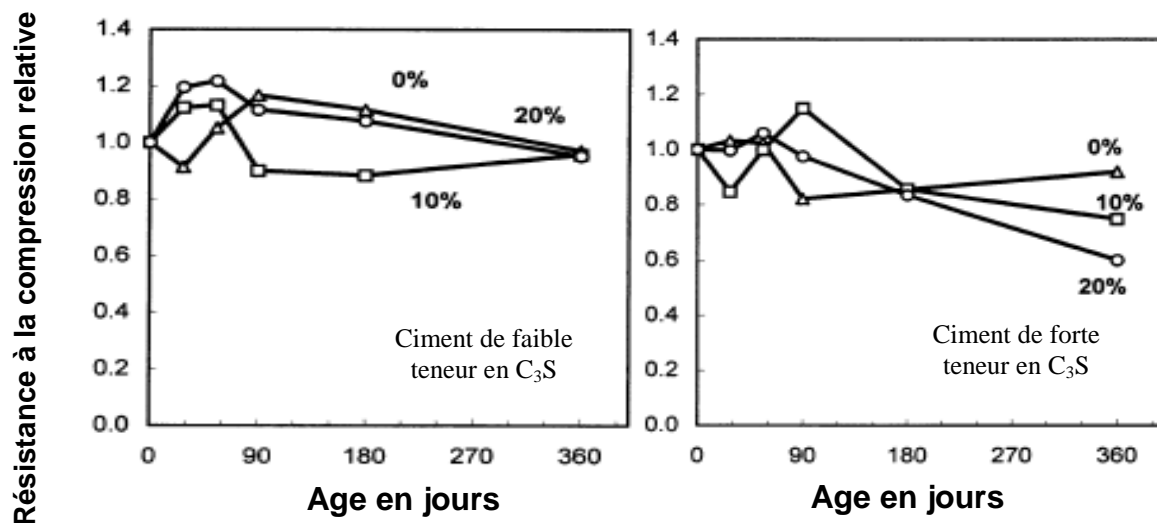


Figure I.29: Résistance à la compression des éprouvettes dans une solution de sulfate [30].

I.7 Conclusion

L'étude bibliographique sur l'influence de l'ajout calcaire sur le comportement des mortiers ou des bétons a montré que la présence des fines calcaires à un faible pourcentage dans le mélange offre une répartition granulométrique plus large et par conséquent améliore l'ouvrabilité, la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons et des mortiers. L'addition des fines calcaires a aussi un effet positif sur la perméabilité à l'eau et la porosité des bétons. Tandis que la présence des fines calcaires augmente la pénétration des ions chlorures, et augmente la perméabilité au gaz.

Chapitre 2

Matériaux et Essais

Chapitre. II Matériaux et essais

II.1 Généralités

Dans ce chapitre on présente les matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes de béton ainsi que tous les essais réalisés et les variables étudiées à 60 et à 90 jours de cure.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Le ciment

Pour cette étude on a utilisé trois type de ciment, le premier est un ciment composé provenant de la cimenterie de M'sila **CEM II/A – 42.5**, le deuxième est un ciment également composé provenant de la cimenterie de Chlef **CEM II/A – 42.5**, et le dernier est un ciment portland artificiel sans ajout provenant de la cimenterie de M'sila **CEM I – 42.5**. Les essais physiques ainsi que l'analyse chimique et minéralogique des ciments ont été effectués aux laboratoires de contrôle de qualité des cimenteries, et les résultats sont résumés sur les tableaux (II.1. II.2 et II.3) respectivement.

Tableau II.1: Essais physiques sur les ciments [33,34]

ESSAIS	CEM II/A – 42.5 (M'SILA)	CEM II/A – 42.5 (CHLEF)	CEM I – 42.5 (M'SILA)	NORME
Finesse SSB (cm² / g)	3500	3080	3200	2700÷3500
Temps de début de prise (h,mn)	2h60	2h30	3h00	≥1h30
Temps de fin de prise (h,mn)	4h00	/	4h20	/
Expansion (mm)	2,00	2,00	<5	≤10

Tableau II.2 : Composition chimique des ciments utilisés [33,34]

Composition chimique %	Teneur en (%)		
	CEM II/A – 42.5 (M'SILA)	CEM II/A – 42.5 (CHLEF)	CEM I – 42.5 (M'SILA)
SiO ₂	20.92	20.32	21.62
Al ₂ O ₃	5.33	4.71	3.98
Fe ₂ O ₃	3.43	3.20	4.47
CaO	61.74	64.34	63.83
CaO libre	2.17	0.21	-
MgO	1.58	0.56	1.7
K ₂ O	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-
SO ₃	1.83	1.26	1.9
Cl-	0.025	-	0.02
Insolubles	1.35	0.29	0.6
Perte au feu	1.65	4.26	1.4

Tableau II.3: Composition minéralogique des ciments utilisés. [33,34]

Composition minéralogique %	Teneur en (%)		
	CEM II/A – 42.5 (M'SILA)	CEM II/A – 42.5 (CHLEF)	CEM I – 42.5 (M'SILA)
C ₃ S	56	50.59	57
C ₂ S	16	20.30	19
C ₃ A	5.75	7.70	3
C ₄ AF	12.1	9.55	14

II.2.2 Les granulats

a) Le sable

Dans cette étude, on a utilisé un seul type de sable (0 / 4) concassé d'origine calcaire provenant de la station de concassage d'El Hachimia dans la wilaya de Bouira. Les essais sur ce sable ont été effectués au sein du laboratoire géomatériaux et génie civil de l'Université de Blida.

Pour assurer la séparation complète des fines calcaires inférieur à 80 μm , qui ont été utilisées par la suite à des pourcentages différents, on a tamisé le sable concassé plusieurs fois avant l'utilisation, à l'aide d'une tamiseuse électrique équipée de tamis à mailles carrées (Figure II.1).



Figure II.1: Tamiseuse électrique utilisée pour la récupération des fines calcaires

b) Le gravier

Deux classes granulaires ont été utilisées dans cette étude pour la confection des éprouvettes de béton, le gravier concassé d'origine basaltique provient de la même station de concassage de Kaf El Assal (Beni slimane) wilaya de Médéa. La première classe est (3/8) et la deuxième classe est (8 / 15). Pour éliminer les impuretés, le gravier a été tamisé et lavé plusieurs fois avant emploi.

II.2.3 Caractérisation des matériaux

a) Granulométrie

L'analyse granulométrique a été effectuée conformément à la norme NF P 18-560 [39]. Les courbes granulométriques des différents granulats utilisés sont représentées dans la Figure II.2. D'après cette figure on remarque que la granularité est continue pour le sable et les deux types de graviers

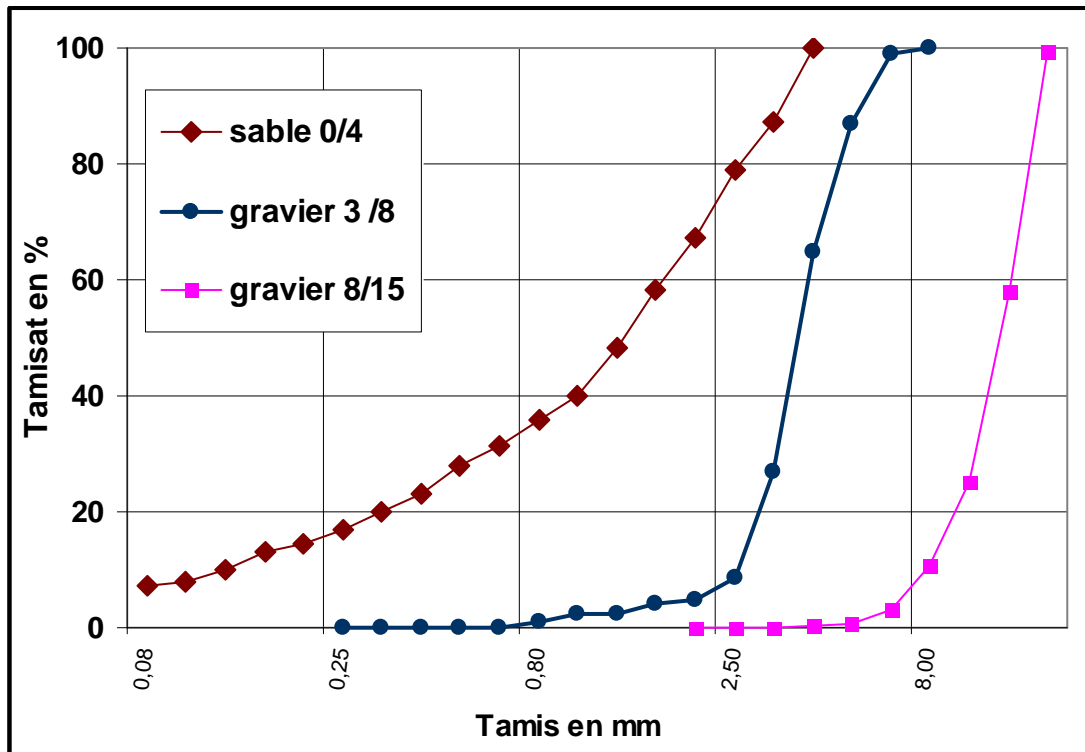


Figure II.2: Courbes granulométriques des différents agrégats utilisés

b) Masse volumique

La masse volumique d'un corps c'est la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue la masse volumique absolue et la masse volumique apparente.

La masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume absolu du corps c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides.

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume apparent du corps c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps, et les vides qu'elle contient. Les masses volumiques absolues et apparentes des différents granulats utilisés sont calculées conformément à la norme NF P-18-554 et 18-555 [40,41] (Tableau II.4).

Tableau II.4 : Masses volumiques des granulats utilisés

	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique absolue (kg / m³)	2543.50	2553.19	2553.19
Masse volumique apparente (kg / m³)	1546.60	1325.66	1326.13

c) Propreté du sable

L'essai d'équivalent de sable (E.S), nous permet d'apprécier la propreté du sable conformément à la norme NF P -18-598 [42]. Les résultats de cet essai pour le sable de concassage, ainsi que le module de finesse sont résumés dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Equivalent de sable et Module de finesse du sable utilisé

		Sable 0/4	Norme
Equivalent de sable (E.S)	E.S à vue	83.17	≥70 (65 et 60 pour sable concassé ou broyé)
	E.S à piston	74.48	
Module de finesse (M.F)		3.06	1,8 < MF < 3.2

d) Analyse chimique du sable

Le but principal de l'analyse chimique des granulats, est la recherche des matières nuisibles à la qualité du béton. Le tableau II.6 résume les différents résultats de l'analyse chimique du sable utilisé [22].

Tableau II.6 : Analyse chimique du sable utilisé

Composition chimique	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃	P.F
Teneur en (%)	4.51	1.09	0.54	50.68	1.01	-	-	-	41.04

II.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des éprouvettes de béton est une eau potable du robinet propre, et exempte d'impuretés.

II.3 Composition et confection des éprouvettes

II.3.1 Composition et dosage de béton

L'étude de la composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées, et en particulier la résistance et l'ouvrabilité.

Dans notre étude, on a utilisé la méthode de composition de DREUX –GORISSE [1]. La composition a été déterminée pour un diamètre maximal des granulats de (16mm), un affaissement au cône d'Abrams de (60 mm à 90 mm) et une résistance caractéristique de béton à 28 jours de 30 MPa. Le dosage en ciment a été fixé à 350 kg/m^3 , et le rapport Eau sur Ciment (E/C) à 0,65. Les proportions des granulats sont résumées sur la Figure II.3.

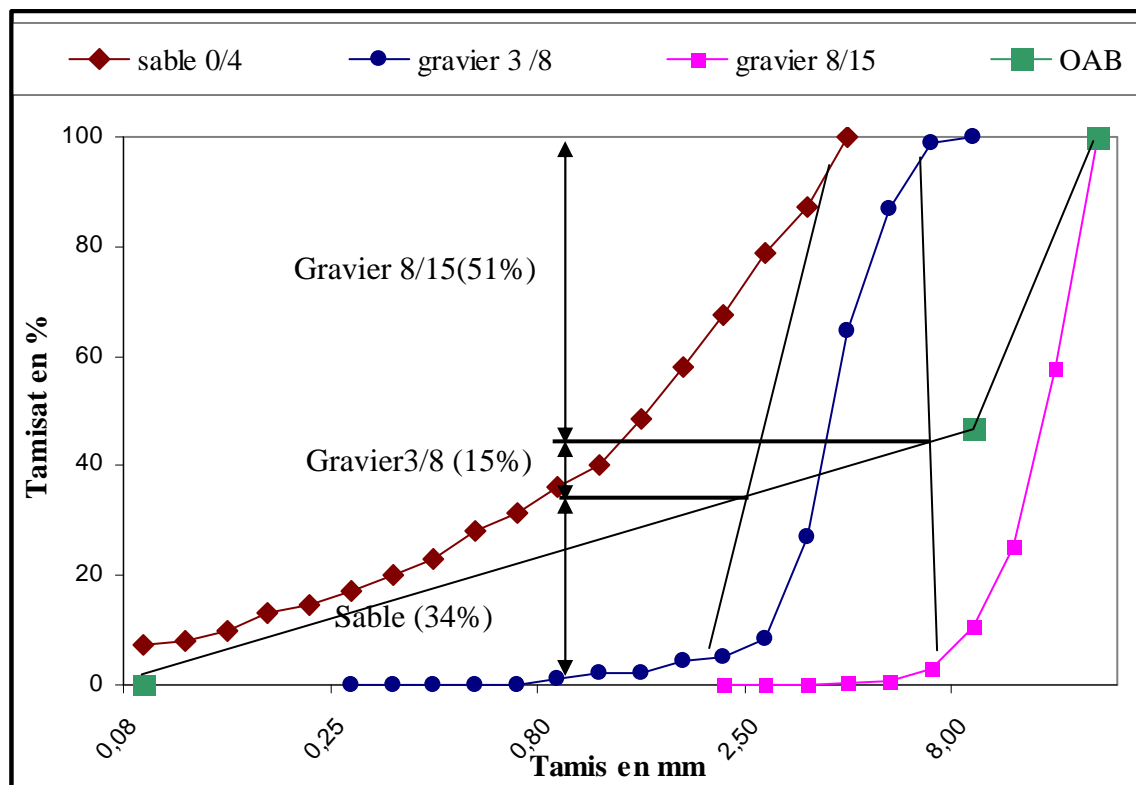


Figure II.3: Proportions des granulats utilisés.

II.3.2 Préparation du béton

Après avoir pesé les quantités de matériaux utilisés (gravier, sable, fines, ciment, et eau), tous les mélanges ont été gâchés dans un malaxeur à béton à axe vertical d'une capacité de 56 litres (Fig. II.4). Ces matériaux ont été mélangés dans un premier temps à sec pendant 30 secondes. L'eau a été ensuite introduite pendant une minute pour obtenir une matière homogène et ouvrable.



Figure II.4: Malaxeur à béton de capacité 56 Litres

II.3.3 Confection des éprouvettes et conditionnement

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes en bétons sont de forme cubique (150 x 150 x 150) mm³ pour l'essai de perméabilité à l'eau, cylindrique de diamètre 100 mm avec une hauteur 200mm pour l'essai de perméabilité aux ions chlorés, et cylindrique de diamètre 150mm avec une hauteur 160mm pour l'essai de perméabilité au gaz. Concernant l'essai de résistance à la compression et la résistances aux agents agressifs tels que les sulfates; les acides et l'absorption capillaire, des éprouvettes cubiques (100 x 100 x 100)mm³ et prismatiques (70 x 70 x 28)mm³, ont été confectionnées.

Après la préparation des bétons, les moules ont été remplis avec les mélanges, et compactés mécaniquement à l'aide d'une table vibrante (Figure II.5), selon la norme NF P 18 – 404 et NF P 18 – 405 [57, 58]. Les moules contenant des bétons ont été couverts par un film en plastique et stockés dans les conditions ambiantes du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conditionnés dans des bacs remplis d'eau saturée en chaux à une température de 20°C±2°C, jusqu'à la date d'essais.



Figure II.5: Les éprouvettes préparées dans les moules sur la table vibrante

II.4 Essais

II.4.1 Essai d'ouvrabilité

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump-Test) permet de mesurer l'ouvrabilité des bétons. C'est un essai simple et le plus couramment utilisé pour caractériser les bétons. L'essai a été réalisé selon la norme NFP 18-451 [43]. On remplit le béton dans le moule tronconique ($h=300$ mm $D= 200$ mm et $d= 100$ mm). Le remplissage a été exécuté en trois couches tassées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement (Figure II.6).



Figure II.6 : Essai de l'ouvrabilité (Slump-Test).

II.4.2 Essai de résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique (Figure II.7) sur des éprouvettes cubiques (100 x 100 x 100) mm³, ces dernières ont été centrées entre les deux plateaux sur les faces latérales de moulage, Après la mise en marche de l'appareil, la charge augmente automatiquement à une vitesse constante de 0.5 MPa /seconde, permettant aux plateaux de comprimer l'éprouvette jusqu'à la rupture. L'essai a été réalisé conformément à la norme NFP 18-406 [44].



Figure II.7: Essai de compression sur éprouvettes cubiques

II.4.3 Essai de perméabilité à l'eau

L'essai de la perméabilité du béton à l'eau est déterminé à l'aide d'un perméamètre à eau (Figure II.8). Cet appareil permet de mesurer la pénétration d'eau dans une éprouvette en béton de formes cubiques (150 x 150 x 150) mm³. L'éprouvette est soumise à une pression d'eau de deux bars pendant une durée de vingt quatre heures. La profondeur de la pénétration de l'eau a été déterminée en divisant l'éprouvette en deux parties par l'essai de traction par fendage (essai brésilien). L'essai est effectué selon la norme DIN 1048 [50]. L'appareil de mesure est composé principalement :

- 1-d'une table avec système de fixation de 3 éprouvettes
- 2-d'un régulateur de pression

- 3- de trois cellules graduées de 1000 ml de capacité chacune
- 4- de trois emplacements pour la mise en place des éprouvettes avec joint
- 5- de conduites d'eau et d'air comprimé
- 6- d'un compresseur à air de capacité 10 bars

La perméabilité caractérise l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide soumis à un gradient de pression



Figure II.8: Essai de perméabilité de béton à l'eau.

Tableau II.7 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau.

Pénétration d'eau (mm)	Perméabilité a l'eau
< 30	Faible
30 – 60	Moyenne
> 60	Elevée

II.4.4 Essai de perméabilité aux ions chlores

La perméabilité aux ions chlore a été déterminée selon la norme ASTM C-1202 [45]. L'essai consiste à mesurer l'intensité du courant engendré par une différence de potentiels égale à 60 Volts maintenue constante pendant 6 heures au moyen d'électrodes en

acier inoxydable entre les deux cellules à deux compartiments. L'une des faces de l'éprouvette est au contact d'une solution de Na Cl dosée à 30 g/l (compartiment amont : cathode), et l'autre face est au contact d'une solution de Na OH 0.3N (compartiment aval : anode)

Les surfaces cylindriques de l'éprouvette sont rendues étanches par un revêtement d'une couche de silicone. Les électrodes immergées dans chaque compartiment sont constituées par un grillage métallique. Le schéma représentatif du principe de fonctionnement et une photo de l'essai de perméabilité des ions chlore sont représentés sur les Figures II.9 et II.10.

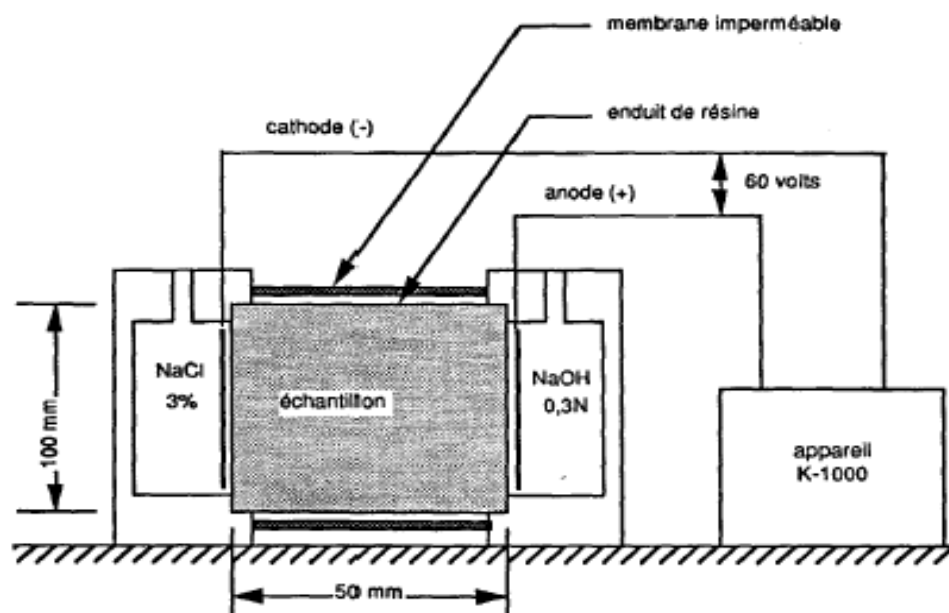


Figure II.9: Schéma représentatif du principe de fonctionnement de l'essai de perméabilité aux ions chlore

Tableau II.8 : Echelle de Whiting pour l'essai de perméabilité aux ions chlores tirée de la norme AASHT T277-831 [59].

Charge Totale passée (coulomb)	Perméabilité des ions chlores	Type de béton
>4000	Elevée	Eau/ciment >0.60
2000 – 4000	Modérée	Eau/ciment >0.45et 0.50
1000 – 2000	Faible	Eau/ciment <0.40
100 – 1000	Très faible	Béton au latex
<100	Négligeable	Béton polymère



Figure II.10 Photo de l'essai de perméabilité de béton aux ions chlore.

Les spécimens cylindriques de diamètre 100 mm et d'épaisseur de 50 mm sont obtenus en découpant des éprouvettes de 100mm x 200 mm à l'aide d'une scie à béton. Avant chaque essai, les éprouvettes sont soumises à une saturation d'eau après avoir été vidés de tout l'air à l'intérieur des éprouvettes à l'aide d'une pompe à vide (Figure II.11)

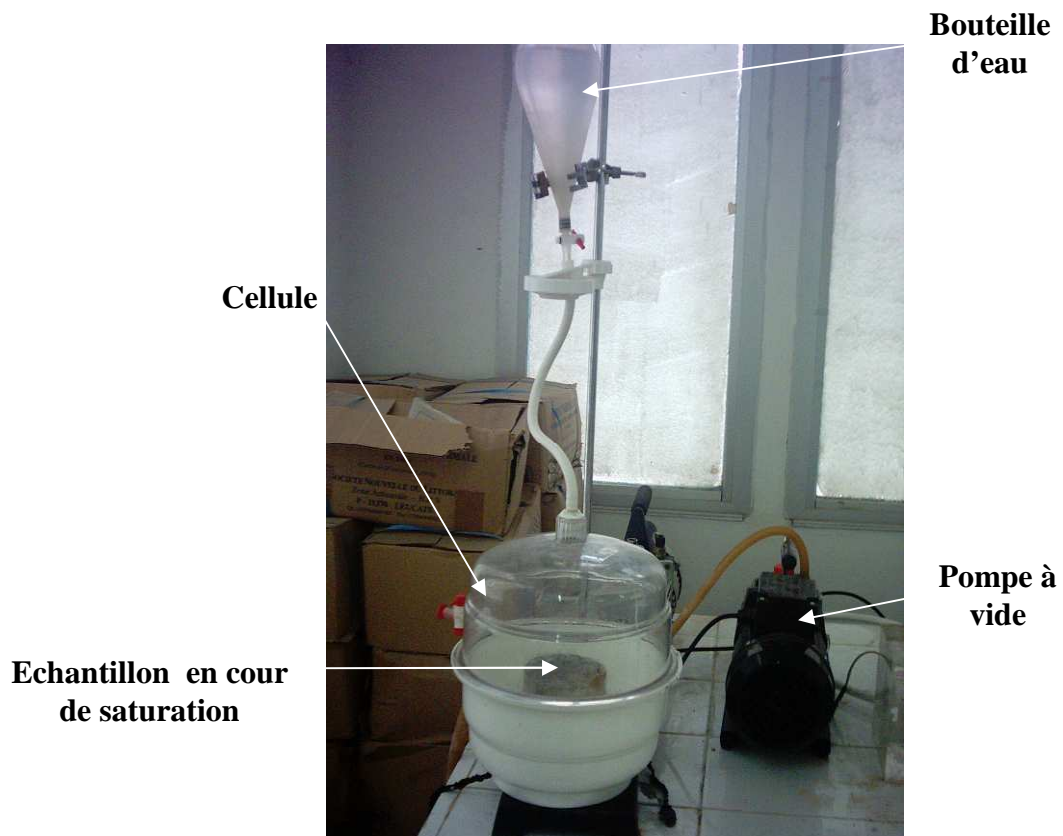


Figure II.11: Photo du spécimen soumis à la saturation

II.4.5 Essai de perméabilité au gaz

L'essai de la perméabilité du béton au gaz a été réalisé à l'aide du perméabilimètre Cembureau. L'appareil de mesure (Figure II.12) permet de mesurer le débit de gaz traversant une éprouvette en béton de forme cylindrique d'un diamètre de 150 mm et une hauteur de 50mm. L'éprouvette est obtenue par sciage et surfacage des éprouvettes de (150mm x 200mm). Cet essai consiste à mesurer le temps de passage d'une bulle de savon dans un tube en verre d'un volume connu.

Le perméabilimètre Cembureau est composé principalement :

- 1- d'une cellule de mesure
- 2- d'une unité de commande
- 3- d'un détendeur
- 4- d'une bouteille à gaz (air, O₂, ou Azote)
- 5- de tubes de mesure



Figure II.12: Photo de l'essai de perméabilité de béton au gaz

Le coefficient de perméabilité K est déterminé à partir de la relation suivante :

$$k = \eta \frac{2 \times Q \times P_0 \times H}{A \times (P^2 - P_a^2)}$$

Avec :

K = le coefficient spécifique de perméabilité (en m²).

A = la zone en coupe du spécimen de test (en m^2).

Q = le débit du gaz de test (en m^3/s).

H = la hauteur du spécimen dans le sens de flux (en m).

η = la viscosité dynamique du gaz de test (Azote = $1,75 \cdot 10^{-5}$).

P = Pression d'entrée (absolue) (en N/m^2).

P_a = Pression de sortie (pour ce test, cela correspond a la pression atmosphérique) (en N/m^2).

P_0 = Pression a la quelle le débit est mesuré (ici, elle équivaut a la pression atmosphérique P_a) (en N/m^2).

II.4.6 Essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité)

Les spécimens de béton sur lesquels on a effectué les essais de l'absorption d'eau sont de forme cubique de 70 mm de coté. Ils sont séchés dans une étuve jusqu'à atteindre la masse constante. Les faces latérales des spécimens ont été couvertes d'une mince couche de silicone pour assurer l'écoulement unidirectionnel, ensuite ils sont positionnés dans un récipient contenant de l'eau. Le niveau d'eau dans ce récipient est environ de 5 mm au dessus de la base des spécimens. La Figure II.13 montre un schéma de l'essai d'absorption d'eau.

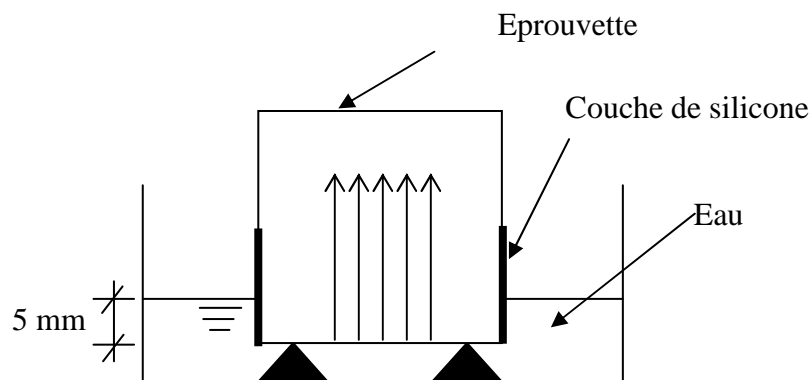


Figure. III.13: Schéma de l'essai d'absorption d'eau.

Les masses des spécimens ont été mesurées tous les : 1/4 h, 1/2 h, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h et 24 heures, à l'aide d'une balance de précision de 0.01g. Le coefficient de sorptivité (S), a été obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$\frac{Q}{A} = S \cdot \sqrt{t}$$

Q = la quantité d'eau adsorbée en (cm^3).

A = la surface du spécimen en contact avec l'eau (cm^2).

t = le temps (s).

S = le coefficient de sorptivité du spécimen ($\text{cm/s}^{1/2}$).

Pour déterminer le coefficient de sorptivité, Q/A a été tracé en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} puis, S a été calculé à partir de la pente de la relation linéaire entre Q/A et \sqrt{t} (Figure II.14).

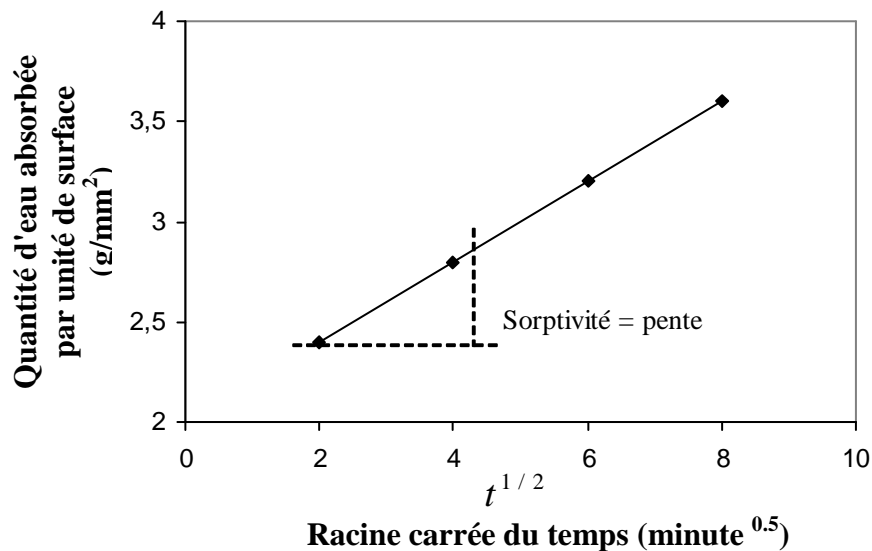


Figure II.14: Détermination de la sorptivité.

II.4.7 Essai de résistance aux sulfates

Les éprouvettes ($70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$) sont conservées dans l'eau à 20°C pendant 60 jours avant d'être soumises à l'immersion dans des bacs en plastique, contenant soit une solution de 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4) ou une solution de 5% de sulfate de magnésium (MgSO_4) dans les conditions du laboratoire. Les bacs en plastique utilisés ont une base ondulée, permettant ainsi le contact facile de la surface inférieure de l'éprouvette avec la solution en question (Figures.II.16 et .II.17). Les solutions de sulfates ont été renouvelées chaque deux mois.



Figure II.15: Immersion des éprouvettes dans une solution de sulfate de sodium 5% (Na_2SO_4)



Figure II.16: Immersion des éprouvettes dans une solution de sulfate de magnésium 5% (MgSO_4).

II.4.8 Essai de résistance aux acides

Les éprouvettes de forme cubique ($70 \times 70 \times 93 \text{ mm}^3$) sont également conservées dans l'eau à 20°C pendant 60 jours avant d'être soumises à l'immersion dans des bacs en plastique, contenant soit une solution de 3% d'acide sulfurique (H_2SO_4) ou une solution de 3% d'acide chlorhydrique (HCL) dans les conditions ambiantes du laboratoire. Les solutions d'acide sont renouvelées chaque deux mois. La résistance chimique relative a été déterminée après 20, 60 et 90 jours d'immersion à la température ambiante. Les parties attaquées des éprouvettes de béton ont été nettoyées avec de l'eau, ensuite la résistance chimique a été évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette:

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

Où :

M_1 : la masse (en gramme) des éprouvettes avant l'immersion.

M_2 : la masse (en gramme) des éprouvettes après l'immersion.

II.5 Variables étudiées

Le tableau II.9 et la figure II.17 récapitulent la formulation du béton, les paramètres et les variables étudiés ainsi les différents essais effectués sur les éprouvettes de bétons confectionnés.

Tableau II.9 : Tableau récapitulatif de la formulation du béton et les différentes variables étudiées

Mélange du béton	Ciment (C) kg/m ³	Sable (S) 0/4mm kg/m ³	Fines Calcaires kg/m ³	Gravier (G1) 3/8mm kg/m ³	Gravier (G2) 8/15mm kg/m ³	Eau	Rapport E/C
A 0	350	601.3	0	266	904.5	227.5	0.65
A 5	350	571.24	30.06	266	904.5	227.5	0.65
A 15	350	511.11	90.19	266	904.5	227.5	0.65
A 25	350	450.98	150.32	266	904.5	227.5	0.65
B 0	350	601.3	0	266	904.5	227.5	0.65
B 5	350	571.24	30.06	266	904.5	227.5	0.65
B 15	350	511.11	90.19	266	904.5	227.5	0.65
B 25	350	450.98	150.32	266	904.5	227.5	0.65
C 0	350	601.3	0	266	904.5	227.5	0.65
C 5	350	571.24	30.06	266	904.5	227.5	0.65
C 15	350	511.11	90.19	266	904.5	227.5	0.65
C 25	350	450.98	150.32	266	904.5	227.5	0.65
A, B et C : Type de ciment utilisé							

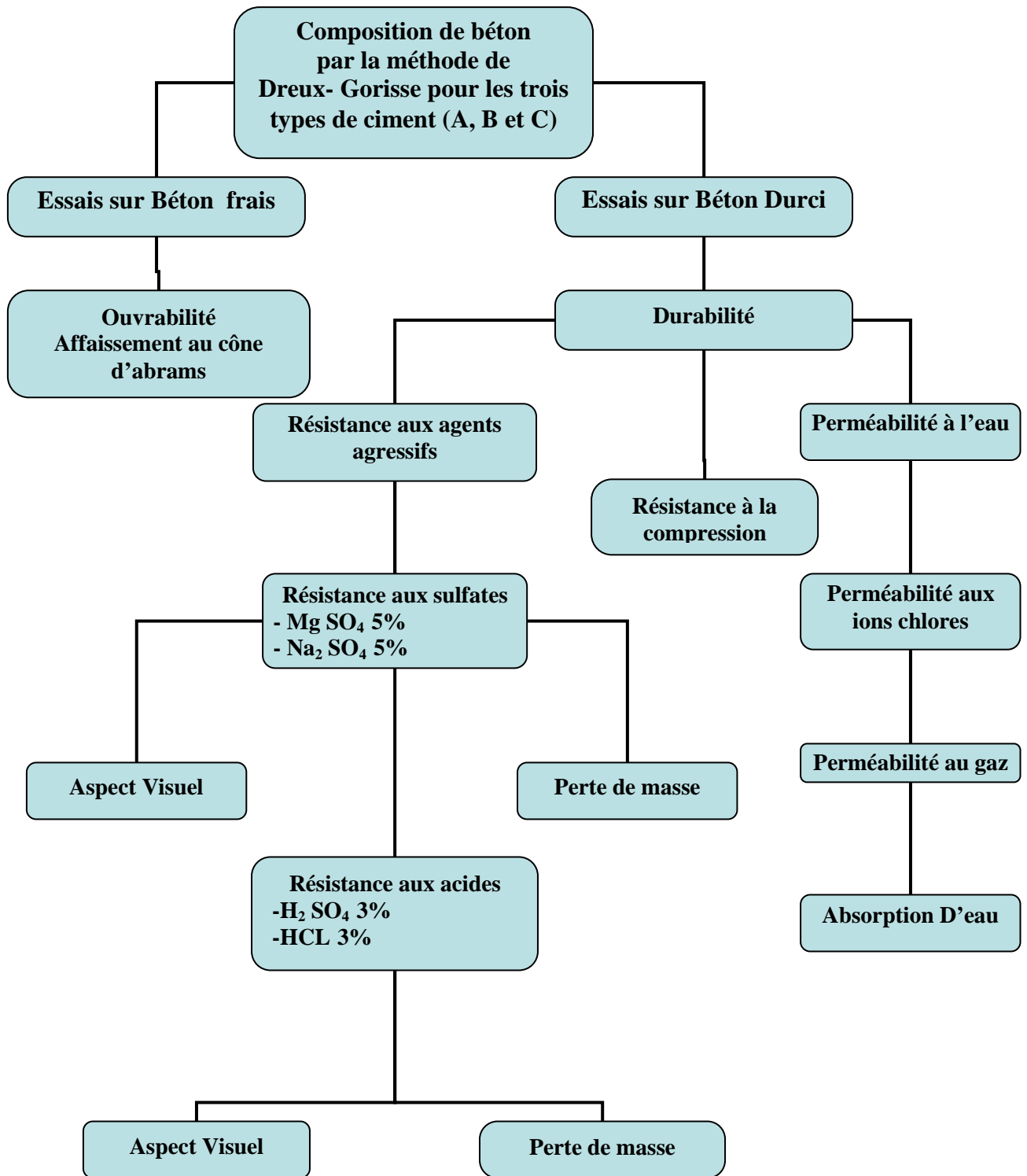


Figure III.17: Organigramme récapitulatif des différents essais réalisés

Chapitre 3

Analyse et interprétation des résultats expérimentaux

Chapitre. III Analyse et interprétation des résultats Expérimentaux

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus expérimentalement sur l'effet des fines calcaires sur les propriétés physico- mécaniques et durabilité des bétons à base de sable de concassage.

III.2 Béton frais

a) Ouvrabilité

L'ouvrabilité des différents bétons à base de sable de concassage a été mesurée conformément à la norme NFP 18-451 [43]. Les résultats obtenus de l'affaissement des bétons en fonction du pourcentage de fines calcaires sont représentés sur la Figure III.1. On remarque que l'affaissement diminue avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires pour tous les types de ciments (A, B et C) utilisés. La plus faible diminution d'affaissement est observée à 25 % d'ajout calcaire, cette diminution est due principalement à la forte absorption d'eau par les fines calcaires. Ces résultats confirment ceux obtenues par d'autres chercheurs.

BERTRANDY, R [9] a observé une diminution systématique de l'ouvrabilité des bétons avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires. HABBOUCHE, A. [22] a aussi montré que l'augmentation du pourcentage de fines calcaires dans les sables de concassage augmente la quantité d'eau de gâchage. MENADI et al [46] ont observé une diminution systématique de l'affaissement pour les bétons contenant 15 % de fines calcaires substituées au sable de concassage par rapport aux bétons sans fines pour tous les types de ciments.

D'autre part, on remarque aussi que l'affaissement des bétons dépend également de la finesse des ciments. Les bétons confectionnés avec le ciment A de surface spécifique Blaine ($3500 \text{ cm}^2/\text{g}$), ont donné des valeurs d'affaissement plus faibles par rapport aux valeurs des bétons confectionnés avec les ciments B et C, de surface spécifique Blaine (3080 et $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$) respectivement. La demande en eau augmente avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires dans les mortiers. Cet effet est attribué à la grande surface spécifique ainsi que la forme et la texture des fines [5,8].

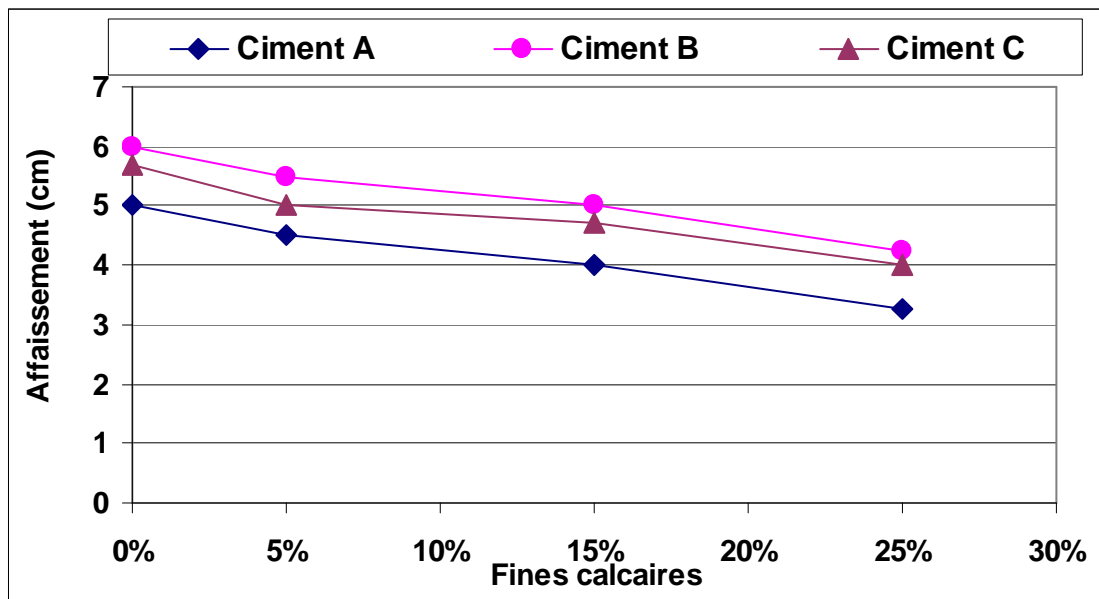


Figure III.1 Effet des fines calcaires sur l'affaissement

III.3 Béton durci

III.3.1 Résistance à la compression

Les figures III.2 et III.3 montrent la variation de la résistance à la compression du béton à base de sable de concassage en fonction du pourcentage des fines calcaires pour les différents types de ciments A, B et C à 60 et 90 jours de cure. La figure III.4 donne une comparaison de la résistance à la compression de ces bétons.

On remarque que pour tous les types de ciment utilisés, l'allure des courbes est la même. La résistance à la compression des bétons à 60 et à 90 jours semble être améliorée par rapport au béton témoin pour un taux de fines calcaires de 5%.

Pour le ciment A, l'augmentation de la résistance à la compression des bétons à 60 jours est de l'ordre de 3 % alors qu'à 90 jours l'accroissement atteint 6%. Pour le ciment, l'augmentation de la résistance à la compression des bétons à 60 et 90 jours est de 8 % et 5 % respectivement par rapport au béton témoin.

En ce qui concerne le ciment C, une faible différence entre les valeurs obtenues de la résistance à la compression a été observée. On remarque aussi que la résistance à la

compression des bétons contenant 15 % de fines calcaires substituées au sable de concassage, est comparable à celle des bétons sans fines calcaires.

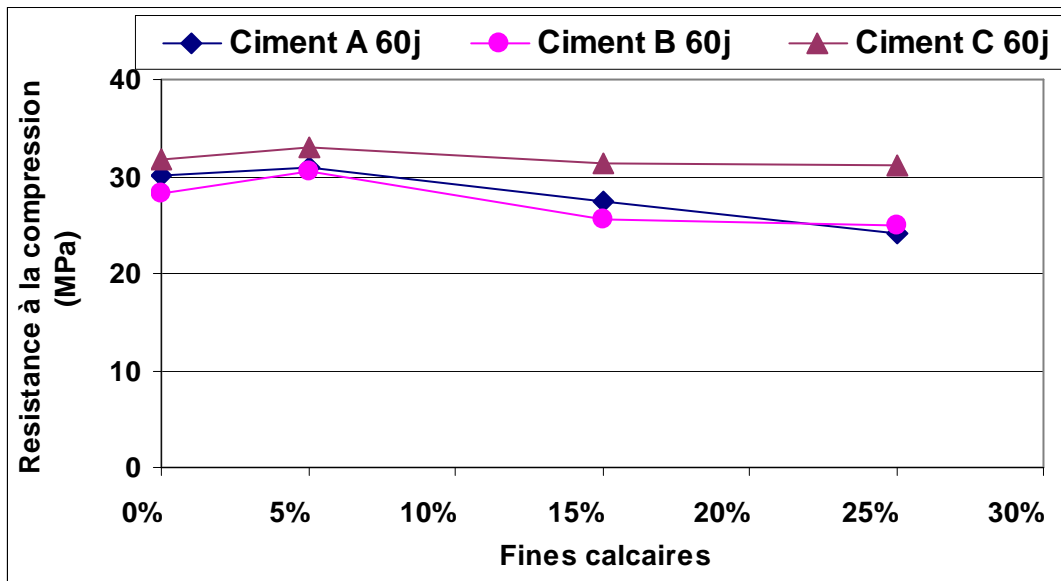


Figure III.2 Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 60 jours

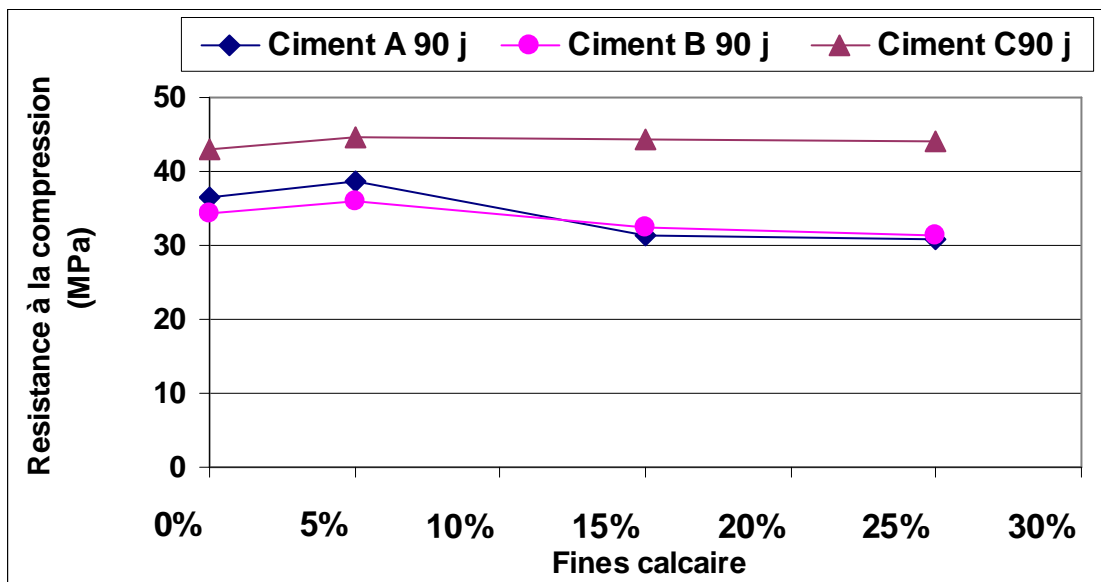


Figure III.3 Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 90 jours

Cette augmentation est due à la contribution des fines calcaires à la résistance par la réaction entre le CaCO_3 et C_3A du ciment. La présence du CaCO_3 accélère aussi

l'hydratation du C_3S , cette relation montre que les fines calcaires ne sont pas totalement inertes [35, 36, 65]. Cette réactivité peut être due à l'excès de broyage, ou du broyage fin du $CaCO_3$.

A 25 % de fines calcaires, une diminution sensible de la résistance à la compression est observée pour les ciments A et B et une résistance comparable est obtenue avec le ciment C. Il semble qu'à 15 % de fines calcaires les deux effets contradictoires de dilution et l'effet bénéfique des fines (physique et chimique) se neutralisent. L'effet de dilution est prépondérant à 25 % de fines calcaires. On remarque d'après la figure III.4 que la résistance à la compression augmente avec le temps, cette augmentation est due au développement de l'hydratation en fonction du temps.

Ces résultats sont en concordance avec plusieurs études antérieures. KENAI et al [8], ont observé que les bétons à base de sable de concassage contenant 15 à 20 % de fines calcaires peuvent être utilisés sans affecter leurs propriétés physico-mécaniques. L'augmentation de résistance à la compression selon l'étude faite par HABBOUCHE, A. [22] est de l'ordre de 7 % à 20 % pour un optimum de fines de 12 % à 15 %.

BONAVETI V, L. et al [5], ont obtenu une augmentation de la résistance à la compression de 44 % à 72 % au jeune âge pour les mortiers contenant des fines calcaires. SAID MANSOUR. M [32] a trouvé que la résistance à la compression augmente pour un niveau de substitution de 10% de calcaires à 2 jours. Cependant l'augmentation d'ajout calcaire réduit la résistance à la compression à long terme. D'après l'étude faite par MENADI et al [46], on observe qu'à 90 jours de cure, le béton contenant 15% des fines calcaires substituées au sable de concassage subit une diminution de la résistance à la compression de 6 % à 15 % par rapport au béton de référence et cette chute est indépendante du type de ciment. KENAI et al [4] ont constaté que la résistance à la compression des mortiers augmente avec le temps, cette augmentation est due au développement de l'hydratation en fonction du temps. Cependant, la résistance à la compression est plus faible pour les éprouvettes ayant plus d'ajout calcaires. L'étude expérimentale a montré que les pertes de résistances dues à la dilution peuvent être compensées par un broyage plus fin du ciment.

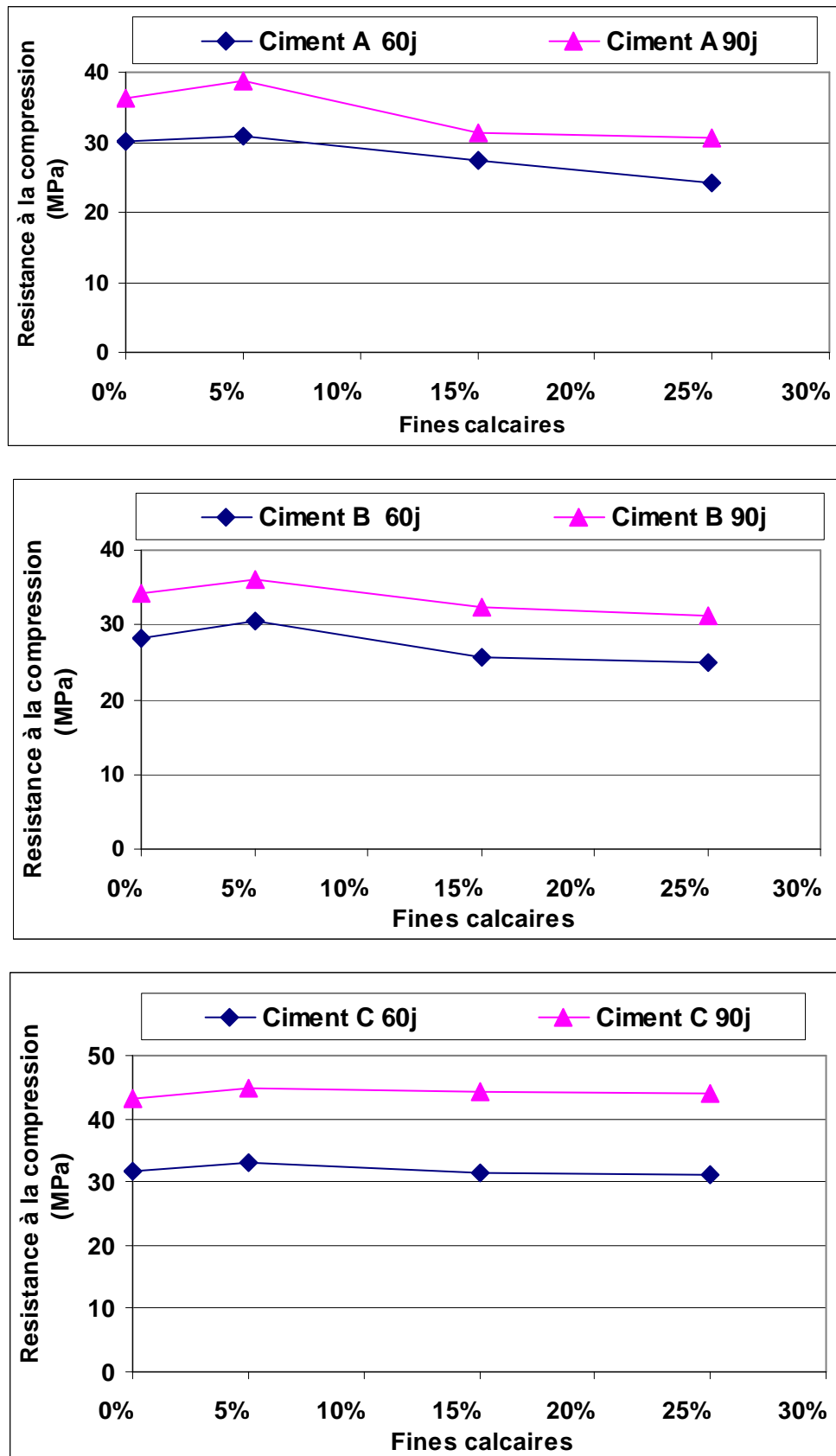


Figure III.4 Effet des fines calcaires et de l'âge sur la résistance à la compression des différents ciments utilisés

III.3.2 Perméabilité des bétons à l'eau

Les résultats obtenus des essais de la perméabilité à l'eau (pénétration de l'eau) des bétons avec et sans fines calcaires des différents ciments utilisés sont illustrés sur la figure III.5, qui résume la pénétration d'eau relative à celle du béton sans fines calcaires. On remarque que l'allure des histogrammes des bétons confectionnés avec les ciments A et B est comparable. Les valeurs de pénétration de l'eau dans les bétons sont aussi comparables pour tous les types de ciment, et elles varient de 45 mm à 62 mm (figure III.6). Ces valeurs montrent que le béton est fortement perméable.

Pour le cas du béton confectionné avec les ciments A et B, une faible diminution de la pénétration d'eau pour un pourcentage de fines calcaires de 5 % est observée par rapport au béton de référence.

Cependant les bétons contenant 15 % de fines calcaires ont présenté la pénétration maximale de l'eau pour les deux types de ciment utilisés (A et B). Cette augmentation de la pénétration de l'eau par rapport au béton témoin est de l'ordre de 9 % et 29 % respectivement pour les ciments A et B.

En ce qui concerne le béton confectionné avec le ciment C, on remarque que l'allure de cet histogramme est totalement inversée en comparaison à celui des ciments A et B. Le béton avec 15 % de fines calcaires a donné la valeur la plus faible de la pénétration d'eau ceci est probablement lié à la faiblesse de ce ciment et à sa faible teneur en C_3A . MENADI et al [46] ont observé que l'incorporation de fines calcaires substituées au sable de concassage jusqu'à 15 % dans les bétons, peut améliorer la structure des pores dans la zone de transition et réduire la perméabilité à l'eau. TSIVILIS et al [25] ont conclu que l'augmentation de la finesse de ciment diminue la perméabilité du béton

TSIVILIS et al [26] ont montré que les bétons avec 15 % d'ajout calcaire ont une porosité similaire à celle des bétons sans ajout. Par contre, un effet positif de l'ajout calcaire sur la perméabilité à l'eau a été constaté. Ces variations sont dues à l'effet de dilution qui influe sur la distribution et le volume des pores.

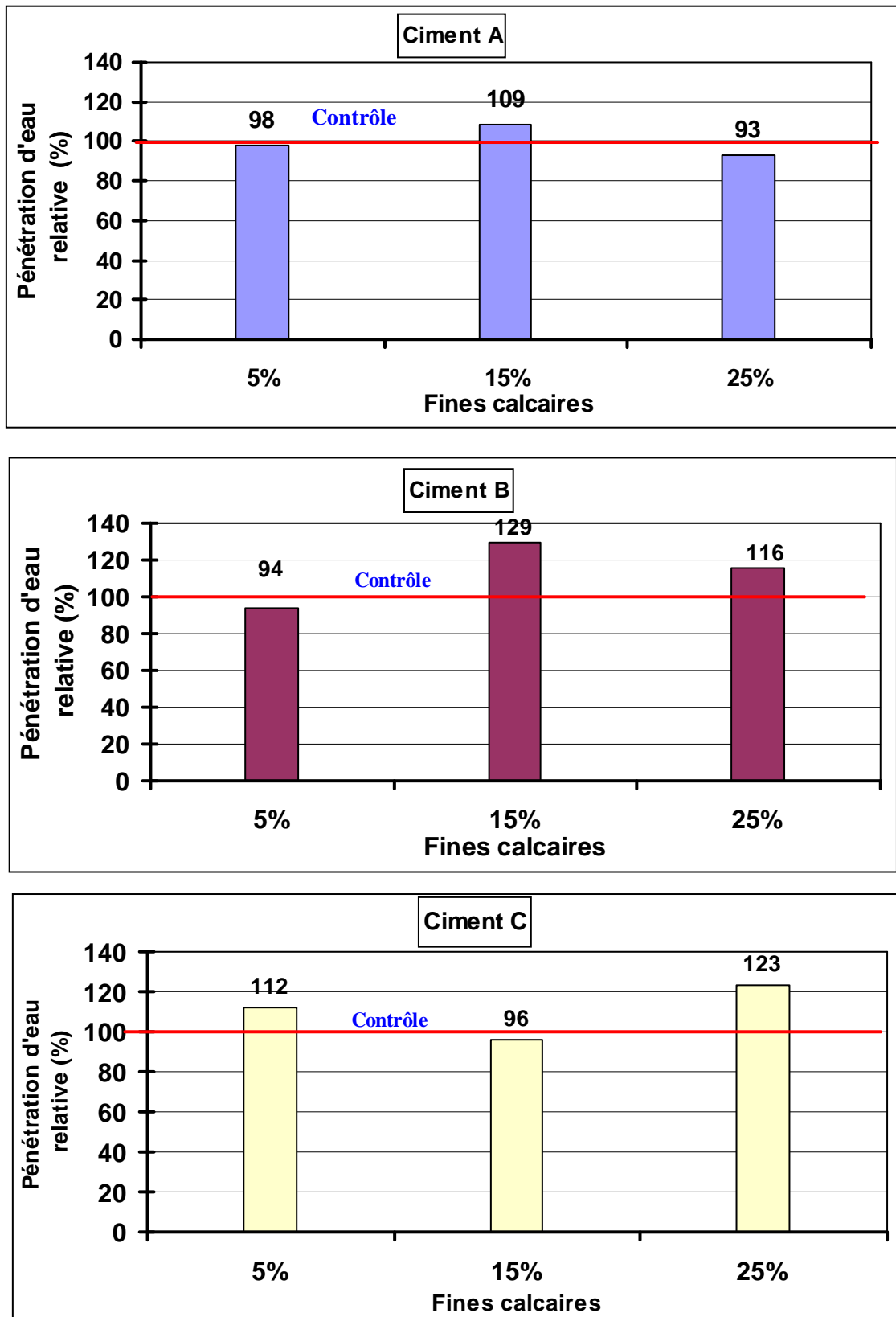


Figure III.5 Effet des fines calcaires sur la pénétration d'eau relative des différents ciments utilisés

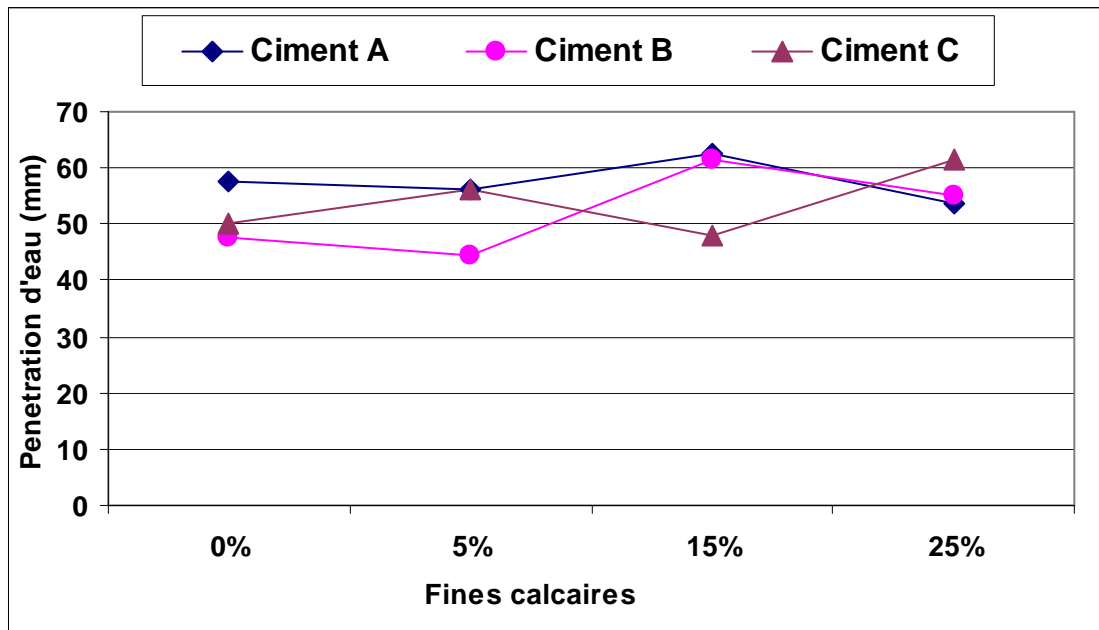


Figure III.6 Effet des fines calcaires sur la pénétration d'eau des différents ciments utilisés

III.3.3 Perméabilité des bétons aux ions chlores

L'essai de la perméabilité des bétons aux ions chlores a été effectué selon la norme ASTM C-1202 [45]. Les figures III.7 et III.8 présentent la perméabilité des ions chlores en fonction du pourcentage des fines calcaires dans les bétons à base de sable de concassage et des différents types de ciments utilisés (A, B et C). On remarque que la perméabilité aux ions chlores des bétons augmente avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires substituées au sable de concassage. Par conséquent, le béton contenant 25 % de fines calcaires donne la valeur maximale de la perméabilité aux ions chlores.

La perméabilité du béton sans fines calcaires (béton de référence) varie de 4438 à 7314 coulombs montrant un béton très perméable selon l'échelle proposée par WHITING [59]. La substitution du sable de concassage par de fines calcaires a donné des perméabilités allant de 7744 à 13707 coulombs pour les ciments A et B, montrant aussi un béton très perméable selon l'échelle de WHITING [59]. Cependant, l'augmentation de la perméabilité aux ions chlores pour le ciment C est faible pour 5 % et 15 % de fines calcaires et atteint une charge de 7773 coulombs à 25 % de fines. Cette augmentation peut être due au rapport élevé de E/C =0.65.

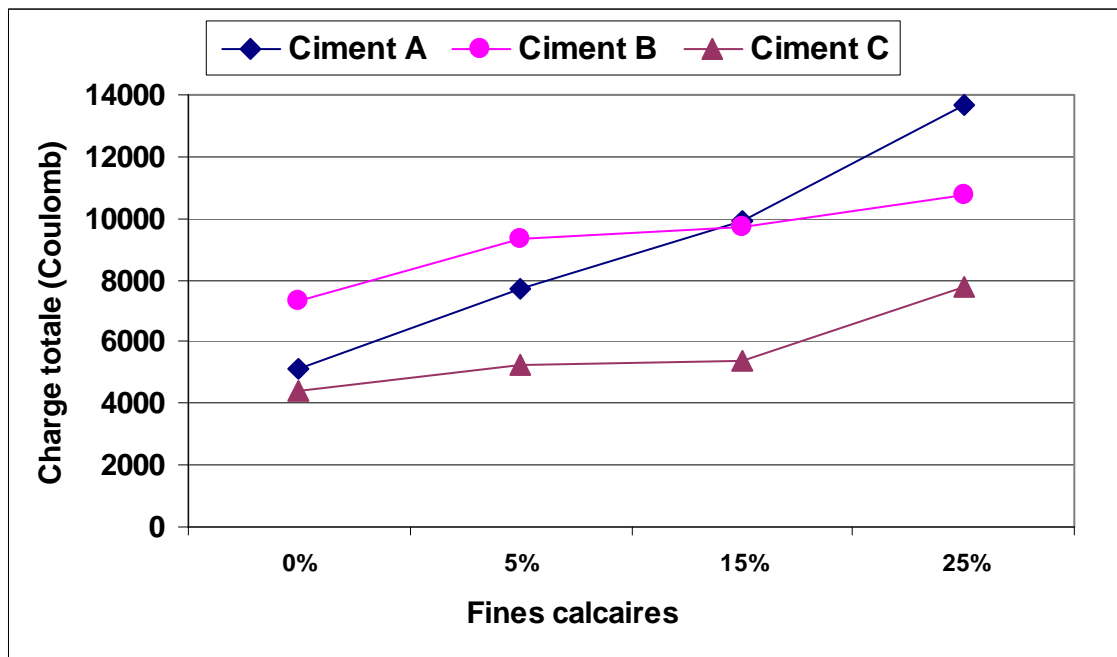


Figure III.7 Effet des fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlorures des différents ciments utilisés

Ces résultats sont en concordance avec plusieurs études antérieures. BONAVETTI et al [18] ont montré que la profondeur de la pénétration des ions chlorure augmente avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires, ils ont expliqué que cette augmentation est due à la prépondérance de l'effet de dilution sur l'accélération d'hydratation due à la présence des fines calcaires.

L'étude réalisée par SAID MANSOUR. M [32] a montré que la perméabilité aux ions chlorures à 90 jours pour le béton contenant 15 % d'ajout calcaire substitué au ciment (15200 coulombs) est supérieure à celle du béton de référence (6450 coulombs).

MENADI et al [46] ont montré que tous les bétons fabriqués avec les différents types de ciments (A, B, C, et D), avec et sans fines calcaires substituées au sable de concassage, donnent des valeurs élevées des charges passées au-dessus de 4000 coulombs, qui indiquent la faible résistance à la pénétration des ions chlorures. Cela peut être attribué au rapport élevé de ($E/C = 0.65$).

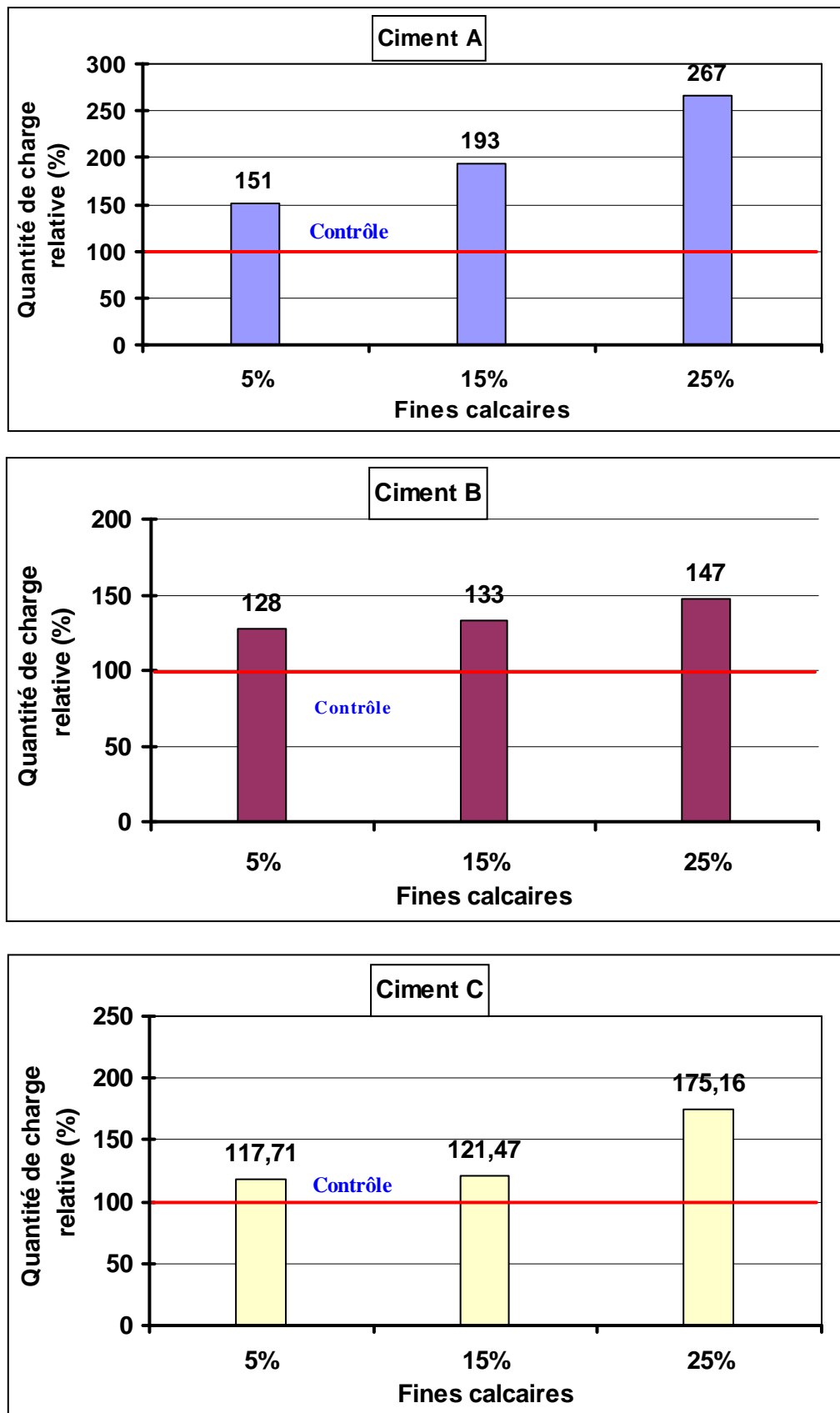


Figure III.8 Effet de fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlorés relative des différents ciments utilisés

III.3.4 Perméabilité des bétons au gaz

La perméabilité des bétons au gaz a été déterminée à l'aide d'un perméabilimètre Cembureau. La figure III.9 montre l'effet des fines calcaires sur la perméabilité au gaz pour les trois ciments testés. La perméabilité au gaz relative à celle du béton de référence (sans fines calcaires) est représentée sur la figure III.10 pour les trois types de ciments. On remarque que les bétons contenant 5 % et 15 % des fines calcaires présentent les valeurs les plus élevées du coefficient de la perméabilité au gaz par rapport au béton de référence pour les ciments A et B, et que 15 % de fines calcaires donne la valeur maximale de ce coefficient

La substitution de 25 % de sable de concassage par des fines calcaires a légèrement diminué la perméabilité au gaz du béton des ciments A et B. L'influence de l'ajout calcaire sur la perméabilité au gaz du béton fabriqué avec le ciment C est très faible en comparaison avec les ciments A et B. La plus faible perméabilité des bétons au gaz est obtenue avec 15 % de fines calcaires. Le ciment C a une faible teneur en C_3A (3 %) (C'est un ciment résistant aux sulfates) et par conséquent, son comportement est différent par rapport aux ciments A et B. Cependant, on constate que la finesse du ciment peut améliorer la qualité du béton vis-à-vis sa perméabilité au gaz.

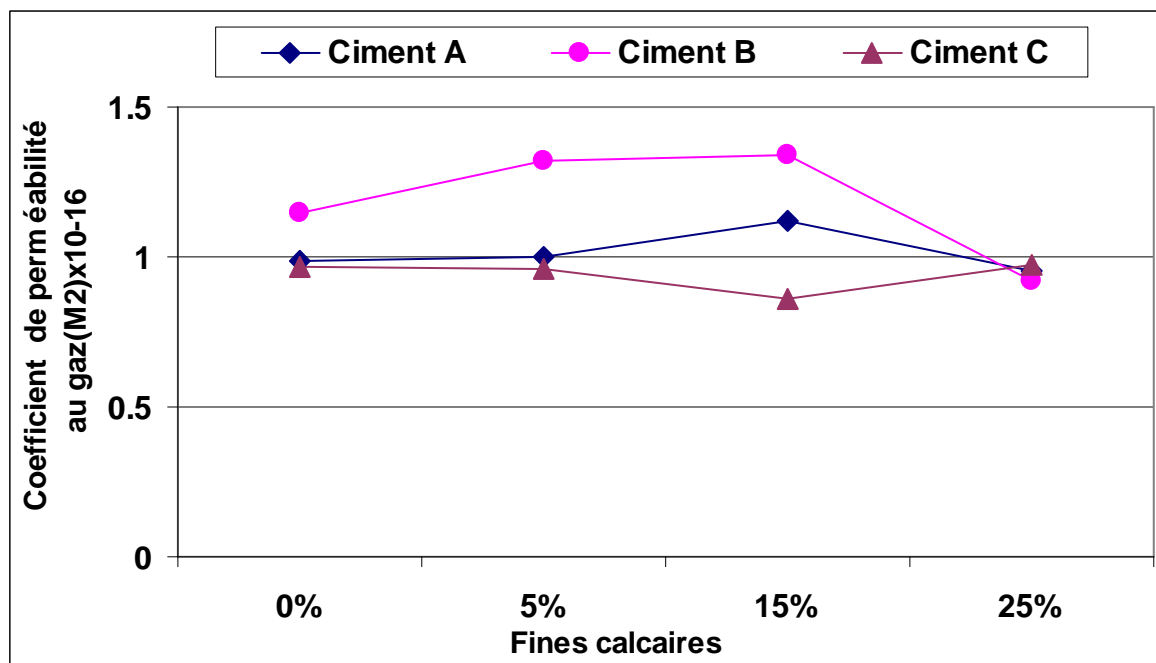


Figure III.9 Effet des fines calcaires sur le coefficient de perméabilité au gaz des différents ciments testés

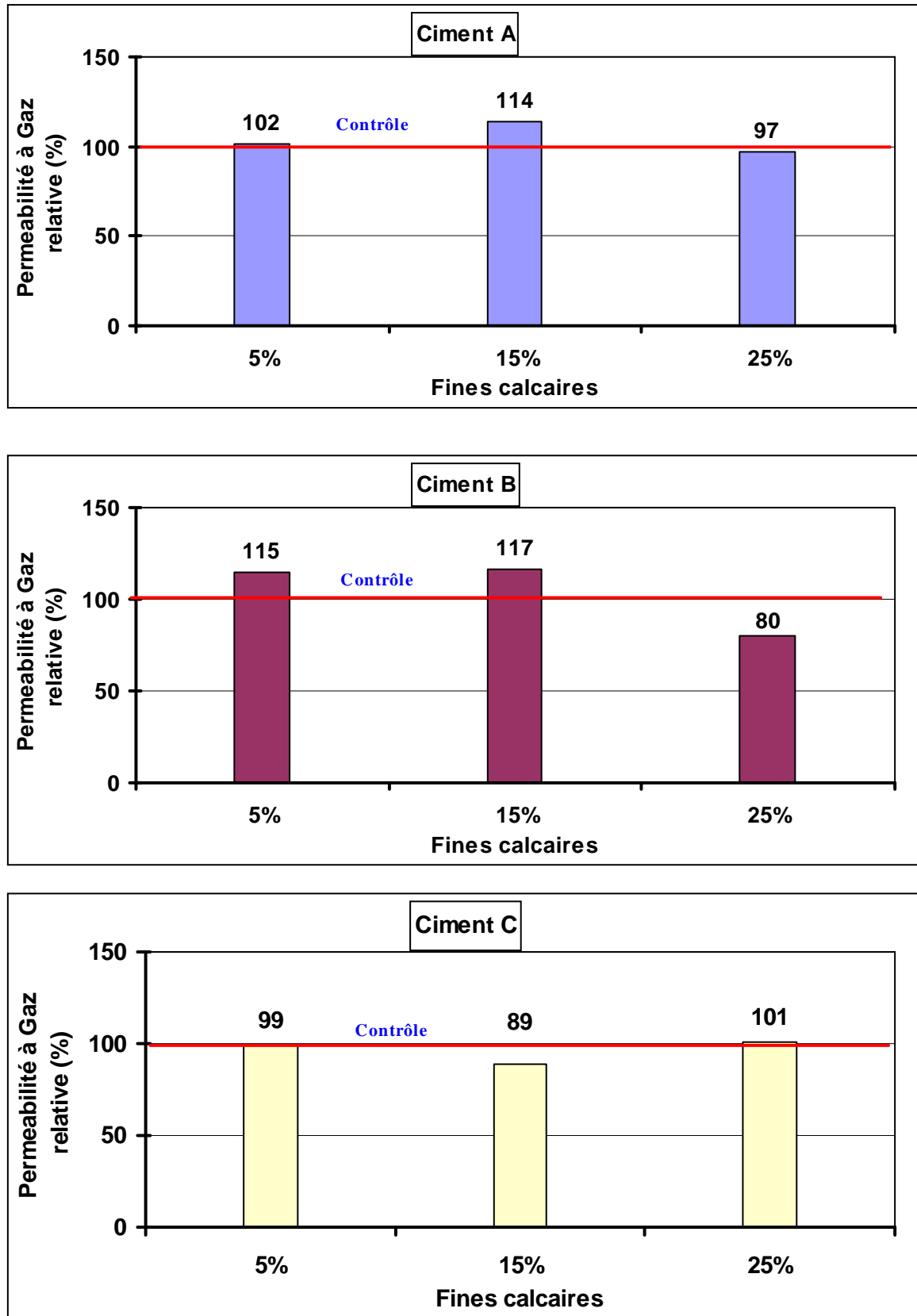


Figure III.10 Effet de fines calcaires sur la perméabilité au gaz relative des différents ciments testés

Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres chercheurs. TSIVILIS et al [26] ont observé que les bétons fabriqués avec du ciment contenant des fines calcaires ont donné les valeurs les plus élevées du coefficient de perméabilité au gaz qui varient de ($2,65 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ à $3,03 \times 10^{-17} \text{ m}^2$) en comparaison avec celles des bétons fabriqués avec des ciments sans ajouts calcaires ($2,26 \times 10^{-17} \text{ m}^2$). Néanmoins le béton contenant 35 % d'ajout calcaire a donné la plus faible valeur de ce coefficient ($2,10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$).

TSIVILIS et al [25] ont montré que le béton fabriqué avec deux types de ciment et avec le même ajout calcaire ont un effet tantôt négatif tantôt positif sur la perméabilité au gaz. Pour le béton confectionné avec le premier type de ciment, l'incorporation de 20 % de fines calcaires a augmenté le coefficient de la perméabilité au gaz de 120 % par rapport au béton témoin, tandis que pour le béton fabriqué avec le deuxième type de ciment, l'incorporation de 20 % de fines calcaires a réduit le coefficient de la perméabilité au gaz de 38 % par rapport au béton de référence. Il faut noter que les deux types de ciment (C_1 et C_2) sont des ciments sans ajout avec une teneur en C_3A de 7.54 % et 11.74 % respectivement. Ils ont conclu que la qualité du ciment affecte de manière significative la perméabilité au gaz, et que l'ajout calcaire réduit la perméabilité du béton plus particulièrement pour les ciments qui ont un pourcentage élevé de C_3A . [25]. De plus ils ont remarqué que l'augmentation de la finesse du ciment peut réduire la perméabilité du béton au gaz.

L'étude entreprise par MENADI et al [46] a montré que l'ajout des fines calcaires augmente la perméabilité au gaz des bétons. Cette augmentation est indépendante du type de ciment, de plus, les valeurs du coefficient de perméabilité au gaz de béton fabriqué sans fines calcaire varient (de $5,08 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ à $9,06 \times 10^{-17} \text{ m}^2$) tandis que l'incorporation de fines calcaires dans le béton montrent bien que le coefficient de perméabilité au gaz varie (de $6,03 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ à $9,72 \times 10^{-17} \text{ m}^2$). Les bétons sans fines calcaires fabriqués avec les ciments A ou B ont des valeurs élevées de la perméabilité au gaz comparées à ceux qui sont fabriqués avec les ciments C et D avec ou sans les fines calcaires. Ceci peut être dû à la faible finesse des ciments A et B comparée à celle des ciments C et D. L'augmentation de la perméabilité au gaz de tous les bétons contenant 15 % de fines peut être due à l'effet de dilution des fillers. La perméabilité du béton n'est pas une fonction simple de la porosité, mais elle dépend également de la taille, la distribution, la forme, la tortuosité, et la continuité des pores. En outre, la distribution de la taille des particules du ciment influe sur la perméabilité des bétons [26].

III.3.5 L'absorption des bétons (sorptivité)

La figure III.19 représente l'effet des différents pourcentages de fines calcaires substituées au sable de concassage sur la sorptivité des bétons. D'après cette figure on remarque que les courbes des bétons confectionnés avec tous les types de ciments A, B et C ont la même tendance. En général, les valeurs de la sorptivité de tous les bétons confectionnés avec et sans fines calcaires varient de ($3.3 \text{ cm/s}^{0.5}$ à $3.9 \text{ cm/s}^{0.5}$). Une faible réduction de la sorptivité pour les bétons contenant 5 % de fines calcaires est observée. Cette réduction est de l'ordre de 2.7 % ; 3 % et 2.8 % pour les ciments A, B et C respectivement.

Dans ce cas, les pores dans la pâte durcie, les interfaces entre les agrégats et la pâte de ciment sont remplis par les fines calcaires et par conséquent, les pores capillaires sont réduits, d'où une réduction de la sorptivité des bétons. Cependant, l'incorporation de 15 % et 25 % de fines calcaires a augmenté légèrement la sorptivité des bétons pour tous les types de ciment testés, on note que l'incorporation de 25 % de fines calcaires a donné la valeur maximale de la sorptivité du béton fabriqué avec le ciment C.

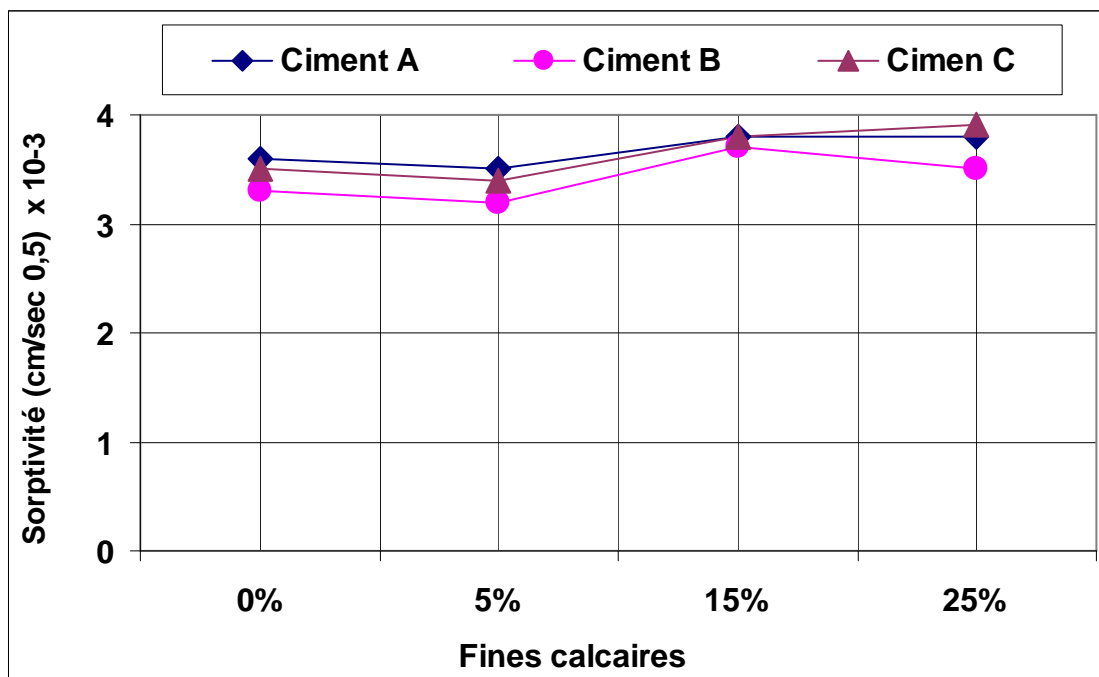


Figure III.11 Effet des fines calcaires sur le coefficient de sorptivité des différents ciments utilisés

Plusieurs recherches ont montré l'efficacité des ajouts minéraux sur la sorptivité des bétons et des mortiers. TSIVILIS et al [25] ont noté une faible augmentation de la sorptivité pour les bétons contenant des ajouts calcaires. Des valeurs maximales (0.257 et 0.275 mm/min^{0.5}) de sorptivité ont été enregistrées pour les bétons contenant 35 % de fines calcaires pour les deux types de ciments. TSIVILIS et al [26] ont observé une faible diminution, de l'ordre de 5 %, de la sorptivité des bétons fabriqués avec un ciment contenant 15 % de calcaire par rapport au béton contrôle avec un E/C=0.7. Ils ont conclu que l'addition de calcaire semble affecter de manière positive la sorptivité des bétons.

L'étude effectuée par SAID MANSOUR [32] a montré qu'à 28 et 90 jours la sorptivité du béton contenant 15 % d'ajout calcaire à un effet négligeable en comparaison avec le béton de référence. MENADI et al [46] ont montré que pour tous les bétons confectionnés avec quatre types de ciment (A, B, C et D), l'incorporation de 15 % des fines calcaires substituées au sable de concassage a un effet négligeable sur l'absorption capillaire. Cette dernière a une tendance similaire pour tous les mélanges des bétons. Ainsi les valeurs les plus élevées de l'absorption capillaire ont été observées pour les bétons fabriqués avec un ciment de faible finesse (ciment A) et indépendamment de la quantité de l'addition calcaire.

III.3.6 Résistance aux sulfates

III.3.6.1 Aspect visuel

a) Eprouvettes conservées dans les sulfates de magnésium

L'inspection visuel des éprouvettes de béton avec et sans fines calcaires des différents ciments utilisés après 360 jours d'immersion dans 5 % de sulfates de magnésium MgSO₄ sont présentées sur la figure III.12. On constate que les bétons avec ou sans fines calcaires fabriqués avec le ciment A ont subi plus ou moins les mêmes dégradations. Une apparition de microfissures locales sur toutes les éprouvettes de béton qui se traduisent par un décollement de petits morceaux de béton non cohésifs à la surface de l'éprouvette et notamment au niveau des arrêtes.

Cependant, les éprouvettes de béton confectionnées avec le ciment B, ont subi des dégradations importantes se traduisant par un décollement de morceaux de béton. L'apparition de fissures ainsi que le gonflement et l'éclatement du béton a été constaté sur

toute la partie extérieure des éprouvettes. Les dégradations importantes observées pour le béton à base de ciment B, sont dues principalement à la forte teneur en C_3A de ce type de ciment ($C_3A=7.70\%$) par rapport au ciment A ($C_3A=5.75\%$).

Ce genre de dégradation est la conséquence directe de l'attaque des sulfates de magnésium. En effet, les silicates de magnésium hydratés (M-S-H), provenant de la conversion des C-S-H n'ont pas de propriété liante, conduisant ainsi à une dégradation successive des couches de surface de la pâte de ciment durcie [53].

Le ciment C qui est un ciment résistant aux sulfates avec une faible teneur de ($C_3A=3\%$) a subi moins de dégradation que les ciments A et B. L'effet des fines calcaires sur la dégradation des éprouvettes de façon visuelle n'est pas évident.

b) Éprouvettes conservées dans les sulfates de sodium

L'état des éprouvettes de béton avec et sans fines calcaires après 360 jours d'immersion dans les sulfates de sodium 5 % Na_2SO_4 est représenté sur la figure III.13. D'après cette figure on remarque que le béton fabriqué avec le ciment A, est resté intact et n'a subi aucune dégradation. Par contre, le béton fabriqué avec le ciment B (avec et sans fines calcaires), a subi pratiquement les mêmes dégradations (l'apparition de fissures, gonflement et l'éclatement du béton). Ces dégradations sont moins intenses que celles observées dans le cas d'immersion dans la solution de sulfates de magnésium.

Les éprouvettes de béton à base de ciment C qui est un ciment résistant aux sulfates, n'ont subi aucune dégradation en raison de la faible teneur en $C_3A=3\%$. VERBECK G. J [6] a effectué des essais sur des éprouvettes de bétons contenant des différents teneurs en C_3A avec différent dosage en ciment, après 16 ans de conservation dans une solution de sulfate de sodium Na_2SO_4 dont la concentration était environ 10%, et la vitesse de dégradation a été évaluée par des observations visuelles ainsi que par la mesure des résistances mécaniques. Il a observé que la résistance chimique du béton croît avec le dosage en ciment, c'est-à-dire avec la compacité du béton. Il y a lieu de signaler que l'augmentation du dosage en ciment réduit le rapport E/C. D'autre part la vitesse de dégradation est pratiquement proportionnelle au pourcentage en C_3A du ciment portland, jusqu'à des teneurs de 10% environ.



Figure III.12: Etat des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% MgSO₄ pour les trois ciments utilisés



Figure III.13: Etat des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na₂SO₄ pour les trois ciments utilisés

Il faut noter que la détérioration des éprouvettes et le mécanisme d'attaque des deux environnements de sulfates (5% MgSO₄) et (5% Na₂SO₄) ne sont pas semblables.

L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs et/ou la perte des propriétés liantes des C-S-H du ciment. Les expansions peuvent causer des dommages structuraux considérables. Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère le rythme de destruction, le taux d'attaque est une fonction du temps d'exposition. L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface. Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates [52]. Par conséquent, on aura la formation des produits suivants :

- Formation de gypse secondaire

La formation de gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution ionique entre la portlandite et les sulfates. Elle s'établit dans le cas du sulfate de sodium (Na₂SO₄) selon la réaction suivante :



NaOH : Alcalinité élevée -> stabilisation des C-S-H.

CaSO₄ .2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

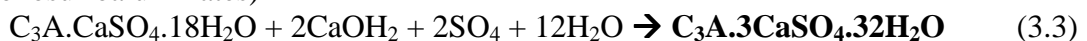
- Formation d'ettringite secondaire

Soit à partir du C₃A résiduel :



Soit à partir des aluminates hydratés:

(monosulfoaluminates)



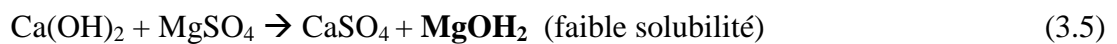
(C₄AH_x)



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

Le sulfate de magnésium est très fortement agressif car il donne une double action, de formation d'ettringite et de substitution des ions Ca^{2+} en Mg^{2+} .

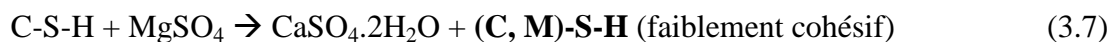
- Formation de produit expansif



$MgOH_2$ est caractérisée par une faible solubilité et un faible pH



- Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H :



III.3.6.2 Perte de masse

Les pertes de masse relative des différentes éprouvettes de bétons à base de sable de concassage en fonction du pourcentage de fines calcaires pour les différents types de ciments A, B et C après 360 jours d'immersion dans 5 % $MgSO_4$ et 5 % Na_2SO_4 sont représentées sur les figures III.14 et III.15 respectivement. D'après ces figures on remarque qu'une perte de masse relative importante, varie de 3 % à 6 % pour les bétons confectionnés avec le ciment B, et immergées dans la solution de sulfate de magnésium. Tandis que les éprouvettes immergées dans les sulfates de sodium ont donné des pertes de masse moins importantes (3 % à 4 %). Aucune perte de masse n'a été mesurée pour les éprouvettes du béton à base des ciments A et C avec et sans fines calcaires immergées dans les deux solutions sulfatiques, confirmant aussi les observations visuelles (Figure III.12 et Figure III.13).

La perte de masse dans le cas d'immersion dans les sulfates de magnésium est plus importante que celle observée avec les sulfates de sodium, montrant que le mécanisme d'attaque et de détérioration n'est pas identique.

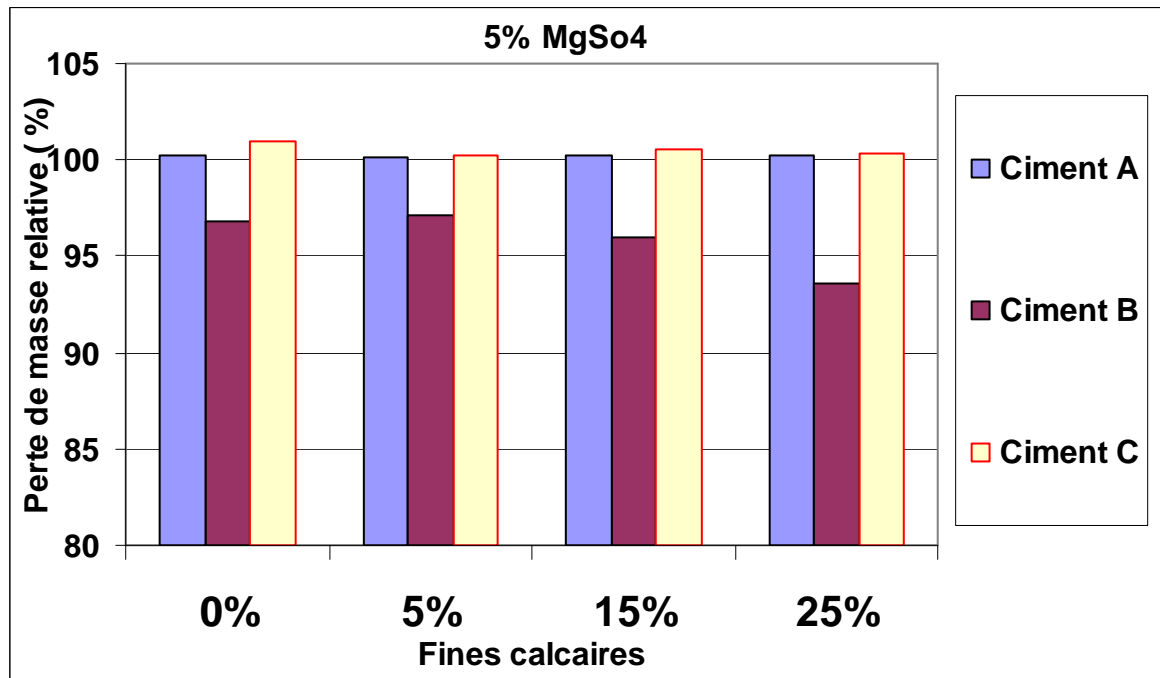


Figure III.14: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% MgSO₄

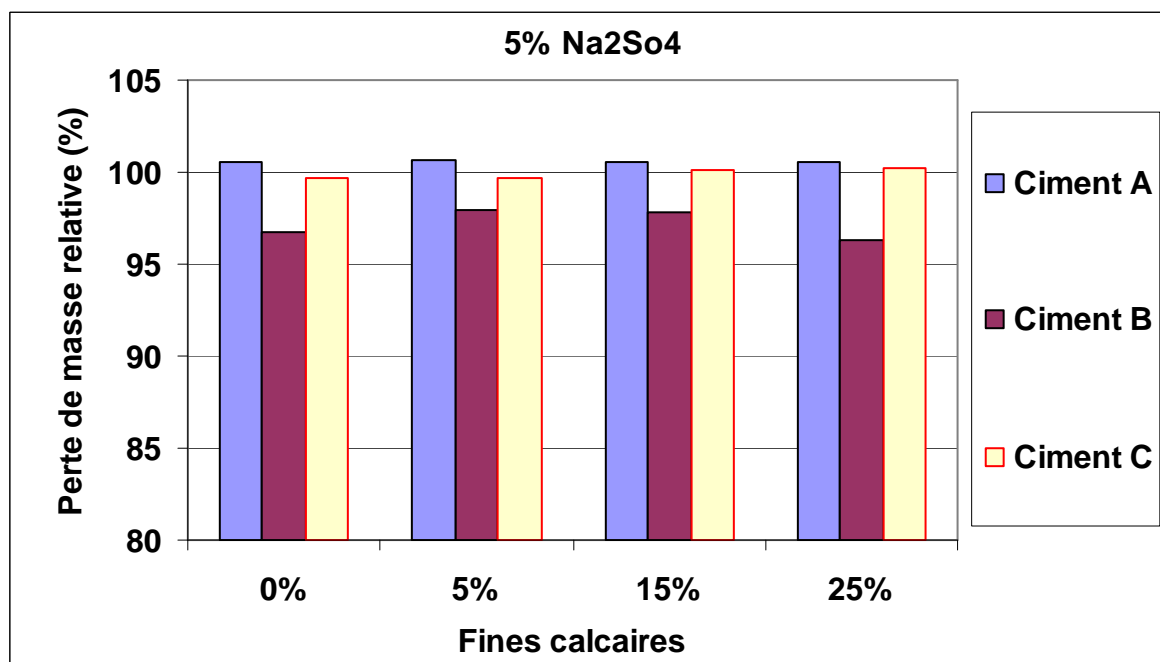


Figure III.15: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na₂SO₄

III.3.7 Résistance aux acides

III.3.7.1 Aspect visuel

a) Eprouvettes conservées dans l'acide (sulfurique et chlorhydrique)

Les figures III.16 et III.17 montrent l'état et l'aspect visuel des éprouvettes de béton immergées pendant 90 jours dans 3 % d'acide sulfurique (H_2SO_4) et 3 % d'acide chlorhydrique (HCL) respectivement. D'après la figure III.16 on remarque que pour tous les types de ciments (A, B et C), et pour tous les pourcentages des fines calcaires les éprouvettes du béton présentent une couleur grise claire. Les mêmes dégradations mineures qui se traduisent par l'apparition de légers éclatements et de faibles gonflements sur les surfaces sont observées pour les trois types de ciments et tous le taux de fines calcaires.

Les éprouvettes du béton immergées dans l'acide chlorhydrique (Figure III.18), a aussi engendré des dégradations comparables pour tous les types de ciments utilisés (A, B et C) et tous les taux de fines calcaires. Ces dégradations sont faibles et se manifestent sous forme d'érosion de la pâte de ciment au niveau de la surface des éprouvettes du béton laissant apparaître les agrégats. Il faut noter que l'attaque de l'acide chlorhydrique (HCL) est aussi observée par une couleur noir foncé des éprouvettes.

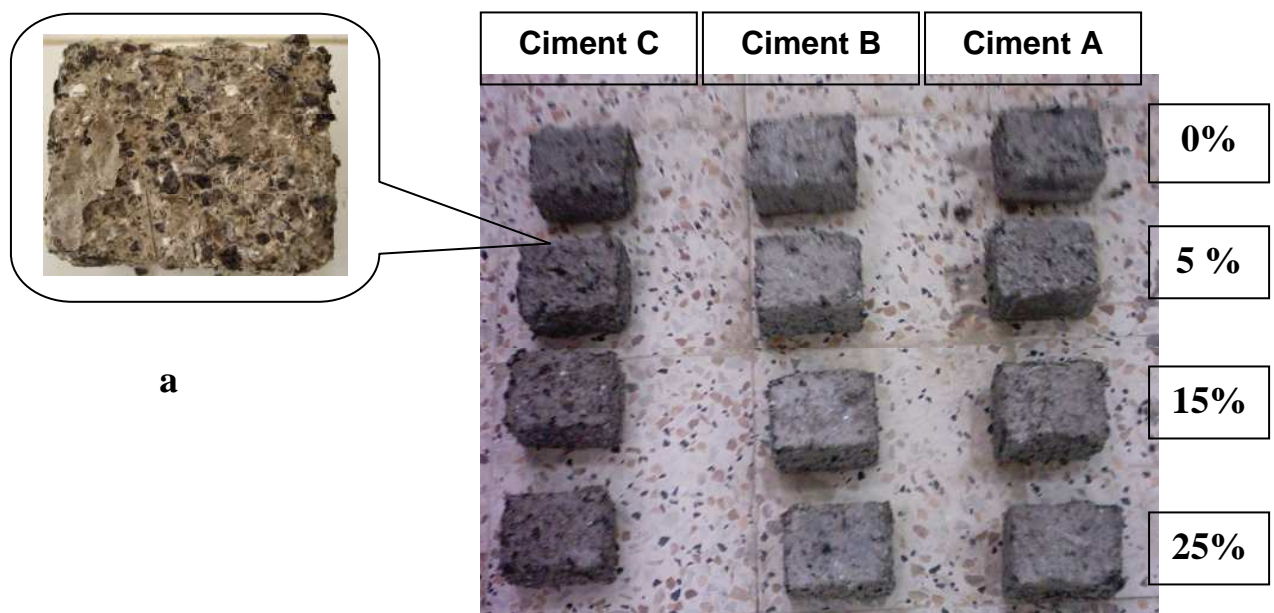


Figure III.16: Eprouvettes après 90 jours d'immersion dans une solution d'acide sulfurique 3% (H_2SO_4)

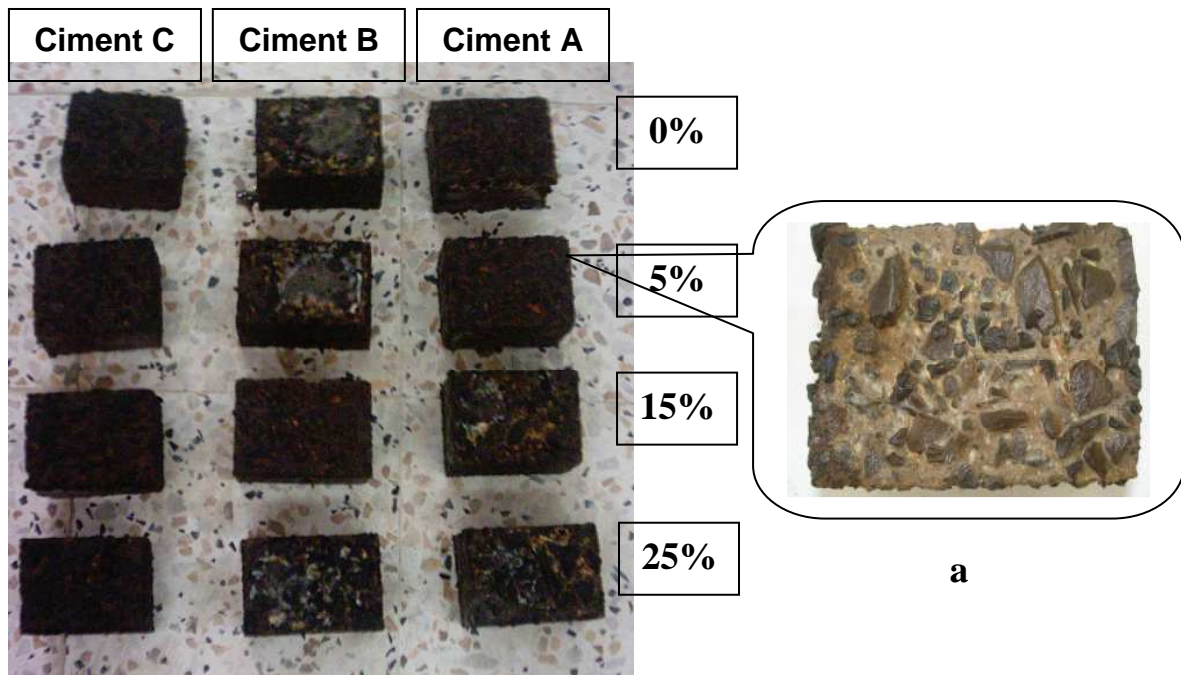


Figure III.17: Echantillons après 90 jours d'immersion dans une solution d'acide chlorhydrique 3% (HCL)

Le béton est très alcalin, il peut être attaqué par des liquides dont le pH est inférieur à 6.5, mais cette attaque ne devient grave que pour des pH inférieurs à 5.5, et en dessous de 4.5 l'attaque devient très sévères [2].

La dégradation des bétons immergés dans les deux solutions d'acides (3% H_2SO_4) et (3 % HCL), est due principalement à la décomposition des produits de l'hydratation et de la formation de nouveaux composés. Le $(Ca(OH)_2)$ est l'hydrate le plus vulnérable, mais les C-S-H peuvent aussi être attaqués ainsi que les granulats calcaires qui sont également vulnérables [2].

La réaction d'un acide avec l'hydroxyde de calcium $(Ca(OH)_2)$ de la pâte de ciment produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans son ensemble :



La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque acide procède en deux phases. La première phase étant la réaction acide-hydroxyde de calcium dans la pâte

de ciment. La deuxième phase étant la réaction acide-silicate de calcium hydraté, cette phase ne commencera que lorsque tout l'hydroxyde de calcium est consommé. La dissolution du silicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton.

III.3.7.2 Perte de masse

Les figures III.18 et III.19, illustrent la variation relative de la masse des éprouvettes de béton en fonction de la période d'immersion dans les solutions respectivement de 3 % H_2SO_4 et 3 % HCl. On constate que la perte de masse augmente avec l'augmentation de la période d'immersion dans la solution d'acide pour les trois types de ciments (A, B, et C). L'effet des fines calcaires sur la perte de masse n'est observé qu'à long terme (plus de 20 jours). A 90 jours d'immersion, l'incorporation de 5 % de fines calcaires réduit légèrement (0.33 %) la perte de masse des bétons confectionnés avec le ciment A par rapport au béton témoin. Cependant, pour 25 % de fines calcaires la perte de masse est plus importante (1,5 %) par rapport au béton sans fines. Le même phénomène est observé pour le ciment B avec des pertes de masse comparables. La substitution de 15 % de fines calcaires au sable de concassage a augmenté la perte de masse pour ce type de ciment en comparaison avec le ciment A. En ce qui concerne les éprouvettes de bétons confectionnées avec le ciment C la perte de masse varie de 4 % à 5 %, l'addition de 25 % de fines calcaires a donné la plus faible valeur de la perte de masse à 90 jours d'immersion dans la solution. Il semble que l'adition des fines calcaires a un effet positif pour le ciment C et un effet négatif pour les ciments A et B.

Les bétons immergés dans la solution d'acide chlorhydrique (3 % HCl), ont des pertes de masses plus importantes que celles immergées dans l'acide sulfurique (3 % H_2SO_4) pour les trois types de ciments A, B et C, La perte de masse est d'environ (10 % à 13 %) pour l'immersion dans (3 % HCl) et (2 % à 4 %) pour l'immersion dans (3 % H_2SO_4). L'influence des fines calcaires sur la perte de masse n'est pas claire et aucune tendance évidente n'est détectée.

Il faut noter qu'une étude similaire faite par SAID MANSOUR. M [38], a Montré que l'incorporation de 15 d'ajout calcaire dans le mortier immergé dans la solution de 1% d'acide chlorhydrique (HCl), a donné les mêmes résultats que le mortier de contrôle.

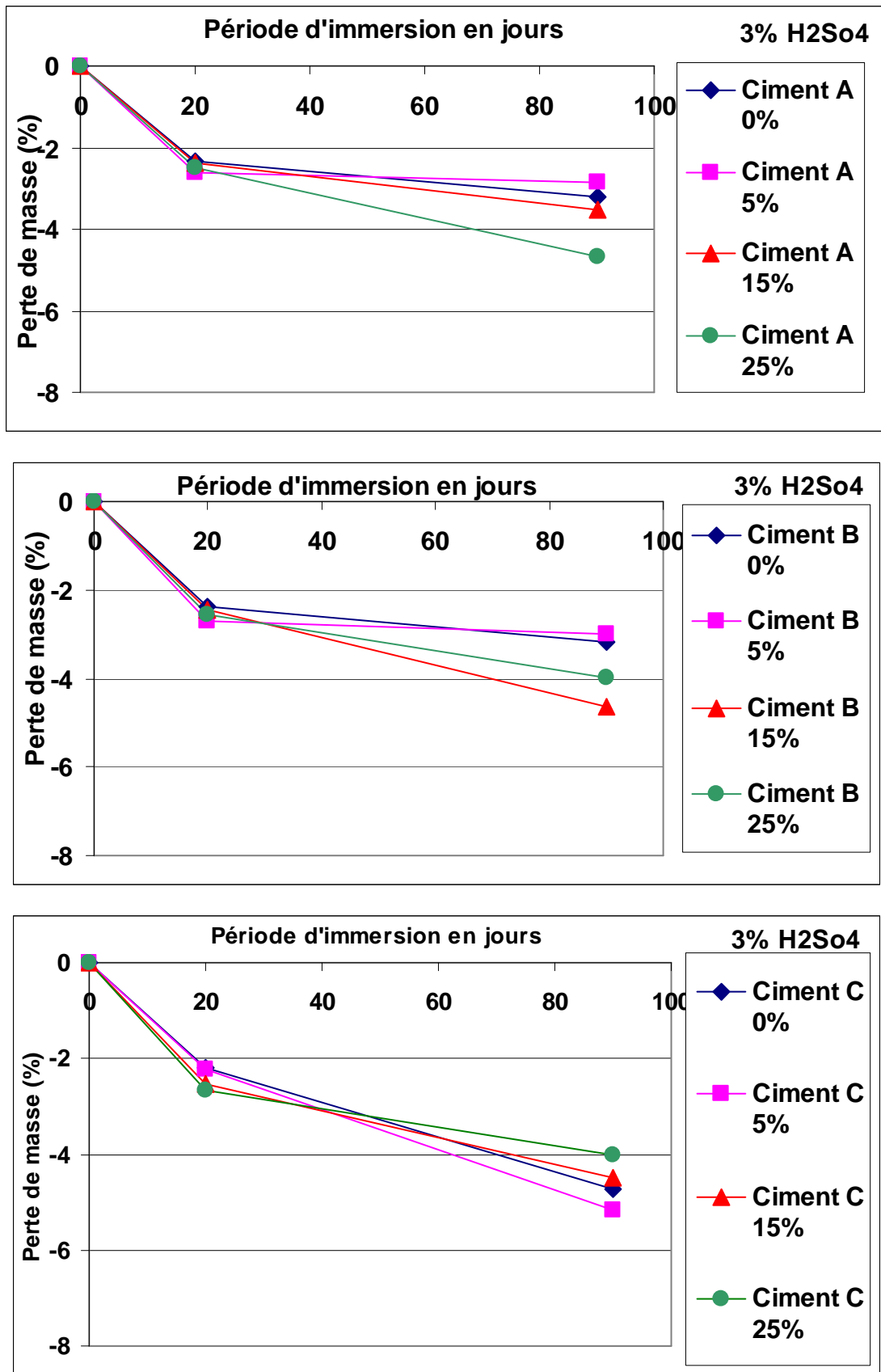


Figure III.18 Effet des fines calcaires sur la perte de masse relative des différents ciments utilisés

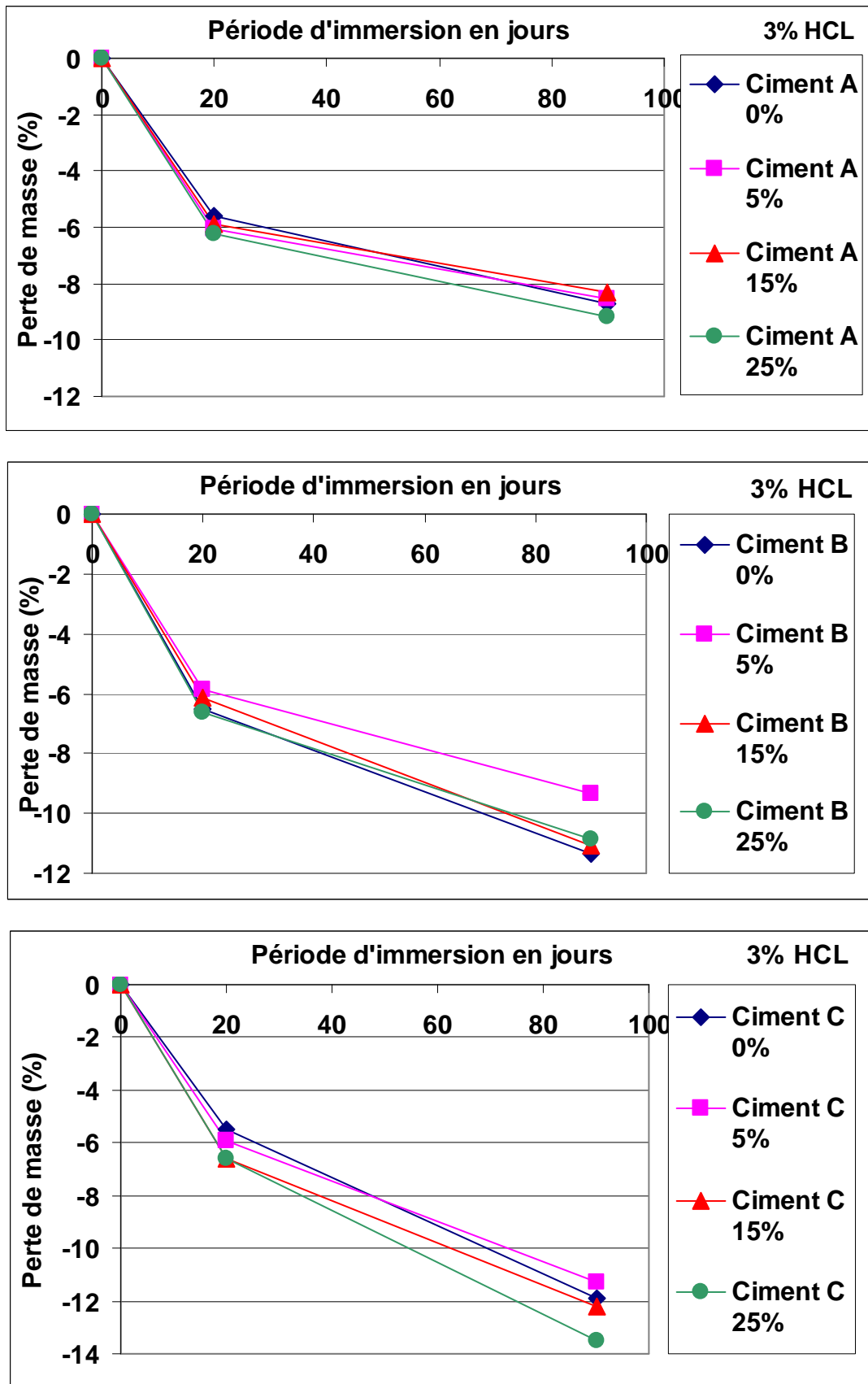


Figure III.19 Effet des fines calcaires sur la perte de masse relative des différents ciments utilisés

III.3.8 conclusion

Les résultats obtenus par la présente étude expérimentale nous amènent à tirer les conclusions suivantes :

- L'incorporation de fines calcaire substitué au sable de concassage tend à diminuer la maniabilité des bétons.

- la substitution de 15 % de fines calcaires au sable de concassage n'a pas affecté négativement la résistance à la compression.

- Les bétons fabriqués avec du sable concassé ont une perméabilité très élevée notamment la perméabilité à l'eau et aux ions chlores.

- la substitution de fines calcaires dans le sable de concassage a un effet négligeable sur la sorptivité.

- L'incorporation d'ajout calcaire semble n'avoir aucun effet sur la résistance aux agents agressifs.

**Conclusions générales
et
perspectives**

Conclusions générales et perspectives

L'objectif de ce travail consiste à examiner la possibilité d'utilisation du sable de concassage dans la fabrication du béton. Une étude expérimentale a été élaborée pour analyser les caractéristiques physiques, mécaniques et de durabilité des bétons fabriqués avec du sable de concassage, ainsi que leurs performances vis-à-vis de l'attaque des sulfates et acides. Les résultats obtenus lors de cette étude, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La caractérisation du sable de concassage a montré que sa qualité est satisfaisante
- Une relation inversement proportionnelle de l'ouvrabilité en fonction de l'augmentation du pourcentage des fines calcaires, ceci a engendré une demande supplémentaire d'eau de gâchage.

- Une amélioration de la résistance à la compression des bétons confectionnés avec les ciments A et B et dont le pourcentage des fines calcaires varie jusqu'à 15 %. Cependant pour les bétons à base du ciment C, une résistance à la compression comparable est obtenue avec 25 % de fines calcaires à 60 et à 90 jours, sans affecter la performance mécanique.

- L'étude de la durabilité des bétons à base de sable de concassage par l'analyse de la perméabilité à l'eau, aux gaz et aux ions chlorures, a montré que le sable de concassage a une forte perméabilité particulièrement à l'eau et aux ions chlorures, ce qui a limité son utilisation surtout dans les environnements agressifs.

- La perméabilité du béton n'est pas une fonction simple de la porosité, mais elle dépend également de la taille, la distribution, la forme, la tortuosité, et la continuité des pores. En outre, la distribution de la taille des particules de ciment influe sur la perméabilité des bétons.

- L'influence de l'ajout calcaire sur la sorptivité demeure négligeable. En général les valeurs de la sorptivité de tous les bétons confectionnés avec ou sans fines

calcaires varient de ($3.3 \text{ cm/s}^{0.5}$ à $3.9 \text{ cm/s}^{0.5}$). Une faible réduction de la sorptivité pour les bétons contenant 5 % de fines calcaires est observée.

- Les modes d'attaque des sulfates de magnésium et de sodium demeurent différents. Les résultats des essais de l'attaque des bétons par des sulfates ont montré que l'utilisation d'ajout calcaire substitué au sable de concassage n'a pratiquement aucun effet. Une perte de masse considérable pour les bétons à base du ciment B est observée. La résistance aux sulfates dépend de la nature et la qualité des ciments utilisés.

-L'ajout des fines calcaires a un effet négligeable sur la résistance des bétons aux acides, pratiquement le même ordre de grandeur de dégradation et les mêmes tendances des courbes de perte de masse ont été observés pour les différents ciments utilisés.

Perspectives

Nous pensons qu'il serait utile d'effectuer les travaux de recherche suivant afin de compléter notre modeste étude. A cet effet nous recommandons de réaliser des études sur :

- L'effet de différentes cures simulant les différents climats dans notre pays (chaud et sec) sur les propriétés des bétons et mortiers à base de sable de concassage contenant des fines calcaires.

- Etude de la performance des bétons à base de sable de concassage dans les environnements agressifs (sulfates, acides et l'eau de mer) à long terme (plus de 360 jours).

- Etude de la durabilité des bétons auto-plaçants à base du sable de concassage contenant des fines calcaires est recommandée.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Dreux, G., Festa. J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » huitième édition, Eyrolles, France, 1998.
- [2] Neville, A., « Propriétés des bétons » Eyrolles, France, 2000.
- [3] Document E.N.G, « Sable la Nouvelle Donne », Alger, Mars1999
- [4] Kenai, S., Soboyojo, W., and Soboyojo, A., « Some engineering properties of limestone concrete » Materials and Manufacturing Process, 2004, 19(5):949-61.
- [5] Bonavetti, V. L., et Irassar, E., « The effect of stone dust content in sand » Cement and concrete Research, Vol 24, N°3, 1994, pp580-590.
- [6] Verbeck, G. J., «Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete» PCA Research Department Bulletin 227, 113-124.1968.
- [7] ELHadj, M., « Performance des ciment à base de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf » Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, Octobre 2002
- [8] Kenai, S., Benna, y., et Mennadi, B., « The effect of stone in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete» International conference on infrastructure regeneration and rehabilitation, Sheffield, Editor R.N Swamy, 1999, pp 253-261
- [9] Bertrandey, R., «Influence des fillers calcaires sur la maniabilité des béton » Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, série: Béton N°147, France, 1975, pp3-11.
- [10] Bertrandey, R., et Chabernaude, J .L., «Etude de l'influence des fillers calcaires dans les bétons hydrauliques » CEMEREX, France, 1970, pp 1-15
- [11] Chanvillard, G., et Basuyaux, O., « Une méthode de formulation des bétons de sable et résistance fixées ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. Vol 205.49-63,1996.
- [12] Benna, Y., « Valorisation des sables de concassage », colloque Maghrébin de génie civil, Centre Universitaire de Biskra, novembre1999.
- [13] Baron, J., et Santerey, R., « Béton hydraulique connaissance et pratique », presse de l'école des ponts et chaussées, Ed. Eyrolles, Paris, 1982.
- [14] Coquillat, G., Hasni, L., et Rougeau, P., « Possibilité d'utilisation des ultrafines naturelles dans le béton hydraulique », les techniques de l'industrie Minérale, N°2/2^{eme} trimestre 1999.

- [15] Benna, Y., « Etude des bétons à base de sables de concassage » Rapport interne CNERIB, Alger, Septembre 1999.
- [16] Ramirez, J.L., Barcena, J.M., Urreta, J.I., « Proposal for limitation and control of fines calcareous sand based upon their influence in some concrete properties »
Matériaux et structures, Vol23. 1990, pp 279-287.
- [17] Bertrandey, R., Coquillat, G., et Giordano, R., « Valorisation de l'emploi des granulas calcaires dans le béton hydraulique », Mines et carrières, industrie minérale, Revue de recherche, France, septembre 1993, pp 147-150.
- [18] Bonavetti, V. L., Donza, H., Rahhal, V., Irassar, E., « Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement ». Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp 703-708.
- [19] Ramirez, J.L., Barcena, J.M., Urreta, J.I., « Sables calcaires à fines calcaires et argileuses: influence et nocivité dans les mortiers de ciment »
Matériaux et construction, 1987, 20, pp 202-213
- [20] Cochet, G., Sorrentino, F., « Limestone filled cement; properties and uses » Mineral Admixture in Cement and Concrete Vol. 4 First edition, 1993.
- [21] Hadj Sadok, A., « Durabilité des mortiers a base de ciment au calcaire » Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, Juin 2004.
- [22] Hebbouche, A., « Propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage » Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, 2002.
- [23] Donza. H, Gonzalez. M, et Cabrera. O, « Influence of fine aggregate mineralogy on mechanical properties of high-strength concrete ». International Conference on High-performance Concrete, Brazil, June 1999, pp 4-6.
- [24] Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal., V, Irassar, E., « Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement ». Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp 703-708.
- [25] Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Batis, G., Meletiou, C., Kasselouri, V., Kakali, G., Sakellariou, A., Pavlakis, G., et Psimadas, C., « The effect of clinker and limestone quality on the gas permeability, water absorption and pore structure of limestone cement concrete ». Cement and Concrete Composites, Vol. 21, 1999, pp 139-146.
- [26] Tsivilis, S., Tsantilas, J., Kakal, G., Chaniotakis, E., Sakellariou, A., « The permeability of Portland limestone cement concrete » Cement and Concrete Research Vol. 33, 2003, pp1465– 1471.

- [27] Hermann, K., « Les ajouts : Les fillers » Bulletin du ciment, Vol.63, N°5, 1995, pp.4-7.
- [28] Hornain, H., Marchand, J., Duhot, V., Moranville, M., « Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement paste and mortars ». Cement and Concrete Research, Vol.25, 1995, pp.1667-1678.
- [29] Soroka, I., and Stern, N., « Effect of calcareous filler on sulfate resistance of Portland cement ». Ceramic Bulletin, Vol. 55, 1976, pp 594-595.
- [30] Gonzalez, M.A., Irassar, E, F., « Effect of limestone filler on the sulfate resistance of low C₃A Portland cement » Cement and Concrete Research, Vol. 28, N°. 11, 1998 pp. 1655–1667.
- [31] Barker, A.P., Hobbs, D,W., «Performance of Portland cement in mortar prism immersed in sulfate solution at 5°C » Cement and Concrete Composites, Vol.21, 1999, pp. 129-137.
- [32] Said Monsour, M., « Etude des propriétés des mortiers et bétons à base de ciments ternaires » Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université Saad Dahleb, Algérie, Décembre 2003.
- [33] Fiche Technique « Algerian Cement Company » CPA.CEM I - 42.5, 2007.
- [34] Fiche Technique « Algerian Cement Company » CPJ.CEM II/A -42.5, 2007.
- [35] Pointevin, P., «Limestone aggregate concrete, usefulness and durability» Cement and Concrete Composites, volume 21 N°2. 1999, 89-97.
- [36] Péra, J., Husson, S., et Guilhot, B., «Influence of finely ground limestone on cement hydration » Cement and Concrete Composites Volume 21 (1999) 99-105.
- [37] ENV 206 « Concrete-performance, production, placing and compliance criteria » 1989.
- [38] ASTM C618-94 « Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete », ASTM Standards, 3 pages.
- [39] Norme Française, 18-560 «Granulat-Analyse granulométrique par tamisage». AFNOR, Paris 1990.
- [40] Norme Française, 18-554 «Granulat-Mesure de masse volumique, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux».AFNOR, Paris 1990.
- [41] Norme Française, 18-555 «Granulat-Détermination de la masse volumique des sables ». AFNOR, Paris 1990.
- [42] Norme Française, 18-598, «Granulat-Equivalent de sable ». AFNOR, Paris 1990.

- [43] Norme Française, 18-451, «Béton-Essai d’Affaissement ». AFNOR, Paris 1981.
- [44] Norme Française, 18-406, «Béton-Essai De compression ». AFNOR, Paris 1981.
- [45] ASTM C 1202-94 «Standard test method for electrical indication of concretes ability to resist chloride ion penetration», Annual book of ASTM Standard, 1995 vol.04.02.
- [46] Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., Ait-Mokhtr, A., « Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand ». Construction and Building Materials, Elsevier, 2008.
- [47] Document Technique « Les Sables De concassage » Ministère De L’habitat Et De L’urbanisme, Mai 2005.
- [48] Ministère de l’Equipement et du Logement, instruction ministérielle N°017/SMP/D.RTC/92 Relative à la gestion et la protection Du Domine Public Maritime et Hydraulique (Concession D’extraction des matériaux) Alger, Décembre 1991.
- [49] Instruction N°003 /S.P/C.G, « Exploitation de sable de plage et de sable d’alluvion », Alger, Mars1999.
- [50] DIN 1048. «Testing method for concrete – determination of the depth of penetration of water under pressure», 2000.
- [51] Alamoudi, O.S., Maslehuddin, M., Saadi, M., « Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cement », ACI materials journal, Vol.92, N°1, 1995, pp15-24.
- [52] Gané, R.R., « Cours de durabilité et réparation du béton (GCI-714) », chapitre 2 : la durabilité du béton. Université de Sherbrooke, Canada, 2002.
- [53] Omar, S., Baghabra Al-Amoudi « Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments » Cement and concrete composite vol. 24, 2002 pp 305-316.
- [54] Buil, M., and Olivier, J.P., « Conception des bétons : la structure poreuse », la durabilité des bétons, Presse de IENPC, Paris, 1992, pp 57-106.
- [55] Yamani, N., El Azdi, K., et, Zaim, K., « Utilisation des sables de mer et de concassage dans le mortier de ciment », Revue Marocaine du génie civil, N° 2, Maroc, 1992, pp 43-63.
- [56] Menadi, B., Kenai, S., « Performance of Concrete with Crushed Limestone Sand », 8 International Conference on Concrete technology in developing Countries, 8-9 November 2007, Tunis.

- [57] Norme Française, 18-404, «Béton-Essai d'étude, de convenue et de contrôle-confection des éprouvettes ». AFNOR, Paris, 1981.
- [58] Norme Française, 18-405, «Béton-Essai d'information-confection et conservation des éprouvettes ». AFNOR, Paris 1981.
- [59] Whiting, D., «Rapid Determination of the chloride Permeability of concrete». Report No. FHWA/RD-81/119, August 1981.
- [60] Piasta, G., Sawicz, Z., Koprowski, G., Owsiak, Z., «Influence of limestone powder filler on microstructure and mechanical properties of concrete under sulphate attack». Proc. 10th Int. Congr. Chem.Cem, Sweden 1988.
- [61] Zelic, J. Krstulovic, R. Tkalcec, E and Krolo, P. «Durability of the hydrate limestone-silica fume portland cement mortars under sulphate attack» Cement and Concrete Research, Vol 29.1999.819-826.
- [62] Hartshorn, S.A., Sharp, J.H., « Thaumassite formation in Portland limestone cement pastes. » Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, pp. 1331-1340.
- [63] Karpinski, Jean Yvan., «Increasing the corrosion Resistance of microconcrete by limited substitution of calcareous for quartz aggregate» *ibid.* N° 568.19-33. 1963
- [64] Chatterji, S., and Jeftery, J, W., « Further evidence relating to the new hypothesis of sulphate expansion» *Mag. Concr. Res* 19 [60] 185-89. 1967.
- [65] Kakali, G., Tsivilis, S., Aggeli, E., and Bati, M., « Hydration products of C3A, C2S and Portland cement in the presence of CaCO₃ » *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp1073– 1077.
- [66] Tezuka, Y., Gemes, D., Martins, J,M., and Djanikian, J,G., « Durability aspects of cement with higt limestone filler content » 9th international congress of the chemistry of cement, New Delhi, India, pages 53-59, 1992.