

UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA 1

**Faculté de Technologie
Département de Génie Civil**

THESE DE DOCTORAT

en Génie Civil

Intitulé :

**ETUDE DES PROPRIETES MECANQUES ET DURABILITE
DU BETON A BASE DE SABLE DE CONCASSAGE**

Présentée par :

MEZIANE El Hadj

Soutenue le 11 Février 2016

Devant le jury composé de:

ABED Mohamed	Professeur, Université de Blida	Président
MENADI Belkacem	Professeur, Université de Blida	Examineur
DEBIEB Farid	Maître de conférences A, Université de Médéa	Examineur
BOUKENDAKDJI Othmane	Maître de conférences A, Université de Médéa	Examineur
KENAI Said	Professeur, Université de Blida	Rapporteur
GHRICI Mohamed	Professeur, Université de Chlef	Co- Rapporteur
EZZIANE Karim	Professeur, Université de Chlef	Invité

Blida, 2016

Remerciements

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

*Je tiens à remercier tout particulièrement mon Directeur de thèse : 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 le remercie également pour ses remarques pertinentes et constructives.*

*Je remercie vivement mon codirecteur de thèse, Monsieur **Mohamed GHRICI**, Professeur à la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de Chlef, Directeur du Laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Chlef, d'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire lors de l'élaboration de ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Karim EZZIANE**, Professeur à la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de Chlef pour ses conseils scientifiques tout au long de la thèse, sa gentillesse, sa grande disponibilité, ces encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée. Le partage de l'ensemble de ses connaissances m'a toujours permis de travailler dans les meilleures conditions.*

*Je remercie monsieur **ABED Mohamed** professeur à l'Université de Blida, qui a accepté de présider ce Jury ; de même monsieur **MENADI Belkacem** ; professeur à l'Université de Blida, monsieur **BOUKENDAKDJI Othmane** ; Maître de conférence à l'Université de Médéa, monsieur **Farid DEBIEB** ; Maître de conférence à l'Université de Médéa, qui ont acceptés d'examiner ce travail.*

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 cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes parents, mes frères, mes sœurs, ma femme et mes enfants qui m'ont soutenu pendant ma recherche.

EL Hadj MEZIANE

RESUME

Ces dernières années, Le secteur de construction, en Algérie, est en plein expansion. 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 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. Ce travail a pour objectif d'évaluer les caractéristiques du sable de concassage (SC), résultant des carrières de calcaire et d'identifier ses performances avec trois types de ciment. Les résultats obtenus montrent que le SC a une grande influence sur les propriétés du mortier; il accélère l'hydratation des grains de ciment conduisant à un temps de prise plus court, augmente la chaleur d'hydratation, améliore considérablement les résistances mécaniques (en flexion et en compression) et augmente la résistance des mortiers aux acides et aux sulfates. Ceci montre la possibilité de l'utilisation du sable de concassage pour la confection du mortier et du béton avec un taux de fines allant de 5 à 15% selon le type de ciment utilisé.

Mots clés : Ciment, sable concassé, fines calcaires, résistance à la compression, durabilité, chaleur d'hydratation, expansion, perte de masse.

ABSTRACT

In recent years, the construction sector in Algeria is in full expansion. This has created considerable consumption of natural resources, especially the aggregates. However, the use of alluvial sand was banned for technical and environmental reasons, contributing to an increased lack of sand, mainly in the northern region of the country. Currently, the conventional concrete-based crushing sand with a fine content of from 5% to 18% is widely used in some countries where there's a deficit in river sand. The objective of this study was to evaluate the characteristics of crushed sand (SC), resulting from limestone quarries and identify its performance with three types of cement. The results show that the SC has a great influence on mortar properties. Sand Crushing accelerates hydration of the cement grains leading to a shorter setting time, increases the heat of hydration, significantly improves the mechanical strength (bending and compression) and increases the resistance of mortars acids and sulfates. This shows the possibility of using the crushing sand for making mortar and concrete with a fines content of 5 to 15% depending on the type of cement used.

Key words: Cement, crushed sand, limestone fines, compressive strength, durability, hydration heat, Expansion, Weight loss.

ملخص

في السنوات الأخيرة شهد قطاع البناء والتشييد في الجزائر توسعا هائلا. وقد أدى ذلك إلى استهلاك الكبير للموارد الطبيعية بما في ذلك الركام. ومع ذلك، فقد تم حظر استخدام الرمل الطبيعي لأسباب فنية وبيئية، ولا سيما في المنطقة الشمالية من البلاد. حاليا، يتم استخدام الرمال في الخرسانة التقليدية والتي تحتوي على مسحوق يتراوح ما بين 5% إلى 18% على نطاق واسع في بعض البلدان حيث هناك عجز في رمال النهر. ويهدف هذا العمل لتقييم خصائص الرمال المسحوقة (SC)، والناجمة عن محاجر الحجر الجيري وتحديد أدائها مع ثلاثة أنواع من الأسمنت. وأظهرت النتائج أن الرمال المسحوقة له تأثير كبير على خصائص الخرسانة. الرمال المسحوقة تعجل ترطيب الأسمنت مما يؤدي إلى تحديد الوقت أقصر للتصلب، ويزيد من حرارة الماء، ويحسن إلى حد كبير من القوة الميكانيكية (الانحناء والضغط) ويزيد من مقاومة كبريتات الحوامض. وهذا يدل على إمكانية استخدام الرمال المسحوقة لصنع الخرسانة ذات المسحوق المحتوي على 5-15% اعتمادا على نوع من الاسمنت المستخدم.

الكلمات الرئيسية: الاسمنت، الرمل، المسحوق، الحبيبات الناعمة، قوة الضغط، الديمومة، حرارة الإماهة للإسمنت، والإنتفاخ وفقدان الوزن.

Listes des figures

Figure 1.1: Consommation de granulats pour quelques ouvrages types.	25
Figure 1.2: Production mondiale des granulats en 2008	26
Figure 1.3: Evolution de la production des agrégats période 2000–2009.	27
Figure 1.4 : Production des agrégats (M^3) : année 2009, 10 wilayas les plus productrices.	28
Figure 1.5: Les impacts de l'extraction du sable sur l'environnement.	29
Figure 1.6 : Relation entre la résistance à la compression du béton et la résistance du mortier.	31
Figure 1.7: Evolution de la production de sable concassé période 2005 – 2009	32
Figure 1.8 : Production de sable concassé, par statut juridique : année 2009.	33
Figure 1.9 : Production de sable concassé (M^3): année 2009, 10 wilayas les plus productrices.	34
Figure 2.1: Variation de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines.	39
Figure 2.2: Effet des fines calcaires sur l'affaissement du béton.	40
Figure 2.3: Variation de la demande en eau en fonction du pourcentage de masse de filler.	41
Figure 2.4: Evolution de la masse volumique du béton en fonction de la quantité des fines.	43
Figure 2.5: Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.	43
Figure 2.6: Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.	44
Figure 2.7 : l'influence des fillers de quartz (Q) et de calcaire (C) sur le flux de chaleur d'un ciment PC1 riche en C_3A et un ciment PC2 pauvre en C_3A .	45
Figure 2.8 : Chaleur d'hydratation des mortiers composés contenant différentes additions minérales, pour une surface spécifique comparable. (CC : Calcaire, A: poudre d'alumine, SF : fumée de silice, F : quartz	46
Figure 2.9 : développement de résistance à la traction par flexion à différents âges.	47
Figure 2.10: Résistance à la traction des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines	48
Figure 2.11: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des mortiers.	49
Figure 2.12: Développement de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires.	50
Figure 2.13: Variation de la résistance à la compression pour différente granulométrie et rapport ciment /sable =1/4,2 (A/S : argile / sable (%)).	50
Figure 2.14: Evolution de modules de Young en fonction de pourcentage de filler.	52
Figure 2.15: Développement du retrait du béton à base de sable de concassage avec différents taux de fines.	52
Figure 2.16: Profondeur de pénétration à 90 jours en fonction des différents types de ciments (A, B, C, D).	54
Figure 2.17 : Coefficient de l'imperméabilité en fonction de dosage en ciment du béton avec différents pourcentage en filler.	54

Figure 2.18: Coefficient de perméabilité à l'eau du béton avec différents pourcentages de poussière de concassage à l'âge de 28 jours.	55
Figure 2.19: Coefficient de perméabilité avec différents mélanges du béton contenant différents pourcentages de fines à 90 jours.	55
Figure 2.20: Influence de fines calcaires sur la perméabilisé aux ions chlores du béton de sable de concassage de faible (a) et de haute (b) résistance à 28 jours.	56
Figure 2.21: Perméabilité aux ions chlores des bétons contenant de fumée de silice, pouzzolane naturel et du calcaire.	56
Figure 2.22: Valeurs du coefficient de la perméabilité au gaz des bétons avec et sans fines pour différents types de ciment.	57
Figure 2.23 : Evolution du coefficient d'absorption capillaire pour différents taux de fillers dans le mortier.	58
Figure 2.24: Absorption du béton à 28 jours d'âges contenant différents pourcentages de poussières de concassage.	59
Figure 2.25: Coefficient de sorptivité du béton à 28 et 90 jours pour différents rapports E/C et différentes fines dans le mortier.	59
Figure 2.26: Evolution du coefficient de capillarité en fonction du pourcentage des fillers dans le béton.	60
Figure 2.27 : Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de sodium (5% Na_2SO_4).	61
Figure 2.28 : Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de magnésium (5% MgSO_4).	61
Figure 2.29: Expansion des spécimens de deux clinkers (I et III) avec leur substitution en % par le calcaire exposés aux sulfates	63
Figure 2.30: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% MgSO_4	64
Figure 2.31: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na_2SO_4	64
Figure 2.32: Influence du gel dégel et de filler sur la résistance a la compression	65
Figure 2.33 : Evolution de taux de résistance en fonction de dosages en fillers	65
Figure 3.1 : Programme expérimentales pour les essais effectués	68
Figure 3.2 : Tamiseuse électrique.	70
Figure 3.3 : Courbe granulométrique du sable de concassage	71
Figure 3.4: Texture de la surface du sable normalisé et concassé.	71
Figure 3.5 : a) Malaxeur de capacité 5 litre b: Table vibrante pour mortier.	73
Figure 3.6: Déroulement de l'essai de flexion trois points pour éprouvettes prismatiques de mortiers 40 x 40 x160 mm.	74
Figure 3.7: Rupture d'un demi-prisme.	75
Figure 3.8 : Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme.	76
Figure 3.10 : Dispositif utilisé pour mesurer la chaleur d'hydratation	77

Figure 3.11 : Boite de languavant	78
Figure 3.12 : Boite d'acquisition des températures	78
Figure 3.13 : Immersion des éprouvettes dans la solution de sulfate de magnésium (5%MgSO ₄).	79
Figure 3.14: Immersion des éprouvettes dans la solution de sulfate de sodium (5%Na ₂ SO ₄).	79
Figure 3.15: Vue générale des éprouvettes immergées dans les solutions de 1% HCl et 3%H ₂ SO ₄	80
Figure 3.16 : Appareil pour mesurer d'expansion des mortiers.	80
Figure 4.1 Résultats des temps de début et de fin de prise pour différents types de sable et de ciment.	85
Figure 4.2 : Relation entre le temps de prise des mortiers à base de sable normalise et de sable de concassage (DP : Début de prise, FP : Fin de prise).	86
Figure 4.3 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassage en fonction du temps.	87
Figure 4.4. : Relation entre la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassage.	88
Figure 4.5 : Variation de la résistance à la compression des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassage en fonction du temps.	89
Figure 4.6. : Relation entre la résistance à la compression des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassé.	90
Figure 4.7. Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment C1 avec le sable normalisé et le sable concassé.	92
Figure 4.8. Evolution du taux d'hydratation du ciment C1 avec le sable normalisé et le sable concassé.	92
Figure 4.9. Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment C2 avec le sable normalisé et le sable concassé.	93
Figure 4.10. Evolution du taux d'hydratation du ciment C2 avec le sable normalisé et le sable concassé.	93
Figure 4.11. Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment C3 avec le sable normalisé et le sable concassé.	94
Figure 4.12. Evolution du taux d'hydratation du ciment C3 avec le sable normalisé et le sable concassé.	94
Figure 4.13: Relation entre la chaleur d'hydratation des mortiers à base de sable normalisé et de sable concassé.	96
Figure 4.14 : Expansion du mortier immergé dans 5% Na ₂ SO ₄ .	98
Figure 4.15 : Expansion du mortier immergé dans 5% MgSO ₄	98
Figure 4.16 : Perte de masse du mortier immergé dans 1% HCl.	100
Figure 4.17 : Perte de masse du mortier immergé dans 3% H ₂ SO ₄ .	101
Figure 5.1: Développement de la résistance à la flexion des mortiers à base de ciment C1 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	105
Figure 5.2: Développement de la résistance à la flexion des mortiers à base de ciment C2 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	105
Figure 5.3: Développement de la résistance à la flexion des mortiers à base de ciment C3 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	106

Figure 5.4: Développement de la résistance à la compression des mortiers à base de ciment C1 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	107
Figure 5.5: Développement de la résistance à la compression des mortiers à base de ciment C2 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	108
Figure 5.6: Développement de la résistance à la compression des mortiers à base de ciment C3 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	108
Figure 5.7: Développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C1 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	112
Figure 5.8: Effet de la teneur des fines dans le sable de concassage sur le développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C1.	113
Figure 5.9: Développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C2 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	113
Figure 5.10: Effet de la teneur des fines dans le sable de concassage sur le développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C2.	114
Figure 5.11: Développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C3 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.	115
Figure 5.12: Effet de la teneur des fines dans le sable de concassage sur le développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C3.	115
Figure 5.13: Flux de chaleur dégagée pour un ciment C1 en présence d'un sable de concassage avec différents pourcentage de fines	117
Figure 5.14: Flux de chaleur dégagée pour un ciment C2 en présence d'un sable de concassage avec différents pourcentage de fines	117
Figure 5.15: Flux de chaleur dégagée pour un ciment C3 en présence d'un sable de concassage avec différents pourcentage de fines	118
Figure 5.16: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C1 et du sable de concassage immergé dans 5% Na ₂ SO ₄	119
Figure 5.17: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C2 et du sable de concassage immergé dans 5% Na ₂ SO ₄	120
Figure 5.18: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C3 et du sable de concassage immergé dans 5% Na ₂ SO ₄	120
Figure 5.19: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C1 et du sable de concassage immergé dans 5% MgSO ₄	121
Figure 5.20: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C2 et du sable de concassage immergé dans 5% MgSO ₄	122
Figure 5.21: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C3 et du sable de concassage immergé dans 5% MgSO ₄	122
Figure 5.22 : Evolution de la perte de masse du mortier à base de ciment C1 et du sable de concassage immergé dans 1% HCl	123
Figure 5.23 : Evolution de la perte de masse du mortier à base de ciment C2 et du sable de concassage immergé dans 1% HCl	124

Figure 5.24 : Evolution de la perte de masse du mortier à base de ciment C3 et du sable de concassage immergé dans 1% HCl	124
Figure 5.25 : Evolution de la perte de masse des mortiers immergés dans 3% H ₂ SO ₄	126
Figure 5.26 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur La résistance à la flexion (t=28 jours)	127
Figure 5.27 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur La résistance à la compression (t=28 jours)	127
Figure 5.28 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur le dégagement de la chaleur d'hydratation (5 jours)	128
Figure 5.29 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur la valeur du flux de chaleur du pic II.	128
Figure 5.30 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur l'expansion dans une solution de 5% de Na ₂ SO ₄ (t=1 an)	129
Figure 5.31 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur l'expansion dans une solution de 5% de MgSO ₄ (t=1 an)	129
Figure 5.32 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur la perte de poids dans une solution de 1% de HCl (t=6 mois)	130
Figure 5.33 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur la perte de poids dans une solution de 3% de H ₂ SO ₄ (t=6 mois)	131

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Effet du dosage en superplastifiant sur l'étalement, la résistance et la teneur en air des mortiers contenant de fines calcaires	42
Tableau 2.2 : Effet de pourcentage des fines calcaires sur la résistance à la traction par flexion	47
Tableau 3.1 : Compositions chimiques, minéralogiques et physiques des ciments utilisés.	69
Tableau 3.2: Équivalent du sable et module de finesse des sables utilisés	71
Tableau 3.3: Proportions du mélange des mortiers à base de sable de concassage.	72
Tableau 3.4. Procédure de malaxage et mode de fabrication des éprouvettes	73
Tableau 4.1: Résultats de la chaleur d'hydratation pour tous les trois mortiers	91
Tableau 5.1: Variations des rapports R_{tj}/R_{28j} et $R(\%)/R(0\%)$ en fonction de l'ajout calcaire de la résistance à la compression.	110
Tableau 5.2: Variations des rapports R_{tj}/R_{28j} et $R(\%)/R(0\%)$ en fonction de l'ajout calcaire de la résistance à la traction.	111
Tableau 5.3 : Valeurs du flux de chaleur du second pic et son temps de parution pour les différentes compositions de mortiers.	109

Liste des symboles et des abréviations

A	Section de l'éprouvette
C	Dosage en ciment
C ₂ S	Silicate bicalcique (belite)
C ₃ A	Aluminate tricalcique
C ₃ S	Silicate tricalcique (alite)
C ₄ AF	Aluminate-ferrite tétra calcique
CaCO ₃	Carbonate de calcium
C-H	Chaux hydraté
CO ₂	Oxyde de carbone
CPA	Ciment portland sans ajout
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
SC	Sable de Concassage
SN	sable Normalisé
E	Dosage en eau
E/C	Rapport eau sur ciment
FC	Filler calcaire
G/S	Rapport de gravier sur sable
H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
HCl	Acide hydrochlorique
HR	Humidité relative
MgSO ₄	Sulfate de magnésium
Na ₂ SO ₄	Sulfate de sodium
Rc	Résistance à la compression
S	Sable
SiO ₂	Oxyde de silicium
t	Temps
T	Température

Sommaire

Remerciements	3
RESUME	5
ABSTRACT	5
<i>ملخص</i>	5
Listes des figures	7
Liste des tableaux	12
Liste des symboles et des abréviations	13

Introduction générale	20
-----------------------------	----

Chapitre 01 Utilisation du sable de concassage

1.1. Introduction	24
1.2. Production des granulats.....	24
1.2.1. Les granulats pour béton.....	24
1.2.2. Production des granulats dans le monde.....	25
1.2.3. Production des granulats en Algérie	27
1.2.4. Valorisation des sables de concassage.....	29
1.2.4.1. Caractéristiques des sables de concassage.....	29
1.2.4.2. Avantages et Inconvénients des sables de concassage	30
1.3. Utilisation du Sable de concassage en Algérie.....	31
1.4. Spécifications pour l'emploi des sables de concassage.....	34
1.5. Travaux de recherche sur le sable de concassage en Algérie	35
1.6. Conclusion	36

Chapitre 02 Effet du sable de concassage sur les propriétés du béton

2.1. Introduction	38
2.2. Effet du sable de concassage sur l'état frais	38
2.2.1. Ouvrabilité	38
2.2.2. Masse volumique	42
2.3. Effet du sable de concassage sur la chaleur d'hydratation	44

2.4. Effet du sable de concassage sur l'état durci.....	46
2.4.1. Résistance à la traction par flexion	46
2.4.2. Résistance à la compression.....	48
2.4.3. Module d'élasticité.....	51
2.4.4. Retrait.....	52
2.5. Effet du sable de concassage sur la durabilité.....	53
2.5.1. Perméabilité à l'eau.....	53
2.5.2. Perméabilité aux ions chlorures	55
2.5.3. Perméabilité au gaz	57
2.5.4. Sorptivité et absorption capillaire d'eau	57
2.5.5. Résistance aux sulfates.....	60
2.5.6. Résistance aux acides.....	64
2.5.7. Gel-dégel.....	65
2.6. Conclusion.....	66

Chapitre 03
Matériaux et Essais

3.1. Introduction	68
3.2. Matériaux utilisés.....	69
3.2.1. Ciments	69
3.2.2. Sable.....	70
3.2.3. Eau de gâchage.....	72
3.3. Composition des mortiers.....	72
3.4. Confection et conservation des éprouvettes	72
3.5. Description des essais	74
3.5.1. Résistance à la traction par flexion.....	74
3.5.2. Résistance à la compression.....	74
3.5.3. Chaleur d'hydratation	76
3.5.4. Durabilité	78
3.5.4.1. Mesure de l'expansion	80
3.5.4.2. Mesure de perte de masse	80
3.6. Conclusion.....	81

Chapitre04
Effet du type de sable sur les performances du mortier normalisé.

4.1. Introduction	84
4.2. Temps de prise.....	84
4.3. Résistance à la flexion.....	86
4.4. Résistance à la compression	88
4.5. Chaleur d'hydratation.....	91
4.6. Attaque des sulfates	97
4.7. Attaque des acides	99
4.8. Conclusion	101

Chapitre 05
Effet des fines du sable sur les performances du mortier normalisé

5.1. Introduction	104
5.2. Propriétés mécaniques	104
5.2.1. Résistance à la traction par flexion	104
5.2.1. Résistance à la compression	106
5.2.3. Evolution des propriétés mécaniques.....	109
5.3. Propriétés d'hydratation	109
5.3.1. Chaleur d'hydratation	109
5.3.2. Flux de chaleur.....	116
5.4. Durabilité	118
5.4.1. Résistance aux sulfates	118
5.4.2. Résistance aux acides.....	122
5.5. Effet du type de ciment.....	125
5.6. Conclusion	131
Conclusions générales	134
Références Bibliographiques	138

Introduction générale

Introduction générale

Le développement dans la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil a provoqué durant les dernières décennies un accroissement considérable dans la consommation de granulats. La demande de sable en Algérie est estimée à 25,1 millions de tonnes, dont 16 millions de tonnes pour la construction et 9,1 millions de tonnes pour la réalisation des routes. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières et des ballastières. Une exploitation anarchique des sables de mer a causé ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages.

Par conséquent, deux décrets ministériels ont été approuvés en 1991 et 1999 par le ministère de l'équipement et du logement, interdisant l'exploitation abusive de sable de mer et de sable d'alluvions. Il faut noter que la surexploitation de ces sables peut conduire à des répercussions directes sur les activités humaines et les ressources naturelles à savoir l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer.

Parallèlement à cette situation préoccupante, il existe en Algérie environ 1010 carrières avec une capacité de production allant de 10 à 400 tonnes par heure et une production annuelle totale de 68 millions de tonnes. Ces carrières génèrent 15 millions de tonnes de sable de concassage comme un sous-produit. Ce sable n'est utilisé que partiellement dans la construction de routes et rarement dans le béton, provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. La raison principale de la non utilisation de ce sable dans le béton est son taux élevé en fines (éléments inférieur à $80 \mu m$) qui varie de 8 à 30%. Plusieurs pays dans le monde, tels que la France, l'Espagne, l'Angleterre, l'Argentine et le Maroc ont le même problème dans certaines régions et, par conséquent, des programmes de recherches ont été menés pour l'utilisation des sables de concassage dans la fabrication des bétons. Ces études ont conduit ces pays à amender leurs normes et en particulier la majoration de taux de fines admissibles qui passe de 12 à 16 %.

Des travaux ultérieurement menés en collaboration avec le CNERIB ont prouvé la possibilité d'utiliser les sables de concassage contenant des proportions en fines de l'ordre de 15 à 25%. A cet effet, en Algérie, une commission technique permanente (C.T.P) du ministère

de l'Habitat, a créé en 1997 un groupe spécialisé (G.S) pour élaborer et proposer des textes normatifs sur l'utilisation des sables de concassage dans le domaine de bâtiment. Une étude limitée a été conduite en collaboration avec plusieurs laboratoires nationaux. Cependant, plusieurs questions techniques sont restées sans réponses vis-à-vis du problème de retrait, de la variabilité d'une carrière à une autre et de la durabilité du béton à base de ce sable.

La présente étude fait partie d'un projet globale sur la valorisation des sables de concassage, qui vise à contribuer à la compréhension du comportement du béton à base de sable de concassage et tenter de proposer un pourcentage maximal toléré des fines et à l'élaboration d'un projet de texte normatif définissant les conditions d'emploi de ce type de sable dans le béton hydraulique.

Le but principal de ce travail est la contribution à l'étude de la valorisation du sable de concassage pour une meilleure connaissance de son comportement. Le sable de concassage choisi provient de la Carrière de l'ONOF de Oued Fodda à Chlef. Ce sable a été tamisé pour lui séparer les fines et a servi à la confection de quatre types de sables de concassage ayant 0, 5, 10 et 15% de fines. Les propriétés physiques et mécaniques des mortiers normalisés à base de ces sables de concassage ont été comparées avec celles d'un mortier avec un sable normalisé.

Dans cette étude, on a utilisé trois types de ciments pour confectionner les éprouvettes des mortiers. Ces ciments sont :

- ciment ordinaire (CEM I) provenant de la cimenterie de Zahana nommé C1 ;
- ciment composé (CEM II) contenant 10% de calcaire, provenant de la cimenterie de Chlef nommé C2 ;
- ciment composé (CEM II) contenant 18% de pouzzolane naturelle, provenant de la cimenterie de Zahana nommé C3 ;

L'effet des fines sur la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion et la chaleur d'hydratation sera étudié. La durabilité sera également analysée sur la base des essais de perte de masse et d'expansion.

Cette thèse est présentée en deux parties avec une introduction générale donnée au début. Une première composée de deux chapitres concerne la synthèse bibliographique et une deuxième partie composée de trois chapitres regroupe la présentation et l'analyse des résultats expérimentaux.

Le premier chapitre récapitule le potentiel de production des agrégats et notamment les problèmes liés à l'utilisation abusive des sables des mers et des rivières. Comme le sable de concassage est largement produit par les carrières et se trouve sans aucune utilisation, il s'avère une solution prometteuse pour résoudre ce problème.

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'effet du sable de concassage sur les caractéristiques du béton et du mortier à l'état frais et à l'état durci. Les résultats de recherche à travers le monde ont confirmé l'apport positif de ce produit par une utilisation optimale des fines qu'il contient.

Dans le troisième chapitre, les protocoles expérimentaux sont exposés pour mesurer toutes les grandeurs physico-mécaniques des mortiers à base de sable de concassage et de mortier normalisé à savoir la prise, les résistances mécaniques, la chaleur d'hydratation. Des essais complémentaires ont été aussi menés pour permettre de suivre les performances de durabilité apportées par ce sable lorsque les mortiers sont exposés à des milieux agressifs.

Un quatrième chapitre regroupe les résultats des essais normalisés de deux mortiers ; l'un à base de sable de concassage et l'autre avec un sable normalisé. Les caractéristiques physiques ; mécaniques et de durabilités sont comparées avec des illustrations et des modèles numériques.

En cinquième chapitre, l'effet des fines présente dans le sable de concassage a été étudié. Des essais de caractérisation de différents mortiers contenant des taux variés de fines ont été confectionnés. Des résultats sont présentés pour mettre en valeur l'effet de ces fines en fonction des trois types de ciments.

Enfin, On termine cette thèse par une conclusion qui regroupe les principaux résultats obtenus et qui sera suivie par des recommandations pour des futures recherches..

Chapitre 01

Utilisation du sable de concassage

1.1. Introduction

La construction des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages d'art exige de gros approvisionnements en matériaux. Jusqu'à présent, les sables les plus couramment utilisés pour la confection des bétons entrant dans ces ouvrages sont les sables roulés alluvionnaires. Mais les prélèvements excessifs de ces sables ont fortement contribué à l'épuisement des ressources et ont provoqué des retombées néfastes sur l'environnement. Les sables de concassage sont très souvent l'unique alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, à prix raisonnables.

Dans ce chapitre, nous présenterons la production, l'utilisation et les spécifications concernant les sables de concassage. En fin, une synthèse des travaux de recherche sur le sable de concassage en Algérie sera présentée.

1.2. Production des granulats

1.2.1. Les granulats pour béton

Les granulats, petits morceaux de roches (entre 0 et 125 mm), sont destinés à réaliser des ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment, et constituent la matière première indispensable à l'industrie des travaux publics et du bâtiment.

Qu'ils soient d'origines éruptives, calcaires, alluvionnaires ou issues du recyclage, les granulats produits et mis sur le marché font l'objet d'un traitement spécifique suivant leur destination, de l'extraction des roches à la livraison.

La norme européenne EN 12620 traite des granulats utilisés dans le béton. Elle s'applique pour les granulats d'origine naturelle ou artificielle, les granulats recyclés et les mélanges de granulats fins et gros. La masse volumique des granulats doit être de 2000 kg/m³ au minimum. La norme s'applique également aux fillers inertes (aussi appelés granulats très fins) utilisés dans le béton.

Les caractéristiques des granulats sont divisées en trois groupes importants:

- les caractéristiques géométriques (fraction, granularité, limites et/ou tolérances pour la granularité, forme, teneur en éléments coquilliers, teneur en fines, qualité des fines);
- les caractéristiques physiques (résistance à la fragmentation, résistance à l'abrasion, résistance au polissage, masse volumique absolue et relative, absorption d'eau, résistance au gel/dégel, stabilité volumique et réaction alcali-silice);
- les caractéristiques chimiques (teneur en chlorures, teneur en sulfates, présence de constituants affectant la vitesse de prise et de durcissement du béton, présence de constituants affectant la stabilité volumique des laitiers de haut-fourneau refroidi par air, teneur en carbonate).

Selon la fraction et la granularité, on distingue:

- les granulats gros;
- les granulats fins;
- les granulats de classe naturelle;
- les graves.

Les propriétés physiques et mécaniques du produit, et notamment la granulométrie doivent être conformes aux exigences de la norme. Aussi, les sables et les gravillons permettent toutes les reconstitutions de bétons de structure conformes aux normes en vigueur.

1.2.2. Production des granulats dans le monde

Le granulat est le matériau le plus consommé au monde. Il représente au minimum 80 % du volume des ouvrages de génie civil, dont l'importance pour l'aménagement du cadre de vie et le développement économique et culturel n'est plus à démontrer (Figure 1.1).

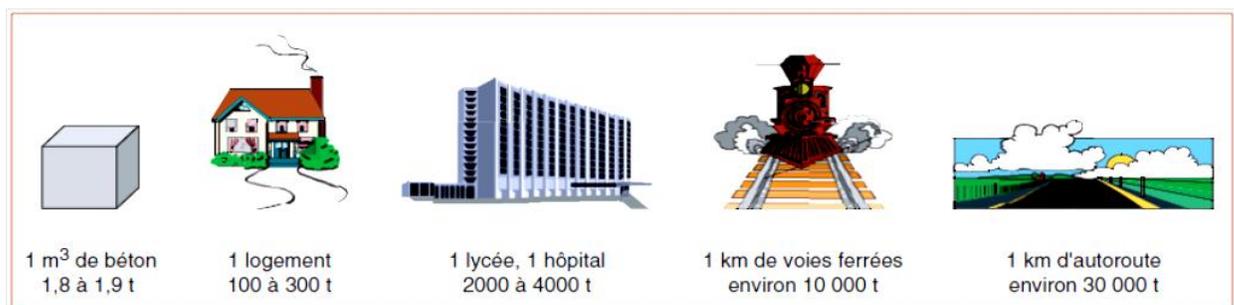


Figure 1.1: Consommation de granulats pour quelques ouvrages types.

Les pays de l'OCDE consomment entre cinq et huit tonnes de granulats par an et par personne. Par comparaison, les pays en voie de développement ou les pays en transition n'en consomment qu'une ou deux tonnes par an et par personne. Ces données traduisent les besoins en granulats qui restent à satisfaire pour répondre aux demandes d'équipements, d'infrastructures et de bâtiments de certains pays.

La demande mondiale des granulats est estimée à près de 24.9 milliard de tonnes en 2008 et près de 28.7 milliard de tonnes en 2013, faisant des granulats la ressource la plus consommée après l'eau (World Construction Agrégats, 2009).

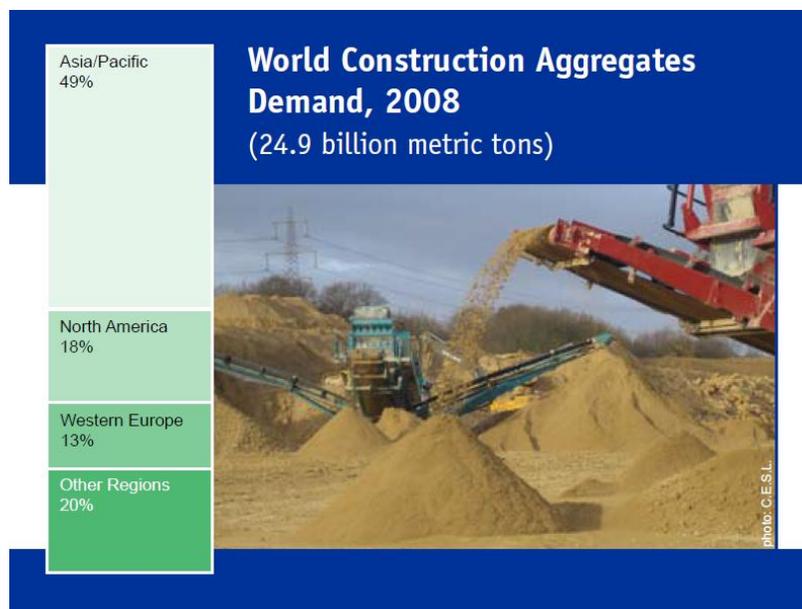


Figure 1.2: Production mondiale des granulats en 2008

La recherche de ressources pour faire face à la demande croissante en granulats et l'exploitation de ces ressources sans porter préjudice à l'environnement posent de plus en plus de problèmes notamment dans les régions actives en matière de construction.

La problématique des granulats dépend des considérations socio-économiques, organisationnelles, techniques, environnementales, juridiques et fiscales, ce qui lui revêt un caractère politique nécessitant l'élaboration d'une stratégie appropriée. Cette stratégie doit s'inscrire dans le cadre du développement durable et intégrer la recherche et la validation de solutions alternatives les plus appropriées (Charef, 2007)

1.2.3. Production des granulats en Algérie

Depuis l'année 2000, la production nationale des agrégats est en hausse constante. Elle a été multipliée par plus de 13, passant de 4.14 Millions de M³ en 2000 à 55.3 Millions de M³ pour l'année 2009 (Figure 1.3).

Pour l'année 2009, 8 wilayas (Bordj Bou Arreridj, Sétif, Mascara, Boumerdès, Constantine, Mila, Sidi Bel Abbés, Boumerdès, et Ain Defla) situées toutes au Nord du pays, ont atteint un niveau de production supérieure à 3 Millions de M³ chacune, totalisant une production de 30.6 Millions de M³ équivalant à plus de la moitié (55.3%) de la production nationale (Figure1.4).

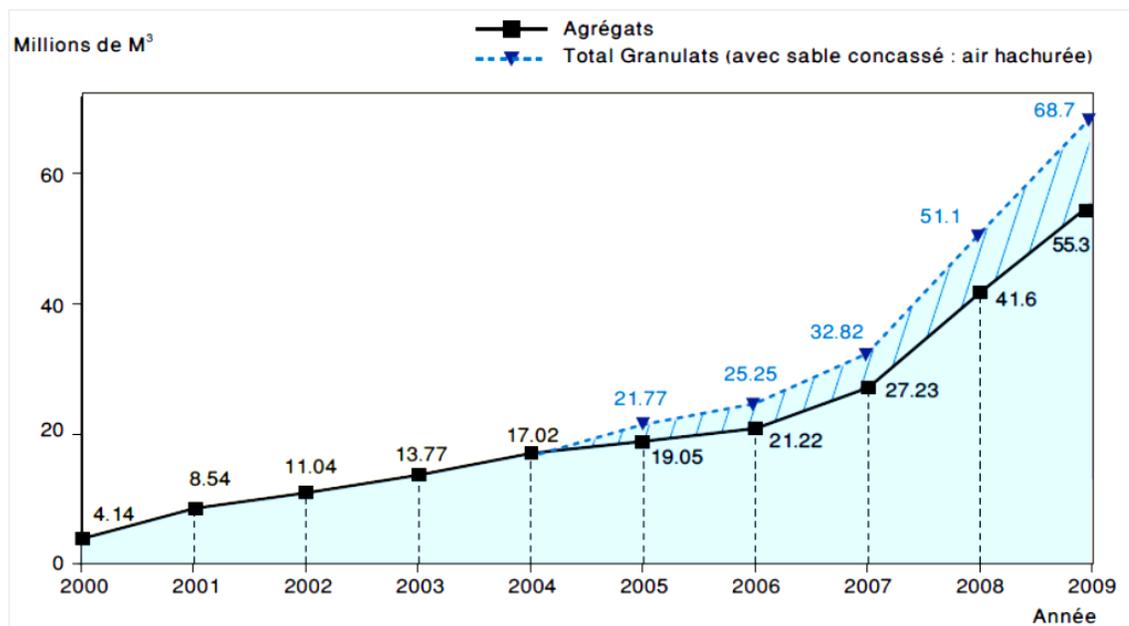


Figure 1.3: Evolution de la production des agrégats période 2000–2009.

(Bilan des activités minières, 2008)

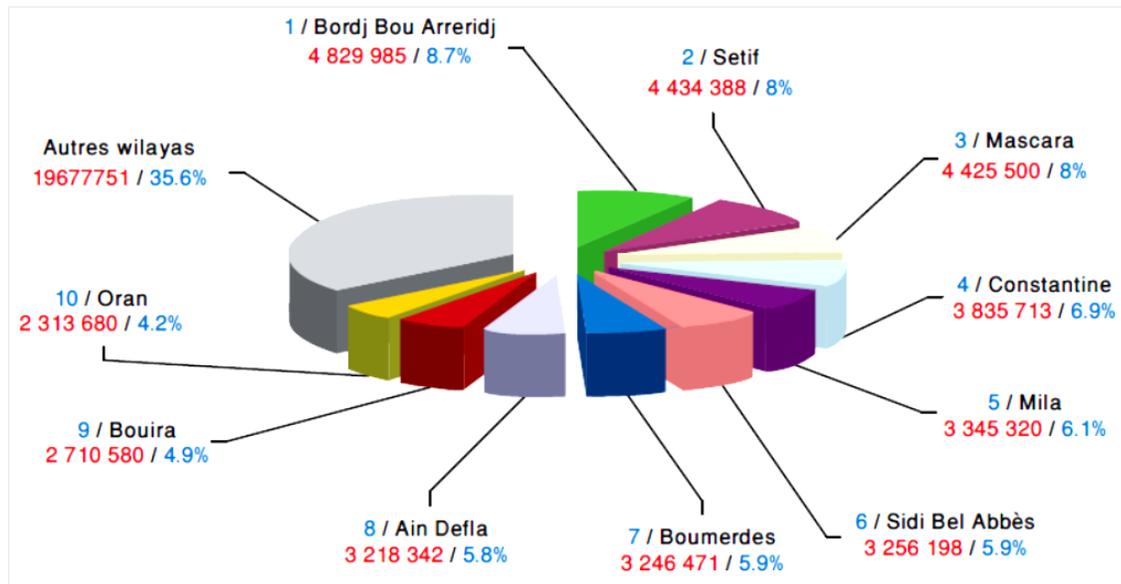


Figure 1.4 : Production des agrégats (M³) : année 2009, 10 wilayas les plus productrices. (Bilan des activités minières, 2008)

La construction des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages d'art exige de gros approvisionnements en matériaux. Jusqu'à présent, les sables les plus couramment utilisés pour la confection des bétons entrant dans ces ouvrages sont les sables roulés alluvionnaires. Cependant, les prélèvements excessifs de ces sables ont fortement contribué à l'épuisement des ressources et ont provoqué des retombées néfastes sur l'environnement (Figure 1.5).

De nombreuses régions du monde vivent cette situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats à béton. Les sables de concassage sont très souvent l'unique alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, à prix raisonnables. Toutefois, les sables issus des carrières sont souvent considérés par les utilisateurs comme des «déchets», car ils sont riches en fines, parfois argileuses au demeurant. Ils sont alors quasi-systématiquement écartés pour un usage dans les bétons, bien que les spécifications d'emploi le permettent dans de nombreux cas.



Figure 1.5: Les impacts de l'extraction du sable sur l'environnement.

1.2.4. Valorisation des sables de concassage

1.2.4.1. Caractéristiques des sables de concassage

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

En raison du processus de broyage, le sable de concassage diffère de sables naturels dans la granulométrie, la forme et la texture des particules; et a généralement entre 10 % et 20 % de fines (les particules passant au tamis de 75 μm)

Dans le sable de concassage les fines sont généralement très probablement les plus petites fractions granulométriques de granulats concassés, tandis que dans les sables naturels, les fines peuvent être argiles ou autres particules nocives.

Les sables de concassage sont des granulats concassés anguleux. Il est souvent admis que leur utilisation dans le béton permet d'obtenir des résistances mécaniques plus élevées. Cependant, l'usage montre qu'ils demandent une quantité d'eau (efficace) plus élevée qu'avec des granulats roulés, à cause notamment de la baisse de compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.

1.2.4.2. Avantages et Inconvénients des sables de concassage

L'effet de différents teneurs des fines calcaires des sables de concassage sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci fait l'objet de plusieurs recherches ces dernières années. Il a été établi que 10 à 15 % du dosage de fines calcaire pourrait être autorisée dans le sable de concassage sans effets néfastes sur les propriétés physiques et mécaniques du béton (Beixing, 2009). Les résultats obtenus à l'état frais ont montré que le pourcentage d'air occlus en fonction du pourcentage de fines passe par un minimum situé entre 10% et 15%. Corrélativement, la densité réelle du béton augmente rapidement lorsque le taux de fines passe de 0 à 15% et au-delà elle diminue. Les fines calcaires ont donc une influence positive, puis négative sur la densité, selon la quantité présente dans les mélanges. D'autre part, les fines confèrent au béton frais une certaine cohésion et un pouvoir de rétention d'eau qui permet le maintien de l'homogénéité, en s'opposant au ressuage et à la ségrégation.

Les résultats obtenus par Donza et al. (2002) montrent que la résistance à la compression est directement liée à résistance du mortier (Figure 1.6). Cependant, les bétons de sable concassés présentent des performances élevées par rapport aux bétons de sable naturel. Cela prouve l'influence de la source des agrégats fins sur l'interface "sable-pâte" dans le béton puisque les gros granulats sont les mêmes pour tous les mélanges.

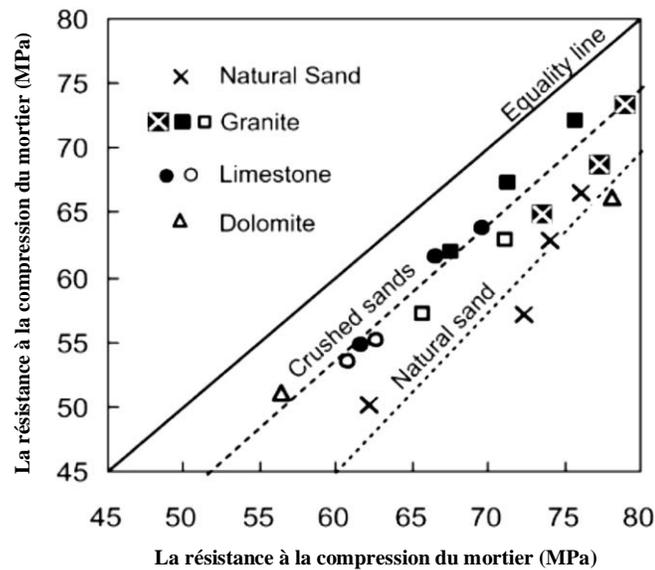


Figure 1.6 : Relation entre la résistance à la compression du béton et la résistance du mortier (Donza et al., 2002).

1.3. Utilisation du Sable de concassage en Algérie

En Algérie, la demande croissante en granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières, suivi d'une exploitation anarchique des sables de mer. Par ailleurs, 20 % de sables fabriqués en carrières ne sont pas utilisés pour la construction à cause de leur teneur en fines supérieure à 12 % (limite normative actuelle), et les fillers résultants du processus de concassage sont considérés comme des résidus inexploitable.

L'Algérie a élaboré en 2005 [Loi n° 05-12, 2005] une instruction ministérielle organisant la généralisation progressive de l'usage des sables de concassage dans le bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux. Une cartographie nationale a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des sables de concassage, et des titres miniers ont été attribués pour la production exclusive de ce type de sable.

Depuis l'année 2005, la production de sable concassé est en croissance continue, permettant ainsi de répondre à la demande croissante du marché du bâtiment et des travaux publics. De 2.72 Millions de M³ de sable concassé produits en 2005, la production a presque

quintuplé, en passant à 13.36 Millions de M³ en 2009, soit une hausse de +391.2%. (Figure 1.7)

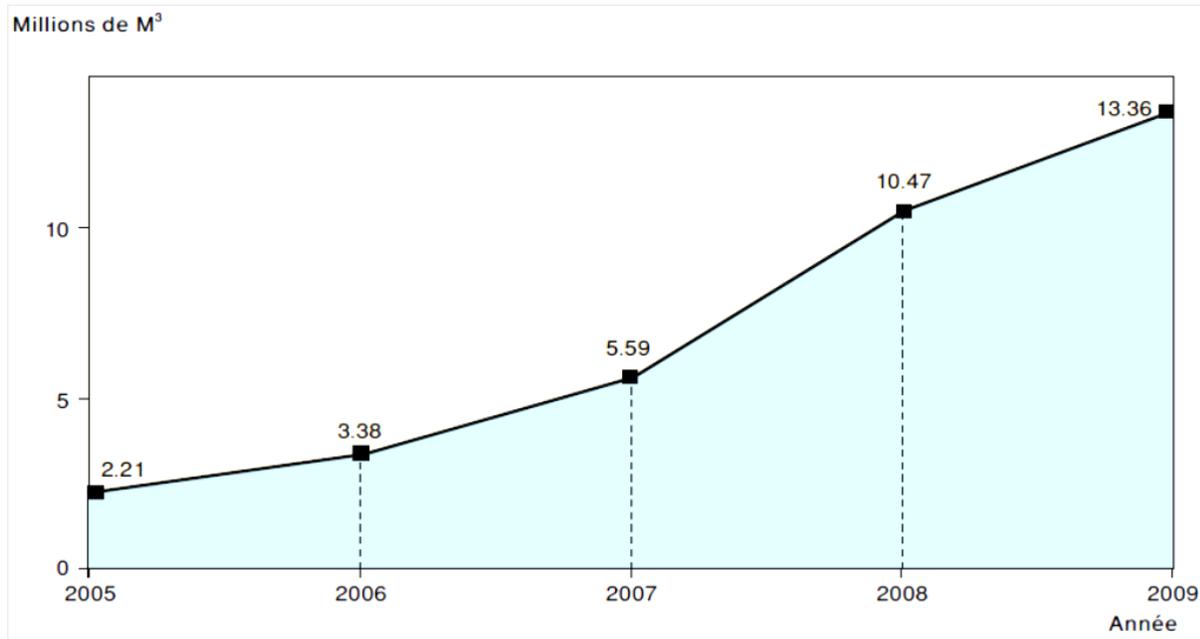


Figure 1.7: Evolution de la production de sable concassé période 2005 – 2009
(Bilan des activités minières, 2008)

Au cours de l'année 2008, 637 exploitations minières de production de sable concassé étaient en activité dans 41 wilayas, parmi lesquelles 603 unités de production des agrégats et de sable concassé simultanément dans 41 wilayas et 34 exploitations minières ayant produit uniquement du sable concassé, dans 4 wilayas.

Le secteur privé dispose de 504 exploitations minières en activité représentant 79.3% du total des exploitations produisant de sable concassé, contre 128 unités appartenant au secteur public correspondant à un taux de 20.7%.

Le secteur privé totalise une production de 8 846 174 M³ de sable concassé représentant 66.2% de la production totale, contre 4 514 067 M³ réalisés par le secteur public soit 33.8%. (Figure 1.8).

Au cours de l'exercice 2008, 10 wilayas à savoir Bordj Bou Arreridj, Constantine, Sétif, Oum El Bouaghi, Bouira, Mila, Ain Defla, Batna, Boumerdès et Sidi Bel Abbès, ensemble, ont produit 9.6 Millions de M^3 correspondant à un taux de 71.7% de la production totale de sable concassé. Les wilayas de Bordj Bou Arreridj et Constantine sont les seules à réaliser une production supérieure à un et demi (1.5) Millions de M^3 de sable concassé qui est, respectivement, de 1 658 861 M^3 et 1 537 358 M^3 correspondant à des taux de 12.4% et 11.5% de la production nationale.

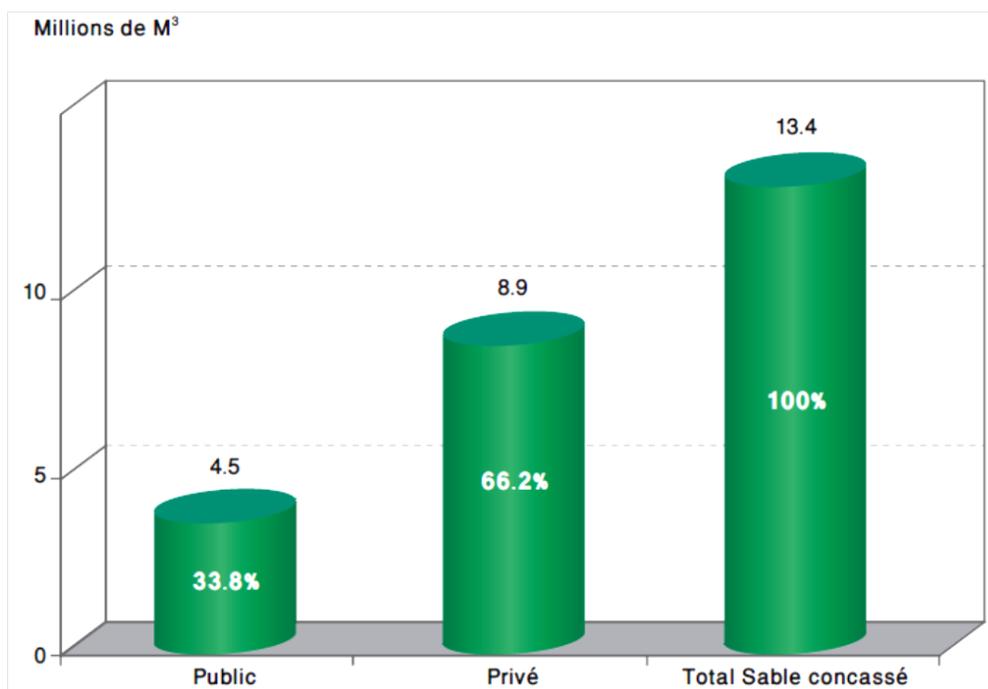


Figure 1.8 : Production de sable concassé, par statut juridique : année 2009
(Bilan des activités minières, 2008)

Les 31 autres wilayas quant à elles ont totalisé une production de 3 775 784 M^3 équivalant à un taux de 28.3%. (Figure 1.9)

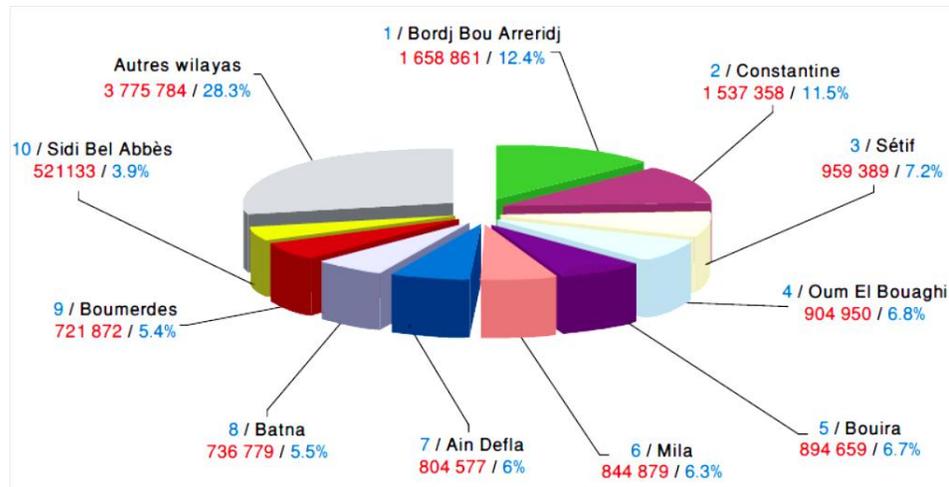


Figure 1.9 : Production de sable concassé (M³): année 2009, 10 wilayas les plus productrices. (Bilan des activités minières, 2008).

L'utilisation du sable de concassage dans la construction a permis de compenser le déficit constaté en sable naturel pour construction et d'augmenter substantiellement ainsi l'offre globale en sables tous types confondus.

1.4. Spécifications pour l'emploi des sables de concassage

Le sable concassé est très abondant dans les carrières de gravier calcaire et son utilisation pourrait diminuer considérablement le coût de production des bétons, d'éliminer la poussière, et le gaspillage des ressources naturelles. Dans plusieurs pays dans le monde, le sable naturel de bonne qualité n'est pas économiquement disponible dans de nombreux domaines. Pour cette raison, les normes ont augmenté la limite permise des fines dans le sable concassé. Par exemple, les normes britanniques (BS 882) permettent jusqu'à 15 % du pourcentage des fines dans le sable alors que la norme américaine ASTM C33 et la norme japonaise JSI A 0015 (2002) exige des limites à moins de 7 % et 5 %, respectivement. En outre, jusqu'à 35 % de filler calcaire sont autorisés dans les ciments européens selon la norme EN197-1 (2002).

En Chine, la norme GB/T 14684 de 2001 indique que les limites des pourcentages des fines du sable de concassage sont de 3 %, 5 % et 7 %, pour des résistances du béton utilisé (définie comme la valeur caractéristique de la résistance à la compression à 28 jours) supérieure à 60 MPa, entre 30 et 60 MPa et inférieure à 30 MPa, respectivement. Ces

spécifications limitent sérieusement le taux des fines qui peuvent être utilisés, même si les teneurs des fines plus élevées peuvent améliorer les propriétés et la performance du béton (Beixing, 2009). Par contre, actuellement la norme GB/T 14684 de 2011 autorise l'utilisation des pourcentages des fines allant jusqu'à 10%.

1.5. Travaux de recherche sur le sable de concassage en Algérie

L'influence du remplacement partiel ou total du sable siliceux par du sable calcaire concassé sur les performances rhéologiques et mécaniques des bétons a fait l'objet de plusieurs études en Algérie.

Certaines études se sont intéressées à un critère optimal d'utilisation des fines calcaires dans les mélanges cimentaires algériens (Guemmadi *et al.*, 2008; Makhloufi *et al.*, 2014). D'autres recherches, ont porté sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fillers calcaires (Benachour *et al.*, 2008 ; Menadi *et al.*, 2009), le but étant de définir la quantité de fillers pouvant être admise dans le sable de concassage.

Par contre, Menadi *et al.* (2009) ont étudié aussi l'influence des fines de calcaire dans le sable concassé sur les propriétés du béton (résistance, perméabilité à l'eau, aux gaz et aux ions chlorés et l'absorption capillaire). Quatre types de ciments différents ont été utilisés avec un rapport eau/ciment constant. Les résultats obtenus montrent que le béton contenant 15 % de fines de calcaire par remplacement du sable concassé réduit la perméabilité à l'eau et augmente la perméabilité aux gaz et aux ions chlorures.

Récemment, Bedirena *et al.* (2013) ont étudié l'effet du remplacement du sable de silice par du sable de calcaire sur la durabilité des mortiers dans trois environnements différents: à l'air libre, dans une solution saturée de chaux et dans une solution agressive d'acide chlorhydrique. Leurs résultats ont montré que l'utilisation du sable de concassage engendre des améliorations considérables: diminution de la perméabilité, réduction des pertes

de masse et de la résistance et l'augmentation de la résistance aux attaques de l'acide chlorhydrique.

Il est à noter que la plupart des études ont été réalisées sur des mortiers en substituant une part du ciment ou bien du sable par des fillers calcaires. Les sables peuvent être constitués soit d'un mélange de sable alluvionnaire et de sable de concassage, soit de sable de concassage seul. D'autres études se sont intéressées à des bétons en substituant le sable alluvionnaire par du sable de concassage.

Il apparaît donc nécessaire de compléter ces travaux par une étude expérimentale rationnelle destinée à conforter les connaissances déjà acquises et de proposer si possible de nouvelles. Il s'agit aussi de statuer sur la pertinence des spécifications normatives des sables à béton actuelles, en particulier pour ce qui concerne le taux optimal de fillers.

1.6. Conclusion

On constate que l'utilisation des sables de concassage et des fillers calcaires dans la formulation des mortiers et des bétons a fait l'objet de plusieurs études et recherches, aussi bien en Algérie que dans les pays européens et ailleurs dans le monde. Elles ont été menées le plus souvent dans le but d'encourager l'utilisation de ces matériaux en tant qu'alternative aux granulats alluvionnaires en voie d'épuisement. Nous présenterons dans le chapitre suivant les effets du sable de concassage sur les propriétés des mortiers et bétons aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Chapitre 02

*Effet du sable de concassage
sur les propriétés du béton*

2.1. Introduction

L'utilisation, dans la construction, du sable issu des carrières de production des granulats semble être une solution idéale et très prometteuse pour les problèmes de déchets causés par le concassage des roches dans les carrières. Ce sable répond aux soucis de manque de sable naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages des poussières de carrières. De même, il apporte par sa composition et sa granulométrie un effet bénéfique aux mortiers et aux bétons.

2.2. Effet du sable de concassage sur l'état frais

2.2.1. 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, cendre volante) s'avère nécessaire. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport E/C et sur le dosage en superplastifiant (Kenai et al., 1999). 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 (Kenai et al., 1999; Westerholm et al., 2007).

Beixing et al. (2009) ont étudié l'effet de fines calcaires substituées 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 de 7 à 10%, respectivement, donne une meilleure ouvrabilité. Cependant, ils ont noté que les mélanges de béton avec un rapport E/C de 0,55 présentent une ségrégation.

Hebbouche (2002) a étudié l'influence des fines issues du sable de concassage sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton. Ils ont utilisé deux types de fines de

natures 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 respectivement de 0, 10, 15 et 20%. Ils ont constaté que la demande en eau augmente avec l'augmentation des pourcentages des fines dans le béton (Figure 2.1). 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.

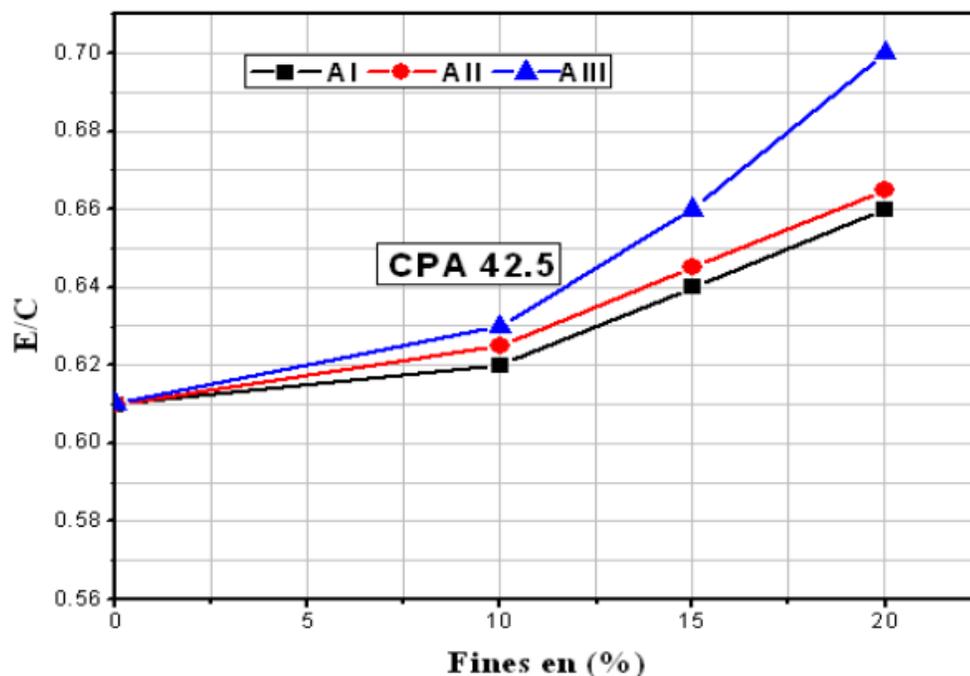


Figure 2.1: Variation de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines (Hebbouche, 2002).

Kenai et *al.* (2005) 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 à leurs surfaces rugueuses.

Skender (2009) a étudié l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton (Figure 2.2), 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.

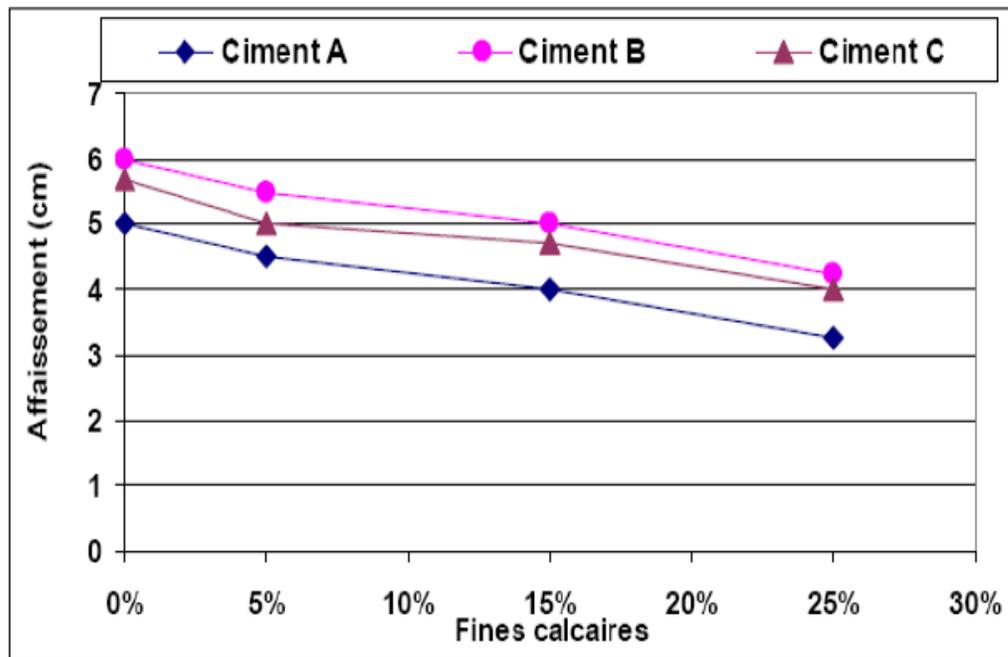


Figure 2.2: Effet des fines calcaires sur l'affaissement du béton (Skender, 2009)

Bonavetti *et al.* (1994) 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 utilisées 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 (< à 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.* (2008) ont étudié la quantité maximale d'addition de filler et leur effet sur les propriétés des mortiers. Les quantités de filler calcaire utilisées dans la formulation des mortiers varient de 15 à 45% (en masse de sable) et de 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 2.3 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.

Le rôle des filler contenus dans le sable de concassage sur la maniabilité du béton est relié à leur indice d'activité (CA). Les résultats de Bertrand (1975) montrent qu'une amélioration de l'ouvrabilité pour les fines ayant CA=0 et 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 est observée.

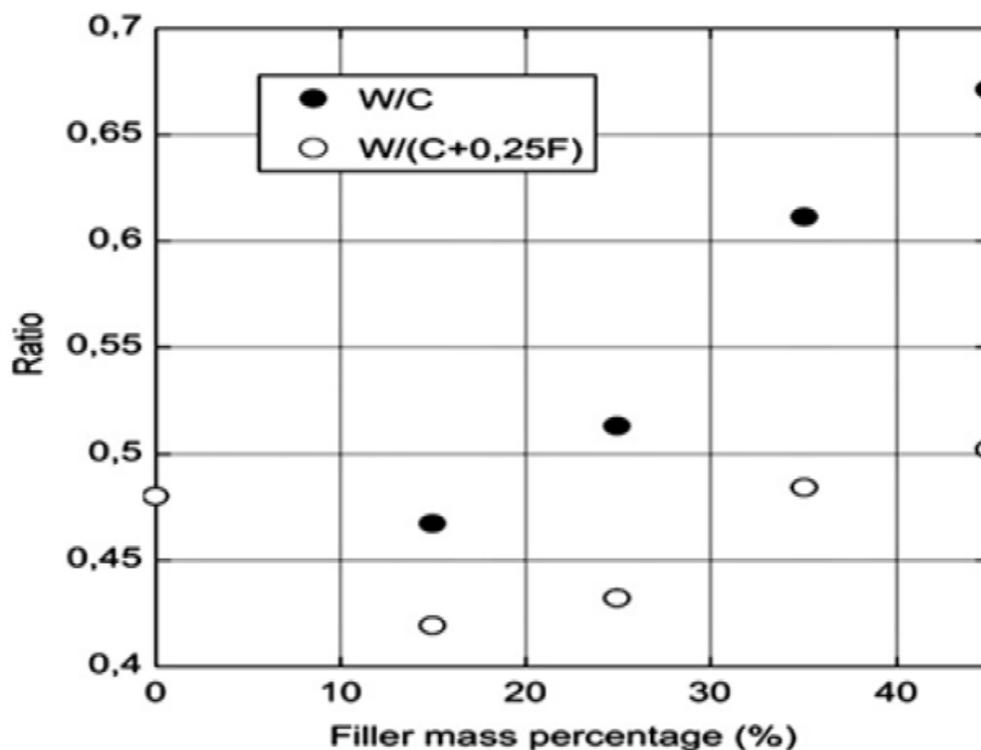


Figure 2.3: Variation de la demande en eau en fonction du pourcentage de masse de filler (Benachour, 2008).

Lorsqu'un superplastifiant est ajouté au mortier à base de sable de concassage, son effet est évidemment d'augmenter l'étalement du mortier comme le montre les résultats du tableau 2.1 (Turcy, 2004). La résistance à la compression à 28 jours est également améliorée et

le retrait est diminué. C'est la conséquence d'une meilleure d'hydratation du ciment dont la surface spécifique augmente suite à la défloculation des grains. 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 induisant ainsi une diminution de la ségrégation.

Tableau 2.1: Effet du dosage en superplastifiant sur l'étalement, la résistance et la teneur en air des mortiers contenant de fines calcaires (Turcy, 2004).

	Sp = 0%	Sp = 0.5%	Sp = 1%
Etalement (cm)	11	21	32
Rc28 (MPa)	57	60	61
Retrait total à 100jours ($\mu m/m$)	800	745	740
Teneur en air estimée (%)	3.5	2.2	2

2.2.2. Masse volumique

La masse volumique du béton dépend du dosage de ses constituants et de leurs granulométries. Les résultats de mesure de la compacité ont montré que la densité des bétons confectionnés avec différents sables augmente avec l'augmentation du rapport filler/sable jusqu'à un optimum, ensuite une diminution est observée (Figure 2.4) (Turcy, 2004). La compacité optimale obtenue pour des bétons avec différents sables peut être due au remplissage des vides existant entre les particules. De même, il a été trouvé 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 2.5 (Guemmadi, 2004).

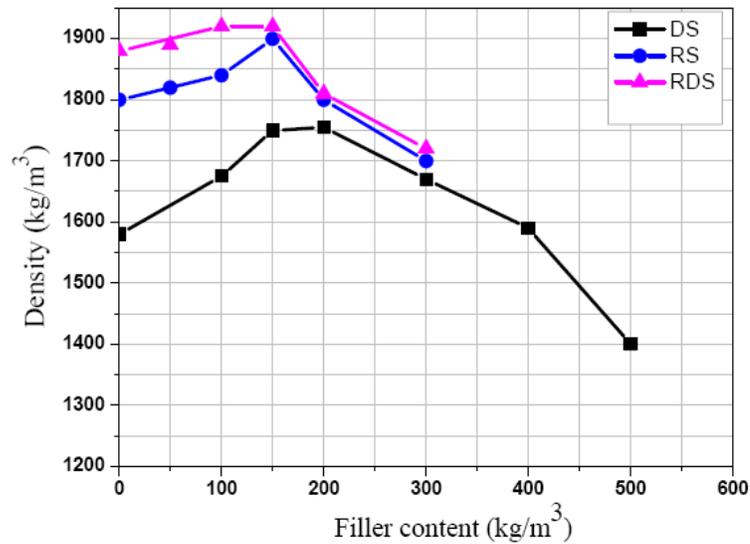


Figure 2.4: Evolution de la masse volumique du béton en fonction de la quantité des fines (Turcy, 2004).

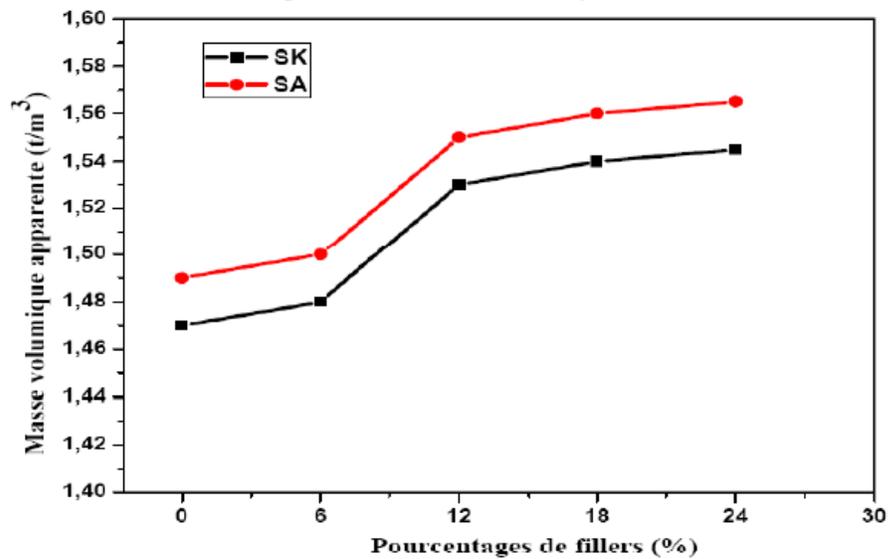


Figure 2.5: Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines (Guemmadi, 2004).

Des résultats similaires présentés par Benna (1998), montrent 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 2.6. Ainsi, les fillers calcaires contribuent à densifier la pâte du béton frais en réduisant les pores et modifiant la microstructure.

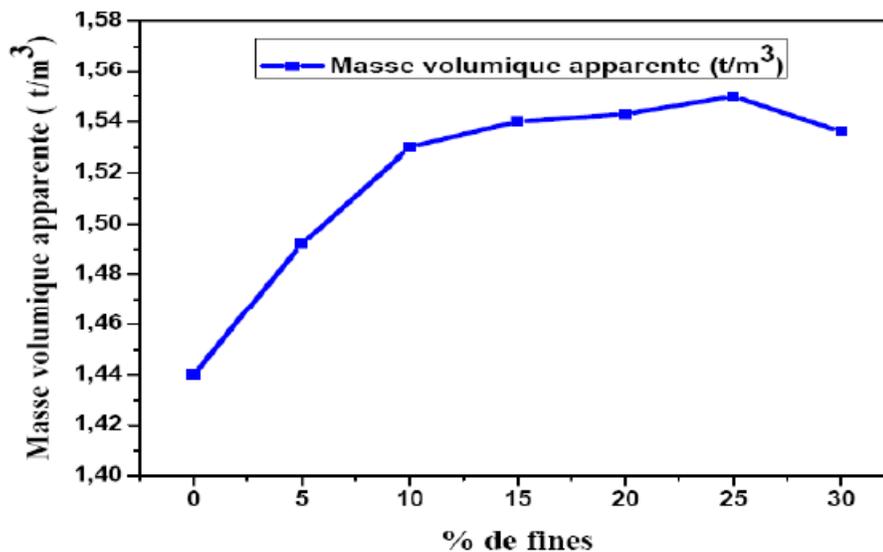


Figure 2.6: Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines (Benna, 1998).

2.3. Effet du sable de concassage sur la chaleur d'hydratation

Le type de ciment est caractérisé par la résistance du ciment à la compression à 28 jours. Cette dernière dépend de la cinétique de l'hydratation et de la microstructure de la pâte du ciment (Foliot, 1982). La composition chimique d'un ciment est le facteur le plus important qui influence l'hydratation (Linfeng et *al.*, 2009).

Plusieurs études ont été menées pour étudier l'influence des fillers calcaire et siliceux sur les propriétés mécaniques et calorimétriques du béton. L'incorporation du filler calcaire au ciment portland augmente son degré d'hydratation au jeune âge, par contre à long terme, la contrainte mécanique sera plus élevée pour la pâte contenant les fillers siliceux (Rahal et *al.*, 2005). Pour un ciment portland riche en C₃A (PC1), l'addition de 20% de filler quartz (Q) ou calcaire (C) accélère l'apparition du second pic du flux de chaleur comparé au ciment ordinaire. Pour un dosage élevé en addition (40%) ce pic est diminué par rapport à celui du ciment témoin (PC1) suivi toujours d'un troisième pic dû à la transformation de l'étringite en monosulfoaluminate. Par contre pour un ciment pauvre en C₃A (PC2), une addition de 20% en quartz ou en calcaire diminue le second pic qui s'accélère lorsque le dosage en quartz passe à 40%. Une élévation du dosage en calcaire (40%) diminue et retarde le flux de chaleur comme le montre la figure 2.7 (Rahal et *al.*, 2005).

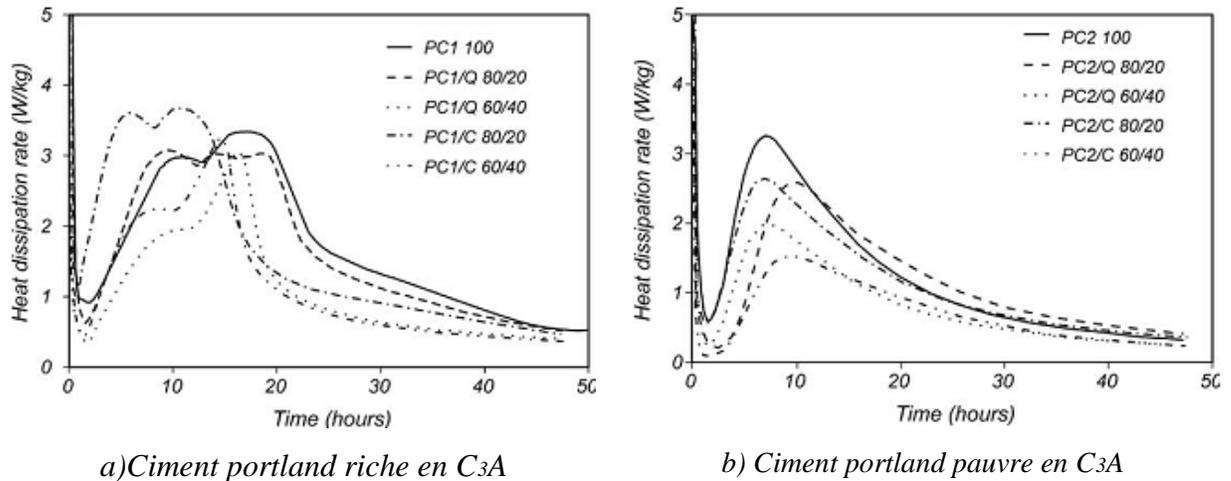
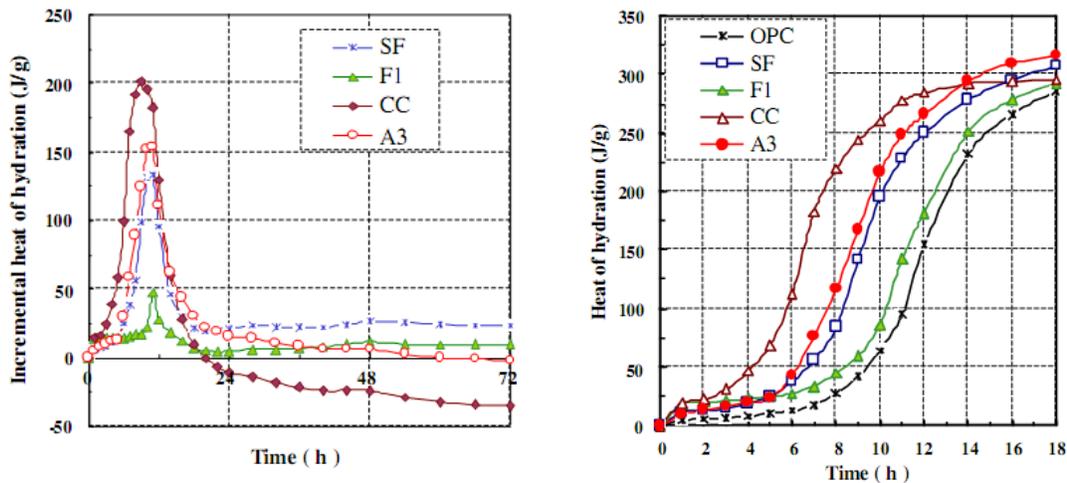


Figure 2.7 : l'influence des fillers de quartz (Q) et de calcaire (C) sur le flux de chaleur d'un ciment PC1 riche en C₃A et un ciment PC2 pauvre en C₃A.

Pour un ciment portland ordinaire (OPC), l'addition des fines de calcaire, d'alumine, de quartz et de fumé de silice modifie le taux et la quantité de chaleur d'hydratation initiale (Kadri et *al.*, 2010). L'addition de fines de quartz n'engendre aucune accélération du processus d'hydratation. L'addition des fines inertes de la poudre d'alumine augmente le flux d'hydratation au jeune âge en favorisant l'apparition de nouveaux sites de nucléation. La substitution du ciment par les fillers calcaire entraîne la création de sites hétérogènes de nucléation conduisant à une hydratation accélérée. D'après des résultats obtenus par Kadri et *al.* (2010), il est clair que la nature chimique et la finesse de l'addition jouent un rôle important sur le processus d'hydratation. En augmentant la finesse de l'addition, une accélération de l'hydratation est enclenchée. Pour des additions de même finesse, le calcaire possède un effet accélérateur plus significatif que celui de la fumée de silice et de la poudre d'alumine. La figure 2.8 illustre l'influence des additions minérales sur le flux et la chaleur d'hydratation d'un ciment ordinaire (Kadri et *al.*, 2010). Les travaux de Mounanga et *al.* (2011) montrent que la substitution du ciment ordinaire de faible dosage en C₃A par des dosages élevés en additions minérales (calcaire) réduit le flux de chaleur dû à l'effet de dilution lié aux ajouts cimentaires. Une addition de 25% filler calcaire diminue le pic principal du flux thermique de 24%, cette réduction augmente à 39% lorsque le dosage passe à 50%. Les fines présentes dans le sable de concassage jouent le rôle d'une addition minérale et accélère l'hydratation des constituants du ciment au jeune âge. Leur effet de nucléation contribue à un exhaussement du flux de chaleur par rapport au mortier à base de granulats siliceux.



a) Evolution du flux de chaleur en fonction du temps

b) Evolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps

Figure 2.8 : Chaleur d'hydratation des mortiers composés contenant différentes additions minérales, pour une surface spécifique comparable. (CC : Calcaire, A : poudre d'alumine, SF : fumée de silice, F : quartz)

2.4. Effet du sable de concassage sur l'état durci

2.4.1. Résistance à la traction par flexion

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 contenant des fines calcaires et ciment, un accroissement de la résistance par rapport au mortier de référence à l'âge de 2 jours est observé (Menadi, 2008). 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, une chute de résistance à la traction est enregistrée à tous les âges pour tous les pourcentages de fines à l'exception du mortier de 5% de fines ou un accroissement de 3% de la résistance par rapport aux mortiers de référence à été observé. A l'âge de 90 jours, Menadi (2008) a 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 2.9).

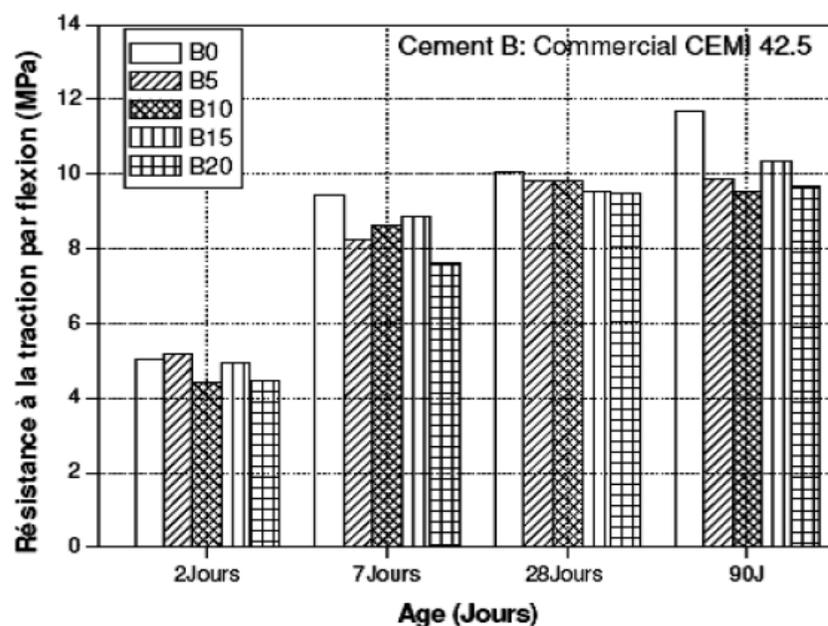


Figure 2.9 : développement de résistance à la traction par flexion à différents âges (Menadi, 2008).

Selon Hebbouche (2002), 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 2.2, montre que la résistance à la traction par flexion du béton de sable concassé présente un optimum au voisinage de 10% de fines.

Tableau 2.2: Effet de pourcentage des fines calcaires sur la résistance à la traction par flexion (Hebbouche, 2002).

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	AI 0/100	2.05	2.34	2.67
	AI 10/90	2.18	2.52	2.78
	AI 15/85	2.11	2.43	2.63
	AI 20/80	1.97	2.29	2.57
Si- Mustapha	AI 0/100	1.92	2.19	2.66
	AI 10/90	2.06	2.27	2.71
	AI 15/85	1.83	2.10	2.58
	AI 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 2.10). Une chute remarquable de la résistance est observée pour les mortiers avec fines calcaires. Cependant, des résistances comparables sont notées pour les bétons à bases fines par rapport au béton de référence (Benna, 1998).

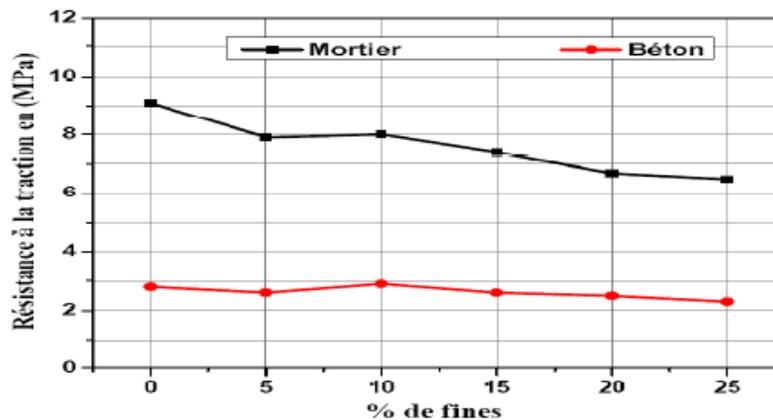


Figure 2.10: Résistance à la traction des mortiers et bétons en fonction de pourcentages de fines (Benna, 1998).

2.4.2. Résistance à la compression

Plusieurs études sont conduites (Khatib et *al.*, 2009 ; Menadi, 2008) sur l'influence de fines calcaires présentes dans le sable de concassage sur la résistance à la compression des mortiers. Pour trois types de ciment utilisés avec des pourcentages de fines calcaires de 0, 5, 10, 15 et 20% et un rapport E/C de 0,55, 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 (Khatib et *al.*, 2009) . Cette augmentation de la résistance à la compression au jeune âge est due à l'effet du filler, à l'accélération de l'hydratation de C_3A et C_3S , au changement de la morphologie du gel C-S-H et à 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 à long terme.

Menadi (2008) 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 utilisés : 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. Il a 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), une amélioration de la résistance à la compression au jeune âge et à long terme est observée pour des taux de fines de 15%. La figure 2.11 présente les résultats de la résistance à compression des bétons étudiés.

Selon cette figure, on remarque 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 varie 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.

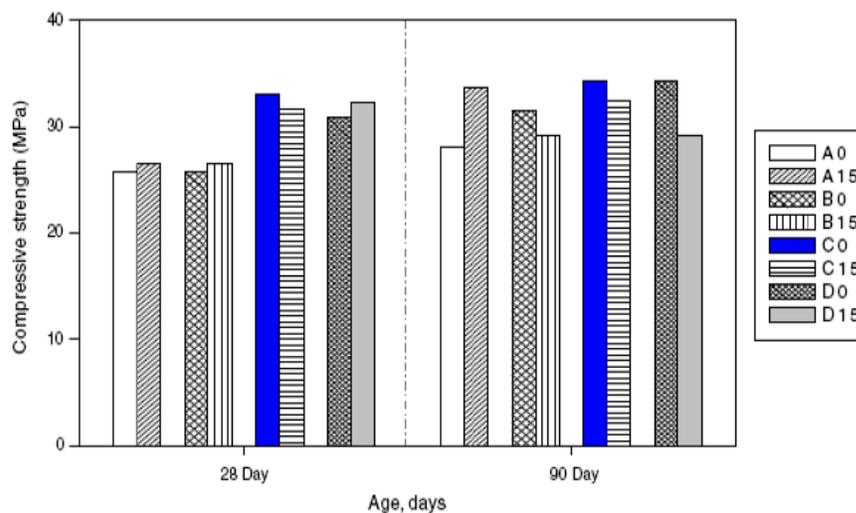


Figure 2.11: Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des mortiers (Menadi, 2008).

Kenai et *al.* (2008) 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 2.12, la résistance à la compression du béton augmente au jeune âge 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 (Benachour et *al.*, 2008).

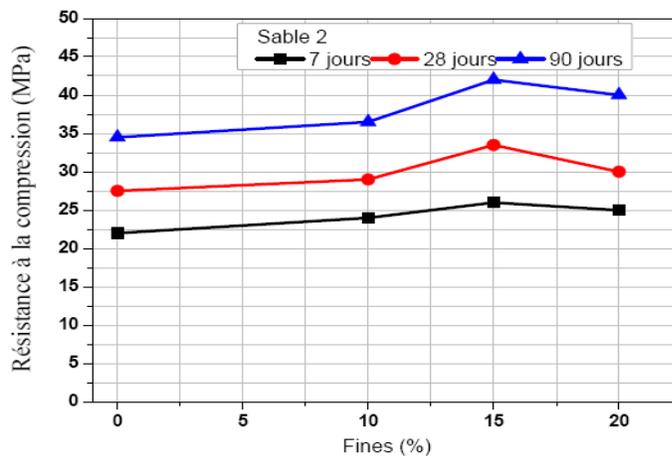


Figure 2.12: Développement de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires (Benachour et al., 2008).

De même, un accroissement de la résistance à la compression des mortiers est observé entre les granulométries fines et grossières de sable de l'ordre de 3 à 20% en l'absence d'argile, et pour des pourcentages des fines allant jusqu'à 20% (Ramirez et al., 1987). Cependant, l'augmentation de la proportion d'argile dans le sable fait chuter de façon remarquable la résistance à la compression (Figure 2.13).

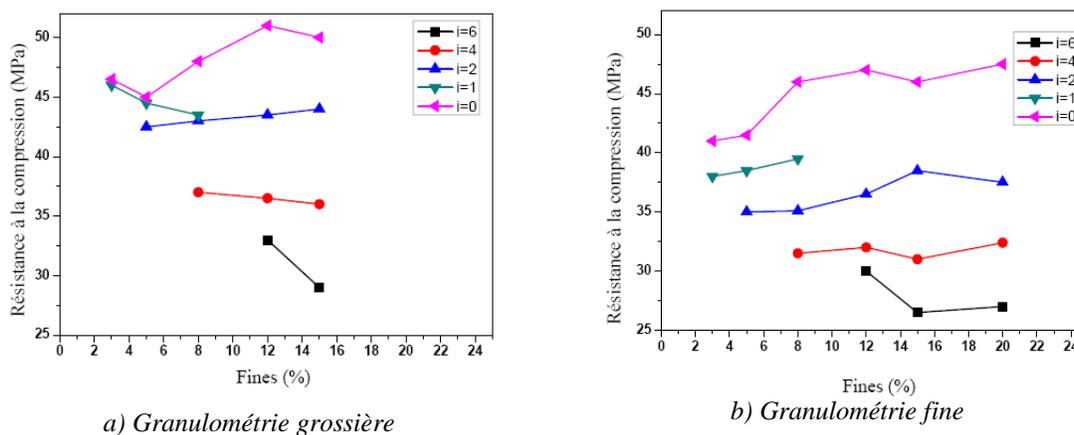


Figure 2.13: Variation de la résistance à la compression pour différente granulométrie et rapport ciment /sable =1/4,2 (A/S : argile / sable (%))(Ramirez et al., 1987).

Les résultats de Beixing et al. (2009) met en évidence 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. 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 au 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.

D'autres travaux (Topçu et *al.*, 2003) concluent que l'incorporation de 7 à 10% de filler dans le sable de concassage améliore les propriétés mécaniques du béton. De même, Kenai et al. (1999) obtiennent une résistance maximale avec 10% de fines. D'autres parts, des 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% (Sadhouari et *al.*, 2009).

D'après Bonavetti et *al.* (1994) 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. Eren et *al.* (2009), 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. En plus, Les résultats de Celik et *al.* (1996) montrent que la résistance optimale est obtenue avec 10% de poussière de concassage dans le béton pour 7 et 28 jours. 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.

2.4.3. Module d'élasticité

Selon les travaux de Hebbouche (2002) Le module d'élasticité du béton est influencé par les fines contenues dans le sable de concassage d'une façon similaire à celle des résistances mécaniques. Hebbouche (2002) constate 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 2.14). Quelque soit l'origine des fines, le module d'élasticité au jeune âge a tendance à diminuer selon les conclusions de Donza et *al.* (2002). Ce comportement peut être attribué au volume important des vides des sables de concassage et au faible remplissage du squelette granulaire.

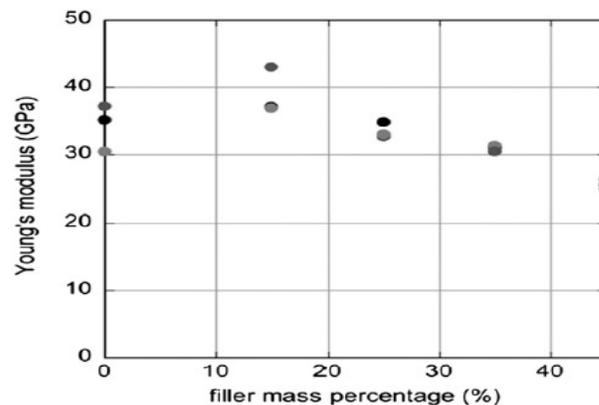


Figure 2.14: Evolution de modules de Young en fonction de pourcentage de filler (Benachour et *al.*, 2008).

2.4.4. Retrait

La cause principale du retrait 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. La formation des carboaluminates causée par la présence des fines dans le sable entraîne une augmentation du retrait (Kkatib et *al.*, 2009). Un mortier contenant 15% de fines calcaires présente un retrait de séchage plus élevé à tous les âges (Menadi, 2008). L'accroissement de ce retrait est de l'ordre de 8 à 23% à l'âge de 180 jours. Cette augmentation n'est observée que pour des sables contenant près de 20% de fines comme le montre la figure 2.15 (Hebbouche, 2002).

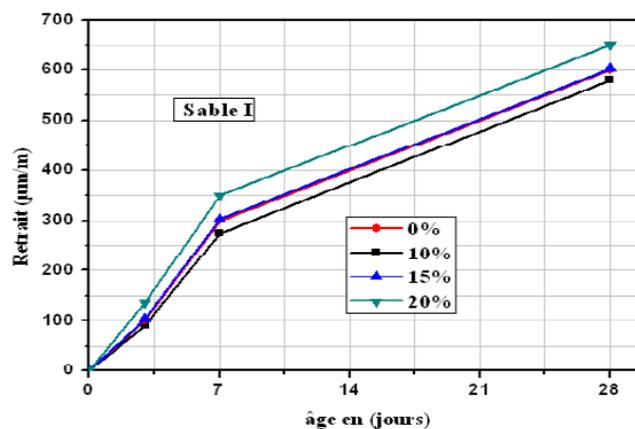


Figure 2.15: Développement du retrait du béton à base de sable de concassage avec différents taux de fines (Hebbouche, 2002).

Les travaux présentés par Kenai et *al.* (2005) montrent 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 Bonavetti et *al.* (1994), l'augmentation des fines calcaires dans le sable de concassage demande une quantité élevée de l'eau et plus particulièrement au-delà de 10%, ceci était probablement la cause principale du retrait.

2.5. Effet du sable de concassage sur la durabilité

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 à la 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.

2.5.1. Perméabilité à l'eau

La présence de près de 15% de fines dans le sable de concassage peut améliorer la structure des pores dans la zone de transition et par conséquent réduire la perméabilité à l'eau. En plus, une réduction de la profondeur de pénétration de l'eau est observé comme l'illustre la figure 2.16 (Menadi, 2008). Cette perméabilité dépend du dosage du ciment où La figure 2.17

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% (Topçu et al., 2003).

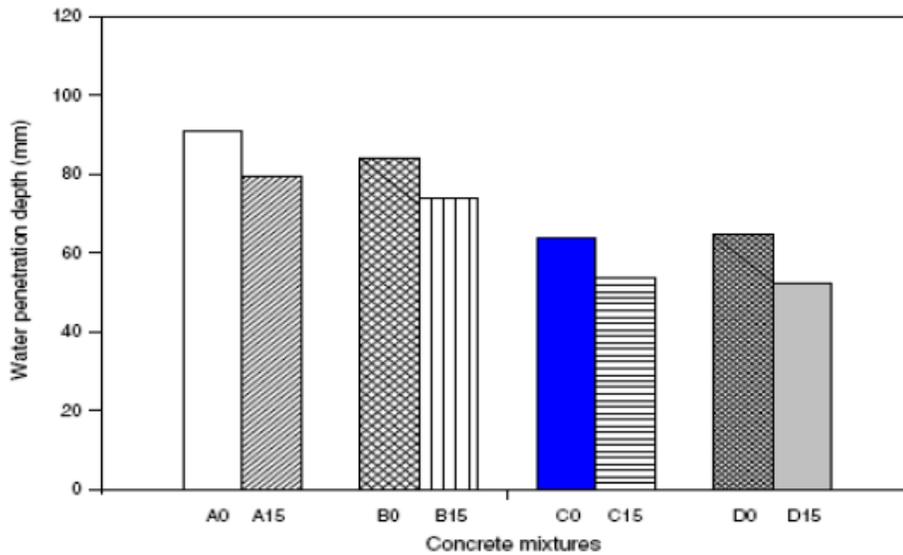


Figure 2.16: Profondeur de pénétration à 90 jours en fonction des différents types de ciments (A, B, C, D) (Menadi, 2008).

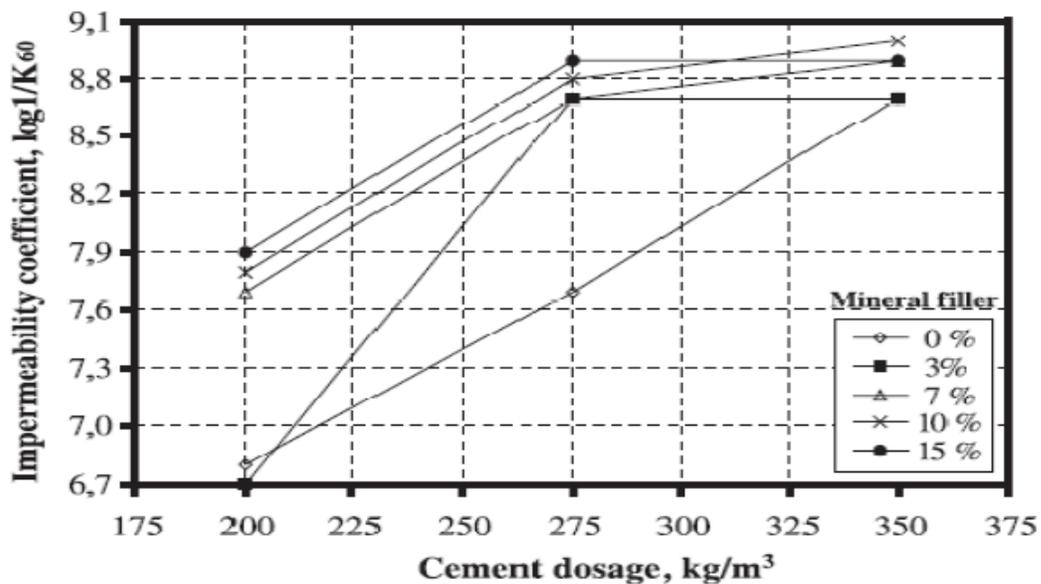


Figure 2.17 : Coefficient de l'imperméabilité en fonction de dosage en ciment du béton avec différents pourcentage en filler (Topçu et al., 2003).

Celik et al. (1996) ont rapporté que le coefficient de perméabilité à l'eau du béton diminue avec l'accroissement du taux de la poussière de concassage dans le béton (figure 2.18). 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.

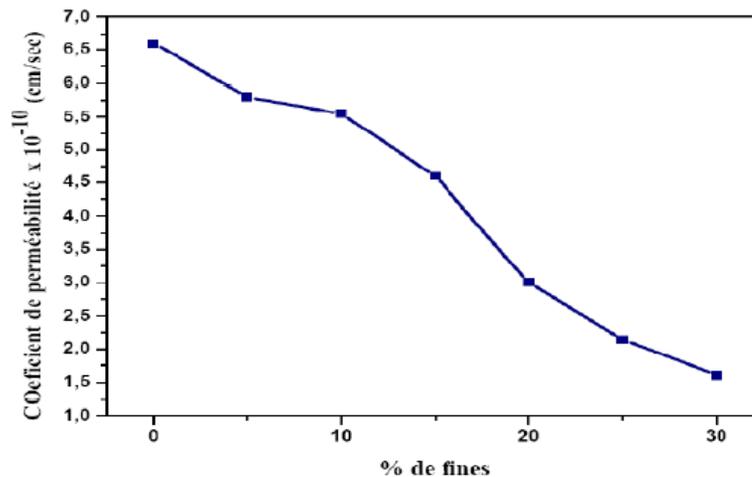


Figure 2.18: Coefficient de perméabilité à l'eau du béton avec différents pourcentages de poussière de concassage à l'âge de 28 jours (Celik et al., 1996).

2.5.2. Perméabilité aux ions chlores

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 (Kenai et al., 2008). La figure 2.19 illustre les valeurs des charges totales trouvées de 7966, 7320, 7890, 8211.5 et 9500 coulombs pour 0, 5, 10, 15 et 20% de fines calcaires, respectivement.

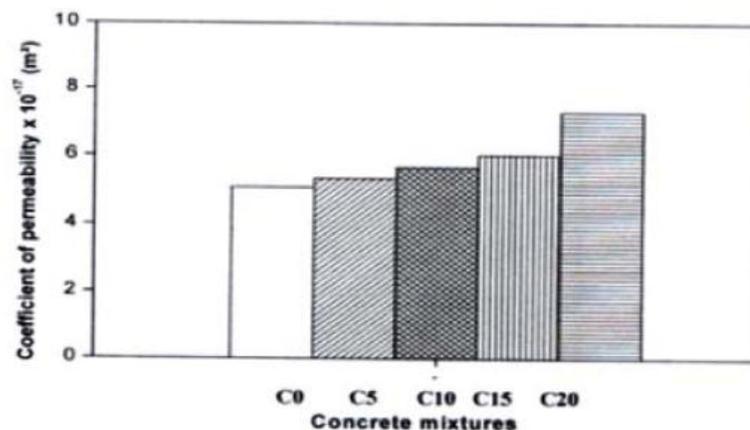


Figure 2.19: Coefficient de perméabilité avec différents mélanges du béton contenant différents pourcentages de fines à 90 jours (Kenai et al., 2008).

Il a été 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 2.20) (Beixing et *al.*, 2009). Le béton de faible résistance présente des grands pores formés après durcissement qui induit la diminution de perméabilité des ions chlores. Pour le béton de haute résistance (séries H), l'incorporation des fines calcaires dans le sable de concassage présente une influence négligeable sur la résistance à la pénétration des ions chlores. Le béton de haute résistance présente un dosage en ciment plus élevé et un rapport E/C plus faible (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 chlores.

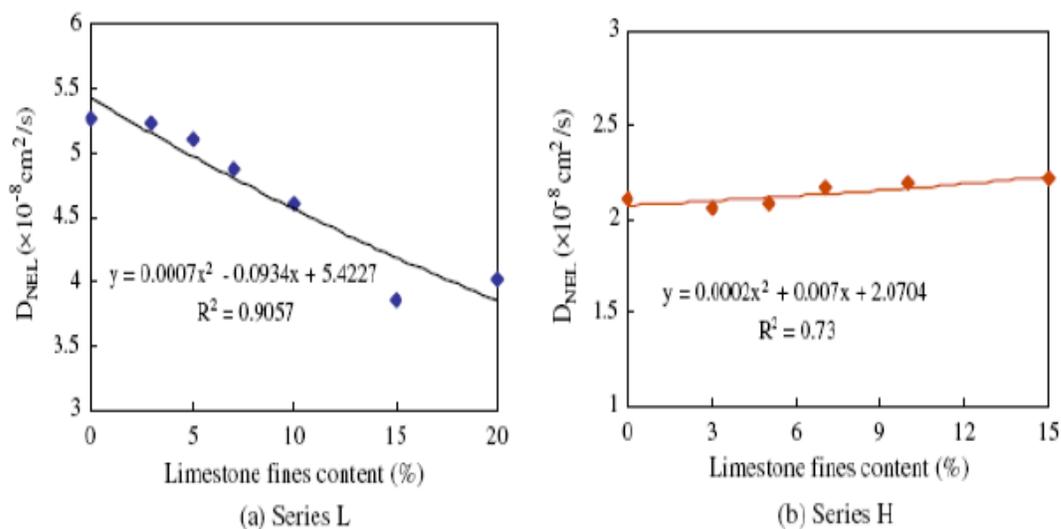


Figure 2.20: Influence de fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlores du béton de sable de concassage de faible (a) et de haute (b) résistance à 28 jours (Beixing et *al.*, 2009).

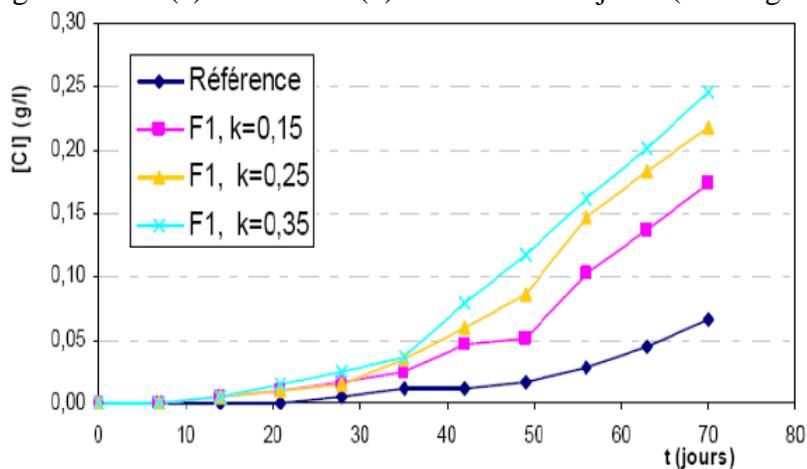


Figure 2.21: Perméabilité aux ions chlores des bétons contenant de fumée de silice, pouzzolane naturelle et du calcaire (Ghrichi et *al.*, 2007)

Ghrici et *al.* (2007) ont réalisé des essais de perméabilité aux ions chlorés à 28 et 90 jours sur des bétons contenant de la fumée de silice, de la pouzzolane naturel et du calcaire. La figure 2.21 illustre les résultats mesurés de la charge électrique en coulomb passante 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 chlorés du béton, quelque soit le type de filler utilisé.

Selon Piérard et *al.* (2007), la présence de fillers calcaires au sein des mortiers favorise le phénomène de diffusion des chlorures. Comme le mortier sans filler possède une plus petite quantité de pâte et la diffusion des chlorures se fait plutôt par la pâte du mortier, la diffusion des chlorures est plus importante pour les mortiers contenant des fillers calcaires.

2.5.3. Perméabilité au gaz

La présence de fines calcaires dans le sable augmente le coefficient de la perméabilité au gaz du béton. L'augmentation de la perméabilité au gaz mesurée est de 5, 10, 16 et 30% respectivement pour 5, 10, 15 et 20% de fines calcaires (Kenai et *al.*, 2008). Ceci est également confirmé par les résultats des travaux représentés sur la figure 2.22 (Menadi et *al.*, 2009).

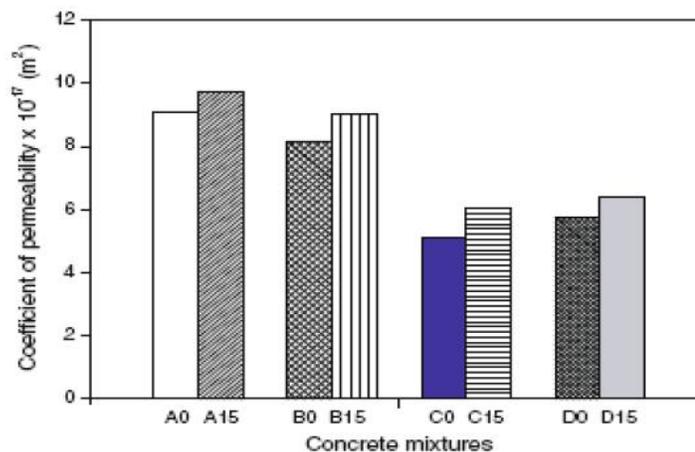


Figure 2.22: Valeurs du coefficient de la perméabilité au gaz des bétons avec et sans fines pour différents types de ciment (Menadi et *al.*, 2009).

2.5.4. Sorptivité et absorption capillaire d'eau

L'absorption d'eau par capillarité augmente avec le temps pour les mélanges du béton contenant de fines calcaires. Cette augmentation est attribuée à une faible porosité du béton. 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 (Menadi, 2009). La présence de 15% de fines calcaires substitués au sable de concassage a un effet négligeable sur l'absorption d'eau par capillarité (Kenai et *al.*, 2009). Hebbouche (2002) a 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 qualité modérée permet une bonne organisation de la structure du béton.

D'autre part, Skender (2009) conclut que l'incorporation de fines calcaires dans le sable de concassage a un effet négligeable sur la sorptivité du béton. 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. 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 2.23 (Benachour et *al.*, 2008).

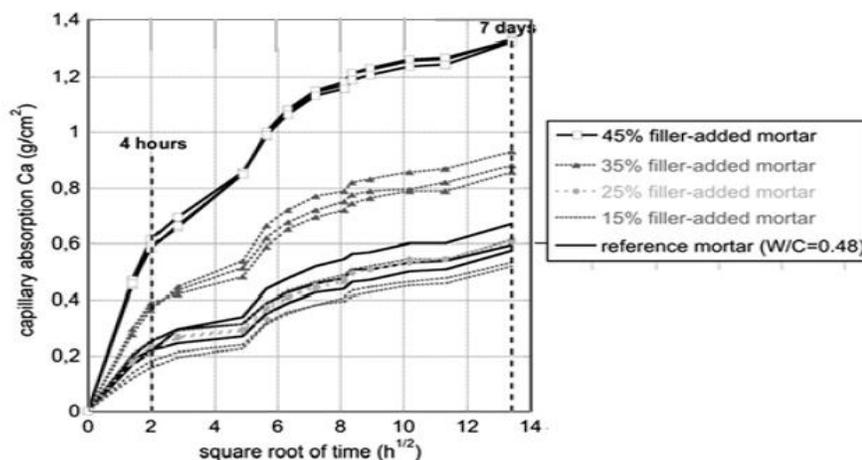


Figure 2.23 : Evolution du coefficient d'absorption capillaire pour différents taux de fillers dans le mortier (Benachour et *al.*, 2008).

Celik et *al.* (1996) 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 2.24 montre que l'absorption du béton diminue 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.

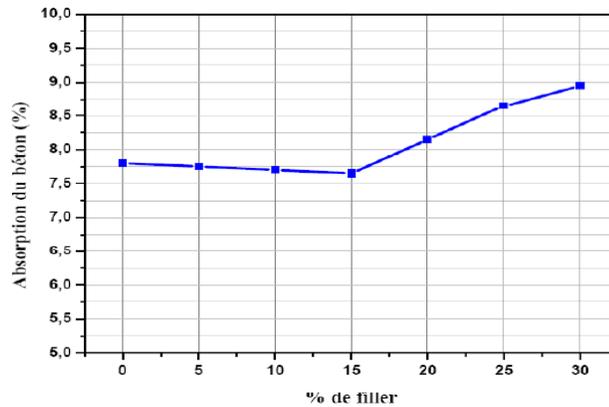


Figure 2.24: Absorption du béton à 28 jours d'âges contenant différents pourcentages de poussières de concassage (Celik et *al.*, 1996).

Ghrici et *al.* (2007) ont étudié l'influence du rapport E/C sur la sorptivité des bétons contenant différents quantités d'additions à 28 et 90 jours d'âges (Figure 2.25). 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.

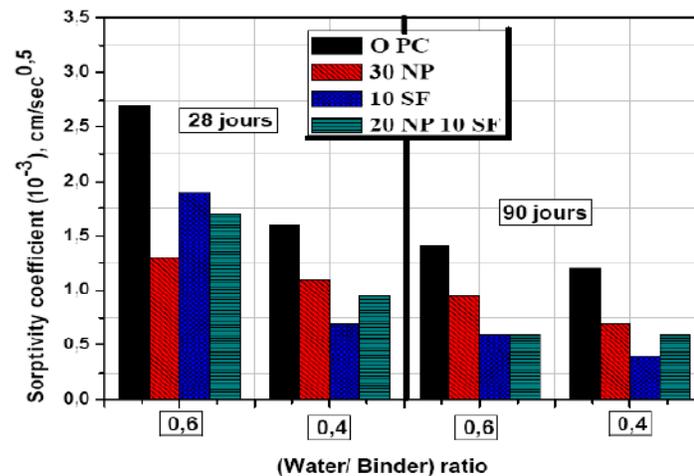


Figure 2.25: Coefficient de sorptivité du béton à 28 et 90 jours pour différents rapports E/C et différentes fines dans le mortier (Ghrici et *al.*, 2007).

L'absorption d'eau par capillarité, du béton contenant des fines de briques, diminue en fonction de l'augmentation du dosage en filler (Hadjoudja et *al.*, 2007). 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 15,1% (250 kg/m^3). La figure 2.26 montre que le coefficient de capillarité diminue en fonction de l'augmentation du dosage en filler. Cette réduction semble être due à la diminution de porosité.

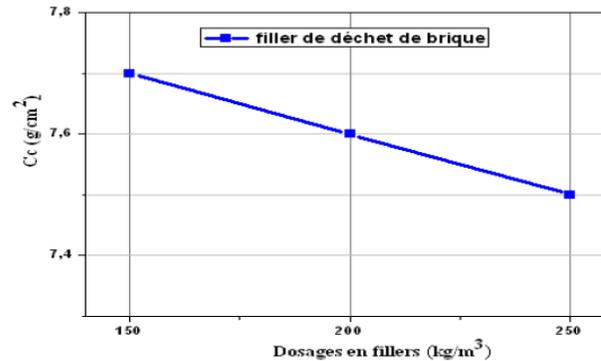


Figure 2.26: Evolution du coefficient de capillarité en fonction du pourcentage des fillers dans le béton (Hadjoudja et al., 2007).

2.5.5. Résistance aux sulfates

Lorsque le béton est exposé à des sulfates, il subit des détériorations importantes. Cette dégradation est attribuée à la détérioration du lien de l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) dans la matrice cimentaire. La présence des ajouts calcaire à travers le sable ou le ciment affecte négativement la résistance des mortiers (Menadi, 2008; Beixing et al., 2009; Tosun et al., 2009). L'effet négatif de l'ajout calcaire est associé au changement de la microstructure de l'ajout.

Les résultats présentés par Hadj Sadok (2004) sur les figure 2.27 et 2.28 montrent 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 .

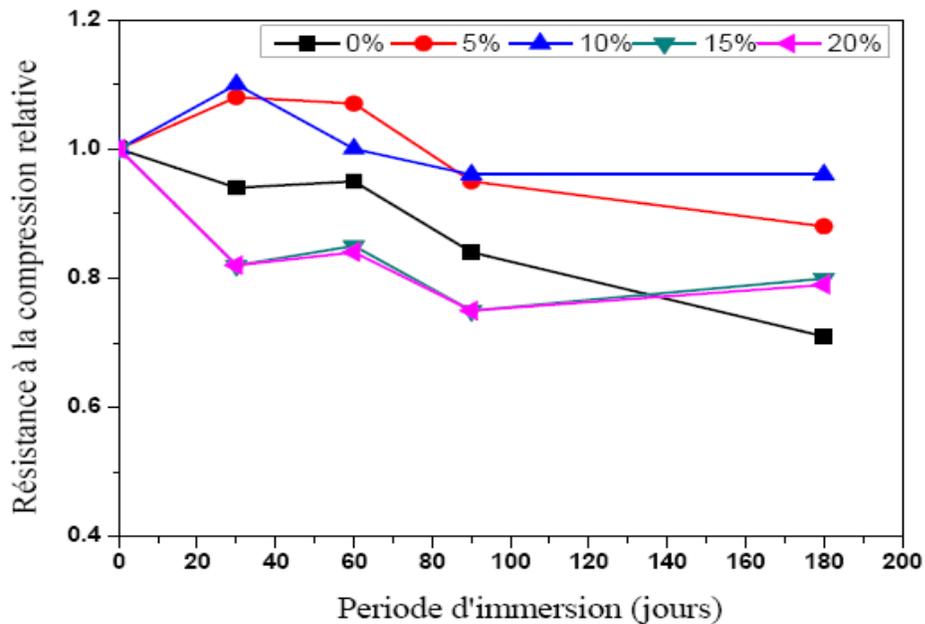


Figure 2.27: Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de sodium (5% Na_2SO_4) (Hadj sadok, 2004).

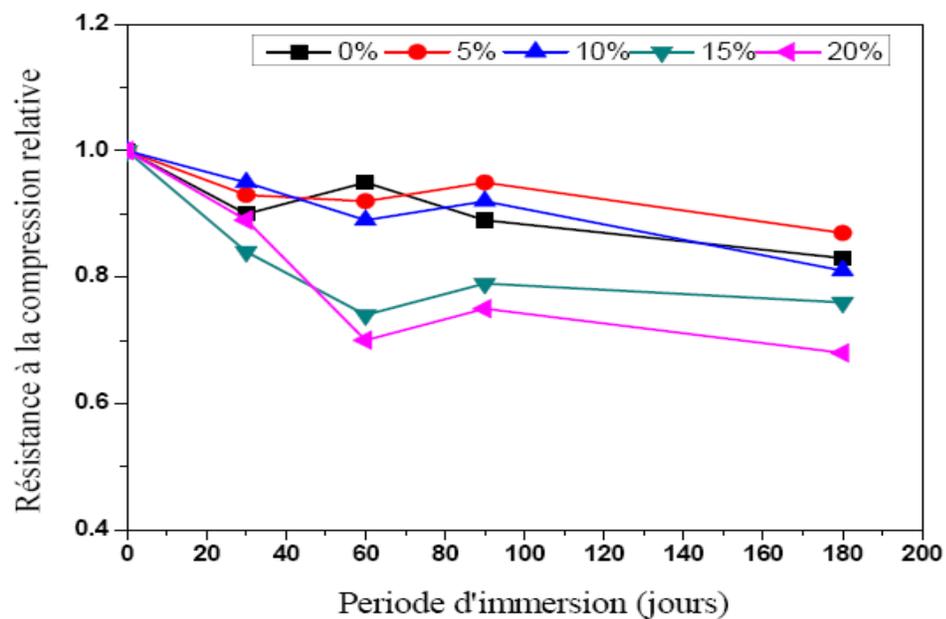


Figure 2.28: Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de magnésium (5% $MgSO_4$) (Hadj sadok, 2004).

Lorsque des éprouvettes de mortier ou bétons sont exposées à des sulfates, une expansion est apparue due à une variation de volume causée par la combinaison des sulfates avec les produits d'hydratation. En présence de fines calcaires dans la composition des bétons, une diminution remarquable est constatée en fonction du pourcentage des fines et de leurs finesses. Des résultats (Gonzalez et *al.*, 1998) 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.

Les résultats de Hadj Sadok (2004) 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 2.29 et 2.30. 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.

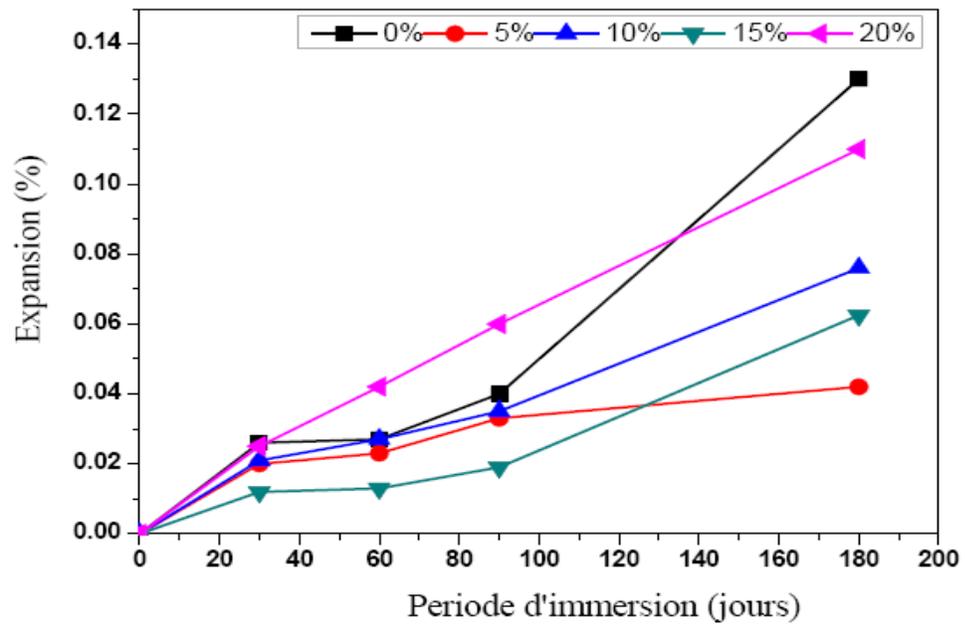


Figure 2.29: Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5% de sulfate de sodium (Na₂SO₄) (Hadj sadok, 2004).

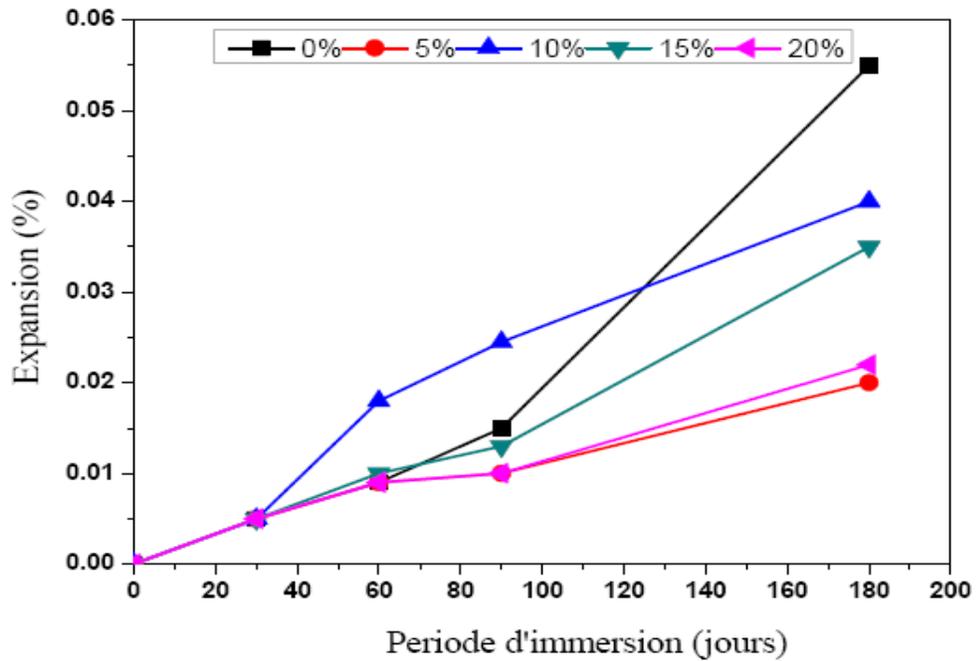


Figure 2.30: Expansion des éprouvettes immergées dans la solution contenant 5% de sulfate de sodium (MgSO₄) (Hadj sadok, 2004).

2.5.6. Résistance aux acides

Le béton est largement utilisé dans des constructions exposées à l'attaque des acides comme les conduites d'égouts où l'acide sulfurique est très présent. L'utilisation de certaines fines minérales dans la composition du béton peut conduire à une amélioration de la résistance du béton à l'attaque des acides par la réduction de l'hydroxyde de calcium, qui est le plus vulnérable à l'attaque de l'acide. Pour des éprouvettes à base de fines calcaire exposées 360 jours dans des solutions de magnésium et de sodium, la perte de masse est généralement plus faible lorsque le taux de fines est élevé comme le montre les résultats présentés sur les figures 2.30 et 2.31 (Menadi, 2008).

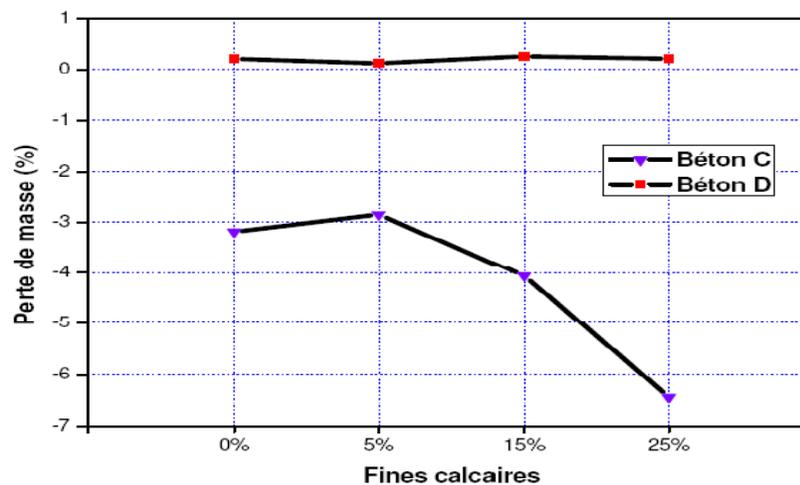


Figure 2.30: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% MgSO₄ (Menadi, 2008).

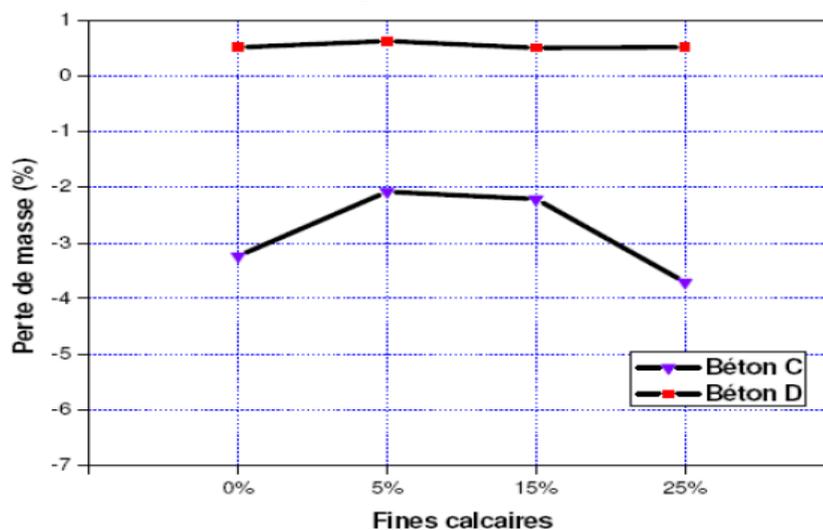


Figure 2.31: Perte de masse relative des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans 5% Na₂SO₄ (Menadi, 2008).

2.5.7 Gel-dégel

La résistance au gel dégel du béton diminue linéairement avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires. Par ailleurs, pour le béton de haute résistance, les fines calcaires ne montrent aucun effet sur la résistance au gel dégel. La bonne résistance au gel dégel du béton de haute résistance est expliquée par le faible rapport E/C et le dosage élevé en ciment (Beixing et *al.*, 2009). Certains résultats (Hadjoudja et *al.*, 2007) ont montré que le gel-dégel influe négativement sur la résistance à la compression (Figure 2.32). De même, le béton à base de sable de dune contenant 250 kg/m³ de filler de brique est plus résistant au gel dégel (Figure 2.33).

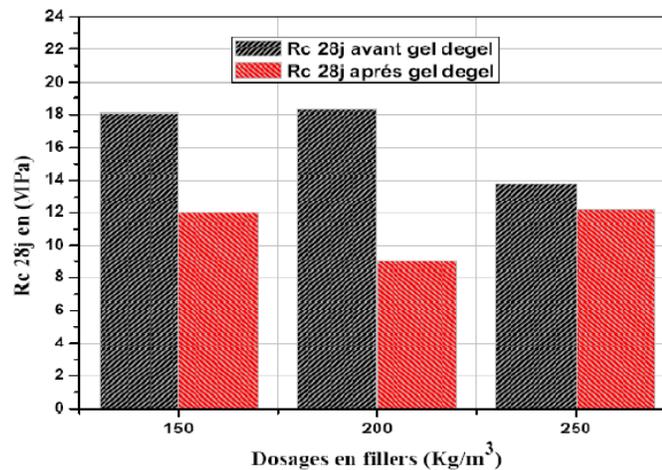


Figure 2.32: Influence du gel dégel et de filler sur la résistance à la compression (Hadjoudja et *al.*, 2007).

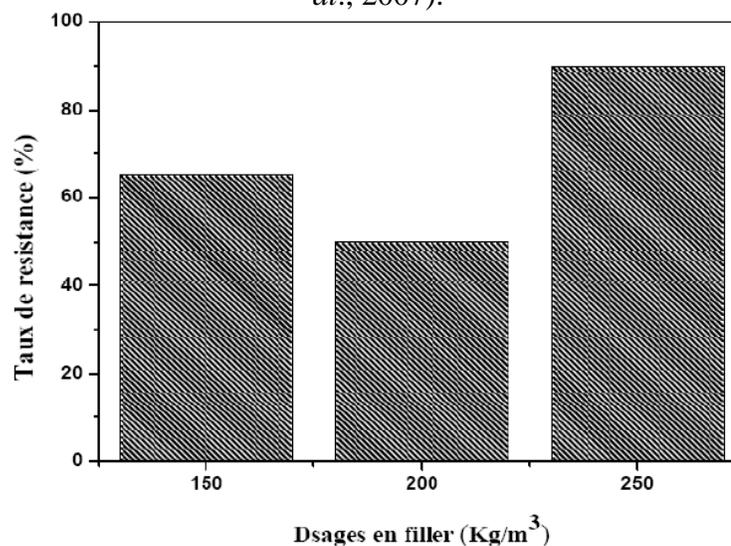


Figure 2.33 : Evolution de taux de résistance en fonction de dosages en fillers (Hadjoudja et *al.*, 2007).

2.6. Conclusion

Le sable issu du concassage des roches calcaires pour la fabrication des granulats s'avère riche en fines et présente une granulométrie continue qui peut compléter celle du béton et former une matrice plus dense. Des résultats obtenus par différents chercheurs, on peut envisager son utilisation dans le béton en remplacement au sable naturel. Cette solution engendre des performances techniques au béton produits et protège l'environnement contre l'épuisement des sables des mers et des rivières. De plus ce produits se trouve sans aucune utilisation et reste stocké dans la nature occupant des lieux devenus inactifs.

Chapitre 03

Matériaux et Essais

3.1. Introduction

L'abondance du sable de concassage dans la région de Chlef causée par l'installation de plusieurs carrières incite les promoteurs de la construction à lui trouver une utilisation rationnelle qui diminue la demande accrue de sable pour la confection du béton. Cela passe par des études de recherches sur ce produit afin d'établir ses performances et ses limites d'utilisations. L'objectif de cette étude expérimentale vise à qualifier les performances physiques, mécaniques et de durabilité apportées par l'utilisation du sable de concassage dans le mortier. En plus, cette étude vise la valorisation de l'effet des fines présentes dans ce sable et leurs effets sur les caractéristiques du mortier. La figure 3.1 récapitule les différents essais de caractérisations des mortiers élaborés.

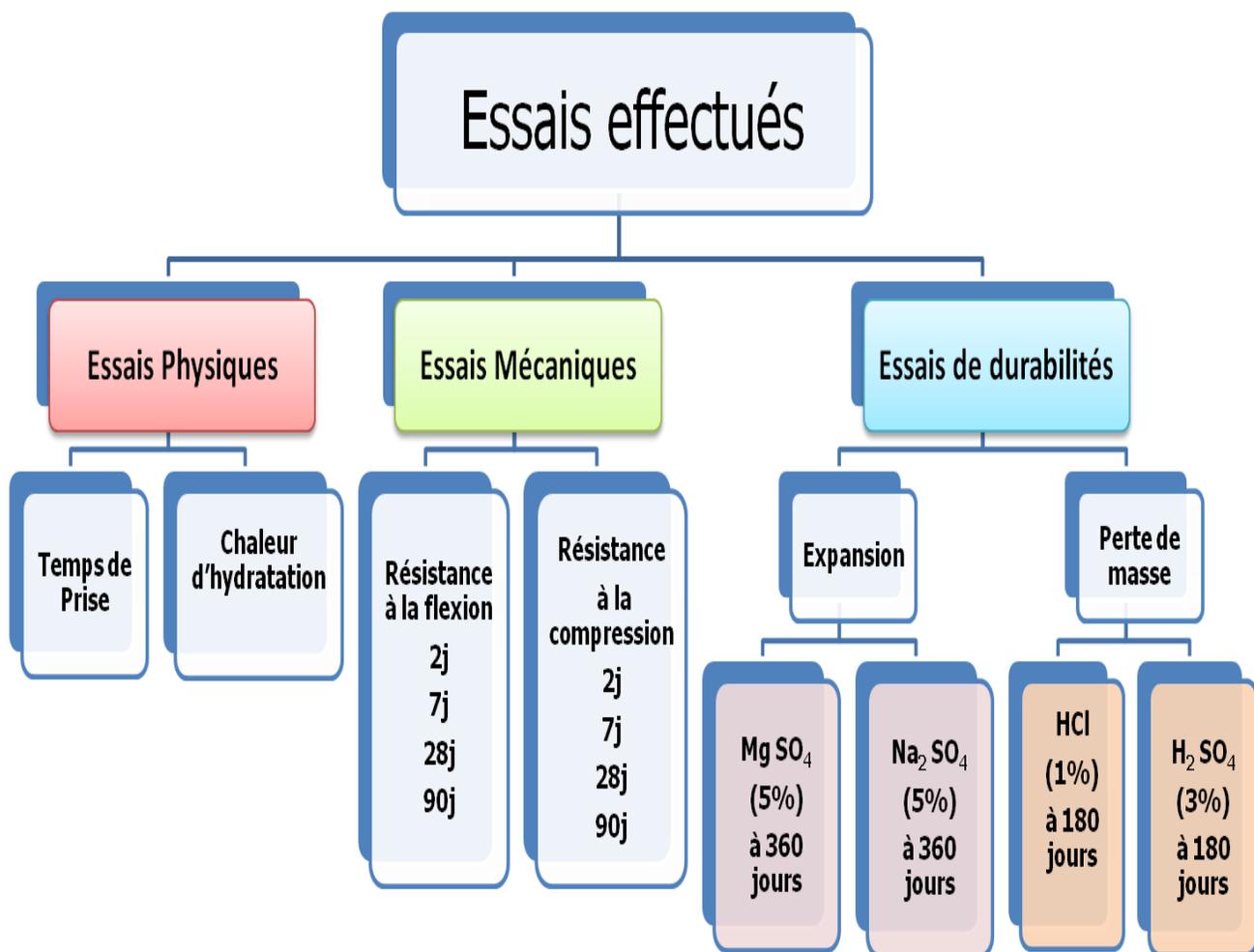


Figure 3.1 : Programme expérimental pour les essais effectués

3.2. Matériaux utilisés

L'étude vise à quantifier l'effet du sable normalisé et du sable concassé lorsqu'ils entrent dans la confection du mortier. Le mortier est constitué de ciment, de sable concassé et normalisé et de l'eau. Les caractéristiques physico-chimiques de ces matériaux sont présentées pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais.

3.2.1. Ciments

Dans cette étude, on a utilisé trois types de ciments pour confectionner les éprouvettes des mortiers. Ces ciments sont :

- ciment ordinaire (CEM I) provenant de la cimenterie de Zahana nommé C1 ;
- ciment composé (CEM II) contenant 10% de calcaire, provenant de la cimenterie de Chlef nommé C2 ;
- ciment composé (CEM II) contenant 18% de pouzzolane naturelle, provenant de la cimenterie de Zahana nommé C3 ;

L'analyse chimique et minéralogique ainsi que les caractéristiques physiques des trois ciments et du sable de concassage ont été effectuées au laboratoire de contrôle de la cimenterie d'Oued Sly de Chlef et dont les résultats sont récapitulés dans le tableau 3.1.

Table 3.1: Compositions chimiques, minéralogiques et physiques des ciments utilisés.

Compound	CEM I C1	CEM II C2	CEM II C3	Limestone crushed sand
SiO ₂	21.53	24.04	22.96	2.5
Al ₂ O ₃	4.26	6.08	6.28	0.6
Fe ₂ O ₃	5.38	4.67	3.62	0.9
CaO	63.45	57.54	58.76	52.6
MgO	1.28	1.81	1.13	0.5
SO ₃	2.30	2.16	1.47	
K ₂ O	0.51	0.93	0.84	0.05
Na ₂ O	0.14	0.22	0.17	0.02
CaO libre	1.05	0.35	0.70	
Loss of ignition	1.6	2.34	5.07	41.9
C ₃ S	52.81	41.8	62.3	
C ₂ S	21.91	33.3	15.2	
C ₃ A	2.02	5.1	3.8	
C ₄ AF	16.36	10.7	8.8	
S.S.B (cm ² /g)	3500	3700	3300	

3.2.2. Sable

Dans la présente étude on a utilisé deux types de sable; un sable normalisé et un sable de concassage. Le sable normalisé est conforme à la norme NF P 15-403 qui est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement arrondie offrant toutes garanties de qualité et de régularité, contrôlé par le laboratoire d'essais des matériaux de la ville de paris (L.E.M.V.P).

Le sable de concassage (80 μ m/4mm) provient de l'unité de concassage d'oued Fodda, située à 15 km à l'Est de la ville de Chlef. Ce sable a été séché et tamisé plusieurs fois par une tamiseuse électrique (Figure 3.2) pour enlever toutes les fines inférieures à 80 μ m avant toute utilisation. Les essais de caractérisation de ce sable (granulométrie, équivalent de sable, masse volumique, etc..) ont été réalisés au sein du laboratoire Géomatériaux de Génie Civil à l'Université de Chlef.

La composition chimique du sable est récapitulée dans le tableau 3.1. L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NF P18-560 (1990) dont les résultats sont présentés dans la figure 3.3. 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 (1990). Les résultats obtenus de l'équivalent du sable ainsi que son module de finesse sont donnés dans le tableau 3.2. La texture de la surface et la forme des particules de ces deux sables sont représentées sur la figure 3.4.



Figure 3.2 : Tamiseuse électrique

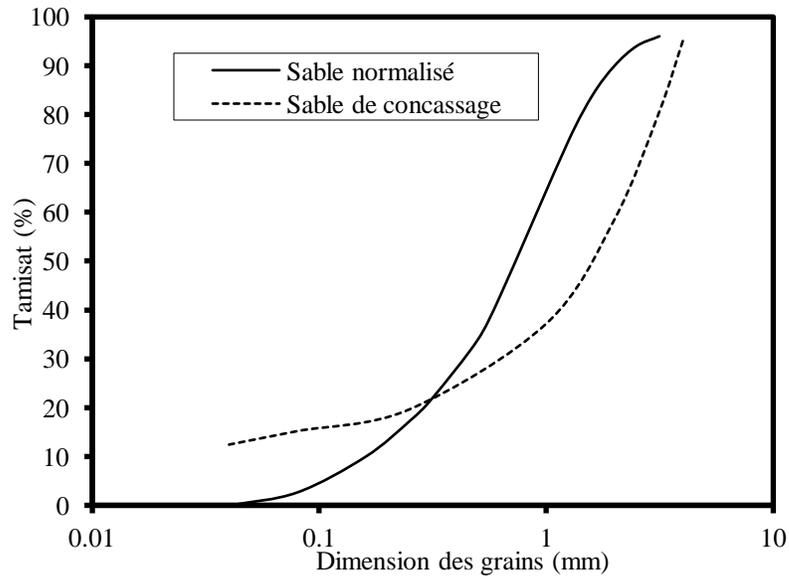


Figure 3.3: Courbe granulométrique du sable de concassage



Figure 3.4: Texture de la surface du sable normalisé et concassé.

Tableau 3.2: Équivalent du sable et module de finesse des sables utilisés

		Résultat		Norme
Sable concassé	Equivalent de sable (E.S)	E.S à vue	83.5	≥ 70 (65 et 60 pour sable concassé ou broyé)
		E.S à piston	78.3	
	Module de finesse (M.F)		3.05	1.8 < MF < 3.2
Sable normalisé	Equivalent de sable (E.S)	E.S à vue	94	≥ 70
		E.S à piston	93	
	Module de finesse (M.F)		2.52	1.8 < MF < 3.2

3.2.3. Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau potable du robinet sans passer par l'analyse chimique et on a admis qu'elle est propre à la consommation et qu'elle renferme toutes les prescriptions de la norme P18-303 (1999).

3.3. Composition des mortiers

Des éprouvettes de mortier normalisé ont été confectionnées avec trois types de ciment. Même formulation pondérale a été adoptée pour tous les mortiers avec des proportions de 3:1:0.5 pour le sable, le ciment et l'eau. Dans le mortier à base de sable de concassage, les fines calcaires inférieures à 80µm ont été substituées par poids au sable de concassage à des pourcentages de 0, 5, 10 et 15%. Le tableau 3.3 montre les proportions du mélange des mortiers.

Tableau 3.3: Proportions du mélange des mortiers à base de sable de concassage.

Mélange	Sable normalisé	Pourcentage de fines de calcaire			
		0 %	5%	10%	15%
Ciment(g)	450	450	450	450	450
Sable de concassage (g)	1350	1350.0	1282.5	1215.0	1147.5
Fines calcaires(g)	0	0.0	67.5	135.0	202.5
Eau (g)	225	225	225	225	225
Rapport(E/C)	0.5	0.5			

3.4. Confection et conservation des éprouvettes

Les échantillons de mortiers ont été confectionnés suivant la norme EN 196. Les mortiers à base du trois types de ciment sont fabriqués avec du sable normalisé et du sable de concassage (EN196-1) avec un rapport E/C=0.50. Les constituants sont introduits du plus gros au plus fin à l'intérieur d'un malaxeur à hélice de capacité 5 litres (Fig 3.5/a). Le remplissage des moules prismatiques 40 x 40 x 160 mm a été effectué sur une table à secousses (Figure 3.5/b).



Figure 3.5 : a) Malaxeur de capacité 5 litre b): Table vibrante pour mortier.

La procédure de malaxage et le mode d'introduction des différents constituants pour fabriquer les mortiers sont illustrés dans le tableau 3.4.

1. Introduire en premier le ciment le sable dans la cuve du malaxeur et mélanger à sec pendant 1min à vitesse lente.
2. Ajouter la 2/3 de l'eau de gâchage et malaxer pendant 1 min à vitesse lente.
3. Introduire le 1/3 de l'eau de gâchage progressivement en malaxant pendant 1 minute
4. Malaxer pendant 1 minute à grande vitesse.
5. Remplir les éprouvettes et les conserver.

Tableau 3.4. Procédure de malaxage et mode de fabrication des éprouvettes

Opérations	Introduire (Ciment + sable)	Verser (2/3 E)	Verser (1/3E)		Préparation des éprouvettes
Durée	0	120s	180s	240s	5min
Malaxeur	Vitesse lente		Vitesse Lente	Vitesse Rapide	

Les échantillons fabriqués sont conservés dans une chambre climatique (Humidité relative > 95% et T = 20°C ± 2°C) pendant 24 heures jusqu'au démoulage. Après 24 heures, une fois démoulés ils ont été immergés et murés dans l'eau saturée en chaux jusqu'aux échéances de 2, 7, 28 et 90 jours.

3.5. Description des essais

3.5.1. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été effectuée sur trois éprouvettes prismatiques de mortier 40 x 40 x 160 mm pour chaque variable conformément à la norme NF EN 196-1 (2006). Cet essai est réalisé sur une presse de flexion à trois points de capacité de 5kN (Figure 3.6). La vitesse de chargement durant l'essai est de 50 N/sec.

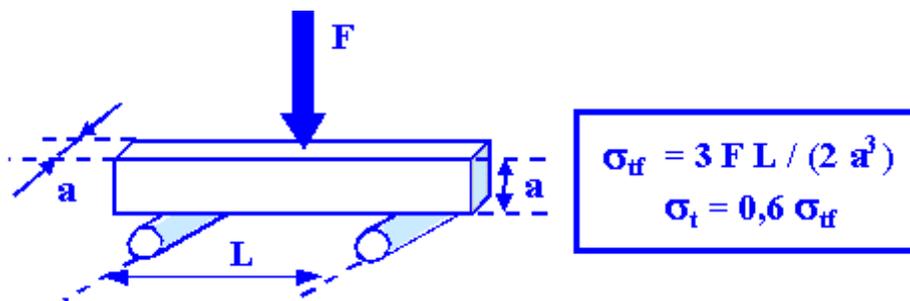


Figure 3.6: Déroulement de l'essai de flexion trois points pour éprouvettes prismatiques de mortiers 40 x 40 x160 mm.

Après avoir enregistré la valeur de la force de rupture F_r , on peut calculer la valeur de la résistance à la flexion par la formule ci-dessous.

$$R_t = \frac{3 F L}{2 a^3}$$

Ou :

R_t : Résistance à la flexion exprimée en MPa.

F : Force de rupture exprimée en Newton.

a : dimension de la section ($a=40$ mm).

L : portée de l'élément ($L=110$ mm)

3.5.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus fréquemment mesurée sur le mortier. L'essai de résistance à la compression des mortiers a été effectué selon la norme NF P 18-406 (1981). Elle est mesurée sur des éprouvettes de 40 x 40 x 160 mm pour chaque mélange du mortier à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours. L'effort de compression est appliqué par une presse hydraulique de capacité 3000 kN (Figure 3.6) dont le chargement est contrôlé en force à raison de 0,5 à 0,6 kN/s.

Pour effectuer l'écrasement des éprouvettes en compression conformément à la norme EN 196-1 (2006), le demi prisme est placé couché au centre des deux plateaux de la presse entre deux plaques métalliques carrées pour transmettre l'effort de la presse aux faces de compression de l'éprouvette de mortier comme l'illustre la (figure 3.7). On met la machine en marche jusqu'à écrasement du demi-prisme, et on note la valeur de la force de rupture F_r . La figure 3.8 schématise la rupture d'un demi-prisme en compression.



a) Eprouvette avant écrasement b) Eprouvette après écrasement c) forme des prismes écrasés
Figure 3.7: Rupture d'un demi-prisme.

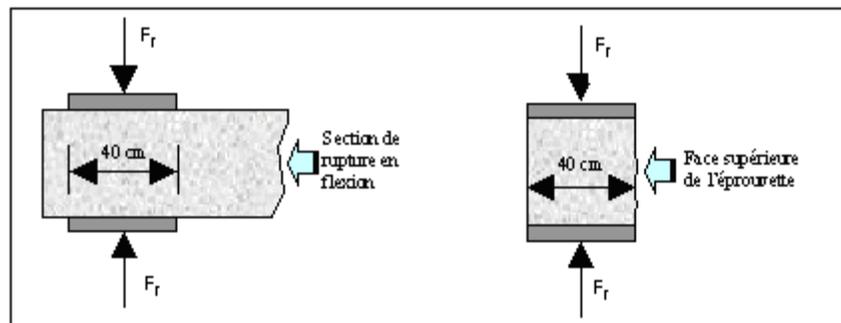


Figure 3.8: Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme.

Après avoir enregistré la valeur de la force de rupture F_r , on peut calculer la valeur de la contrainte de compression donnée par la formule ci-dessous.

$$R_c = \frac{F_r}{b^2}$$

Ou :

R_c : Résistance à la compression exprimée en MPa.

F_r : Force de rupture exprimée en Newton.

b^2 : section du prisme donnée par $40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$.

3.5.3. Chaleur d'hydratation

Un calorimètre semi-adiabatique appelé aussi calorimètre de langavant a été choisi pour mesurer la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier confectionné. Ce calorimètre est dit semi-adiabatique si la perte de chaleur est inférieure à $100 \text{ j}/(\text{h.K})$, il est constitué d'un vase de Dewar fermé par un bouchon calorifugé et placé dans une enveloppe rigide qui lui sert de support. Au fond du vase se trouve un disque en caoutchouc qui sert d'appui à l'éprouvette cylindrique destinée à recevoir la gâchée de mortier. La figure 3.9 schématise les constituants principaux d'un calorimètre semi-adiabatique.

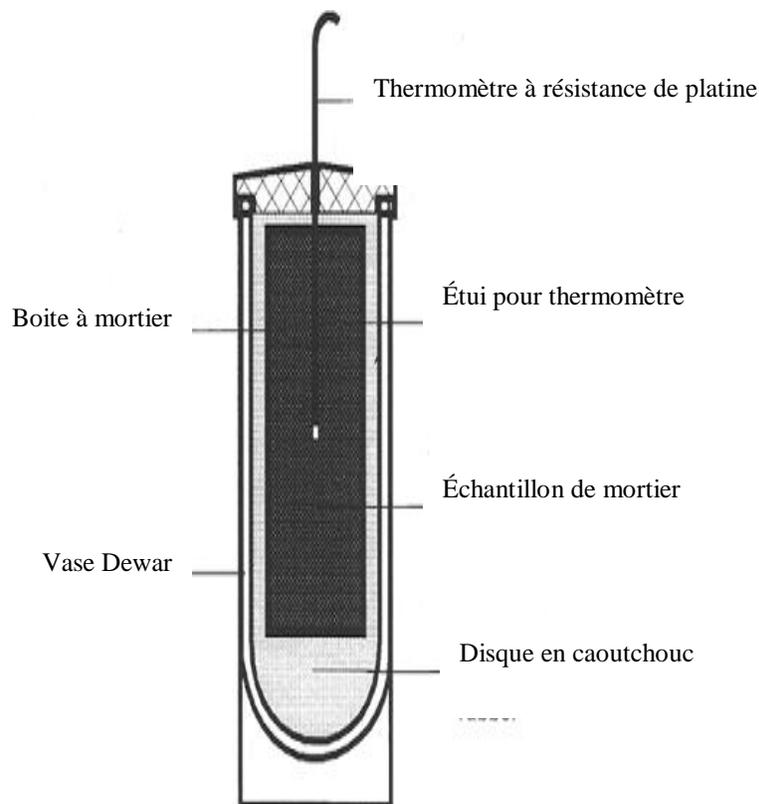


Figure 3.9 : Schéma d'un calorimètre semi-adiabatique.

Pour mesurer la chaleur d'hydratation, le calorimètre doit être associé à un calorimètre de référence utilisé pour contrôler la température ambiante, contenant une éprouvette de mortier âgé plus de trois mois, considérée comme inerte. Une boîte d'acquisition des températures avec deux sorties de mesure reliée à un ordinateur pour traiter les résultats. La figure 3.10 montre le dispositif d'essai et l'ordinateur de contrôle.



Figure 3.10 : Dispositif utilisé pour mesurer la chaleur d'hydratation

Après l'enregistrement de l'échauffement le long de l'essai, la chaleur d'hydratation q à l'instant t est donnée par :

$$q = \frac{C}{m_c} \theta_t + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \theta \cdot dt$$

Où :

C : Capacité thermique totale du calorimètre et de l'éprouvette ($\text{j} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

θ_t : échauffement de l'échantillon d'essai à l'instant t ($^\circ\text{C}$).

m_c : masse du ciment, en gramme.

α : coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre exprimé en $\text{j} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

$t(\text{h})$: durée de l'hydratation.

μ : capacité thermique du calorimètre vide.

Les caractéristiques de l'appareil Languavant sont :

$$\alpha = 63.5 + 0.188 \theta \pm 1.2 \text{ (j} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}, \text{ pour } \theta = 20^\circ\text{C} \rightarrow \alpha = 67.3 \text{ (j} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

$$\mu = 640 \text{ (j} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}.$$

Pour effectuer l'essai de mesure de la chaleur d'hydratation sur la boîte de Languavant conforme à la norme NF 15-436 (1989), on suit les démarches suivantes :

1. peser la boîte cylindrique à vide.
2. verser le mortier dans la boîte et relever la température du mortier avant de fermer la boîte.

3. peser la boîte pleine et déduire le poids de l'échantillon.
4. Relever la température de la salle de préparation.
5. introduire les données (masse du ciment, sable, eau, mortier, température ambiante) en utilisant le clavier numérique de la chaîne de mesure.

Les figures 3.11 ci-dessous montrent la mise en place de la boîte à mortier dans le calorimètre et la figure 3.12 présente la chaîne d'acquisition des températures. En fonction des données relatives à l'essai et des températures relevées, un logiciel permet de donner la chaleur dégagée en utilisant l'équation citée ci-dessus.



Figure 3.11 : Boîte de languavant



Figure 3.12 : Boîte d'acquisition des températures

3.5.4. Durabilité

L'objectif de cette partie était de caractériser le comportement des mortiers à base des trois types de ciment (C1, C2 et C3) vis-à-vis des agents agressifs en fonction de temps d'immersion et du taux de substitution de fines calcaires au sable de concassage. La durabilité des échantillons du mortier à base de sable de concassage dans l'environnement chimique a été déterminée selon la norme ASTM C-1012 (2013).

Deux environnements agressifs ont été étudiés (deux solutions de sulfatiques et deux solutions acides). A cet effet, pour chaque environnement, cinq mortiers ont été formulés : un mortier de référence (sable normalisé) et quatre mortiers dans lesquels les fines calcaires ont été substituées au sable de concassage avec des taux de 0, 5, 10, et 15%.

La durabilité des échantillons du mortier à base de sable de concassage dans l'environnement chimique a été déterminée selon la norme ASTM C-1012 (2013). Les solutions sulfatiques sont 5% de $MgSO_4$ (Figure 3.13), 5% de Na_2SO_4 (Figure 3.14) tandis que les solutions acides sont 3% H_2SO_4 et 1% HCl (Figure 3.15). Trois échantillons de chaque mélange de mortier pour chaque solution, ont été préparés et immergés dans l'eau saturée de chaux à une température de $20 \pm 2^\circ C$ pendant 28 jours avant leur immersion dans les solutions. Des éprouvettes prismatiques 40 x 40 x 160 mm ont été utilisées. Les solutions ont été renouvelées chaque mois.



Figure 3.13: Immersion des éprouvettes dans la solution de sulfate de magnésium (5% $MgSO_4$).

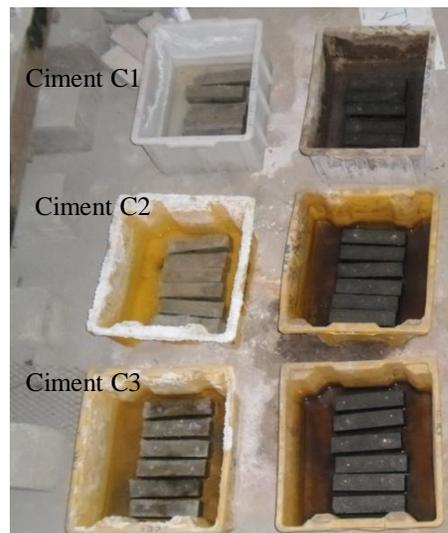


Figure 3.14: Immersion de des éprouvettes dans la solution de sulfate de sodium (5% Na_2SO_4).



Figure 3.15 : Vue générale des éprouvettes immergées dans les solutions de 1% HCl et 3% H₂SO₄

3.5.4.1. Mesure de l'expansion

L'expansion des éprouvettes (40x40x160 mm) munies de plots métalliques, immergées dans différentes solutions agressives a été évaluée en fonction du temps conformément à la norme ASTM C-1012. L'expansion est mesurée sur des éprouvettes à l'aide d'un extensomètre représenté sur la figure 3.16. L'évolution de la concentration des solutions a été suivie à l'aide d'un PH-mètre



Figure 3.16 : Appareil pour mesurer d'expansion des mortiers

3.5.4.2. 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, 5, 10 et 15% de fines calcaires en fonction de temps d'immersion

dans des différentes solutions sulfatiques (1% de l'acide chloridrique HCl et 3% de l'acide sulfurique H₂SO₄). La perte de masse a été déterminée par pesée selon la formule suivante:

$$\text{Perte de masse en \%} = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \cdot 100$$

Où :

M₀ : masse de l'éprouvette avant l'immersion en (g),

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

3.6. Conclusion

Toutes ces manipulations sont conformes aux normes en vigueur et que les essais se sont déroulés dans de meilleures conditions. Les résultats de ces essais seront présentés dans les chapitres ultérieurs où une discussion des résultats obtenus sera donnée afin de comprendre le comportement du sable de concassage et l'effet de la présence des fines.

Chapitre 04

Effet du type de sable sur les performances du mortier normalisé.

4.1. Introduction

L'augmentation rapide dans les activités de la construction au cours des dernières décennies a provoqué l'augmentation considérable de la consommation de granulats naturels pour la fabrication du béton. Par conséquent, la disponibilité de bons granulats naturels devient rare. En outre, l'extraction de granulats naturels a des effets néfastes sur l'environnement, et donc il est important de réduire leur consommation ainsi que de trouver d'autres sources alternatives. Cela a encouragé les chercheurs à étudier et identifier les matériaux de sous-produits supplémentaires qui peuvent être utilisés comme substituts pour les granulats naturels dans la production du béton (Raman et *al.*, 2011)

L'objectif principal de cette recherche est de fournir plus d'informations sur les effets de sable concassé quand il remplace le sable normalisé dans la confection des mortiers. Les propriétés fournies par le sable concassé sont étudiés en fonction de trois types de ciment utilisés en les comparants avec celles du sable normalisé. Ainsi, les essais de prise, de résistance à la compression, de résistance à la flexion, de la chaleur d'hydratation et de durabilité sont effectuées sur des échantillons de mortier produits avec et sans sable concassé. Les résultats expérimentaux de sable concassé sont analysés par rapport à ceux de sable normalisé.

4.2. Temps de prise

La période du temps de prise représente le temps de passage du ciment à partir de l'état liquide à l'état solide. Les résultats obtenus concernant le temps de prise (début et fin) sont présentés dans la figure. 4.1. On remarque que tous les temps de début de prise des différents types de ciments sont plus élevés que le minimum de temps de 90 minutes exigé par les normes. Le sable concassé a un grand effet sur le temps de prise où ses valeurs sont considérablement réduites par rapport à celles du sable normalisé. Par conséquent, le temps de début de prise diminue de 73, 55 et 105 minutes pour les ciments C1, C2 et C3 respectivement lorsque le sable utilisé dans le mortier est le sable normalisé. Le ciment Portland ordinaire C1 présente la plus faible baisse dans le temps de fin de prise par rapport aux ciments composés C2 et C3. Ces résultats sont conformes avec ceux obtenus par d'autres chercheurs (Ezziane et *al.*, 2010) sur le comportement ces ciments.

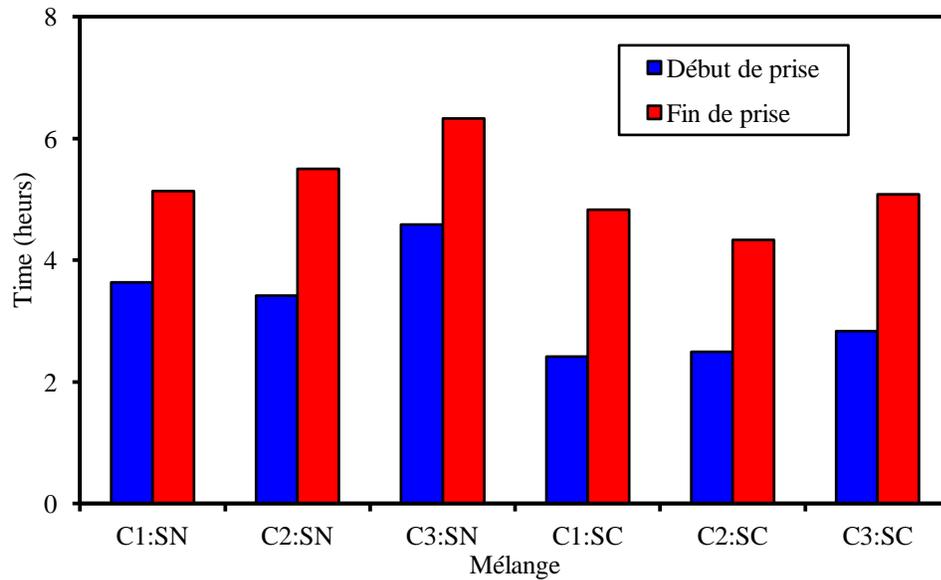


Figure 4.1 : Résultats des temps de début et de fin de prise pour différents types de sable et de ciment.

L'analyse des résultats de prise des différents mélanges montre qu'il est possible d'établir une relation entre les valeurs des temps de prise pour les mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassé. La figure 4.2 illustre une variation linéaire entre les temps de prise des deux sables utilisés avec un coefficient de corrélation acceptable. Cette relation est indépendante du type de ciment. Ainsi, il est possible de prévoir un début et une fin de prise de mortier contenant du sable concassé selon le temps de prise du mortier à base du sable normalisé selon la relation suivante:

$$t_{SC} = a t_{SN} + b \quad (4.1)$$

où t_{SC} et t_{SN} représentent respectivement le temps de prise pour le sable concassé et le sable normalisé. a et b ce sont des coefficients obtenu par des résultats des expériences. La méthode des moindres carrés a été utilisée pour déterminer les valeurs de meilleur ajustement de ces coefficients pour chaque temps de prise comme illustré sur la figure. 4.2.

Les fines calcaires contenues dans le sable concassé jouent un rôle fondamental pour l'amélioration de l'hydratation des grains de ciment et la réduction du temps de prise du mortier. La présence de fines calcaires agit par l'amélioration de l'hydratation à un âge

précoce, et accélère l'hydratation des minéraux de clinker résultant en une amélioration de la résistance (Beixing *et al.*, 2009 ;Safiddin *et al.*, 2007 ; Bonavetti *et al.*, 2001). Ceci explique l'accélération observée une fois le mortier est mélangé avec du sable concassé contenant plus de 12% de fine calcaire.

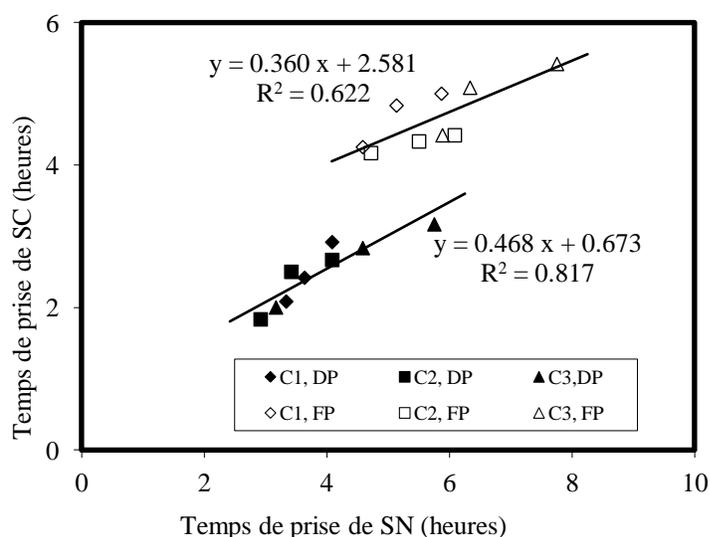


Figure 4.2 : Relation entre le temps de prise des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassage (DP : Début de prise, FP : Fin de prise).

4.3. Résistance à la flexion

Les résistances à la flexion des trois ciments sont représentées sur la figure 4.3, où chaque valeur est évaluée comme la moyenne des trois résultats de test. L'utilisation du sable concassé dans un mortier améliore la résistance à la flexion par rapport à celui du mortier à base du sable normalisé. Il est très clair que le type de ciment a un rôle fondamental sur l'amélioration de la résistance à la flexion. Tous les ciments ont une très grande sensibilité à la présence de sable concassé en particulier au jeune âge. Ceci est probablement dû à l'effet des fines calcaires présentes dans le sable de concassage et qui génère une forte hydratation des grains de ciment. Le ciment ordinaire C1 mélangé avec du sable concassé présente la meilleure amélioration de la résistance à la flexion, qui est de 2,8 MPa supérieure à celle du mortier de sable normalisé à 90 jours. Cependant, le ciment C2 contenant du calcaire semble être le moins touché par des fines présentes dans le sable concassé en particulier à un âge précoce. D'autre part, le ciment C3 contenant de la pouzzolane naturelle a une activité modérée au jeune âge. Au-delà de 28 jours, une activité pouzzolanique donne une plus grande

résistance à la flexion en particulier à 90 jours, ce qui est plus proche de celle des autres ciments. Selon les résultats obtenus, le sable concassé engendre une amélioration de la résistance à la flexion par rapport au sable normalisé de 38, 27 et 17% pour le ciment C1, C2 et C3 respectivement.

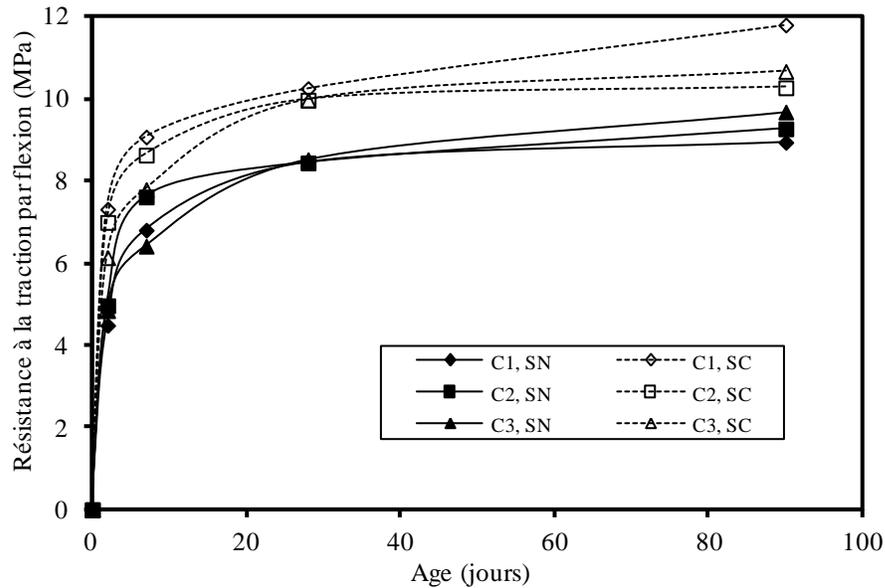


Figure 4.3 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassage en fonction du temps.

La figure. 4.4 montre la relation entre les résistances de flexion des deux mortiers à base du sable normalisé et du sable concassé. Cette relation est moins dépendante du type de ciment car le coefficient de corrélation est plus élevé pour le ciment C2 contenant 10% de fines calcaires. La relation entre les résultats de la résistance à la flexion des deux sables est donnée par :

$$S_{FSC} = c + d S_{FSN} \quad (4.2)$$

Où S_{FSC} et S_{FSN} sont respectivement la résistance à la flexion de sable concassé et du sable normalisé. Les coefficients c et d sont obtenus pour chaque type de ciment par le meilleur ajustement des résultats d'essais. Il sera conclu que les valeurs de la résistance à la flexion présentées sur la Figure 4.4, montrent une faible dépendance sur les types des ciments.

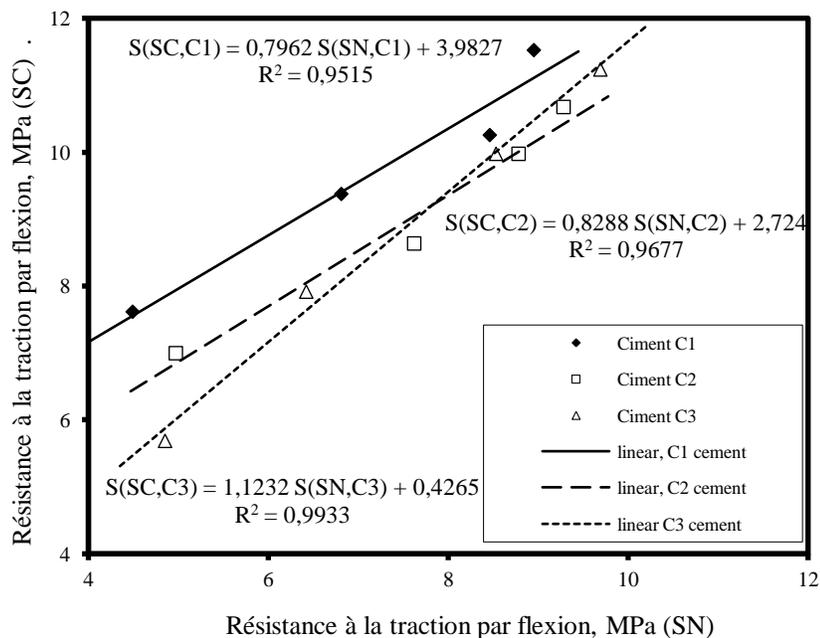


Figure 4.4. : Relation entre la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassage.

Les fines calcaires présentes dans le sable concassé contribuent à réduire l'absorption de béton. En outre, les micros fines peuvent remplir les vides entre les particules et améliorent la densité de la matrice cimentaire durcie qui conduit à une amélioration considérable de la résistance à la flexion (Beixing et *al.*, 2009).

4.4. Résistance à la compression

Les résultats illustrés sur la figure 4.5 montrent l'évolution des résistances à la compression des mortiers à base de sable normalisé et concassé. Il est évident que l'effet bénéfique du sable concassé au jeune âge conduit à une nette amélioration de la résistance à la compression. En deux jours, le mortier contenant du sable concassé présente une augmentation de la résistance à la compression de 14, 12,5 et 5,6 MPa respectivement pour les ciments C1, C2 et C3. En revanche, cette amélioration n'est que de 10, 4 et 5 MPa à 28 jours. Ceci est cohérent avec les conclusions d'autres chercheurs, qui ont montré que l'utilisation de sable concassé dans le béton augmente la résistance à la compression et la résistance à la flexion (Hebhoub et *al.*, 2011 ; Kou et *al.*, 2009 ; Kim et *al.*, 1997). En dépit de la faible amélioration

de la résistance à la compression du ciment C3 au jeune âge, sa réaction pouzzolanique conduit à une résistance similaire à 90 jours.

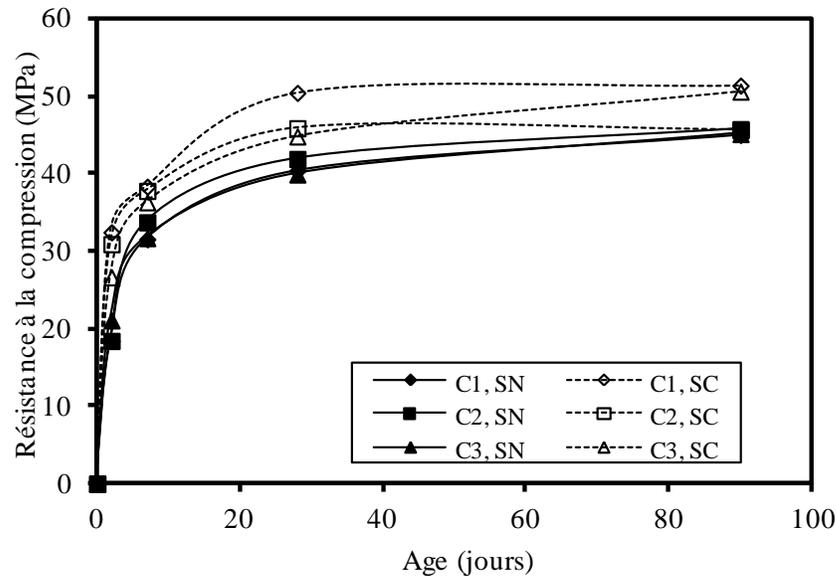


Figure 4.5 : Variation de la résistance à la compression des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassage en fonction du temps.

La Figure 4.6 donne une relation linéaire entre les résistances à la compression des deux mortiers avec les deux types de sable. De ce résultat on remarque que les tendances sont presque similaires et les variations ne sont pas très importantes. La résistance à la compression du mortier contenant du sable concassé peut être prédite en fonction des résultats du sable normalisé et indépendamment du type de ciment utilisé. L'amélioration de la résistance à la compression fournie par le sable concassé est améliorée de 41, 23 et 21% pour les ciments C1, C2 et C3 respectivement. Les relations entre les résultats de la résistance à la compression des deux sables sont données par:

$$C_{SCS} = e + f S_{CSN} \quad (4.3)$$

Où C_{SCS} et S_{CSN} sont respectivement la résistance à la compression du mortier à base de sable concassé et à base de sable normalisé. Le coefficient e et f sont obtenus pour chaque ciment par un meilleur ajustement des résultats d'essais. Les valeurs présentées sur la figure 4.6 montrent une faible dépendance sur les types de ciment.

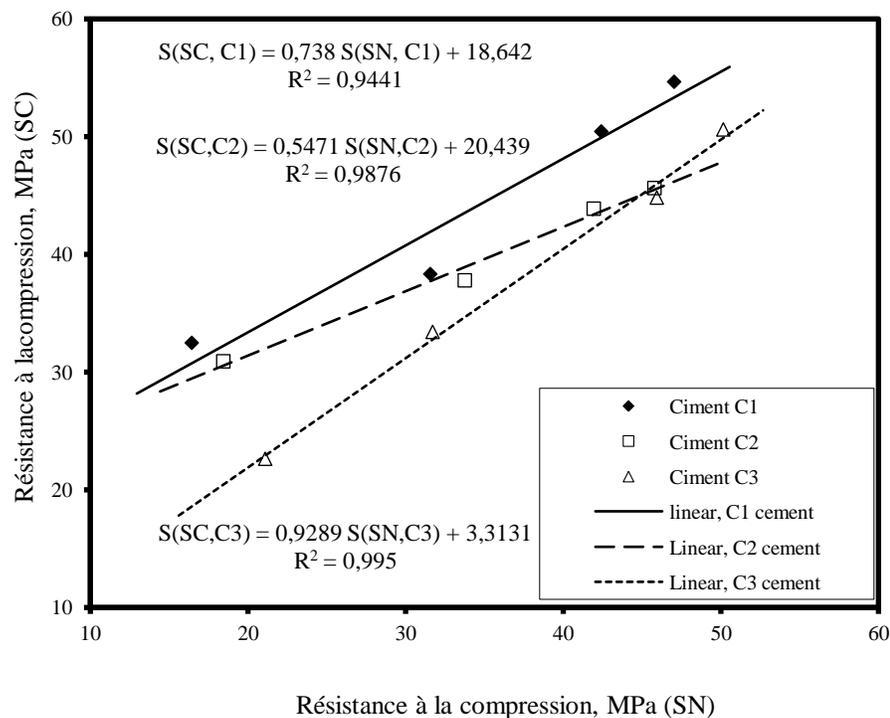


Figure 4.6. : Relation entre la résistance à la compression des mortiers à base de sable normalisé et de sable de concassé.

Il est évident que le contenu en fines de sable concassé permet de combler les vides entre les grosses particules de grains de ciment pour augmenter la densité et donc réduire le volume d'eau de remplissage. Cela permet d'accroître le montant de l'excédent d'eau, pour former des films d'eau sur les particules solides afin d'améliorer la maniabilité, promouvoir la réactivité des grains de ciment et produire plus de produits d'hydratation (Adjoudj et *al.*, 2014). En plus, Kenai et *al.* (2004) ont rapporté qu'une amélioration de la résistance initiale se produit lorsque les fines de calcaire sont utilisées en tant que matériaux de remplacement du ciment. Cependant, l'augmentation de la teneur en fines de plus de 15% provoque une augmentation de l'absorption ce qui réduit l'évolution des résistances à la compression (Celik et *al.*, 1996).

La surface lisse de sable normalisé réduit la résistance du mortier par rapport au mortier du sable concassé. Donza et *al.* (2002) montrent que la forme et la texture de particules du sable concassé ont un effet important sur l'interaction pâte-agrégats, menant ainsi à une amélioration de la résistance à la compression du béton et mortier.

4.5. Chaleur d'hydratation

Le mortier avec du sable concassé génère une chaleur d'hydratation supérieure à celle avec du sable normalisé. Les figures 4.7, 4.8 et 4.9 montrent la chaleur d'hydratation cumulée pour les mortiers avec différents sables et pour les trois ciments utilisés. Les courbes pour les mortiers de sable concassé évoluent plus rapidement au jeune âge; la production de chaleur est plus rapide en présence des fines calcaires, qui jouent le rôle de germes dans l'hydratation des grains de ciment. Comme présenté dans le tableau 4.1, la chaleur maximale pour les mortiers à base du sable normalisé se produit à 9.3 h, 6.3h et 7.8h pour les ciments C1, C2 et C3, respectivement. Lorsque le mortier est fait avec du sable concassé, ce temps est seulement de 6.8h, 4.8h et 5,3h pour les trois ciments respectivement. Cela confirme le temps de prise rapide observée plus tôt, quand le sable utilisée est du type concassé.

Tableau 4.1 : Résultats de la chaleur d'hydratation pour tous les trois mortiers

Type de sable	Désignation	Ciment C1	Ciment C2	Ciment C3
Sable normalisé	La chaleur d'hydratation finale (J/g)	205.3	242.5	213.1
	Taux d'hydratation (J/g/h)	14.6	18.7	12.9
	Temps de Pic II (h)	9.3	6.3	7.8
Sable concassé	La chaleur d'hydratation finale (J/g)	209.9	249.7	218.6
	Taux d'hydratation (J/g/h)	24.0	33.5	15.7
	Temps de Pic II (h)	6.8	4.8	5.3

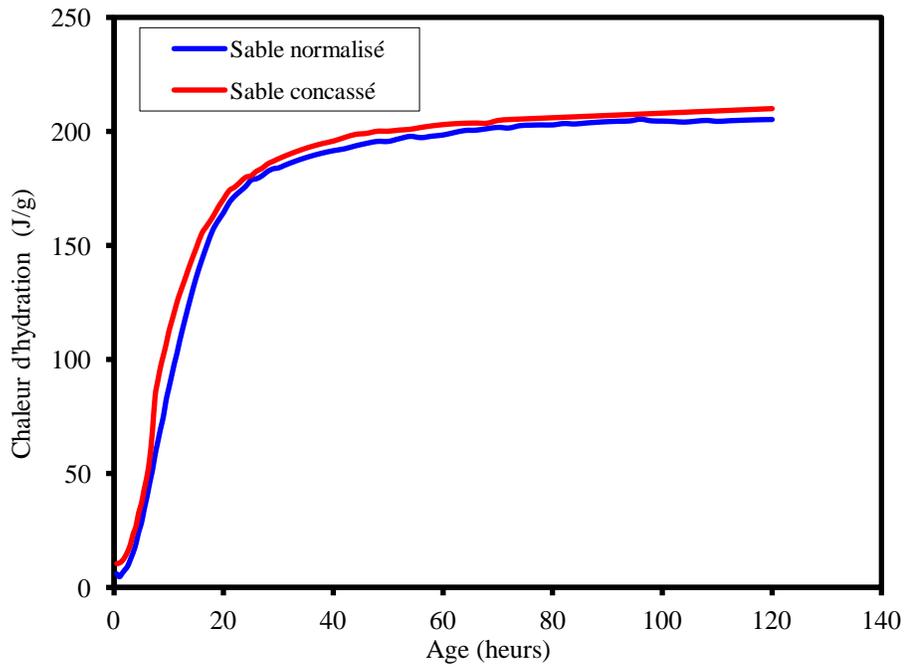


Figure 4.7. Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment C1 avec le sable normalisé et le sable concassé.

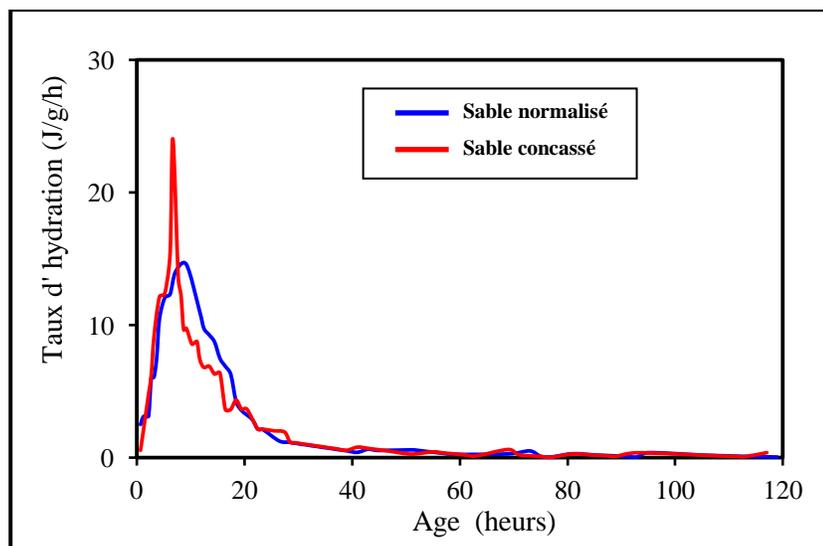


Figure 4.8. Evolution du taux d'hydratation du ciment C1 avec le sable normalisé et le sable concassé.

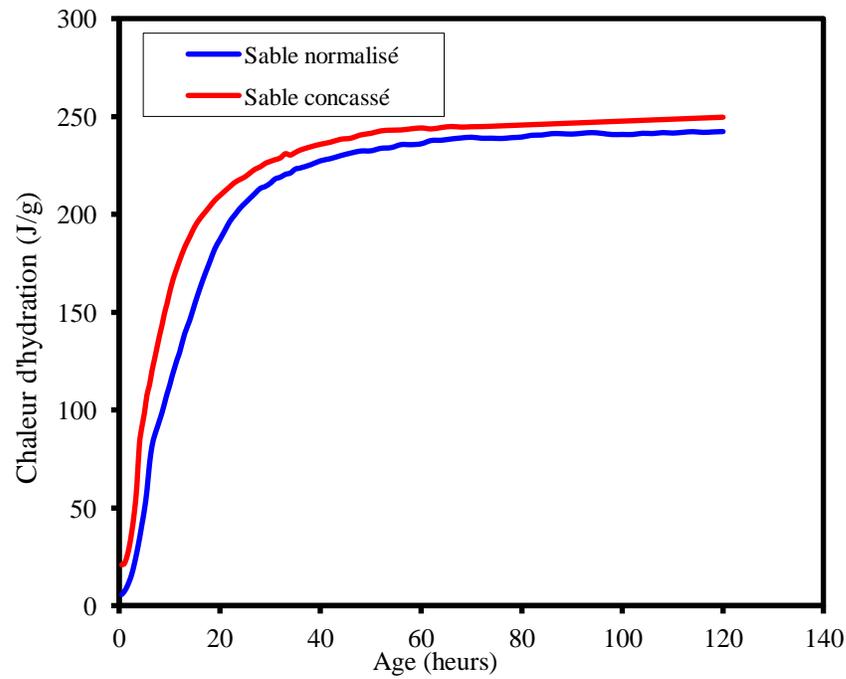


Figure 4.9. Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment C2 avec le sable normalisé et le sable concassé.

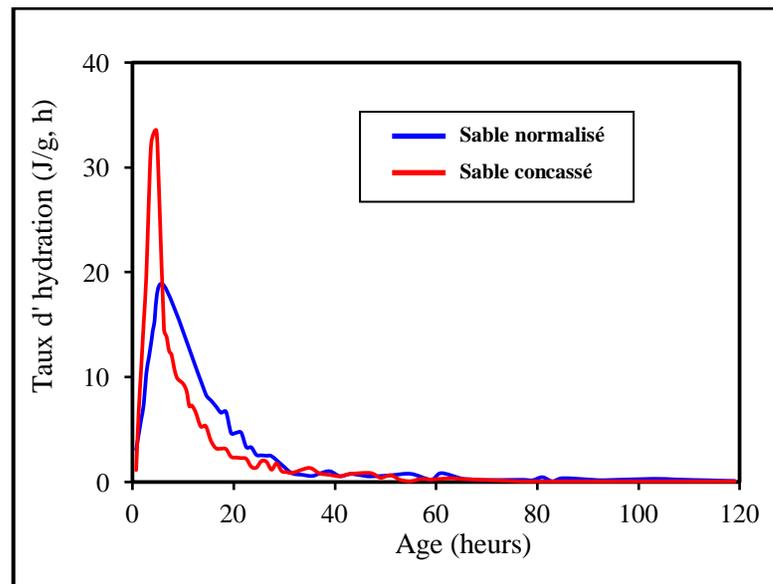


Figure 4.10. Evolution du taux d'hydratation du ciment C2 avec le sable normalisé et le sable concassé.

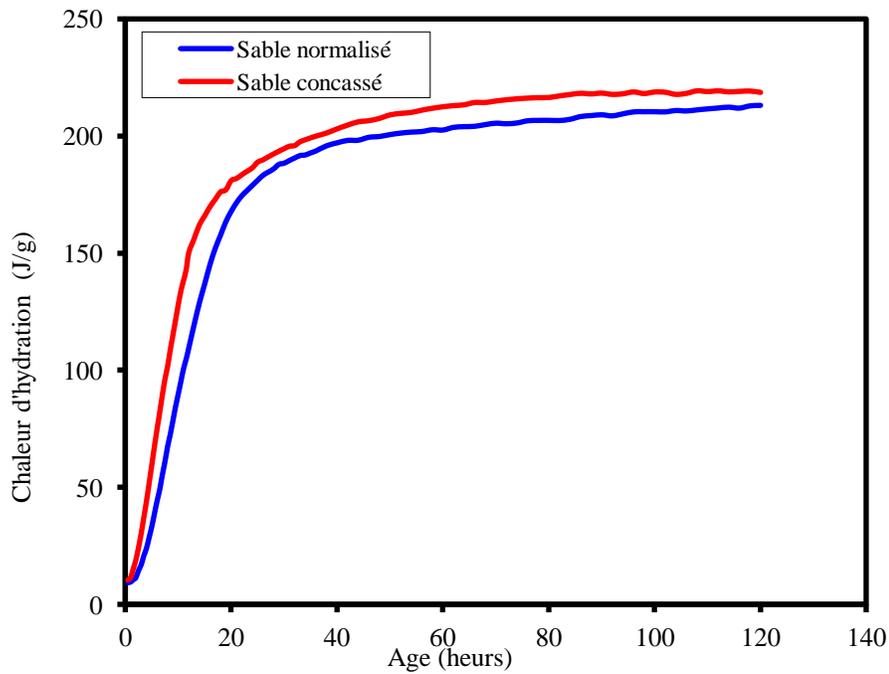


Figure 4.11. Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment C3 avec le sable normalisé et le sable concassé.

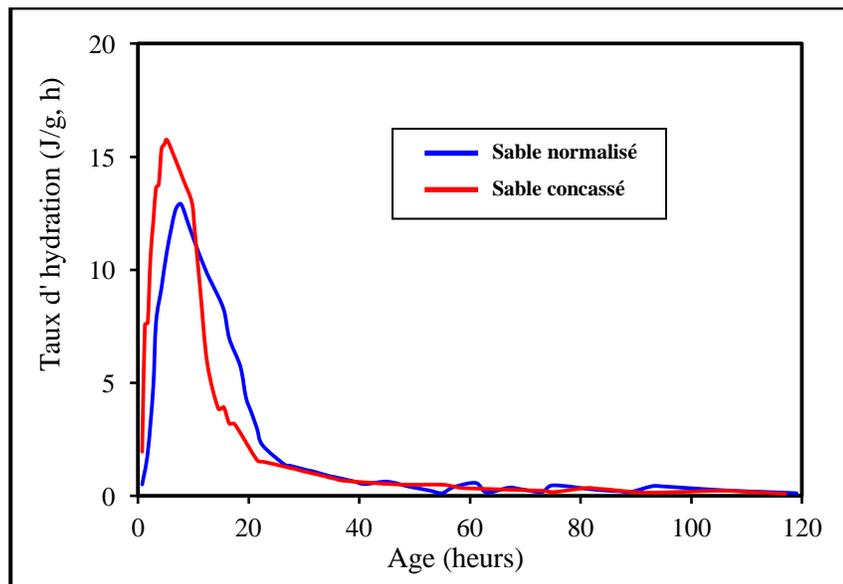


Figure 4.12. Evolution du taux d'hydratation du ciment C3 avec le sable normalisé et le sable concassé.

L'accélération de l'hydratation due à l'incorporation de sable concassé est fonction du type de ciment. Le ciment ordinaire C1 est très sensible au type de sable et manifeste une augmentation du deuxième pic de l'hydratation, qui se produit à 2,5 h avant que celui du sable normalisé. La chaleur d'hydratation d'un mortier avec du ciment C2 à base de calcaire correspond à une valeur du pic d'hydratation supérieure lorsque le sable concassé est utilisé. L'efficacité du sable concassé sur l'hydratation du ciment C3 contenant de la pouzzolane naturelle est moins importante et génère une augmentation uniforme de la chaleur pour tous les temps. Des études antérieures ont démontré un effet bénéfique sur le développement d'hydratation quand une petite quantité de fines calcaires est combinée avec des cendres volantes (De Weerd et *al.*, 2011) ou de la pouzzolane naturelle (Ghrichi et *al.*, 2007). Cela a conduit à une augmentation du volume des hydrates d'alumine en raison de ces additions minérales les plus disponibles dans le ciment C3. En effet, les valeurs finales de chaleur d'hydratation mesurées à 4 jours pour les deux types de sable montrent qu'il y a une légère différence et elles restent liées au type de ciment.

La présence du sable concassé riche en fines donne une grande activité d'hydratation aux grains de ciment. Les fines calcaires forment d'autres sites de nucléation qui soutiennent la formation des hydrates. Cette accélération se fait sentir au jeune âge, où la chaleur dégagée des mortiers avec du sable concassé est nettement supérieure à celle dégagée avec du sable normalisé. Les ciments C2 et C3 sont les plus sensibles à la présence du sable concassé; l'amélioration de leur chaleur d'hydratation est plus importante en raison de l'effet synergique des différents additifs.

En comparant les chaleurs dégagées pour les deux sables et pour les trois ciments, on obtient les résultats illustrés sur la figure 4.13. La variation des deux manches d'hydratations est donnée par une relation polynomiale pour chaque type de ciment. Les coefficients de corrélation sont proches de l'unité, et donc le choix de ce modèle est justifié. Après 24 heures, l'effet de sable est moins important et les courbes de la chaleur d'hydratation entre les deux types de sable se rencontrent sur une variation linéaire simple comme indiqué sur la figure. 4.13. Ainsi, la chaleur d'hydratation d'un mortier de sable concassé est fonction de celle du sable normalisé comme montre l'équation suivante:

$$Q_{SC} = g Q_{SN} + h Q_{SN}^2 \quad (4.4)$$

Où Q_{SC} et Q_{SN} sont respectivement la chaleur d'hydratation pour les mortiers de sable concassé et normalisé. Les coefficients g et h sont obtenus pour chaque ciment par le meilleur ajustement des résultats d'essais.

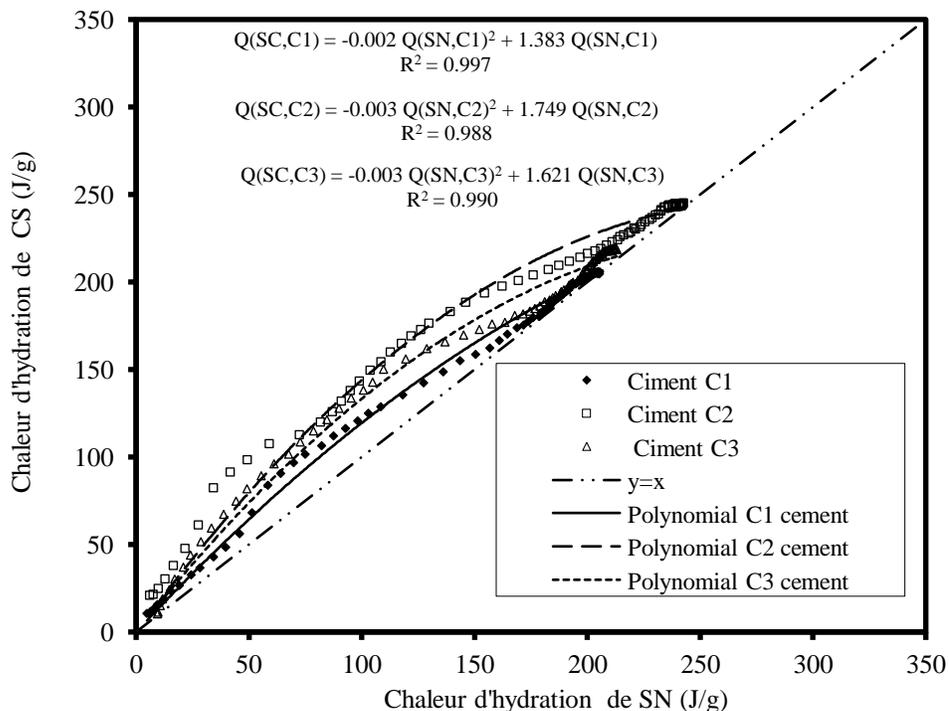


Figure 4.13: Relation entre la chaleur d'hydratation des mortiers à base de sable normalisé et de sable concassé.

A partir des résultats ci-dessus, on peut conclure que l'addition du sable concassé contenant de fines calcaires dans la matrice augmente la température au cours de l'hydratation et augmente aussi la chaleur d'hydratation. L'utilisation de sable concassé affecte largement la cinétique d'hydratation et la formation des produits finaux d'hydratation. Comme le montre le tableau 4.1, la chaleur d'hydratation se produit plus tôt pour les mortiers contenant du sable concassé en comparaison avec celle d'un sable normalisé. L'utilisation de sable concassé impliquant une accélération de l'hydratation du ciment en présence de calcaire finement broyé. Cela est conforme aux résultats observés par Thongsanitgarn et *al.* (2014) dans lesquels la chaleur d'hydratation maximale a été observée à environ 6,5 h pour le ciment au calcaire et

10h pour le ciment ordinaire. En conséquence, la chaleur cumulative exprimée par gramme de clinker est plus élevée pour le mortier contenant du sable concassé, surtout avec du ciment au calcaire. Ceci est en accord avec les résultats de Lothenbach et *al.* (2008) dans lesquels la chaleur d'hydratation mesurée est de 266 J / g pour le ciment ordinaire et 276 j / g pour le ciment au calcaire.

4.6. Attaque des sulfates

Dans cette étude expérimentale, les performances du mortier à base de sable normalisé et de sable concassé lorsqu'ils sont immergés dans une solution de 5% Na₂SO₄ et de MgSO₄ pendant un an, ont été étudiées en comparaison avec trois types de ciments. Les figures. 4.14 et 4.15 montrent les résultats obtenus de l'expansion des mortiers.

Des expansions similaires sont observées pour les deux solutions où les valeurs sont limitées à 0,6% après un an d'observation. Le sable concassé est plus efficace en solution Na₂SO₄ tandis que l'expansion du mortier de sable normalisé est plus faible en solution MgSO₄ et devient presque indépendante du type de ciment. Avec les deux sables utilisés, le ciment C3 contenant de la pouzzolane naturelle se comporte bien en solution MgSO₄ et offre une grande durabilité avec une diminution nette de son expansion. Par conséquent, on peut déduire que le sable concassé offre de meilleures performances de durabilité à long terme. On a observé de bonnes résistivités à l'attaque des sulfates surtout quand on utilise des ciments composés.

Des résultats comparables ont été trouvés par Vuk et *al.* (2002), dans lesquels l'absorption de sulfate et la formation de sulfates minéraux dans la pâte de ciment calcaire a été diminuée par l'ajout des additions minérales. L'étude a démontré la vulnérabilité élevée du ciment au calcaire (C2) dans un environnement sulfaté (MgSO₄) où l'expansion a augmenté de 17 et 38% pour le mortier à base de sable normalisé et de sable concassé respectivement. Ces résultats sont en accord avec ceux de Pipilikaki et *al.* (2009), dans lesquels la porosité totale plus élevée dans la pâte de ciment calcaire qui conduit à des fissures et à une diminution de la résistance à la compression.

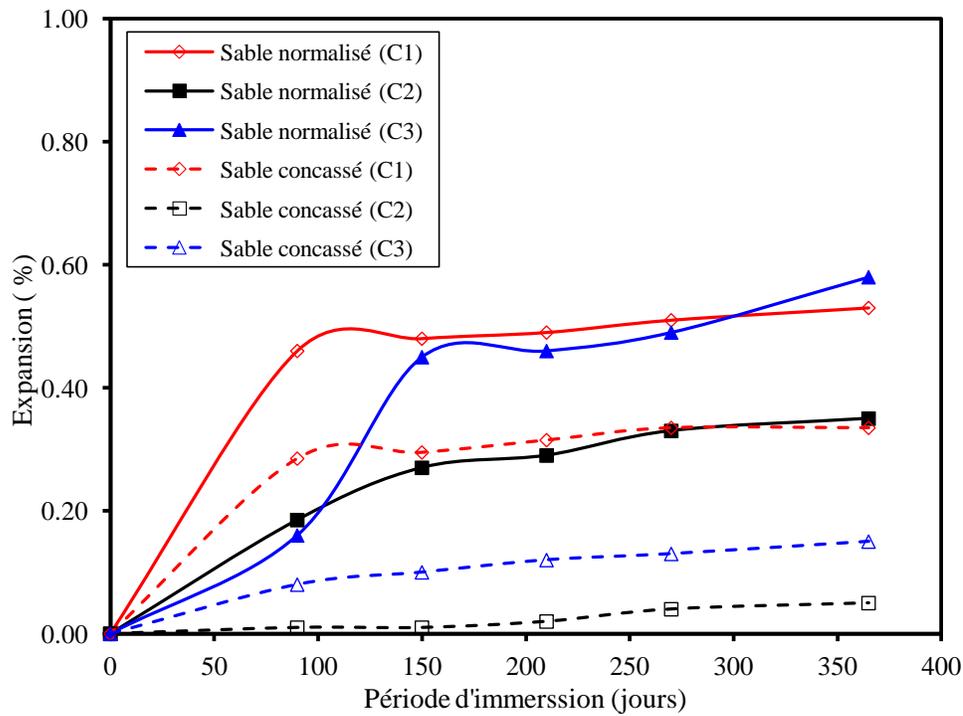


Figure 4.14 : Expansion du mortier immergé dans 5% Na₂SO₄.

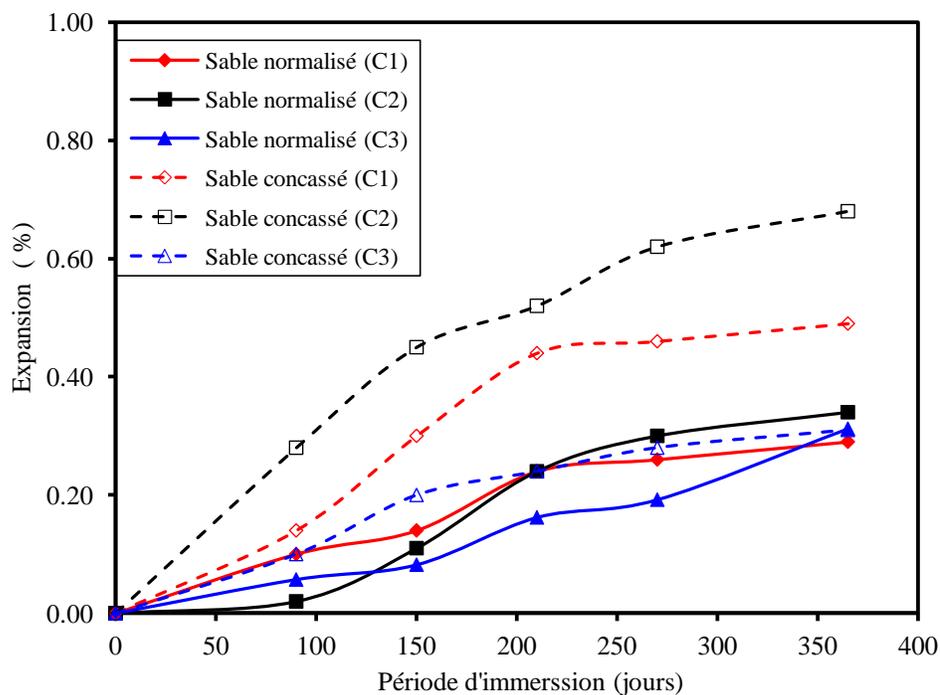


Figure 4.15 : Expansion du mortier immergé dans 5% MgSO₄.

4.7. Attaque des acides

Les résultats de la résistance du mortier à l'attaque des acides sont basés sur les valeurs moyennes de pesées obtenues à partir de trois échantillons par mélange. L'acide attaque la pâte de ciment et forme du chlorure de calcium et le sulfate de calcium, qui rendent la pâte moins cohésive. Lorsque les échantillons sont observés dans l'aspect extérieur, on voit qu'il existe un dommage considérable et une déformation de tous les échantillons. Une érosion considérable se produit dans le coin des échantillons immergés dans une solution acide. En effet, les agrégats se précipitent vers le bas de la solution acide provoquant une perte de masse. Les figures 4.16 et 4.17 montrent les résultats des tests de changement de poids en fonction du temps pour des échantillons des mortiers exposés à des solutions de 1% HCl et de 3% H₂SO₄ jusqu'à 180 jours. Le pourcentage de perte de poids en fonction du temps pour les mortiers immergés dans une solution de HCl est beaucoup plus faible que celui des échantillons immergés dans H₂SO₄. Il est clair que la perte de poids est indépendante du type de ciment et de type de sable utilisé pendant le premier mois de l'immersion où tous les échantillons sont soumis à la même perte de poids. Après 180 jours d'immersion dans une solution de HCl, le mortier à base de sable normalisé est plus efficace et offre une meilleure résistance à la dégradation de l'acide chlorhydrique. La perte de poids est de 8,6, 6,1 et 7,4% pour les ciments C1, C2 et C3 respectivement. Cette perte prend des valeurs supérieures de 18,2, 17,3 et 11,5% lorsque le sable concassé est utilisé.

Bien que le ciment C2 contenant des fines calcaires semble plus efficace, l'utilisation de sable concassé entraîne une perte considérable de poids et le rend indésirable dans cet environnement. Pour le mortier immergé dans une solution de H₂SO₄, la perte de masse enregistré est indépendante du type de ciment utilisé et prend une valeur unique de 66% pour le sable normalisé et elle est réduite à 13% lorsque le sable concassé est utilisé. Le meilleur état des zones d'interface dans les agrégats calcaire du béton pourrait être un facteur important pour sa meilleure performance sous l'attaque de l'acide sulfurique comme il est signalé par d'autres chercheurs (Chang et *al.*, 2005).

L'utilisation de sable concassé dans le béton améliore l'imperméabilité du béton, car il bloque les passages reliant les pores capillaires et les canaux d'eau. Ce blocage est affecté par

le montant des fines contenues dans le sable concassé où plusieurs passages d'eau ont été bloqués et une amélioration de la durabilité est observée (Celik et al., 1996). En outre, l'amélioration de la durabilité observée dans certains cas est probablement causée par la densité de la matrice à base de ciment, ce qui empêche la pénétration des solutions agressives au sein du mortier. De plus, l'immersion des mortiers de sable concassés dans de l'acide H_2SO_4 provoque une neutralisation de l'acide et protège le mortier contre une éventuelle attaque. Les performances du mortier de sable concassé dans une solution de H_2SO_4 sont en conformité avec les résultats de Alaa (2014) où une meilleure résistance à l'attaque d'acide est observée avec l'inclusion de 75% et 100% de sable de verre. Une résistance de mortier dans les acides et les solutions de sulfates dépend du type de sable, de ciment et le type de la solution elle-même. D'après les résultats ci-dessus, on peut noter que l'effet du sable concassé sur la résistance chimique de la matrice a encore besoin de plus d'investigations.

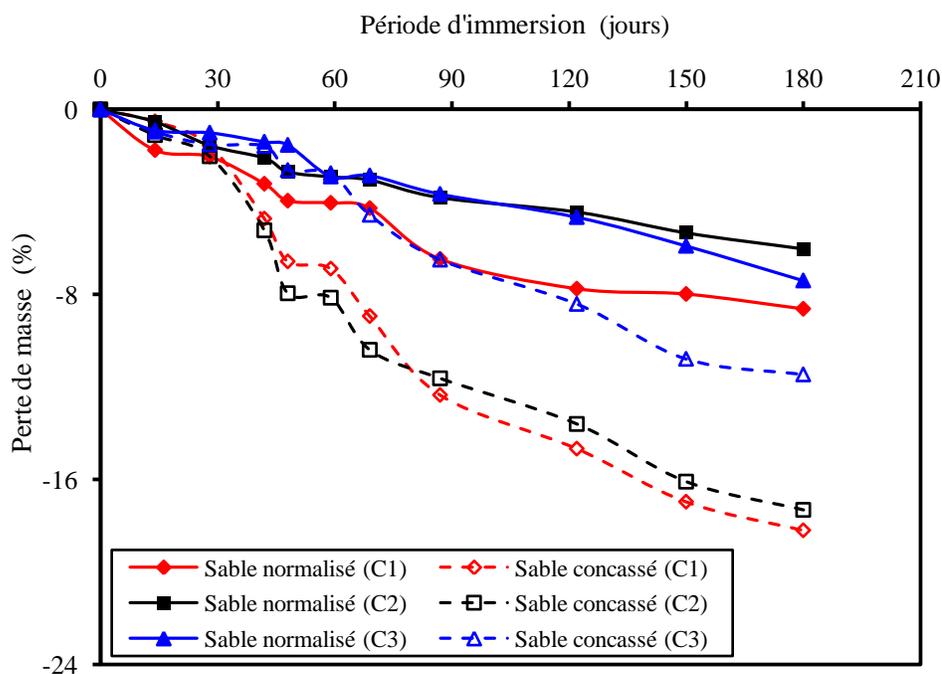
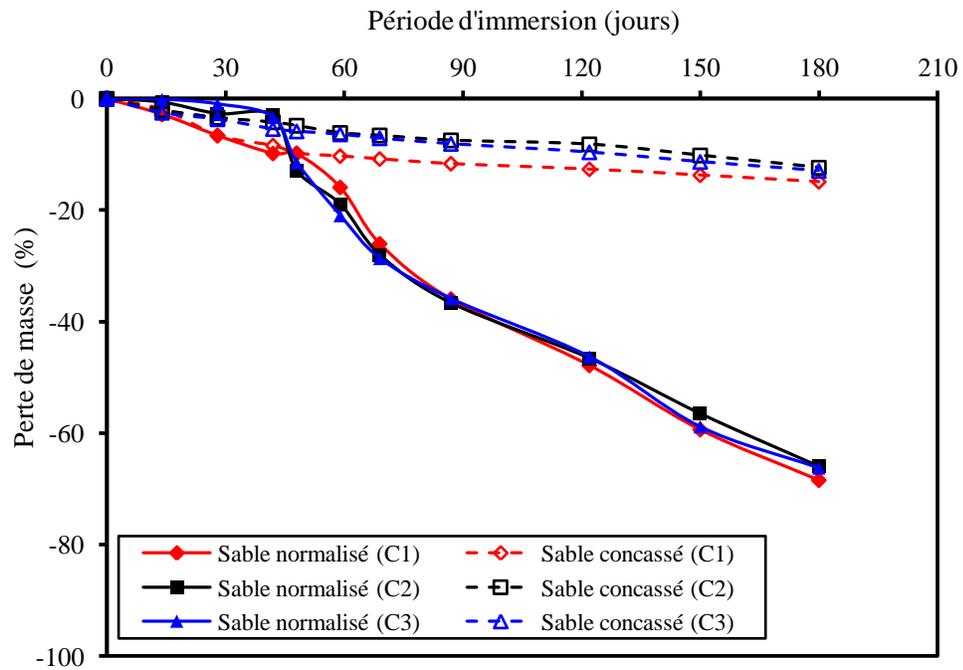


Figure 4.16 : Perte de masse du mortier immergé dans 1% HCl.

Figure 4.17 : Perte de masse du mortier immergé dans 3% H_2SO_4 .

4.8. Conclusion

Les performances acquises par la présence du sable de concassage sont souvent attribuées à sa granulométrie continue et au taux de fines qu'il contient. La substitution totale du sable naturel par le sable de concassage est très encourageante et offre une alternative pour résoudre le déficit ressenti dans les gisements des sables dans nos carrières près des oueds. L'effet des fines va prendre une part entière en étudiant ses apports au mortier lorsque son taux varie progressivement dans le sable concassé.

Chapitre 05

*Effet des fines du sable sur les
performances du mortier
normalisé*

5.1. Introduction

Lors du concassage de la roche calcaire pour l'obtention du gravier, un déchet est retenu composé de grains fins ($<80\mu$) dont la teneur en poudre fines varie selon la nature de la roche et le mode de concassage dans les carrières. Le sable obtenu dans cette opération contient une grande partie de poussière fine qui possède une influence capitale sur les propriétés physique et mécaniques des mortiers et des bétons. Dans cette partie on a envisagé d'étudier l'influence de la teneur de cette matière sur certaines propriétés en variant sa teneur pour le sable de concassage obtenu. Le sable obtenu contient près de 15% de matière fines qui sera éliminée par tamisage et introduit à des proportions de 0, 5, 10 et 15% du poids du sable de formulation.

5.2. Propriétés mécaniques

5.2.1. Résistance à la traction par flexion

L'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers avec les différents types de ciment utilisés est illustrée sur les figures 5.1, 5.2 et 5.3. Selon ces figures, on remarque que la résistance à la traction augmente avec l'âge quelque soit le type de ciment utilisé. Cette augmentation est similaire à celle observée dans le cas de la compression régie par l'avancement de l'hydratation du ciment avec l'âge.

Avec le ciment C1, l'effet des fines présentes dans le sable de concassage est très éclatant à deux jours d'âge. Un mortier contenant des fines de sable voit sa résistance augmenter de 50%. A long terme, cette amélioration descend jusqu'à 12% sans être dépendante du taux de fines incorporées. Pour le ciment C2, les résistances à la flexion sont nettement améliorées en relation linéaire avec le taux de fines dans le sable concassé. Pour 15% de fines, cette amélioration atteint 29, 27, 21 et 18% respectivement à 2, 7, 28 et 90 jours. Dans un mortier confectionné avec le ciment C3 contenant de la pouzzolane naturelle, l'effet des fines n'est impressionnant qu'au jeune âge (2 jours) alors qu'après leur présence ne contribue que de 5 à 10% d'amélioration. Comme pour le cas de la compression, les fines de sable sont plus bénéfiques avec les ciment ordinaire ou avec les ciment composé avec des taux modérés d'addition minérale comme c'est le cas du ciment C2. (Bexing et *al.*, 2009)

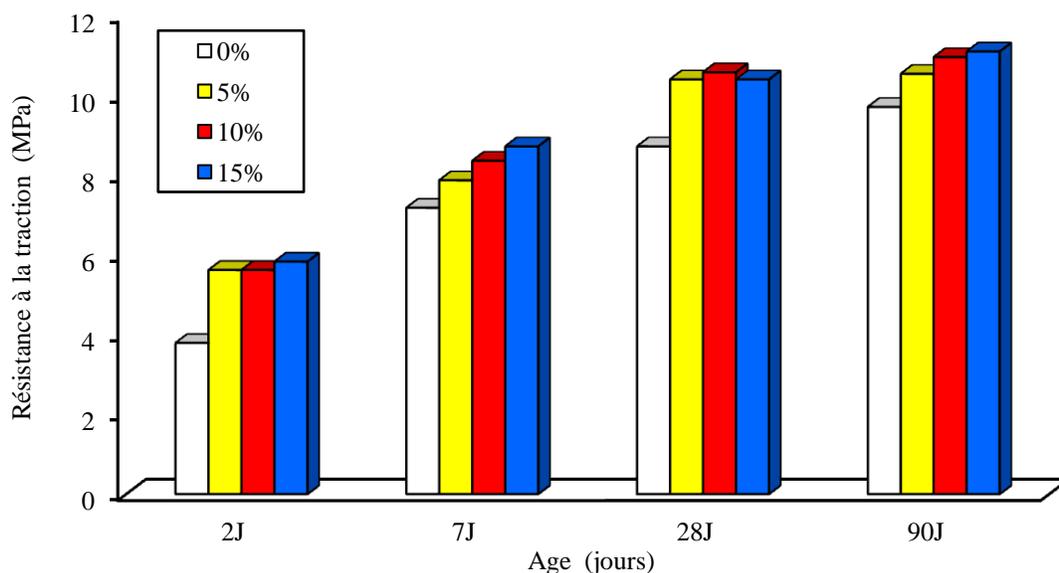


Figure 5.1: Développement de la résistance à la flexion des mortiers à base de ciment C1 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

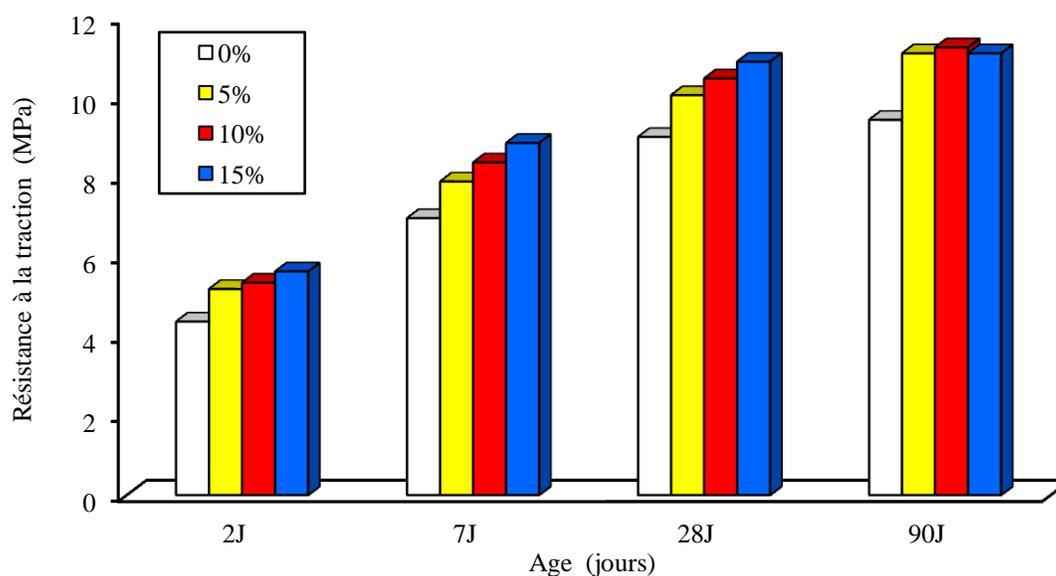


Figure 5.2: Développement de la résistance à la flexion des mortiers à base de ciment C2 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

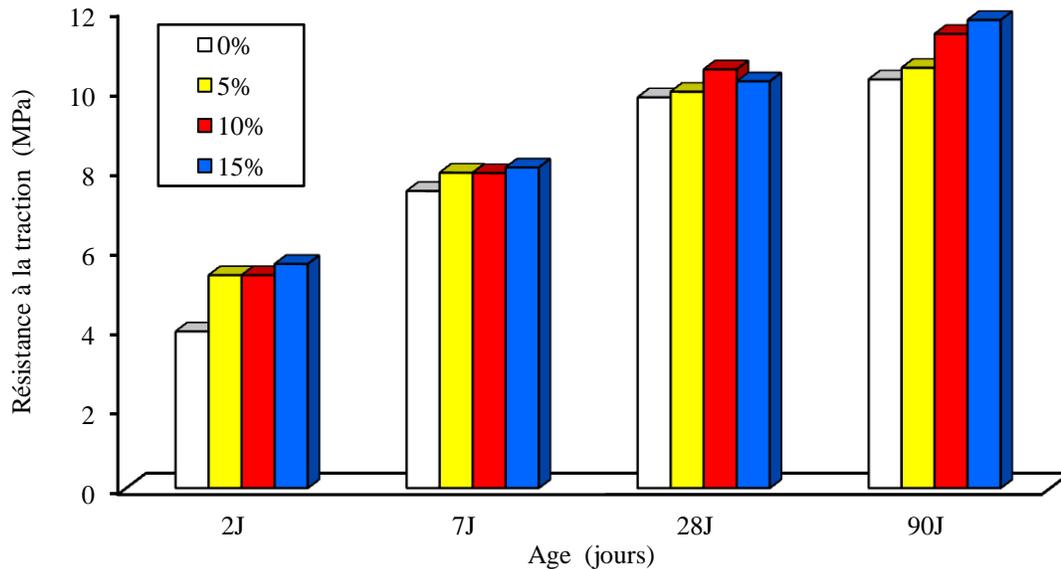


Figure 5.3: Développement de la résistance à la flexion des mortiers à base de ciment C3 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

5.2.1. Résistance à la compression

Le développement de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines contenues dans le sable de concassage avec les différents types de ciment utilisés est illustré sur les figures 5.4, 5.5 et 5.6. D'après ces figures, on constate que la résistance à la compression augmente avec l'âge pour les mortiers avec et sans fines, en raison du développement de l'hydratation du ciment.

Pour les mortiers confectionnés avec le ciment C1, on remarque, à l'âge de 2 jours sur la figure 5.4, que la résistance à la compression des mortiers avec 5%, 10% et 15% de fines augmente par rapport au mortier de référence. Cette augmentation est respectivement de l'ordre de 42.1, 45.3 et 57.2%. Cette amélioration reste très marquée au jeune âge et qui diminue au cours de l'âge des éprouvettes pour atteindre à 90 jours des augmentations de 3.1, 9.5, 22.8% respectivement pour les mêmes taux utilisés. Ces fines gardent un effet identique à celui des fines calcaires substituant le ciment ordinaire et jouent un rôle de filler au jeune âge leur permettant de combler les vides entre les grains, accélérer l'hydratation du ciment et ainsi améliorer ses résistances (Hebboube *et al.*, 2011 ; Kou *et al.*, 2009 ; Kim *et al.*, 1997). Along terme, son effet est diminué causé par l'effet de dilution caractérisé par un ciment plus actif et une poudre inerte et sans réaction chimique significative.

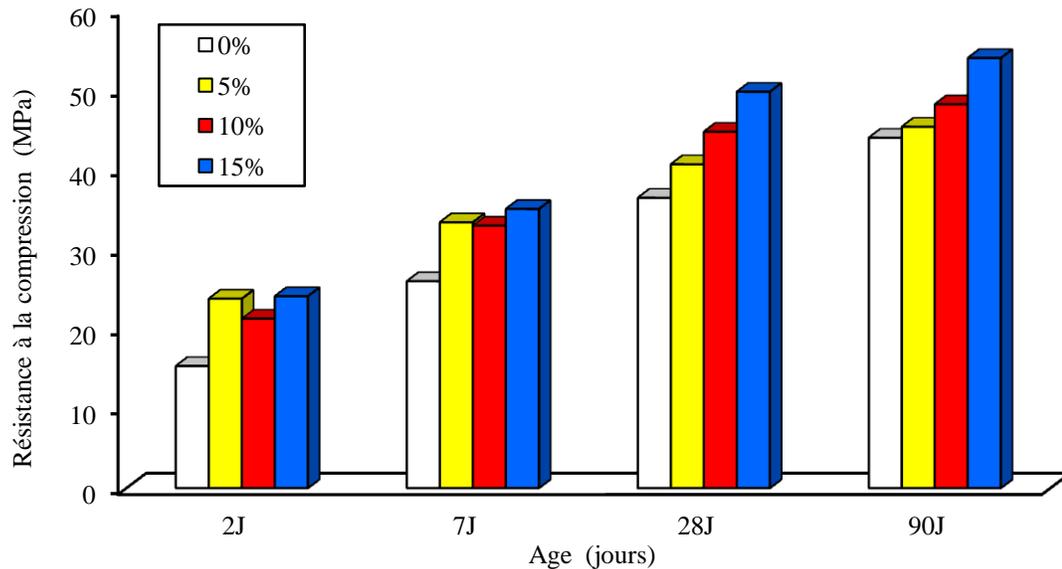


Figure 5.4: Développement de la résistance à la compression des mortiers à base de ciment C1 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

Pour les mortiers de ciment C2 à base de ciment au calcaire, la figure 5.2 montre un effet bénéfique d'un sable riche en poudre fines autour d'un pourcentage optimale de 10%. Ce taux est plus marqué au-delà d'un âge de 7 jours et atteint une amélioration de la résistance à la compression de 24.9, 42, 25.2 et 18 % respectivement à des âges de 2, 7, 28 et 90 jours. Il semble que le ciment C2 riche en fines de calcaire est saturée et ne permet pas plus de 10% de leur présence dans le sable de concassage. De ceci, les sables présentant des taux élevés de fines ne seront pas tolérés avec ce type de ciment et serait souhaitable de diminuer leur présence dans les carrières ou procéder à un lavage pour les évacuer.

Les résultats relatifs au ciment C3 à base de pouzzolane naturelle sont illustrés sur la figure 5.3. La combinaison des fines présentes dans le sable de concassage et la pouzzolane naturelle entraîne une amélioration des résistances à la compression de 30% à 28 jours d'âge lorsque leur taux dépasse les 10%. A 90 jours, cette amélioration reste modéré et avoisine les 10% pour les différents taux utilisés. Ces poudres fines ont contribué positivement avec la pouzzolane à activer les grains de ciment et à compléter la distribution granulaire de la mixture. Ceci a été concrétisé par une élévation des résistances à la compression avec le pourcentage incorporé (Kenai et *al.*, 2004).

La présence des fines calcaire dans le sable de concassage s'avère avoir un effet très positif sur les résistances à la compression. Néanmoins, leurs taux doit être limité à 10% pour les ciments composé et semble n'avoir aucune limite pour les ciments ordinaire.

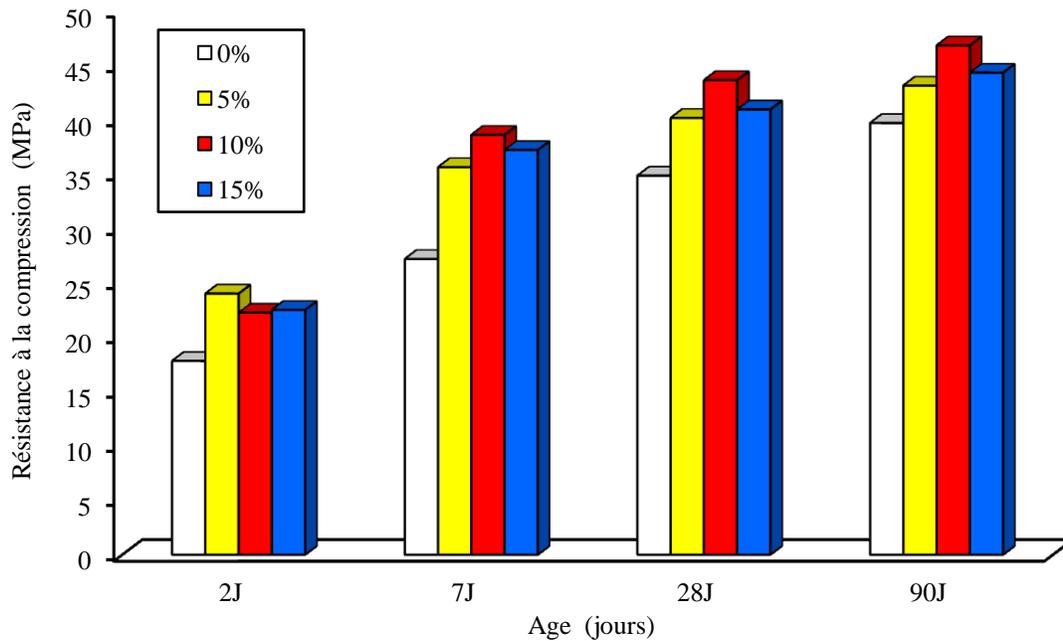


Figure 5.5: Développement de la résistance à la compression des mortiers à base de ciment C2 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

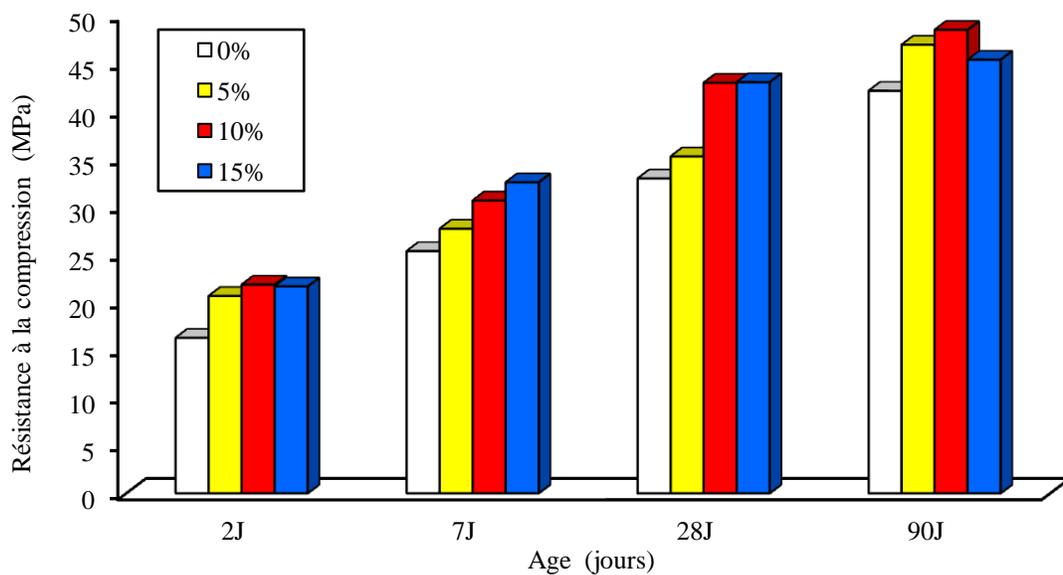


Figure 5.6: Développement de la résistance à la compression des mortiers à base de ciment C3 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

5.2.3. Evolution des propriétés mécaniques

Les tableaux 5.1 et 5.2 montrent la variation des rapports R_t/R_{28} représentant l'effet de l'âge et $R(\%)/R(0\%)$ représentant l'effet des fines de sable de concassage. On constate que le développement de la résistance à la compression au jeune âge est plus rapide pour les ciments C2 et C3. Ces résultats sont en accord avec plusieurs études (Hadj sadok, 2004 ; Merghoub, 2004). En ajoutant des fines de sable le ciment C2 semble le plus activé et ses résistances sont plus développées et représentent à 7 jours 90% de celle de 28 jours. A long terme, le ciment C3 développe mieux les résistances à cause son effet pouzzolanique enclenché tardivement et cause un gain de 27.8%. Avec 5% de fines ce gain atteint 33.2%. En augmentant davantage de taux de fines, le gain de résistance à long terme s'affaiblit et n'est que de 13 et 6 % respectivement pour un taux de fines de 10 et 15%. Les ciments C1 et C2 développent moins de résistance au-delà de 28 jours avec et sans fines. Cette constatation est appuyée par le rôle filler des fines de sables qui ne participent qu'au jeune âge avec un apport de nucléation et de fermeture des pores laissés par l'hydratation du ciment.

5.3. Propriétés d'hydratation

5.3.1. Chaleur d'hydratation

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

D'après les résultats obtenus sur les figures 5.7 et 5.8 relatifs à l'hydratation du ciment C1, on s'aperçoit que la chaleur dégagée pour un mortier confectionné avec un sable de concassage contenant 5% de fines suit une allure similaire à celle d'un sable sans fines. Par contre, la présence de sable de concassage riche en matière fine (>10%) attribue une accélération au très jeune âge et une stabilisation après 48 heures. A long terme, la chaleur finale dégagée reste peu dépendante de la qualité du sable de concassage malgré que la présence des fines garde toujours une faveur marginale.

Tableau 5.1: Variations des rapports R_{tj}/R_{28j} et $R(\%)/R(0\%)$ en fonction de l'ajout calcaire de la résistance à la compression

	Résistance à la compression MPa				Résistance (t)/Résistance (28) %				Résistance (%)/Résistance (0%) %			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Ciment C1												
2j	15.31	21.75	22.25	24.06	42.1	53.6	49.8	48.4	100.0	142.1	145.3	157.2
7j	25.94	32.33	32.91	35	71.3	79.6	73.7	70.4	100.0	124.6	126.9	134.9
28j	36.4	40.6	44.68	49.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	111.5	122.7	136.5
90j	43.93	45.31	48.12	53.93	120.7	111.6	107.7	108.5	100.0	103.1	109.5	122.8
Ciment C2												
2j	17.81	24	22.25	22.5	51.1	59.8	51.0	55.0	100.0	134.8	124.9	126.3
7j	27.18	35.62	38.59	37.2	78.0	88.7	88.5	90.9	100.0	131.1	142.0	136.9
28j	34.84	40.15	43.62	40.93	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	115.2	125.2	117.5
90j	39.68	43.12	46.81	44.31	113.9	107.4	107.3	108.3	100.0	108.7	118.0	111.7
Ciment C3												
2j	16.25	20.62	21.81	21.62	49.4	58.6	50.8	50.3	100.0	126.9	134.2	133.0
7j	25.31	27.65	30.6	32.5	76.9	78.6	71.3	75.7	100.0	109.2	120.9	128.4
28j	32.9	35.2	42.9	42.96	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	107.0	130.4	130.6
90j	42.06	46.87	48.43	45.31	127.8	133.2	112.9	105.5	100.0	111.4	115.1	107.7

Tableau 5.2: Variations des rapports R_{tj}/R_{28j} et $R(\%)/R(0\%)$ en fonction de l'ajout calcaire de la résistance à la traction

	Résistance à la traction MPa				Résistance (t)/Résistance (28) %				Résistance (%)/Résistance (0%) %			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Ciment C1												
2j	3.79	5.62	5.62	5.83	43.5	54.0	53.1	56.1	100.0	148.3	148.3	153.8
7j	7.18	7.87	8.36	8.72	82.3	75.7	79.0	83.8	100.0	109.6	116.4	121.4
28j	8.72	10.4	10.58	10.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	119.3	121.3	119.3
90j	9.71	11.54	10.96	11.1	111.4	111.0	103.6	106.7	100.0	118.8	112.9	114.3
Ciment C2												
2j	4.36	5.18	5.34	5.62	48.4	51.5	51.0	51.6	100.0	118.8	122.5	128.9
7j	6.96	7.88	8.36	8.85	77.3	78.4	79.8	81.3	100.0	113.2	120.1	127.2
28j	9	10.05	10.47	10.89	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	111.7	116.3	121.0
90j	9.43	11.1	11.25	11.1	104.8	110.4	107.4	101.9	100.0	117.7	119.3	117.7
Ciment C3												
2j	3.93	5.34	5.34	5.62	40.1	53.7	50.9	55.1	100.0	135.9	135.9	143.0
7j	7.45	7.91	7.9	8.04	76.0	79.6	75.2	78.8	100.0	106.2	106.0	107.9
28j	9.8	9.94	10.5	10.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	101.4	107.1	104.1
90j	10.25	10.54	11.39	11.74	104.6	106.0	108.5	115.1	100.0	102.8	111.1	114.5

La figure 5.8 montre l'effet positif de la présence des fines au-delà de 5% où le dégagement de chaleur devient plus important caractérisé par des courbes plus ascendantes. Après 12 heures d'hydratation, 15% de fines calcaires contenues dans le sable de concassage engendrent 66% d'élévation de la chaleur dégagée. Ceci reste valable jusqu'à l'âge de 120 heures où la chaleur dégagée prend une variation linéaire avec la teneur en fines calcaires avec un faible accroissement qui avoisine seulement 5%.

Le ciment C1 considéré comme ordinaire voit sa chaleur chuter lorsqu'on le malaxe avec un sable contenant 5% de fines calcaires. Le sable doit contenir un taux de fines plus important pour qu'on puisse déclencher une chaleur additionnelle remarquable. L'utilisation d'un sable riche en matière fines est très favorable à l'hydratation au jeune âge où l'effet synergique et de nucléation de ces fines est plus efficace.

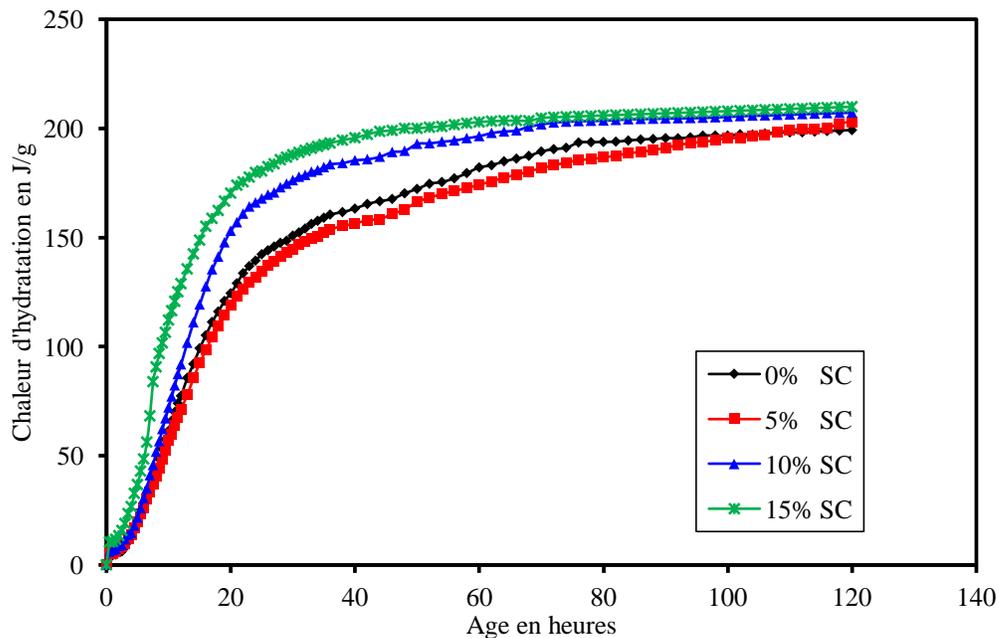


Figure 5.7: Développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C1 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

Les chaleurs d'hydratation dégagées par les différents mortiers confectionnés avec le ciment C2 sont illustrées sur les figures 5.9 et 5.10. Il s'avère que la qualité de sable et en particulier sa teneur en fines calcaires attribue une nette variation entre les différentes courbes observées sur la figure 5.9. Une teneur de 5% de fines dans le sable déclenche une chaleur additionnelle dès les premières 12 heures. A cet âge, la figure 5.10 met en évidence une variation quasi-linéaire entre la chaleur dégagée et la teneur en fines où chaque 5% de fines

engendre une élévation de chaleur près de 25%. Ce rapport décroît avec l'avancement de l'hydratation du ciment pour se stabiliser autour de 7.5% d'accroissement pour chaque 5% de fines.

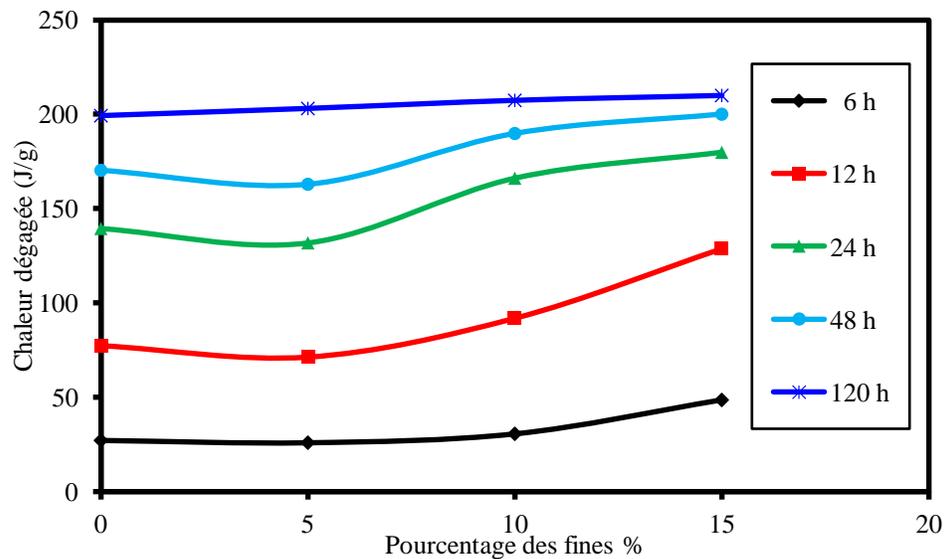


Figure 5.8: Effet de la teneur des fines dans le sable de concassage sur le développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C1.

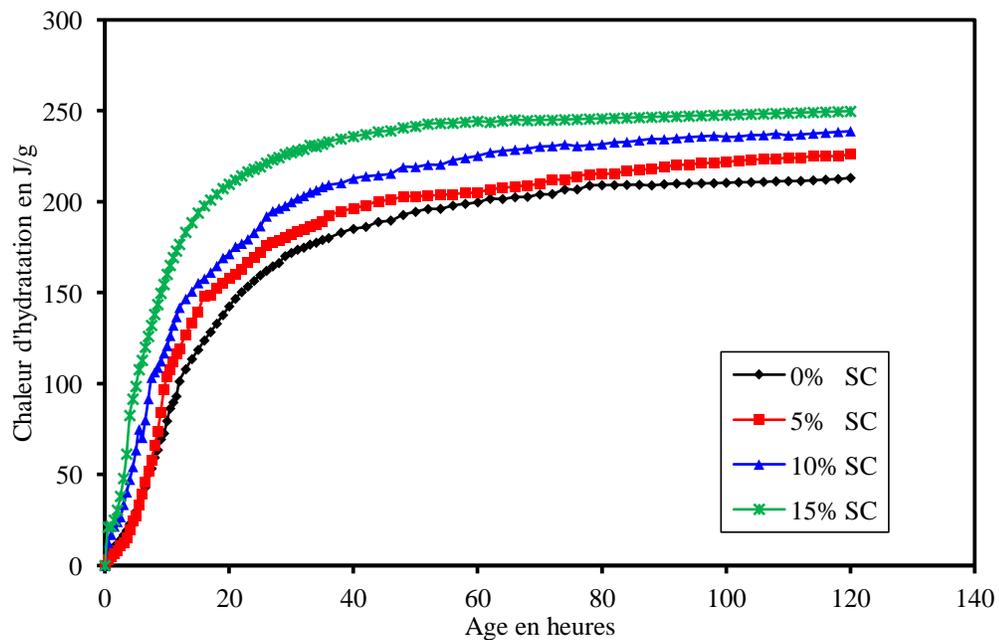


Figure 5.9: Développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C2 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

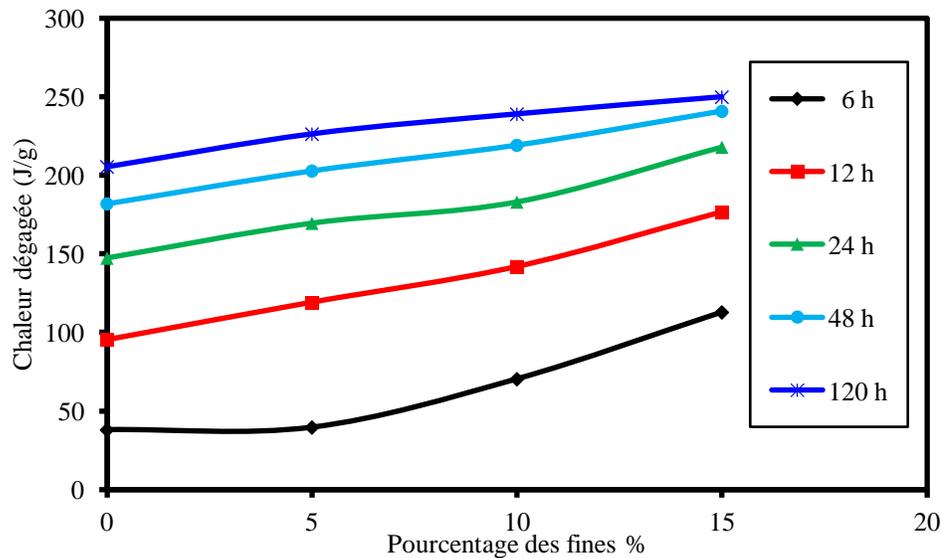


Figure 5.10: Effet de la teneur des fines dans le sable de concassage sur le développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C2.

Le ciment C2 à base de calcaire est très sensible à la présence des fines dans le sable de concassage. Ces fines viennent s'ajouter aux fillers et contribuent à la création de nouveaux sites de nucléation ce qui favorise l'hydratation des grains de ciment et génère une chaleur supplémentaire. Cette chaleur garde une variation linéaire avec la teneur en poudre fine que contient le sable (Thongsanitgarn et *al.*, 2014).

Lorsque le ciment C3 composé de pouzzolane naturelle est utilisé pour la confection des mortiers avec un sable de concassage, il génère, au jeune âge, des chaleurs d'hydratation comparables tant que le sable ne contient pas plus de 10% de fines. Par contre la présence d'un sable contenant 15% de fines, entraîne une accélération de l'hydratation des grains de ciment suivie par un dégagement remarquable dès le contact avec l'eau de gâchage. Juste après 12 heures d'hydratation, la figure 5.11 illustre une évolution de la chaleur dégagée spécifique pour chaque type de sable. Après 120 heures, le ciment confectionné avec un sable contenant 0, 5, 10 et 15% de fines génère respectivement une chaleur de 192, 203, 206 et 218 J/g.

La figure 5.12 montrent l'effet direct du pourcentage des fines dans le sable sur le dégagement de chaleur. Au jeune âge, il faut une présence de 15% de fines pour que la chaleur soit modifiée, par contre à long terme l'effet devient linéaire et proportionnel à la présence de ces fines. A cet âge, chaque 5% de fines engendre une augmentation de 5% de chaleur. En

présence du ciment C3, la combinaison des fines de calcaire avec la pouzzolane naturelle induit un effet synergique un peu tardif pour les faibles taux de fines. Ceci est dû à un effet pouzzolanique du ciment conditionné par la saturation de la solution interstitielle de chaux qui gouverne l'enclenchement de cette réaction. Il est évident que cette condition devient moins nécessaire si le sable est riche en matières fines.

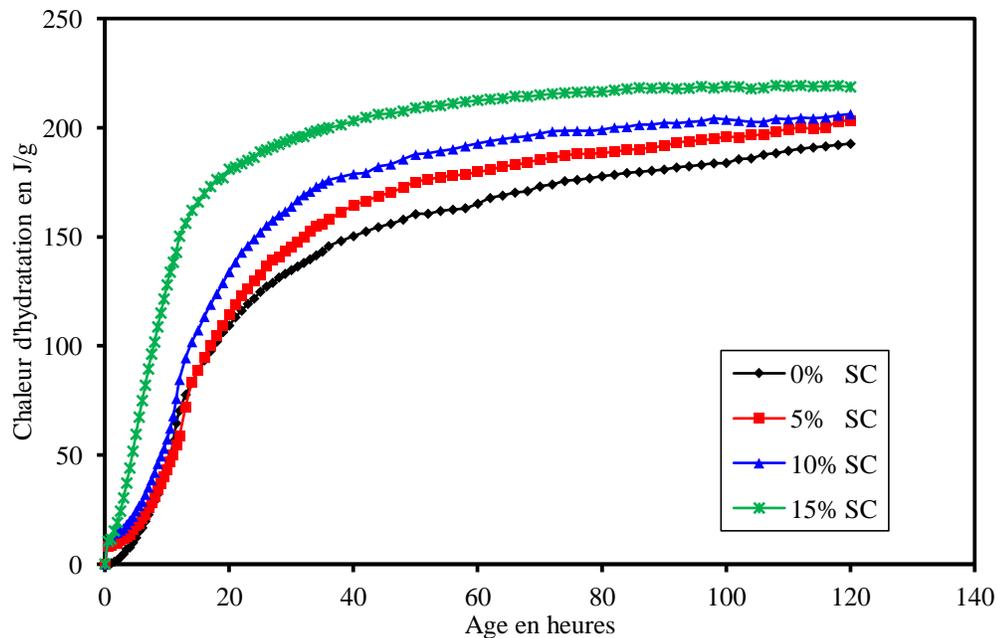


Figure 5.11: Développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C3 pour différents taux de fines dans le sable de concassage.

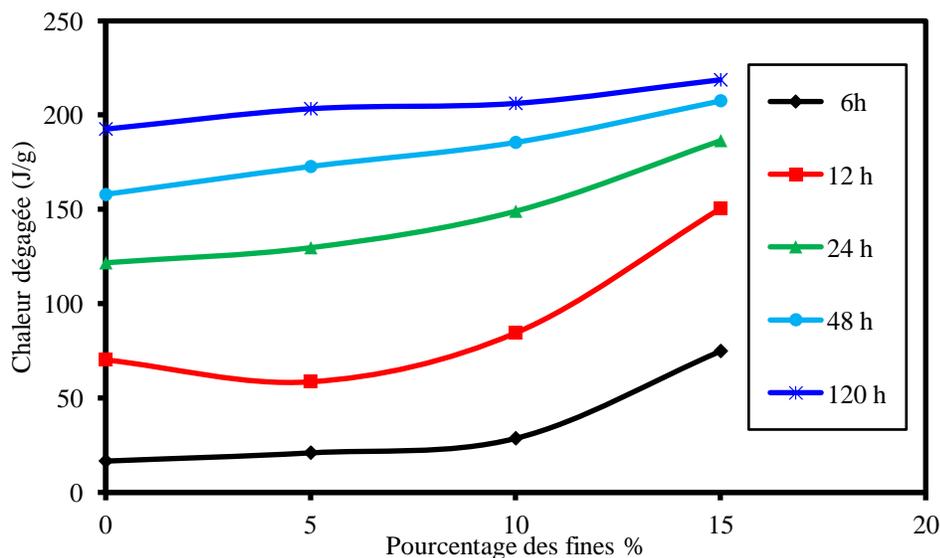


Figure 5.12: Effet de la teneur des fines dans le sable de concassage sur le développement de la chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment C3.

5.3.2. Flux de chaleur

L'étude du flux thermique au cours du temps par calorimétrie permet de suivre l'évolution de l'hydratation des constituants. La chaleur d'hydratation dégagée dans sa courbe la plus classique peut être représentée par une vitesse de dégagement de chaleur afin d'identifier les différentes étapes de la réaction ciment-eau. En utilisant les résultats obtenus des chaleurs d'hydratation, on peut représenter le flux dégagé par un simple rapport de l'incrément de chaleur sur le pas de temps correspondant. Les figures 5.13, 5.14 et 5.15 illustrent les résultats obtenus où il paraît clairement les différentes phases de l'hydratation.

Les courbes du flux thermique rendent certains l'effet significatif de la qualité du sable de concassage sur l'hydratation des trois types de ciments. Même, si chaque ciment garde sa spécificité, il reste sensible à la teneur en fines dans les sables concassés. Les valeurs du second pic et les temps de son apparition sont caractéristiques pour l'hydratation du ciment et les modifications apportées par les fines du sable. Le tableau 5.3 récapitule les valeurs des pics enregistrées et les temps de leurs apparitions.

Tableau 5.3 : Valeurs du flux de chaleur du second pic et son temps de parution pour les différentes compositions de mortiers

Type de ciment	Ciment C1				Ciment C2				Ciment C3			
% des fines	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Flux J/g/h	8.28	7.30	10.32	13.38	9.53	13.26	12.11	18.80	8.94	6.28	9.31	12.56
Temps (h)	12	11.5	11.5	10.5	10	10	9.5	8.5	11.5	14	12	9.5

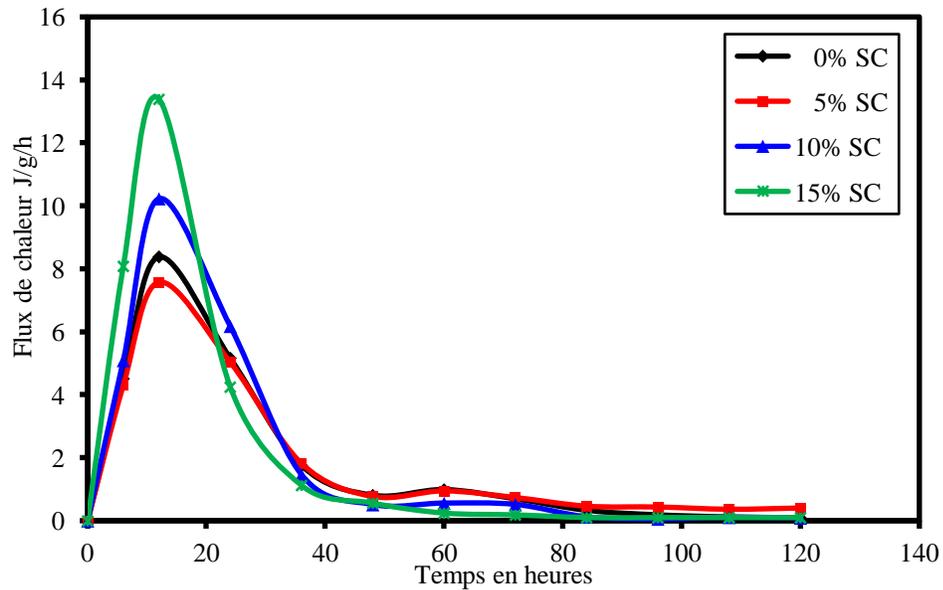


Figure 5.13: Flux de chaleur dégagée pour un ciment C1 en présence d'un sable de concassage avec différents pourcentage de fines

Pour les trois types de ciments, le sable contenant plus de fines (15%) est plus influent sur la valeur du second pic. Sa valeur est augmentée de plus de 61% pour le ciment C1, 91% pour le ciment C2 et 41 % pour le ciment C3. L'apparition de ce pic est ressentie beaucoup plus avec les ciments composés C2 et C3 marquée par une accélération de l'hydratation. Il est bien visible que le ciment C2 à base de calcaire achève son hydratation plus tôt que les autres ciments, sa chaleur cesse dès l'âge de 60 heures. Les autres ciments continuent de dégager une faible chaleur jusqu'à la fin de l'essai.

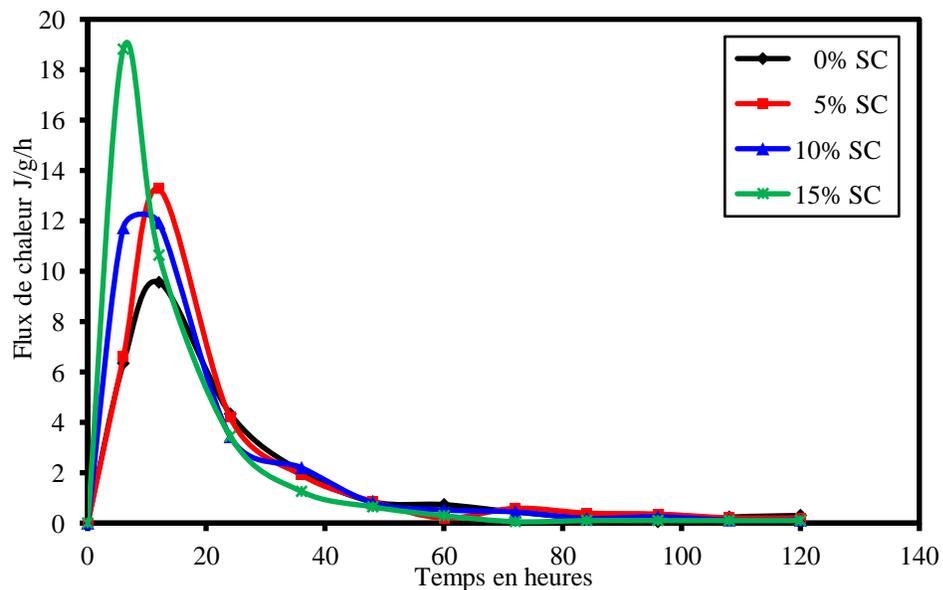


Figure 5.14: Flux de chaleur dégagée pour un ciment C2 en présence d'un sable de concassage avec différents pourcentage de fines.

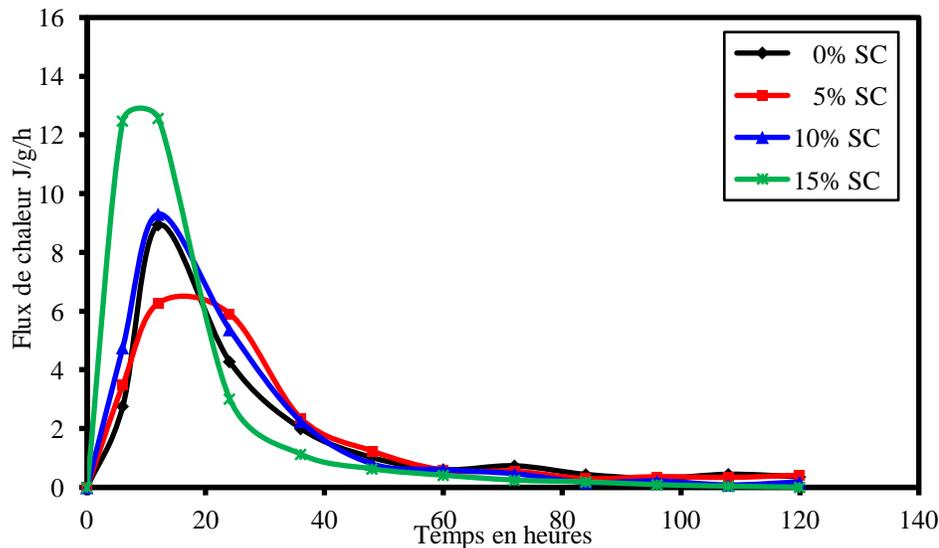


Figure 5.15: Flux de chaleur dégagée pour un ciment C3 en présence d'un sable de concassage avec différents pourcentage de fines.

5.4. Durabilité

5.4.1. Résistance aux sulfates

Afin d'avoir des mortiers performants pouvant résister aux agressions extérieures, on doit effectuer des testes d'expansion dans des solutions sulfatées. Ces sulfates sont souvent présentes dans l'eau de mer, les eaux souterraines, les eaux usées et dans certains sous-produits industriels. Les résultats présentés sur les figures 5.16, 5.17 et 5.18 récapitulent l'évolution de l'expansion de chaque mortier lorsqu'il est immergé dans une solution contenant 5% de Na_2SO_4 .

Les mortiers à base de ciment ordinaire présentent une expansion rapide qui se stabilise au bout de 6 mois d'immersion. La figure 5.16 montre clairement que l'excès de fines calcaire dans le mortier favorise l'expansion contrairement au sable contenant de faibles proportions. Les mortiers confectionnés par un sable contenant 5 ou 10 % de fines conservent bien leurs dimensions et ne présentent que de faibles expansions pendant près de trois mois d'immersion. Après, leurs expansions augmentent rapidement et se rapprochent de celle d'un sable sans fines ajoutées. Après une année d'observation, 15% de fines dans le sable de concassage engendre une hausse de 10% d'expansion par contre 5 ou 10% de fines la réduisent de 10%.

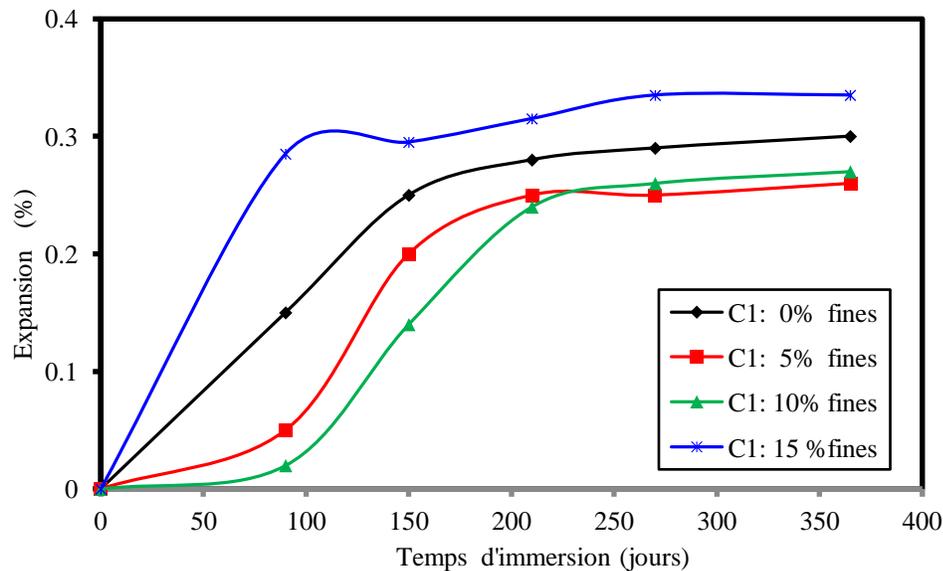


Figure 5.16: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C1 et du sable de concassage immergé dans 5% Na_2SO_4

Lorsque le mortier est confectionné avec un ciment à base de calcaire, les fines calcaires contenues dans le sable de concassage possèdent une influence considérable sur l'expansion enregistrée. La figure 5.17 montre une progression monotone de l'expansion avec un effet très positif des fines. Après une année d'exposition, les mortiers contenant 5,10 et 15% de fines présentent une réduction de l'expansion respectivement de 10, 30 et 70% par rapport à celle d'un mortier de référence sans fines ajoutées. Ces fines présentes dans le sable vont s'ajouter aux fines du ciment pour former une barrière contre la pénétration des sulfates. Leurs finesses et leur pouvoir accélérant de l'hydratation sont des apports positifs au mortier pour acquérir cette performance.

La figure 5.18 présente l'évolution de l'expansion des mortiers à base de pouzzolane naturelle. Le taux de fines contenu dans le sable de concassage garde un effet négatif pendant près de trois mois où l'expansion est doublée lorsque les sable ayant 10 et 15% de fines sont utilisés. Ensuite, l'effet des fines s'inverse et une réduction considérable de l'expansion est enregistrée. L'effet du taux utilisé ne semble avoir aucun effet où 40% de réduction est observée indépendamment du taux de fines présent dans le sable de concassage.

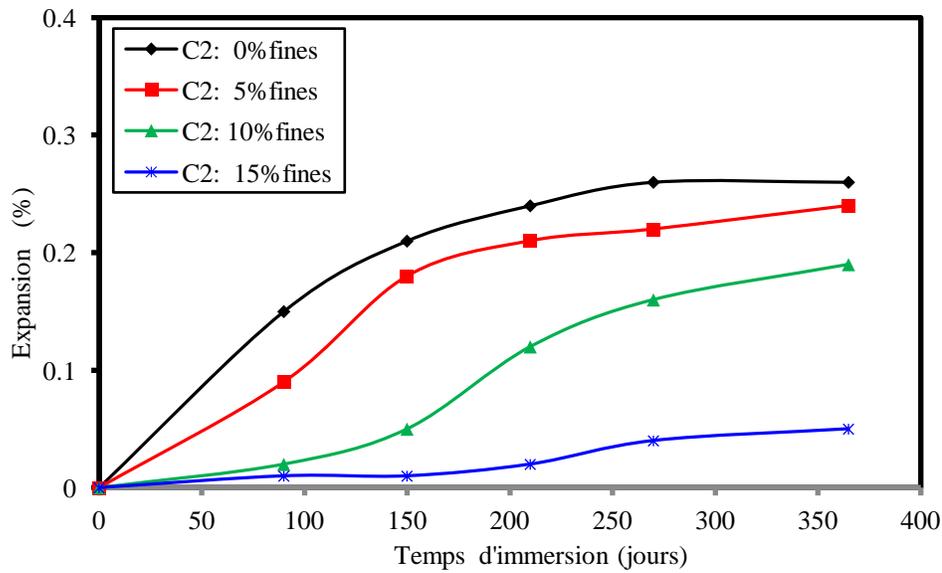


Figure 5.17: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C2 et du sable de concassage immergé dans 5% Na₂SO₄

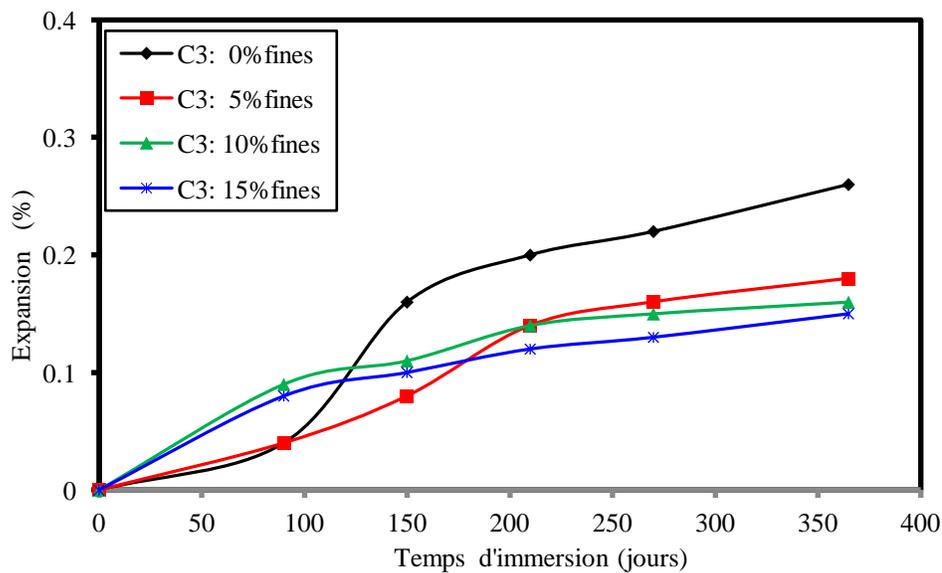


Figure 5.18: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C3 et du sable de concassage immergé dans 5% Na₂SO₄

Des constatations similaires ont été observées sur les figures 5.19, 5.20 et 5.21, lorsque les mortiers sont immergés dans une solution de 5% $MgSO_4$. Le mortier avec un ciment ordinaire (C1) est très influencé la présence des fines dans le sable concassé. Cet effet très favorable pour réduire l'expansion au jeune âge. A long terme, la forte présence de fines conduit à une expansion excessive dépassant celle d'un mortier sans fine de 45%. Ce résultat est reproduit lorsque le mortier est fabriqué avec un ciment au calcaire (C2) avec hausse de l'expansion variant entre 13 et 50%. Ces résultats sont en accord avec ceux de Pipilikali et *al.* (2009).

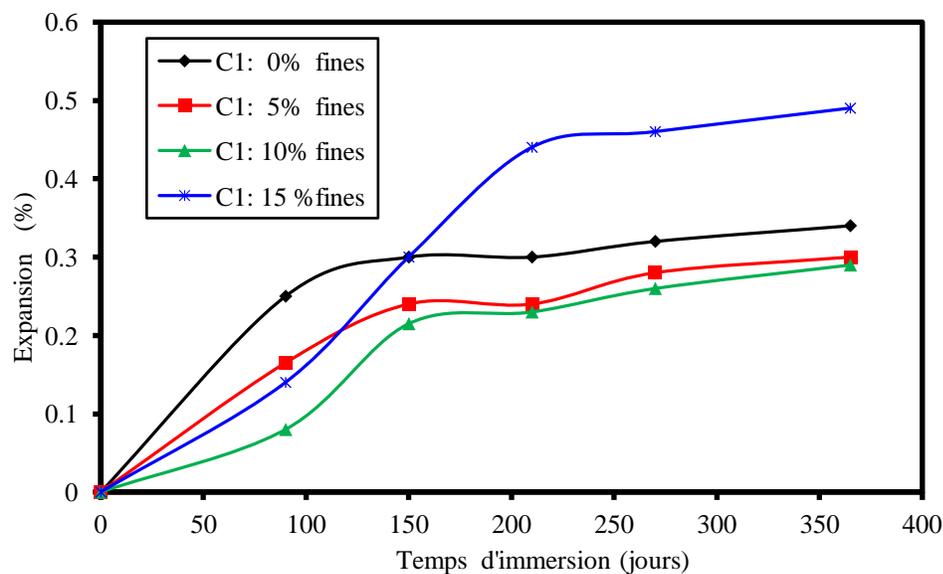


Figure 5.19: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C1 et du sable de concassage immergé dans 5% $MgSO_4$

Lorsque le ciment est fabriqué à base de pouzzolane naturelle (C3), son expansion dans une solution de $MgSO_4$ est très sensible à la présence des fines calcaires dans le sable de concassage. La réduction est nettement observée, sur la figure 5.21, dès le jeune âge et reste monotone et peu influencée par le taux de fines contenues dans le sable. La combinaison des fines calcaires et de la pouzzolane naturelle conduit à une pâte dense et moins poreuse pour empêcher la pénétration de sulfates à l'intérieur.

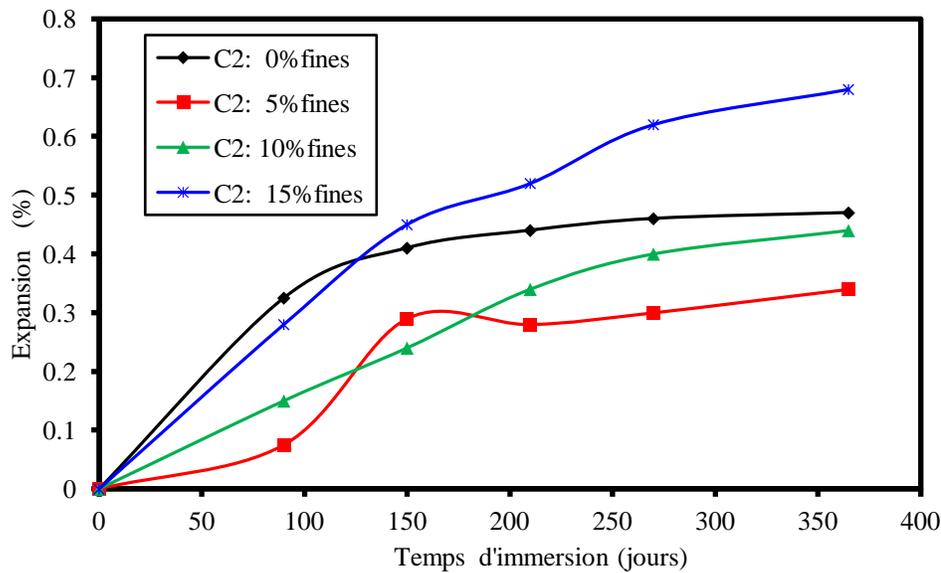


Figure 5.20: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C2 et du sable de concassage immergé dans 5% MgSO₄

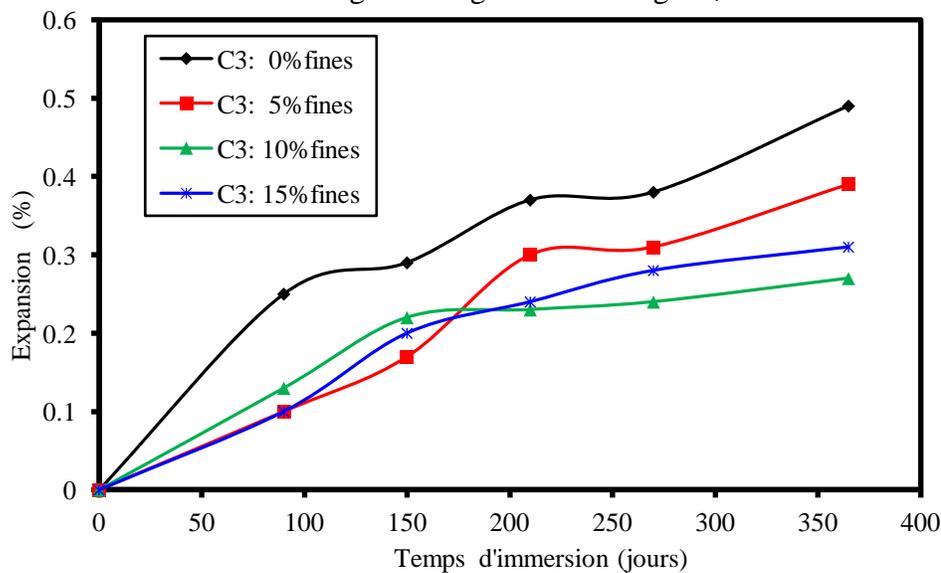


Figure 5.21: Evolution de l'expansion du mortier à base de ciment C3 et du sable de concassage immergé dans 5% MgSO₄

5.4.2. Résistance aux acides

Les bétons et les mortiers peuvent être soumis à des conditions environnementales agressives. C'est le cas notamment des constructions agricoles, des installations industrielles ou des égouts qui peuvent générer des attaques par différents types d'acides (acide sulfurique, nitrique, phosphorique, acétique, lactique, ...). L'attaque du béton par les acides comprend un ensemble de processus complexes qui entraînent une réduction des propriétés physiques et

mécaniques du matériau. Le béton est un matériau basique susceptible d'être attaqué par les acides qui réagissent avec les composés calciques du béton et entraînent finalement une dissolution de la structure du ciment durci.

Afin de tester la résistance des mortiers aux milieux acides, les éprouvettes ont été confectionnées avec un sable de concassage avec différents taux de fines puis immergées, à 28 jours d'âge, dans une solution de 1% d'acide chlorhydrique ou 3% d'acide sulfurique pendant de 6 mois. Les figures 5.22, 5.23 et 5.24 montrent une réduction monotone des poids des mortiers avec le temps d'immersion. La présence des sables avec différents taux de fines calcaires cause une augmentation de la perte en poids quelque soit la nature du ciment employé (Celik et *al.*, 1996). Le ciment avec un sable dépourvu de fines se montre plus performant et moins dégradé dans ce milieu acide (Alaa, 2014).

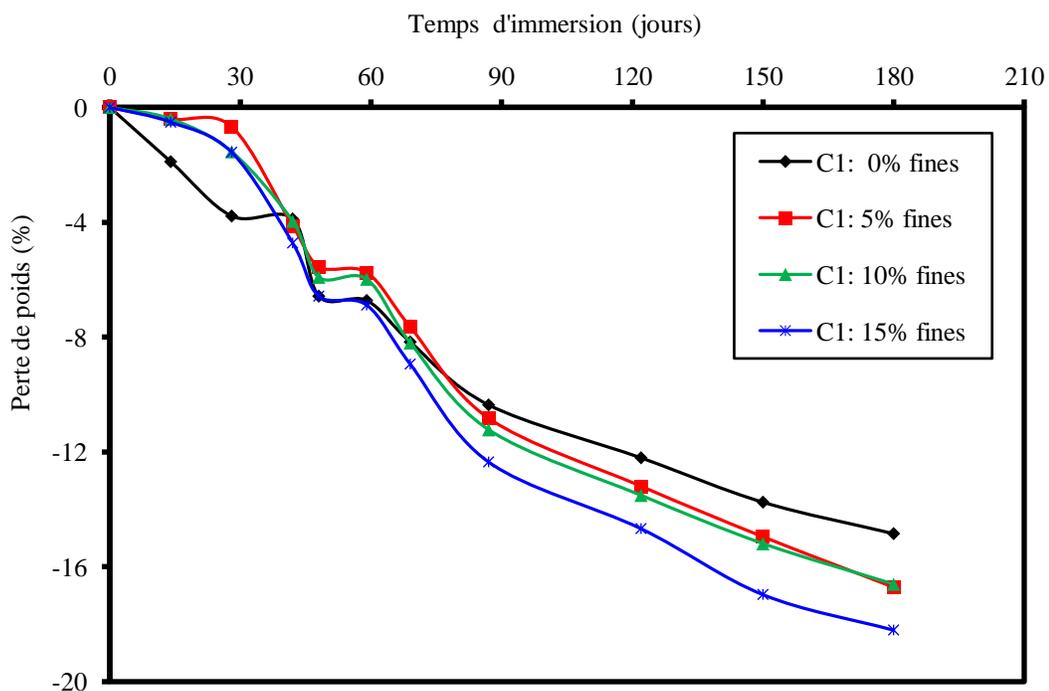


Figure 5.22 : Evolution de la perte de masse du mortier à base de ciment C1 et du sable de concassage immergé dans 1% HCl

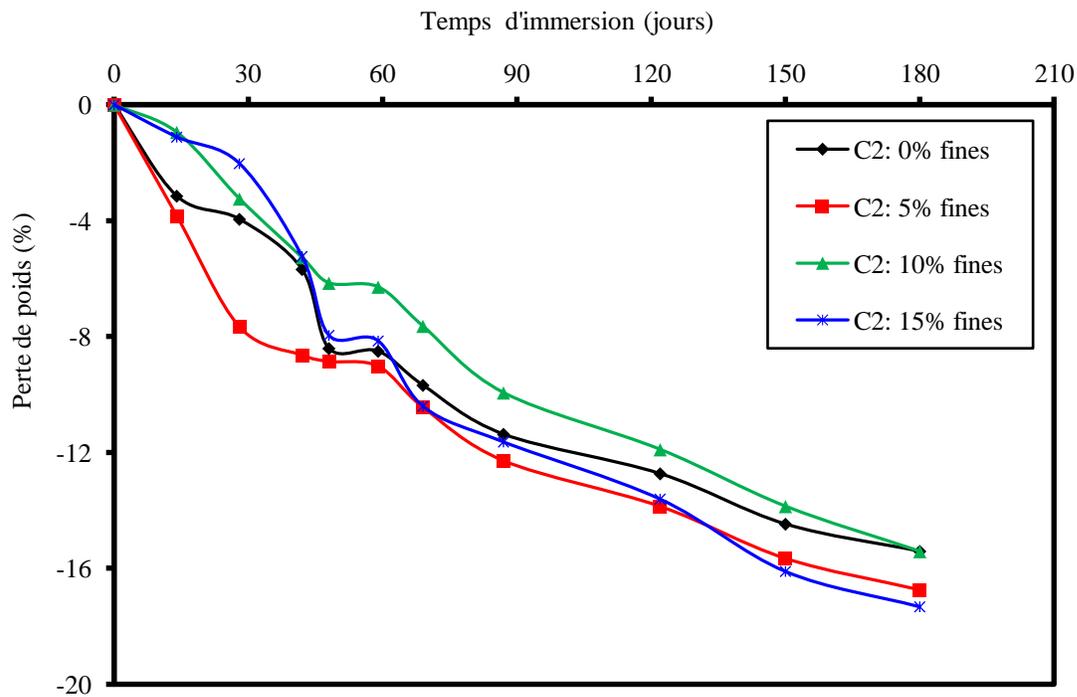


Figure 5.23 : Evolution de la perte de masse du mortier à base de ciment C2 et du sable de concassage immergé dans 1% HCl

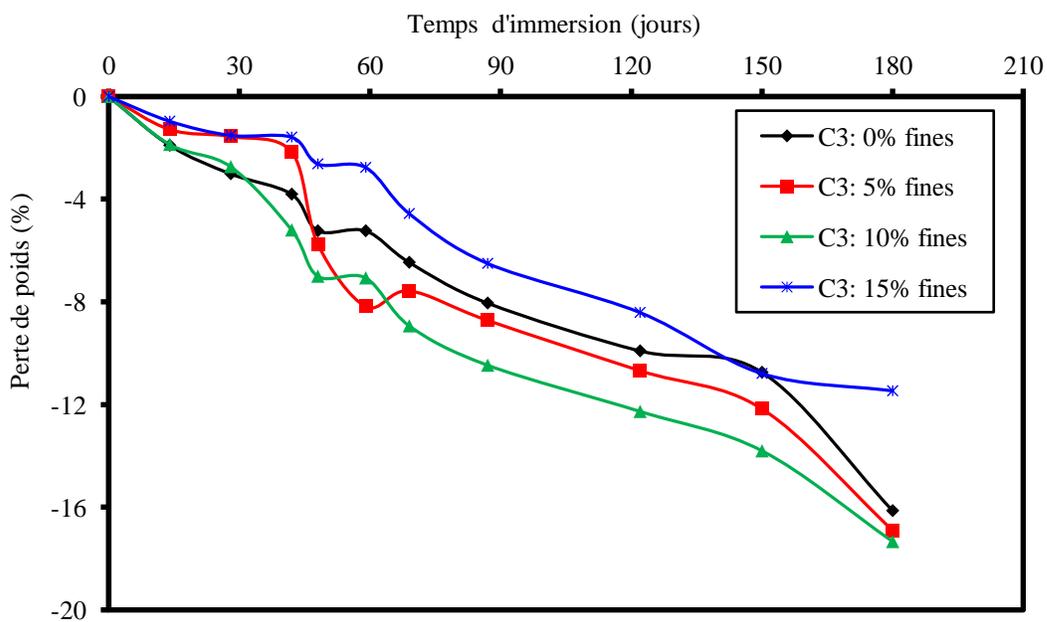


Figure 5.24 : Evolution de la perte de masse du mortier à base de ciment C3 et du sable de concassage immergé dans 1% HCl

Lorsque les mortiers sont exposés à des acides sulfuriques, l'effet de la présence des fines est plus marqué à long terme et plus pour les ciments composés. Le figure 5.25 représente les mesures des poids des éprouvettes de mortiers immergées dans de l'acide sulfurique. Seul le mortier réalisé avec un ciment ordinaire (C1) se dégrade avec les sables riches en fines calcaires. Ceci est très visible sur la figure 5.25 où la perte en poids atteint 10, 12, 14 et 15% respectivement pour les mortiers contenant 0, 5, 10 et 15% de fines. Lorsque le ciment est à base de calcaire (C2) ou de pouzzolane naturelle (C3), l'effet de la présence des fines dans le sable ne semble avoir d'effet d'après 4 mois d'immersion (Chang et *al.*, 2005).

5.5. Effet du type de ciment

Afin de mener une comparaison entre les trois types de ciment utilisés, on a tracé les histogrammes des figures 5.26 à 5.33 des différentes caractéristiques étudiées. Le tableau 5.2 récapitule les principales conclusions trouvées.

Il n'y'a pas d'effet significatif du type de ciment sur la résistance à la flexion. Néanmoins, pour avoir les meilleures résistances on doit utiliser un sable sans fines avec le ciment C3 et contenant 5 à 10% de fines avec le ciment C1 et contenant 15% de fines avec le ciment C2.

Par contre les résistances à la compression s'avèrent plus sensibles au type de ciment utilisé et à sa combinaison avec le type de sable de concassage. La figure 5.27 met en évidence la variabilité des résistances à la compression des différents mortiers à 28 jours. Les ciments deviennent plus performants en résistance à la compression lorsqu'ils sont combinés des sables de concassage convenables. Le ciment C1 développe une meilleure résistance avec un sable contenant 15% de fines. Alors que le mortier à base de ciment C2 nécessite un sable avec 10% de fines seulement. Le mortier à base de ciment C3 à besoin d'un sable riche en fines (>10%) pour développer ses meilleures résistances à la compression.

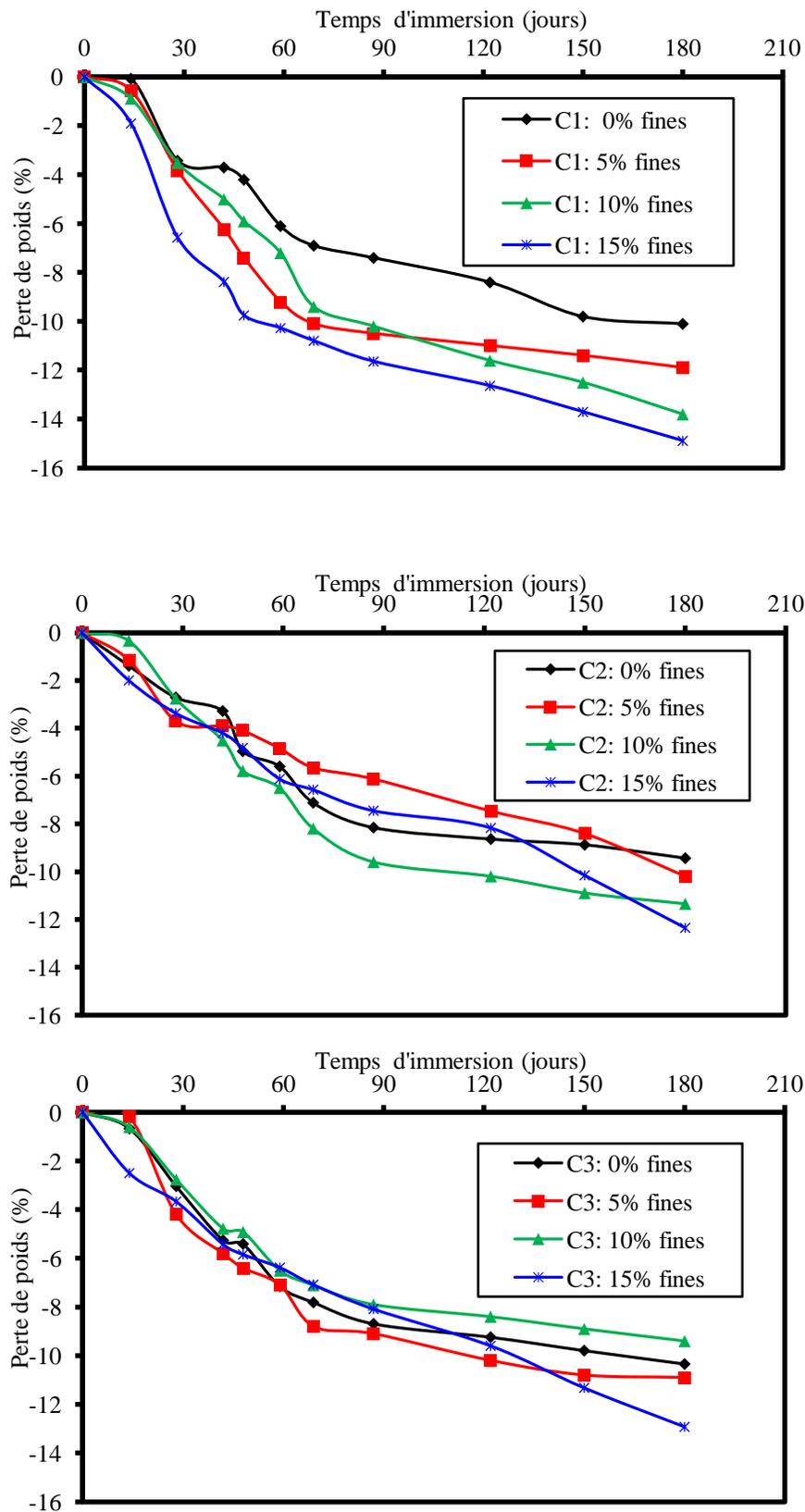


Figure 5.25: Evolution de la perte de masse des mortiers immergés dans 3% H₂SO₄

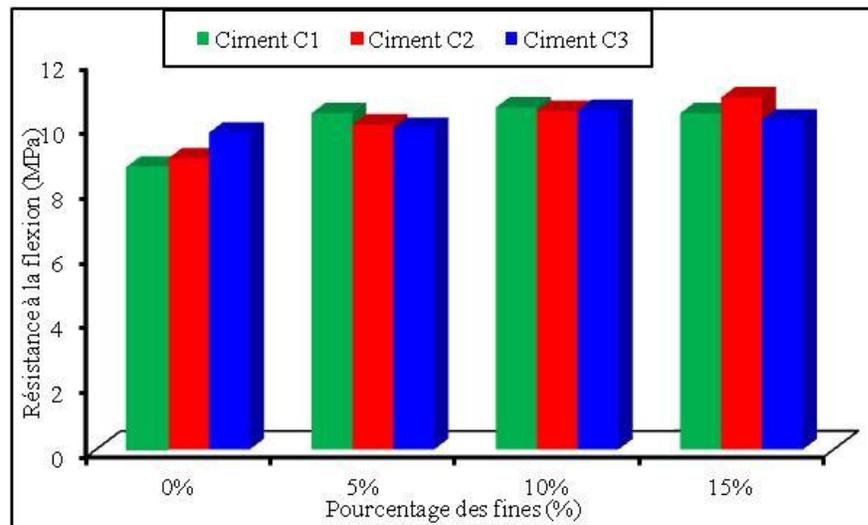


Figure 5.26: Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur La résistance à la flexion (t=28 jours)

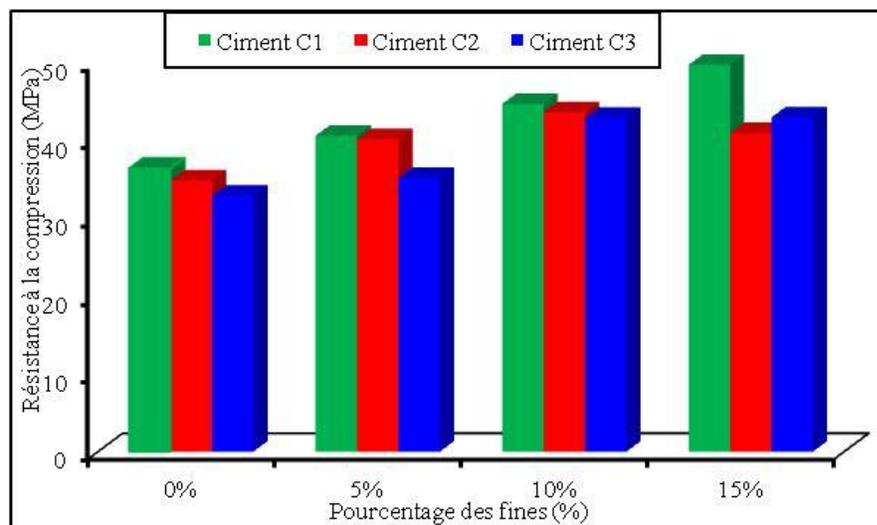


Figure 5.27: Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur La résistance à la compression (t=28 jours)

Les quantités de chaleur d'hydratation dégagées sont strictement liées au type de ciment utilisé. Les figures 5.28 et 5.29 illustrent les valeurs de chaleur enregistrées après cinq jours de mesure. Le ciment C1 est peu influencé par le type de sable utilisé et génère des chaleurs identiques indépendamment du pourcentage de fines dans le sable. La chaleur du ciment C2 augmente linéairement avec le pourcentage des fines et présente le dégagement le plus élevé. Par contre le ciment C3 ne devient sensible qu'avec des sables riche en fines (15%).

Le flux de chaleur possède un effet néfaste sur les caractéristiques du mortier d'où la nécessité de trouver des combinaisons convenables pour le réduire. La figure 5.29 illustre clairement que le ciment C1 et C3 trouvent leur optimum pour un sable contenant 5% de fines. Par contre le flux du ciment C2 atteint sa valeur minimale avec un sable ne contenant aucune proportion de fines.

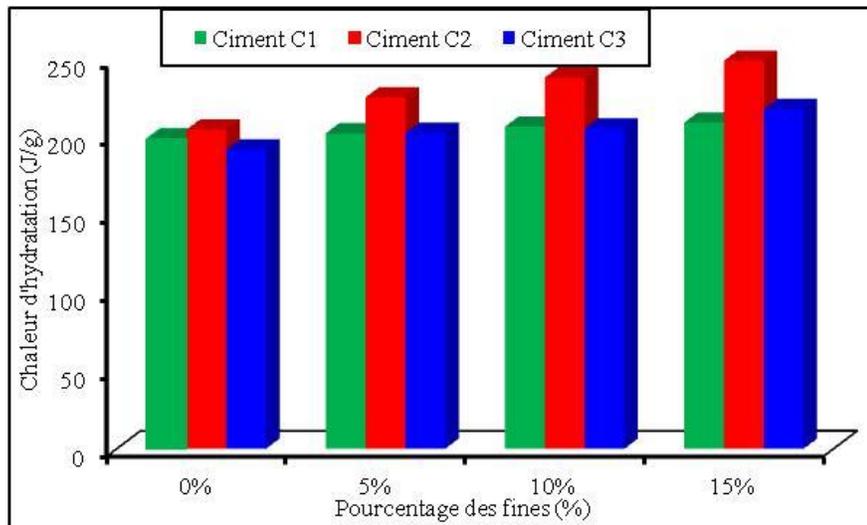


Figure 5.28 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur le dégagement de la chaleur d'hydratation (5 jours).

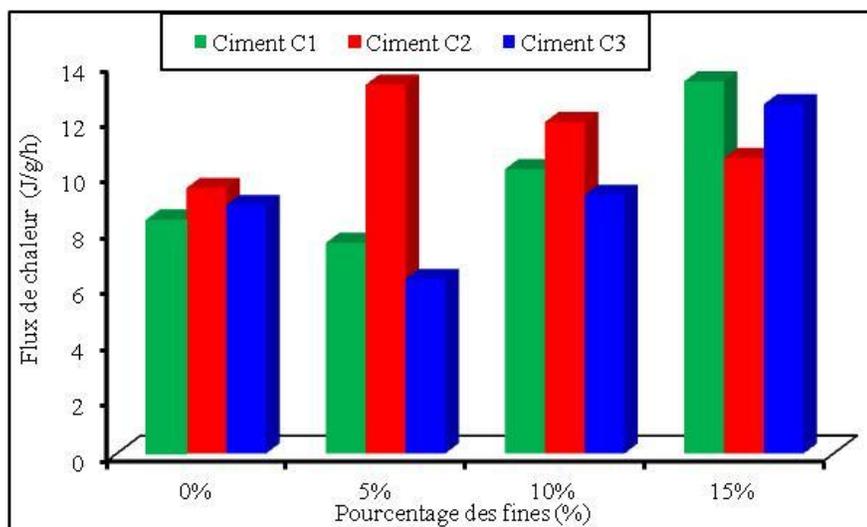


Figure 5.29 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur la valeur du flux de chaleur du pic II.

Les performances des types de ciment vis-à-vis de la résistance aux sulfates sont illustrées sur les figure 5.30 et 5.31. Lorsque les mortiers sont immergés dans une solution de 5% Na_2SO_4 , leur expansion est réduite au maximum lorsque le ciment C1 est malaxé avec un sable contenant 5% de fines. De même, le ciment C2 trouve sa meilleure résistance en présence d'un sable riche en fines (15%) alors que le ciment C3 exige un sable ayant plus de 5% de fines.

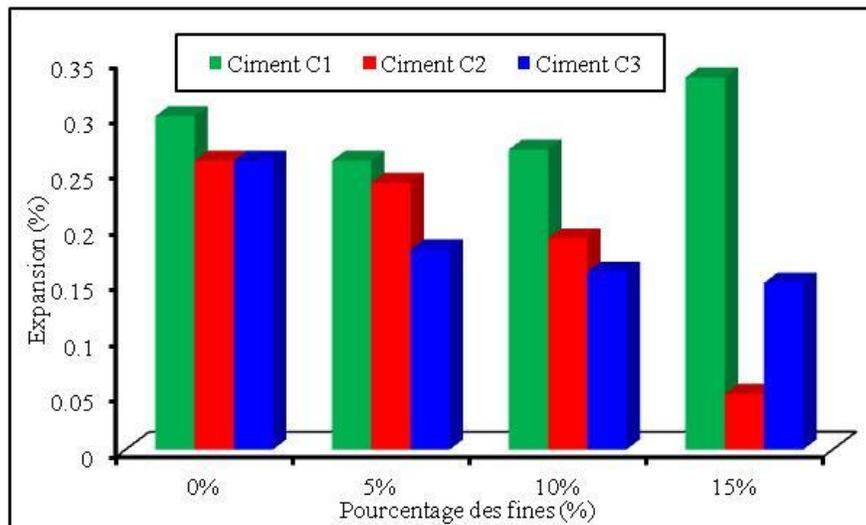


Figure 5.30 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur l'expansion dans une solution de 5% de Na_2SO_4 (t=1 an).

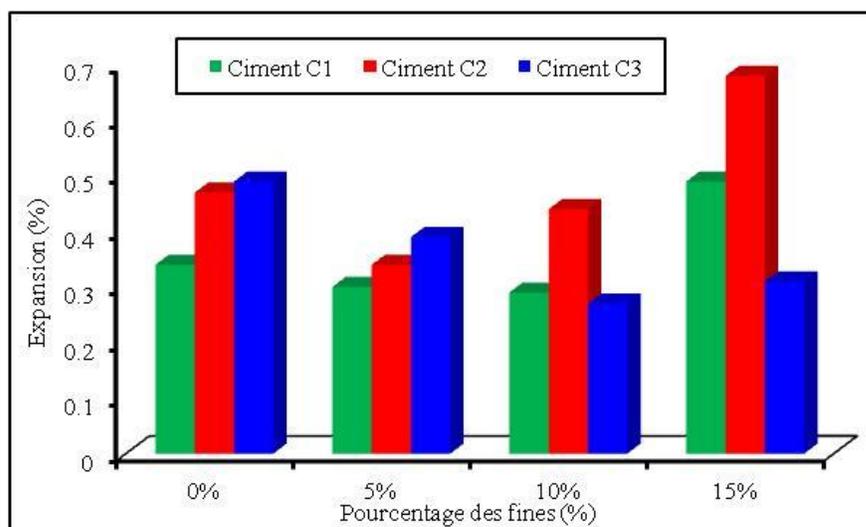


Figure 5.31 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur l'expansion dans une solution de 5% de MgSO_4 (t=1 an).

Ces performances sont complètement changées si les mortiers sont immergés dans une solution de 5% de $MgSO_4$ comme c'est illustré sur la figure 5.31. Les mortiers les plus résistants à l'expansion dans cette solution sont trouvés en malaxant le ciment C1 avec un sable contenant 5 à 10 % de fines, le ciment C2 avec un sable contenant 5% de fines et le ciment C3 avec un sable contenant plus de 10% de fines.

La résistance des mortiers aux acides dépend et du type de ciment et du type de sable utilisés comme c'est illustré sur les figures 5.32 et 5.33. Lorsque le mortier est immergé dans une solution de 1% HCl, l'effet du type de ciment utilisé n'est observé que lorsque le sable contient plus de 10% de fines. Le ciment C3 devient plus performant lorsqu'il est malaxé avec un sable ayant 15% de fines. La figure 5.33 montre un effet plus apparent du type de ciment sur la durabilité des mortiers lorsqu'ils sont immergés dans une solution 3% de H_2SO_4 . Le ciment C1 trouve ses performances lorsque les fines sont absentes dans le sable. Le ciment C2 garde sa résistance inchangée jusqu'à 10%. Alors que le ciment C3, sa résistance optimale est atteinte avec un sable contenant 10% de fines.

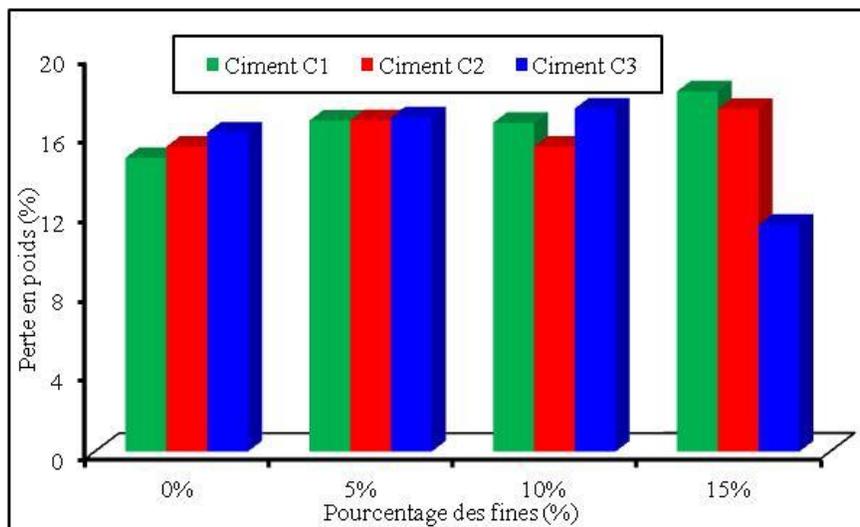


Figure 5.32 : Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur la perte de poids dans une solution de 1% de HCl (t=6 mois).

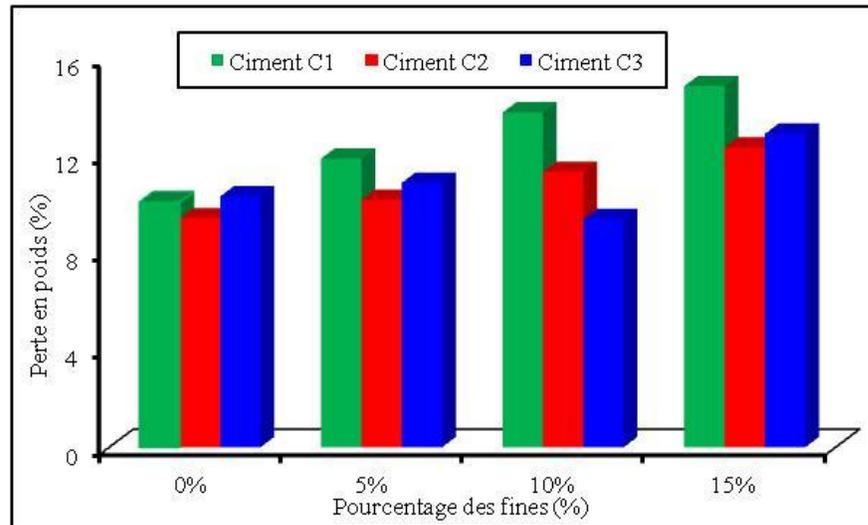


Figure 5.33: Effet du type de ciment et du pourcentage de fines sur la perte de poids dans une solution de 3% de H_2SO_4 (t=6 mois).

5.6. Conclusion

Le taux de fines présent dans le sable de concassage semble jouer un rôle fondamental sur l'hydratation du ciment. Le ciment ordinaire est plus sensible au jeune âge à la présence des fines dont leur effet disparaît au cours du temps. Les ciments composés C2 et C3 se voient leur hydratation accélérée au jeune âge et en générant plus de chaleur à long terme tant que les fines sont abondantes dans le sable concassé. Ceci se manifeste sur des résistances améliorées au jeune âge et une diminution de la porosité qui accrut la durabilité de ces mortiers.

Conclusions générales

Conclusions générales

Le ciment C1 développe une meilleure résistance avec un sable contenant 15% de fines. Alors que le mortier à base de ciment C2 nécessite un sable avec 10% de fines seulement. Le mortier à base de ciment C3 a besoin d'un sable riche en fines (>10%) pour développer ses meilleures résistances à la compression.

A 2 jours d'âge, le mortier à base de ciment C1 confectionné avec un sable concassé ayant 5%, 10% et 15% de fines développe des résistances améliorées respectivement de 42.1, 45.3 et 57.2%. Cette amélioration diminue au cours de l'âge des éprouvettes pour atteindre à 90 jours des augmentations seulement de 3.1, 9.5, 22.8% respectivement pour les mêmes taux utilisés.

Le ciment C2 riche en fines calcaires est saturé et ne permet pas plus de 10% de leur présence dans le sable de concassage. De ceci, les sables présentant des taux élevés de fines ne seront pas tolérés avec ce type de ciment et serait souhaitable de diminuer leur présence dans les carrières ou procéder à un lavage pour les évacuer.

Les fines calcaires présentes dans le sable de concassage contribuent positivement avec la pouzzolane naturelle dans le ciment C3 à activer les grains de ciment et à compléter la distribution granulaire de la mixture. Ceci a été concrétisé par une élévation des résistances à la compression de 30% à 28 jours lorsque leur taux dépasse les 10%.

Le développement de la résistance à la compression au jeune âge est plus rapide pour les ciments C2 et C3. A 7 jours d'âge, les résistances représentent 70, 90 et 76% respectivement pour les ciments C1, C2 et C3.

Il s'avère que la qualité de sable et en particulier sa teneur en fines calcaires attribue une nette variation de sa chaleur d'hydratation dégagée. Une teneur de 5% de fines dans le sable déclenche une chaleur additionnelle dès les premières 12 heures surtout en présence des ciments composés.

Le ciment C1 est peu influencé par le type de sable utilisé et génère des chaleurs identiques indépendamment du pourcentage de fines dans le sable. La chaleur du ciment C2 augmente linéairement avec le pourcentage des fines et présente le dégagement le plus élevé. Par contre le ciment C3 ne devient sensible qu'avec des sables riches en fines (15%).

Pour les trois types de ciments, le sable contenant plus de fines (15%) est plus influant sur la valeur du second pic. Sa valeur est augmentée de plus de 61% pour le ciment C1, 91% pour le ciment C2 et 41 % pour le ciment C3. L'apparition de ce pic est ressentie beaucoup plus avec les ciments composés C2 et C3 marquée par une accélération de l'hydratation.

L'excès de fines calcaire dans le mortier à base d'un ciment ordinaire favorise l'expansion contrairement au sable contenant de faibles proportions. Après une année d'observation, 15% de fines dans le sable de concassage engendre une hausse de 10% d'expansion par contre 5 ou 10% de fines la réduisent de 10%.

Par contre 5, 10 et 15% de fines avec le ciment C2 présentent une réduction de l'expansion respectivement de 10, 30 et 70% par rapport à celle d'un mortier de référence sans fines ajoutées.

Avec le ciment C3, le taux de fines contenu dans le sable de concassage garde un effet négatif pendant près de trois mois où l'expansion est doublée lorsque les sables ayant 10 et 15% de fines sont utilisés. Ensuite, l'effet des fines s'inverse et une réduction considérable de l'expansion est enregistrée.

Lorsque les mortiers sont exposés à des acides sulfuriques, l'effet de la présence des fines est plus marqué à long terme et plus pour les ciments composés. Seul le mortier réalisé avec un ciment ordinaire (C1) se dégrade avec les sables riches en fines calcaires. Lorsque le ciment est à base de calcaire (C2) ou de pouzzolane naturelle (C3), l'effet de la présence des fines dans le sable ne semble avoir d'effet d'après 4 mois d'immersion.

Lorsque le mortier est immergé dans une solution de 1% HCl, l'effet du type de ciment utilisé n'est observé que lorsque le sable contient plus de 10% de fines. Le ciment C1 trouve ses performances lorsque les fines sont absentes dans le sable. Le ciment C2 garde sa résistance inchangée jusqu'à 10%. Alors que le ciment C3, sa résistance optimale est atteinte avec un sable contenant 10% de fines.

Recommandations

Enfin, on peut recommander pour les futures recherches de mener des travaux sur la modification de la microstructure de la pâte de ciment lorsque le sable de concassage est introduit. D'autres travaux peuvent viser le comportement rhéologique des mortiers et des bétons contenant du sable de concassage. Cela facilitera la compréhension du comportement de ce sous produit et son utilisation convenable dans la construction.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Adjoudj M., Ezziane K., Kadri EH., Ngo TT., Kaci A., Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer, *Construction and Building Materials*, 2014;70:549–559.
- Alaa MR., Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement, *Construction and Building Materials*, 2014;72:340–357.
- Aquino C., Inoue M., Miura H., Mizuta M., Okamoto T., The effects of limestone aggregate on concrete properties, *Construction and Building Materials*, 2010;24:2363–2368.
- ASTM C1012, Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution, ASTM International; 2013.
- ASTM C267, Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, monolithic surfacings, and polymer concretes. ASTM International; 2012.
- 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.
- 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.
- Benna Y., Valorisation du sable de concassage, 1er colloque maghrébin en génie civil, Algérie, Beskra, les 16 et 17 novembre 1998.
- 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.
- Bonavetti VL., Donza H., Rahhal VF., Irassar EF., Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement, *Cement and Concrete Research*, 2000;30:703–708.
- Bonavetti VL., Rahhal VF., Irassar EF., Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements, *Cement and Concrete Research*, 2001;31:853–859.
- Celik T., Marar K., Effect of crushed stone dust on some properties of concrete, *Cement and Concrete Research* 26; (1996): 1121–1130.
- Chakib K., Bilan des activités minières année 2007, Ministère de l'énergie et des mines, direction générale des mines, Volume II; Avril: 2008.
- Chang ZT., Song XJ., Munn R., Marosszeky M., Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack, *Cement and Concrete Research*, 2005;35:1486–1494.
- Correia JR., de Brito J., Pereira AS., Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates, *Mater. Struct.* 2006; 39:169–177.

- De Weerd K, Ben Haha M, Le Saout G, Kjellsen KO, Justnes H, Lothenbach B., Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash, *Cement and Concrete Research*, 2011;41:279–291.
- Donza H., Cabrera O., Irassar E.F., High-strength concrete with different fine aggregate, *Cement and Concrete Research* 32; (2002): 1755–1761.
- EN 196-1: April 2006, Methods for testing of cement: mechanical strength. 1987. p. 24.
- Eren Ö., Marar K., Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete, *Construction and Building Materials* 23; (2009): 981–988.
- Ezziane K., Kadri EH., Hallal A., Duval R., Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method, *Mater. Struct.* 2010;43:393–401.
- Felekoglu B., Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), *Resour. Conserv. Recycl.* 2007;51:770–791.
- Foliot A, chapitre 01, le ciment, le béton hydraulique, presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1982, paris.
- 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.
- Gonçalves JP., Tavares LM., Toledo Filho RD., Fairbairn EMR., Cunha ER., Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cement and Concrete Research*.2007;37:924–932.
- 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.
- 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.
- 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.
- Hebbouche A., Propriétés 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.
- Kazuyuk T., Mitsunor K., Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulphuric acid and sulphate attack, *Cement and Concrete Research*, 1994;24:361–370.
- (Langavant calorimetry method), AFNOR; 1989. p. 21.
- 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.
- 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.
- Kenai S., Menadi B., Use of sand from residues of aggregates quarries in concrete, Beijing, China, September 2005.

- Kenai S., Debieb F., Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates, *Mater. Struct.* 2011;44:815–824.
- Kenai S., Soboyejo W., Soboyejo A., Some engineering properties of limestone concrete, *Mater. Manuf. Processes.* 2004;19:949–961.
- 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.
- Kim JK., Lee CS., Park CK., Eo SH., The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete, *Cement and Concrete Research*, 1997;27:1719–1729.
- Kou S., Poon CS., Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates, *Construction and Building Materials*, 2009;23: 2877–2886.
- Lin Feng, Meyer Christian, Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure, *cement and concrete research* ,39 ,2009,p 255–265.
- Lothenbach B., Le Saout GL., Gallucci E., Scrivener K., Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 2008;38:848–860.
- Menadi B., Kenai S., Effect of cement type on the transport properties of crushed sand concrete, *Proceeding ICMT Conference; 2011 July, Hangzhou, China.* p. 6318–6321.
- 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.
- Menadi B., Kenai S., Khatib J., Ait-Mokhtar A., Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, *Construction and Building Materials*, 2009, 23, 625-633.
- Merghoub. M, Etude physico-mécanique et durabilité du mortier de ciment au calcaire. Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de Laghouat, 2004.
- NF P18-303 Eau de gâchage pour béton (1999).16p.
- NF P 18-560. Granulats-Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, Paris, 1990.
- NF P 18-598. Granulats- équivalent de sable, AFNOR, Paris, 1990.
- NF P 18-406, Béton-essai de compression, AFNOR, Paris, 1981.
- NF EN 196-3: January 2009, Methods for testing of cement: setting time and stability, 1990 Mar; p. 10
- NF 15-436, Measurement of heat of hydration of cement by semi-adiabatic calorimeter
- Piérard J., Michel F., Effet des fillers calcaires sur la résistance aux chlorures des mortiers, Université de liège, 2007.
- Pipilikaki P., Katsioti M., Gallias JL., Performance of limestone cement mortars in a high sulfates environment, *Construction and Building Materials*, 2009;23:1042–1049.

- Raman S.N, Ngo T, Mendis P, Mahmud H.B, (2011) High-strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust as a partial substitute for sand, *Construction and Building Materials*; 25(7): 3123-3130.
- 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.
- Sadhouari 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.
- Safiuddin M., Raman SN., Zain MFM., Flowing concretes with quarry waste fine aggregate, *Civ. Eng. Res. Pract.* 2007;4:17–25.
- 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.
- Taha B., Nounu G., Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 2008;22:713-720.
- Thongsanitgarn P., Wongkeo W., Chaipanich A., Poon CS., Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: effect of limestone particle size, *Construction and Building Materials*, 2014;66:410–417.
- 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.
- Tosun K., Felekoglu B., Baradan B., Akin-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.
- Tsivilis S., Batis G., Chaniotakis E., Grigoriadis Gr., Theodossis D., Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar, *Cement and Concrete Research*, 2000;30:1679–1683.
- 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.
- Vuk T., Gabrovšek R., Kaučič V., The influence of mineral admixtures on sulfate resistance of limestone cement pastes aged in cold MgSO₄ solution, *Cement and Concrete Research*, 2002; 32:943–948.
- Westerholm M., Lagerblad B., Forssberg E., Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates, *Materials and Structures* (2007); 40:615–625.
- Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research*, 2005;35:532–539.
- Yang J., Du Q., Bao Y., Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks, *Construction and Building Materials*, 2011;25:1935–1945.