

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

En Génie Civil

Spécialité : Construction

DURABILITE DU BETON HYDRAULIQUE

A BASE DE SABLE DE CONCASSAGE

Présenté Par :

Djelloul DJEZIRI

Devant le jury composé de:

K. GRINE	Maître de conférence,	Université de Blida	Président
M. GHRICI	Maître de conférence,	Université de Chlef	Examineur
A. BOUIKNI	Maître assistant,	Université de Blida	Examineur
S. KENAI	Professeur,	Université de Blida	Rapporteur
B. MENADI	Maitre de conférence,	Université de Blida	Co-Rapporteur

Blida, Décembre 2010

ملخص

أدى التطور التكنولوجي وزيادة السكان في الجزائر في العشرية الأخيرة إلى زيادة كبيرة في استهلاك الموارد الطبيعية وخاصة الركام (رمل وحصي). يضاف إلى ذلك منع استعمال رمال الشواطئ والأودية لأسباب تقنية وبيئية، مما ساهم في نقص مادة الرمل خاصة في المناطق الشمالية للبلاد.

أجريت بعض الدراسات السابقة في مخبر المواد والهندسة المدنية بجامعة البليدة عن تأثير المواد الحجرية الناعمة المضافة إلى رمال المحاجر على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة والمونة. لكن تأثير المضافات اللدنة وطرق الإنضاج على خواص الخرسانة المصنوعة من رمل المحاجر لم تحضي بأي دراسة. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير المضافات اللدنة على خواص خرسانة رمال المحاجر وتحت شروط إنضاج مختلفة.

بينت نتائج الدراسة المخبرية إمكانية استعمال رمال المحاجر المحتوية على نسبة من المواد الناعمة لا تتعدى ٢٠٪ دون تأثير سلبي على الخصائص الميكانيكية والديمومة.

مفاتيح: الخرسانة، رمل المحاجر، مواد ناعمة، إنضاج، المضافات اللدنة، الديمومة، مقاومة الكبريتات.

RESUME

Le secteur de construction en Algérie est en plein expansion ces dernières années. Ceci a engendré une consommation considérable des ressources naturelles, notamment les granulats. Cependant, l'utilisation des sables alluvionnaires a été interdite pour des raisons techniques et environnementales, contribuant ainsi à un manque plus accru du sable principalement dans la région Nord du pays. Actuellement, le béton conventionnel à base de sable de concassage avec un taux de fines allant de 5% à 18% est largement utilisé dans certains pays où il y a un déficit en sable de rivière. L'utilisation de ce type de sable pour la fabrication du béton hydraulique permet de compenser le déficit constaté en sable naturel. Des études antérieures au laboratoire Géomatériaux et génie civil de l'université de Blida ont été réalisées sur l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des mortiers et bétons. Cependant, l'effet des superplastifiants et l'effet de cure sur la durabilité du béton à base de sable de concassage n'a pas été étudié à ce jour. Le but principal de ce travail est de compléter les études antérieures sur le comportement du béton hydraulique à base de sable de concassage par une analyse de durabilité à court et à long terme en ciblant plus particulièrement, l'effet combiné des fines calcaires et du superplastifiant sous différents modes de cure. Le comportement des mortiers à base de sable de concassage vis-à-vis des milieux agressifs, notamment les milieux sulfatiques (sulfate de magnésium et de sodium) et les milieux marins (eau de mer) a aussi été étudié.

Les résultats obtenus à partir de cette étude expérimentale ont confirmé les résultats antérieurs sur la possibilité de l'utilisation du sable de concassage pour la confection du béton avec un taux de fines allant jusqu'à 20% sans affecter ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

Mots clés : Béton, sable concassé, fines calcaires, cure, superplastifiant, durabilité, résistances aux sulfates.

ABSTRACT

In these recent years, construction sector in Algeria has witness a grand development. This has resulted in a considerable consumption of natural resources in particular aggregates. Alluvial sands have been forbidden for technical and environmental reasons; leading to the lack of natural sand mainly in the north part of the country.

Ordinary concrete containing crushed sand with fines content from 5% to 18% has been widely used in some countries where there is a deficit in river sand. Previous studies at the geomaterials laboratory of the University of Blida have been conducted to investigate effect of limestone fines as sand replacement on the physical-mechanical and durability of mortars and concretes. However, the effect of superplasticizers on crushed sand concrete durability under different curing modes has not been studied so far. The main aim objective of this work is to investigate the effect of superplasticizers on the durability of crushed sand concrete subjected to different curing modes. The effect of aggressive environments, particularly magnesium and sodium sulfate solutions and seawater is also investigated.

The results obtained from this experimental study confirmed previous findings about the possibility of using crushed sand concrete with limestone fines up to 20% without affecting its mechanical and durability properties.

Key words: Concrete, crushed sand, limestone fines, curing mode, superplasticizers, durability, sulfates resistance.

REMERCIEMENTS

La présente étude a été menée au sein du laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida.

Je souhaite remercier ici tous ceux qui, par leur aide, leurs encouragements et leurs conseils, m'ont permis de réaliser ce mémoire.

Je commencerais par remercier Dieu tous puissent, de m'avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon Directeur de ce mémoire : Monsieur Saïd KENAI, Professeur à l'Université de Blida, Directeur du Laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida, pour ses conseils scientifiques, son soutien durant la rédaction de ce mémoire, je les remercie également pour ses remarques pertinentes et constructives.

J'exprime ma très sincère reconnaissance à Monsieur Belkacem MENADI, Maître de Conférences à l'Université de Blida, qui a encadré ce travail, et qui m'a toujours accordé sa confiance pendant ces deux années. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité, son total dévouement de tous les jours et m'avoir donné les moyens de réaliser dans les meilleures conditions ce travail de mémoire.

Je tiens à remercier :

Monsieur Khaled GRINE, Maître de conférences à l'université de Blida Président de jury, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Monsieur Mohamed GHRICI, Maître de conférences à l'université de chlef pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de ce travail.

Monsieur Amar BOUIKNI, chargé de cours à l'université de Blida pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de ce travail et remercier également pour ses conseils et son encouragement lors de réalisation de ce travail.

Je remercie Monsieur Abdelkader FORTAS laborantin du LGM de l'Université de Blida pour m'avoir aidé dans mes travaux.

Je remercie également mon collègue Ahmed HAMIDI pour m'avoir aidé dans mes travaux, particulièrement, les jours de confection des mélanges du béton.

Je tiens également à remercier tous les membres du département de génie civil, enseignants et administratifs ; en particulier l'ensemble des enseignants qui m'ont guidé durant ma carrière de formation.

Je remercie aussi tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je tiens à exprimer mon immense gratitude à mes parents, mes frères, ma sœur et l'ensemble de mes proches, pour leur soutien permanent et leur encouragement tout au long de ces années, sans lesquels je n'aurais jamais mené à bien ce travail.

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

LISTES DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION	20
✓ Position du Problème	20
✓ Objectif de travail	22
✓ Plan de travail	22
CHAPITRE 1 : FILLERS CALCAIRES ISSUS DU SABLE DE CONCASSAGE	23
1. Introduction	23
1.1. Les ajouts minéraux	23
1.2. Les différents types d'additions minérales	23
1.2. 1. La pouzzolane naturelle	23
1.2. 2. Les cendres volantes	24
1.2. 3. Laitier de hauts fourneaux	25
1.2. 4. Les fumées de silice	26
1.2. 5. Filler calcaire	27
1.3. Production des granulats en Algérie	27
1.4. Influence des fines calcaires substituées au sable de concassage sur les propriétés du béton frais	30
1.4.1. Ouvrabilité	30
1.4.2. Masse volumique	36
1.5. Influence des fines calcaires substituées au sable de concassage sur les propriétés mécaniques	38
1.5. 1. Résistance à la compression	38
1.5. 2. Influence de la cure sur la résistance à la compression du béton à base de sable de concassage contenant des fines calcaires	49
1.5. 3. Résistance à la traction par flexion	51
1.5. 4. Module d'élasticité	53
1.5. 5. Retrait	54
1.6. Influence de fines calcaires substitués au sable de concassage sur les propriétés de durabilité du béton	57
1.6. 1. Perméabilité à l'eau	58
1.6. 2. Perméabilité aux ions chlores	60
1.6. 3. Perméabilité au gaz	64
1.6. 4. Sorptivité et absorption Capillarité d'eau par immersion	65
1.6. 5. Résistance à l'attaque sulfatique	70

1.6. 6. Expansion	72
1.6. 7. Perte de masse	75
1.6. 8. Gel-dégel	77
1.7. Conclusion.....	78
CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET PROTOCOLES EXPERIMENTALES.....	79
2.1. Introduction	79
2.2. Matériaux utilisés	79
2.2.1. Ciment	79
2.2.2. Granulats.....	81
2.2.3. L'eau de gâchage.....	85
2.2.4. Adjuvants	85
2.3. Formulation des bétons et mortiers	86
2.3.1. Formulation du béton et confections des éprouvettes	86
2.3.2. Procédures expérimentales	87
2.3.3. Essais sur béton frais	91
a). Ouvrabilité	91
b). Masse volumique	93
2.3.4. Essais sur béton durci	94
1). Résistance à la compression	94
2). Absorption d'eau par capillarité	94
3). Mesure de la porosité accessible à l'eau.....	96
4). Perméabilité à l'eau	97
5). Perméabilités aux gaz et ions chlorures	99
2.4. Mortiers	103
2.4.1. Formulations des mortiers à base de sable de concassage	103
2.4.2. Confections et conservations des éprouvettes.....	104
2.4.3. Résistance des mortiers aux solutions sulfatique et l'eau de mer	105
a). Mesure de l'expansion.....	105
b). Mesure de la perte de résistance	105
c). Mesure de perte de masse	106
2.5. Variables étudiées	106
CHAPITRE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS	109
3.1. Introduction	109
3.2. Béton frais	109
3.2.1. Ouvrabilité	109
3.2.2. Masse volumique absolue	111
3.3. Béton durci	112
3.3.1. Résistance à la compression.....	112
3.3.2. Porosité accessible à l'eau.....	120
3.3.3. Absorption d'eau par capillarité et sorptivité	123
3.3.4. Perméabilité à l'eau.....	129
3.3.5. Perméabilité aux gaz	134

3.3.6. Perméabilité aux ions chlores	138
3.4. Resistances des mortiers aux sulfates et au l'eau de mer	142
3.4.1 Perte de la résistance à la compression	143
3.4.2 Perte de masse	145
3.4.3 Expansion	147
3.4.4 Aspect visuel	149
3.5. Conclusion	151
CONCLUSIONS GENERALE ET PERSPECTIVES	152
REFERENCES	154
ANNEXES	

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Influence de la pouzzolane naturelle sur la perméabilité des bétons aux ions chlorés.	24
Figure 1.2	Influence des cendres volantes sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps.	25
Figure 1.3	Influence du pourcentage de laitier sur la perméabilité, sur la fixation et sur le coefficient de diffusion des chlorures.	26
Figure 1.4	Effet de l'ajout de fumée de silice sur la compacité d'un mélange liant-granulats.	26
Figure 1.5	Production des substances minérales pour les granulats : Année 2007.	28
Figure 1.6	Production des granulats, par Wilaya - Année 2007.	28
Figure 1.7	Production de sable concassé : période 2005-2007.	29
Figure 1.8	Variation de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines.	31
Figure 1.9	Variation de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines.	32
Figure 1.10	Variation de la demande en eau on fonction de pourcentage de masse de filler.	33
Figure 1.11	Ouvrabilité du béton de sable de dune en fonction du taux de filler avec différentes rapport E/C.	35
Figure 1.12	Ouvrabilité du béton de sable de dune et rivière en fonction du taux de filler avec différentes rapport E/C.	35
Figure 1.13	Evolution de la densité du béton en fonction de la quantité des fines.	36
Figure 1.14	Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.	37
Figure 1.15	Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.	37
Figure 1.16	Evolution de la densité du béton en fonction des taux de fines.	38
Figure 1.17	Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des mortiers.	39

Figure 1.18	Développement de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires.	40
Figure 1.19	variation de la résistance a la compression pour une granulométrie grossière et rapport ciment /sable =1/4,2 (A/S : argile / sable(%)).	41
Figure 1.20	Variation de la résistance a la compression pur une granulométrie fine et rapport ciment /sable =1/4,2 (A/S : argile / sable (%)).	41
Figure 1.21	Evolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de fines calcaires pur deux types de béton : béton de faible résistance, L (a), et béton de haute résistance, H (b).	42
Figure 1.22	Evolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de filler substitué au sable de concassage à 28 jours.	43
Figure 1.23	Variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de fines.	44
Figure 1.24	Evolution de la résistance à la compression en différentes âges.	44
Figure 1.25	Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 60 jours.	45
Figure 1.26	Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 90 jours.	45
Figure 1.27	La résistance à la compression des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines.	46
Figure 1.28	Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Kristel).	47
Figure 1.29	Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Sid ali benyoub).	47
Figure 1.30	Evolution de la résistance a la compression et de degré d'hydratation du béton avec différentes sables.	49
Figure 1.31	Effet de la cure humide sur l'évolution de la résistance à la compression.	50
Figure 1.32	Résistance à la compression de la pâte de ciment à base d'ajout calcaire.	50
Figure 1.33	Développement de résistance à la traction par flexion à différentes âges.	51
Figure 1.34	Résistance à la traction des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines.	53

Figure 1.35	Evolution de modules de Young en fonction de pourcentage de filler.	53
Figure 1.36	Module d'élasticité du béton à base de différents granulats en fonction de l'âge.	54
Figure 1.37	Développement du retrait du béton à base de sable de concassage avec différents âges.	55
Figure 1.38	Retrait de séchage et la perte de masse en fonction de l'humidité relative.	56
Figure 1.39	Retrait des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines.	57
Figure 1.40	Profondeur de pénétration en fonction des différents mélanges des bétons étudiés à 90 jours.	58
Figure 1.41	Coefficient de l'imperméabilité en fonction de dosage en ciment du béton avec différentes pourcentage en filler.	59
Figure 1.42	Effet des fines calcaires issues de sable de concassage sur la pénétration de l'eau du béton avec différentes ciments utilisés.	59
Figure 1.43	Coefficient de perméabilité à l'eau du béton avec différentes pourcentages de poussière de concassage à l'âge de 28 jours.	60
Figure 1.44	Coefficient de perméabilité avec différentes mélanges du béton contenant différents pourcentages de fine à 90 jours.	61
Figure 1.45	Charges totale des bétons étudiés à 90 jours.	61
Figure 1.46	Influence de fines calcaires sur la perméabilisé aux ions chlores de béton de sable de concassage de faible (a) et haute (b) résistance à 28 jours.	62
Figure 1.47	Perméabilité aux ions chlores des bétons contenant de fumée de silice, pouzzolane naturel et du calcaire.	63
Figure 1.48	Influence du type de ciment, de la présence ou non du filler F1 et de la valeur du facteur k sur la quantité de chlorure traversant, au cours du temps une éprouvette de mortier par diffusion stationnaire.	63
Figure 1.49	Valeurs du coefficient de la perméabilité au gaz des bétons étudiés à 90 jours.	64
Figure 1.50	Effet des fines calcaires sur la perméabilité aux gaz du béton avec et sans fines calcaires pour différentes ciments utilisés.	66

Figure 1.51	Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons à base de fines calcaires substitués au sable de concassage à 90 jours.	66
Figure 1.52	Coefficient d'absorption capillaire.	67
Figure 1.53	Coefficient d'absorption capillaire en fonction du pourcentage de fines.	67
Figure 1.54	Absorption du béton 28 jours d'âges contenant différentes pourcentages de poussières de concassage.	68
Figure 1.55	Coefficient de sorptivité du béton à 28 et 90 jours.	69
Figure 1.56	Evolution de coefficient de capillarité.	69
Figure 1.57	La résistance à la compression des mortiers à base de ciment au calcaire soumise à des différentes solutions (A : l'eau distillé à $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, B et N: Na_2SO_4 à $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$, respectivement et M : MgSO_4 à $5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$).	71
Figure 1.58	Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de sodium (5% Na_2SO_4).	71
Figure 1.59	Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de magnésium (5% MgSO_4).	72
Figure 1.60	Expansion des spécimens de deux clinkers (I et III) avec leur substitution en % par le calcaire exposés aux sulfates attaques.	73
Figure 1.61	Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4).	74
Figure 1.62	Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5% de sulfate de sodium (MgSO_4).	74
Figure 1.63	Expansion des mortiers après 360 jours d'immersion dans une solution de sulfate de sodium.	75
Figure 1.64	Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% MgSO_4 .	76
Figure 1.65	Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na_2SO_4 .	76
Figure 1.66	Influence du gel dégel et de filler sur la résistance à la compression.	77
Figure 1.67	Evolution de taux de résistance en fonction de dosages en fillers.	78

Figure 2.1	Tamiseuse électrique.	81
Figure 2.2	Courbe granulométrique du sable de concassage.	82
Figure 2.3	Courbes granulométriques des graviers utilisés.	83
Figure 2.4	Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.	84
Figure 2.5	Diffractogramme de rayons X du sable de concassage.	85
Figure 2.6	Proportions des granulats utilisés.	86
Figure 2.7	Malaxeur pour béton.	88
Figure 2.8	Moules utilisés.	88
Figure 2.9	Compactage du béton à l'aide d'une table vibrante.	89
Figure 2.10	Eprouvettes conservées dans l'eau (cure humide).	90
Figure 2.11	Echantillons à l'air libre (atmosphère non contrôlée) après une cure initiale de 7 jours dans l'eau.	90
Figure 2.12	Essai d'affaissement (cône d'Abrams).	91
Figure 2.13	Dispositif de l'essai de compression simple.	94
Figure 2.14	Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité	96
Figure 2.15	Détermination de coefficient de sorptivité.	96
Figure 2.16	Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.	97
Figure 2.17	Essai de perméabilité à l'eau.	98
Figure 2.18	Mesure la profondeur de pénétration de l'eau.	98
Figure 2.19	Carottage des échantillons destinés aux essais de perméabilités au gaz et aux ions chlores.	99
Figure 2.20	Rectification des éprouvettes.	100
Figure 2.21	Perméamètre au gaz de CEMBUREAU.	100
Figure 2.22	Vue d'ensemble de l'essai de perméabilité aux ions chlores.	102
Figure 2.23	Appareil de mesure de la perméabilité aux ions chlores.	103
Figure 2.24	a) Malaxeur de capacité 5 litre, b) Table vibrante pour mortier.	104

Figure 2.25	Echantillons de mortier immergés dans différentes solutions.	104
Figure 2.26	Appareil pour mesurer d'expansion des mortiers.	105
Figure 2.27	Dispositif de l'essai de compression.	105
Figure 2.28	Organigramme récapitulatif des différents essais réalisés sur le béton.	107
Figure 2.29	Organigramme récapitulatif des différents essais réalisés sur le mortier.	108
Figure 3.1	Effet des fines calcaires sur l'affaissement.	110
Figure 3.2	Effet du superplastifiant sur l'ouvrabilité.	111
Figure 3.3	Effet des fines calcaires sur la masse volumique absolue du béton frais.	112
Figure 3.4	Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 28 et 180 jours.	113
Figure 3.5	Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 28 et 180 jours (ENV2).	116
Figure 3.6	Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des bétons à 28 et 180 jours (ENV2).	118
Figure 3.7	Effet de mode de cure sur la résistance à la compression des bétons à 28 jours.	119
Figure 3.8	Effet de mode de cure sur la résistance à la compression des bétons à 180 jours.	119
Figure 3.9	Effet des fines calcaires et de cure humide sur la porosité accessible à l'eau à 28 et 180 jours.	121
Figure 3.10	Effet des fines calcaires et de cure humide initiale de 7 jours suivent d'une cure à l'air libre sur la porosité accessible à l'eau à 28 et 180 jours.	121
Figure 3.11	Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau.	122
Figure 3.12	Absorption d'eau capillaire des bétons à base de sable de concassage à 28 et 180 jours (ENV1).	124

Figure 3.13	Absorption d'eau capillaire des bétons à base de sable de concassage à 28 et 180 jours (ENV2).	125
Figure 3.14	Effet des fines calcaires et de modes de cure sur la sorptivité à 28 et 180 jours (ENV1 & ENV2).	127
Figure 3.15	Effet des modes de cure sur la sorptivité à 28 et 180 jours.	128
Figure 3.16	Corrélation entre la sorptivité et la résistance à la compression.	129
Figure 3.17	Effet des fines calcaires et des modes de cure sur la profondeur de pénétration de l'eau à 28 et 180 jours.	131
Figure 3.18	Effet de l'environnement de cure sur la profondeur de pénétration de l'eau à 28 et 180 jours.	132
Figure 3.19	Relation entre la résistance à la compression et la profondeur de pénétration d'eau pour les bétons étudiés.	133
Figure 3.20	Relation entre la profondeur de pénétration d'eau et la cinétique de l'absorption d'eau capillaire pour les bétons étudiés.	133
Figure 3.21	Valeurs du coefficient de perméabilité au gaz pour les différents bétons étudiés (ENV1) à l'âge 180 jours.	135
Figure 3.22	Valeurs du coefficient de perméabilité au gaz pour les différents bétons étudiés (ENV2) à l'âge de 180 jours.	136
Figure 3.23	Effet des modes de cure sur le coefficient de perméabilité aux gaz des différents bétons étudiés à 180 jours.	136
Figure 3.24	Relation entre la résistance à la compression et le coefficient de perméabilité aux gaz.	137
Figure 3.25	Relation entre la sorptivité et le coefficient de perméabilité aux gaz.	138
Figure 3.26	Effet des fines calcaires et de modes de cure sur la perméabilité aux ions chlorures des différents mélanges à 180 jours (ENV1).	139
Figure 3.27	Effet des fines calcaires et de modes de cure sur la perméabilité aux ions chlorures des différents mélanges à 180 jours (ENV2).	140
Figure 3.28	Effet des modes de cure sur la perméabilité aux ions chlorures des différents mélanges à 180 jours.	140
Figure 3.29	Relation entre la charge totale (Q) et le coefficient de perméabilité au gaz des bétons étudiés.	141

Figure 3.30	Corrélation entre la résistance à la compression et la charge totale (Q) des bétons étudiés.	142
Figure 3.31	Variation de la résistance à la compression : a) 5% MgSO ₄ , b) 5% Na ₂ SO ₄ , c) eau de mer.	144
Figure 3.32	Evolution de pH des solutions utilisés.	145
Figure 3.33	Variation de la perte de masse en fonction de l'âge d'immersion : a) 5% de MgSO ₄ , b) 5% de Na ₂ SO ₄ , c) eau de mer.	146
Figure 3.34	Expansion des éprouvettes des mortiers immergées dans différents solutions : a) 5% MgSO ₄ , b) 5% Na ₂ SO ₄ , c) eau de mer.	148
Figure 3.35	Eprouvettes de mortiers après 210 jours d'immersion dans 5% MgSO ₄ .	149
Figure 3.36	Eprouvette de mortiers après 210 jours d'immersion dans 5% Na ₂ SO ₄ .	150
Figure 3.37	Eprouvette de mortiers après 210 jours d'immersion dans l'eau de mer.	151
Tableau 1.1	Effet du dosage en superplastifiant sur l'étalement, la résistance et la teneur en air des mortiers contenant de fines calcaires.	34
Tableau 1.2	Composition des bétons utilisés.	48
Tableau 1.3	Effet de pourcentage des fines calcaires sur la résistance à la traction par flexion.	52
Tableau 2.1	Composition chimique du ciment utilisé.	80
Tableau 2.2	Propriétés physiques et mécaniques du ciment utilisé.	80
Tableau 2.3	Analyse chimique du sable de concassage d'El Hachimia.	81
Tableau 2.4	Équivalent du sable et module de finesse de sable utilisé.	81
Tableau 2.5	Propriétés physiques des granulats utilisés.	84
Tableau 2.6	Dosage optimal en superplastifiant et en eau.	92
Tableau 2.7	Mélanges des bétons mis à l'essai (kg/m ³).	93
Tableau 2.8	Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau.	98
Tableau 2.10	Valeurs limitent pour l'essai de perméabilité aux ions chlore.	102

Tableau 2.11	Formulation des mortiers.	103
Tableau 3.1	Résistance à la compression des différents bétons étudiés à 28 et 180 jours de cure humide.	114
Tableau 3.2	Taux d'évolution de la résistance à la compression du béton avec fines calcaires par rapport au béton de référence.	115
Tableau 3.3	Résistance à la compression des différents bétons étudiés à 28 et 180 jours avec cure humide initiale de 7 jours et cure à l'air libre.	117
Tableau 3.4	Porosité accessible à l'eau des différents mélanges étudiés à 28 et 180 jours.	120
Tableau 3.5	Résultats concernant l'absorption d'eau par capillarité à 64 mn et sorptivité des bétons (ENV1 & ENV2).	123
Tableau 3.6	Effet des fines calcaires et des modes de cures sur la perméabilité à l'eau à 28 et 180 jours.	130

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

E/C	Rapport eau sur ciment
SiO ₂	Oxyde de silicium
C ₃ A	Aluminate tricalcique
C ₄ AF	Aluminate-ferrite tétracalcique
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CO ₂	Oxyde de carbone
CPA	Ciment portland sans ajout
CA	Coefficient d'activité
LCPC	Laboratoire national des ponts et chaussés
V	Volume
R _c	Résistance à la compression
C ₃ S	Silicate tricalcique (alite)
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C-H	Chaux hydraté
C	Dosage en ciment
Sp	Dosage en superplastifiant
E	Dosage en eau
FC	Filler calcaire
Q	Charge électrique totale
MgSO ₄	Sulfate de magnésium
C ₂ S	Silicate bicalcique (belite)
Na ₂ SO ₄	Sulfate de sodium
G	Gravier
S	Sable
HR	Humidité relative
T	Température
G/S	Rapport de gravier sur sable
ρ	Masse volumique
C _c	Coefficient d'absorption capillaire
A	Section de l'éprouvette
Q	Quantité d'eau absorbée
A	Surface du spécimen en contact avec l'eau
S _{pt}	Sorptivité
t	Temps
ε(%)	Porosité accessible à l'eau
Ø	Diamètre de l'échantillon
η	Viscosité dynamique du gaz
P _{atm}	Pression atmosphérique
L	Epaisseur d'échantillon
P ₁	Pression appliqué

A_i	Section de l'échantillon
h	Heures
NaCl	Chlorure de sodium
NaOH	Oxyde de sodium
I	Intensité du courant
ENV	Environnement des modes de cure
χ	Moyenne de résistance à la compression
σ	Ecart type

INTRODUCTION

✓ Position du Problème

Le matériau béton est irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial. Au niveau régional et national le béton est le matériau de construction utilisé par excellence au sein de tous les chantiers, aussi bien dans les secteurs du bâtiment que ceux des travaux publics; il n'a pas de substitut économique et performant qui possède les mêmes qualités.

Si le béton est un matériau purement local, ses propriétés restent étroitement liées aux conditions locales (constituants, fabrication, mise en œuvre, conditions climatiques, ..).

En Algérie, le développement technologique et l'augmentation de la population ont créé des besoins importantes en logements et équipements publics ces dernières années. Ceci s'est traduit par une consommation considérable des granulats. La problématique des granulats en Algérie et plus particulièrement du sable dépend des considérations socio-économiques, techniques et environnementales. Dans ce contexte, le gouvernement Algérien a décrété la loi n° 05-12 du 4 août 2005 qui interdit l'extraction des matériaux alluvionnaires par tous les moyens et en particulier par l'installation des sablières dans les lits d'oueds à partir du 04 septembre 2007. Face à cette situation préoccupante, le Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, le Ministère des Ressources en Eau et le Ministère des Travaux Publics considèrent que le recours à l'utilisation des sables de concassage issus de roches calcaires est une opportunité à saisir.

Le sable de concassage, connu sous l'appellation de sable de carrière, est obtenu à partir de la récupération de la fraction granulométrique (0/4 mm), résultant du concassage des roches calcaires, granodiorite, andésite, dolomie et basalte. La production de ce sable a connue une augmentation considérable ces dernières années, à titre d'exemple pour l'année 2007, une augmentation de 39% par rapport à l'année 2006.

L'abondance des gisements de calcaires, et ses caractéristiques intrinsèques le destine à un matériau idéal pour remplacer les granulats roulés dont la consommation anarchiques a provoqué des désordres environnementaux. Cependant, l'industrie des granulats concassés génère des quantités importantes de sable de concassage contenant une quantité importante de particules fines (8 à 30%). Ces fines représentent des gisements importants qui sont actuellement inexploités et stockés dans divers endroits. Ces fines constituent aussi un problème pour l'environnement, en raison de leur finesse et légèreté, sont aisément transportées par les courants d'air et entraînent une pollution gênante pour l'homme et l'environnement.

A cet effet, l'utilisation du sable de concassage pour la fabrication du béton hydraulique s'avère de plus en plus une nécessité pour préserver l'environnement et de satisfaire la forte demande du secteur de la construction et surtout qu'ils existent des milliers de tonnes de sable de concassage inexploités.

Ainsi, l'utilisation de sable de concassage en tant que sable pour la fabrication du béton hydraulique permis de compenser le déficit constaté en sable naturel pour l'industrie de construction.

Les sables de concassage issus des dépôts des roches calcaires contiennent des proportions élevées de fine particules (inférieur à 80 μm), dont le pourcentage varie de 8 à 30% selon différentes sources. La performance des bétons à base du sable de concassage peut être affectée si le taux de fines dépasse un certain seuil. A cet effet, les normes internationales ont limité le pourcentage de fines calcaires substitués au sable de concassage dans la fabrication du béton hydraulique. A titre d'exemple le taux de fines maximal toléré par la norme française est de 18%. Par ailleurs, la norme américaine limite ce taux à 7%.

Les mortiers et bétons confectionnés avec une addition minérale ont fait l'objet de nombreuses études. En particulier, l'effet de l'ajout calcaire au sable de concassage sur les propriétés physico-mécaniques et physico-chimiques des bétons et mortiers sans adjuvants et dans un environnement de cure humide. Les résultats ont montré que la performance du béton de cure humide n'est pas affectée si le pourcentage des fines est de l'ordre de 10 à 15% [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Cependant, l'effet de fines calcaires substitués au sable de concassage sur la durabilité du béton avec superplastifiant dans différents environnements

de cure n'a pas été étudié à ce jour. En outre, l'effet de fines calcaires issues de sable de concassages sur la performance des mortiers vis-à-vis des agents agressifs reste à éclaircir.

✓ But de travail

Ce travail s'inscrit dans la poursuite des travaux effectués au laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida sur la valorisation du sable de concassage qui vise à étudier le comportement du béton à base du sable de concassage et d'optimiser le taux de fines calcaires dans le sable pour la formulation du béton hydraulique.

Le but principal de ce travail est de compléter les études ultérieures sur le comportement du béton hydraulique à base de sable de concassage par une analyse de durabilité à court et à long terme en, ciblant plus particulièrement, l'effet des fines calcaires, l'effet de superplastifiant et l'effet de différents modes de cure. Parmi les objectifs de la présente étude : la perméabilité à l'eau, aux gaz et aux ions chlorés et l'absorption par capillarité.

✓ Plan de travail

Après une introduction générale, le présent travail est divisé en trois chapitres : le premier chapitre donne une synthèse bibliographique sur les ajouts minéraux. En particulier, l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage sur les propriétés des mortiers et bétons frais et durci. Le second chapitre présente les matériaux utilisés et les protocoles expérimentaux réalisés. Le troisième chapitre présente l'interprétation et l'analyse des résultats expérimentaux. Enfin, des conclusions sur les résultats obtenus et des recommandations pour des futurs travaux sont données.

CHAPITRE 1

FILLERS CALCAIRES ISSUS DU SABLE DE CONCASSAGE

1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous présentons une revue bibliographique sur les ajouts minéraux en particulier les fillers calcaires substitués au sable de concassage et leurs influences sur les propriétés physico-mécaniques et chimiques des bétons et mortiers à l'état frais et durci.

1.1. Les ajouts minéraux

Les ajouts sont des matériaux minéraux finement divisés et pouvant être ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou lui conférer des propriétés particulières. Les additions peuvent avoir un caractère pouzzolanique, un caractère hydraulique latent ou améliorer la microstructure de la pâte de ciment par réaction avec ses constituants.

1.2. Les différents types d'additions minérales

Les additions minérales les plus utilisés sont les suivantes : La pouzzolane naturelle, le laitier, la fumée de silice, les cendres volantes et le calcaire.

1.2.1. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est une substance d'origine des roches volcaniques réduite en poudre qui réagit en présence d'eau avec la chaux et forme des hydrates développant des résistances mécaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer. Son ajout dans le clinker avec le gypse se produit des réactions chimiques qui commencent dès l'addition de l'eau, les premiers produits qui se forment sont l'ettringite et la portlandite. Son utilisation améliore la durabilité des mortiers et bétons, notamment la perméabilité aux ions chlorures et la résistance aux attaques par les sulfates et les acides. La figure 1.1 montre l'influence de la pouzzolane naturelle sur la perméabilité des bétons aux ions chlorures [8].

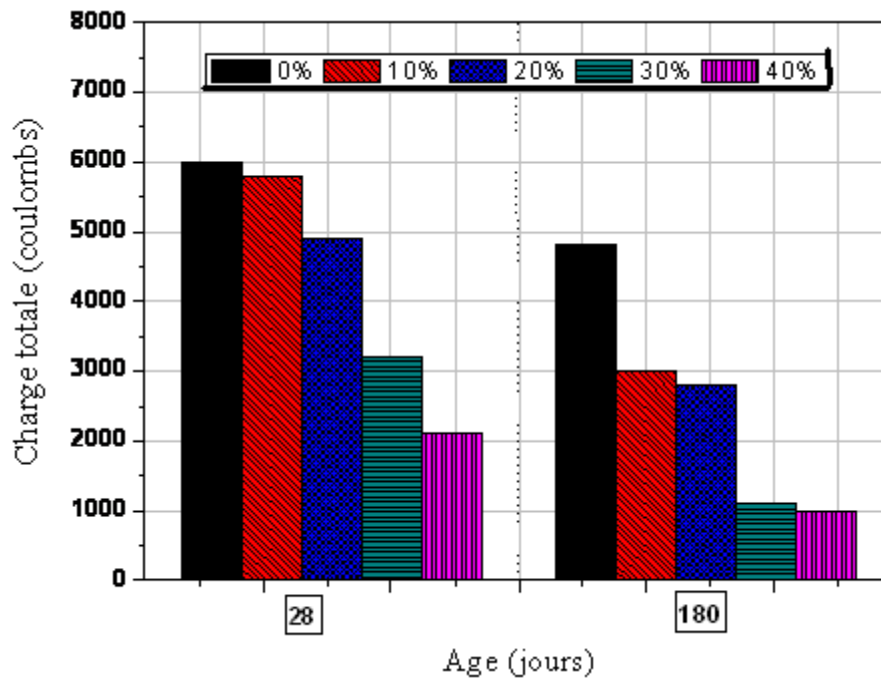


Figure 1.1: Influence de la pouzzolane naturelle sur la perméabilité des bétons aux ions chlores [8]

1.2.2. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des déchets industriels. Leur effet le plus notable est d'augmenter la résistance à long terme par réaction pouzzolanique. La cinétique de la réaction pouzzolanique des cendres volantes est très lente et dépend de nombreux facteurs (surface spécifique, composition, inclusions de phases cristallines dans la phase vitreuse, teneurs en alcalin et en sulfate du ciment, ...). Les réactions pouzzolanique des cendres volantes dans la matrice cimentaire se déroulent longtemps après le coulage, ce qui tend à améliorer la structure du matériau en resserrant la porosité (Figure 1.2) [9]. Elles peuvent remplacer les clinkers à hauteur de 30% dans la construction de structures et jusqu'à 70% pour les utilisations nécessitant une moindre performance mécanique. Les cendres volantes améliorent souvent sensiblement la résistance aux sulfates, au moins pour des taux de substitution inférieurs à 30 %. Les cendres agissent également sur la résistance chimique du liant, par l'intermédiaire de la réaction pouzzolanique. En effet, celle-ci consomme de l'hydroxyde de calcium (portlandite), qui pourrait réagir avec les sulfates et initier la dégradation du liant (dégradation par formation d'ettringite et de gypse).

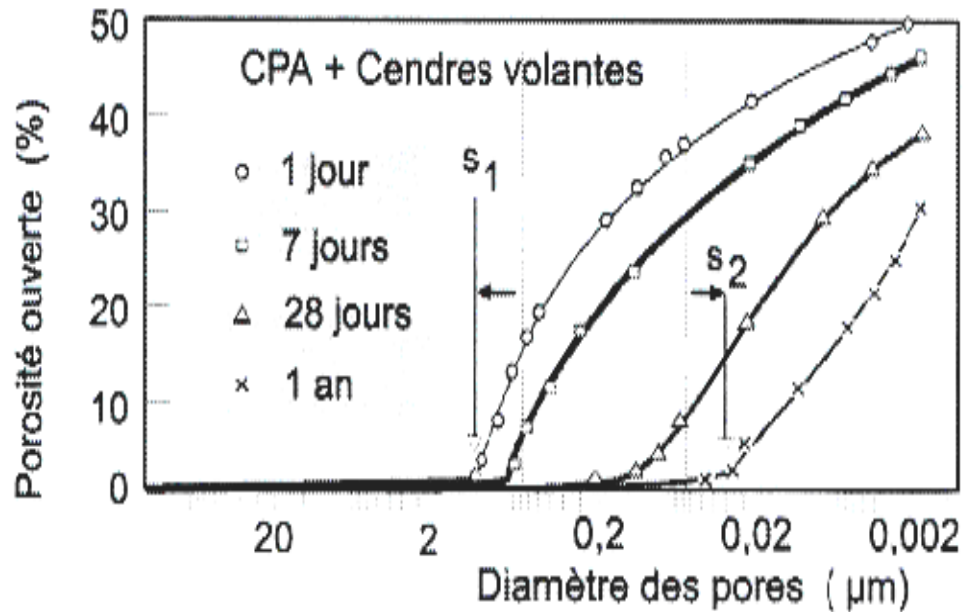


Figure 1. 2 : Influence des cendres volantes sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps [9]

1.2.3. Laitier de hauts fourneaux

Le laitier est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Il contient de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et 10% environ de magnésie, oxydes divers et manganèse. Son hydratation, traduit par le développement de résistances mécaniques est moins rapide que celle du ciment Portland surtout dans sa période initiale. Il dégage parallèlement moins de chaleur et accuse une sensibilité plus marquée aux variations de température. Chimiquement, il résiste mieux tant à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées de certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif. Les avantages de la substitution du laitier sont également confirmés par d'autres études sur des pâtes de ciment Portland pur et de ciment Portland avec les remplacements du clinker par 33, 50 et 67% de laitier (à E/C = 0,55). Ils ont constaté qu'une augmentation de la proportion de laitier conduit à une diminution du coefficient de diffusion (Figure 1.3) [9].

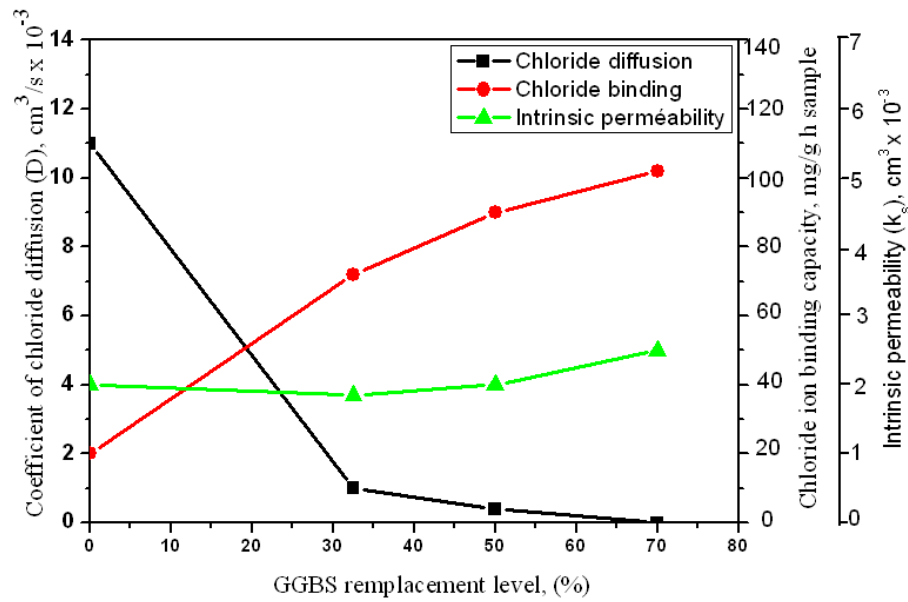


Figure 1.3: Influence du pourcentage de laitier sur la perméabilité, sur la fixation et sur le coefficient de diffusion des chlorures [9]

1.2.4. Les fumées de silice

Les fumées de silice sont des sous-produits de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium. Elles se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 μm . Leur surface spécifique est de 20 m²/g à 25 m²/g et une teneur en SiO₂ \geq 85%. Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolanique. Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice, par la forme sphérique de ses grains, permettre de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant [9]. La fumée de silice est principalement utilisée pour obtenir des bétons de hautes performances, par augmentation de la compacité (Figure 1.4).

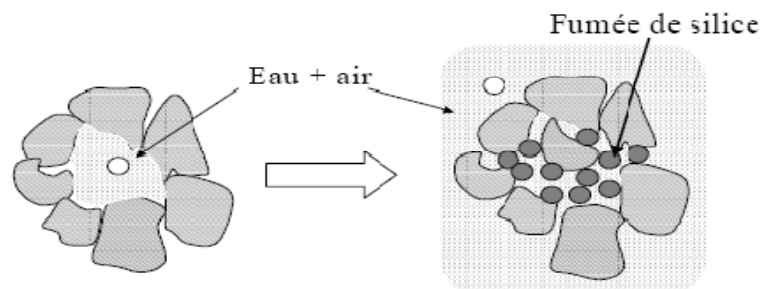


Figure 1.4: Effet de l'ajout de fumée de silice sur la compacité d'un mélange liant-granulats [9]

1.2.5. Filler calcaire

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Sa finesse mesurée au perméabilimètre de Blaine, devra être supérieure à 2000 cm²/g. Son indice de plasticité ne devra pas être mesurable et sa teneur en carbonate de calcium devra être supérieure à 90% en poids. Les fillers agissent principalement sur certaines qualités du béton comme l'accroissement de la maniabilité, la diminution de la perméabilité et de la capillarité. En général les fillers sont inertes.

Les ajouts calcaires présentent une large utilisation dans le domaine cimentier, pour leurs propriétés avantageuses qui incluent la réduction du coût de fabrication, réduction d'émission de CO₂ dans l'air, la préservation de l'environnement ainsi que l'amélioration de la durabilité des ciments et en particulier la résistance aux sulfates. Le calcaire CaCO₃, réagit avec le C₃A et C₄AF pour former 3CaO.Al₂O₃.CaCO₃.11H₂O.

Les fillers améliorent l'hydratation du ciment portland en agissant comme des sites de nucléation. Les fillers peuvent être des matériaux naturels ou provenant de procédés industriels traitant des minéraux inorganiques. La teneur en filler est limitée à 5% par la norme NF P 15 -301 [10] et permet l'utilisation du filler calcaire jusqu'à 35 % à condition que le matériau hydraulique est le ciment portland.

1.3. Production des granulats en Algérie

La production des granulats (agrégats et sable concassé), a connue une augmentation considérable dans les dernières années, par exemple, pour l'année 2007, la production des granulats a atteint 32 817 310 m³ en progression de plus de 30% par rapport à l'année 2006. Cette production est assurée par 698 unités d'exploitations minières implantées dans 46 wilayas. Les différents types des granulats produits sont : le calcaire, la granodiorite, les gneiss, les andésites, le granite, les grés, le basalte, le microgranite, les quartzites et la dolomie. Plus de 95% de ces granulats sont des granulats calcaires comme l'indique la figure 1.5 [11,12]. La figure 1.6 représente le volume de production des granulats par wilayas en année 2007.

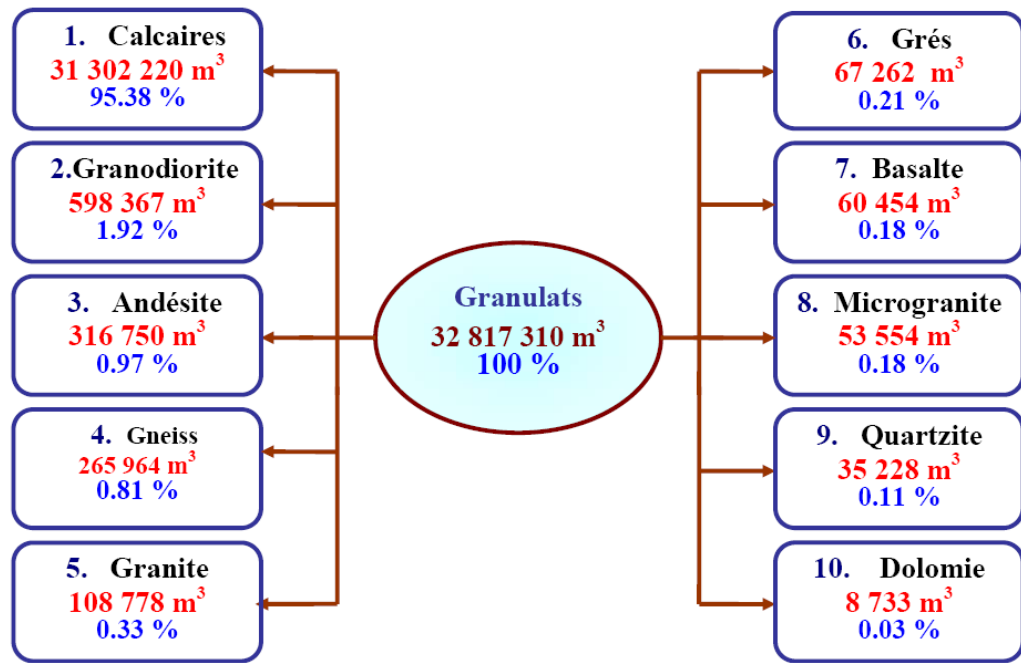


Figure 1.5 : Production des substances minérales pour les granulats :
Année 2007 [11,12]

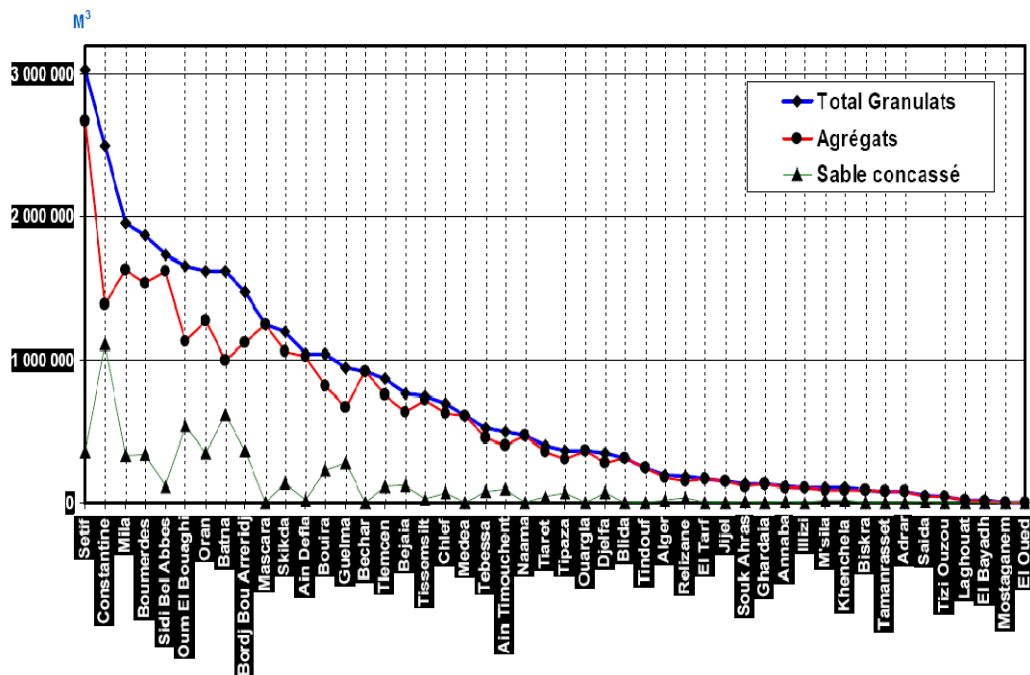


Figure 1.6 : Production des granulats, par Wilaya - Année 2007 [11]

Le sable concassé, connu aussi sous l'appellation de sable de carrière est obtenu à partir de la récupération de la fraction granulométrique [0/3, 0/4 et 0/5 mm] résultant du concassage des calcaires, granodiorite, andésite, dolomie et basalte.

Son utilisation en Algérie en tant que sable pour construction peut compenser le déficit constaté en sable naturel pour la construction, et d'augmenter substantiellement ainsi l'offre globale en sables tout types confondus, notamment grâce à l'exploitation de 30 carrières dédiées uniquement à la production de ce type de sable. La production de sable concassé est assurée par 397 unités d'exploitation minière implantées dans 30 wilayas sur les 698 unités recensées dédiées à la production des granulats. La production de sable concassé a plus que doublé depuis l'année 2005 de 2.72 Million m³, et elle est passée à 5.59 Million m³ en 2007, soit une hausse de plus 105.52 % (Figure 1.7).

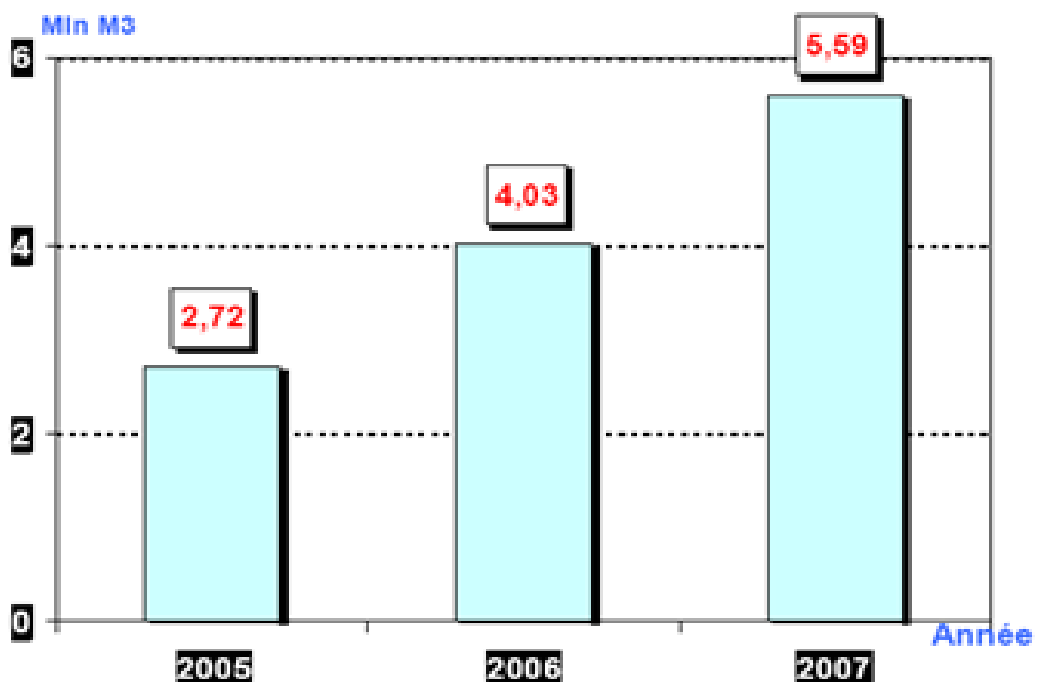


Figure 1.7: Production de sable concassé : période 2005-2007 [11]

L'industrie des granulats concassés génère des quantités importantes de sable de concassage contenant plus des particules fines. Les fines calcaires provenant de l'exploitation de granulats issus de concassage représentent dans certain régions d'Algérie, des gisements importants qui sont actuellement inexploités et stockés dans divers endroits. Ces fines constituent bien souvent un problème pour l'environnement, en raison de leur

finesse et légèreté, sont aisément transportés par les courants d'air et entraînent une pollution gênante pour l'homme et l'environnement. A cet effet, l'utilisation du sable de concassage pour la fabrication du béton hydraulique s'avère de plus en plus une nécessité pour préserver l'environnement et de satisfaire la forte demande du secteur de la construction et surtout qu'ils existent des millions de tonnes de sable de concassage inexploités.

Dans cette section, on présentera l'effet de fines calcaires issues du sable de concassage sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état frais et durci.

1.4. Influence des fines calcaires substituées au sable de concassage sur les propriétés du béton frais

1.4.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une caractéristique fondamentale du béton frais. Elle est évaluée traditionnellement à l'aide de l'essai du cône d'Abrams. L'augmentation de la demande en eau des bétons à base de sable de concassage est l'un des problèmes qui se posent pour l'obtention d'une ouvrabilité suffisante. La diminution de l'ouvrabilité peut être due à la présence élevée des fines, à la forme et à la texture du sable de concassage. Afin d'obtenir une fluidité suffisante, l'addition des ajouts minéraux (fumée de silice, superplastifiant) s'avère nécessaire. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport E/C et sur le dosage en superplastifiant [13]. Une augmentation de la teneur en eau conduit systématiquement à une chute de la résistance mécanique et à diminution de la viscosité de la pâte du ciment. En général, l'incorporation de 5 à 10% des fines calcaires améliore l'ouvrabilité et la cohésion du béton [13,14].

LI BEIXING et al [6], ont aussi étudié l'effet de fines calcaire substitué au sable de concassage sur l'ouvrabilité des bétons. Ils ont étudié deux types du béton : béton de faible résistance ($E/C = 0,55$) et un béton de haute résistance ($E/C = 0,32$). Les résultats ont montré qu'avec un pourcentage de fines calcaires variant de 10 à 15% et 7 à 10%, respectivement, donne une meilleure ouvrabilité. Cependant, ils ont noté que les mélanges de béton avec un rapport $E/C = 0,55$ présentent de la ségrégation.

HEBBOUCHE [15] a étudié l'influence des fines issues du sable de concassage sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton. Ils ont utilisés deux types de

fines de nature différentes (calcaire et siliceuse) avec des taux de fines de 0, 10, 15 et 20% comme substitution au sable concassé. Trois mélanges de bétons ont été confectionnés avec un rapport E/C de 0.61, 0.62, 0.64 et 0.66 pour des taux des fines calcaire de 0, 10, 15 et 20%, respectivement. Ils ont constaté que la demande en eau augmente avec l'augmentation des pourcentages des fines dans le béton (Figure 1.8). En effet, cette augmentation de la demande en eau est due principalement à l'augmentation de la porosité des bétons avec l'accroissement des fines calcaires, et ainsi à la surface spécifique des grains du sable de concassage utilisé qui présente des faces fraîchement rompues induisant toujours une porosité systématique donnant lieu à une grande absorption de l'eau.

Kenai et al [16], ont étudié l'ouvrabilité du béton à base de trois sables de concassage avec 0, 10, 15 et 20% de fines. Ils ont montré que l'ouvrabilité augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines. En effet, cette augmentation est due à la grande surface spécifique des fillers, à la morphologie de leur texture et leur surface rugueuse.

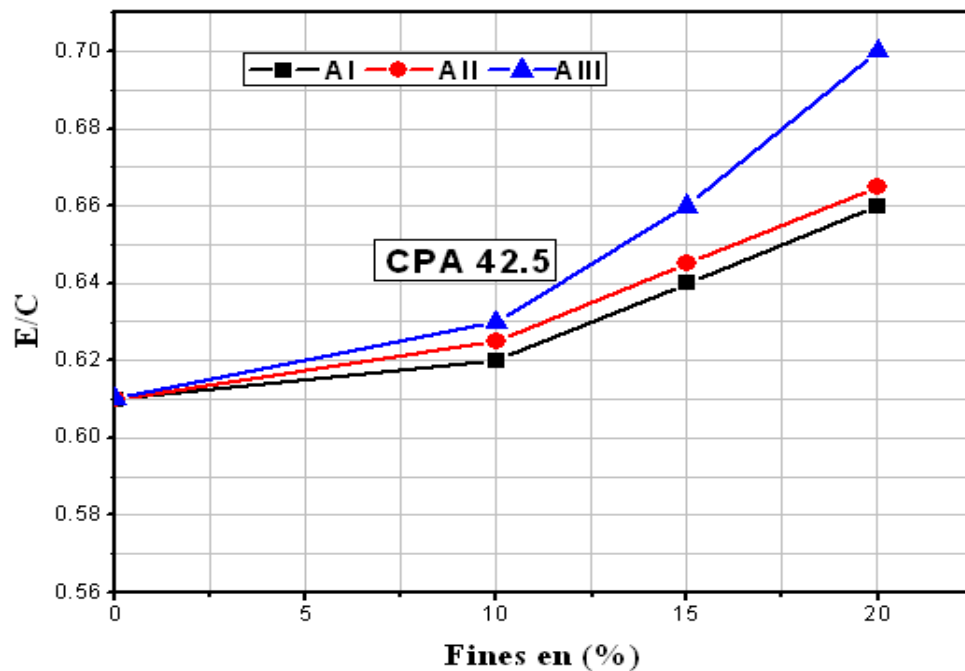


Figure 1.8: Variation de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines [15]

SKENDER [17] a étudié l'effet des fines calcaires substitués au sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton (Figure 1.9), le pourcentages des fines calcaires utilisé est de 0, 5, 15 et 25%. Les résultats montrent que l'ouvrabilité du béton diminue avec l'augmentation du taux de fines calcaires indépendamment du type de ciment utilisé.

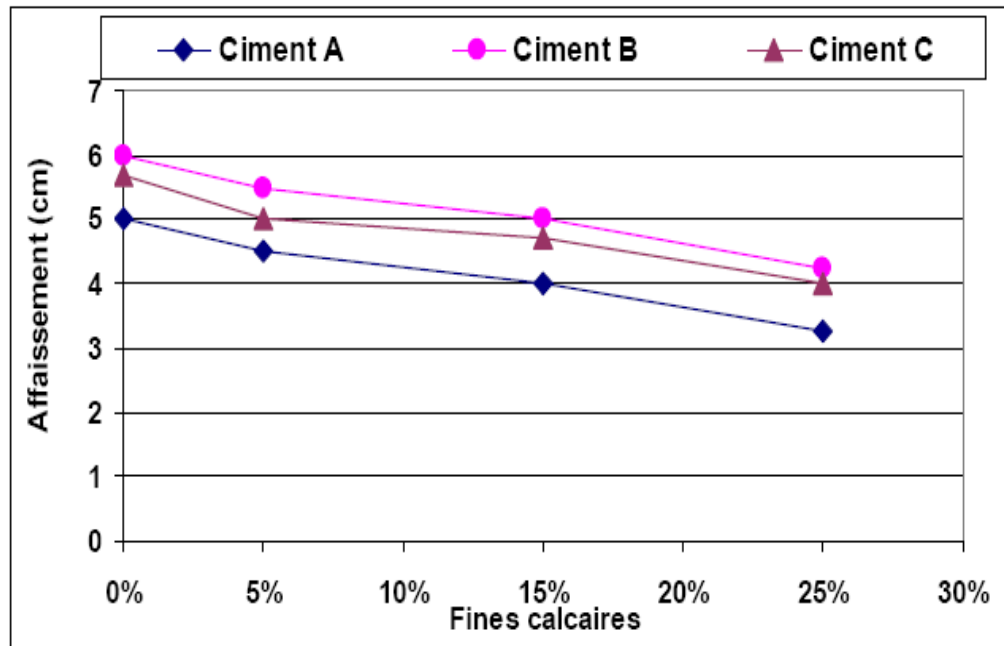


Figure 1.9: Variation de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines [17]

BONAVETTI et al [18], ont étudié l'effet des fines substituées au sable sur les propriétés physiques et chimiques des mortiers. Trois types de fines de nature quartz, granite et calcaire ont été utilisé avec un taux de fines variant de 0 à 20%. Les résultats de cette étude ont montré que la demande en eau augmente avec l'augmentation du pourcentage des fines dans le mortier. En effet, cette augmentation peut être attribuée à la grande surface spécifique des fines. Pour les mortiers avec 5 % de fines, l'augmentation de la demande en eau est insignifiante ($< 2\%$). Cependant, une augmentation rapide de la demande en eau a été observée, lorsque le pourcentage des fines dépasse 10%. Les mortiers avec 20% de fines de granite et de calcaire présentent une augmentation de la demande en eau de 17%.

BENACHOUR et al [19], ont étudié la quantité maximale d'addition de filler et leur effet sur les propriétés des mortiers. Les quantités de filler calcaire utilisé dans la formulation des mortiers varient de 15 à 45% (en masse de sable) et 45 à 135% (en masse de ciment). Les résultats sur la demande en eau ont montré que le rapport E/C augmente avec l'augmentation du filler jusqu'à 15% en masse de sable, et il devient très important lorsque l'ajout du filler atteint 40% en masse de sable. La figure 1.10, montre que la demande en eau augmente avec l'accroissement du pourcentage de filler. L'augmentation de la finesse du filler améliore la demande en eau et l'hydratation du ciment.

BERTRANDY [20] a étudié l'effet de filler calcaire substitué au sable de concassage sur la maniabilité des bétons. Trois types de fillers utilisés qui ont un coefficient d'activité (CA) allant de 0.5 à 2. Les pourcentages de teneur en filler est de 0, 4 et 8%. La maniabilité a été mesurée au maniabilimètre LCPC. Les résultats ont montré qu'une amélioration de l'ouvrabilité a été observée pour les fines avec CA=0 et CA=1 pour un taux de fines 8% et 4% respectivement. Par ailleurs, pour les fines avec un coefficient d'activité CA=2, une diminution systématique de l'ouvrabilité avec l'augmentation de pourcentages de fines a été observée.

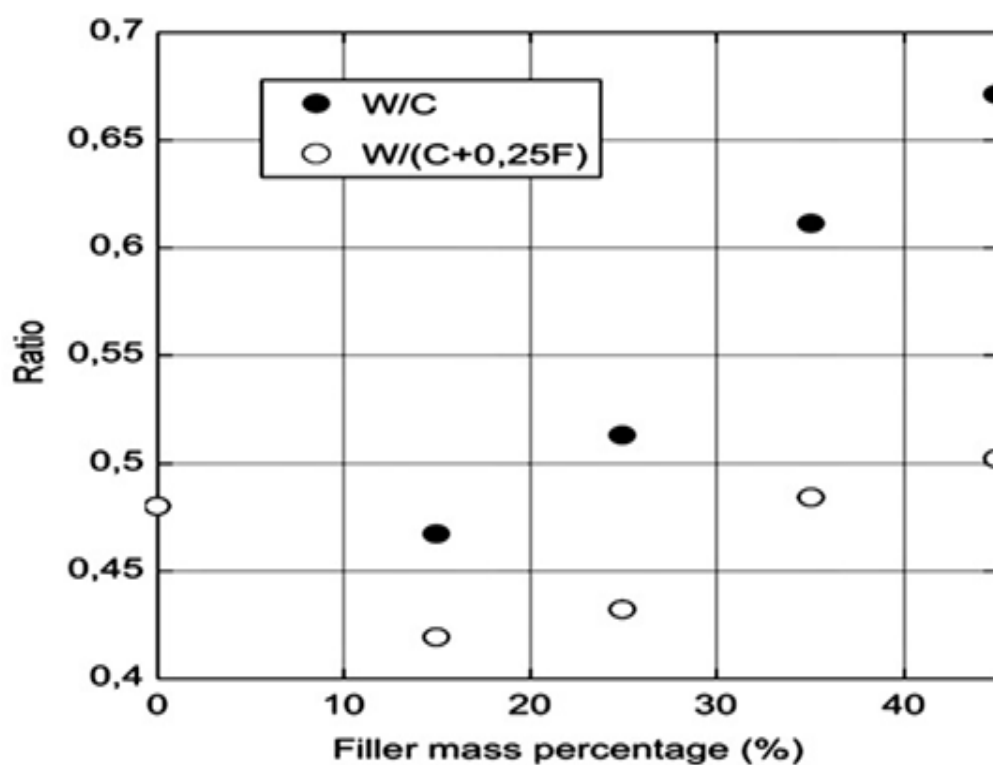


Figure 1.10: Variation de la demande en eau on fonction de pourcentage de masse de filler [19]

TURCRY [21] a étudié l'effet du superplastifiant sur des mortiers contenant du filler calcaire FC 0/100, dont les proportions sont : $V_{pate}=55\%$, $a/c=0,6$ et $e/f=1,07$, il a utilisé 0, 0,5 et 1% de superplastifiant (dosages par rapport à la masse de fines). Les résultats ont montré que le premier effet du superplastifiant est évidemment d'augmenter l'étalement du mortier (Tableau 1.1). La résistance à la compression à 28 jours a été

également améliorée. C'est la conséquence d'une meilleure d'hydratation du ciment, dont la surface spécifique augmente suite à la défloculation.

Tableau 1.1: Effet du dosage en superplastifiant sur l'étalement, la résistance et la teneur en air des mortiers contenant de fines calcaires [21]

	Sp=0%	Sp=0,5%	Sp=1%
Etalement (cm)	11	21	32
Rc28 (MPa)	57	60	61
Retrait total à 100 jours ($\mu\text{m}/\text{m}$)	800	745	740
Teneur en air estimée (%)	3,5	2,20	2

BEDERINA et al [22], ont étudié l'effet de filler substitué au sable de dune et sable composé de sable de dune et de rivière sur l'ouvrabilité des bétons frais. Ils ont utilisé l'essai VEBE pour mesurer l'ouvrabilité du béton en fonction du taux de filler avec différents rapport E/C (0.5, 0.7 et 0.9). Le dosage de ciment a été maintenu constant à 350 kg/m³. Un superplastifiant de type MEDAPLAST-SP avec un dosage 1.5% en poids de ciment a été utilisé. Les résultats ont montré que l'ouvrabilité du béton de sable dépend de la quantité d'eau et du filler et elle augmente avec l'accroissement du rapport E/C. Par ailleurs, l'augmentation du filler diminue l'ouvrabilité jusqu'à une valeur optimale du rapport filler / sable (f/s) comme l'illustre les figures 1.11 et 1.12. Pour des rapports E/C plus élevé (E/C = 0.9), l'ouvrabilité augmente en fonction du taux du filler indépendamment du type de sable utilisé. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la présence d'une quantité d'eau élevé, le mouvement de grain de sable n'est pas resserré par la présence du filler.

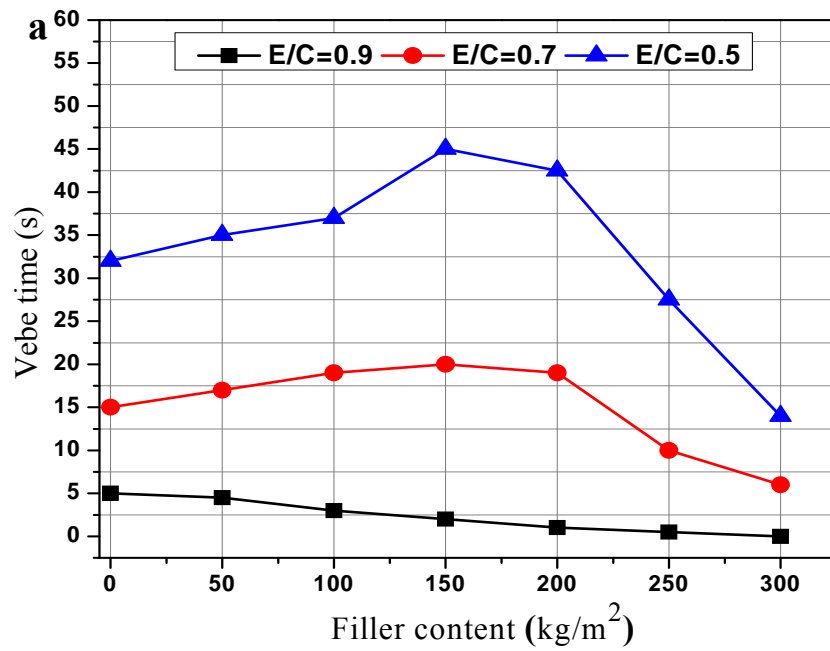


Figure 1.11: Ouvrabilité du béton de sable de dune en fonction du taux de filler avec différentes rapport E/C [21]

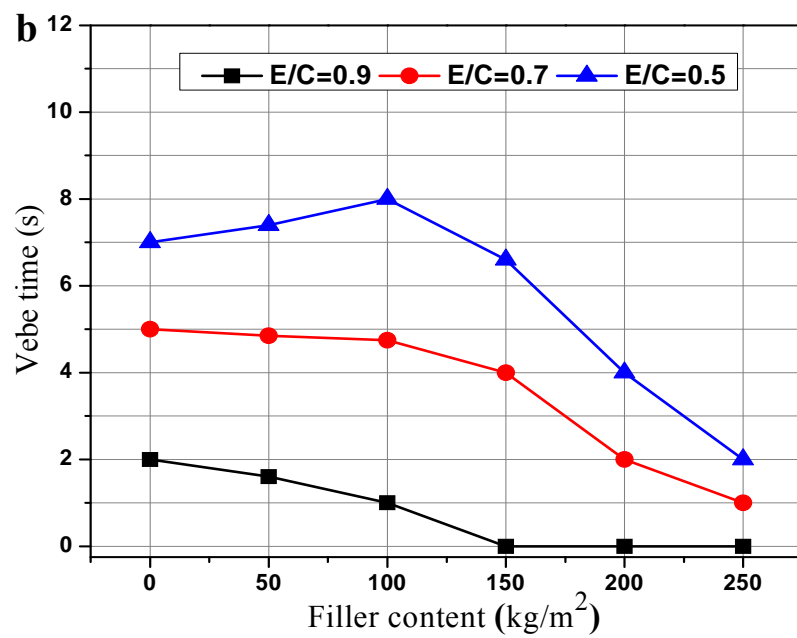


Figure 1.12: Ouvrabilité du béton de sable de dune et rivière en fonction du taux de filler avec différentes rapport E/C [21]

1.4.2. Masse volumique

BEDERINA et al [21], ont étudié l'effet du filler sur la compacité des mélanges secs du béton. Cette étude a été basée sur la détermination de la masse volumique des mélanges dont ils ont réalisés trois mélanges avec différents types de sable (sable de dune (DS), sable de rivière (RS) et un mélange de sable de dune et de rivière (DS & RS)). Les résultats ont montré que la densité des bétons confectionnés avec les différents sables augmente avec l'augmentation du rapport filler/ sable (f/s) jusqu'à un optimum, ensuite une diminution est observée (Figure 1.13). La compacité optimale obtenue pour des bétons avec différents sables peut être due au remplissage des vides existant entre les particules.

GUEMMADI [23] a également effectué des mesures de la masse volumique du sable en fonction des fines de deux types de sable concassé, Elle a remarqué que la masse volumique apparente augmente légèrement pour un taux de filler de 0 à 6%, et plus fortement entre 6 et 12%. Au-delà de 12%, elle se stabilise comme l'illustre la figure 1.14. Par ailleurs, l'introduction des fines a entraîné une légère augmentation de la masse volumique absolue pour les différents types de sable.

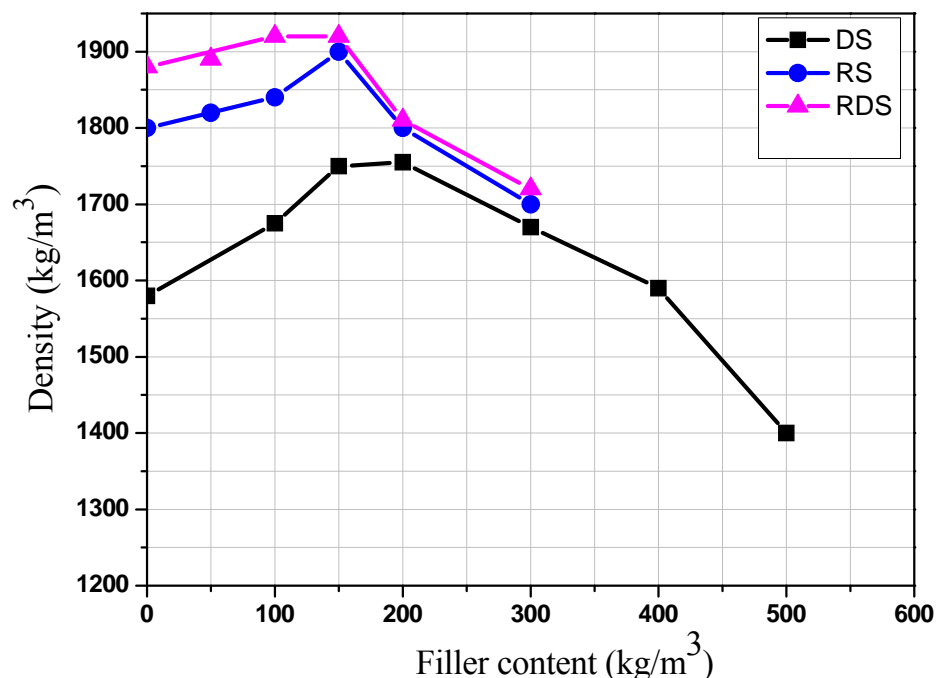


Figure 1.13: Evolution de la densité du béton en fonction de la quantité des fines [21]

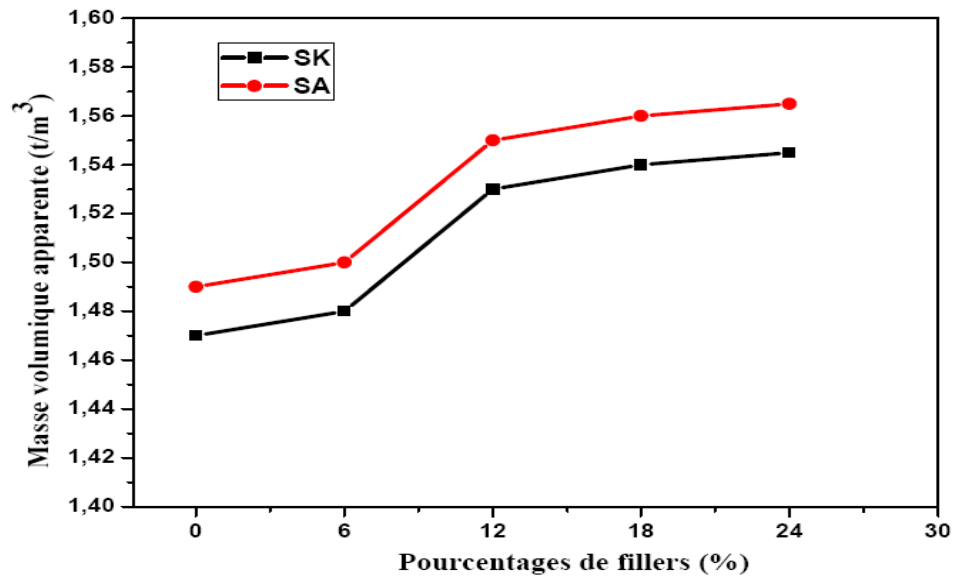


Figure 1.14: Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines [23]

Des essais effectués par BENNA [24], ont montré que la masse volumique apparente augmente rapidement pour un taux de fines allant de 0 à 10 % puis s'accroît très faiblement entre 10% et 25%. Il a remarqué que la compacité optimale est obtenue pour des taux de fines allant de 10 à 25% comme illustre la figure 1.15.

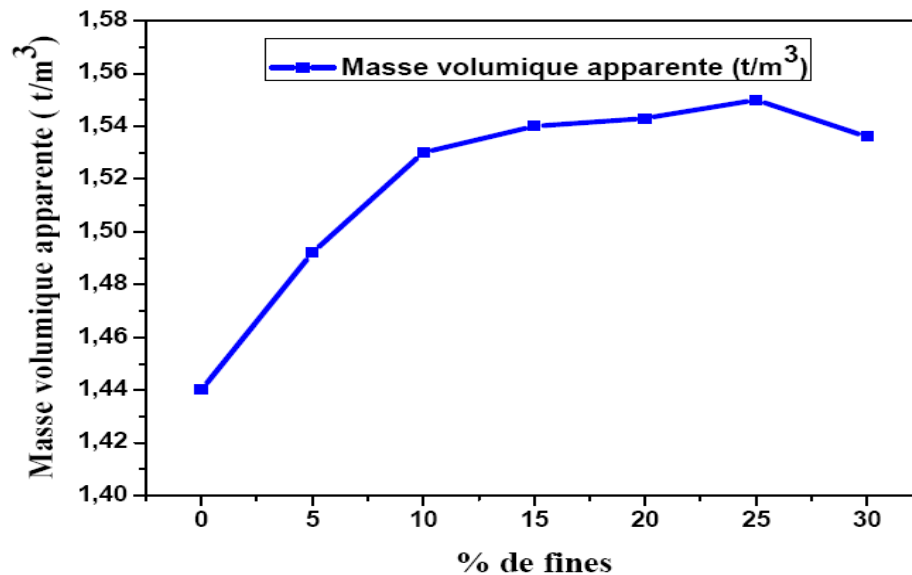


Figure 1.15: Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines [24]

SADHOUARI et al [25], ont trouvé que la densité réelle du béton augmente rapidement pour les taux de fines allant de 0 à 15%. Au delà de 15%, une diminution est observée pour les deux bétons (BGK, BGS) comme illustre la figure 1.16. L'évolution des densités des bétons à base de granulats issus de Sidi Ali Benyoub (BGS) est meilleure par rapport à ceux issus du site de Kristel (BGK) pour les deux types de granulométrie. Ainsi, les fillers calcaires ont contribué à densifier la pâte du béton frais en réduisant les pores (modification de la microstructure). D'autre part, les fines confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de s'opposer au ressuage et une cohésion qui assure le maintien de l'homogénéité (absence de ségrégation).

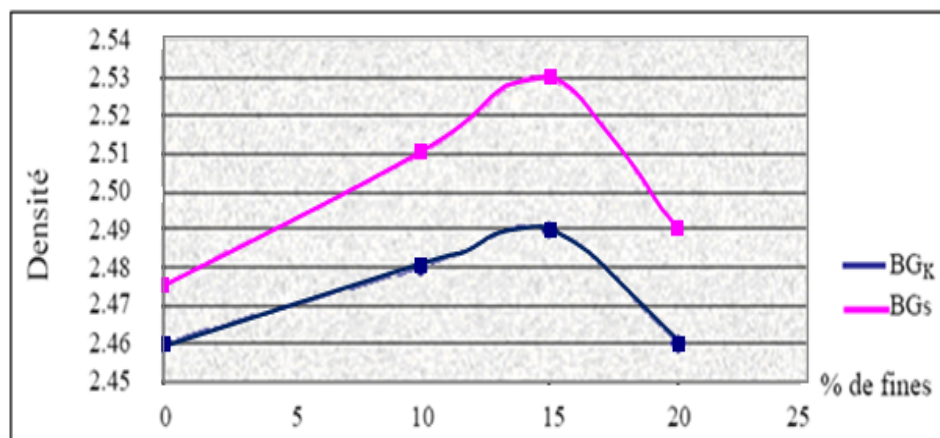


Figure 1.16: Evolution de la densité du béton en fonction des taux de fines [25]

1.5. Influence des fines calcaires substituées au sable de concassage sur les propriétés mécaniques

1.5.1. Résistance à la compression

KHATIB et al [1], ont étudié l'influence de fines calcaires substitués au sable de concassage sur la résistance à la compression des mortiers. Trois types de ciment ont été utilisés avec des pourcentages de fines calcaires de 0, 5, 10, 15 et 20%. Le rapport E/C = 0,55 a été maintenu constant. Les résultats ont montré que la résistance à la compression augmente à jeune âge pour 10 à 15% de fines calcaires selon les différents types de ciment. Cette augmentation de la résistance à la compression à jeune âge est due à l'effet du filler, l'accélération de l'hydratation de C_3A et C_3S , le changement de la morphologie de gel C-S-H et la formation des carboaluminates de la réaction du $CaCO_3$ avec le C_3A . Cependant,

la diminution de la résistance à la compression des mortiers avec fines calcaires pour les différents types de ciment est due à l'effet de dilution.

MENADI [2], a étudié le développement de la résistance à la compression des mortiers et bétons en fonction du pourcentage de fines substitués au sable de concassage. Quatre types de ciment ont été utilisées : ciment (A) de type CEM I 32.5, ciment (B) de type CEM I 42.5, ciment (C) et ciment (D) de types CEM II 42.5/A-L. Ils ont constaté que la résistance à la compression des mortiers augmente avec l'âge pour les mortiers avec et sans fines. En effet, cette augmentation est due au développement de l'hydratation du ciment. Pour les mortiers confectionnés avec le ciment (A) ils ont observés pour des taux de fines de 15% une amélioration de la résistance à la compression à jeune et à long terme. Figure 1.17 présente les résultats de la résistance à compression des bétons étudiés. Selon cette figure, ils ont remarqué que les bétons confectionnés avec les ciments C et D présentent des résistances à la compression élevées par rapport aux bétons confectionnés avec le ciment A et B. La résistance à la compression des tous les mélanges des bétons varient de 25 à 34 MPa. Pour le béton avec 15% de fines calcaires une diminution de résistance de 6 à 15% est observée à l'âge de 90 jours par rapport au béton sans fines.

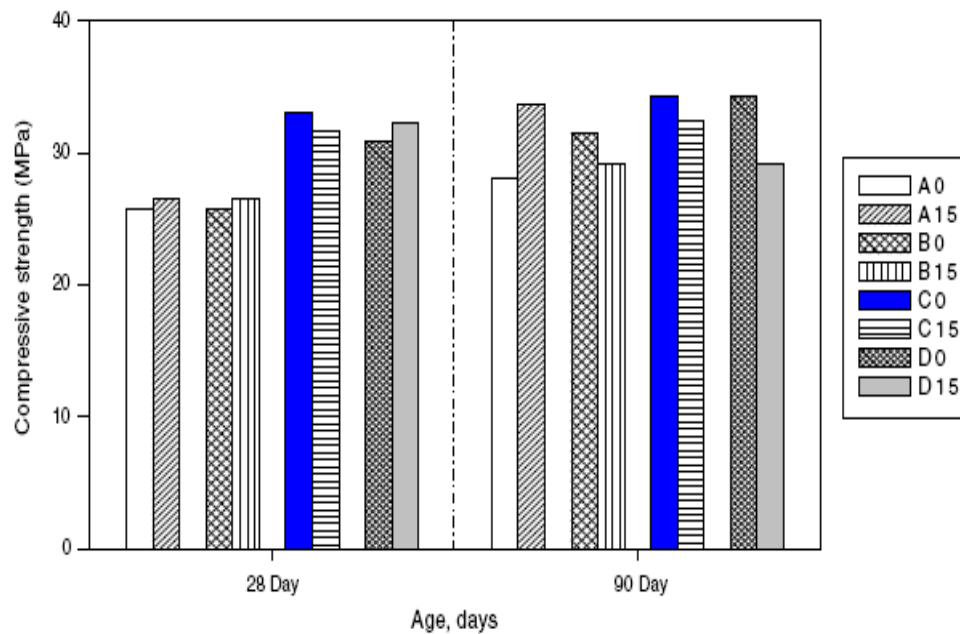


Figure 1.17: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des mortiers [2]

KENAI et al [3], ont étudié l'effet d'un filler calcaire substitué au sable de concassage sur la résistance à la compression des mortiers et bétons. Le rapport E/C a été maintenu constant ($E/C = 0,55$). Le ciment utilisé est un ciment Portland au calcaire de type CEM II/A-L. Les résultats ont montré que l'ajout de fines calcaires au sable de concassage jusqu'à 10% n'a aucun effet sur la résistance à la compression du mortier, mais par contre, l'addition des fines calcaires à des taux de 10 à 20% diminue la résistance à la compression. Selon la figure 1.18, la résistance à la compression du béton augmente à jeunes âges avec l'augmentation des fines de 0 à 15%. Cette augmentation est due à la surface rugueuse du sable de concassage et à la réaction des fillers calcaires (CaCO_3) avec le C_3A du ciment. Au delà du taux de 15% de fines, la résistance à la compression diminue légèrement jusqu'à 20% de fines et devient comparable à celle du béton de référence [16].

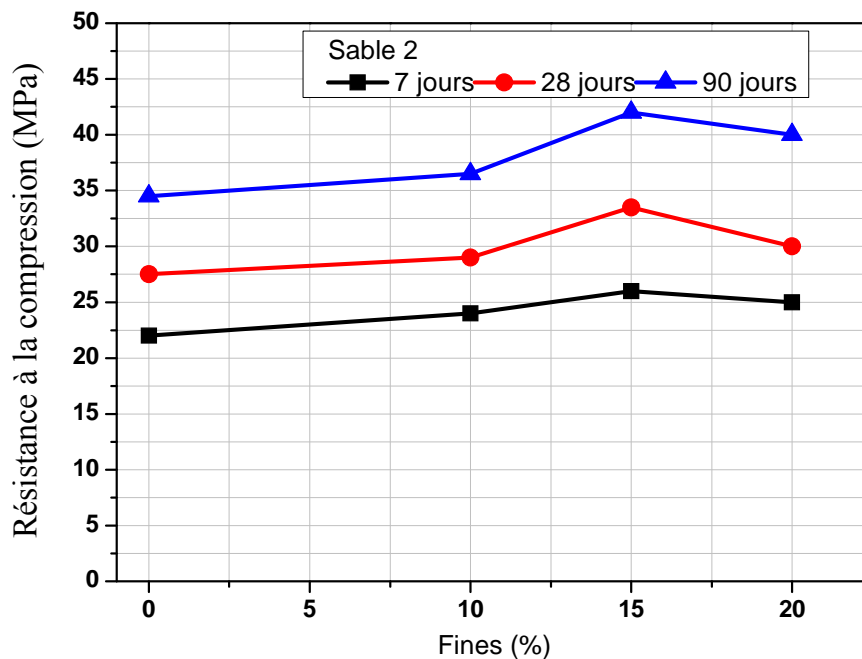


Figure 1.18: Développement de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires [16]

RAMIREZ et al [5], ont montré que pour des granulométries fins et grossières avec des dosages en fines de 3, 5, 8, 12 et 20% et 3, 5, 8, 12 et 15% respectivement et des taux d'argile dans le sable de 0, 2, 4 et 6%, un accroissement de la résistance à la compression des mortiers est observé pour les granulométries fins et grossières de l'ordre de 3 à 20% en l'absence d'argile, et pour des pourcentages des fines allant jusqu'à 20%. Cependant,

l'augmentation de la proportion d'argile dans le sable fait chuter de façon remarquable la résistance à la compression (Figures 1.19 et 1.20).

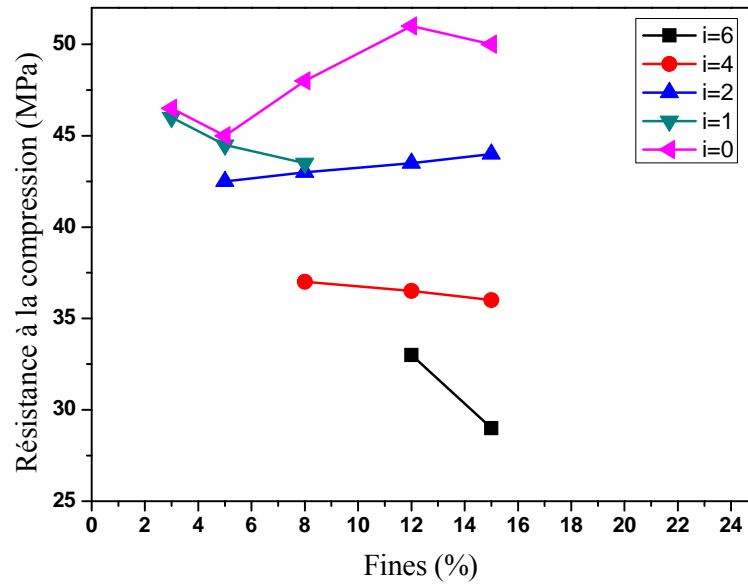


Figure 1.19: Variation de la résistance à la compression pour une granulométrie grossière et rapport ciment /sable =1/4,2 (A/S : argile / sable(%)) [5]

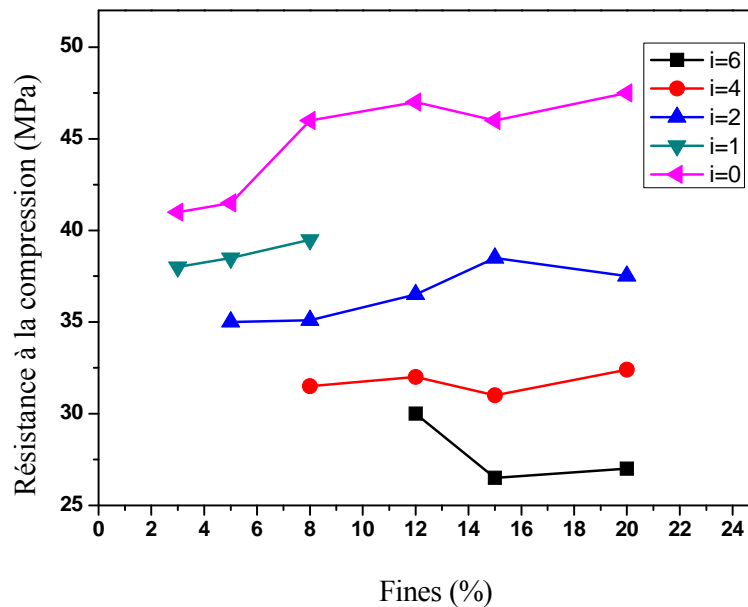


Figure 1.20: Variation de la résistance à la compression pour une granulométrie fine et un rapport ciment /sable =1/4,2 (A/S : argile / sable (%)) [5]

LI BEIXING et al [6], ont étudié l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage sur la résistance à la compression et la durabilité des bétons. Ils ont montré que l'incorporation de 15% de fines pour le béton de faible résistance et de 10% pour le béton de haute résistance améliore la résistance à la compression (Figure 1.21). En effet, cette amélioration de résistance à la compression est due aux particules de fines calcaires qui agissent comme sites de nucléation pour les réactions de CH et C-S-H aux cours de l'hydratation du ciment, et accélèrent l'hydratation des minéraux de clinker, surtout le C_3S . La réaction entre les fines calcaires et le C_3A forme des carboaluminates.

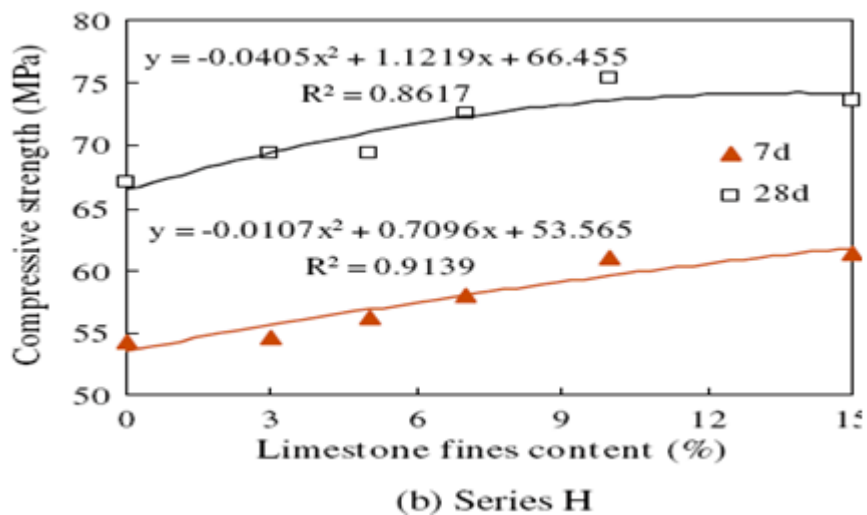
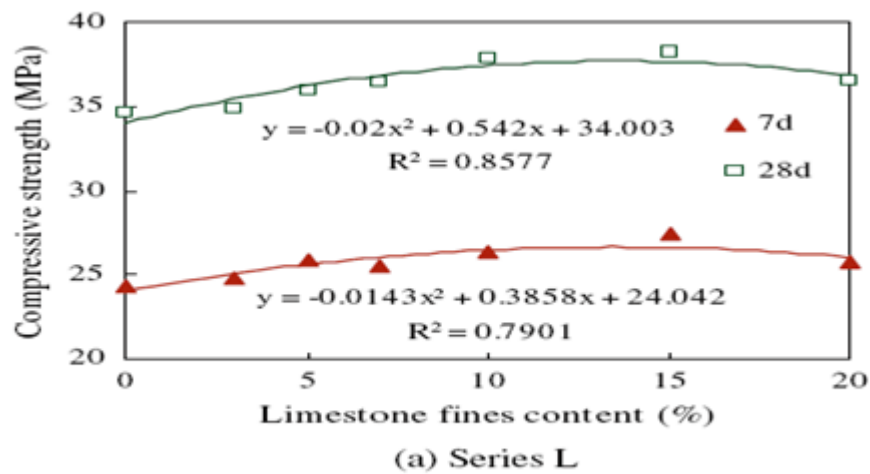


Figure 1.21: Evolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de fines calcaires pour deux types de béton : béton de faible résistance, L (a), et béton de haute résistance, H (b) [6]

Topçu et al [7], ont présenté les résultats sur l'effet du filler substitué au sable de concassage sur la résistance à la compression du béton. Le dosage en ciment utilisé est de 200, 275 et 350 kg/m^3 . Figure 1.22, montre que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du dosage en ciment et du filler. Ils ont conclut que l'incorporation de 7 à 10% de filler dans le sable de concassage améliore les propriétés mécaniques du béton.

L'effet du taux de fines et du dosage en ciment sur la résistance à la compression à 28 jours a été étudié également par KENAI et al [13]. La figure 1.23 montre que la résistance maximale a été obtenue pour un taux de fines de 10%.

L'étude faite par HEBBOUCHE [15] sur les bétons confectionnés avec trois sables concassés fillérisés de nature calcaire et siliceuse, ont montré que la résistance à la compression augmente avec l'âge de cure quelque soit le pourcentage de fines substitués au sable. Selon la figure 1.24, l'incorporation d'un taux de 15% de fines calcaires semble améliorer la résistance à la compression à jeunes âges. Cependant, pour des pourcentages de 20% de fines calcaire, la résistance à la compression est comparable à celle du béton sans fines. A 7 jours de cure l'augmentation de la résistance à la compression était de 11.8, 11.2 et 12% des bétons fillérisés par rapport au béton sans fines. Par ailleurs, cette augmentation est de 9.4, 20.6 et 5% à l'âge de 28 jours.

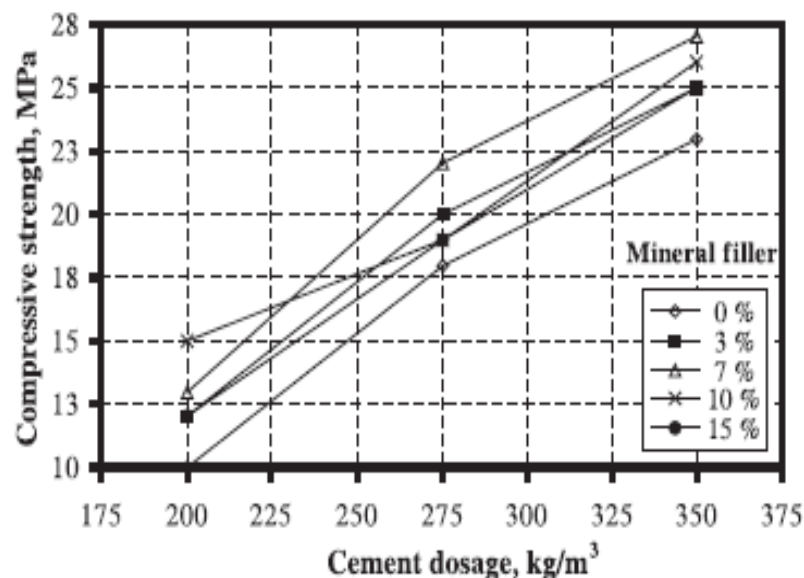


Figure 1.22: Evolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de filler substitué au sable de concassage à 28 jours [7]

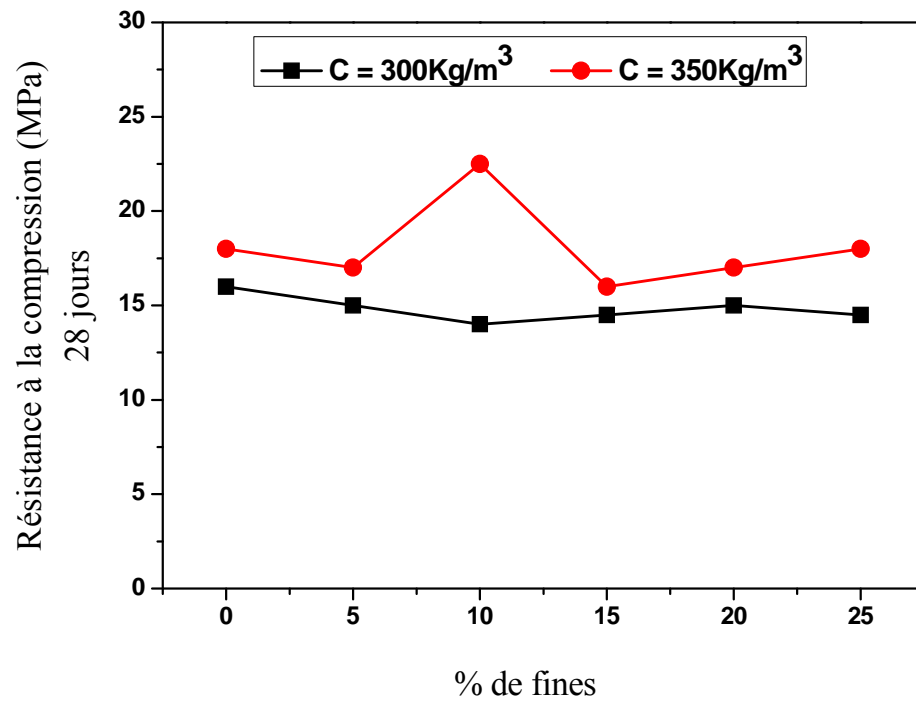


Figure 1.23: Variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de fines [13]

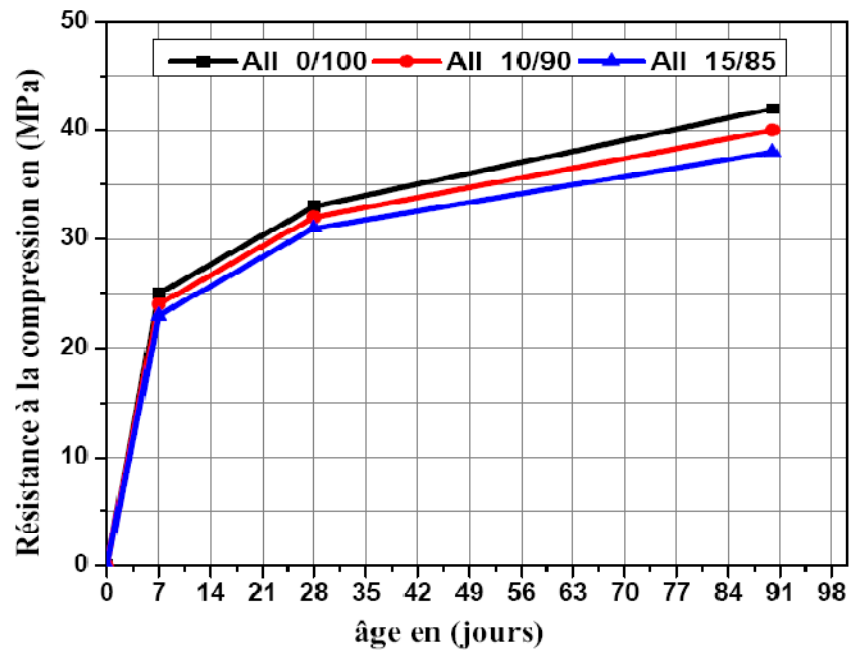


Figure 1.24: Evolution de la résistance à la compression à différents âges [15]

SKENDER [17] a étudié l'effet des fines calcaires substitués au sable de concassage sur la résistance à la compression du béton à base de trois ciments différents (A : CEM II/42.5 de M'sila, B : CEM II/42.5 de Chlef et C : CPA de M'sila). Ils ont trouvé que la résistance à la compression est meilleure pour 5% de fines calcaires issues de sable de concassage pour les différents ciments utilisés pour les deux âges de cure. En effet, cette augmentation de la résistance est due à la réaction entre le CaCO_3 et C_3A du ciment. La présence de CaCO_3 accélère aussi l'hydratation du C_3S . La résistance la compression du béton à 15% de fines est comparable à celle du béton de référence. Les figures 1.25 et 1.26 illustrent les différents résultats obtenus sur la résistance à la compression du béton à base de sable de concassage avec et sans fines calcaires pour les âges de 60 et 90 jours.

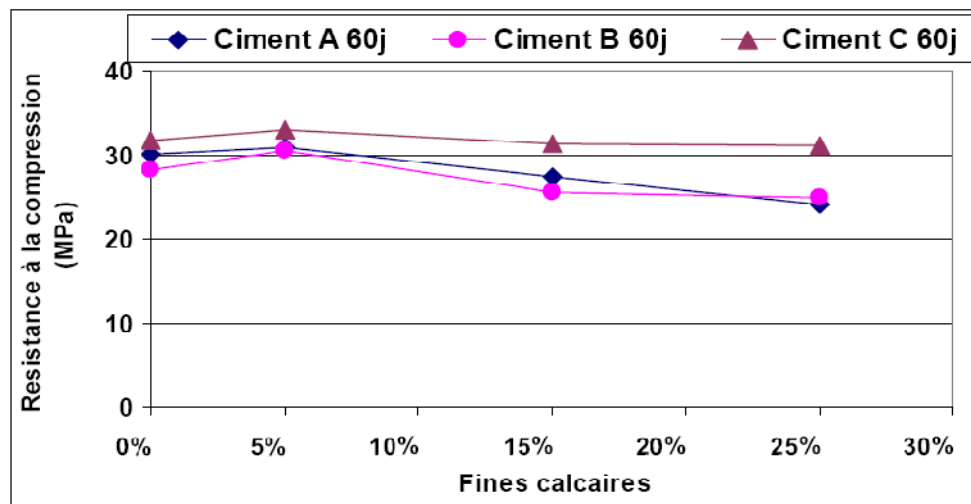


Figure 1.25: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 60 jours [17]

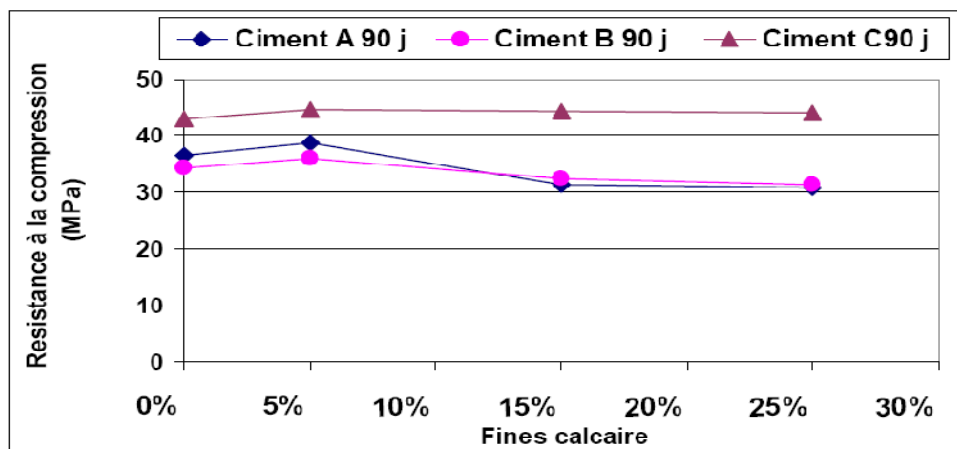


Figure 1.26: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 90 jours [17]

D'après BONAVENTTI et al [18], la résistance à la compression des mortiers avec fines calcaires est toujours élevée en comparaison à celle du mortier sans fines, une augmentation importante de 44 à 72% à l'âge de 7 jours de cure humide est observée. Au delà, de 28 jours d'âge de cure, les résistances sont comparables à celles de référence.

Benna [24] a étudié la résistance à la compression des mortiers et bétons à base de sable de concassage avec et sans fines (Figure 1.27). On observé une chute remarquable de la résistance à la compression avec l'augmentation du taux de fines calcaires dans les mortiers. Par ailleurs, les résistances à la compression des bétons avec et sans fines sont comparables à l'exception du béton avec 10% de fines, où on note la valeur maximale de la résistance.

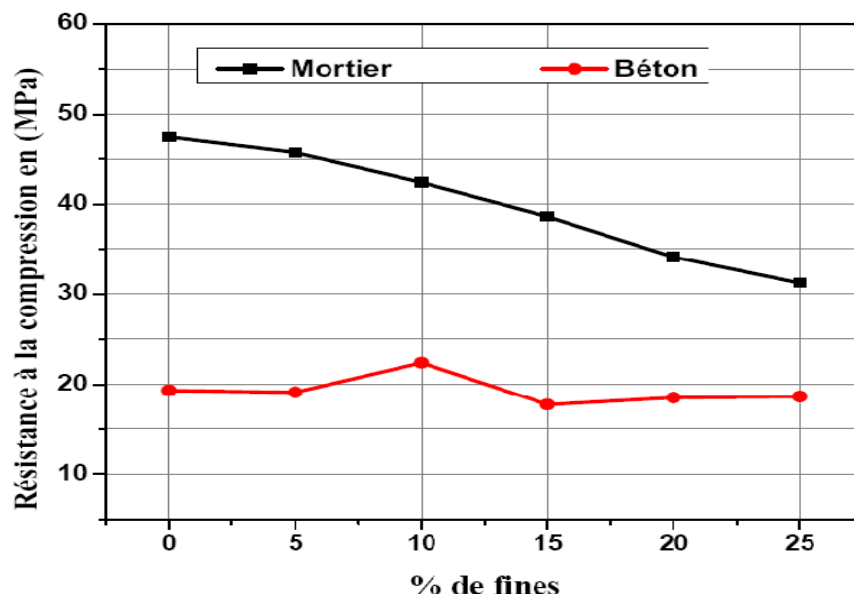


Figure 1.27: Résistance à la compression des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines [24]

SADHOUARI et al [25], ont étudié la résistance à la compression du béton en fonction de l'âge et de taux de filler pour deux types de sable (Figures 1.28 et 1.29). Les résultats ont montré que les bétons formulés avec les deux sables de concassage utilisés (Kristel et Sidi ali-benyoub) présentent une augmentation de résistance à la compression de 20% pour un optimum de fines de l'ordre de 15%.

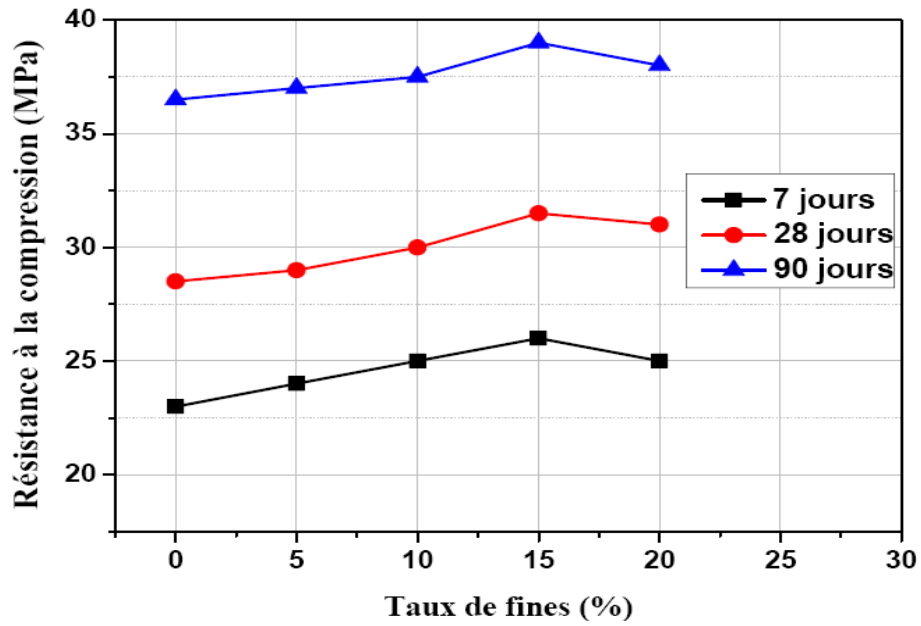


Figure 1.28: Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Kristel) [25]

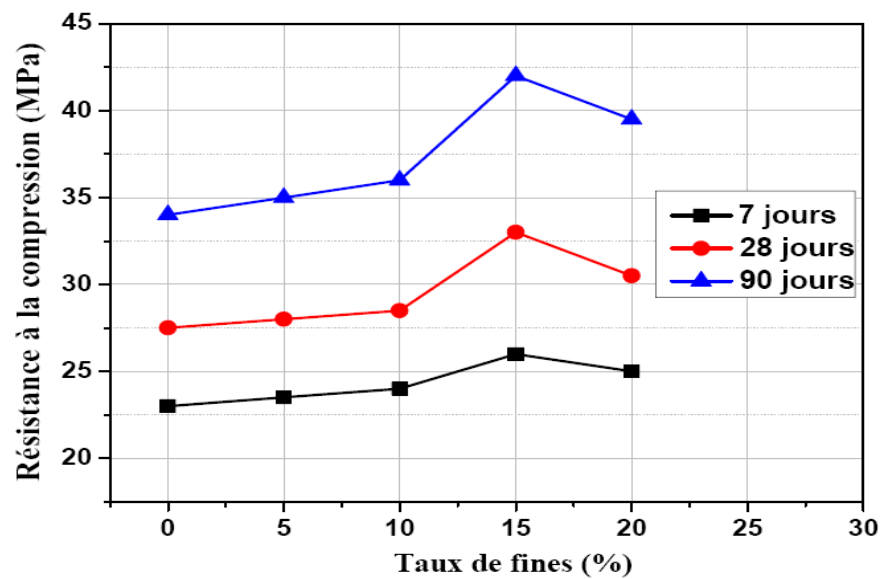


Figure 1.29: Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers (Sid ali benyoub) [25]

EREN et al [26], ont analysé l'effet de la poussière issu du broyage des granulats calcaires sur les propriétés du béton. Ils ont trouvé qu'avec 10% de poussière comme substitution au sable de concassage, une augmentation maximale de la résistance à la

compression de 39% en comparaison à celle du béton de référence. Cette augmentation est due à la faible quantité des gros granulats comparés à l'ensemble des granulats.

BOUKNI et al [27], ont effectué des essais sur la résistance à la compression des bétons avec et sans filler calcaire à différentes températures. Trois bétons ont été préparés : deux bétons autoplaçants (BAP1, BAP2) et un béton ordinaire vibré. Les compositions de ces bétons sont présentées dans le tableau 1.2. Avant le traitement thermique les éprouvettes confectionnés ont été conservées dans l'air à $T=20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=55\%\pm 5\%$. Après une durée de conservation de 28 jours et avant chauffage, le BAP2 présentait une résistance supérieure à celle de BAP1, en raison du dosage élevé en ciment et de la diminution du dosage en filler. Cependant, après chauffage, les résultats ont montré une baisse de la résistance à la compression pour les trois bétons étudiés, allant de 5 à 19% pour une température de 120°C , et d'environ 2 à 26% pour une température de 200°C . Les résultats ont montré également que le BAP2 est moins affecté par l'exposition à la température (une diminution entre 4.9 et 12.20 MPa, en comparaison à une perte de 19 et 26 MPa). La diminution du dosage en filler améliore la résistance à haute température.

Tableau 1.2 : Composition des bétons utilisés [27]

	Ciment (C)	Filler (FC)	Eau (E)	Superplastifiant (SP)	Gravier (G)	Sable (s)
BAP1	400	200	211	9,6	762	772
BAP2	500	100	221	10,8	762	772
BV	400	0	225	0	1102	625

DONZA et al [28], ont étudié la résistance à la compression des bétons confectionnés avec dosage en ciment de 450 et 485 kg/m^3 et différents sable de concassages (calcaire: L-450 et L-485, granite: G-450 et G485 et dolomite: D-485). Ils ont montré que pour les bétons de sable de concassage, quel que soit l'origine du sable ; la résistance a la compression augmente avec l'augmentation de l'âge (Figure 1.30/a). Cependant, le béton avec granite: (G-485), donne des résistances à la compression très élevées par rapport aux autres mélanges. En effet, ceci est dû au degré de l'hydratation élevé de mélanges à tous âges (Figure 1.30/b).

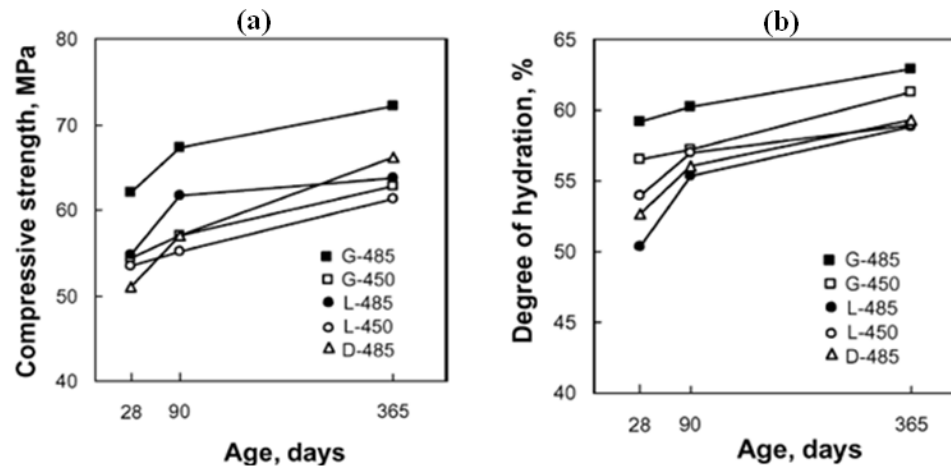


Figure 1.30: Evolution de la résistance à la compression et de degré d'hydratation du béton avec différents sables [28]

CELIK et al [29], ont réalisés des essais sur l'effet de poussière de concassage sur la résistance à la compression du béton à 7 et 28 jours d'âges. Les résultats ont montré que la résistance optimale est obtenue avec 10% de poussière de concassage dans le béton pour les deux âges. Au de-là de 10% de fines, la résistance à la compression diminue légèrement jusqu'à 15% de fines, puis elle se stabilise à un taux de 30% de fines.

1.5.2. Influence de la cure sur la résistance à la compression du béton à base de sable de concassage contenant des fines calcaires

Plusieurs travaux ont mis en évidence l'intérêt de la cure humide pour accroître la résistance mécanique des bétons. Une cure humide permet en effet une hydratation plus complète du béton d'enrobage, donc la fermeture de la porosité et par conséquent la diminution de la perméabilité. Cette sensibilité au mode de cure peut être amplifiée par l'augmentation de la proportion d'additions utilisées en substitution du ciment ou du sable.

KENAI et al [16], ont constatés que la durée de cure humide a un effet positif sur la résistance à la compression du béton à base de fines calcaires. Des échantillons de béton ont été conservés dans l'eau pendant 1, 3 ou 7 jours. Après, les éprouvettes sont conservés à l'air libre (toit du laboratoire) jusqu'aux échéanciers des essais. L'intérêt d'une cure humide prolongé est bien montré dans la figure 1.31.

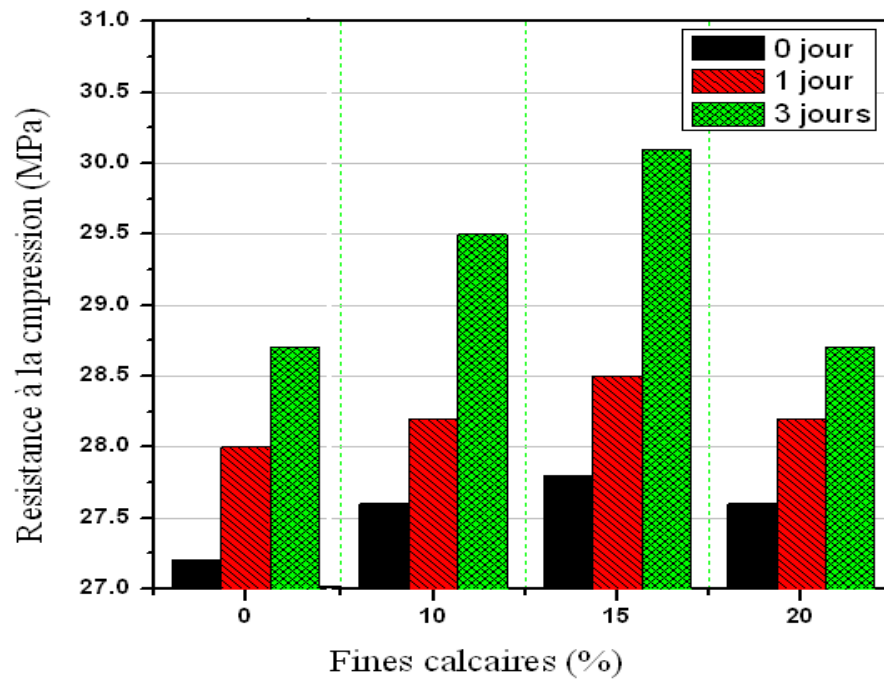


Figure 1.31: Effet de la cure humide sur l'évolution de la résistance à la compression [16]

HEIKAL et al [30], ont montré que la substitution des fines calcaires dans un ciment pouzzolanique réduit la résistance à la compression de la pâte de ciment durcie (Figure 1.32).

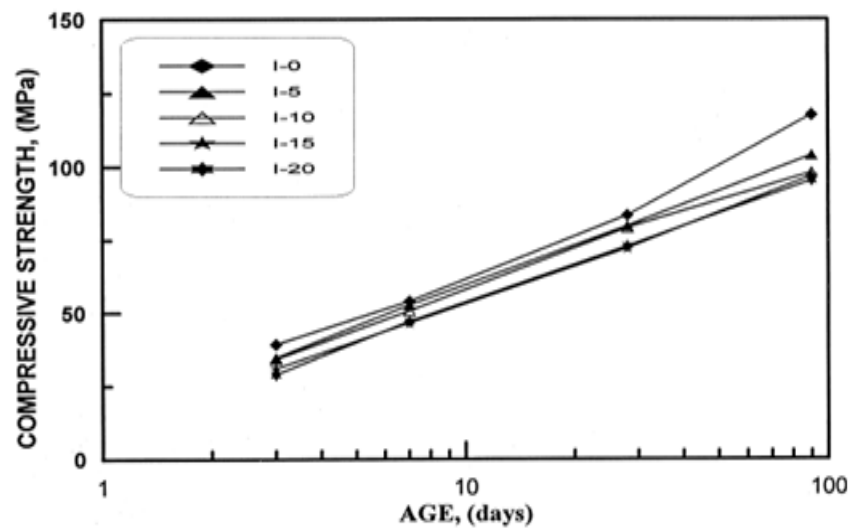


Figure 1.32: Résistance à la compression de la pâte de ciment à base d'ajout calcaire [30]

1.5.3. Résistance à la traction par flexion

MENADI [2], a montré que la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable de concassage augmente avec l'âge quelque soit le type de ciment utilisé. Cette augmentation est due à l'évolution de l'hydratation avec le temps. Pour les mortiers avec fines calcaires et ciment CEM I 32.5, ils ont observé un accroissement de la résistance par rapport au mortier de référence à l'âge de 2 jours. Le taux de cette augmentation est de l'ordre de 14, 18 et 39% pour 10, 15 et 20% de filler, respectivement. La résistance à la traction des mortiers avec 15% de fines présente une meilleure performance par rapport aux autres mortiers avec et sans fines à l'âge de 90 jours. Cependant, dans le cas des mortiers confectionnés avec le ciment CEM II 42.5, ils ont observé une chute de résistance à la traction à tous les âges pour tous les pourcentages de fines à l'exception du mortier de 5% de fines où un accroissement de 3% de la résistance par rapport aux mortiers de référence a été observé. A l'âge de 90 jours, ils ont trouvé une réduction de la résistance à la traction par flexion. En effet, cette diminution de la résistance à la traction par flexion est due à l'effet de dilution résultant de l'ajout des fines dans le sable (Figure 1.33).

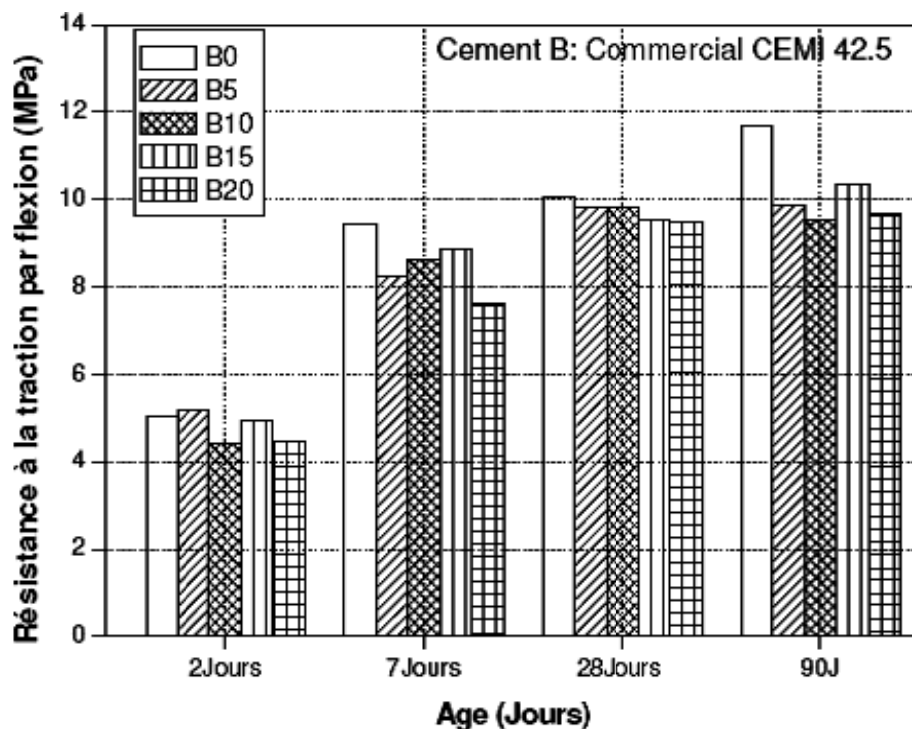


Figure 1.33: Développement de résistance à la traction par flexion à différentes âges [2]

Selon HEBBOUCHE [15], le développement de la résistance à la traction par flexion en fonction de substitution des fines dans le sable de concassage est similaire au développement de la résistance à la compression. Le tableau 1.3, montre que la résistance à la traction par flexion du béton de sable concassé présente un optimum au voisinage de 10% de fines.

Tableau 1.3: Effet de pourcentage des fines calcaires sur la résistance à la traction par flexion [15]

Type de sable	Composition (A f/s)	Résistance à la traction par flexion (MPa)		
		7 jours	28 jours	90 jours
El Hachimia	AI 0/100	1,97	2,33	2,77
	AI 10/90	2,09	2,42	2,97
	AI 15/85	1,91	2,29	2,81
	AI 20/80	1,86	2,18	2,73
S- Ali Ben youb	AII 0/100	2,05	2,34	2,67
	AII 10/90	2,18	2,52	2,78
	AII 15/85	2,11	2,43	2,63
	AII 20/80	1,97	2,29	2,57
Si - Mustapha	AIII 0/100	1,92	2,19	2,66
	AIII 10/90	2,06	2,27	2,71
	AIII 15/85	1,83	2,10	2,58
	AIII 20/80	1,71	1,98	2,51

La résistance à la traction des mortiers et bétons diminue avec l'augmentation de pourcentage de fines (Figure 1.34). Une chute remarquable de la résistance est observée pour les mortiers avec fines calcaires. Cependant, des résistances comparables sont notées pour les bétons à base fines par rapport au béton de référence [24].

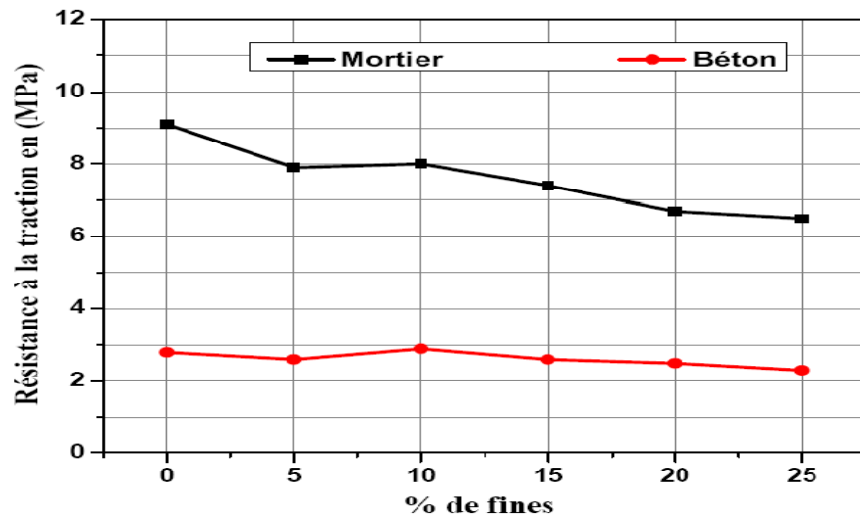


Figure 1.34: Résistance à la traction des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines [24]

1.5.4. Module d'élasticité

Selon les travaux de HEBBOUCHE [15], le module d'élasticité du béton avec incorporation de fines calcaires présente une évolution similaire à la résistance mécanique. Ils ont constaté que le module d'élasticité augmente avec l'ajout de fines calcaires jusqu'à environ 15% de fines. Une légère chute du module de Young est observée à des taux de fines élevés (Figure 1.35).

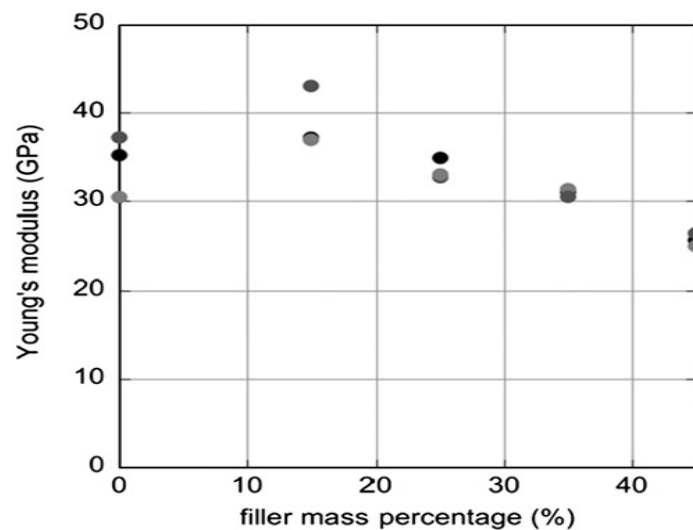


Figure 1.35: Evolution de modules de Young en fonction de pourcentage de filler [19]

DONZA et al [28], 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. Le module d'élasticité augmente avec l'augmentation de l'âge (Figure 1.36). Cependant, à l'âge de 360 jours ces différences sont atténuées et les modules d'élasticité atteignent environ 40 GPa.

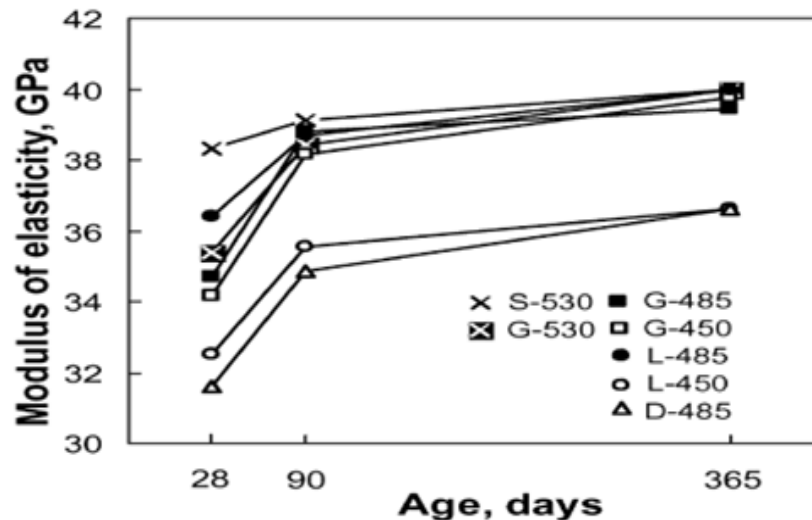


Figure 1.36: Module d'élasticité du béton à base de différents granulats en fonction de l'âge [28]

1.5.5. Retrait

La cause principale du retrait, de façon générale, est l'excès d'eau de gâchage. Cependant, d'autres facteurs interviennent sur le retrait, tels que le dosage élevé en ciment et la proportion très élevée de sable fin. Plusieurs études ont été faites sur la durabilité des bétons et mortiers à base de sable de concassage, particulièrement, l'effet des ajouts calcaires sur le retrait du béton et mortier.

KHATIB et al [1], ont trouvé que l'augmentation des fines calcaires dans le sable provoque un retrait élevé en raison de la formation des carboaluminates.

D'après MENADI [2], les mortiers contenant 15% de fines calcaires comme substitution au sable de concassage présente un retrait de séchage plus élevé à tous les âges et avec les quartes types de ciment utilisé. L'accroissement du retrait de séchage est de

l'ordre de 8 à 23% à l'âge de 180 jours. L'augmentation du retrait des mortiers contenant des fines calcaires a été attribuée à la formation des carboaluminates lors de l'hydratation des particules de calcaire CaCO_3 avec le C_3A en présence de l'eau.

Selon HEBBOUCHE [15], les retraits des bétons avec ajouts de fines ont des valeurs comparables à celle du béton sans fines à court terme. Ils ont constaté qu'il y a une diminution du retrait de l'ordre de 6, 5% et 4% selon les types de sable utilisée à un taux de fines atteignant 15% en comparaison au béton sans fines. Au de-là et jusqu'à 20%, ils ont observé une légère augmentation du retrait (Figure 1.37). En effet, cette augmentation du retrait à un pourcentage élevé de fines peut être liée, d'une part à la grande demande en eau et d'autre part à la présence du CaCO_3 qui provoque l'augmentation du gel C-S-H à jeune âge.

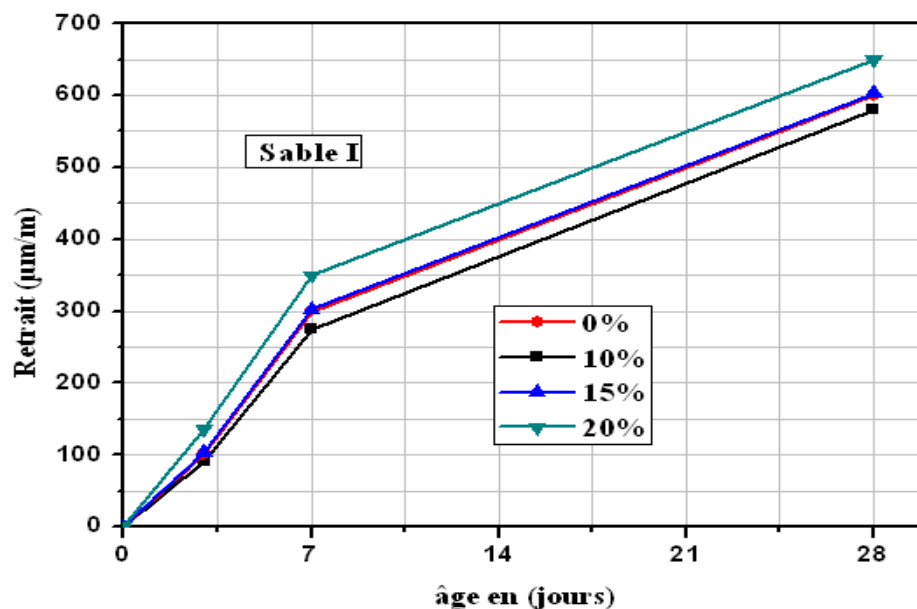


Figure 1.37: Développement du retrait du béton à base de sable de concassage avec différents âges [15]

KENAI et al [16], ont étudié l'effet des fines calcaires sur le retrait du béton à base de sable de concassage à jeunes âges (3, 7 et 28 jours) et ont montré que le retrait du béton contenant des fines calcaires est comparable à celui du béton de référence. Pour des bétons à 15% de fines, le retrait diminue de 4 à 6% en comparaison au béton sans fines calcaires. Cependant, à 20% de fines, une légère augmentation de retrait est observée en raison de l'augmentation du dosage en eau.

Selon BONAVENTI et al [18], l'augmentation des fines calcaires dans le sable de concassage demande une quantité élevée de l'eau, ceci était probablement la cause principale du retrait. Ils ont montré que les mortiers avec des pourcentages de fines plus de 10% présentent des retraits élevés par rapport au mortier de référence.

BENACHOUR et al [19], ont étudié le retrait de séchage en fonction de l'humidité relative et de pourcentage de masse de filler à 250 jours (Figure 1.38). Ils ont observé qu'à une humidité relative de 97.6%, les mortiers avec 35% de masse de filler présentent un retrait équivalent à celui du mortier de référence. Les mortiers avec 45% de filler et à une humidité relative de 23%, présente un retrait de séchage plus élevé de 11,6% par rapport au mortier de référence.

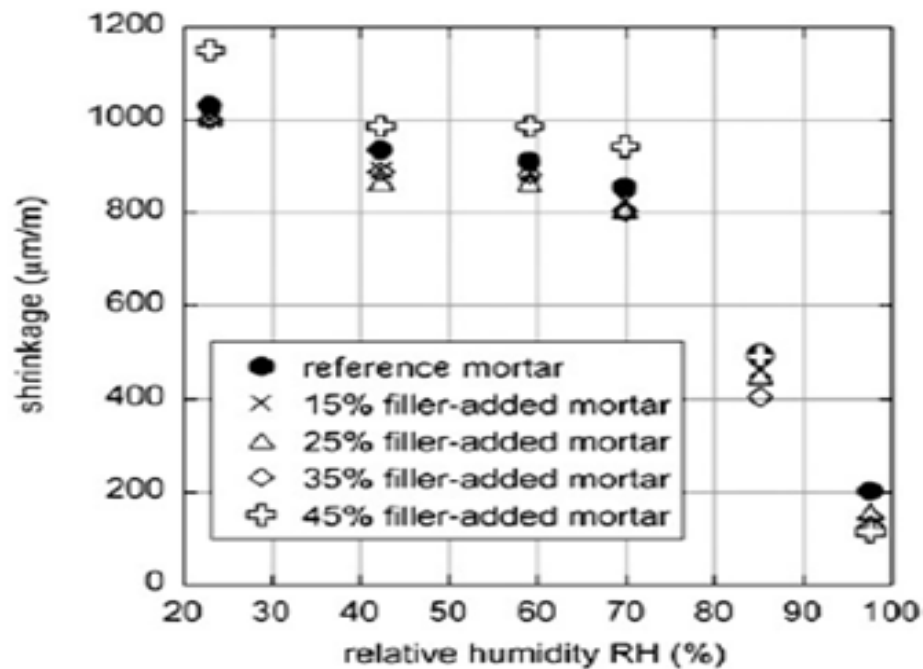


Figure 1.38: Retrait de séchage et la perte de masse en fonction de l'humidité relative [19]

D'autres chercheurs ont confirmés aussi que le retrait croit en fonction de l'augmentation de taux de fines (Figure 1.39) [24].

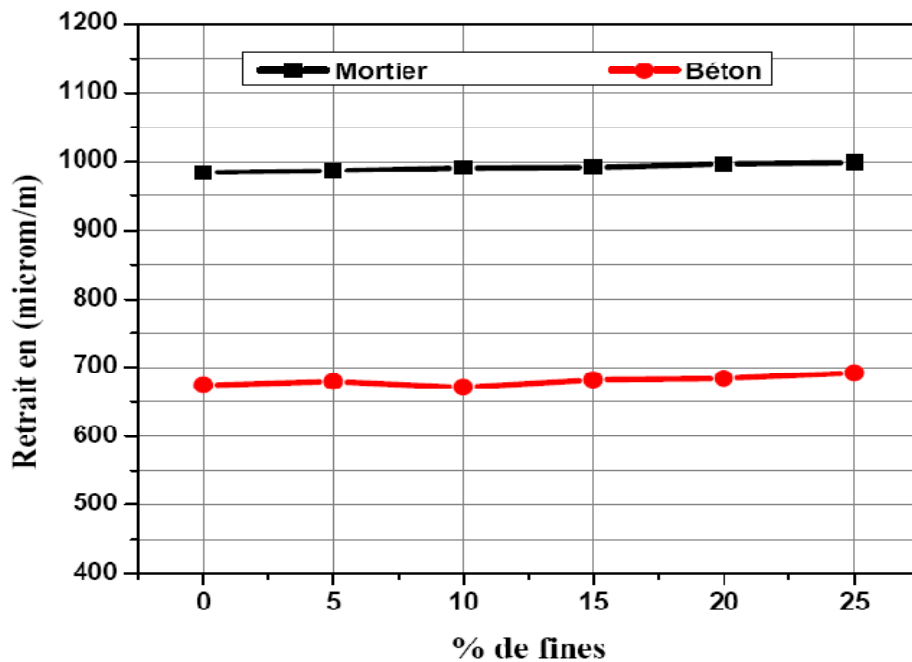


Figure 1.39: Retrait des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines [24]

1.6. Influence de fines calcaires substitués au sable de concassage sur les propriétés de durabilité du béton

La durabilité d'un matériau cimentaire dépend largement de sa résistance à l'intrusion d'espèces potentiellement agressives. La perméabilité est un paramètre pouvant influencer indirectement la durabilité des structures en béton et responsable de la vitesse de pénétration d'agents agressifs. La perméabilité du béton dépend de ses constituants (type, quantité) et des paramètres suivants :

- du rapport E/C, directement lié à la porosité capillaire. Toutefois, on ne connaît pas exactement l'influence des additifs dans la pâte de ciment (Fumée de silice, laitier, cendres volantes ou calcaires) sur la perméabilité.
- de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent respectivement créer l'auréole de transition et modifier la tortuosité.

La résistance en compression, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité au gaz et les coefficients de diffusion, constituent des indicateurs performants, car ils caractérisent le matériau autrement que par sa composition.

1.6.1. Perméabilité à l'eau

MENADI [2], a étudié la perméabilité à l'eau du béton à base de sable de concassage. Ils ont conclut que l'incorporation des fines calcaires jusqu'à 15% comme substitution au sable de concassage peut améliorer la structure des pores dans la zone de transition et par conséquent réduire la perméabilité à l'eau. Ils ont montré aussi qu'avec la présence de 15% de fines calcaires, il y a une réduction de la profondeur de pénétration de l'eau comme l'illustre la figure 1.40.

Selon Topçu et al [7], la perméabilité à l'eau du béton à base de sable de concassage (0/2) dépend du dosage en ciment. La figure 1.41 montre que lorsque le dosage en ciment augmente, la perméabilité du béton diminue. Cette diminution est maximale pour un pourcentage de filler varie de 7 à 10%.

SKENDER [17] a trouvé que pour le béton avec 15 % de fines, la profondeur de pénétration de l'eau du béton avec ciment Portland composé est plus élevée que celui du béton avec ciment Portland sans ajout (Figure 1.42). Les valeurs de pénétration de l'eau pour des bétons à 15% de fines mesurés sont 62 mm pour le ciment A (CEM42.5 de M'sila), 61 mm pour ciment B (CEM II/42.5 de Chlef) et 48 mm pour le béton avec le ciment CPA.

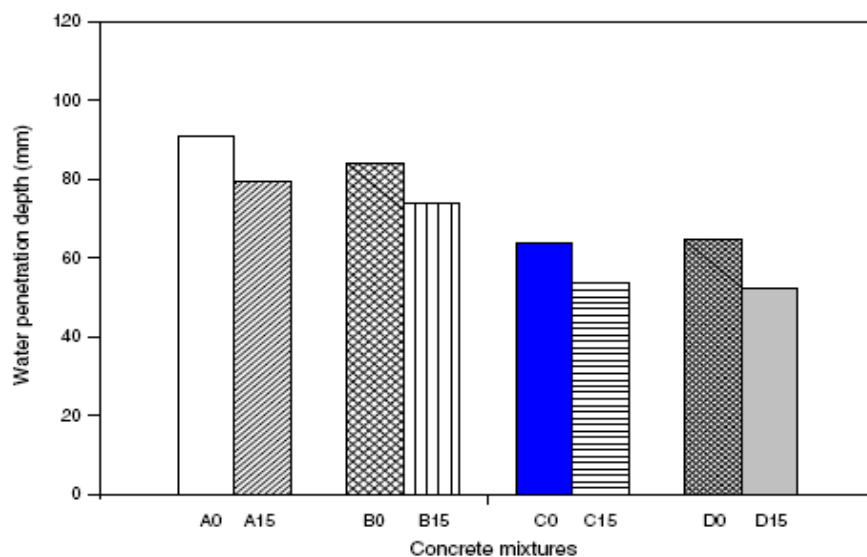


Figure 1.40: Profondeur de pénétration en fonction des différents mélanges des bétons étudiés à 90 jours [2]

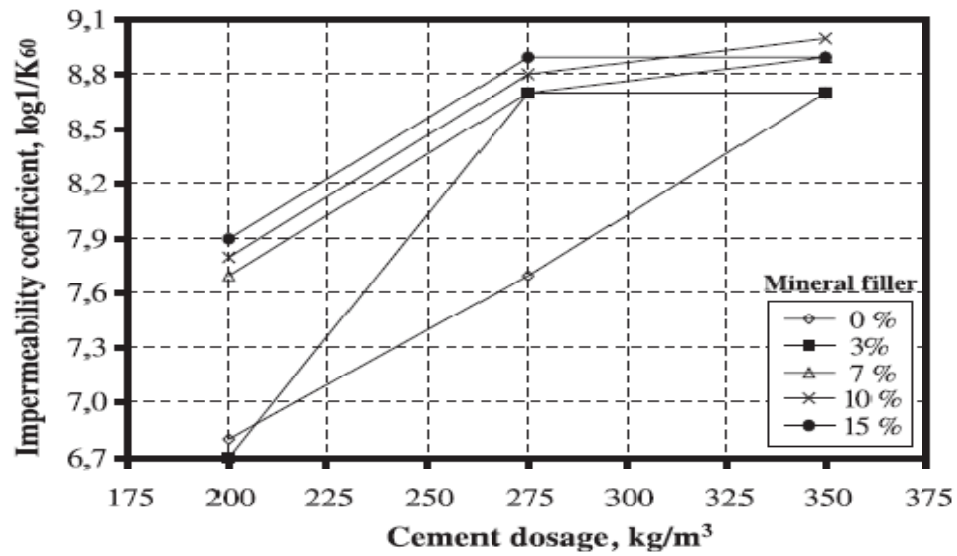


Figure 1.41: Coefficient de l'imperméabilité en fonction de dosage en ciment du béton avec différentes pourcentage en filler [7]

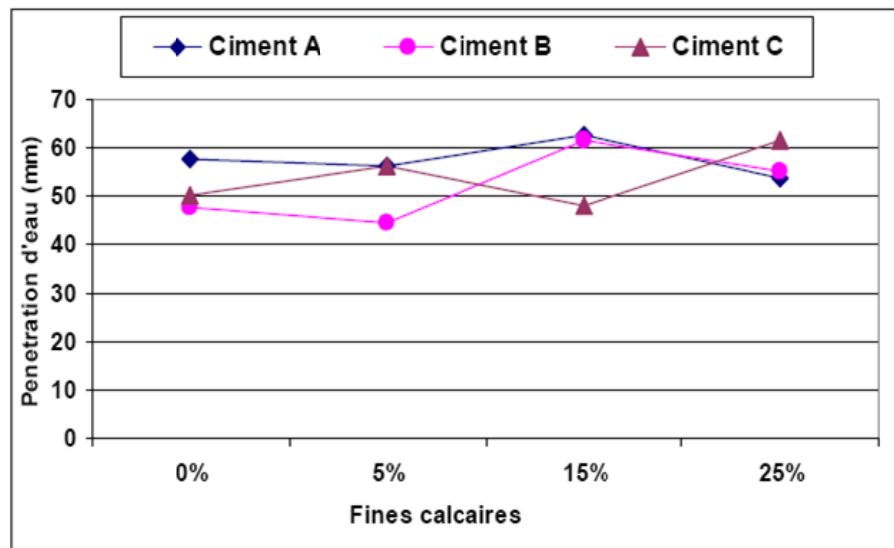


Figure 1.42: Effet des fines calcaires issues de sable de concassage sur la pénétration de l'eau du béton avec différentes ciments utilisés [17]

CELIK et al [29], ont rapporté que le coefficient de perméabilité à l'eau du béton diminue avec l'accroissement du taux de poussières de concassage dans le béton (Figure 1.43). La valeur maximale de coefficient de perméabilité obtenue était de 6.59×10^{-10} cm/sec pour 0% de fines. Par ailleurs, la valeur la plus faible était de 1.93×10^{-10} cm/sec pour 30% de fines. L'incorporation des poussières de concassage dans le béton améliore la

perméabilité à l'eau. En effet, cette amélioration est due à la diminution des pores capillaires dans la matrice cimentaire.

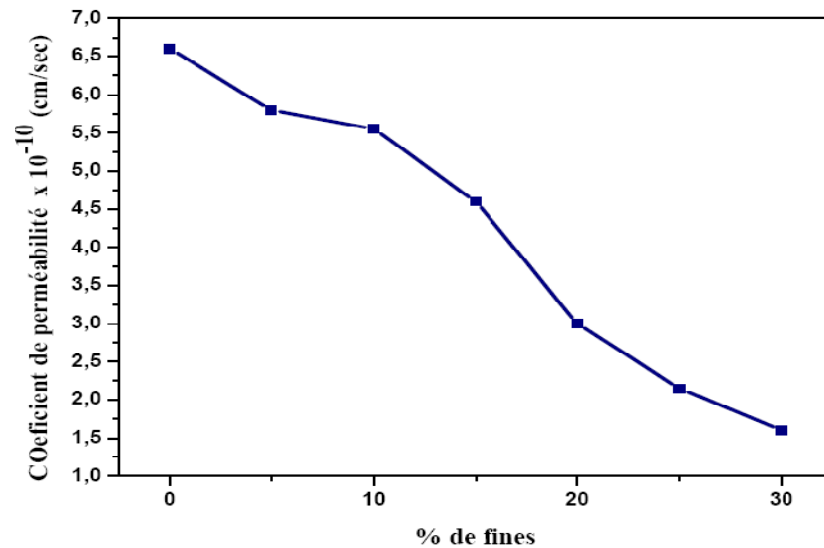


Figure 1.43: Coefficient de perméabilité à l'eau du béton avec différents pourcentages de poussière de concassage à l'âge de 28 jours [29]

1.6.2. Perméabilité aux ions chlores

KENAI et al [3], ont montré que les mélanges des bétons avec et sans fines calcaires substitués au sable de concassage présentent des charges électriques totales élevées et par conséquent une faible résistance vis-à-vis de la pénétration des ions chlores (Figure 1.44). Les valeurs des charges totales trouvées étaient de 7966, 7320, 7890, 8211.5 et 9500 coulombs pour 0, 5, 10, 15 et 20% de fines calcaires, respectivement.

MENADI et al [4], ont étudié la perméabilité aux ions chlores des bétons à base de sable de concassage avec 0 et 15% de fines calcaires. Ils ont utilisé quatre types de ciment. La charge électrique totale (Q) à 28 jours et 90 jours de cure qui passe en 6 heures est utilisé comme mesure de la perméabilité aux ions de chlores. La perméabilité aux ions chlore observée a été plus élevée pour tous les bétons confectionnés avec différents type de ciment (Figure 1.45). A 90 jours de cure, la pénétration des ions chlores des bétons avec 15% des fines calcaires a été plus importante que celle du béton sans fines calcaires.

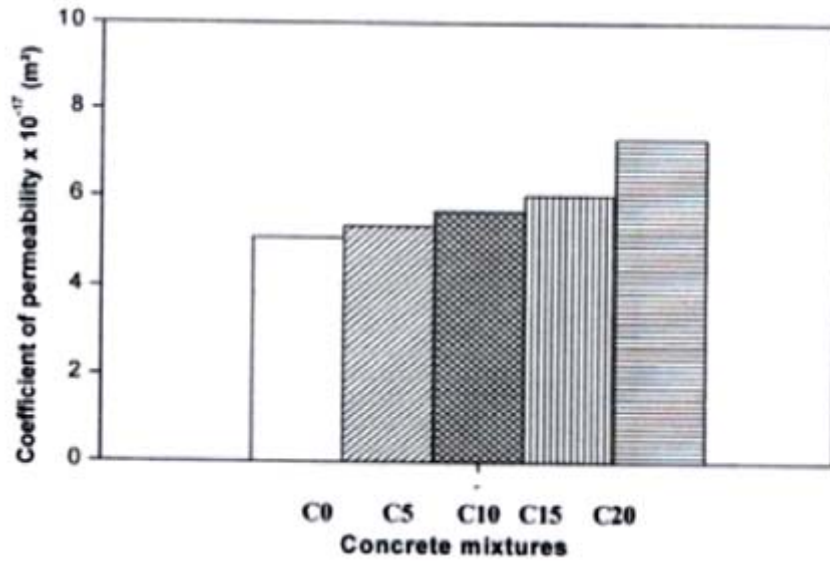


Figure 1.44: Coefficient de perméabilité avec différents mélanges du béton contenant différents pourcentages de fine à 90 jours [3]

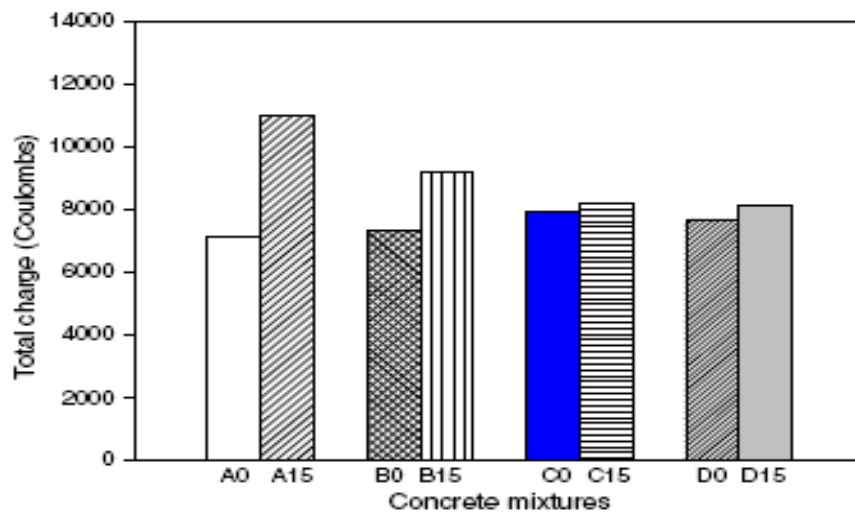


Figure 1.45: Charges totale des bétons étudiés à 90 jours [4]

LI BEIXING et al [6], ont trouvé que la perméabilité aux ions chlore augmente avec l'accroissement du pourcentage de fines dans le sable de concassage pour les bétons de faible résistance (séries L) (Figure 1.46 (a)). Cette augmentation a été expliquée par le faible dosage en ciment et le rapport E/C élevé. Le béton de faible résistance présente des grands pores formés après durcissement qui induit la diminution de perméabilité des ions chlorures. Pour le béton de haute résistance (séries H), l'incorporation des fines calcaires dans le sable de concassage a présenté une influence négligeable sur la résistance à la

pénétration des ions chlorures. Le béton de haute résistance présente un dosage en ciment plus élevé et un rapport E/C plus bas ($E/C = 0,32$). Ceci limite la communication des pores capillaires, et les fines calcaires ne peuvent pas évidemment influencer la structure dense du béton durci ou modifier sa résistance à la pénétration des ions chlorures.

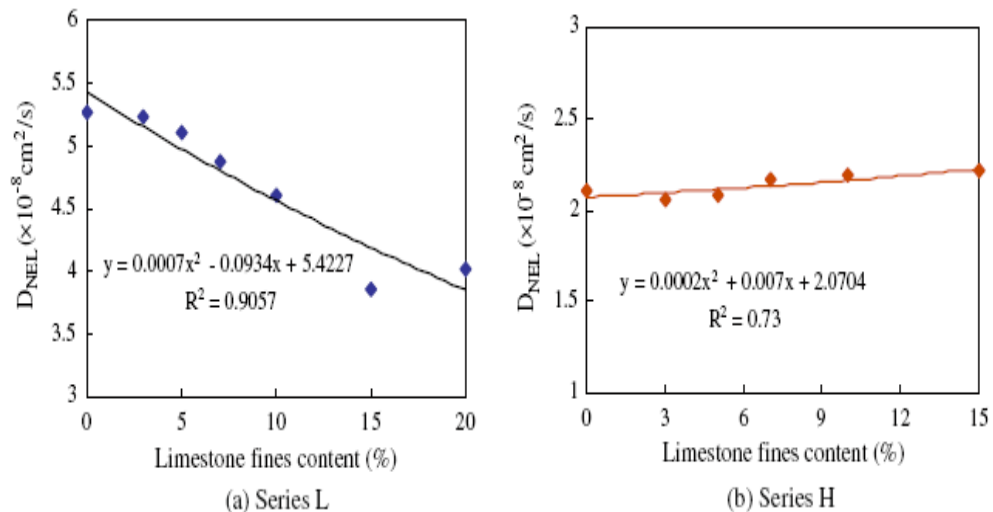


Figure 1.46: Influence de fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlorures du béton de sable de concassage de faible (a) et haute (b) résistance à 28 jours [6]

SKENDER [17] a montré que la perméabilité aux ions chlorures des bétons à base de sable de concassage augmente avec l'augmentation de fines calcaires pour les différents ciments utilisés.

GHRICI et al [31], ont réalisé des essais de perméabilité aux ions chlorures à 28 et 90 jours sur des bétons contenant de fumée de silice, pouzzolane naturel et le calcaire. La figure 1.47 illustre les résultats mesurés de la charge électrique en coulomb passant dans les spécimens. Les résultats montrent que la diminution du rapport E/C de 0.6 à 0.4 ont largement réduit la perméabilité aux ions chlorures du béton, quelque soit le type de filler utilisé.

Selon PIERARD et al [32], la présence de fillers calcaires au sein des mortiers favorise le phénomène de diffusion des chlorures. Le mortier de référence possédant la plus petite quantité de pâte et, sachant que la diffusion des chlorures se fait plutôt par la pâte du mortier que par les grains de sable. Ceci semble expliquer pourquoi la diffusion des chlorures est plus importante pour les mortiers contenant des fillers calcaires. La diffusion

des chlorures semble augmenter avec le facteur k (Figure 1.48). Ceci est certainement dû au fait que, lorsque ce dernier augmente, le rapport eau/ciment augmente également et par conséquent, la porosité induite a un impact direct sur la résistance à la diffusion.

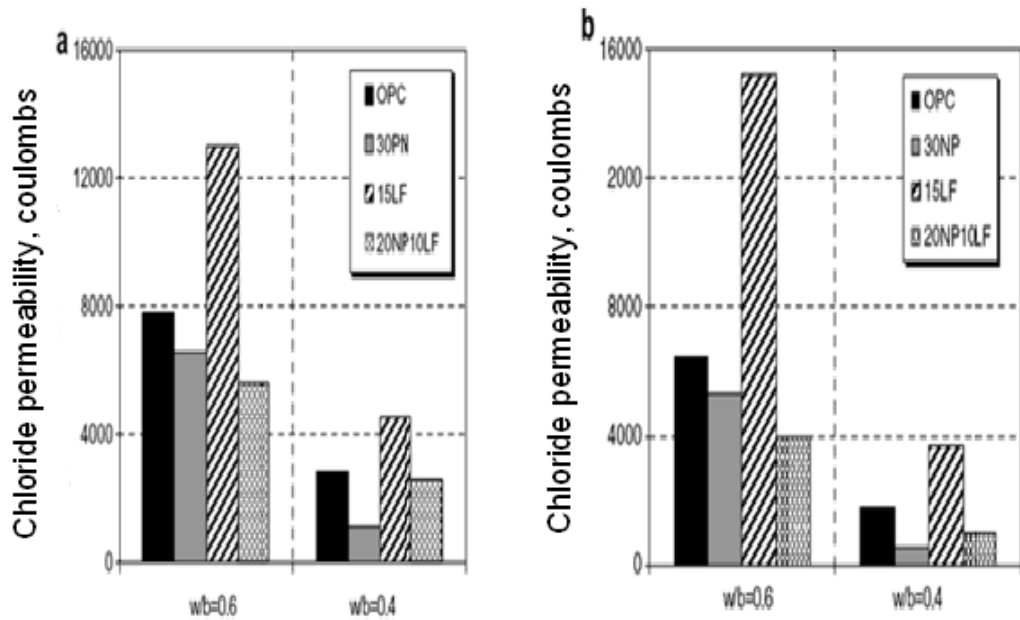


Figure 1.47: Perméabilité aux ions chlorés des bétons contenant de fumée de silice, pouzzolane naturelle et du calcaire [31]

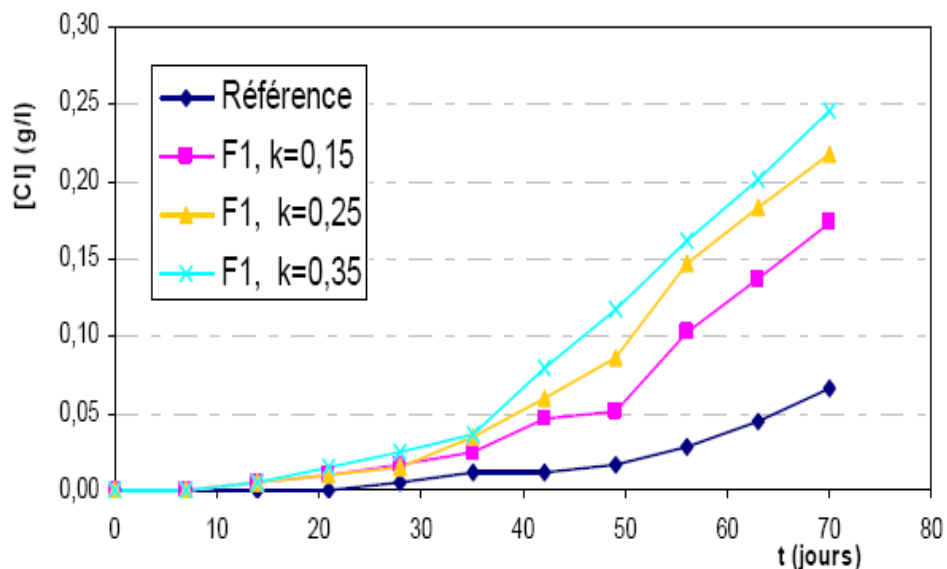


Figure 1.48: Influence du type de ciment, de la présence ou non du filler F1 et de la valeur du facteur k sur la quantité de chlorure traversant, au cours du temps une éprouvette de mortier par diffusion stationnaire [32]

1.6.3. Perméabilité au gaz

KENAI et al [3], ont montré que la présence de fines calcaires dans le béton augmente le coefficient de la perméabilité au gaz du béton. L'augmentation de la perméabilité au gaz mesurée était de 5, 10, 16 et 30% pour 5, 10, 15 et 20% de fines calcaires, respectivement.

MENADI et al [4], ont également confirmé que la présence des fines calcaires augmente la perméabilité au gaz du béton (Figure 1.49).

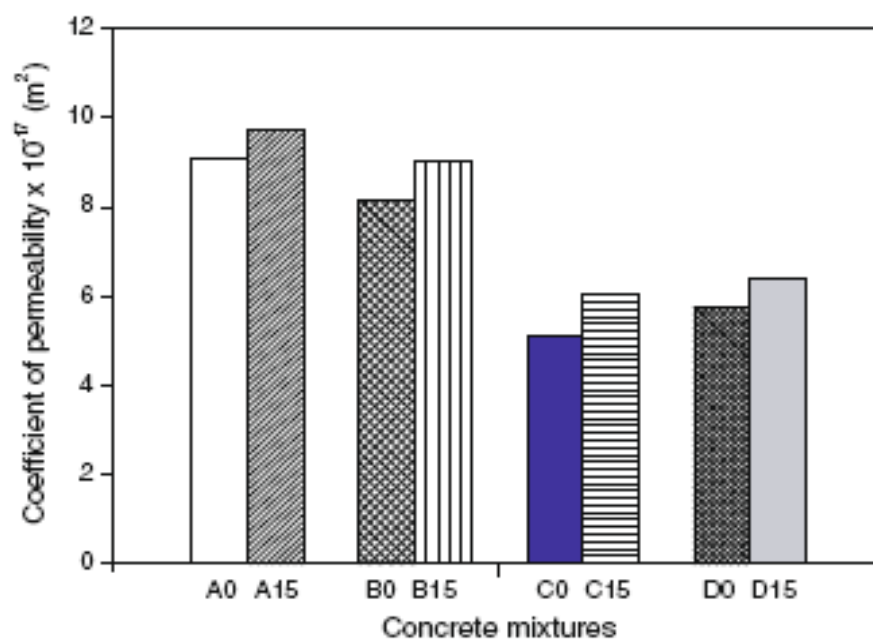


Figure 1.49: Valeurs du coefficient de la perméabilité au gaz des bétons étudiés à 90 jours [4]

SKENDER [17] a montré que le béton contenant 5 à 15% de fines calcaires donne des valeurs plus élevées du coefficient de perméabilité aux gaz par rapport au béton de référence pour les deux ciments (A) et (B) utilisés. Par ailleurs, pour le béton avec le ciment (C), le coefficient de perméabilité aux gaz est plus faible pour 15% de fines calcaires (Figure 1.50). En effet, cette diminution est due probablement à la faible valeur de C_3A (3%) contenue dans le ciment (C) par rapport aux ciments (A) et (B).

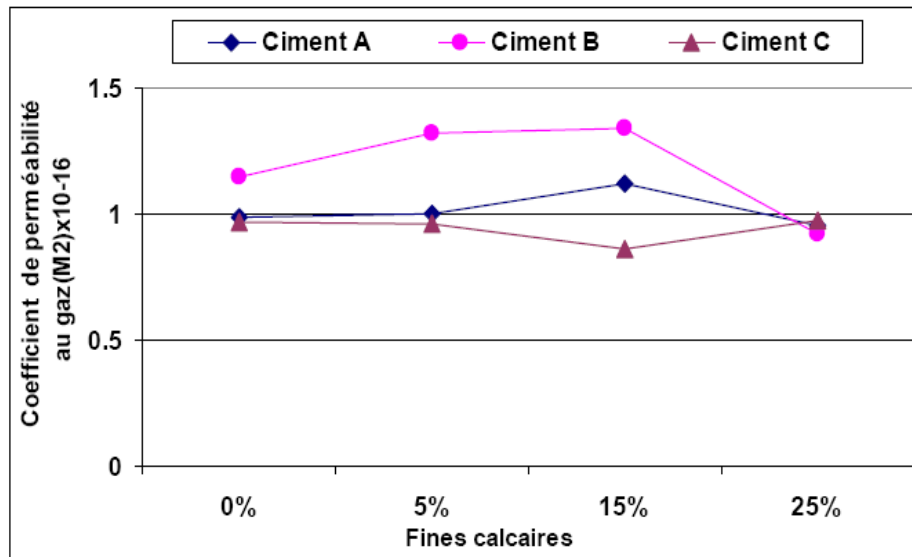


Figure 1.50: Effet des fines calcaires sur la perméabilité aux gaz du béton avec et sans fines calcaires pour différents ciments utilisés [17]

1.6.4. Sorptivité et absorption capillaire d'eau par immersion

Les travaux de KENAI et al [3], montre que l'absorption d'eau par capillarité augmente avec le temps pour les mélanges du béton contenant de fines calcaires. Pour des bétons de 15 et 25% de fines calcaires l'absorption d'eau augmente de 6 à 9% en comparaison avec le béton sans fines calcaires. En effet, cette augmentation est attribuée à une faible porosité du béton.

MENADI et al [4], ont montré que la présence de 15% de fines calcaires substitués au sable de concassage a un effet négligeable sur l'absorption d'eau par capillarité (Figure 1.51). Les mélanges des bétons confectionnés avec le ciment A avec et sans fines présentent des valeurs plus élevées de l'absorption capillaire d'eau par rapport aux autres mélanges.

HEBBOUCHE [15] a analysé l'effet des fines calcaires dans le sable de concassage sur l'absorption capillaire à l'eau. Le ciment utilisé est un ciment Portland de classe CPA 42.5. A l'âge de 28 jours, ils ont observé que la capillarité augmente avec le temps en comparaison avec le béton de référence. Ils ont constaté que la présence de 10% de fines donne le coefficient de capillarité le plus faible. L'ordre de grandeur déterminée est d'environ 4.10, 4.20 et 4.30% pour le béton avec les différents sables utilisés. Cette

variation de comportement de la capillarité vis-à-vis de la teneur en fines peut s'expliquer par le fait que la présence des fines en quantité modérée permet une bonne organisation de la structure du béton.

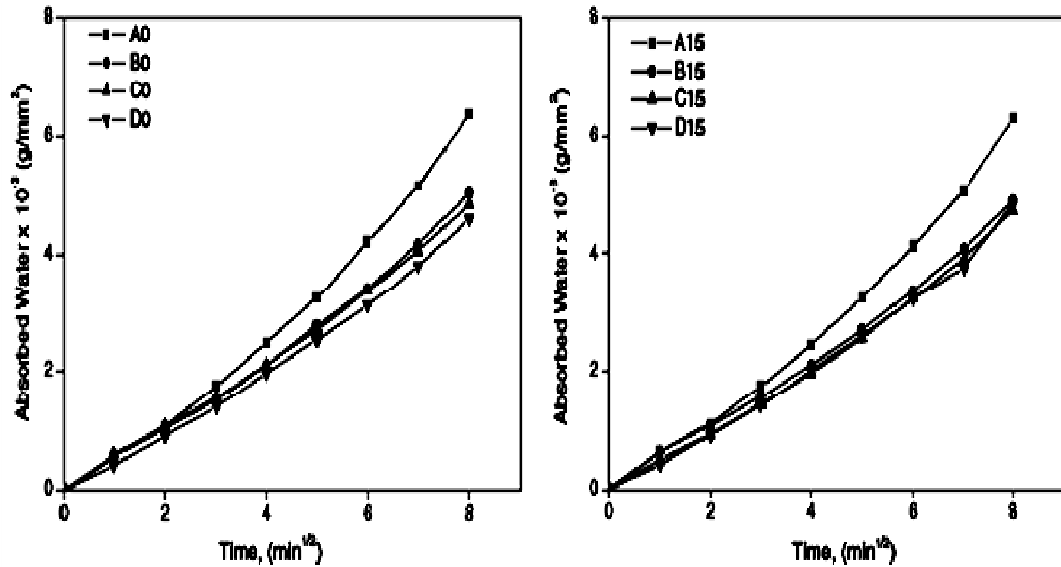


Figure 1.51: Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons à base de fines calcaires substitués au sable de concassage à 90 jours [4]

SKENDER [17] a conclu que l'incorporation de fines calcaires dans le sable de concassage a un effet négligeable sur la sorptivité du béton avec les différents ciments utilisés. Les valeurs de la sorptivité obtenues de tous les bétons confectionnés avec et sans fines calcaires varient de $3.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{1/2}$ à $3.9 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{1/2}$. Une faible réduction de la sorptivité pour les bétons contenant 5% de fines calcaires a été observée.

BENACHOUR et al [19], ont trouvé que l'absorption capillaire des mortiers augmente avec l'augmentation des fines calcaires en fonction du temps. Pour les mortiers avec 0, 15 et 25% de filler en masse de sable, le coefficient d'absorption capillaire varie de 0.52 à 0.65 g/cm^2 après 7 jours d'immersion. L'accroissement de l'addition de filler à 35% et 45% augmente le coefficient d'absorption capillaire de 0.84 à 1.27 g/cm^2 , respectivement, après 7 jours d'immersion. L'absorption capillaire augmente avec l'accroissement du filler calcaire, les valeurs de l'absorption capillaire pour 45% de filler est deux fois plus grande par rapport à 25% de filler comme l'illustre la figure 1.52.

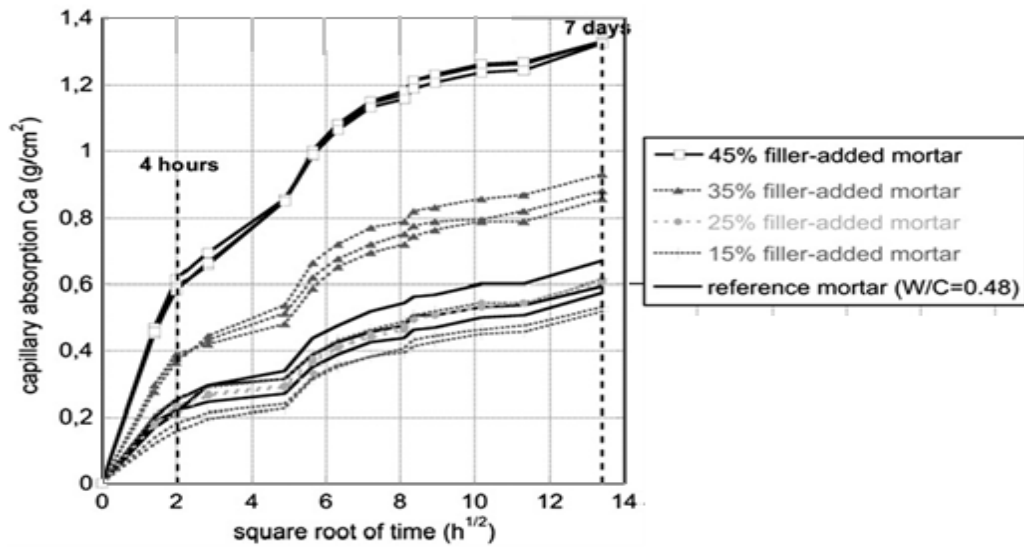


Figure 1.52: Coefficient d'absorption capillaire [19]

BENNA [24] a constaté que le coefficient d'absorption capillaire augmente faiblement en fonction de l'accroissement de la teneur en fines comme l'indique la figure 1.53.

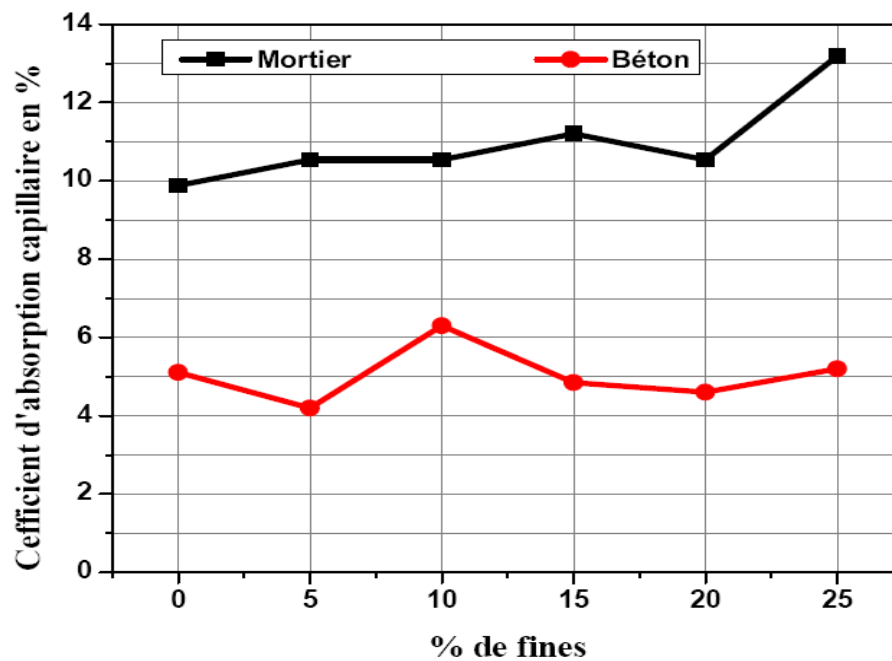


Figure 1.53: Coefficient d'absorption capillaire en fonction du pourcentage de fines [24]

CELIK et al [29], ont constaté que l'incorporation des faibles pourcentages de poussière de concassage dans le béton contribue à l'augmentation de l'absorption du béton. La figure 1.54 montre que l'absorption du béton diminué avec l'augmentation de poussière de concassage de 0 à 15%. Au de-là de 15% de fines de concassage, une augmentation du coefficient d'absorption est observé.

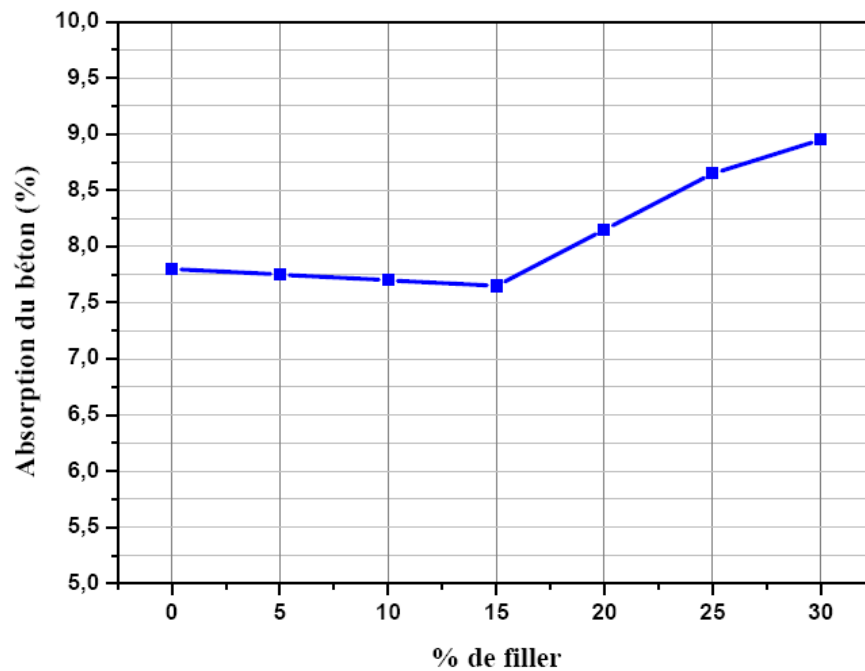


Figure 1.54: Absorption du béton 28 jours d'âges contenant différents pourcentages de poussières de concassage [29]

GHRICI et al [31], ont étudié l'influence du rapport E/C sur la sorptivité du béton contenant des différentes quantités d'additions à 28 et 90 jours d'âges (Figure 1.55). Ils ont constaté que la diminution du rapport E/C réduit la sorptivité du béton, à l'âge de 90 jours. Le coefficient de sorptivité du béton contenant 30% de pouzzolane naturel et de 10% de fumé de silice diminue de 32% et 58%, respectivement avec un rapport E/C de 0.6. Cette diminution a été expliquée par la formation secondaire du gel C-S-H de la réaction de pouzzolane.

HADJOUJJA et al [33], ont réalisé l'essai d'absorption d'eau du béton de sable de dune contenant des fines de brique. Ils ont utilisés des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$ cm³. Les résultats ont montré que l'absorption d'eau par capillarité diminuée en fonction de l'augmentation du dosage en filler. En effet, cette augmentation est liée à la nature du

filler de brique et précisément à sa finesse élevée, et aussi à la granulométrie du sable utilisé. La valeur optimale de l'absorption d'eau par capillarité est atteinte à un dosage maximal de filler de l'ordre de 1,51% (250 kg/m³). La figure 1.56 montre que le coefficient de capillarité diminué en fonction de l'augmentation du dosage en filler. Cette réduction semble être due à la diminution de porosité.

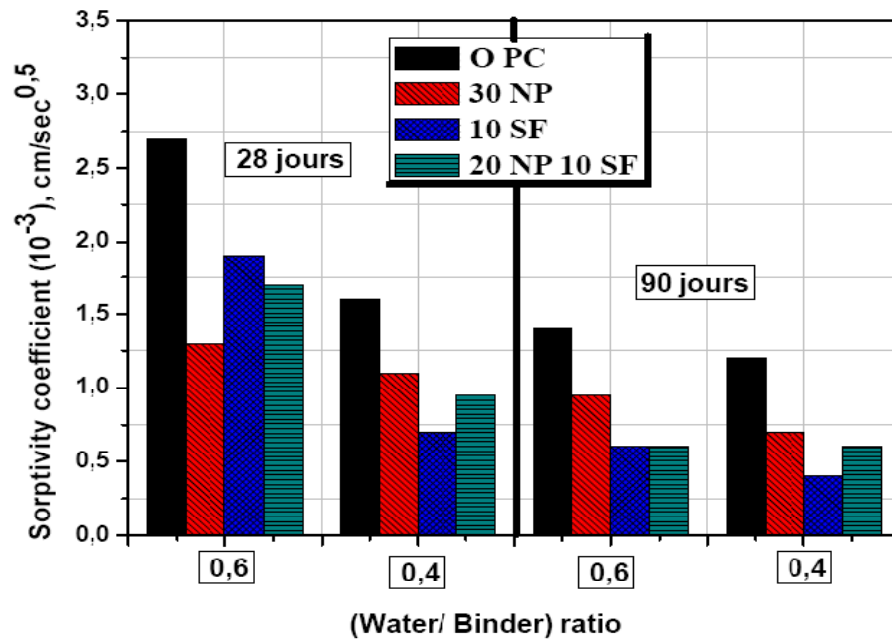


Figure 1.55: Coefficient de sorptivité du béton à 28 et 90 jours [31]

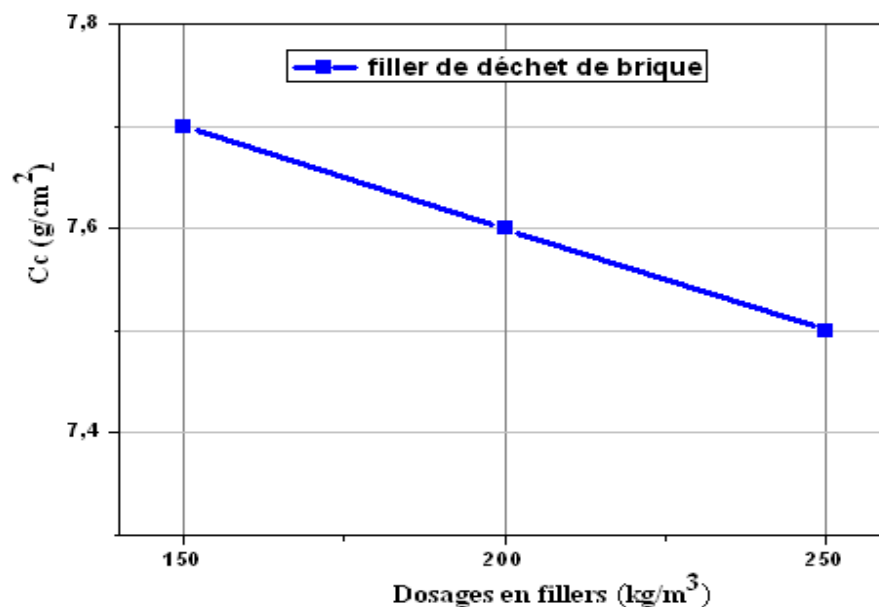


Figure 1.56: Evolution du coefficient de capillarité [33]

1.6.5. Resistance à l'attaque sulfatique

MENADI [2], a trouvé qu'après 360 jours d'immersion dans une solution de sulfate de magnésium (5% MgSO_4). Les éprouvettes de béton avec et sans fines calcaires ont subi des détériorations importantes. Cette dégradation a été expliquée par la détérioration du lien de l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) dans la matrice cimentaire.

LI BEIXING et al [6], ont montré qu'après 10 mois d'immersion dans une solution sulfatique les deux résistances, à la compression et flexion diminuent avec l'incorporation des fines calcaires.

TOSUN et al [34], ont étudié la résistance aux sulfates des mortiers à base de ciment au calcaire. La concentration des sulfates été de 200 g/l. Ils ont utilisés deux types de clinker avec différents rapport de $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$. Les mélanges des ciments ont été préparés avec 5, 10, 20 et 40% comme substitution au clinker I et III. Ils ont utilisés des éprouvettes cubiques de dimensions $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ pour la confection des mortiers. Après une cure initiale de deux mois, les spécimens confectionnés ont été soumises à quatre solutions différentes (A : l'eau distillé à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, B et N: Na_2SO_4 à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et $5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ respectivement et M : MgSO_4 à $5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$). Les résultats ont montré que l'augmentation de l'ajout calcaire affecte négativement les mortiers à base du clinker I et III pour les différentes solutions utilisées (Figure 1.57). L'effet négatif de l'ajout calcaire est associé au changement de la microstructure de l'ajout.

HADJ SADOK [35] a constaté une perte de résistance à la compression à tous les âges pour les éprouvettes des mortiers avec 0, 15 et 20% d'ajout calcaire immergées dans la solution de sulfate de sodium (5% Na_2SO_4). Cependant, pour les ciments avec 5 et 10% d'ajout, ils ont enregistré une légère augmentation jusqu'à deux mois de conservation et une diminution de la résistance à la compression aux âges ultérieures. Néanmoins, après 180 jours d'immersion, les mortiers avec 5 et 10% d'ajout calcaire présentent une perte de résistance de 11 et 4%. Cette diminution est moins importante que celle constatée pour les mortiers avec 0, 15 et 20% d'ajout calcaire, qui est de 29, 20 et 22%, respectivement. Cependant, les éprouvettes conservées dans la solution de sulfate de magnésium, tous les mortiers ont subi une perte de la résistance à la compression. Ils ont prouvé que la perte de résistance à la compression des éprouvettes conservées dans 5% MgSO_4 est plus importante que celle des éprouvettes immergées dans la solution de 5% Na_2SO_4 (Figures 1.58 et 1.59).

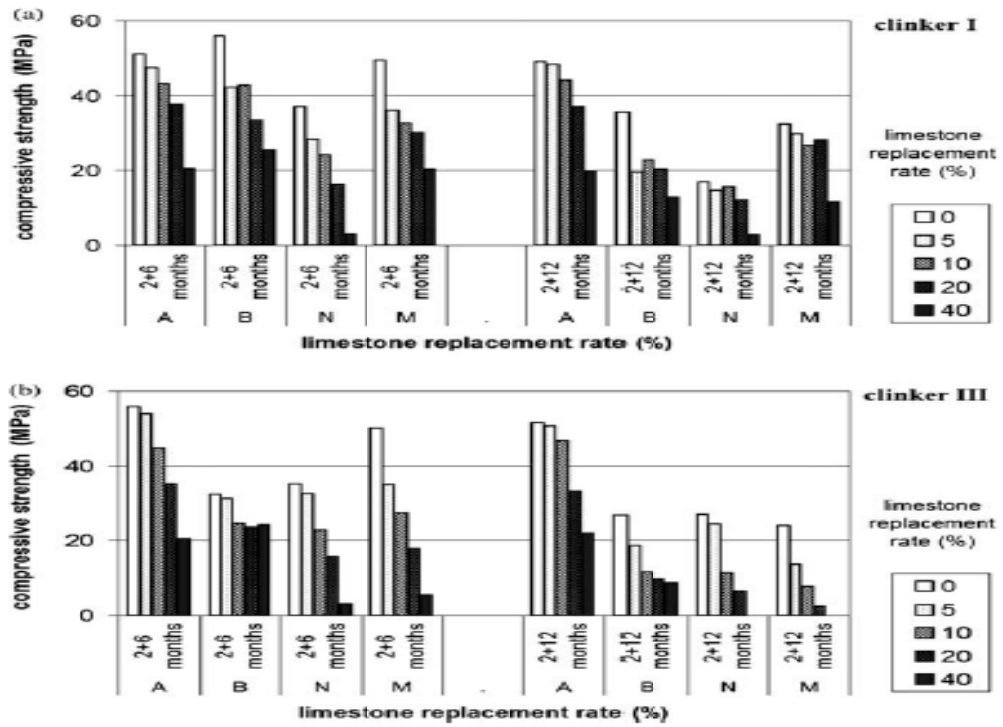


Figure 1.57: La résistance à la compression des mortiers à base de ciment au calcaire soumise à des différentes solutions (A : l'eau distillé à $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, B et N: Na_2SO_4 à $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$, respectivement et M : MgSO_4 à $5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$) [34]

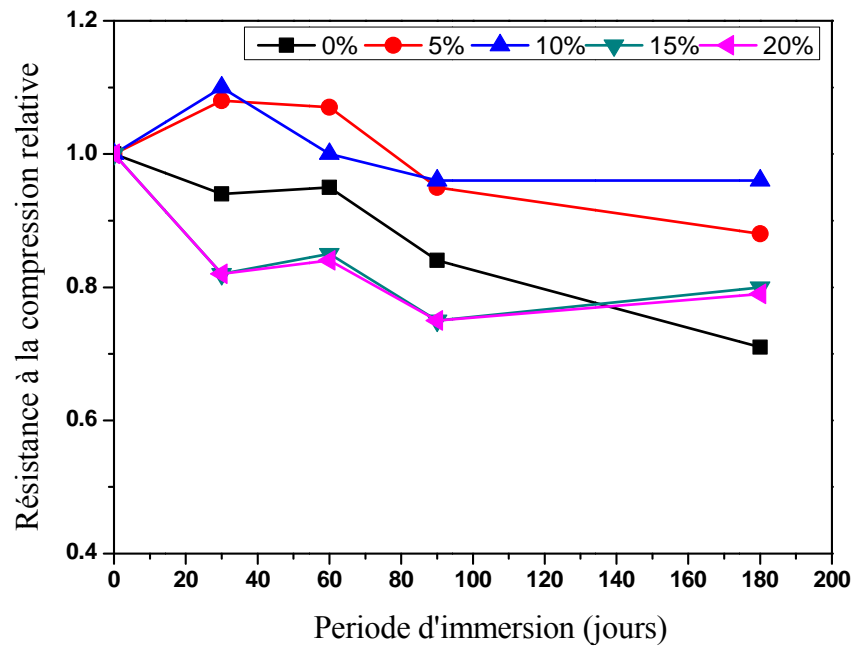


Figure 1.58: Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de sodium ($5\% \text{Na}_2\text{SO}_4$) [35]

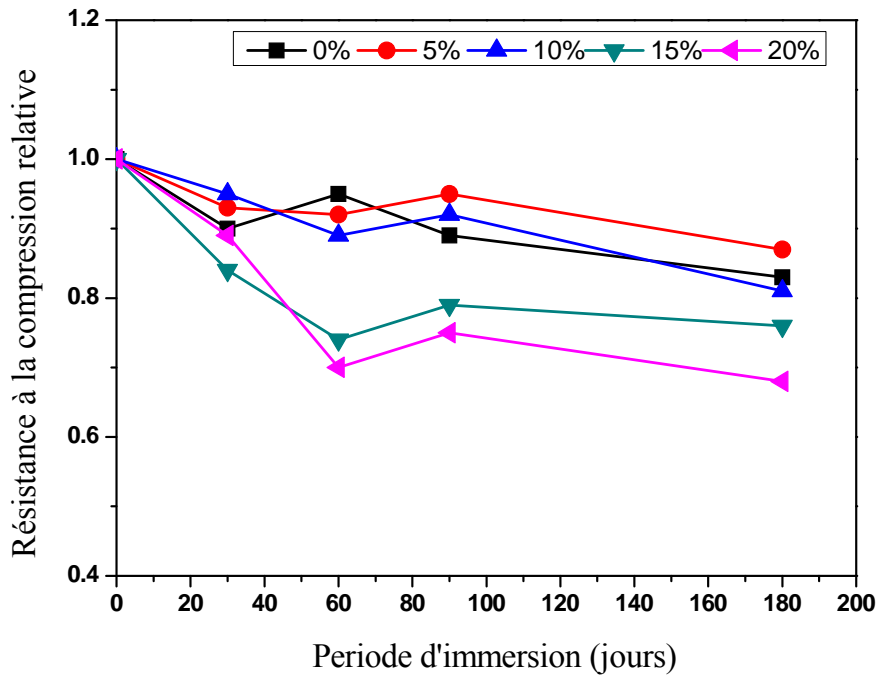


Figure 1.59: Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de magnésium (5% $MgSO_4$) [35]

KAKALI et al [36], ont trouvé qu'après exposition de 9 mois dans une solution sulfatique de magnésium ($MgSO_4$) à $5^\circ C$, les échantillons des mortiers ont présenté une perte importante de résistance de 18% pour les mortiers contenant 15% de fines calcaires et de 34% pour les mortiers contenant 30% de calcaire.

1.6.6. Expansion

TOSUN et al [34], ont mesuré l'expansion des mortiers au calcaire exposés à différentes solutions sulfatiques (Figure 1.60). L'expansion des spécimens exposés à la solution Na_2SO_4 à une température de $5^\circ C$ a été trouvée presque semblable à celle des spécimens exposés à la solution de Na_2SO_4 à une température de $20^\circ C$ pour un taux de calcaires élevé. Par contre, les spécimens préparés sans ajout de calcaires sont moins affectés pour les deux types de clinkers. Pour les échantillons exposés au $MgSO_4$ à une température de $5^\circ C$, l'expansion augmente avec l'augmentation de pourcentage du calcaire.

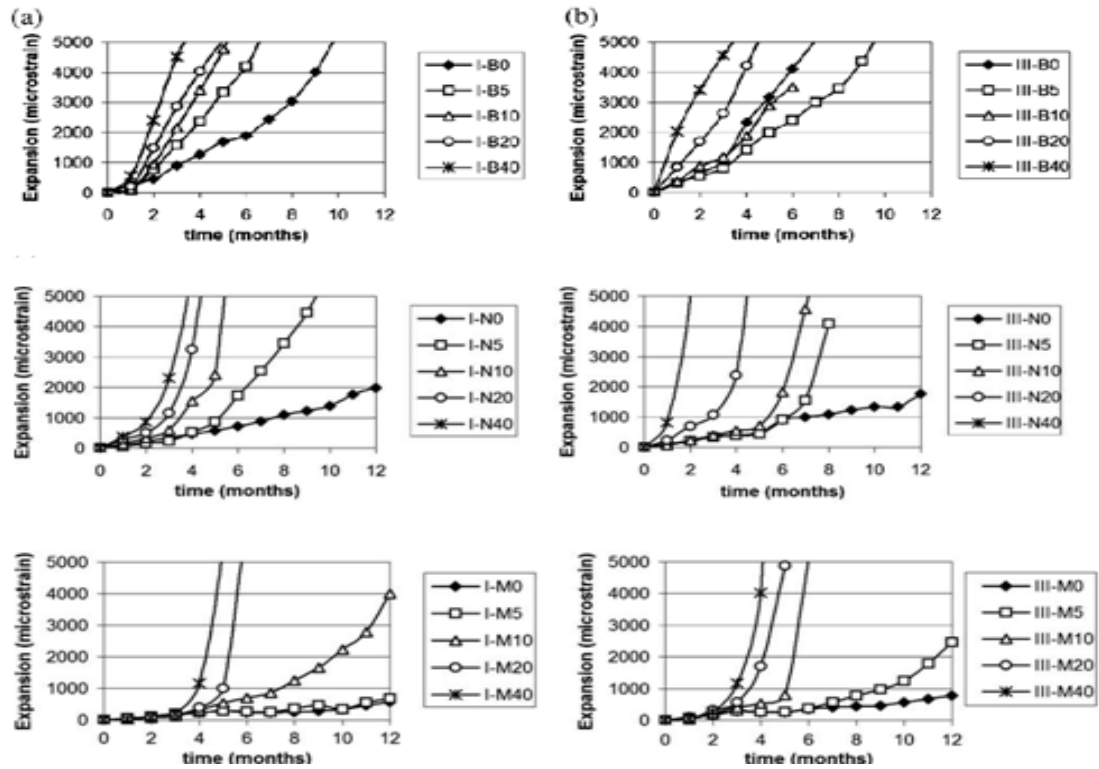


Figure 1.60: Expansion des spécimens de deux clinkers (I et III) avec leur substitution en % par le calcaire exposés aux sulfates [34]

Les résultats de HADJ SADOK [35], sur l'essai d'expansion des éprouvettes de mortier avec et sans filler calcaire immergées dans les solutions contenant 5% de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) et 5% de sulfates de sodium (Na_2SO_4) sont présentés dans les figures 1.61 et 1.62. Ces résultats montrent une expansion plus élevée des mortiers conservés dans la solution contenant le sulfate de sodium, comparée à ceux conservés dans la solution de sulfate de magnésium. En effet, pour un mortier sans filler calcaire, l'expansion après 180 jours d'immersion est de 0,11% pour les éprouvettes placées dans la solution de Na_2SO_4 comparée à 0,0535% pour le mortier immergé dans la solution de $MgSO_4$. Par ailleurs, pour les éprouvettes immergées dans la solution de sulfate de magnésium (5% $MgSO_4$), l'expansion des mortiers avec ajouts calcaire (5, 10, 15 et 20%), après 6 mois d'immersion était moins importante que celle des mortiers témoins (sans filler calcaire). En effet, l'incorporation d'ajout calcaire a conduit à une diminution d'expansion de l'ordre de 50% pour 5 et 20% de filler calcaire et de 14 et 21% pour 10 et 15% de filler calcaire.

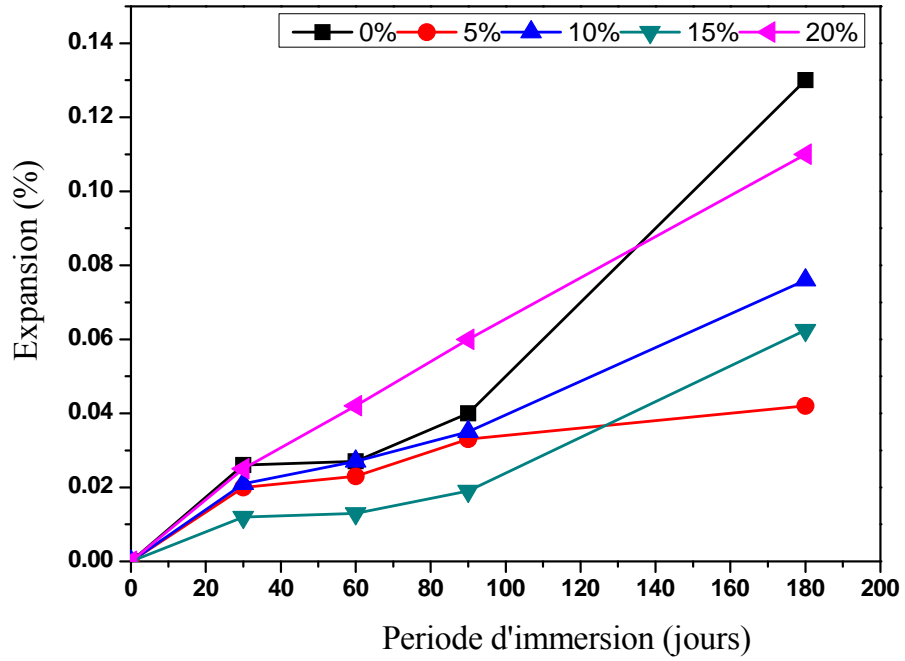


Figure 1.61: Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4) [35]

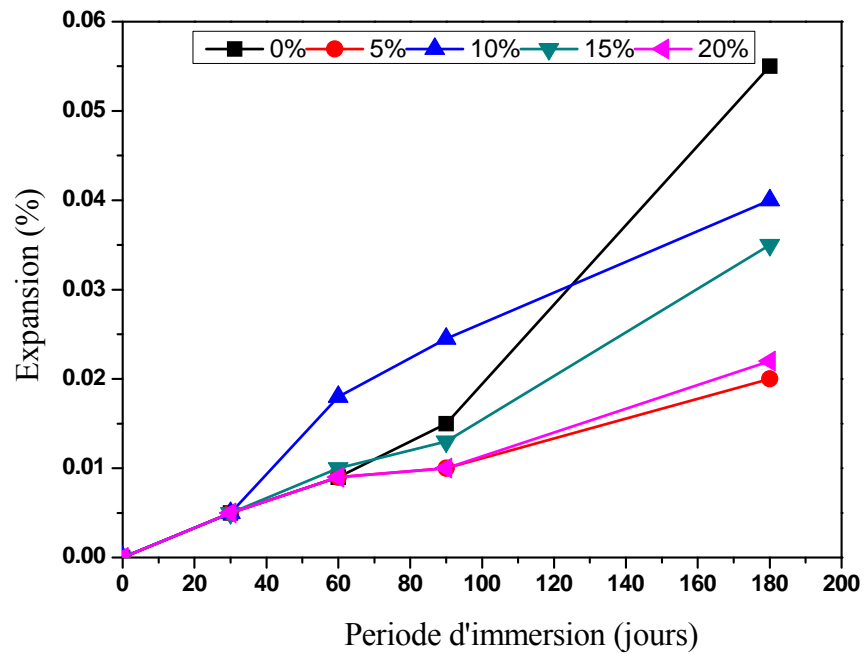


Figure 1.62: Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5% de sulfate de sodium (MgSO_4) [35]

GONZALEZ et al [37], ont étudié l'effet de variation du type du ciment et de la composition chimique du clinker (C_3S et C_3A) et le pourcentage de l'ajout calcaire sur l'expansion des éprouvettes de mortier, immergé dans une solution de 5% de Na_2SO_4 (Figure 1.63). 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 qu'à 20% d'ajout calcaire, l'expansion est très importante. En effet, ce comportement a été expliqué par les changements du degré d'hydratation, de la porosité capillaire, et du type des produits d'hydratation en présence du calcaire.

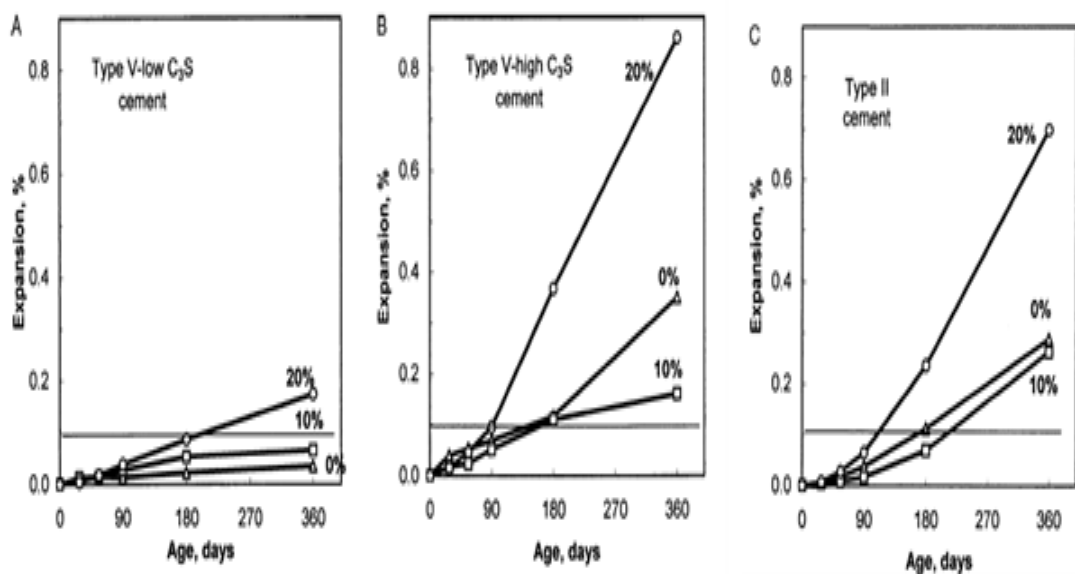


Figure 1.63: Expansion des mortiers après 360 jours d'immersion dans une solution de sulfate de sodium [37]

1.6.7. Perte de masse

MENADI [2], a montré qu'après 360 jours d'immersion dans les solutions de magnésium et de sodium, la perte de masse des bétons est généralement plus faible lorsque le taux de fines est élevé (Figures 1.64 et 1.65).

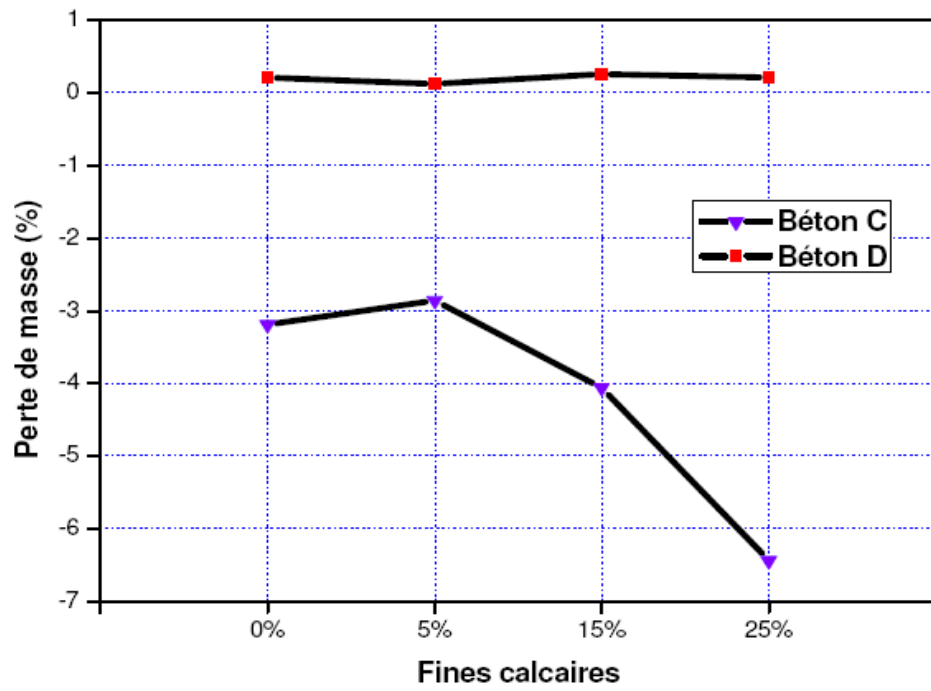


Figure 1.64: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% MgSO₄ [2]

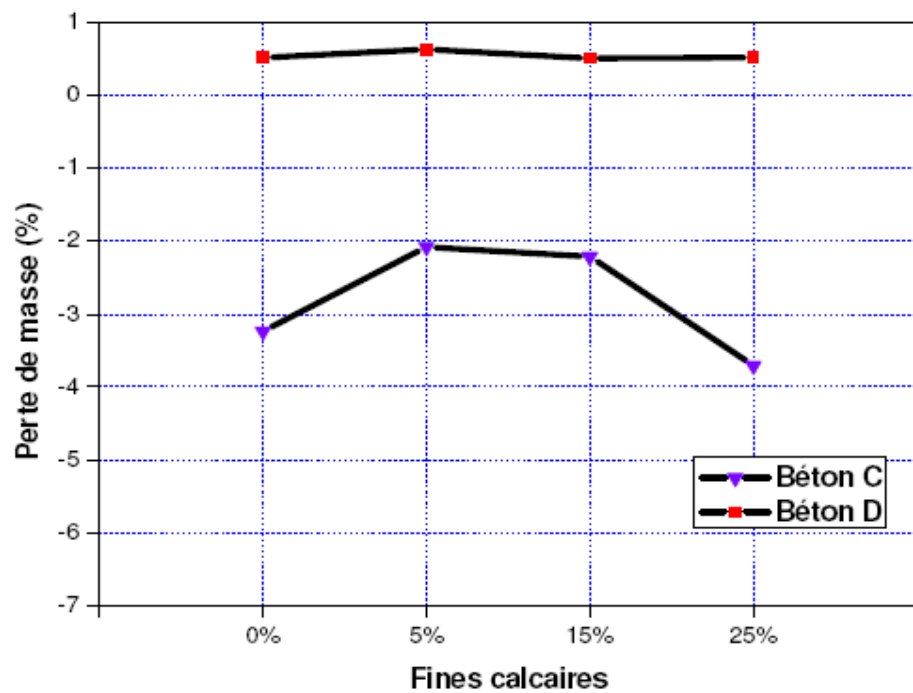


Figure 1.65: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na₂SO₄ [2]

1.6.8. Gel-dégel

LI BEIXING et al [6], ont étudié l'effet de fines calcaires substitué au sable de concassage sur la résistance au gel-dégel. Ils ont montré que, pour le béton de faible résistance, la résistance au gel dégel diminue linéairement avec l'augmentation de pourcentage de fines calcaires. Par ailleurs, pour le béton de haute résistance, les fines calcaires n'ont montré aucun effet sur la résistance au gel dégel. La bonne résistance au gel dégel du béton de haute résistance a été expliqué par le faible rapport E/C et le dosage élevé en ciment.

HADJOUJJA et al [33], ont étudié la résistance au gel dégel du béton de sable de dunes contenant des fillers de brique. Ils ont soumis les éprouvettes à 12 cycles de vieillissement accéléré ou chacun s'est caractérisé par 4 heures de gel (-23°C) suivi par immersion totale dans l'eau à une température de 21°C jusqu'à dégel complet (environ 4 heures). Les résultats ont montré que le gel-dégel influe négativement sur la résistance à la compression (Figure 1.66). Ils sont constatés que le béton de sable de dune contenant 250 kg/m^3 de filler de brique est plus résistant au gel dégel (Figure 1.67).

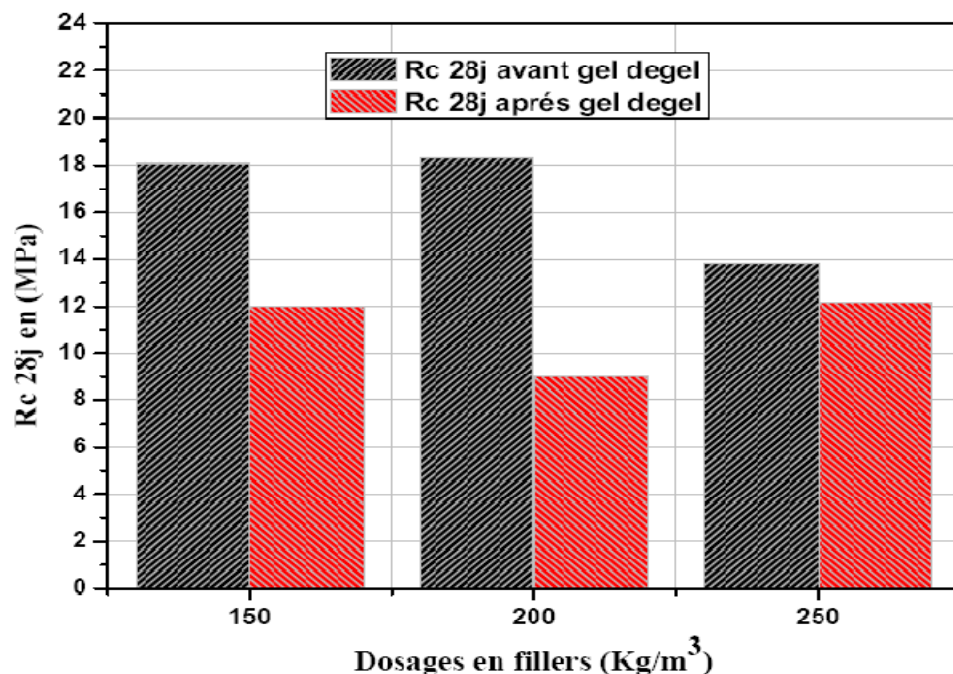


Figure 1.66: Influence du gel dégel et de filler sur la résistance a la compression [33]

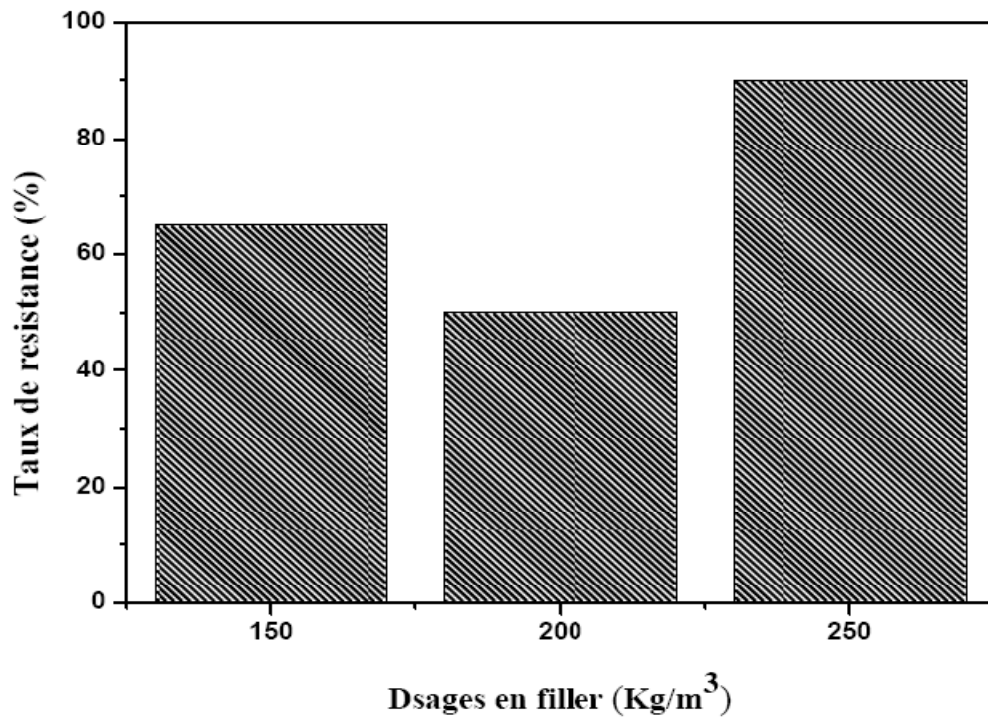


Figure 1.67: Evolution de taux de résistance en fonction de dosages en fillers [33]

1.7. Conclusion

Les résultats de l'analyse bibliographique sur l'influence de l'ajout calcaire sur le comportement des bétons ou des mortiers ont montré que la présence des fines calcaires à un faible pourcentage de 10 à 15% 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 par flexion des bétons et des mortiers. L'addition des fines calcaires a également un effet positif sur la perméabilité à l'eau et la porosité des bétons. Cependant, la présence des fines calcaires augmente la pénétration des ions chlorures, et augmente la perméabilité au gaz. L'utilisation d'un dosage optimal de superplastifiant permet d'améliorer l'ouvrabilité et la résistance à la compression, de diminuer la porosité, d'augmenter la compacité des bétons et mortiers et par conséquent diminuer la pénétration des ions chlorure et la perméabilité aux gaz.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET PROTOCOLES EXPERIMENTALES

2.1. Introduction

Les objectifs de cette étude expérimentale visent à qualifier la durabilité des bétons hydrauliques et mortiers à base de sable de concassage en caractérisant leurs performances physiques, mécaniques et leur durabilité en tenant compte de l'effet de l'environnement de cure et l'effet d'un superplastifiant.

2.2. Matériaux utilisés

Le comportement du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, nous commençons ce chapitre par une présentation des matériaux mis en œuvre pour confectionner nos mélanges et les proportions avec lesquelles ils entrent dans les compositions.

Le béton est constitué de ciment, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants ou d'ajouts. Les caractéristiques physico-chimiques de ces matériaux d'études sont également présentées pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais.

2.2.1. Ciment

Dans la présente étude, nous avons utilisé un seul type de ciment pour confectionner les éprouvettes des mortiers et bétons. Le ciment utilisé est un ciment composé, CEM II/A-L 42.5 provenant de la cimenterie de M'SILA. L'analyse chimique et minéralogique du ciment ont été effectués au laboratoire de contrôle de la cimenterie de M'SILA et sont récapitulées dans le tableau 2.1.

Les essais physico-mécaniques du ciment ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida dont les résultats d'identification sont donnés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.1 : Composition chimique du ciment utilisé [38]

Composition chimique	Teneur en (%)
	CEM II/A-L 42.5
SiO ₂	20.92
Al ₂ O ₃	5.33
Fe ₂ O ₃	3.43
CaO	61.74
CaO libre	2.17
MgO	1.58
K ₂ O	-
Na ₂ O	-
SO ₃	1.83
Cl ⁻	0.025
Insolubles	1.35
Perte au feu	1.65
Composition minéralogique	
C ₃ S	61.5
C ₂ S	16.0
C ₃ A	7.25
C ₄ AF	11.0

Tableau 2.2 : Propriétés physiques et mécaniques du ciment utilisé

ESSAIS	CEM II/A-L42.5	NORME
Finesse SSB (cm ² /g)	3454	2700 :3500
Temps de début de prise (heure, minute)	2h50	≥1h30
Temps de fin de prise (heure, minute)	3h45	/
Stabilité (mm)	2.00	≤10.0
Résistance à la compression (N/mm²)		
2 jours	20.5	≥10.0
7 jours	35.0	/
28 jours	43.85	≥ 42.5

2.2.2. Granulats

a) Sable

Dans la présente étude on a utilisé un seul type de sable concassé ($80\mu\text{m}/4\text{mm}$) provenant de l'unité de concassage d'El Hachimia, située à 19 km au Sud de la ville de Bouira. Le sable a été séché et tamisé plusieurs fois par une tamiseuse électrique (Figure 2.1) pour enlever toutes les fines inférieures à $80\mu\text{m}$ avant leur utilisation. La caractérisation du sable (Granulométrie, E.S, Masse volumique,) a été réalisée au sein du laboratoire Géomatériaux de Génie Civil de l'Université de Blida.

L'analyse granulométrique du sable a été réalisée conformément à la norme NF P 18-560 (septembre 1990) [39] dont les résultats sont présentés dans la figure 2.2. Sa composition chimique est résumée dans le tableau 2.3. Le degré de propreté du sable concassé est obtenu par le biais de l'essai d'équivalent de sable (E.S) conformément à la norme NF P 18-598 [40]. Les résultats obtenus de l'équivalent du sable ainsi que son module de finesse sont donnés dans le tableau 2.4.



Figure 2.1 : Tamiseuse électrique

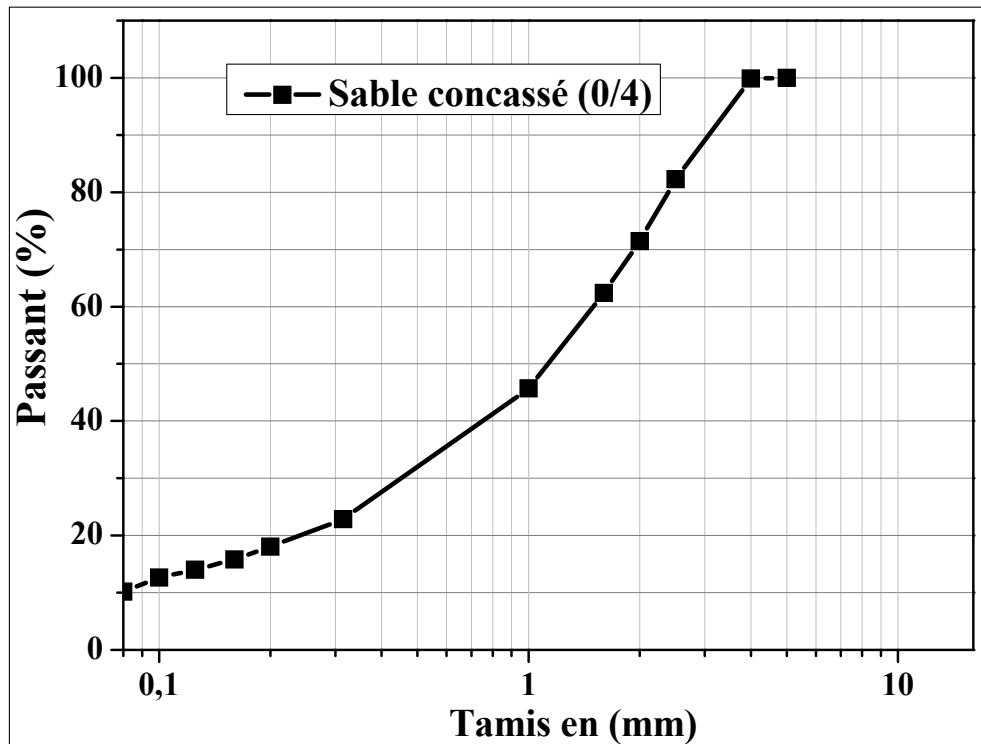


Figure 2.2: Courbe granulométrique du sable de concassage

Tableau 2.3: Analyse chimique du sable de concassage d'El Hachimia

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Perte au feu
Sable Concassé	4.51	1.09	0.54	50.68	1.01	-----	-----	-----	41.04

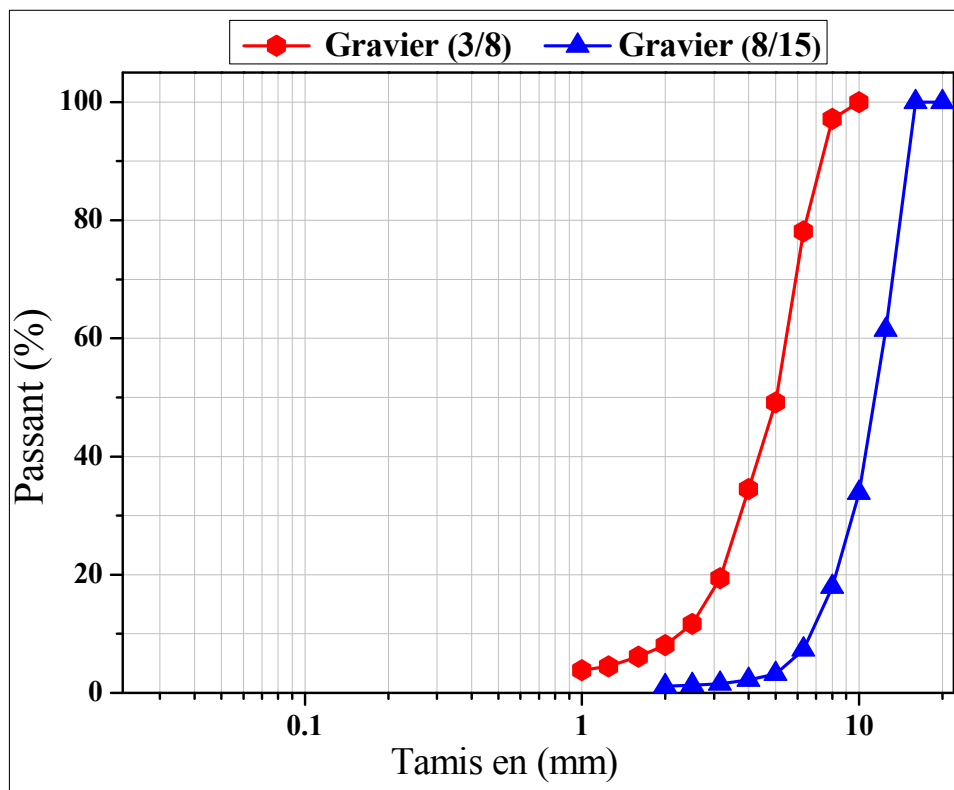
Tableau 2.4: Équivalent du sable et module de finesse de sable utilisé

		Sable (80µm /4mm)	Norme
Equivalent de sable (E.S)	E.S à vue	83.26	≥ 70 (65 et 60 pour sable concassé ou broyé)
	E.S à piston	78.16	
Module de finesse (M.F)		3.02	1.8 < MF < 3.2

b) Graviers

Deux types de graviers concassés (3/8) et (8/15) d'origines basaltiques ont été utilisés dans cette étude pour la confection des éprouvettes du béton provenant de la même station de concassage de Béni Slimane dans la wilaya de Médéa. Pour éliminer les impuretés, les graviers ont été lavés plusieurs fois avant leurs utilisations.

L'analyse granulométrique des graviers a été réalisée conformément à la norme NF P 18-560 (septembre 1990) [39] dont les résultats sont présentés dans la figure 2.3.



ont été déterminées conformément aux normes NF P 18-554 et NF P 18-555[41-42] et sont données dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 Propriétés physiques des granulats utilisés

	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique absolue (kg/m³)	2540	2500	2500
Masse volumique apparente (kg/m³)	1541.7	1489.9	1391.4

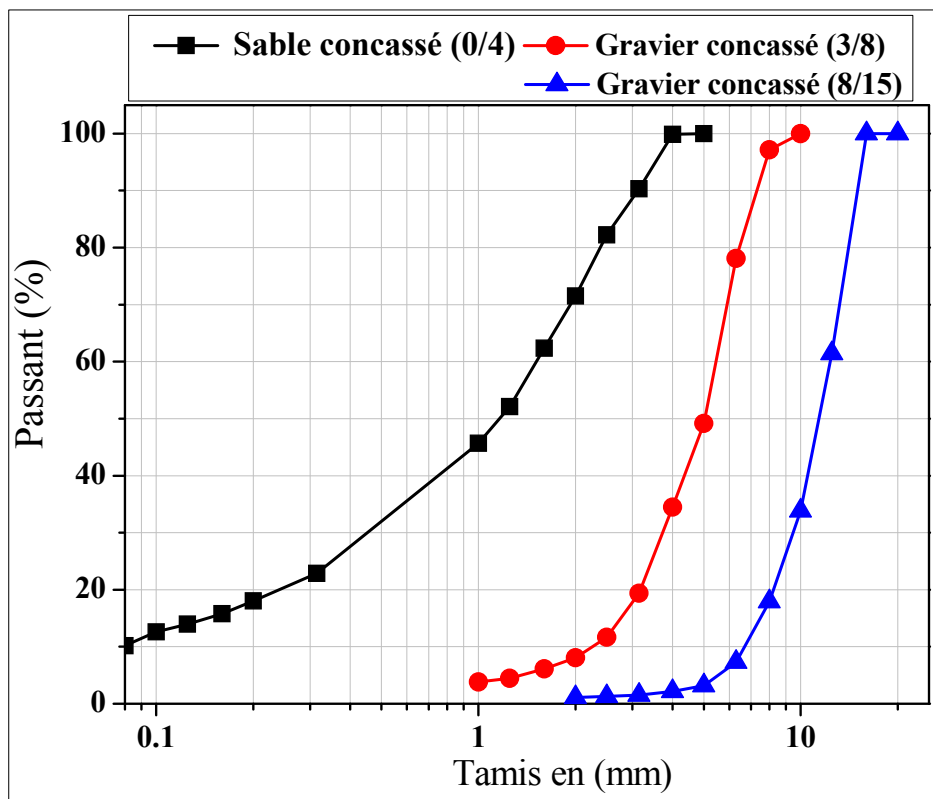


Figure 2.4: Courbes granulométriques des différents granulats utilisés

c) Filler calcaire (< 80 μm)

Pour la formulation des bétons hydrauliques, le filler calcaire issu du sable de concassage a été utilisé comme substitution au sable. La masse volumique et la surface

spécifique du filler sont de 2710 kg/m^3 et de $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$, respectivement. Sa composition minéralogique déterminée par diffraction de rayons X a montré que 90% des fines sont des calcites (Figure 2.5).

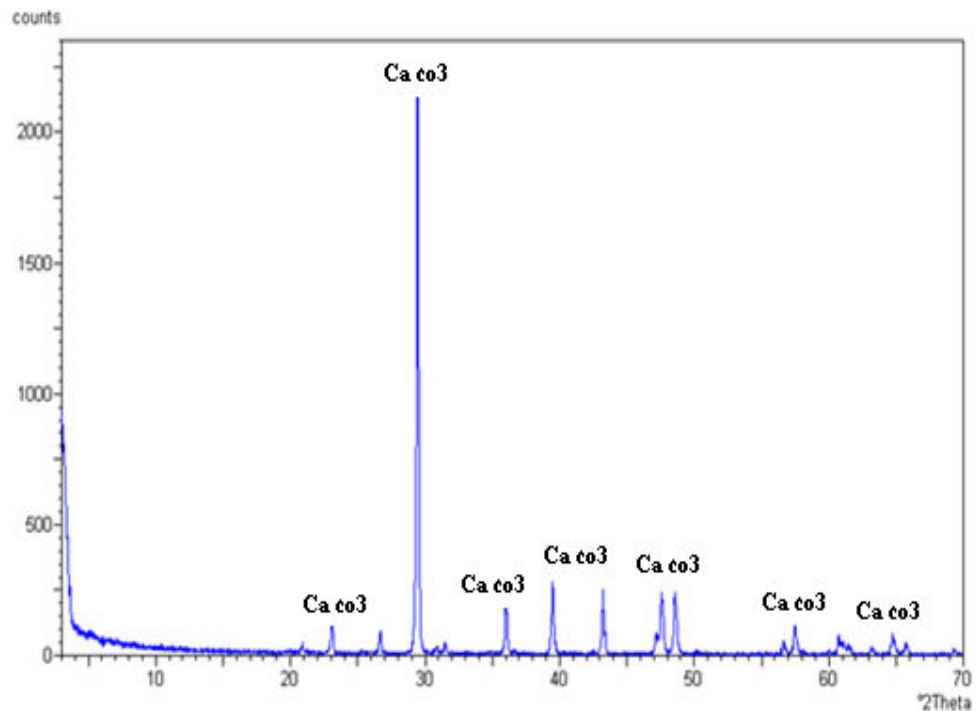


Figure 2.5: Diffractogramme de rayons X du sable de concassage [2]

2.2.3. L'eau de gâchage

L'eau dans le béton sert à hydrater le ciment. Pour la confection des bétons et mortiers, nous avons utilisé de l'eau potable du robinet exempte d'impuretés.

2.2.4. Adjuvants

Lors des essais préliminaires nous avons utilisé deux types d'adjuvants afin de fixer le type à utiliser selon les critères recherchés (ouvrabilité et réduction du dosage en eau). Les deux types d'adjuvants utilisés sont comme suit :

- Un plastifiant réducteur d'eau, conforme à la Norme NF EN 934-2, le PLASTIMENT BV 40 (Sika France S.A., voir annexe). Il est particulièrement indiqué pour les bétons à haute performance, béton précontraint et béton

préfabriqué. Il permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10% sans diminuer la maniabilité.

- Un superplastifiant, haut réducteur d'eau, conforme à la Norme NF EN 934-2, le VISCOCRETE 3045 (Sika France S.A., voir annexe), à base de polycarboxylate modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron. Il permet de maintenir l'ouvrabilité des bétons pendant plus d'une heure et d'obtenir des résistances mécaniques élevées à court terme, améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend le mélange moins sensible aux variations d'eau et des constituants. Sa densité est de 1,11, sa teneur en ions chlorures est inférieure à 0,1% et il possède 36,4% d'extrait sec. Son dosage peut varier de 0,25 à 2,5% de la masse de ciment selon l'effet souhaité.

2.3. Formulation des bétons et mortiers

Trois programmes d'essais ont été réalisés dans notre étude pour mettre en évidence l'effet des fines calcaires sur la durabilité des bétons et mortiers à base de sable de concassage:

- Propriétés physiques et mécaniques du béton à base de sable de concassage
- Durabilité du béton à base de sable de concassage (à long terme) avec deux environnements de cure différents.
- Durabilité du mortier à base du sable de concassage dans les milieux agressifs (sulfate de magnésium, sulfate de sodium et eau de mer).

2.3.1 Formulation du béton et confections des éprouvettes

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

Dans le but d'étudier l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage sur la durabilité du béton, nous avons confectionné nos mélanges selon la méthode de Dreux [43]. En visant une résistance à la compression du béton ordinaire de 30 MPa à 28 jours et une consistance plastique allant de 40 à 90 mm avec l'utilisation d'un superplastifiant. La

quantité de ciment a été maintenue constante à 350 kg/m^3 pour tous les mélanges des bétons. En ce qui concerne le rapport E/C, on a fait plusieurs tentatives d'essais préliminaires avec l'utilisation en premier lieu d'un plastifiant (Plastiment BV40) et en deuxième lieu un superplastifiant (viscocrete 3045) afin de trouver le dosage optimal et l'ouvrabilité souhaitée. Les proportions des granulats retenus pour la formulation de nos mélanges de bétons sont illustrées sur la figure 2.6.

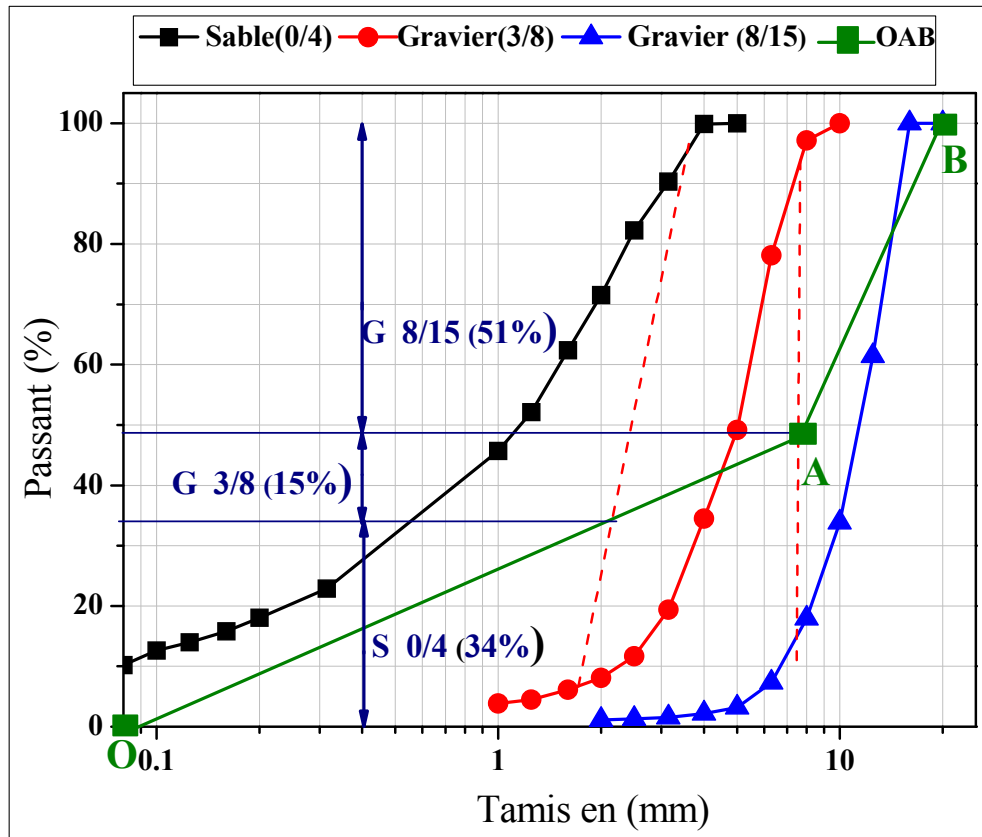


Figure 2.6: Proportions des granulats utilisés

2.3.2 Procédures expérimentales

✓ Confection et conservation des éprouvettes

Après la préparation des quantités des matériaux utilisés, les constituants du béton ont été introduits dans le malaxeur (Figure 2.7) par ordre décroissant de granulométrie et ont été mélangés à sec pendant 1 minute, ensuite l'eau de gâchage et l'adjuvant sont ajoutés. Le malaxage a été maintenu pendant 2 minutes conformément à la norme NF P 18-404 [44].



Figure 2.7 : Malaxeur pour béton

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes de béton sont des cubes $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ et $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ pour l'essai de perméabilité à l'eau et l'essai de compression, respectivement. Des éprouvettes prismatiques $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ ont été utilisées pour les essais de l'absorption d'eau par capillarité et les essais de porosité. Concernant l'essai de perméabilité au gaz et l'essai de perméabilité aux ions chlorés, des dalles de dimensions $(70 \times 230 \times 280 \text{ mm}^3)$ ont été confectionnées, ensuite des carottes seront retirées pour ces essais. La figure 2.8 illustre les différents moules utilisés pour chaque gâchée.



Figure 2.8 : Moules utilisées

Après la préparation des mélanges du béton, les moules ont été remplis et compactés mécaniquement à l'aide d'une table vibrante (Figure 2.9). Après coulage, les éprouvettes ont été protégées de la dessiccation par un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Toutes les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures et conservées dans deux environnements de cure.



Figure 2.9 : Compactage du béton à l'aide d'une table vibrante

✓ Mode de cure des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes confectionnées ont été conservées dans deux modes d'environnements de cure différents :

Mode 1 :

Les éprouvettes ont été conservées à l'intérieur du laboratoire dans l'eau à une température moyenne de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative, $\text{HR}=100\%$, comme l'illustre la figure 2.10 jusqu'à échéance d'essais.



Figure 2.10 : Epreuves conservées dans l'eau (cure humide)

Mode 2 :

Les éprouvettes ont été conservées initialement pendant 7 jours dans l'eau à une température moyenne de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative, $\text{HR}=100\%$. Ensuite, elles ont été conservées dans l'air (Figure 2.11) à l'extérieur du laboratoire (toit du laboratoire) en atmosphère non contrôlée jusqu'aux échéanciers d'essais. Pendant cette phase de cure la température, T varie de 20°C à 40°C (hiver/été) et l'humidité relative, (H.R) de 25% à 85%.



Figure 2.11: Echantillons à l'air libre (atmosphère non contrôlée)
après une cure initiale de 7 jours dans l'eau

2.3.3 Essais sur béton frais

a). Ouvrabilité

L'essai d'affaissement par le cône d'Abrams permet de mesurer l'ouvrabilité des bétons conformément à la norme NFP 18-451 [45]. C'est l'essai, le plus couramment utilisé pour caractériser l'ouvrabilité des bétons ordinaires. On remplit le béton dans le moule tronconique de ($h=300$ mm, $D=200$ mm et $d=100$ mm) dont le remplissage a été exécuté en trois couches tassées (25 coups par couche) avec une tige en acier de diamètre 16 mm. Ensuite, on soulève le cône et on mesure l'affaissement (Figure 2.12).



Figure 2.12 : Essai d'affaissement (cône d'Abrams)

Pour l'obtention de la plasticité souhaitée, plusieurs tentatives d'essais préliminaires ont été réalisées sur la teneur en eau et le dosage en plastifiant. Quatorze (14) gâchées ont été confectionnées dans un premier temps avec différents teneur en eau et en plastifiant pour choisir le dosage optimum de ces derniers. Le tableau 2.6 présente quelques résultats de l'affaissement des différents gâchés de bétons confectionnés avec différents adjuvants.

Tableau 2.6 : Dosage optimal en plastifiant et en eau

Dosage Notation	E/C	Plastiment BV 40	Affaissement (cm)	E/C	Viscocrete 3045	Affaissement (cm)
B15*	0.45	1.1%	0	0.48	2%	3.8
B15	0.45	1.8%	0	0.50	1.8%	7.0
B15	0.55	2%	7.4	0.50	1.5%	4.8
B15	0.50	2%	7.2	-	-	-
B15	0.48	2%	0.3	-	-	-
B15	0.45	2%	0	-	-	-
B0	-	-	-	0.50	1%	2.2
B0	-	-	-	0.50	1.8%	9.3
B0	-	-	-	0.49	1.8%	13.7
B0	-	-	-	0.49	1.5%	11.7
B0	-	-	-	0.48	1.5%	7.9

B15* : béton à base de 15 % de fines substitués au sable

A partir de ce tableau, on a choisi le dosage optimal en eau (E/C) et en superplastifiant (viscocrete 3045) de 0.49 et 1.5%, respectivement. L'ensemble des bétons mis en œuvre à base de sable de concassage avec et sans filler ont été confectionnés avec un dosage constant de 1.5% (par poids du ciment) en viscocrete 3045 et un rapport E/C de 0.49. Six (06) gâchés par environnement de cure ont été confectionnés des différents mélanges du béton mis à l'essai, comme l'indique le tableau 2.7.

Tableau 2.7: Mélanges des bétons mis à l'essai (kg/m³)

Mélange du béton	BO	B5	B10	B15	B20	B25
Ciment (C)	350	350	350	350	350	350
Sable (S) 0/4 mm	601.06	571.01	540.95	470.00	480.85	450.80
Filler calcaire (<80µm)	0.0	30.05	60.11	131.05	120.21	150.26
Gravier 3/8 mm	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00
Gravier 8/15 mm	887.4	887.4	887.4	887.4	887.4	887.4
Eau (E)	171.5	171.5	171.5	171.5	171.5	171.5
E/C	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
Viscocrete 3045	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25
G/S	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
Slump (cm)	12.2	10.7	7.8	6.2	3.2	2.8

b). Masse volumique

Nous avons mesuré la masse volumique du béton frais conformément à la norme NF EN 12350-6 [46]. Connaissant la masse (m_1) et le volume (V) du récipient à vide, on pèse, la masse (m_2) du récipient rempli d'un échantillon de béton frais. La masse volumique est calculée selon la formule suivante:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2.1)$$

Avec :

ρ : masse volumique du béton frais (kg/m³),

m_1 : masse du récipient (kg),

m_2 : masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient (kg),

V : volume du récipient (m³).

2.3.4 Essais sur béton durci

1) Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus fréquemment mesurée sur béton durci. L'essai de résistance à la compression des bétons a été effectué selon la norme NF P 18-406 [47]. La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cubiques $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ pour chaque mélange du béton à l'âge de 28 et 90 jours. L'effort de compression est appliqué par une presse hydraulique de capacité 3000kN (Figure 2.13) dont le chargement est contrôlé en force à raison de 0,5 à 0,6 kN/s.



Figure 2.13 : Dispositif de l'essai de compression simple

2) Absorption d'eau par capillarité

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C (procédure AFREM [AFPC 97]). Les échantillons testés sont des morceaux coupés à partir des éprouvettes prismatiques ($70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$). Les éprouvettes ont été séchées dans une étuve ventilée et régulée, jusqu'à atteindre une masse constante. Les faces latérales des éprouvettes ont été couvertes par une mince couche de résine pour assurer l'écoulement unidirectionnel. L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite de ce pré-conditionnement. Il consiste à suivre

l'évolution de masse des éprouvettes plongées de 5 mm dans l'eau (Figure 2.14). Les échéances de mesure sont les suivantes : 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes. Les différentes pesées ont été faites à l'aide d'une balance de précision de 0.01g.

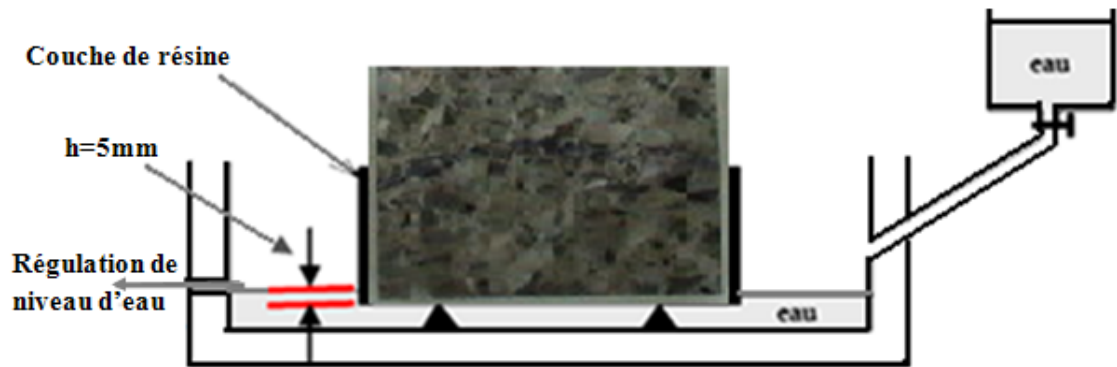


Figure 2.14 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$C_c = \frac{(M_x - M_0)}{A} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (2.2)$$

Où

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : section de l'éprouvette (m^2),

Le coefficient de sportivité (s) du béton peut être déterminé de l'expression suivante :

$$\frac{Q}{A} = Spt \cdot \sqrt{t} \quad (2.3)$$

Où :

A : surface du spécimen en contact avec l'eau en cm^2 ,

Q : quantité d'eau absorbé en cm^3 ,

t : temps en (Spt),

Spt : coefficient de sorptivité du spécimen en $\text{cm/s}^{1/2}$.

On trace $\frac{Q}{A}$ en fonction de \sqrt{t} , puis on trace la régression linéaire entre $\frac{Q}{A}$ et \sqrt{t} , ensuite on calcule la pente de la ligne droite qui donne le coefficient de sorptivité (Spt). La figure 2.15 montre comment le coefficient de sorptivité peut-être déterminé.

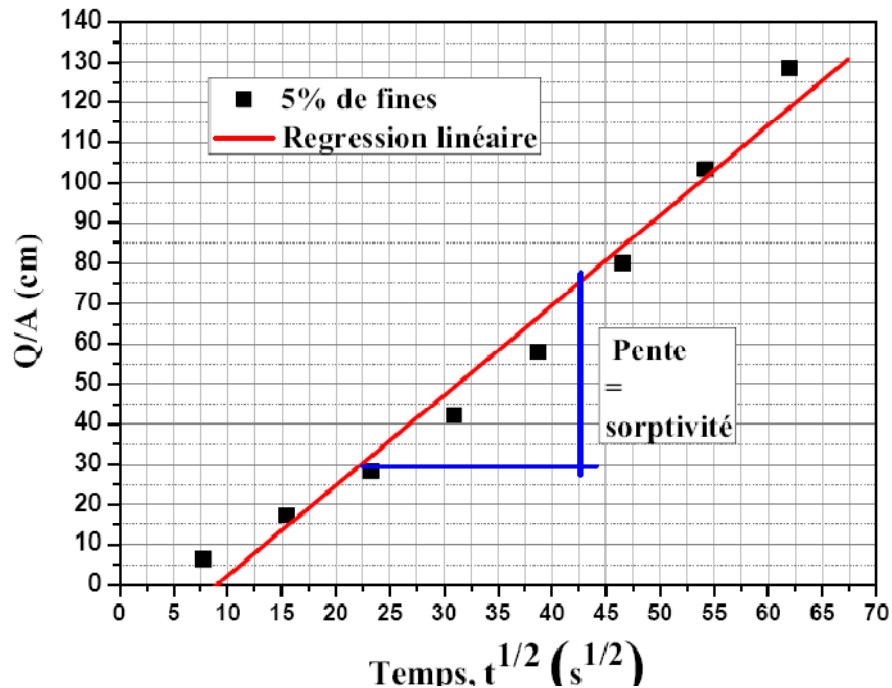


Figure 2.15 : Détermination de coefficient de sorptivité

3) Mesure de la porosité accessible à l'eau

Parmi les méthodes à utiliser pour la détermination de la porosité accessible à l'eau est celle par pesée hydrostatique. C'est une mesure simple et pratique à utiliser pour une large variété de matériaux. Cette méthode a été réalisée selon le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM. L'essai comprend les étapes suivantes : étuvage à 105°C jusqu'à la stabilisation de la masse (lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0,05 %) et saturation en eau sous vide (Figure 2.16). Les échantillons testés sont des morceaux coupés à partir des éprouvettes prismatiques ($70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$).

La porosité totale accessible à l'eau ε (%) est déterminée à partir de la formule suivante:

$$\varepsilon(\%) = \frac{M_{x \text{ sat}} - M_{0 \text{ sec}}}{\rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{app}}} \quad (2.4)$$

Où :

$M_{0 \text{ sec}}$: masse de l'éprouvette à l'état sec (g),

$M_{x \text{ sat}}$: masse de l'éprouvette à l'état saturé (g),

V_{app} : volume apparent de l'échantillon (cm³),

ρ_{solu} : masse volumique de la solution (kN/m³).

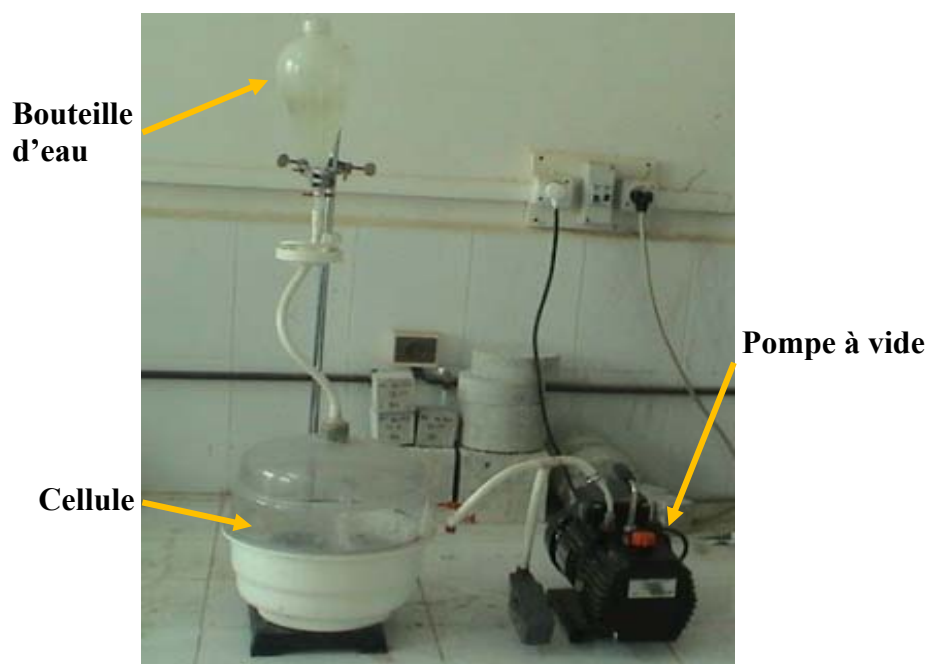


Figure 2.16 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes

4) Perméabilité à l'eau

Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués selon la norme DIN 1048 [48]. Cet essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150 mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de 72h ± 2 (Figure 2.17). L'essai a été réalisé à l'âge de 28 et 180 jours sur des éprouvettes conservées dans différents modes de cure. La pression est appliquée sur la surface inférieure de l'éprouvette. Après 72 heures de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai brésilien. La profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée avec précision par un pied à

coulisse (Figure 2.18). Les valeurs d'échelle de classement de la perméabilité à l'eau des bétons sont données par le tableau 2.8.

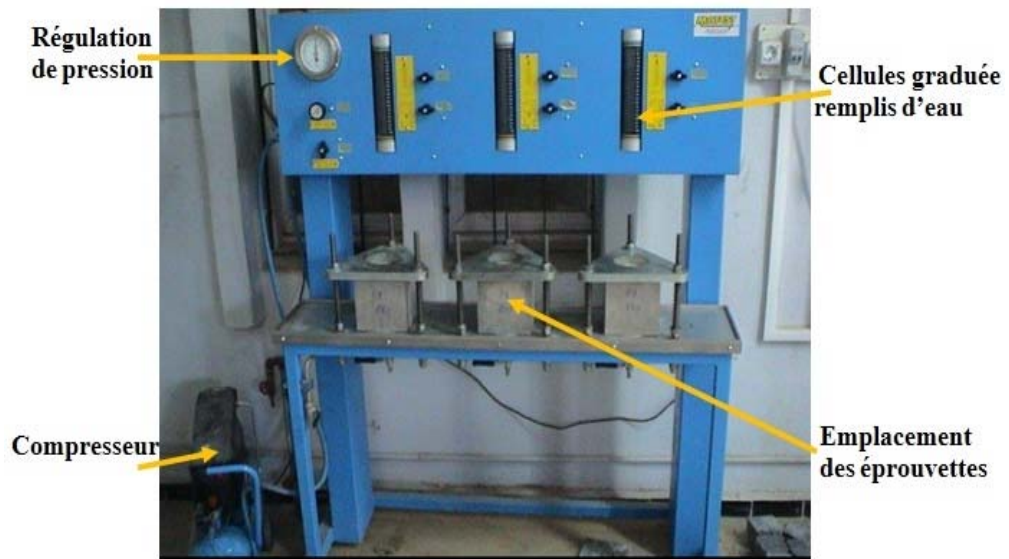


Figure 2.17: Essai de perméabilité à l'eau



Figure 2.18 : Mesure la profondeur de pénétration de l'eau

Tableau 2.8 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau [48]

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

5) Perméabilités aux gaz et ions chlorures

✓ Préparation des éprouvettes à testées

Afin d'étudier l'effet des fines calcaires sur la perméabilité au gaz et aux ions chlorures des bétons à base de sable de concassage, quatre dalles de dimensions (70x230x280 mm³) ont été confectionnées de la même gâchée pour chaque pourcentage de fines substitué au sable de concassage, un nombre total de 48 dalles ont été préparées pour les deux environnements de cure étudiés. Après durcissement des différentes dalles de bétons ; des éprouvettes cylindriques de dimensions Ø 150 x 50 mm et Ø 100 x 50 mm, destinées aux essais de perméabilité au gaz et aux ions chlorures, respectivement, ont été carottées de ces dalles à l'aide d'une carotteuse (Figure 2.19). Après rectification des surfaces des éprouvettes (Figure 2.20), les éprouvettes sont ensuite conservées dans les deux environnements de cure choisis, jusqu'aux échéanciers des essais.



Figure 2.19 : Carottage des échantillons destinés aux essais de perméabilités au gaz et aux ions chlorures



Figure 2.20 : Rectification des éprouvettes

✓ Procédure de mesure de la perméabilité aux gaz

L'essai consiste à appliquer un gradient de pression constant à un échantillon de béton et à mesurer le flux de gaz qui traverse l'échantillon en régime permanent, à l'aide du Perméamètre CEMBUREAU [49] (Figure 2.21). Cet essai de perméabilité a été effectué sur béton durci avec des échantillons carottés dans les limites dimensionnelles de l'appareillage. Les échantillons employés dans notre étude sont cylindriques de diamètre 15 cm et de hauteur 5 cm. Les éprouvettes testées sont protégées latéralement et confinées, ce qui assure un écoulement unidirectionnel du gaz. Ces éprouvettes sont soumises à cinq valeurs de pression constante (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 bars) d'azote pour chaque mélange de béton.



Figure 2.21: Perméamètre au gaz de CEMBUREAU

Pour chaque échantillon, le coefficient de perméabilité apparente K est déterminé à partir de la formule suivante :

$$K(m^2) = \frac{2\eta \cdot Q_1 \cdot L \cdot P_{atm}}{A_i \cdot (P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad (2.5)$$

Où

η : viscosité dynamique du gaz d'essai (Pa.s),

Q_1 : débit volumique mesuré à la pression atmosphérique (m^3/s),

P_{atm} : pression atmosphérique (Pa),

L : épaisseur d'échantillon (m),

P_1 : pression d'injection (Pa),

A_i : section de l'échantillon (m^2).

✓ Procédure de mesure de la perméabilité aux ions chlores

L'essai de perméabilité aux ions chlores a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de ($\Phi 100 \times 50 \text{ mm}^2$), préalablement saturées sous vide dans un dessiccateur avec une pompe à vide (Figure 2.16) selon la norme ASTM C-1202 [50], La saturation est effectuée selon la procédure suivante :

- On place les éprouvettes dans un dessiccateur sous vide, hermétiquement fermé avec une pompe à vide afin de maintenir une dépression de 25 mbars pendant au moins 3 heures.
- On introduit l'eau déminéralisée de telle sorte qu'après 15 minutes les éprouvettes soient baignées complètement environ 20 mm sous l'eau déminéralisée, ensuite, le fonctionnement de la pompe à vide est maintenu durant une heure supplémentaire avant son arrêt complet. Après l'arrêt de la pompe à vide, les éprouvettes sont conservées sous vide pendant $20h \pm 1h$ avant lancement de l'essai de la perméabilité.

Après saturation pendant 24 heures, l'échantillon de béton est fixé entre deux compartiments remplis des solutions suivantes : NaCl 3% (cathode) et NaOH 0,3 N (anode) (Figure 2.22). L'essai consiste à appliquer entre les deux faces de l'échantillon une différence de potentiel de 60 V pendant 6 heures et à mesurer toutes les 30 minutes

l'intensité du courant qui traverse l'échantillon (Figure 2.23). Le résultat de l'essai est une quantité d'électricité (en Coulomb) pour 6 h d'essai. La quantité d'électricité totale passante est calculée par la formule suivante:

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2.6)$$

Avec:

I_n : intensité du courant (Ampères) qui traverse l'échantillon à n minutes,

Q: quantité d'électricité totale (Coulomb) qui traverse la cellule.

Les valeurs limites de la quantité d'électricité totale passante sont présentées dans le tableau 2.10 selon l'échelle de whiting [50-51].

Tableau 2.10 : Valeurs limitent pour l'essai de perméabilité aux ions chlore [50-51]

Quantité d'électricité passante (Coulombs)	Pénétration des chlorures
>4000	élevée
2000-4000	modérée
1000-2000	faible
100-1000	très faible
< 100	négligeable

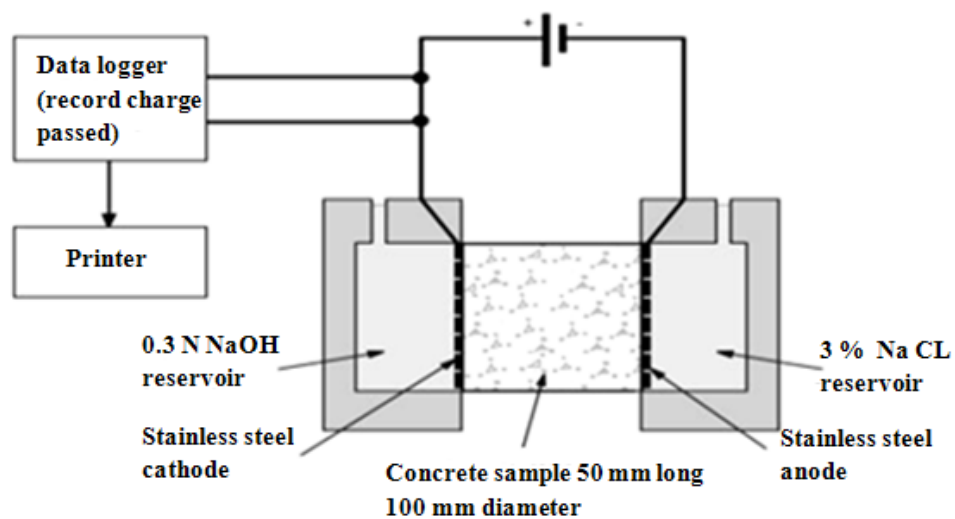


Figure 2.22: Vue d'ensemble de l'essai de perméabilité aux ions chlorures

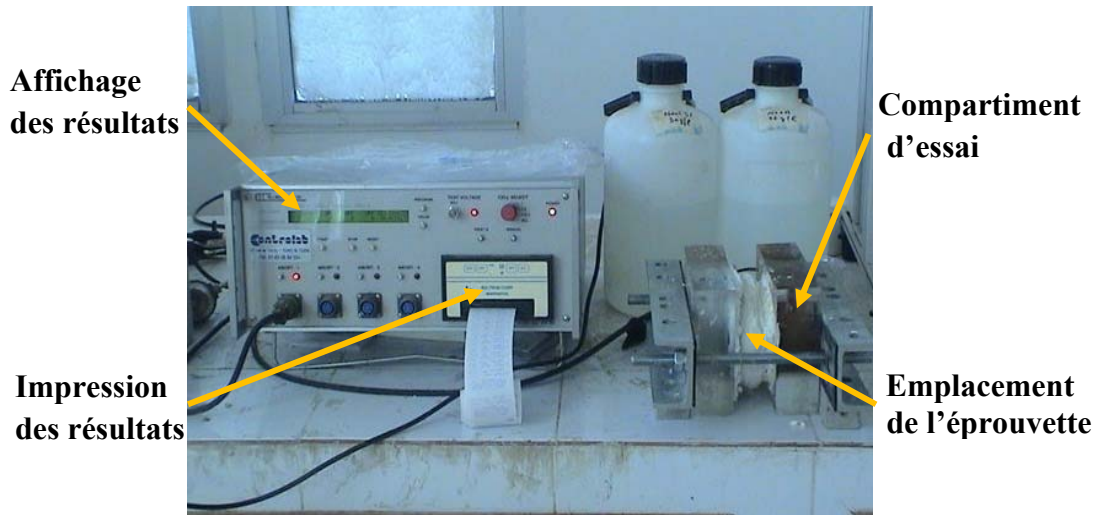


Figure 2.23: Appareil de mesure de la perméabilité aux ions chlorés

2.4. Mortiers

2.4.1. Formulations des mortiers à base de sable de concassage

L'objectif de cette partie était de caractériser le comportement des mortiers vis-à-vis des agents agressifs en fonction de temps d'immersion et du taux de substitution de filler calcaire au sable de concassage. Trois environnements agressifs ont été étudiés (solution de sulfate de magnésium, de sodium et de l'eau de mer). A cet effet, pour chaque environnement, quatre mortiers ont été formulés : un mortier de référence et trois mortiers dans lesquels le filler calcaire a été substitué au sable avec des taux de 0, 10, 15 et 20%, nommés respectivement M0, M10, M15 et M20. Le ciment utilisé est un ciment composé de la cimenterie de M'sila de type CEM II/A-L 42.5. Le sable est un sable calcaire de concassage (0/4mm), extrait de la carrière d'El Hachimia. La formulation retenue pour le mortier est présentée dans le tableau 2.11.

Tableau 2.11 : Formulation des mortiers

Désignation	M0	M10	M15	M20
Ciment (g)	450.0	450.0	450.0	450.0
Sable concassé (g)	1350.0	1215.0	1147.5	1080.0
Filler calcaire (g)	0.0	135.0	202.5	270.0
Rapport E/C	0.55			

M0* : Mortier à base de sable de concassage avec 0% de fines calcaires.

2.4.2. Confections et conservations des éprouvettes

Les mortiers ont été confectionnés selon la norme EN 196-1. Après malaxage des différents constituants dans un malaxeur de capacité 5 l (Figure 2.24/a) ; les mortiers ont été ensuite coulés dans des moules prismatiques ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) et ($25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$) et vibrés grâce à une table vibrante (Figure 2.24/b). Après coulage, les éprouvettes ont été protégées de la dessiccation par un film plastique. Les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures et conservées dans un bassin d'eau (HR = 100%, $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) pendant 60 jours. Après la cure initiale, les éprouvettes ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) et les éprouvettes ($25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$) ont été conservées dans différentes solutions agressives (Figure 2.25).

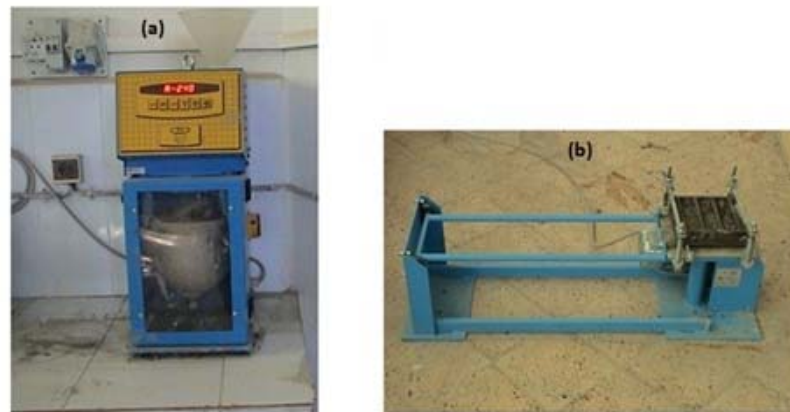


Figure 2.24 : a) Malaxeur de capacité 5 litre, b) Table vibrante pour mortier

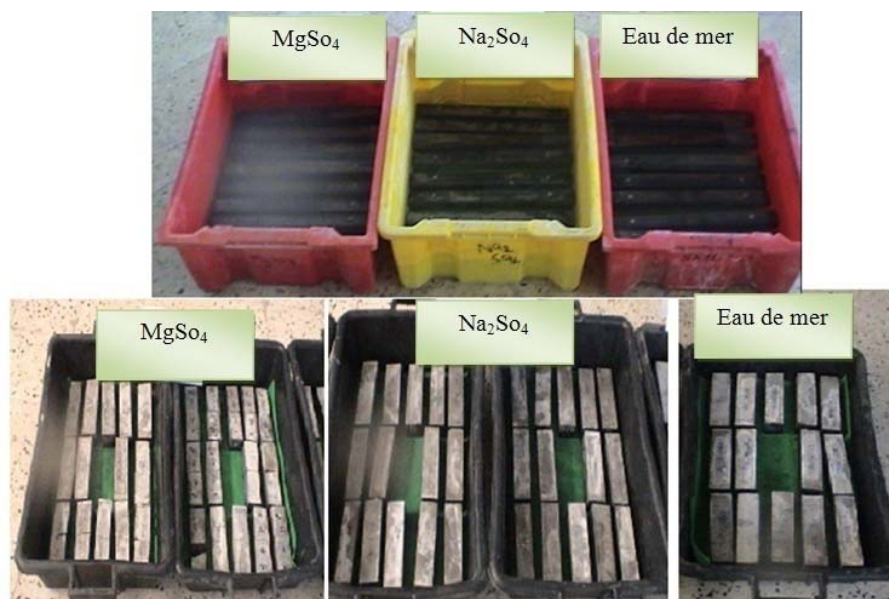


Figure 2.25: Echantillons de mortier immergés dans différentes solutions

2.4.3. Résistance des mortiers aux solutions sulfatique et l'eau de mer

a) Mesure de l'expansion

L'expansion des éprouvettes ($25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$) munies de plots métalliques, immergées dans différentes solutions agressives a été évaluée en fonction du temps à conformément à la norme ASTM C-1012. L'évolution de la concentration des solutions a été suivie à l'aide d'un PH-mètre (Figure 2.26).



Figure 2.26 : Appareil pour mesurer l'expansion des mortiers

b) Mesure de la perte de résistance

La perte de résistance à la compression des demi éprouvettes ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) a été évaluée en fonction de temps d'immersion dans les solutions chimiques (5% de sulfate de magnésium, 5% de sulfate de sodium et de l'eau de mer) conformément à la norme NF EN 196-1 [54]. Les essais de la résistance à la compression sur mortiers (Figure 2.27) ont été réalisés aux échéances de 15, 30, 90, 120 et 210 jours d'immersion.



Figure 2.27: Dispositif de l'essai de compression

c) Mesure de perte de masse

L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon du mortier à base de sable de concassage avec 0, 10, 15 et 20% de fines calcaires en fonction de temps d'immersion dans des différentes solutions sulfatique (5% de sulfate de magnésium, 5% de sulfate sodium et de l'eau de mer). La perte de masse a été déterminée par pesée selon la formule suivante:

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Où :

M_0 : masse de l'éprouvette avant l'immersion en (g),

M_i : masse de l'éprouvette à l'instant (i) d'immersion en (g).

2.5. Variables étudiées

Dans cette section, nous résumons le programme expérimental réalisé et les variables étudiés. L'étude expérimentale est divisée en deux parties. Dans la première partie expérimentale, nous avons étudié l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage et de l'environnement sur la durabilité du béton. Les pourcentages de fines calcaires utilisées sont de 0, 5, 10, 15, 20 et 25%. Deux modes d'environnements de cure ont été étudiés dans la présente étude : un environnement de cure humide dans l'eau (HR=100% et $T=20 \pm 2$ °C) pendant toute la durée de cure à l'extérieur du laboratoire (HR=variable et T=variable) après 7 jours de cure humide. Des essais ont été réalisés à court et à long terme, notamment l'essai d'ouvrabilité, masse volumique, porosité accessible à l'eau, absorption d'eau par capillarité et les essais de perméabilité (eau, gaz et ions chlorés). La figure 2.28 récapitule les essais réalisés sur le béton à base de sable de concassage. Enfin, dans la deuxième partie expérimentale, nous avons étudié l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage sur la durabilité des mortiers vis-à-vis des agents agressifs (les sulfates de magnésium, sodium et l'eau de mer). Les pourcentages de fines calcaires utilisés sont de 0, 10, 15 et 20%. Des essais de perte de résistance à la compression, expansion et perte de masse ont été réalisés. La figure 2.29 récapitule les essais réalisés sur le mortier à base de sable de concassage.

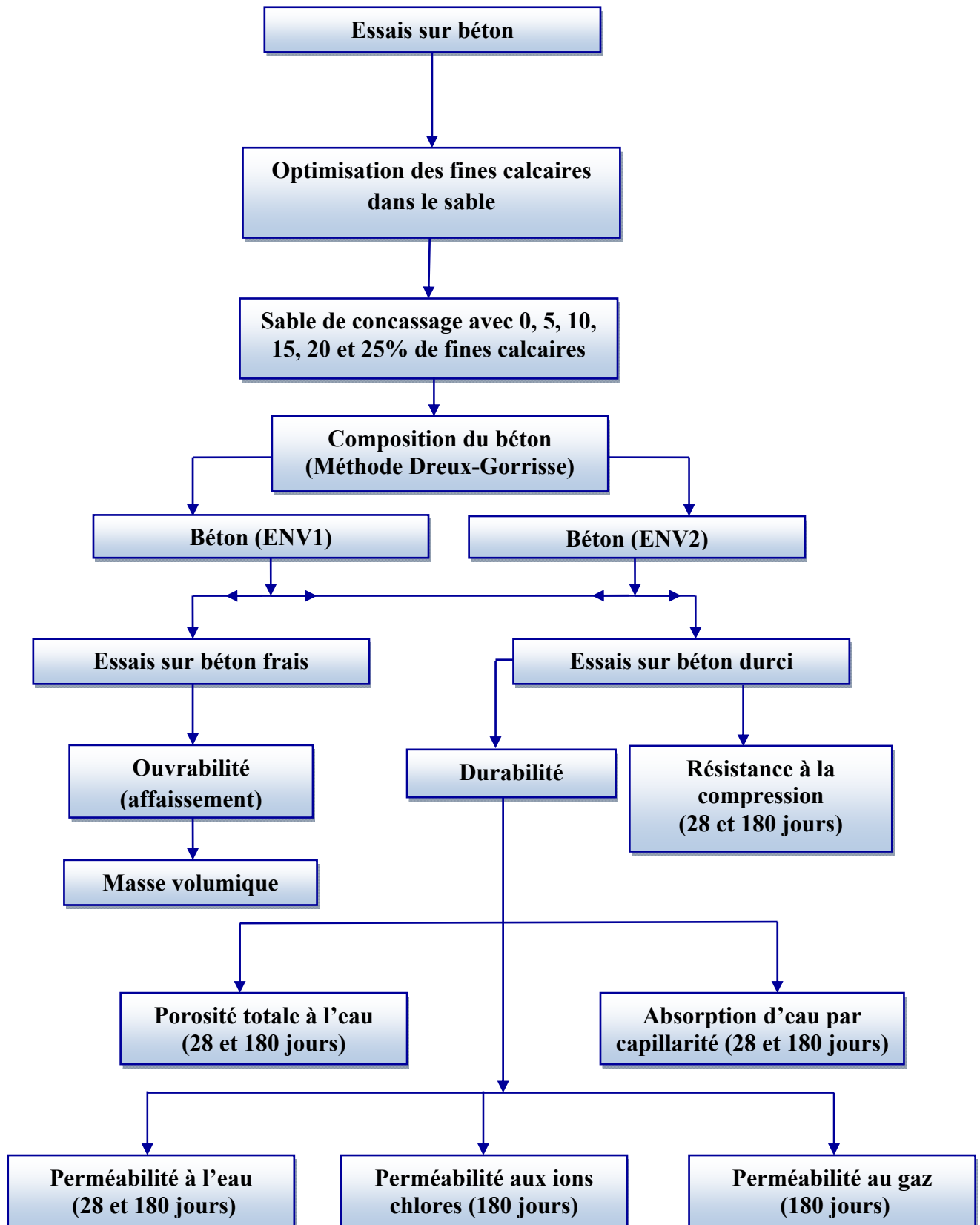


Figure 2.28 : Organigramme récapitulatif des différents essais réalisés sur le béton

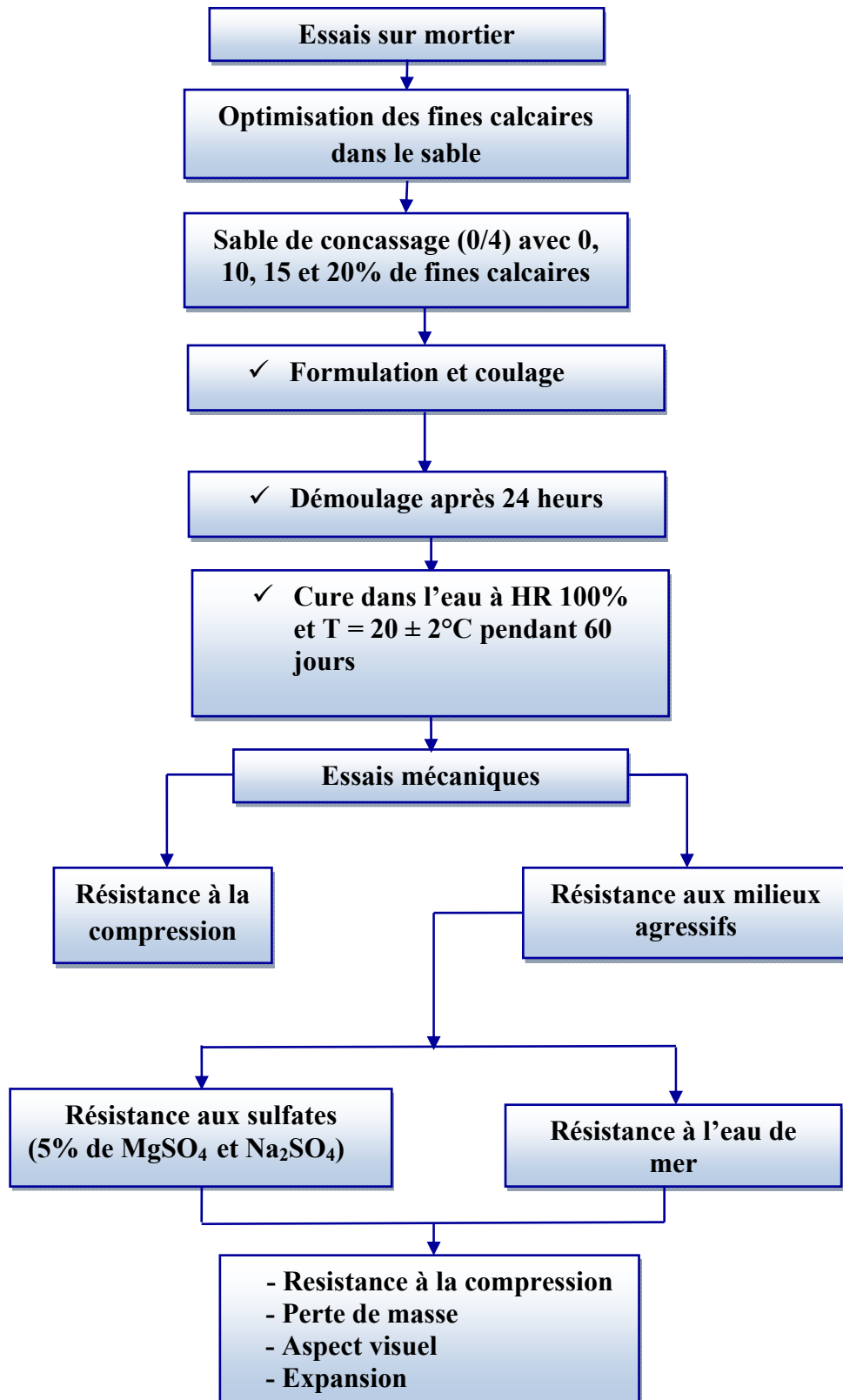


Figure 2.29 : Organigramme récapitulatif des différents essais réalisés sur le mortier

CHAPITRE 3

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus expérimentalement sur l'effet des fines calcaires issus du sable de concassage sur les propriétés physico-mécaniques et sur la durabilité du béton avec superplastifiant dans deux environnements de cure différents. Les résultats de la durabilité des mortiers à base de sable de concassage dans trois solutions agressives seront aussi présentés.

3.2. Béton frais

3.2.1. Ouvrabilité

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend capable à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. Dans cette étude, la mesure de l'ouvrabilité des différents bétons à base de sable de concassage a été mesurée conformément à la norme NFP 18-451 [45]. Après plusieurs tentatives d'essais préliminaires pour l'obtention d'une ouvrabilité satisfaisante, le rapport Eau/Ciment a été maintenu constant à 0.49 avec un dosage constant en superplastifiant (viscocrete 3045) de 1.5 % pour tous les mélanges des bétons étudiés. Les résultats obtenus de l'affaissement des bétons en fonction du pourcentage de fines calcaires sont représentés sur la figure 3.1. En augmentant le pourcentage des fines calcaires dans le sable concassé, on constate une diminution progressive de l'affaissement et par conséquent l'ouvrabilité. En comparaison avec le béton de concassage sans fines calcaires (B0), cette diminution est de l'ordre de 12, 36, 49, 74 et 77% pour les bétons avec 5, 10, 15, 20 et 25% de fines calcaires, respectivement. La valeur de l'affaissement la plus élevée est observée pour le béton de sable de concassage avec 0% de fines calcaires. Par ailleurs, le plus faible affaissement est observé pour le béton contenant 25% de fines calcaires substituées au sable. Cette diminution est due principalement à la forte absorption d'eau par les fines calcaires. La forte demande en eau est probablement due à l'augmentation de la porosité

des bétons avec l'accroissement des fines calcaires, et ainsi à la surface spécifique des grains du sable de concassage utilisés qui présentent des faces fraîchement rompues, induisant toujours une porosité systématique qui favorise une absorption d'eau élevée.

Ces résultats sont comparables à ceux trouvés par plusieurs chercheurs [2, 6, 15, 17, 20]. MENADI [2] a 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 différents types de ciments utilisés.

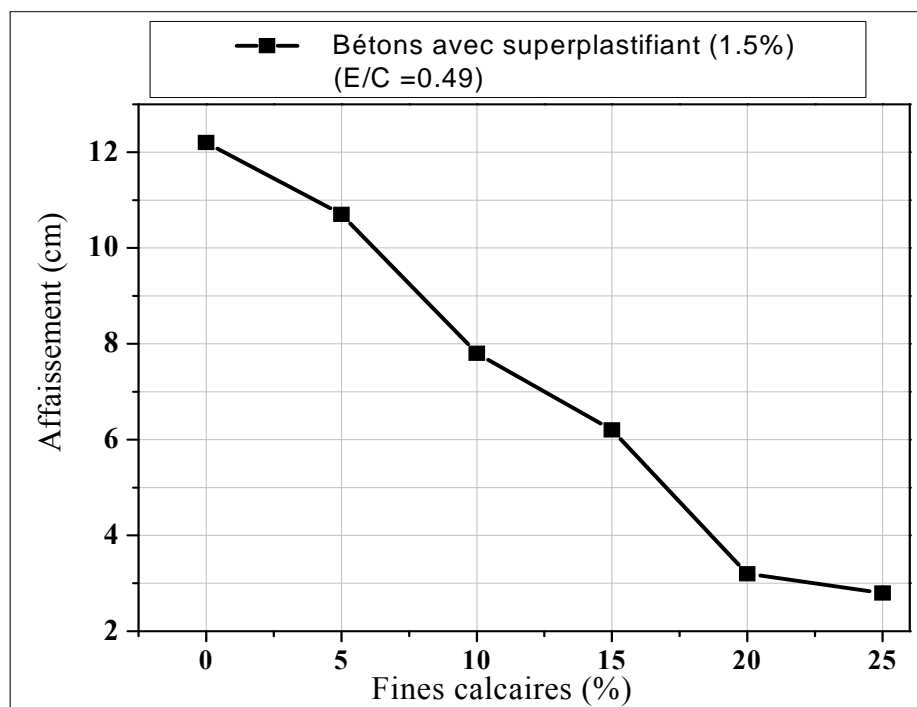


Figure 3.1: Effet des fines calcaires sur l'affaissement

L'utilisation d'un dosage de 1.5% en superplastifiant dans les mélanges de bétons à base de sable de concassage a permis d'augmenter l'ouvrabilité du béton frais (Figure 3.2). Soit une réduction du rapport Eau/Ciment de 24.60 % par rapport au béton de sable concassé sans superplastifiant. Cela, est dû à l'effet du superplastifiant qui permet de disperser les particules de ciment et de fines calcaires. Suite à cette dispersion, la fluidité du mélange augmente. Une augmentation de l'affaissement de l'ordre de 59, 57 et de 35.5% pour les bétons de sable de concassage avec 0, 5 et 15% de fines, respectivement, a

été trouvée lorsqu'un dosage de 1.5% de superplastifiant est utilisé en comparaison avec les bétons sans superplastifiant ($E/C = 0.65$) [17].

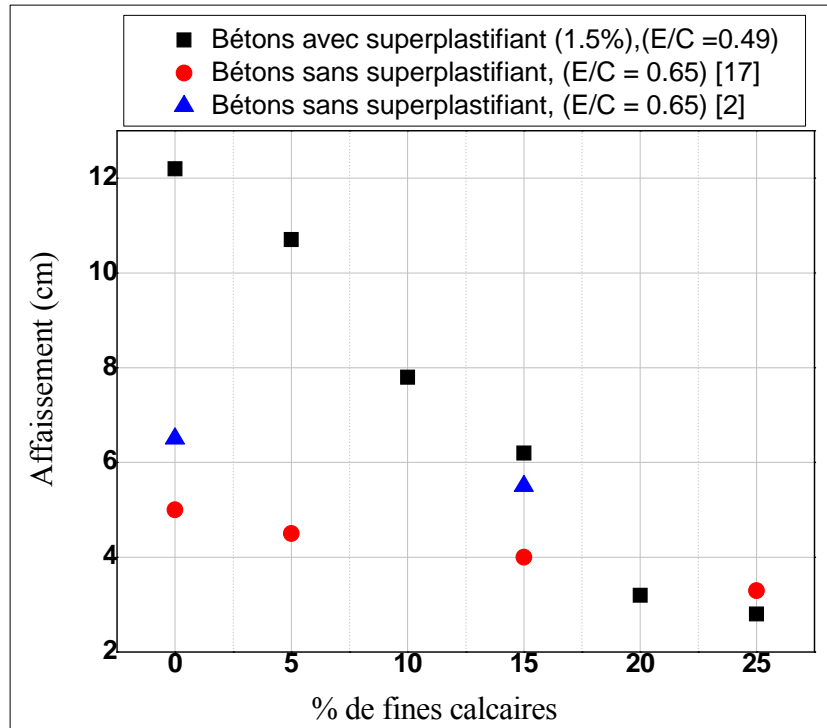


Figure 3.2: Effet du superplastifiant sur l'ouvrabilité

3.2.2. Masse volumique absolue

La figure 3.3 montre l'effet de fines calcaires substituées au sable de concassage sur la variation de la masse volumique du béton frais adjuvanté. Selon cette figure, on remarque une légère diminution de la masse volumique lorsque le pourcentage de fines calcaires varie de 0 à 10%. Cette diminution est due au faible dosage en fines calcaires, et donc moins de remplissage des vides dans le béton. En plus l'incorporation du superplastifiant permet de disperser les grains de ciment, et par conséquent augmente la fluidité des mélanges des bétons, ce qui peut être traduit par une diminution de la compacité. La compacité optimale est obtenue pour un taux de fines compris entre 10 et 15%. Au de-là de 15% de fines, on constate une diminution de la masse volumique jusqu'à 20% de fines, et devient comparable à celle de béton de référence pour 25% de fines calcaires. L'introduction de 15% de fines calcaires dans la composition des mélanges entraîne une augmentation de la masse volumique de 3% par rapport au béton sans fines

calcaires. Ces résultats sont en concordance avec plusieurs travaux [23, 25]. GUEMMADI [23] a trouvé une compacité optimale des bétons frais à 16% de fillers calcaires substitués au sable avec un rapport E/C variant de 0.56 à 0.59 selon le type de sable utilisé. La compacité optimale des bétons avec différents sables peut être due au remplissage des vides existant entre les particules [22]. SADHOUARI et al [25], ont montré que la densité réelle du béton augmente rapidement pour les taux de fines allant de 0 à 15%. Au delà de 15%, une diminution est observée. Les fillers calcaires ont contribué à densifier la pâte du béton frais en réduisant les pores et par conséquent la compacité augmente.

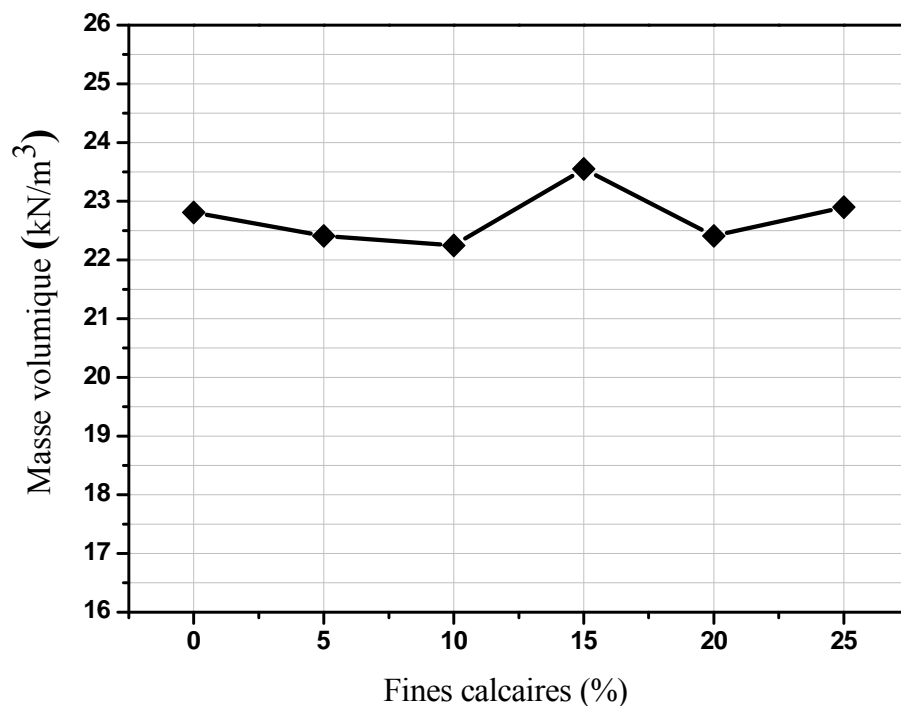


Figure 3.3 : Effet des fines calcaires sur la masse volumique absolue du béton frais

3.3. Béton durci

3.3.1. Résistance à la compression

✓ Environnement 1 (ENV1) : Cure humide complète ($T = 20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=100\%$)

Les résultats de la résistance à la compression en fonction de la durée de cure humide (28 et 180 jours) des bétons à base de sable de concassage contenant différents pourcentages de fines calcaires sont donnés dans le tableau 3.1 et illustrés sur la figure 3.4.

Les pourcentages de fines calcaires sélectionnés dans cette première phase expérimentale sont respectivement 0, 5, 10, 15, 20 et 25%. Le béton étudié est un béton ordinaire de rapport E/C =0.49 et de dosage en superplastifiant de 1.5% en poids du ciment. Pour des bétons de faible pourcentage de fines calcaires allant de 0 à 15%, on remarque une augmentation de la résistance à la compression quelque soit l'âge de cure. En effet, cette augmentation est due à l'évolution de l'hydratation du ciment au cours du temps. Au delà d'un taux de 15% de fines, on observe une chute progressive de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage des fines calcaires. Cette diminution de résistance est probablement due à l'effet de dilution [1, 2, 55]. Selon ces résultats, on peut noter que le pourcentage optimal de fines calcaires substitués au sable se situe entre 10 et 15% à l'âge de 28 et 180 jours de cure. La résistance optimale est obtenue à 15% de fines calcaire.

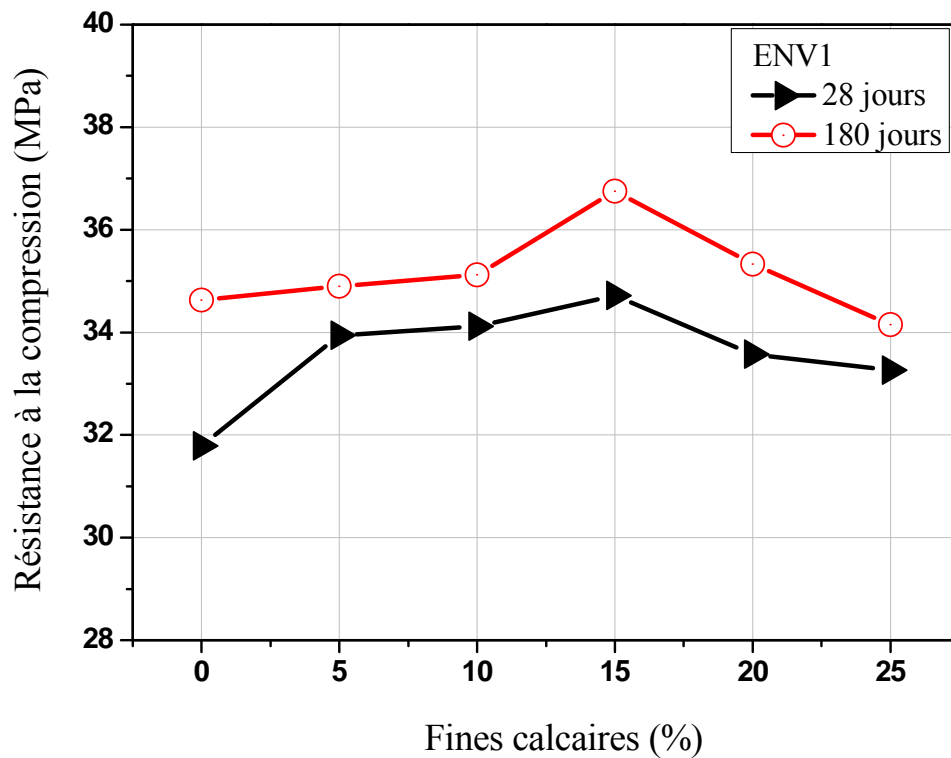


Figure 3.4 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 28 et 180 jours

Tableau 3.1: Résistance à la compression des différents bétons étudiés
à 28 et 180 jours de cure humide

Mélanges	B0	B5	B10	B15	B20	B25
R_{c28} (MPa)	31.21	33.53	34.38	33.52	33.48	33.22
	32.37	34.28	33.84	35.36	34.05	33.49
	31.79	34.01	34.14	35,27	33.18	33.06
	$\chi = 31.79$ $\sigma = 0.82$	$\chi = 33.94$ $\sigma = 0.38$	$\chi = 34.12$ $\sigma = 0.40$	$\chi = 34.72$ $\sigma = 1.04$	$\chi = 33.57$ $\sigma = 0.44$	$\chi = 33.26$ $\sigma = 0.22$
R_{c180} (MPa)	35.66	36.41	36.27	37.02	35.85	33.94
	34.75	34.59	34.57	36.60	34.93	34.36
	33.47	33.71	34.52	36.63	35.20	34.15
	$\chi = 34.63$ $\sigma = 1.10$	$\chi = 34.90$ $\sigma = 1.34$	$\chi = 35.12$ $\sigma = 1.00$	$\chi = 36.75$ $\sigma = 0.17$	$\chi = 35.33$ $\sigma = 0.74$	$\chi = 34.15$ $\sigma = 0.30$

B5* : Mélange du béton avec 5% de fines calcaires substitué au sable de concassage

χ^* : Moyenne

σ^* : Ecart type

La figure 3.4 montre une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de l'âge de cure. Les taux d'augmentation de la résistance à la compression à l'âge de 180 jours par rapport à l'âge de 28 jours de cure des bétons avec 0, 5, 10, 15, 20 et 25% de fines calcaires sont de 9, 3, 3, 6, 5 et 3%, respectivement. Cet effet est dû à l'évolution du développement de la résistance avec l'âge de cure. A 28 jours de cure, le béton B5 présente une meilleure résistance à la compression par rapport au béton de référence, (taux d'augmentation est d'environ 7%). Par ailleurs, à l'âge de 180 jours de cure humide, on constate une légère augmentation de la résistance à la compression du béton B5 par rapport au béton B0 qui est de l'ordre de 1% (tableau 3.2). Pour les bétons contenant 25% de fines calcaires, on constate une augmentation de la résistance à la compression de 3% par rapport au béton sans fines à l'âge de 28 jours de cure. Cependant, une diminution de l'ordre de 2.80% est observée à l'âge de 180 jours (Tableau 3.2). L'amélioration de la résistance à la compression des bétons avec fines calcaires peut être attribuée à l'effet du superplastifiant. On peut, aussi remarquer que l'utilisation des taux de fines calcaires jusqu'à 20% de fines comme substitution au sable de concassage dans le

béton n'affecte pas la résistance à la compression en comparaison avec le béton de référence.

Tableau 3.2 : Taux d'évolution de la résistance à la compression du béton avec fines calcaires par rapport au béton de référence

Fines calcaires (%)	5	10	15	20	25
R_{c28} (%)	6.76	7.33	9.22	5.66	3.29
R_{c180} (%)	0.78	1.41	6.12	2.02	-2.85

Ces résultats expérimentaux confirment les résultats trouvés par plusieurs chercheurs [2, 3, 5, 6, 7, 15, 17, 23, 25, 26]. MENADI [2], a montré que pour 15% de fines calcaires substitués au sable de concassage, le béton à l'âge de 90 jours de cure humide présente une diminution de la résistance à la compression de 6 à 15% par rapport au béton sans fines quelque soit le type de ciment utilisé. KENAI et al [3], ont montré une augmentation de la résistance à la compression des mortiers contenant de fines calcaires substituées au sable ($E/C=0.55$) avec l'évolution du temps, et la résistance optimale obtenue a été à 15% de fines calcaires. RAMIREZ et al [5], ont trouvé que la résistance à la compression des mortiers augmente pour des pourcentages des fines allant jusqu'à 20%, en l'absence d'argile dans le sable. LI BEIXING et al [6], ont noté une amélioration de la résistance à la compression des bétons contenant 10 à 15% de fines calcaires dans le sable à l'âge de 28 jours de cure. Cette amélioration est due aux particules de fines calcaires qui agissent comme les sites de nucléation pour les réactions de CH et C-S-H au cours de l'hydratation. Topçu et al [7], ont conclu que l'incorporation de 7 à 10% de filler dans le sable de concassage améliore la résistance à la compression du béton avec l'augmentation du dosage en ciment. HEBBOUCHE [15] a constaté une augmentation de la résistance à la compression du béton avec l'augmentation de l'âge de cure humide pour un taux de fines calcaires dans le sable allant jusqu'à 15%. SKENDER [17] a observé une amélioration de la résistance à la compression à 60 et 90 jours du béton contenant 5% de fines calcaires substitués au sable de concassage pour tous les ciments utilisés. Par ailleurs, pour le béton à 15 % de fines, la résistance à la compression est comparable à celle de référence.

✓ Environnement 2 (ENV2) : Cure humide initiale de 7 jours suivi d'une cure à l'air libre

Les résultats expérimentaux de la résistance à la compression à 28 et 180 jours sur des bétons auxquels est appliquée une cure humide initiale de 7 jours suite à une cure à l'air libre sont présentés dans le tableau 3.3 et illustrés sur les figures 3.5 et 3.6. À l'âge de 28 jours, on remarque une augmentation importante de la résistance à la compression des bétons contenant 5 et 10% de fines calcaires, par rapport au béton de référence. Au delà d'un taux de 10% de fines calcaires, une chute de résistance est observée. Le taux de développement de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours de cure (ENV2) est de 16, 17, 13, 11 et 7% pour les bétons avec 5, 10, 15, 20 et 25% de fines, respectivement. A l'âge de 180 jours, on observe une augmentation de la résistance à la compression des bétons avec des taux de fines allant de 0 à 15%. Au de-là de 15% de fines, on observe une chute remarquable de la résistance à la compression. La résistance maximale est obtenue pour les bétons avec 15% de fines calcaires, dont le taux d'accroissement est de l'ordre de 15% par rapport au béton sans fines calcaires.

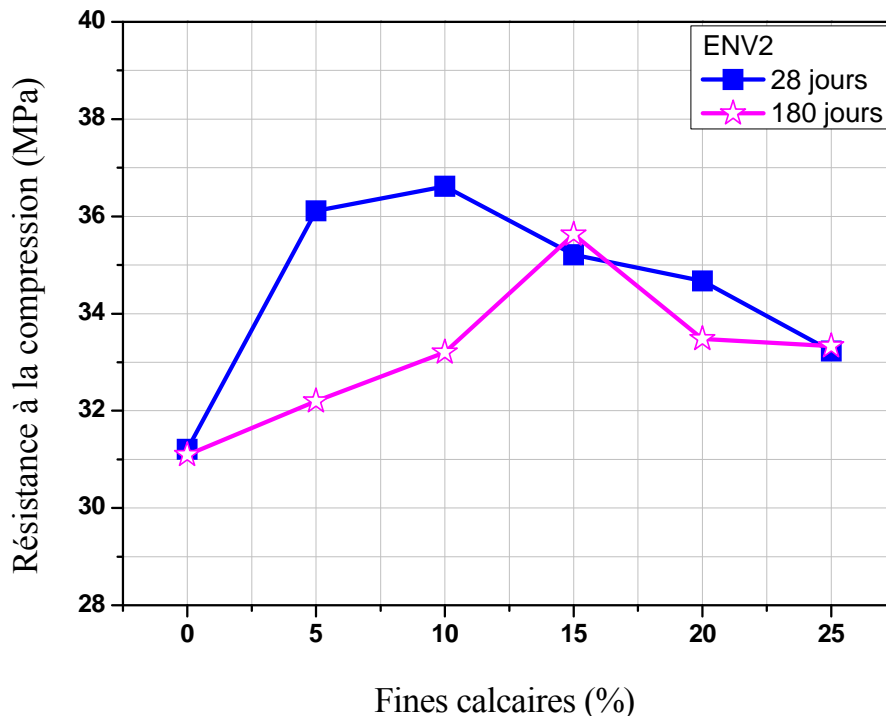


Figure 3.5 : Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression à 28 et 180 jours (ENV2)

Tableau 3.3: Résistance à la compression des différents bétons étudiés à 28 et 180 jours avec cure humide initiale de 7 jours et cure à l'air libre

Mélanges	B0	B5	B10	B15	B20	25
R_{c28} (MPa)	30,42	37,07	36,58	35,54	34,60	33,34
	32,16	36,19	36,42	34,97	35,04	32,94
	31,04	35,08	36,86	35,11	34,37	33,40
	$\chi = 31.21$ $\sigma = 0.88$	$\chi = 36.11$ $\sigma = 1.00$	$\chi = 36.62$ $\sigma = 0.34$	$\chi = 35.25$ $\sigma = 0.33$	$\chi = 34.67$ $\sigma = 0.52$	$\chi = 33.23$ $\sigma = 0.40$
R_{c180} (MPa)	31,35	32,28	33,32	35,29	33,70	33,40
	30,85	31,81	33,04	35,68	33,54	33,11
	31,06	32,52	33,23	35,93	33,20	33,48
	$\chi = 31.09$ $\sigma = 0.34$	$\chi = 32.20$ $\sigma = 0.36$	$\chi = 33.20$ $\sigma = 0.18$	$\chi = 35.63$ $\sigma = 0.32$	$\chi = 33.48$ $\sigma = 0.40$	$\chi = 33.33$ $\sigma = 0.31$

B0* : Mélange du béton avec 0% de fines calcaires substitué au sable de concassage

χ^* : Moyenne

σ^* : Ecart type

Une comparaison de la résistance à la compression à 28 et 180 jours des éprouvettes conservés à l'environnement 2 est donnée sur la figure 3.6. On remarque une diminution de la résistance à la compression à 180 jours en comparaison avec la résistance en compression à 28 jours de cure. Cette diminution est plus importante à des taux de fines de 5 et 10%. Cet effet, est dû probablement à l'hydratation incomplète du ciment par manque d'humidité, ce qui a conduit à une baisse des résistances [56]. Il faut noter que, les éprouvettes ont été réalisées pendant la période d'été, où la température peut atteindre plus de 40°C et une humidité relative (HR) qui ne dépasse pas 70%. La résistance optimale est observée pour les bétons de sable de concassage contenant 10 et 15% de fines calcaires à l'âge de 28 et 180 jours, respectivement.

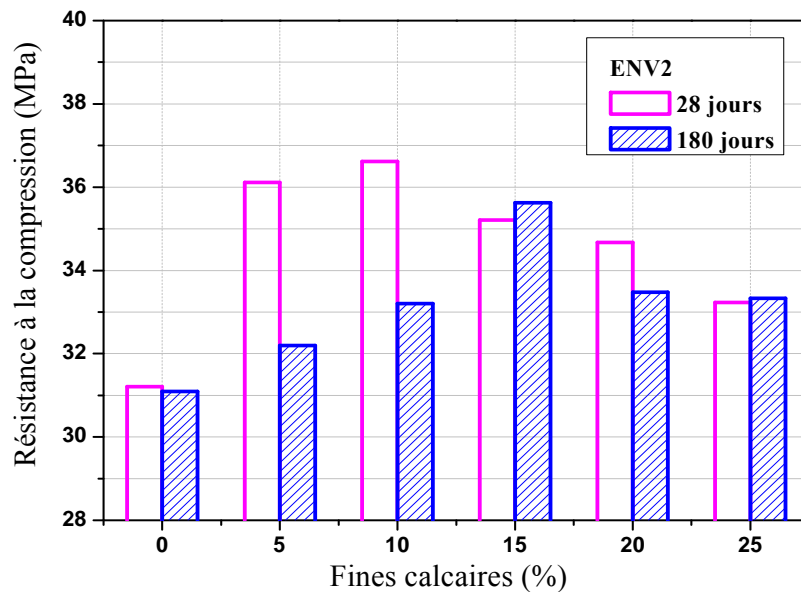


Figure 3.6: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des bétons à 28 et 180 jours (ENV2)

✓ Comparaison de la résistance en compression des bétons entre l'environnement de cure 1 et 2

Les figures 3.7 et 3.8 présentent l'influence des différents modes de cure (ENV1 & ENV2) sur la résistance à la compression des bétons à base de sable de concassage à 28 et 180 jours. A l'âge de 28 jours, pour les bétons avec des pourcentages de fines allant de 0 à 5%, on remarque une augmentation de la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans l'environnement 2 par rapport à l'environnement 1. Ceci peut être dû au développement de l'hydratation du ciment entre la cure humide complète et la cure humide initiale de 7 jours suivie d'une cure à l'air libre. L'ajout de superplastifiant aux pâtes contenant du filler calcaire permet d'avoir une meilleure défloculation des particules de ciment et de filler. Cela donne une certaine fluidité au mélange et permet une meilleure hydratation en augmentant la surface de contact entre l'eau et le ciment. L'utilisation d'un superplastifiant de type polycarboxylate accélère la réaction d'hydratation à très jeune âge [57]. Selon la figure 3.9, le développement de la résistance à la compression des différents mélanges de bétons contenant des fines calcaires conservés dans les deux modes de cure (ENV1 & ENV2) à l'âge de 28 jours de cure est un peu variable. On constate, une augmentation de résistance de 6 et 7% pour le béton B5 et B10, respectivement dans le cas

de l'environnement 2 par rapport aux bétons de l'environnement 1. Cependant, des résistances comparables sont notées pour les bétons B0, B15, B20 et B25. A l'âge de 180 jours de cure, on constate que la cure humide prolongée (ENV1) a un effet très positif sur la résistance à la compression des bétons à base de sable de concassage en comparaison à l'environnement extérieur (ENV2).

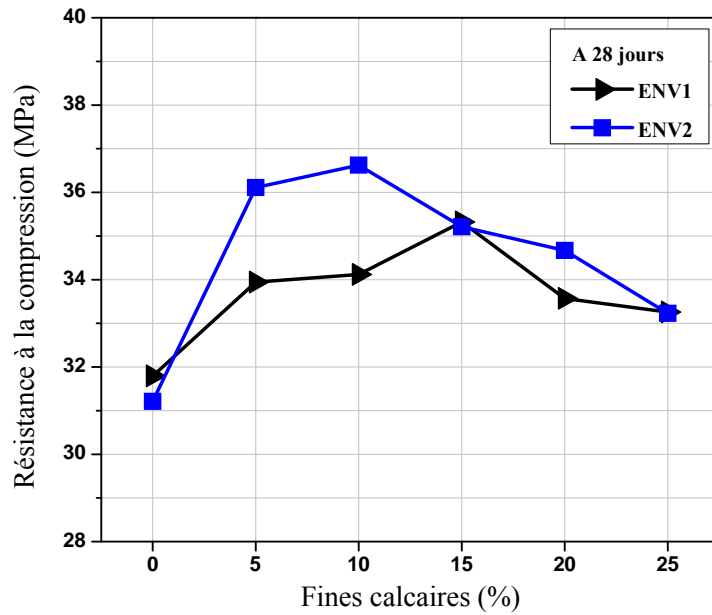


Figure 3.7: Effet de mode de cure sur la résistance à la compression des bétons à 28 jours

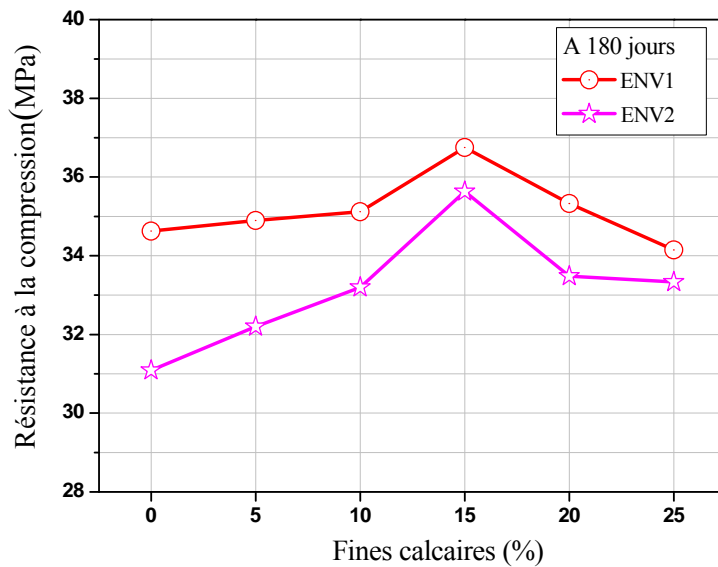


Figure 3.8: Effet de mode de cure sur la résistance à la compression des bétons à 180 jours

3.3.2. Porosité accessible à l'eau

Les résultats de porosité accessible à l'eau pour les différents mélanges des bétons étudiés pour les deux environnements de cure à 28 et 180 jours sont présentés dans le tableau 3.4 et illustrés sur les figures 3.9 et 3.10. Pour les mélanges de bétons conservés dans l'environnement 1, on remarque une diminution importante de la porosité accessible à l'eau des bétons avec et sans fines calcaires avec l'augmentation de l'âge de cure. Le taux de diminution à 28 et 180 jours de cure est de L'ordre de 41, 60, 49, 54, 37 et 45% pour B0, B5, B10, B15, B20 et B25, respectivement. En effet, cette diminution est probablement due au filler calcaire qui occupe une partie des vides intergranulaires et réduit les espaces qui constituent la porosité totale [57]. De même, le superplastifiant aide à donner une meilleure défloculation du ciment, ce qui engendre une meilleure hydratation réduisant les espaces des vides entre les grains [24, 57]. Il faut noter que les porosités obtenues sont largement inférieures à celle obtenu par MENADI [2], pour les bétons contenant 0 et 15 % de fines calcaires avec un rapport E/C constant de 0.65 et sans superplastifiant.

En ce qui concerne l'environnement 2 de cure, l'incorporation des fines calcaires diminue la porosité accessible à l'eau à 28 jours. A l'âge de 180 jours, on remarque une légère diminution de la porosité accessible à l'eau pour les bétons B5 et B10, et une faible augmentation pour les bétons B15, B20 et B25. A tire de comparaison, on remarque que les bétons soumis à l'environnement 1 présentent des porosités inférieures à celle de l'environnement 2 à l'âge de 180 jours de cure. Ceci nous montre clairement l'avantage d'une cure humide prolongée (ENV1).

Tableau 3.4 : Porosité accessible à l'eau des différents mélanges étudiés à 28 et 180 jours.

Mélanges de bétons			B0	B5	B10	B15	B20	B25
Porosité ε (%)	ENV1	28 jours	14.58	13.86	13.08	14.54	12.48	12.38
		180 jours	8.61	8.35	6.72	6.74	7.84	6.85
	ENV2	28 jours	11.68	10.1	10.57	10.27	10.96	11.03
		180 jours	11.5	11.01	11.22	12.48	12.99	12.74

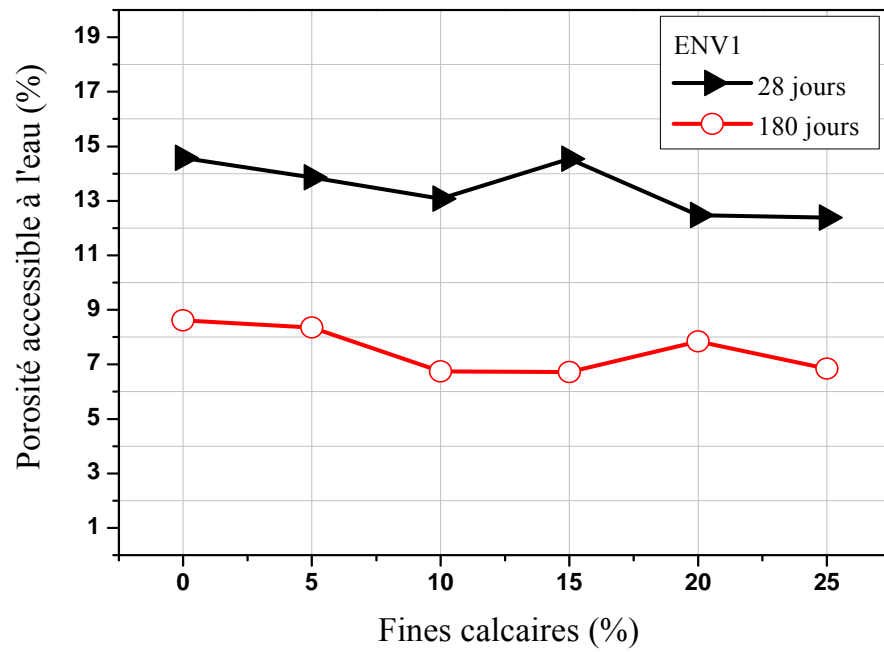


Figure 3.9 : Effet des fines calcaires et de cure humide sur la porosité accessible à l'eau à 28 et 180 jours

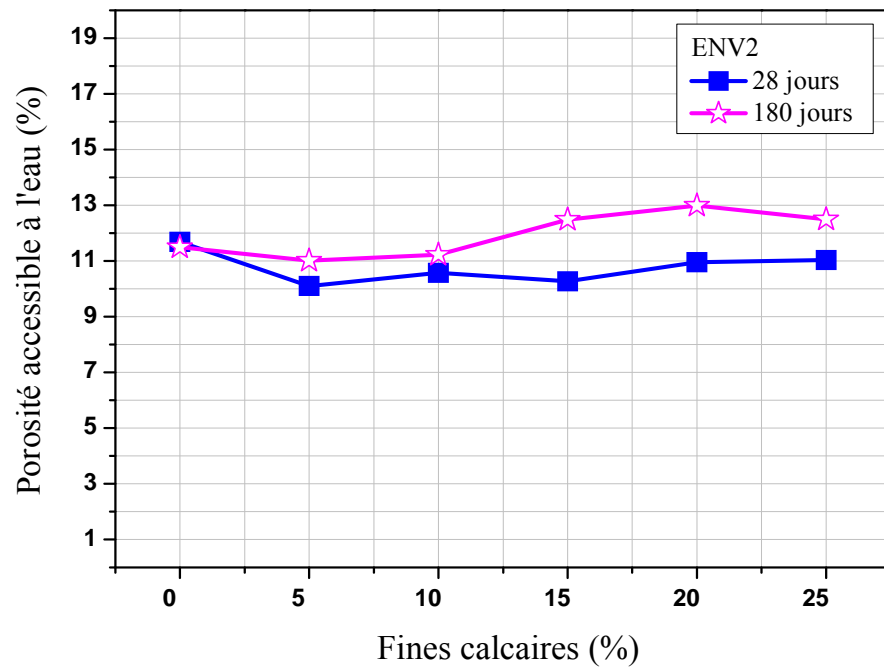


Figure 3.10 : Effet des fines calcaires et de cure humide initiale de 7 jours suivent d'une cure à l'air libre sur la porosité accessible à l'eau à 28 et 180 jours

La figure 3.11 montre la relation entre la résistance à la compression et la porosité totale à l'eau des différents mélanges des bétons étudiés. On constate une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de la porosité totale à l'eau. En effet, La résistance à la compression augmente avec l'âge en fonction de l'augmentation du volume des produits d'hydratation, et donc à mesure que la porosité diminue. Pour cela, on peut dire que la porosité est une fonction inverse de la résistance à la compression. Outre leur volume, la forme et la taille des pores peuvent aussi influencer la résistance. Une bonne corrélation ($R = 0.47$) a été observée entre le logarithmique de porosité (ϵ) et la résistance à la compression (R_c) de façon linéaire, et les résultats de ces dernières peuvent être représentée par l'équation suivante :

$$R_{c=} = a + b (\epsilon) \quad (3.1)$$

Avec a, b des constantes qui sont dans notre cas 41,4 et -7,10, respectivement.

Cette corrélation obtenue est un peu plus faible par rapport à d'autres chercheurs qui, ont trouvé une bonne corrélation non linéaire ($R^2 = 0.85$) entre la porosité et la résistance à la compression avec une relation de forme exponentielle, ou une bonne corrélation linéaire ($R = 0.93$) [2, 35].

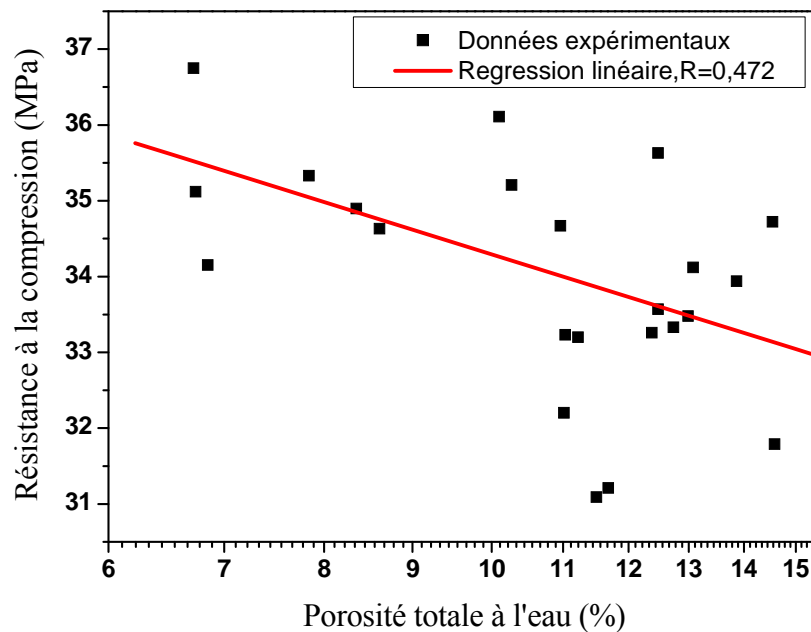


Figure 3.11 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau

3.3.3. Absorption d'eau par capillarité et sorptivité

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec dépend de deux paramètres majeurs à savoir la porosité du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (sorptivité).

La sorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité dans le béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorption capillaire est faible [58]. Les résultats expérimentaux sur l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité et la sportivité des mélanges de bétons à base de sable de concassage contenant 0, 5, 10, 15, 20 et 25% de fines calcaires, et conservés dans différents modes de cure sont présentés sur les figures 3.12 à 3.13. Afin de faciliter la comparaison des résultats obtenus entre les différents bétons de l'environnement 1 et 2, l'absorption capillaire à 64 minute et la cinétique de cette absorption (sorptivité) ont été calculées et présentées sur le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Résultats concernant l'absorption d'eau par capillarité à 64 minute et sorptivité des bétons (ENV1 & ENV2)

Mélange des bétons			B0	B5	B10	B15	B20	B25
Quantité d'eau absorbée en (g/cm ²) x10 ⁻³	ENV1	28 j	60.42	128.53	122.21	172.31	64.92	96.12
		180j	65.40	89.35	81.18	78.82	73.09	80.83
	ENV2	28 j	349.23	185.69	247.39	290.77	194.75	226.36
		180 j	154.32	125.97	160.69	154.93	159.94	152.78
Sorptivité (g/cm ² .s ^{1/2}) x10 ⁻³	ENV1	28 j	0.88	2.25	2.00	2.93	1.00	1.60
		180 j	1.09	1.57	1.40	1.33	1.21	1.31
	ENV2	28 j	5.85	3.14	4.29	5.00	3.33	3.77
		180 j	2.57	2.00	2.60	2.50	3.20	3.00

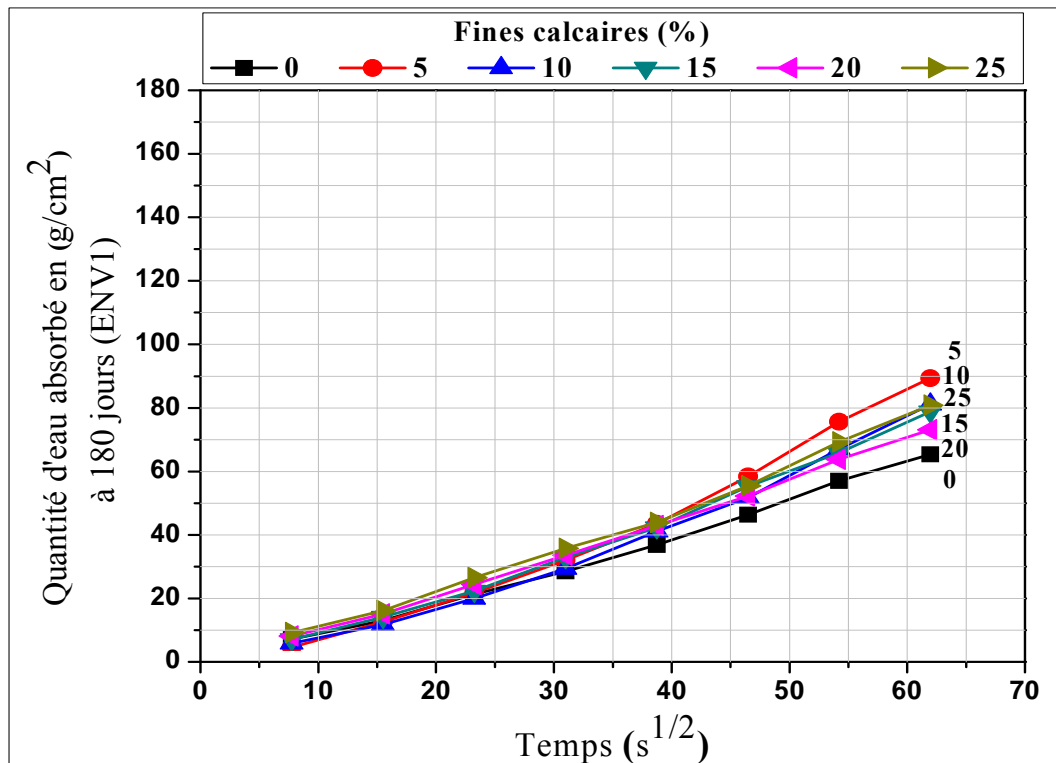
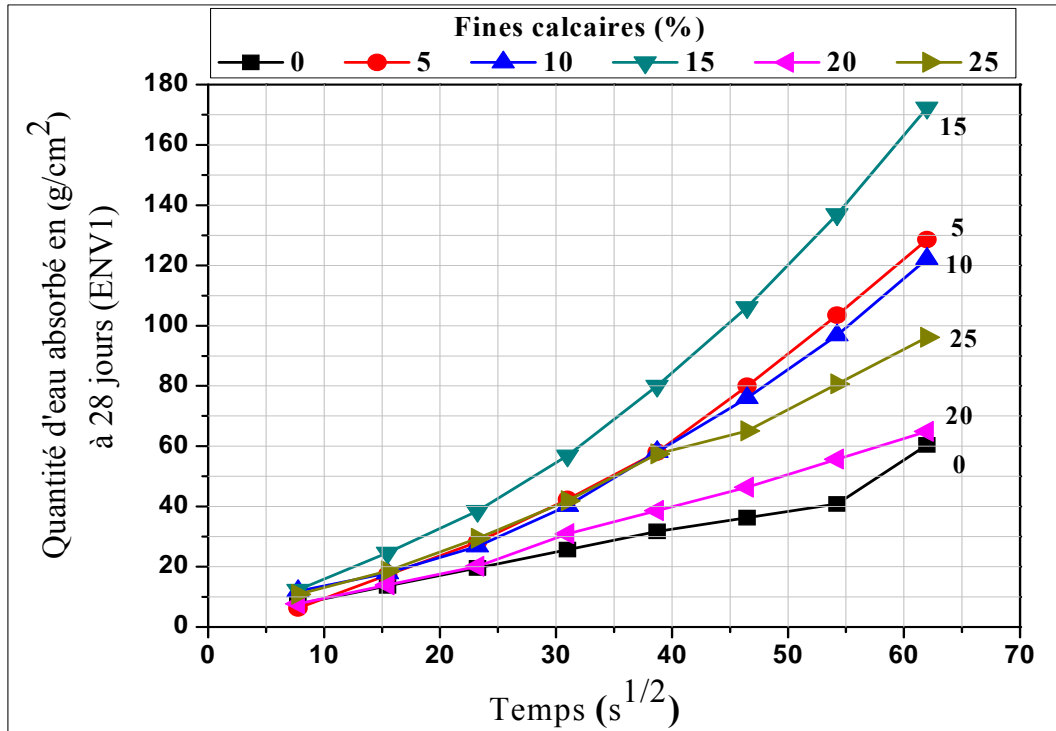


Figure 3.12: Absorption d'eau capillaire des bétons à base de sable de concassage à 28 et 180 jours (ENV1)

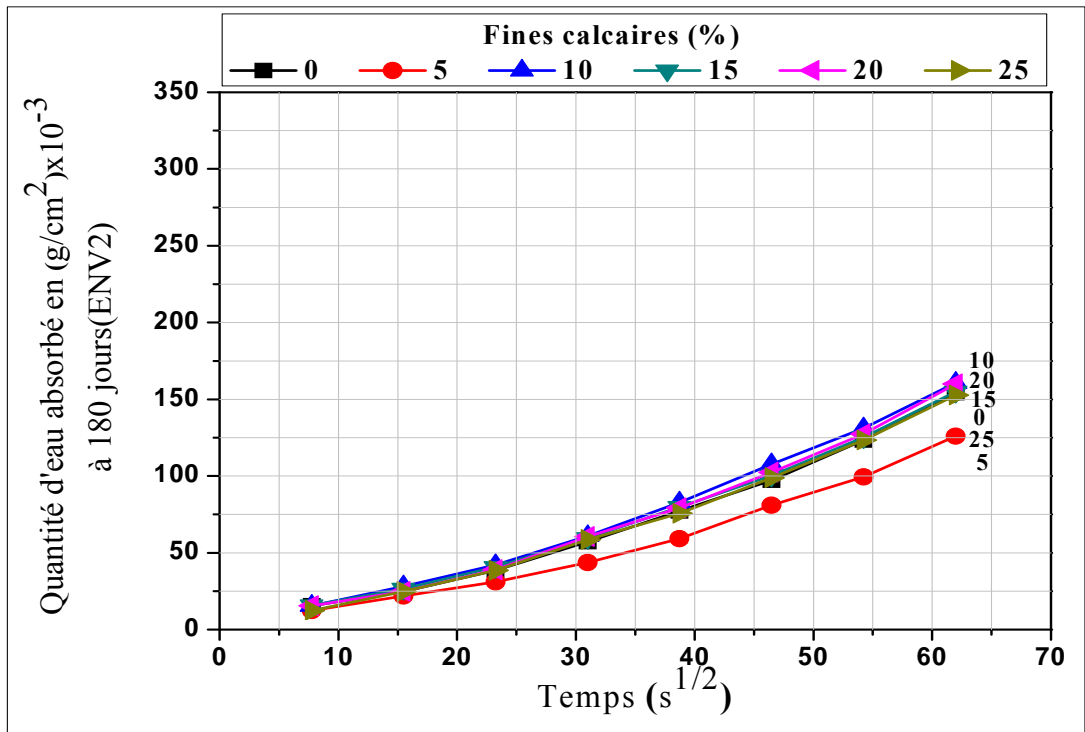
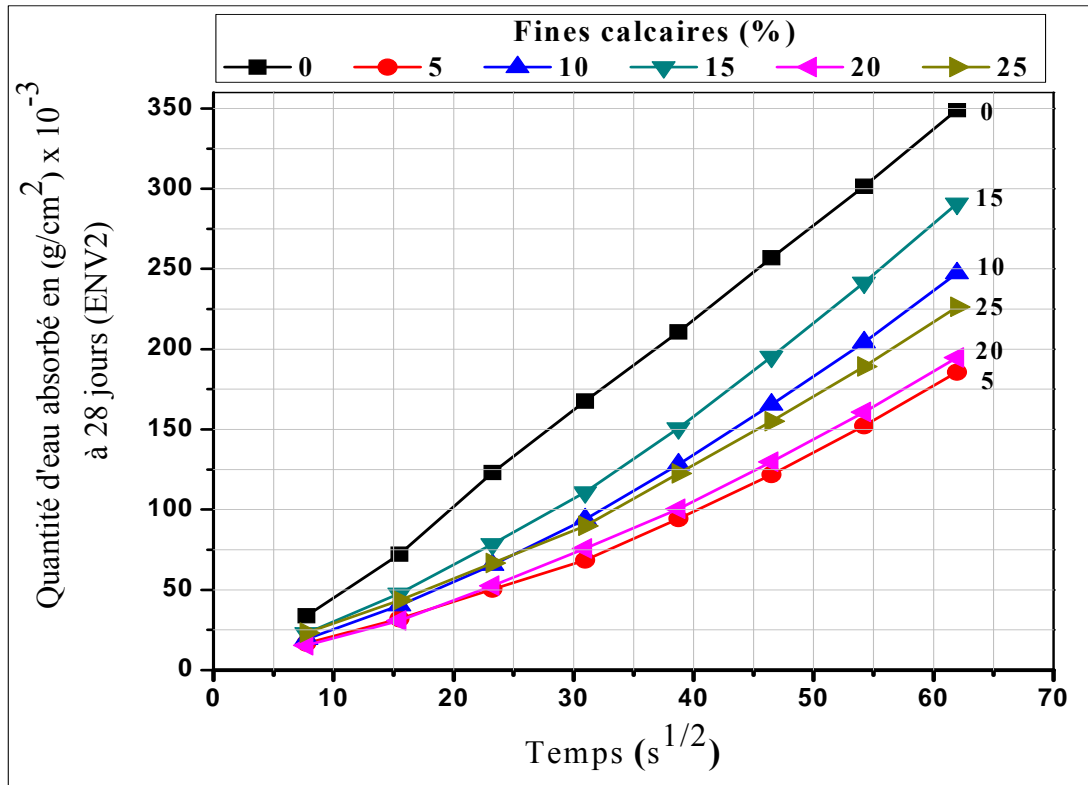


Figure 3.13: Absorption d'eau capillaire des bétons à base de sable de concassage à 28 et 180 jours (ENV2)

La figure 3.12 montre la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps pour tous les mélanges des bétons à base de sable de concassage avec et sans fines calcaires à l'âge de 28 et 180 jours de cure humide prolongée. On constate que l'absorption d'eau par capillarité augmente avec l'augmentation du temps pour tous les taux de fines calcaires substituées au sable et quelque soit l'âge de cure. On peut noter aussi que le coefficient d'absorption capillaire augmente avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires à 28 jours de cure. Le béton B15 et B5, présentent le coefficient d'absorption capillaire le plus élevé par rapport au béton de référence (B0) à l'âge de 28 et 180 jours de cure, respectivement; soit une augmentation de 59 et 37% pour une durée d'absorption de 64 mn (Tableau 3.5). Par ailleurs, dans le cas de l'environnement 2 (ENV2), l'absorption maximale est enregistrée pour les bétons B0 et B10 à l'âge de 28 et 180 jours de cure, respectivement. La composition des bétons des deux environnements est similaire et l'augmentation de l'absorption d'eau observée entre ces deux bétons n'est due qu'à la différence des modes de cure, qui se traduit par des comportements différents.

Les valeurs de la sorptivité obtenus à l'âge de 28 et 180 jours de cure dans les deux environnements, varient de $0.88 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ à $5.85 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ (Figure 3.14). L'incorporation des fines calcaires augmente la sorptivité des bétons dans l'environnement 1 (ENV1) par rapport au béton de référence. Cependant, dans l'environnement 2 (ENV2) une légère diminution de la sorptivité est obtenue à l'âge de 28 jours, et une faible augmentation à l'âge de 180 jours pour les bétons B10, B20 et B25.

Le rôle de la cure humide est primordial pour tous les ciments à activité lente; c'est le cas de ceux qui comportent des constituants secondaires (CEM II) pour lesquels l'eau libre doit rester suffisamment longtemps disponible dans le béton, aussi bien près de la surface qu'au cœur [56]. L'effet de cure sur la sorptivité des différents mélanges de bétons à base de sable de concassage à l'âge de 28 et 180 jours est clairement montré sur la figure 3.15.

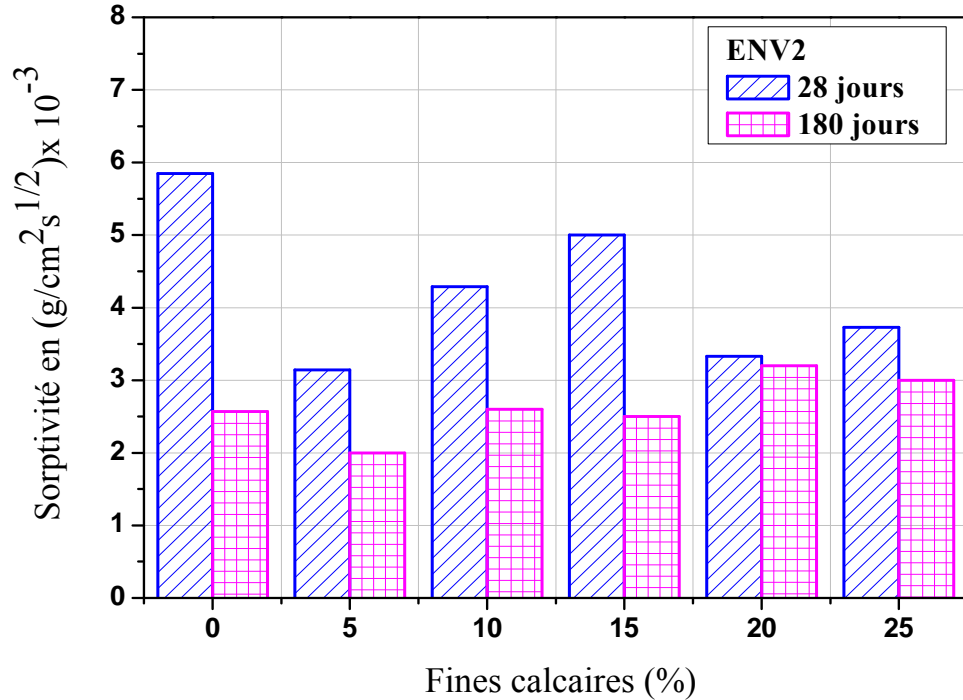
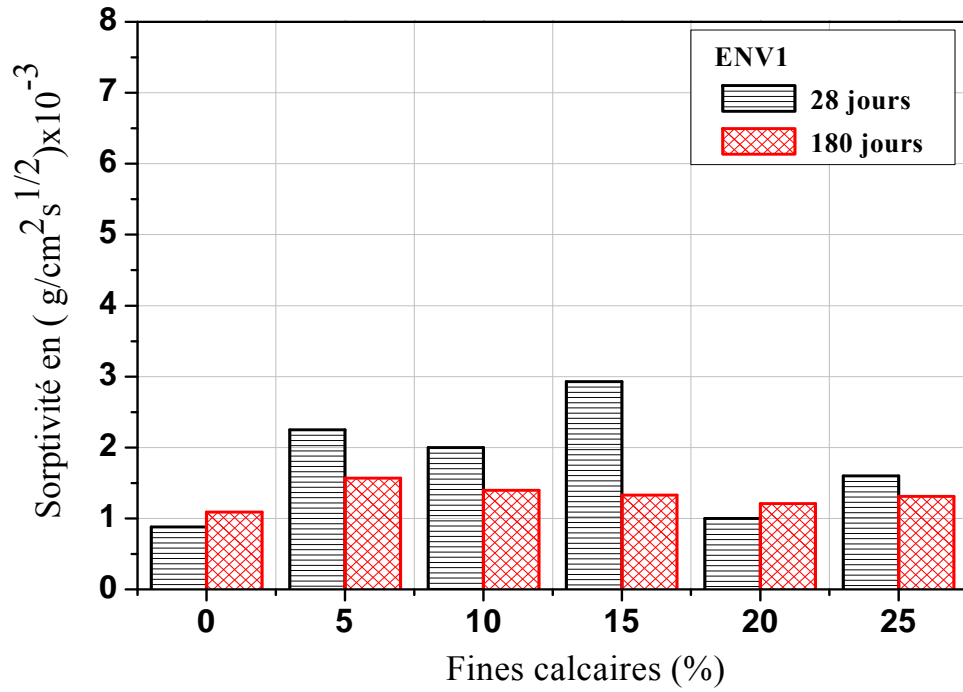


Figure 3.14 : Effet des fines calcaires et de modes de cure sur la sorptivité à 28 et 180 jours (ENV1 & ENV2)

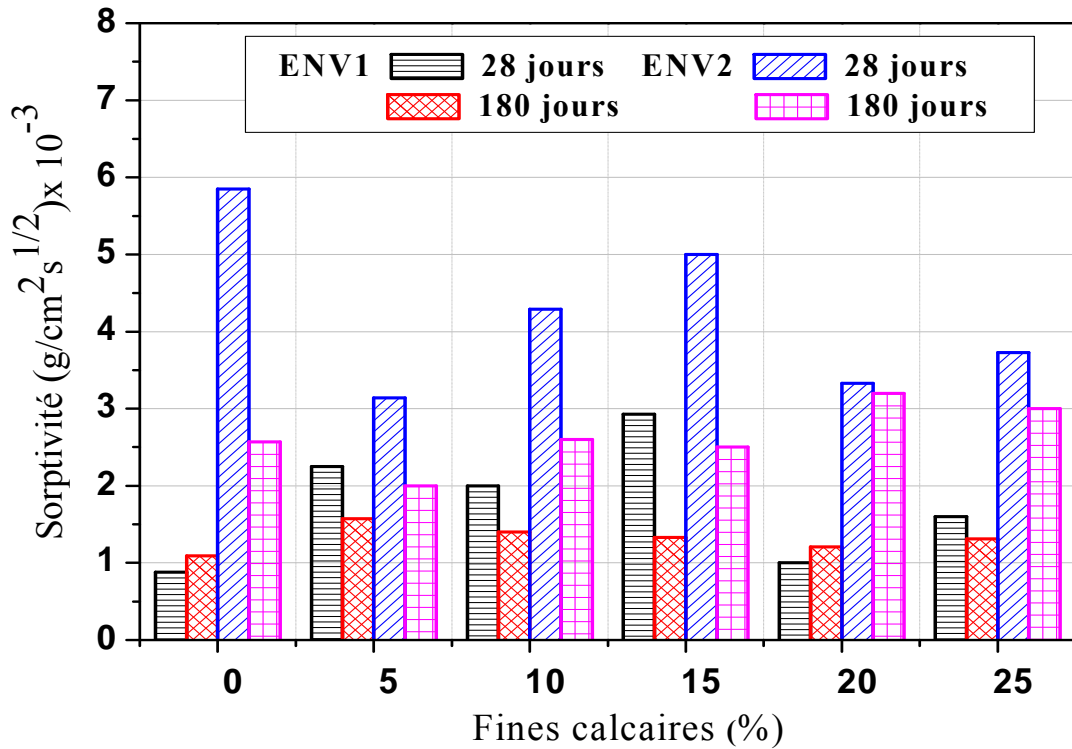


Figure 3.15 : Effet des modes de cure sur la sorptivité à 28 et 180 jours

En conclusion, l'incorporation des fines calcaires comme substitution au sable de concassage a un effet négligeable sur l'absorption capillaire à l'âge de 180 jours de cure. Les résultats de cette recherche sont identiques à ceux obtenus par plusieurs chercheurs [4, 17, 24, 29]. MENADI et al [4], ont rapporté que la présence de 15% de fines calcaires substitués au sable de concassage a un effet négligeable sur l'absorption d'eau par capillarité [24]. SKENDER [17] a trouvé une légère augmentation de la sorptivité des bétons confectionnées avec fines calcaires par rapport au béton de référence avec une variation de la sorptivité de $3.3 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ à $3.9 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$. De même, CELIK et al [29], ont constaté que l'absorption du béton diminue avec l'augmentation de fines calcaires de 0 à 15%.

La figure 3.16 représentent les valeurs du cinétique de l'absorption capillaire d'eau à 64 minutes en fonction de la résistance à la compression des mélanges des bétons étudiés avec et sans fines calcaires. Aucune corrélation entre l'absorption capillaire d'eau et la résistance à la compression n'a été observé.

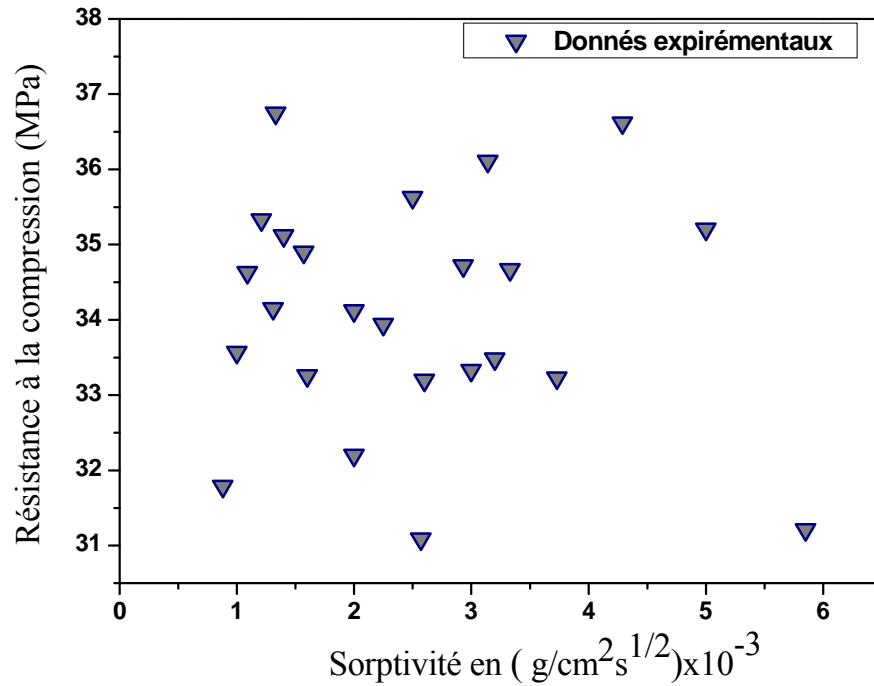


Figure 3.16 : Corrélation entre la sorptivité et la résistance à la compression

3.3.4. Perméabilité à l'eau

Les essais de perméabilité à l'eau ont été réalisés selon la norme DIN 1048 [48]. Les résultats de la perméabilité à l'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de $72\text{h} \pm 2\text{h}$ sont récapitulés dans le tableau 3.6 et illustrés sur la figure 3.17. On remarque que, les bétons à base de sable de concassage avec et sans fines calcaires présentent une perméabilité élevée à l'âge de 28 et 180 jours de cure pour les deux environnements de cure (ENV1 & ENV2) étudiés. La profondeur de pénétration de l'eau des bétons (ENV1) augmente avec l'augmentation de l'âge de cure à l'exception du béton B15, où on note une faible diminution de l'ordre 2% à l'âge de 180 jours par rapport à 28 jours de cure. Une diminution de la profondeur de la perméabilité de l'ordre de 10% pour les bétons B10 et B15, de 6% pour le béton B20 et 2% pour le béton B25 par rapport au béton de référence (B0) à l'âge de 180 jours est observé pour le cas de l'environnement 1. Ceci peut être expliqué par l'effet positif des fines calcaires qui se traduit par l'amélioration de la structure des pores dans la zone de transition, et réduit de ce fait la perméabilité. Ces résultats confirment les constatations de plusieurs auteurs [2, 17] pour le

cas du béton B15 confectionné avec un rapport E/C de 0.65 sans superplastifiant, ou ils ont montré une réduction de la perméabilité à l'eau de 16% par rapport au béton sans fines.

En ce qui concerne les bétons conservés dans l'environnement 2 (ENV2), la profondeur de pénétration de l'eau à 28 jours d'âge augmente pour 5 et 10% de fines calcaires et diminue pour 15 à 25% de fines.

Tableau 3.6 : Effet des fines calcaires et modes de cure sur la perméabilité à l'eau à 28 et 180 jours

Mélange des bétons	Profondeur de pénétration de l'eau en (mm)				Norme	Perméabilité
	ENV1		ENV2			
	28 jours	180 jours	28 jours	180 jours		
B0	93.8	109.2	93.5	94.8	> 60	élevée
B5	84.7	112.7	96.9	101.1	> 60	élevée
B10	91.0	98.4	117.4	91.8	> 60	élevée
B15	100.4	98.1	108.6	96.3	> 60	élevée
B20	99.0	102.4	103.1	83.1	> 60	élevée
B25	103.3	107.4	100.8	89.4	> 60	élevée

La comparaison des bétons conservés dans les deux environnements de cure (Figure 3.18), montre que les valeurs de profondeur de la pénétration de l'eau sont presque comparables (perméabilité élevée) pour tous les mélanges avec différents pourcentages de fines calcaires, (elles varient de 83 mm à 117 mm). À 180 jours, les résultats de la perméabilité à l'eau pour les bétons B10 et B15 conservés dans l'environnement 1 et 2 sont comparables et présentent une diminution de la perméabilité à l'eau par rapport au béton sans fines. Au-delà de 15% de fines, on observe une diminution de la perméabilité à l'eau des bétons de l'environnement 2 par rapport aux bétons de l'environnement 1. De ce fait, on peut conclure qu'une cure humide de 7 jours est suffisante pour ne pas affecter négativement la perméabilité à l'eau des bétons contenant les fines calcaires.

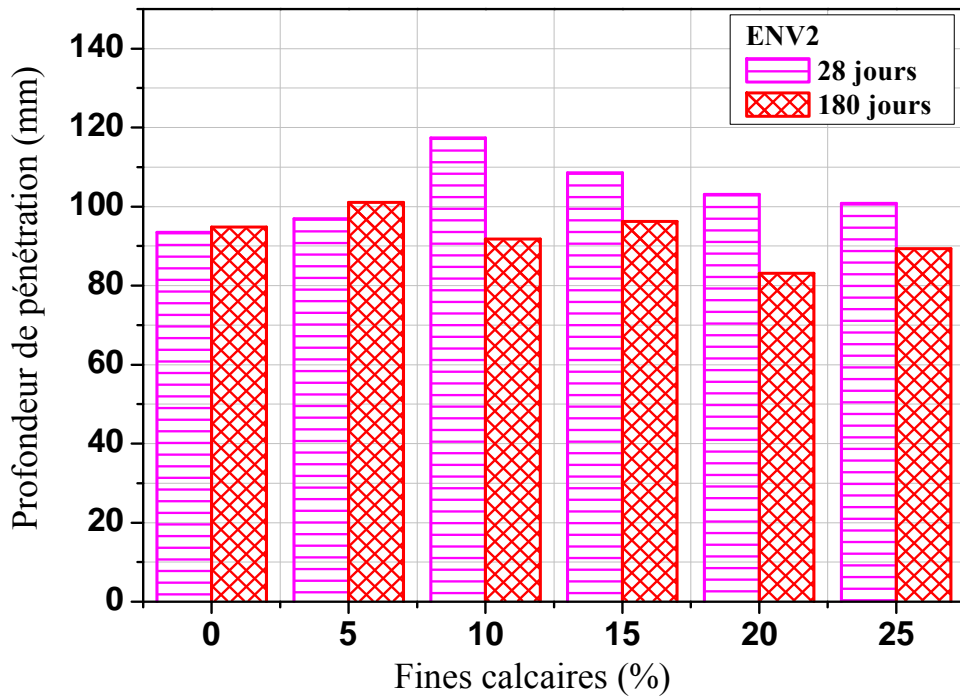
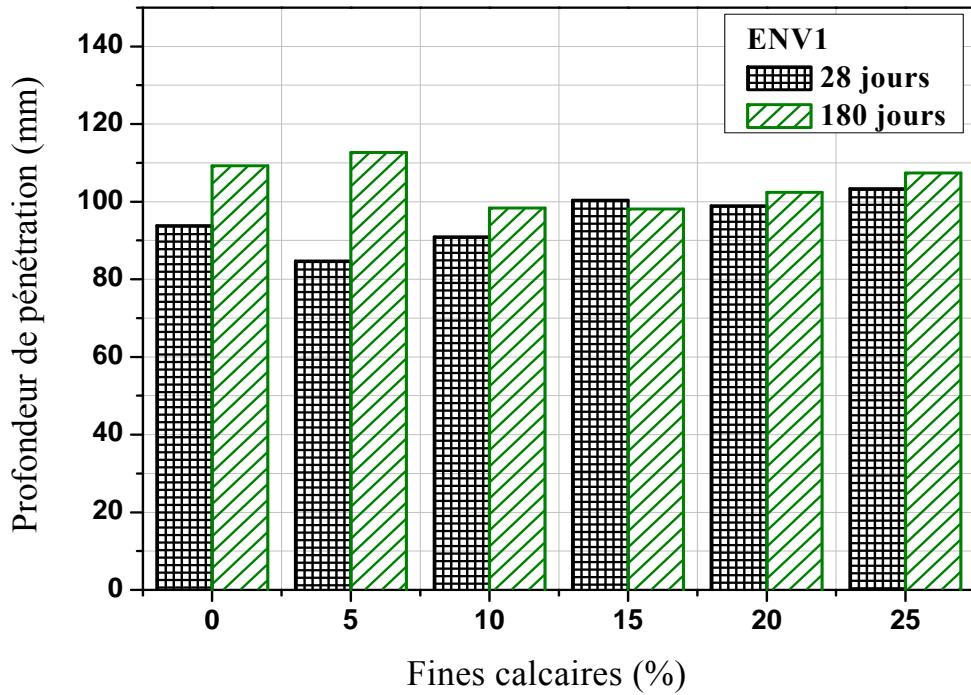


Figure 3.17 : Effet des fines calcaires et des modes de cure sur la profondeur de pénétration de l'eau à 28 et 180 jours

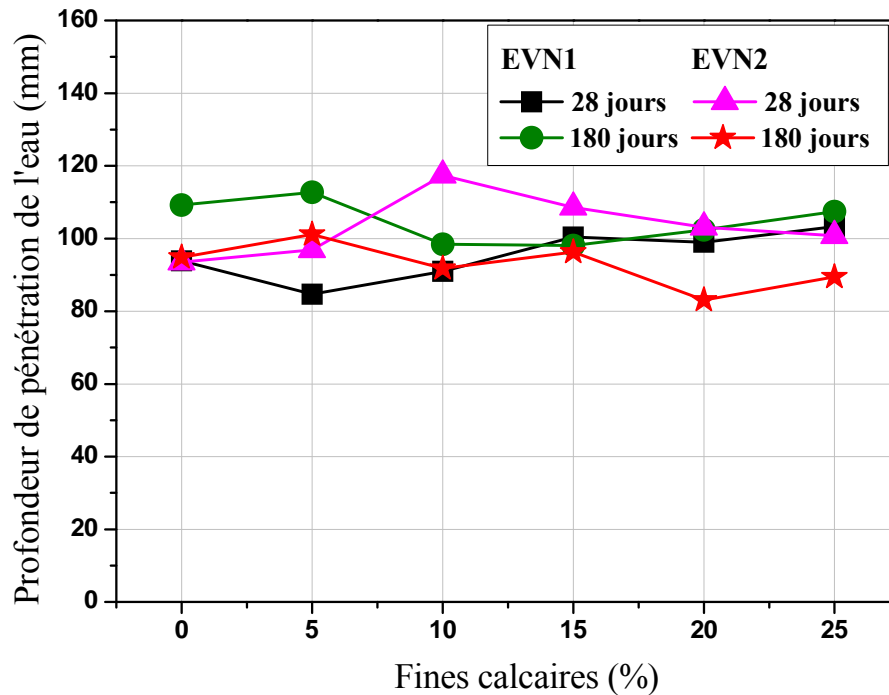


Figure 3.18 : Effet de l'environnement de cure sur la profondeur de pénétration de l'eau à 28 et 180 jours

La relation entre la résistance à la compression et la profondeur de pénétration d'eau est illustrée sur la figure 3.19. Bien qu'il y ait une tendance de diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la profondeur de pénétration d'eau, cette corrélation est faible ($R = 0.43$ pour une régression linéaire). Cette corrélation est en concordance avec les résultats obtenus par MENADI [2] entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau avec une faible corrélation ($R^2 = 0.26$). Ceci pourrait être expliqué par le fait que la perméabilité à l'eau dépend non seulement de la résistance à la compression mais également de la tortuosité, de la surface spécifique, de la dimensions et connectivité des pores.

La figure 3.20 montre que la cinétique d'absorption capillaire d'eau augmente avec la diminution de la profondeur de pénétration d'eau pour tous les mélanges étudiés et peut être estimée d'une façon satisfaisante par régression linéaire ($R = 0.70$). Ceci peut être expliqué par la différence de la procédure d'essais : absorption libre d'eau et pénétration à l'aide d'une pression appliquée de 5 bars.

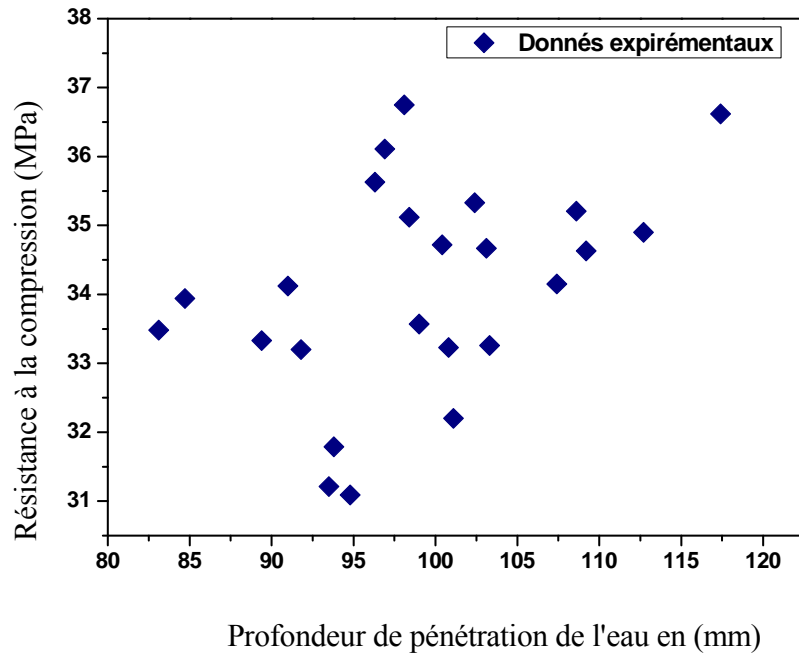


Figure 3.19: Relation entre la résistance à la compression et la profondeur de pénétration d'eau pour les bétons étudiés

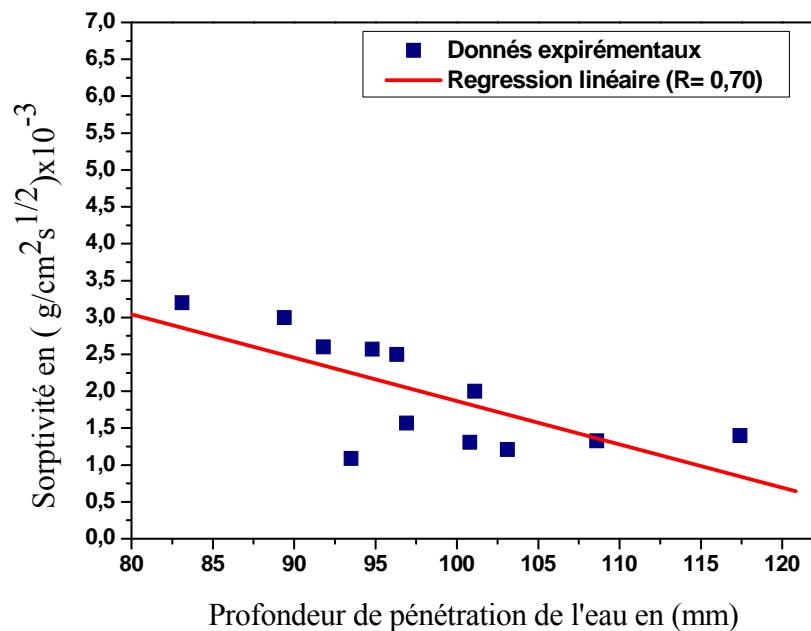


Figure 3.20 : Relation entre la profondeur de pénétration d'eau et la cinétique de l'absorption d'eau capillaire pour les bétons étudiés

3.3.5. Perméabilité aux gaz

Les résultats de la perméabilité au gaz des bétons étudiés dans les deux environnements de cure à 180 jours sont illustrés sur les figures 3.21 et 3.22. Selon ces figures, on remarque que le coefficient de perméabilité au gaz diminue avec l'augmentation du taux de fines calcaires par rapport au béton de référence dans le cas de l'environnement de cure 1 (ENV1). Cette diminution est de l'ordre de 17, 29, 26, 14 et 22% pour les bétons B5, B10, B15, B20 et B25, respectivement. Similairement, les résultats de la perméabilité au gaz des bétons conservés dans l'environnement 2 (Figure 3.19) indiquent une diminution du coefficient de perméabilité de tous les mélanges contenant les fines, à l'exception du béton avec 15%, où on constate une légère diminution par rapport au béton de référence. Les valeurs de la perméabilité mesurées sont de 5.60×10^{-17} , 4.63×10^{-17} , 3.93×10^{-17} , 4.11×10^{-17} , 4.77×10^{-17} et 4.34×10^{-17} m² pour les bétons B0, B5, B10, B15, B20 et B25 (ENV1), respectivement. En général, l'incorporation de fines calcaires diminue la perméabilité au gaz des bétons en comparaison avec le béton de référence. Cette diminution peut être expliquée par la réduction de la porosité capillaire due aux fines calcaires.

La figure 3.22 montre une légère diminution du coefficient de perméabilité au gaz pour bétons B5 et B10, et une faible augmentation pour béton B15. Au de-là de 15% de fines, une réduction importante est observée. Les valeurs du coefficient de perméabilité aux gaz des bétons de l'environnement 2 de cure (ENV2) sont de 5.53×10^{-17} , 5.43×10^{-17} , 5.12×10^{-17} , 5.48×10^{-17} , 3.87×10^{-17} et 3.72×10^{-17} m² pour les bétons B0, B5, B10, B15, B20 et B25, respectivement. L'incorporation de fines calcaire aux bétons à base de sable concassé diminue la perméabilité aux gaz. Les taux de diminution par rapport au béton de référence sont de l'ordre de 2, 7, 1, 30 et 33% pour B5, B10, B15, B20 et B25, respectivement. La perméabilité minimum est obtenue à 10% de fines calcaires.

La figure 3.23 montre l'effet des modes de cure sur le coefficient de perméabilité aux gaz des bétons à base de sable de concassage avec et sans fines calcaires. La cure humide prolongée a un effet positif sur la perméabilité aux gaz par rapport à la cure initiale humide de 7 jours suivie d'une cure à l'air libre pour les bétons B5, B10 et B15. Au-delà de 15% de fines calcaires, on constate l'effet inverse, où la perméabilité des bétons dans l'environnement 2 est inférieure à celle des bétons conservés dans l'environnement 1. Généralement, les valeurs de la perméabilité au gaz pour les bétons

avec et sans fines calcaires des deux modes de cure sont comparables. Les valeurs mesurées du coefficient de perméabilité sont de l'ordre de $5.60 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ à $4.34 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ et $5.53 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ à $3.72 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ pour les bétons de l'environnement de cure 1 et 2, respectivement. En conclusion, une cure humide de 7 jours est suffisante pour ne pas affecter la perméabilité au gaz des bétons avec et sans fines calcaires.

Les résultats de perméabilités aux gaz obtenus pour les bétons avec et sans fines calcaires sont en contradiction avec les travaux de recherche antérieurs [3, 4, 17]. KENAI et al [3], ont conclu que la présence des fines calcaires augmente le coefficient de perméabilité aux gaz. MENADI et al [4], ont montré aussi que le béton avec 15% de fines calcaires présente une perméabilité au gaz légèrement élevée par rapport au béton sans fines. Cette différence par rapport aux études précédentes est probablement due au faible rapport E/C utilisé dans cette étude.

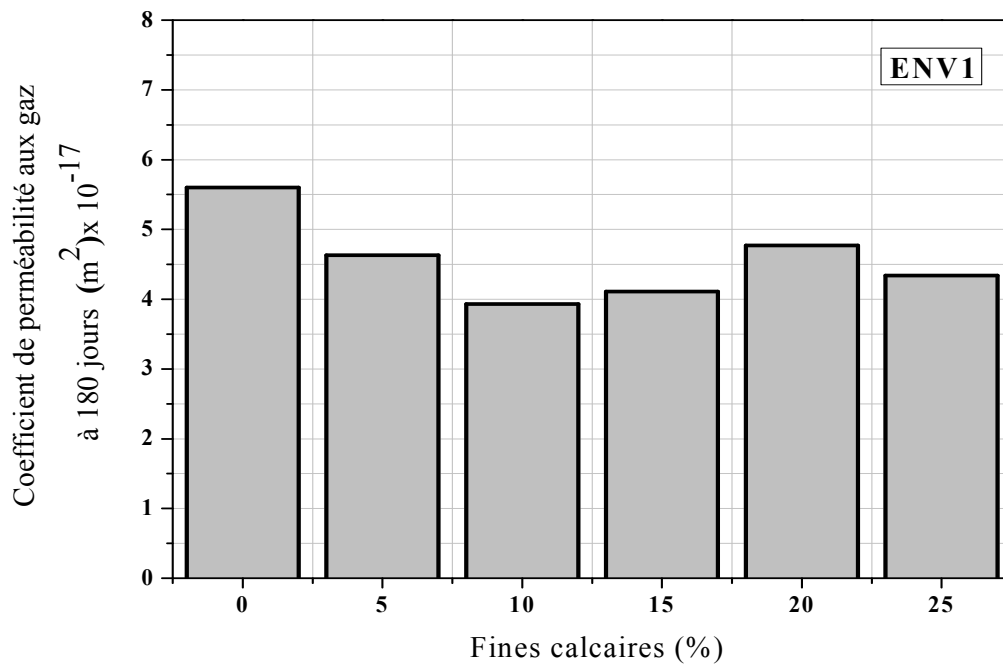


Figure 3.21: Valeurs du coefficient de perméabilité au gaz pour les différents bétons étudiés (ENV1) à l'âge 180 jours

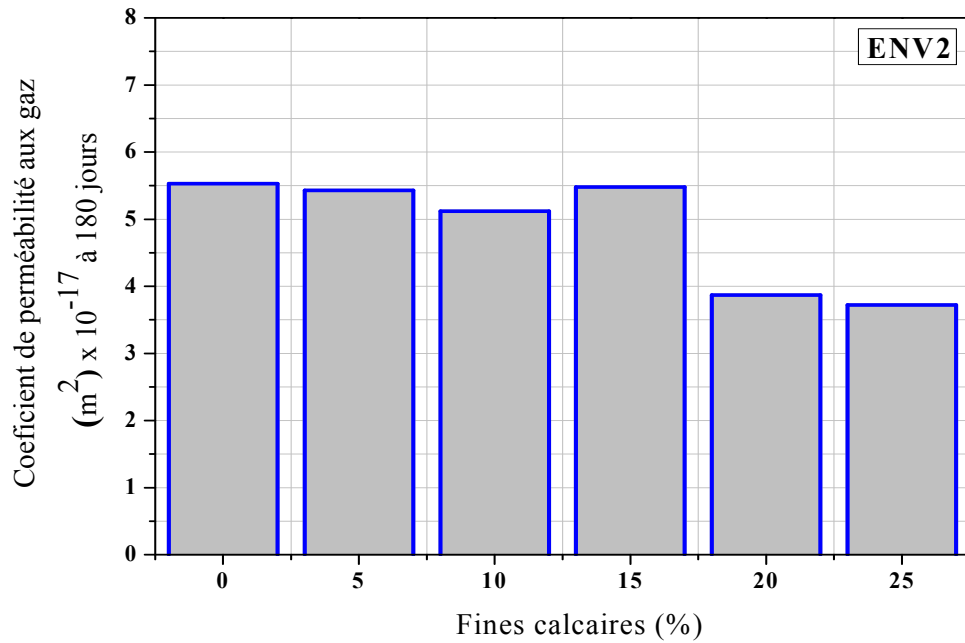


Figure 3.22: Valeurs du coefficient de perméabilité au gaz pour les différents bétons étudiés (ENV2) à l'âge de 180 jours

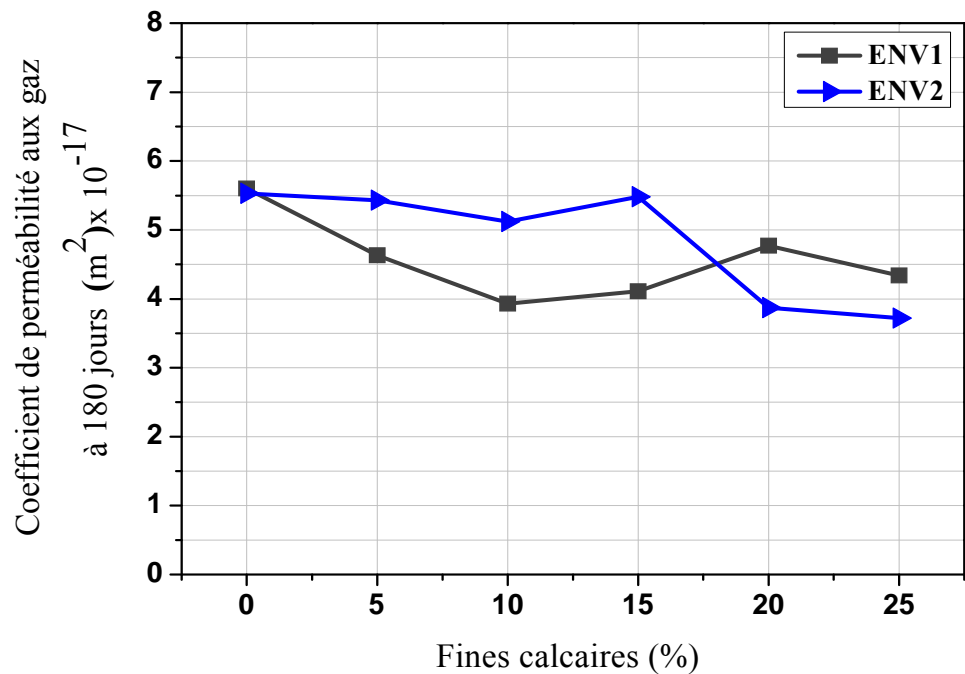


Figure 3.23 : Effet des modes de cure sur le coefficient de perméabilité aux gaz des différents bétons étudiés à 180 jours

La figure 3.24 représente la relation entre la résistance à la compression et le coefficient de perméabilité au gaz. On constate d'après cette figure qu'il y'a une tendance d'augmentation du coefficient de perméabilité au gaz avec la diminution de la résistance à la compression.

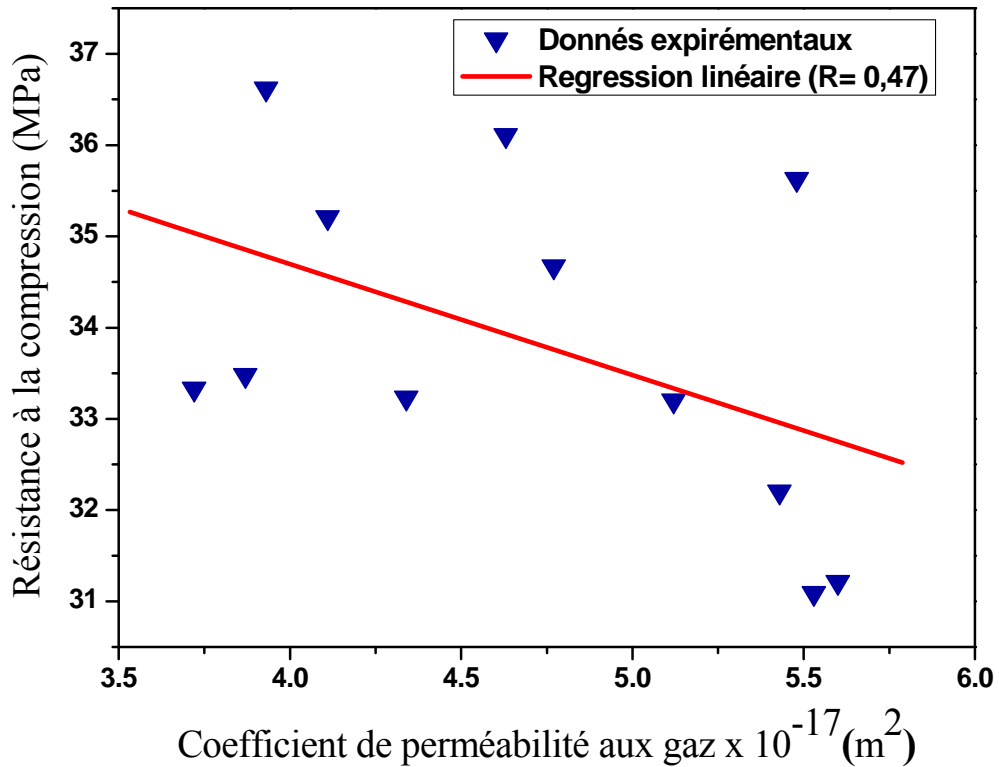


Figure 3.24 : Relation entre la résistance à la compression et le coefficient de perméabilité aux gaz

La figure 3.25 représente les valeurs du cinétique de l'absorption capillaire d'eau à 64 minutes en fonction de le coefficient de perméabilité au gaz des mélanges des bétons étudiés avec et sans fines calcaires. Aucune dépendance entre l'absorption capillaire d'eau et le coefficient de perméabilité au gaz on été observé.

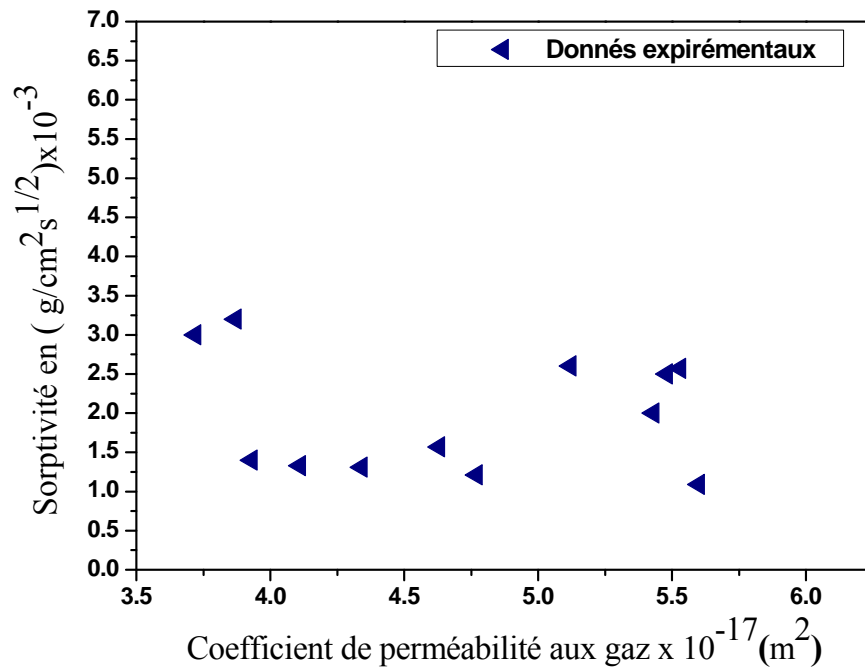


Figure 3.25 : Relation entre la sorptivité et le coefficient de perméabilité aux gaz

3.3.6. Perméabilité aux ions chlores

L'essai de la perméabilité des bétons aux ions chlores a été effectué selon la norme ASTM C-1202 [50]. Les résultats de la perméabilité aux ions chlores des bétons dans les deux modes de cure sont présentés sur la figure 3.21. On constate, dans tous les cas (ENV1 & ENV2), que la perméabilité aux ions chlores des bétons contenant de fines calcaires est inférieure à celle du béton de référence. Les bétons sans fines présentent des charges électriques plus élevées par rapport aux bétons avec fines quelque soit le mode de cure. Ces valeurs montrent que les bétons sans fines calcaires sont classés à perméabilité aux ions chlores élevée selon l'échelle proposée par WHITING [50, 51]. Cependant, les bétons avec fines calcaires présentent différentes classes de perméabilité aux ions chlores (moyenne et élevée) selon le pourcentage de fines calcaires utilisés. Les taux de variation de la perméabilité aux ions chlores des bétons avec fines calcaires par rapport aux bétons de référence (100%) sont de 59.70, 62.50, 59.50, 66.20 et 49.30% et de 73.70, 81.30, 83.10, 74.95 et 69.85% pour bétons B5, B10, B15, B20 et B25 des deux environnements de cure ENV1 et ENV2, respectivement. Le béton contenant 25% de fines calcaires donne la

valeur minimale de la perméabilité aux ions chlorures. Cette diminution de la perméabilité aux ions chlorures est due premièrement à l'effet de superplastifiant et d'autre part, à l'effet du rapport E/C (< 0.50) [50, 51]. En comparant la perméabilité aux ions chlorures des bétons pour les deux modes de cure (ENV1 et ENV2), la figure 3.22 montre que les perméabilités aux ions chlorures des bétons de l'environnement 1 sont supérieures à celle des bétons de l'environnement 2. Les taux d'augmentation de la perméabilité aux ions chlorures des bétons de l'environnement 1 par rapport aux bétons de l'environnement 2 sont de 42.50, 15.50, 9.65, 2.0, 25.85 et 0.55%. Ceci peut s'expliquer par l'effet positif de la cure à l'air libre sur la perméabilité aux ions chlorures. Les résultats obtenus sont contradictoires à ceux obtenus par d'autres chercheurs [3, 4, 6, 17]. Ils ont montré que l'incorporation des fines calcaires fait augmenter la perméabilité aux ions chlorures des bétons à long terme. Cette augmentation est due à l'effet de dilution des fines calcaires. En effet, cette contradiction des résultats obtenus peut être due à l'effet du superplastifiant qui exerce deux effets sur la microstructure du ciment : il crée une meilleure défloculation des particules fines, ce qui permet un accroissement de la compacité du béton, et il lubrifie les surfaces solides des grains, en diminuant les contraintes de frottement entre les particules [59].

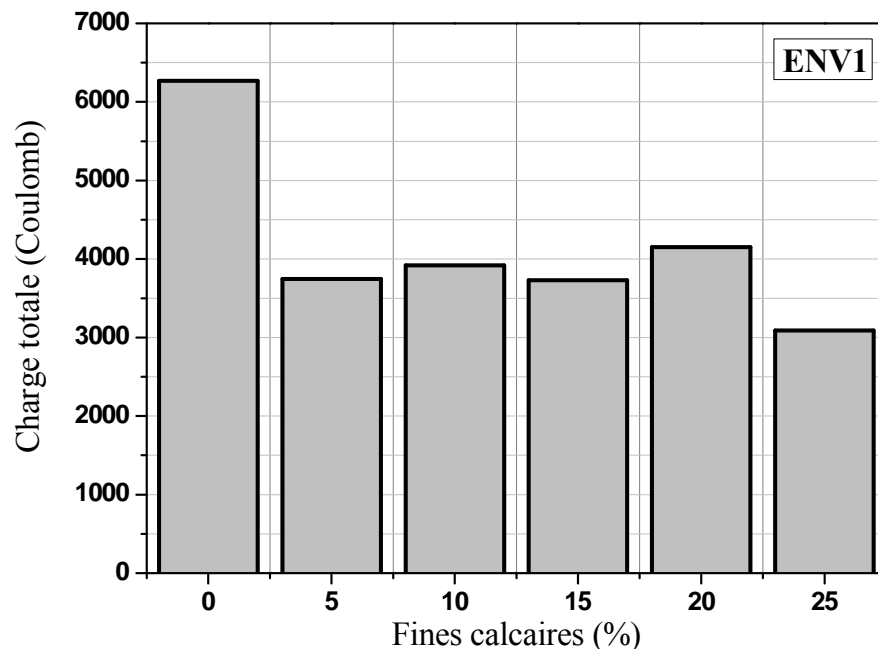


Figure 3.26 : Effet des fines calcaires et de modes de cure sur la perméabilité aux ions chlorures des différents mélanges à 180 jours (ENV1)

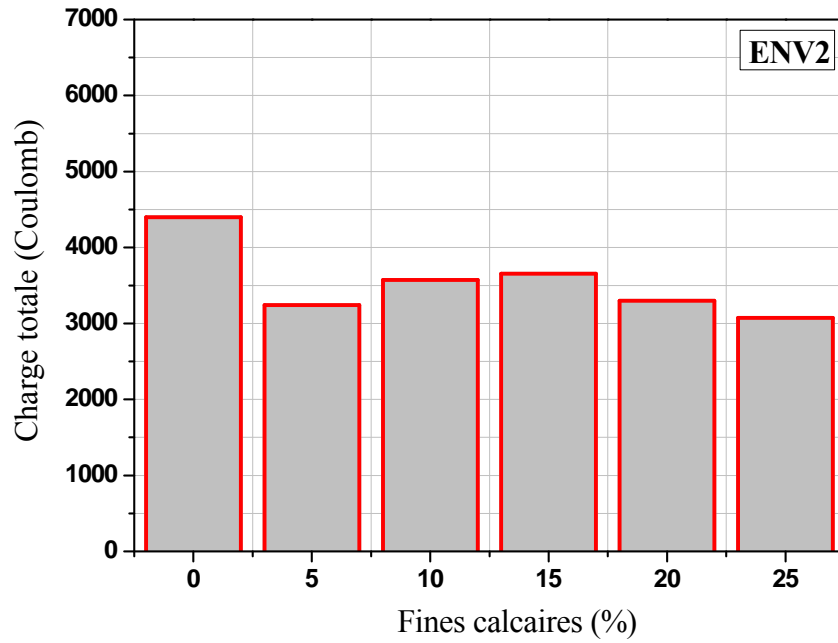


Figure 3.27 : Effet des fines calcaires et de modes de cure sur la perméabilité aux ions chlores des différents mélanges à 180 jours (ENV2)

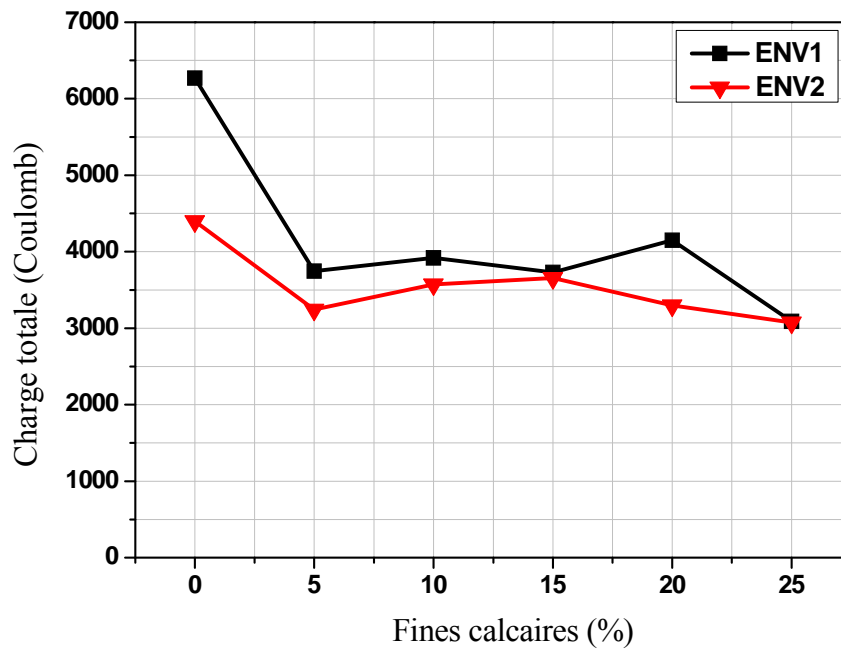


Figure 3.28 : Effet des modes de cure sur la perméabilité aux ions chlores des différents mélanges à 180 jours

La charge totale (Q) des mélanges de béton est représentée en fonction de la perméabilité au gaz sur la figure 3.29. On remarque qu'il y a une tendance d'augmentation de la charge (Q) avec le coefficient de perméabilité au gaz. Une faible corrélation a été obtenue ($R=0.52$) par une régression linéaire.

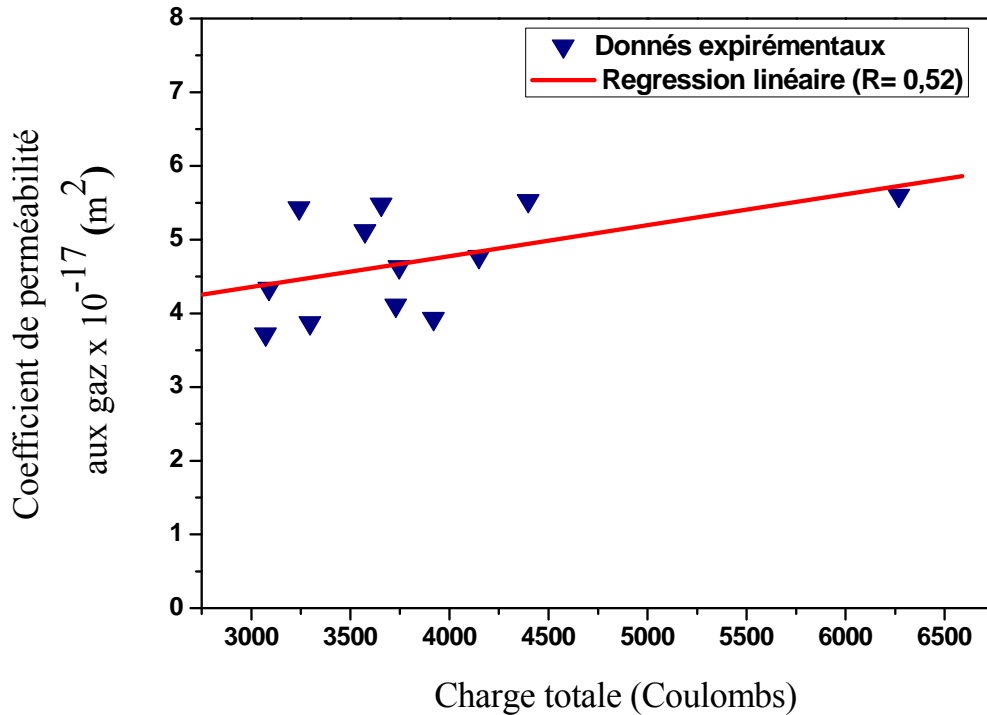


Figure 3.29: Relation entre la charge totale (Q) et le coefficient de perméabilité au gaz des bétons étudiés

La figure 3.30 montre la relation entre la résistance à la compression et la charge totale passée (Q) des différents mélanges des bétons étudiés. Selon cette figure, on constate qu'il n'existe aucune corrélation entre la charge totale (Q) et la résistance à la compression.

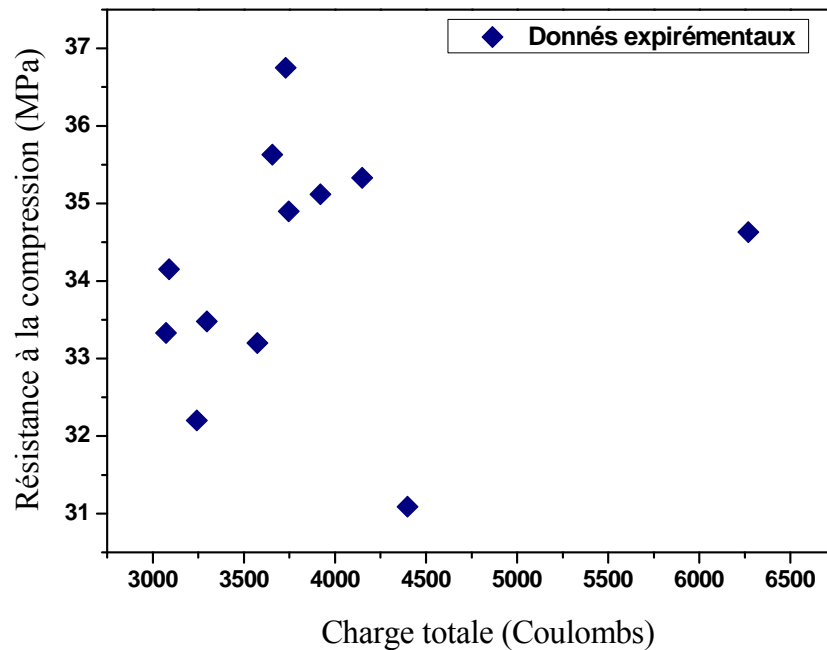


Figure 3.30: Corrélation entre la résistance à la compression et la charge totale (Q) des bétons étudiés

3.4. Resistances des mortiers aux sulfates et au l'eau de mer

L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation des produits expansifs et perte des propriétés liantes des C-S-H du ciment. Les expansions peuvent causer des dommages structuraux considérables dans un intervalle de temps relativement court (10 à 15 ans) [60]. Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates. L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface [60]. Les expansions peuvent résulter de la formation d'ettringite secondaire ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$):

La salinité des mers ou des océans peut être très variable, de quelques grammes par litre à plus de 200 g/l. La salinité des grands océans est de l'ordre de 35 g/l [61]. La composition moyenne d'un litre d'eau de mer est [61] :

$NaCl_2 = 27.20$ g, $MgCl_2 = 3.80$ g, $MgSO_4 = 1.65$ g, $CaSO_4 = 1.25$ g, $Na_2SO_4 = 0.85$ g: soit au total, 35 g.

Le principal sel dissous dans l'eau de mer est le chlorure de sodium, puis vient le chlorure de magnésium et les sulfates [61].

En plus de l'action de sulfates de l'eau de mer sur le béton, les chlorures de l'eau de mer sont aussi agressif vis-à-vis du béton. Le chlorure de magnésium $MgCl_2$ réagit avec la portlandite $Ca(OH)_2$ et provoque la dissolution (ou lixiviation) du liant. Le chlorure de calcium $CaCl_2$ réagit avec l'aluminate tricalcique C_3A (provenant du clinker) et conduit à la formation d'un chloro-aluminate [60, 62].

3.4.1 Perte de résistance à la compression

La figure 3.31 montre les variations de résistance à la compression des éprouvettes de mortiers à base de sable de concassage en fonction de la période d'immersion dans les solutions de 5% $MgSO_4$ et 5% Na_2SO_4 et eau de mer respectivement, avec une température de conservation variable dans les solutions. On remarque une augmentation de la résistance à la compression des mortiers dans les solutions sulfatiques pour une période d'immersion allant jusqu'à 90 jours, suivi d'une perte de résistance au de là cette période d'immersion. L'augmentation initiale de résistance semble être due à la continuité d'hydratation du ciment et à la réaction entre les solutions sulfatiques et le $Ca(OH)_2$ pour former le gypse et l'ettringite qui remplissent les micropores et mènent à la densification de la matrice cimentaire [8]. La diminution de résistance à la compression à long terme (> 90 jours) montre l'effet défavorable de l'expansion due aux attaques des sulfates qui produits des microfissures dans le matériau [37]. L'effet du pH sur la résistance aux sulfates est un facteur important dans les milieux agressifs. En outre, le contrôle du pH peut changer les phases prédominantes d'attaque, particulièrement la formation de gypse par C-H. L'action de l'eau de mer semble avoir un effet négligeable sur la résistance à la compression des mortiers aux calcaires, à l'exception des mortiers à 20% de fines calcaires qui présentent une diminution de la résistance à la compression à long terme (≥ 90 jours). Cependant, il faut noter que la période d'immersion (210 jours), n'est pas suffisante pour évaluer le comportement des mortiers aux calcaires vis-à-vis des agents agressifs (sulfate de magnésium, sulfate de sodium et eau de mer).

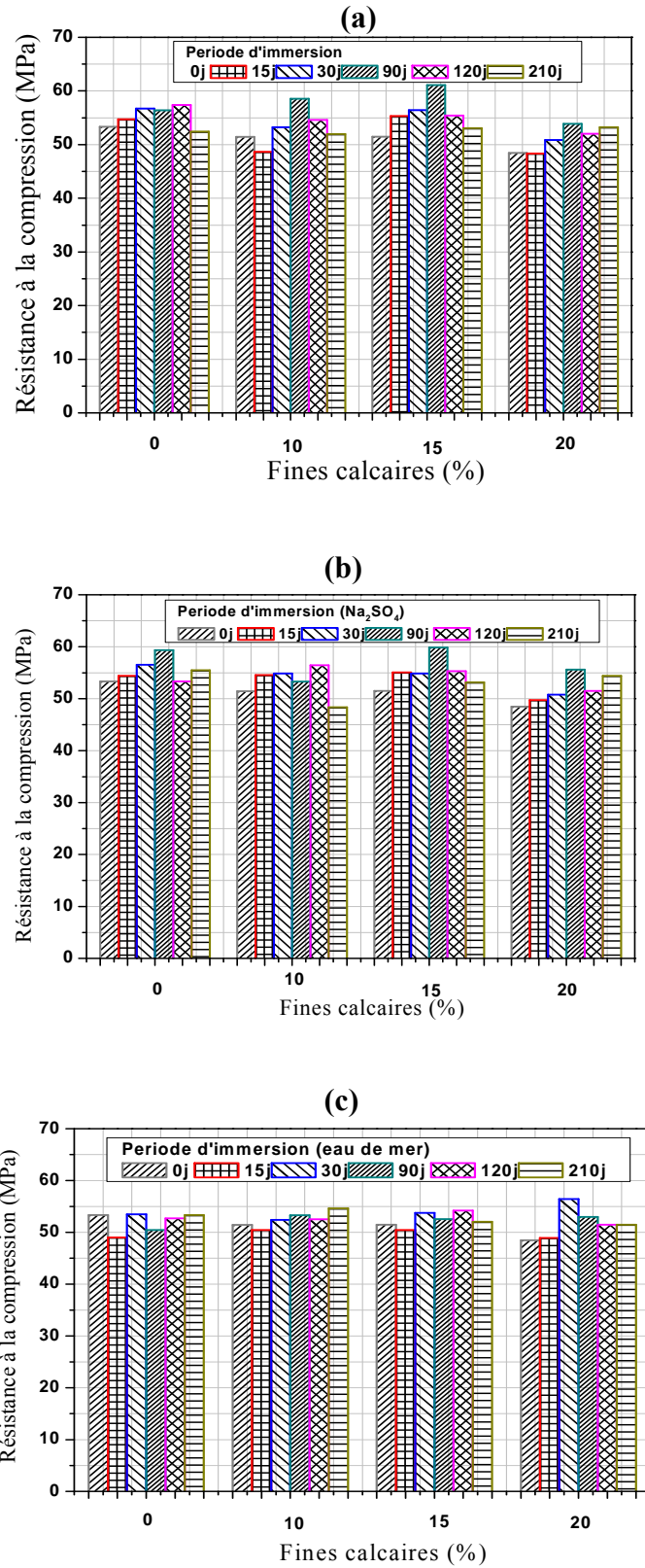


Figure 3.31 : Variation de la résistance à la compression :

a) 5% MgSO₄, b) 5% Na₂SO₄, c) eau de mer

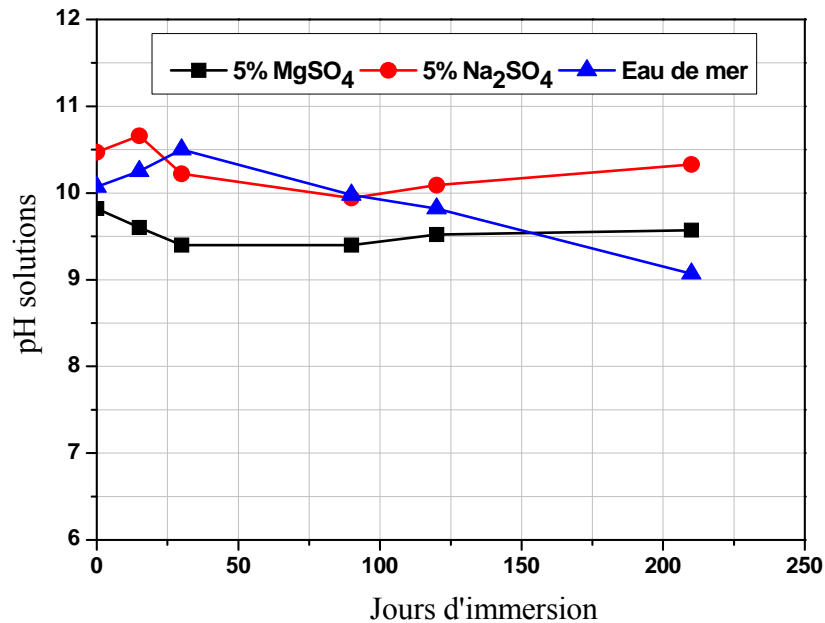


Figure 3.32 : Evolution de pH des solutions utilisés

3.4.2 Perte de masse

La figure 3.33 montre les variations de perte de masse des éprouvettes de mortiers en fonction de la période d'immersion dans les solutions de 5% MgSO₄, de 5% Na₂SO₄ et de l'eau de mer, respectivement. On remarque que les éprouvettes conservées dans une solution de MgSO₄ sont moins endommagées que les éprouvettes immergées dans une solution de sulfate de sodium (Na₂SO₄) et dans l'eau de mer. Le taux d'attaque est une fonction de la durée d'immersion. Après 210 jours d'immersion des éprouvettes des mortiers avec 0, 10, 15 et 20% de fines calcaires dans la solution de sulfate de magnésium et de sulfate de sodium, la perte de masse est de l'ordre de 0.15, 0.20 et 0.05% et de 0.25, 0.15 et 0.05%, respectivement, par rapport aux mortiers de référence. En ce qui concerne les éprouvettes des mortiers immergées dans l'eau de mer, la perte de masse enregistrée est de l'ordre de 0.10, 0.20 et 0.15% par rapport au mortier de référence. La perte de masse mesurée est presque semblable pour les différentes solutions utilisées. Les pertes de masse mesurés sont relativement faible aux pertes mesurés pur les éprouvettes du béton immergé dans 5% MgSO₄ et 5% Na₂SO₄ [2].

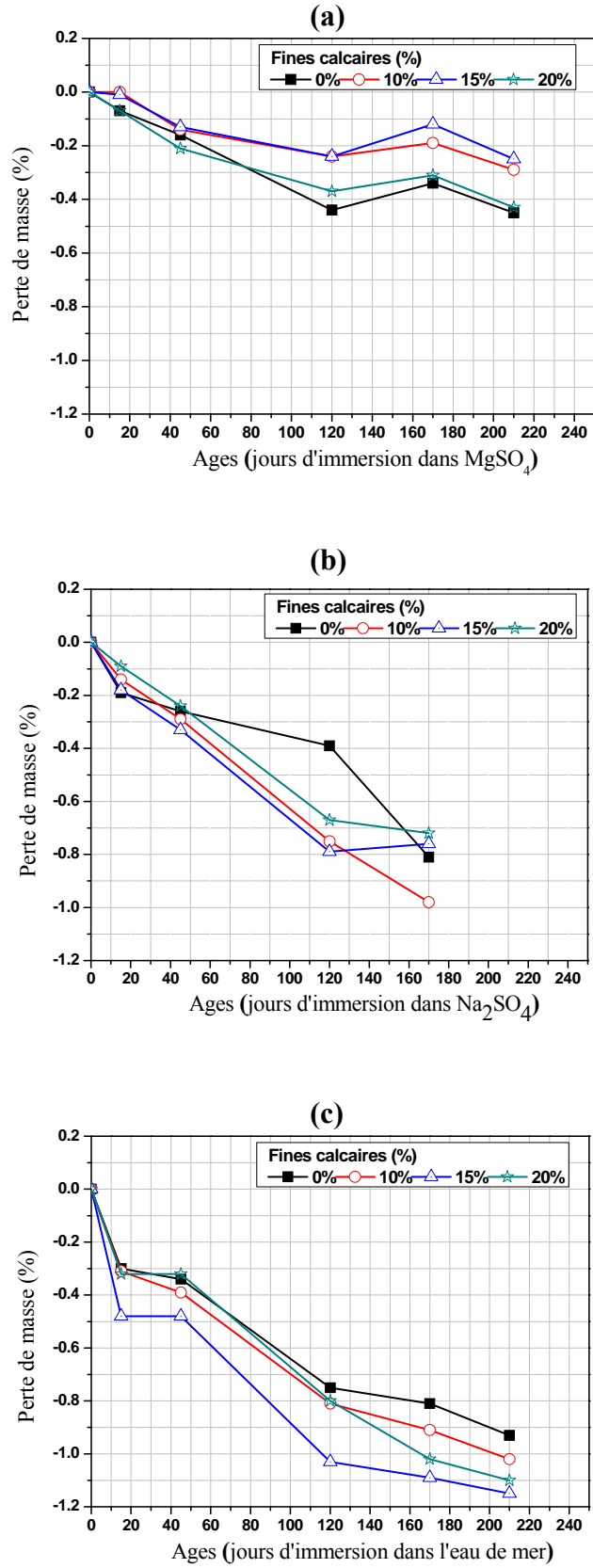


Figure 3.33 : Variation de la perte de masse en fonction de l'âge d'immersion :
 a) 5% de $MgSO_4$, b) 5% de Na_2SO_4 , c) eau de mer

3.4.3 Expansion

Les résultats de l'essai d'expansion des éprouvettes immergées dans les solutions contenant 5% de sulfate de magnésium (MgSO_4), 5% de sulfates de sodium (Na_2SO_4) et dans l'eau de mer sont présentés dans la figure 3.34. Ces résultats montrent une expansion plus élevée pour les mortiers avec 15% de fines calcaires conservés dans la solution contenant le sulfate de magnésium, comparé à ceux conservés dans la solution de sulfate de sodium et dans l'eau de mer. L'expansion après 210 jours d'immersion est de l'ordre de 0,25% pour les éprouvettes placées dans la solution de MgSO_4 comparée à 0,1% pour les mortiers immergés dans la solution de Na_2SO_4 et dans l'eau de mer. L'expansion augmente avec l'augmentation de l'âge d'immersion. Pour les éprouvettes immergées dans la solution de sulfate de magnésium (5% MgSO_4), l'expansion des mortiers avec ajouts calcaire, après 210 jours d'immersion est comparable à celle des mortiers témoins. A l'exception des mortiers avec 15% de fines calcaires, l'expansion pour les mortiers à base de sable de concassage n'est pas élevée. L'expansion des éprouvettes des mortiers exposés à la solution de 5% MgSO_4 augmente rapidement avec la diminution de température [63]. Cependant, les éprouvettes immergées dans la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4), l'expansion est moins importante pour tous les mortiers avec ou sans fines calcaires. Néanmoins, pour les éprouvettes immergées dans l'eau de mer, l'expansion des mortiers à 20% de fines calcaires est plus importante. La plus faible expansion est enregistrée pour des mortiers à 10% de fines calcaires avec une valeur de l'ordre de 0.025%. La variabilité de l'expansion des éprouvettes entre les trois solutions (5% MgSO_4 , 5% Na_2SO_4 et eau de mer) indique que le mécanisme d'attaque des deux sulfates et l'eau de mer n'est pas identique. Ces résultats sont comparable a celle trouvé par Hadj sadok [35] sur des éprouvettes de mortiers à base de ciment au calcaire immergés dans (5% MgSO_4 et 5% Na_2SO_4).

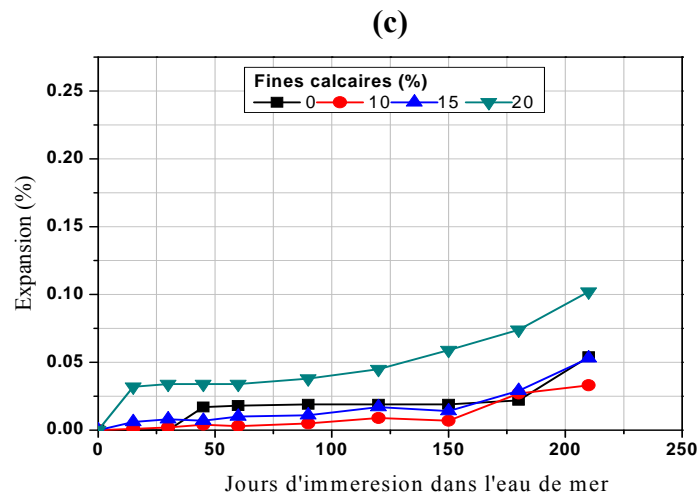
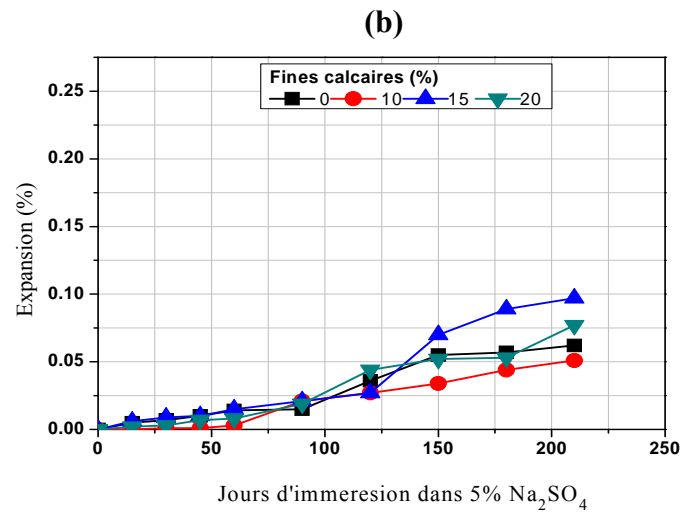
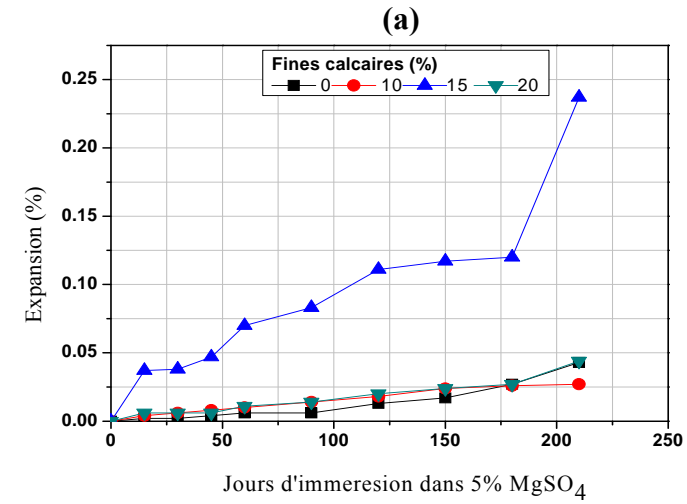


Figure 3.34: Expansion des éprouvettes des mortiers immergées dans différents solutions : a) 5% $MgSO_4$, b) 5% Na_2SO_4 , c) eau de mer

3.4.4. Aspect visuel

L'état des éprouvettes des mortiers avec et sans fines calcaires après 210 jours d'immersion dans 5 % de sulfates de magnésium (MgSO_4) sont présentées sur la figure 3.35. On constate que les éprouvettes des mortiers avec et sans fines calcaires ont subi des effritements et éclatement de la pâte sur toute la partie extérieure, commençant au niveau des coins et des arrêtes des éprouvettes. L'effet plus important des sulfates sur les arrêtes est due à la présence de deux fronts d'attaques. Visuellement, l'attaque par les sulfates de magnésium est plus sévère pour les éprouvettes de mortiers avec 20% de fines calcaires par rapport aux mortiers M0, M10 et M15. Cet effet est du à la détérioration du lien de l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) dans la matrice cimentaire.

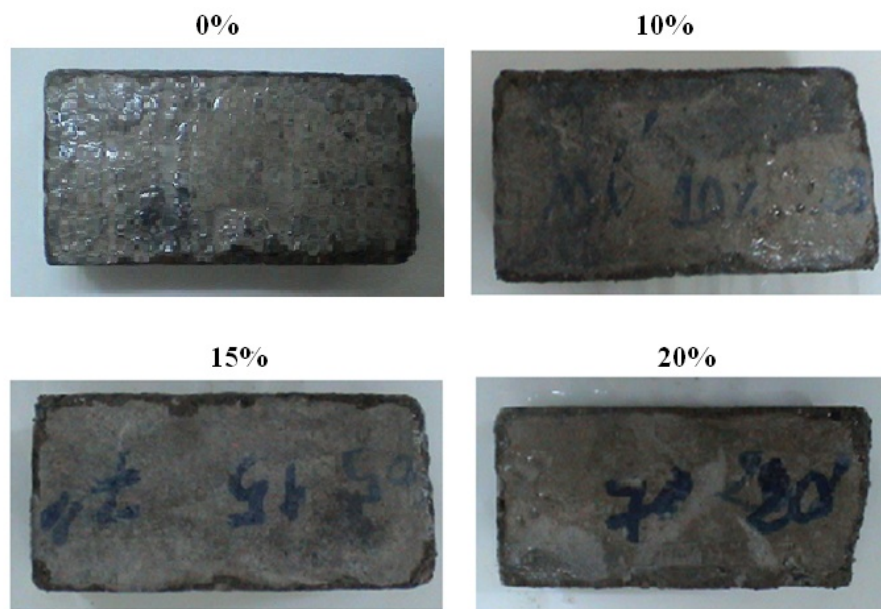


Figure 3.35: Eprouvettes de mortiers après 210 jours d'immersion dans 5% MgSO_4

La figure 3.36 montre l'aspect visuel des éprouvettes de mortiers avec et sans fines calcaires après 210 jours d'immersion dans la solution de sulfate de sodium (5% Na_2SO_4). On remarque que les mortiers M10 et M15 sont restés intacts et n'ont subi aucune dégradation. Par contre les mortiers M0 et M20 ont subi pratiquement les mêmes dégradations par l'apparition des fissures longitudinales aux extrémités des éprouvettes. Ces dégradations sont moins intenses que celles observées dans le cas d'immersion dans la solution de sulfates de magnésium. Cependant, les éprouvettes de mortiers exposés à l'eau de mer (Figure 3.37) n'ont subi aucune dégradation. L'influence des fines calcaires sur la

durabilité des mortiers vis-à-vis de l'eau de mer n'est pas claire et aucune tendance évidente n'est détectée. Il reste à noter que l'âge de 210 jours n'est pas suffisant pour étudier la durabilité des mortiers ou bétons dans des milieux agressifs.

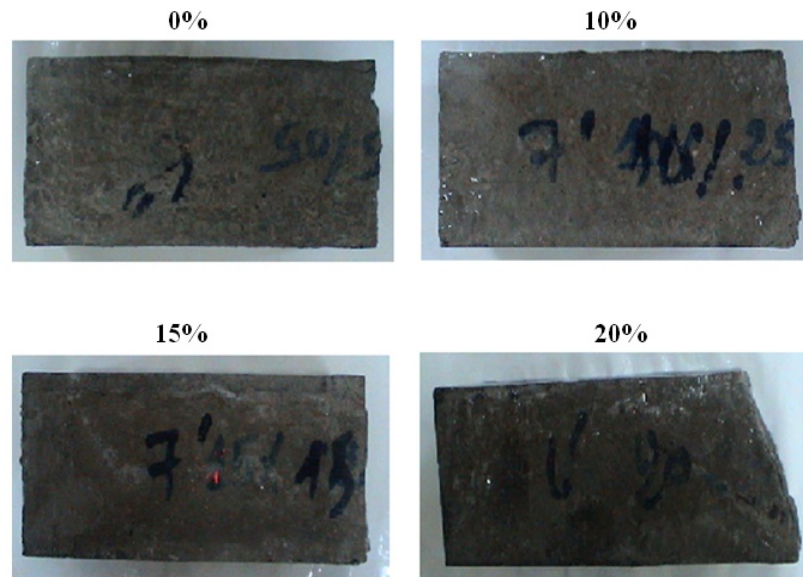


Figure 3.36: Epreuve de mortiers après 210 jours d'immersion dans 5% Na_2SO_4

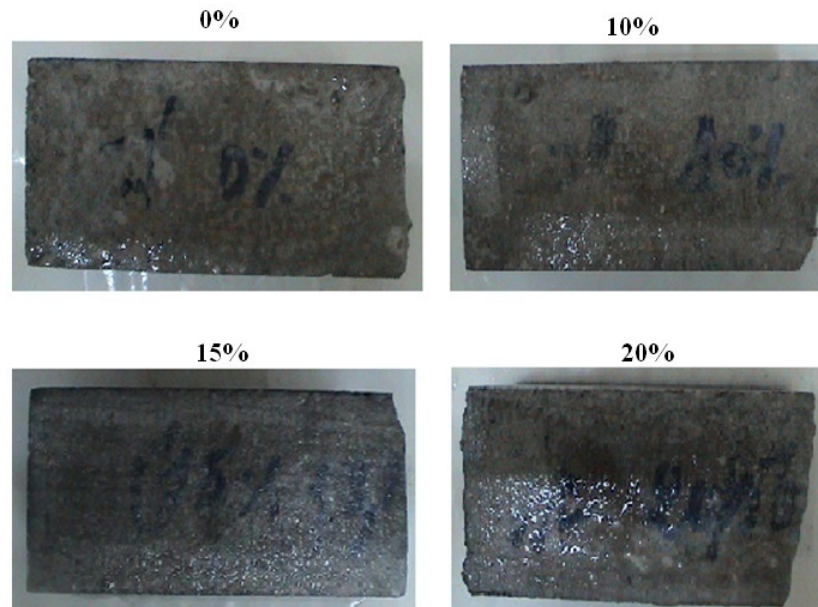


Figure 3.37: Epreuve de mortiers après 210 jours d'immersion dans l'eau de mer

3.5. Conclusion

Les résultats obtenus à partir de cette étude expérimentale, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'utilisation d'un superplastifiant a amélioré l'ouvrabilité du béton de sable de concassage fillérisé.
- La substitution de 15% de fines calcaires dans le sable de concassage a amélioré la compacité du béton frais.
- En présence de superplastifiant, la substitution de 20% de fines calcaires au sable de concassage n'a pas affecté la résistance à la compression en comparaisons avec bétons sans fines calcaires.
- La résistance à la compression optimale a été obtenue pour à un taux de fines de 15%.
- La cure humide a un effet très positif sur la porosité des bétons de concassage.
- La porosité accessible à l'eau des bétons à base de sable de concassage a diminué avec l'augmentation de la durée de cure humide.
- La substitution de fines calcaires dans le sable de concassage a un effet négligeable sur l'absorption d'eau capillaire des bétons et leur sorptivité.
- La présence de sable de concassage dans les bétons a augmenté la perméabilité à l'eau.
- l'utilisation de superplastifiant, a diminué les perméabilités aux gaz et aux ions chlores en comparaisons avec les bétons sans fines calcaires.
- la présence de superplastifiant dans un béton avec de 20% de fines calcaires n'affect pas les propriétés mécaniques des bétons et leur propriété de durabilité, particulièrement, porosité, absorption, perméabilités au gaz et ions chlores.
- L'incorporation de 10% de fines calcaires dans le sable de concassage a un effet positive sur l'expansion des mortiers vis-à-vis des deux sulfates et de l'eau de mer.
- L'addition des fines calcaires améliore la résistance à la compression vis-à-vis des deux solutions sulfatiques et l'eau de mer.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette étude est de compléter les études ultérieures sur le comportement du béton hydraulique à base de sable de concassage. Notre étude expérimentale a été élaborée pour analyser l'effet des fines calcaires dans le sable de concassage et des superplastifiants sur les propriétés physiques et mécaniques et sur la durabilité du béton conservés dans deux environnements de cure (cure humide prolongé et cure humide initial de 7 jour suivi d'une cure à l'air libre). La performance des mortiers à base de ce sable vis-à-vis des agents agressifs (sulfate de magnésium, sulfate de sodium et eau de mer) a aussi été étudiée. Les pourcentages de fines de sable de concassage utilisés sont de 0, 5, 10, 15, 20 et 25% et 0, 10, 15 et 20% pour bétons et mortiers, respectivement. Les résultats obtenus lors de cette étude, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La résistance à la compression est maximale pour un taux de fines calcaires de 15% dans le sable de concassage.
- L'environnement de cure humide prolongé a un effet très positif sur les propriétés des bétons à base de sable de concassage en particulier la résistance à la compression et la porosité totale.
- La cure humide initiale de 7 jours est suffisante pour améliorer les propriétés des bétons.
- La cinétique d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité) est négligeable. les valeurs de la sorptivité de tous les bétons confectionnés avec ou sans fines calcaires varient de $0.88 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ à $5.85 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$.
- La présence des fines de calcaire dans le béton à base de sable de concassage augmente la perméabilité à l'eau, tandis que les perméabilités aux gaz et ions chlorures s'est réduit.
- L'incorporation de 10 à 25% de fines calcaires dans le sable de concassage diminue la perméabilité à l'eau des bétons étudiés à long terme pour les deux environnements de cure en comparaisons aux bétons de référence.

- Le superplastifiant améliore l'ouvrabilité et la compacité du béton frais. Il a augmenté aussi la résistance à la compression et diminue la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau et les perméabilités aux gaz et ions chlorés.
- La perméabilité modérée aux ions chlore et aux gaz des bétons à base de sable de concassage contenant de 5 à 25% de fines calcaire signifient que son utilisation en structures exposées à l'environnement marin devrait être limitée.
- L'utilisation de 10% de fines calcaires dans le sable de concassage a un effet positif sur l'expansion des mortiers vis-à-vis des deux solutions sulfatiques et l'eau de mer.
- L'utilisation des fines calcaires dans les mortiers à base de sable de concassage améliore la résistance à la compression vis-à-vis des deux solutions sulfatiques et l'eau de mer.
- L'influence des fines calcaires sur la durabilité des mortiers vis-à-vis des deux sulfates et de l'eau de mer n'est pas claire et aucune tendance évidente n'est détectée.

Perspectives

Suite à cette étude expérimentale, nous proposons de la compléter pour d'autres investigations :

- ✓ Etude de fines calcaire sur les propriétés des bétons à base de sable de concassage avec utilisation d'un ciment résistant au sulfate.
- ✓ Etude de l'effet de climat chaud sur la durabilité des bétons a base de sable de concassage.
- ✓ Etude de la performance des bétons à base de sables de concassage issus de différentes carrières en Algérie.
- ✓ Etude des propriétés des bétons à base d'un mélange de sable de concassage et sable de dune avec différents ciments disponibles sur le marché.

REFERENCES

1. Khatib J.M, Menadi B, Kenai S. Effect of cement type on strength development of mortar containing limestone fines. Excellence in concrete construction through innovation, limbachiya 2009, Taylor et Francis group, London, ISBN 978-0-415-47592-1.
2. Menadi B. Performance du mortier et béton à base de filler calcaire. Thèse de doctorat d'état, sous la direction de Pr Kenai Said, Département de Génie Civil, université Saad Dahleb de Blida, Juin 2008.
3. Kenai S, Menadi B, Attar A, Khatib J. Effect of crushed limestone fines on strength of mortar and durability of concrete. ICCBT 2008; A-(18):pp205-216.
4. Menadi B, Kenai S, Khatib J, Ait-Mokhtar A. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. Construction and Building Materials (23): 2009; 625–633.
5. 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; 20:202-213.
6. Li Beixing, Wang Jiliang, Zhou Mingkai. Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low and high-strength concretes. Construction and Building Materials, August (2009); 23: 2846-2850.
7. Topçu I.B, Ugurlu A. Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete. Cement and Concrete Research 33: (2003); 1071–1075.
8. Ghrici M. Etude des propriétés physico-mécaniques et de la durabilité de ciments à base de pouzzolane naturelle. Thèse de Doctorat sous la direction de Pr Kenai Said, département de Génie Civil, Université de Science et de la Technologie d'Oran, 2004.
9. Nguyen T.S. Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires. Thèse de Doctorat sous la direction de Pr Karim Ait-Mokhtar et Pr Nicolas Burlion, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) ; INSA-UPS Génie Civil, (2006).
10. Neville A. Propriétés des bétons. Eyrolles ; France : 2000.
11. Chakib K. Bilan des activités minières année 2007. Ministère de l'énergie et des mines, direction générale des mines, Volume I; Avril: 2008.

12. Chakib K. Bilan des activités minières année 2007. Ministère de l'énergie et des mines, direction générale des mines, Volume II; Avril: 2008.
13. Kenai S, Benna Y, Menadi B. The effect of fines in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete. Proceeding of international conference held at the university of Sheffield, 28 June; 2 July: 1999.
14. Westerholm M, Lagerblad B, Forssberg E. Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates. *Materials and Structures* (2007); 40:615–625.
15. Hebbouche A. Propriété mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage. Mémoire de magistère, sous la direction de Pr. Kenai. S, département de Génie Civil, Université de SAAD DAHLEB Blida, 2002.
16. Kenai S, Menadi B. Use of sand from residues of aggregates quarries in concrete. Beijing, China, September 2005.
17. Skender Z. Durabilité du béton à base de sable de concassage. Mémoire de magistère, sous la direction de Pr Bali Abderahim, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique et Pr kenai Said, Professeur à l'université SAAD DAHLEB de Blida, 2009.
18. Bonavetti V.L, Irassar E.F. The effect of stone dust content in sand. *Cement and concrete research*, vol. 24, No. 3; pp-590, 1994.
19. Benachour Y, Davy C.A, Skoczylas F, Houari H. Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. *Cement and Concrete Research* 38; (2008): 727–736.
20. Bertrand R. Influence des fillers calcaires sur la maniabilité des bétons. *Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics*, série: Béton N°147, France, 1975, pp3-11.
21. Turcry P. Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : influence de la Formulation. Thèse de doctorat d'état, sous la direction de Dr Gilles Pijaudier-Cabot, Ecole Centrale de Nantes, février 2004.
22. Bédérina M, Khenfer M.M, Dheilily R.M, Quéneudec M. Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cement and Concrete Research*, (2004).
23. Guemmadi Z. Contribution a l'étude de l'influence des additions calcaires (fillers) sur le comportement des matrices cimentaires. Thèse de doctorat d'état, sous la direction de Pr Houari Hassan, Département de Génie Civil, Université Mentouri - Constantine, Juin 2004.
24. Benna Y. Valorisation du sable de concassage. 1^{er} colloque maghrébin en génie

civil, Algérie, Beskra, les 16 et 17 novembre 1998.

25. Sathouari F, Goufi N, Guezzouli A. Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria): October 12-14, 2009.
26. Eren Ö, Marar K. Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete. *Construction and Building Materials* 23; (2009): 981–988.
27. Boukni B, Houari H. L'effet de fillers sur les performances des bétons autoplacants chauffés à 200°C. SBEIDCO- 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing in Developing Countries ENSET Oran; (Algeria): Octobre 12-14, 2009.
28. Donza H, Cabrera O, Irassar E.F. High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement and Concrete Research* 32; (2002): 1755–1761.
29. Celik T, Marar K. Effect of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete Research* 26; (1996): 1121–1130.
30. Heikal M, El-Didamony H, Morsy M.S. Limestone-filled pozzolanic cement. *Cement and Concrete Research* 30; (2000): 1827–1834.
31. Ghrici M, Kenai S, Said-Mansour M. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites* 29 ; (2007): 542–549.
32. Piérard J, Michel F. Effet des fillers calcaires sur la résistance aux chlorures des mortiers. Université de Liège, 2007.
33. Hadjoudja M, Bedrina M. Influence des fillers des déchets des briques sur la durabilité du béton de sable de dunes. Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 décembre 2007.
34. Tosun K, Felekoglu B, Baradan B, Akın-Altun I. Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations. *Construction and Building Materials* 23; (2009): 2534–2544.
35. Hadj Sadok A. Durabilité des mortiers à base de ciment au calcaire. Mémoire de magistère, sous la direction de Pr Kenai. Said, département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb Blida, 2004.
36. Kakali G, Tsvivilis S, Skaropoulou A, Sharp J.H, Swamy R.N. Parameter's affecting thaumasite formation in limestone cement mortar. *Cement et Concrete Composites* 25; (2003): 977–981.

37. 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, No. 11, pp. 1655–1667, 1998.
38. Fiche Technique. Algerian cement company. Ciment portland composé, CPJ-CEM-II/A 42.5.
39. Norme française, P 18-560. Granulats-Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR, Paris, 1990.
40. Norme française, P 18-598. Granulats- équivalent de sable. AFNOR, Paris, 1990.
41. Norme française, P 18-554. Granulats-mesure de la masse volumique, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux. AFNOR, Paris, 1990.
42. Norme française, P 18-555. Granulats-mesure de la masse volumique, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables. AFNOR, Paris, 1990.
43. Dreux G, Festa J. Nouveau guide de béton et de ses constituants. Ed. Eyrolles, 1995-1998.
44. Norme française, P 18-404. Bétons-essais d'étude, de convenance et de contrôle, confection et conservation des éprouvettes. AFNOR, Paris, 1981.
45. Norme française, P 18-451. Bétons-essais d'affaissement. AFNOR, Paris, 1981.
46. Norme française, P 18-440, Essai pour béton frais-Masse volumique. AFNOR, Paris, 1999.
47. Norme française, P 18-406. Béton-essai de compression. AFNOR, Paris, 1981.
48. DIN 1048. Testing method for concrete: determination of the depth of penetration of water under pressure, 2000.
49. Controlab. Système de test pour mesurer la perméabilité a l'air compte-bulles. Manuel d'utilisation, Réf E0651.
50. Grace W.R, Conn C. Concrete understanding AASHTO T277 and ASTM C1202 Rapid Chloride Permeability Test. Technical Bulletin Tb-0100, Cambridge, MA 02140, Canada, 2006.
51. Stanish K.D, Hooton R.D, Thomas M.A. Testing the chloride penetration resistance of concrete: A literature review. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.
52. Mikael W. Rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate. Licentiate thesis, Lulea University of Technology, SE-971 87 Lulea, Lulea, 2006.

53. Dupain R, Ianchon R, Saint Arroman J.C. Granulats, sols, ciments et bétons : caractérisations des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Nouvelle édition conforme aux normes européennes (2006), Paris, écoles française du béton.
54. Norme française, P 15-471. Méthodes d'essais des ciments-détermination des résistances mécaniques. AFNOR, Paris, 1995.
55. Menadi B, Kenai S, Khatib J.M, Ait-Mokhtar A. Strength development and prediction of mortars containing limestone fines. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries; ENSET Oran (Algeria): October 12-14, 2009.
56. Adam M. Durabilité et pathologie du béton. Techniques de l'Ingénieur, traité construction, C 2 250.
57. Hamami A.A. Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires. Thèse de Doctorat sous la direction de Pr Myriam Carcasses et Pr Nicolas Burlion, Lille, 2009.
58. Stéphan A. Durabilité des bétons autoplacants. Thèse de doctorat d'état, sous la direction de Pr Geert de Schutter à l'Université de Gand, Belgique, et Pr Abdelhafid Khelidj à l'Université de Nantes, Octobre 2004.
59. De Larrard François. Structures granulaires et formulation des bétons. laboratoire central des ponts et chaussés, 1999.
60. Gané R. Cours de durabilité et réparation du béton (GCI-714). Chapitre 2 : la durabilité du béton. Université de Sherbrooke, Canada, 2002, pp.32.
61. Documentation technique, T93. les bétons et les ouvrages en site maritime. CIMbéton, centre d'information sur le ciment et ses applications, 7, Place de la Défense - 92974 Paris.
62. Caude G. Guide d'utilisation du béton en site maritime. Centre d'Etudes techniques maritimes et fluviales, Notice N° PM 08-01 : Avril 2008.
63. Irassar E.F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler: A review. Cement and Concrete Research, 39 (2009); 241–254.

ANNEXES

Fiches techniques :

- **PLASTIMENT BV 40**
- **SIKA VISCOCRETE 3045**

Notice technique
Edition août 2009
Numéro 1.10
Version n°153.2009
PLASTIMENT® BV 40

PLASTIMENT® BV 40

Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab. 1 et 2



Présentation

Le PLASTIMENT® BV 40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité,
- facilite la mise en place du béton,
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment,
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Domaines d'application

1. Augmentation des résistances mécaniques.

Le PLASTIMENT® BV 40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée.

La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Le PLASTIMENT® BV 40 est donc particulièrement indiqué pour :

- les bétons armés à hautes performances,
- les bétons précontraints,
- les bétons préfabriqués étuvés.

2. Réduction du dosage en ciment.

Le PLASTIMENT® BV 40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques.

Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

3. Amélioration de la maniabilité.

Le PLASTIMENT® BV 40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10 % environ.

Il est donc utilisé pour la confection de pièces élancées, fortement ferrillées et dans le cas de bétons pompés.

4. Augmentation du délai de mise en œuvre.

A dosage élevé, le PLASTIMENT® BV 40 augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :

- à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %.
- à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 h.

Le PLASTIMENT® BV 40 est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AER5.

Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel,
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier),
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage.



Caractères généraux Le PLASTIMENT® BV 40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

Sur béton frais :

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage,
- de disperser le ciment dans la masse,
- d'améliorer l'adhérence béton-armatures,
- de s'opposer à la ségrégation,
- d'améliorer la thixotropie,
- d'étaler éventuellement la prise.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques,
- d'accroître la compacité,
- d'augmenter l'imperméabilité,
- de diminuer le retrait et le fluage.

Le PLASTIMENT® BV 40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

Agréments, essais officiels

- Caractéristiques sur béton frais, résistances mécaniques à 7 et 28 jours, perméabilité, capillarité : CEMEREX - PV n° 363. 1.014 du 11.02.72.
- Résistances mécaniques à 7, 28, 90 et 365 jours : EMPA ZURICH - PV n° 59239/32 du 10.02.69
- Conformité à la norme ASTM C 494 type A : TESWELL Laboratoires (USA) - PV n° IZ-15 du 23.08.79

Caractéristiques

Coloris Brun foncé

Conditionnement

- Tonnelet de 30 litres
- Fût de 250 kg
- Conteneur perdu de 1000 litres
- Vrac

Stockage Le PLASTIMENT® BV 40 gèle à - 5°C environ.
En cas de gel prolongé et intense, vérifier s'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.

Données techniques

Densité 1,190 ± 0,010

pH 7 ± 1

Extrait sec 37 à 40 %

Teneur en ion Cl⁻ ≤ 0,1 %

Teneur en Na₂O éq. ≤ 3,5 %

Temps de prise (NF EN 480-2)	CEM I 52,5 PM ES CP2 HTS Le Teil		CEM I 52,5 Gargenville	
	20°C	5°C	20°C	5°C
	PLASTIMENT® BV40 0,5%	11 h 00	15 h 00	10 h 00
PLASTIMENT® BV40 1,25%	24 h 00	26 h 00	20 h 00	33 h 00



Conditions d'application

Dosage

Le dosage précis du PLASTIMENT® BV 40 est fonction des conditions de chantier et de l'effet recherché.

Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1% du poids du ciment (soit 0,25 à 0,85 litre pour 100 kg de ciment).

Comme retardateur : à partir de 0,5% du poids du ciment (soit 0,42 litre pour 100 kg de ciment).

Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais puisqu'il est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacité, plasticité) et des conditions climatiques.

Ne pas dépasser 1% (0,85 litre pour 100 kg de ciment) sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.

Mise en œuvre

Introduire le PLASTIMENT® BV 40 dans l'eau de gâchage.

Précautions d'emploi

Manipulation non dangereuse.

En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit.

Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex.
France

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France

Fiche technique : SIKA VISCOCRETE 3045

Construction

Notice technique
Edition août.2009
Numéro 1.60
Version n°160.2009
SIKA VISCOCRETE® 3045

SIKA VISCOCRETE® 3045

Plastifiant/Réducteur d'eau de nouvelle génération pour bétons prêts à l'emploi.

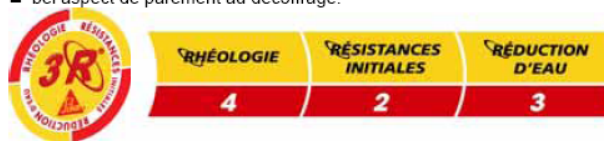
Conforme à la Norme NF EN 934-2 Tab. 1 et 2



Présentation SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron.

Domaines d'application SIKA VISCOCRETE 3045 permet d'obtenir un long maintien de rhéologie (>1H30). Il est donc parfaitement adapté à l'industrie du BPE et à l'utilisation sur chantier.
SIKA VISCOCRETE 3045 permet la fabrication de :
■ bétons plastiques à fluides,
■ bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice,
■ bétons pompés sur longues distances.
Dans les bétons fluides, SIKA VISCOCRETE 3045 améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau qui confère au béton les propriétés suivantes :
■ haute réduction d'eau,
■ maintien prolongé de la rhéologie,
■ robustesse vis-à-vis de la ségrégation,
■ bel aspect de parement au décoffrage.



Caractéristiques

Aspect Liquide marron

Conditionnement
■ Fût de 230 kg
■ Conteneur perdu de 1000 litres
■ Vrac

Stockage Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.
En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation 6 mois dans son emballage d'origine intact

Données techniques

densité 1,11 ± 0,02



pH	5 ± 1
Teneur en ions Cl ⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 2,5 %
Extrait sec	36,4 ± 1,8 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,25 à 2,5 % du poids de liant selon les performances recherchées. Dosage usuel du SIKA VISCOCRETE 3045 : 0,3 % à 0,8 %.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE 3045 est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité sur Internet www.sika.fr
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France