

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil & Hydraulique
Ref :



جامعة محمد خيضر - بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية والري
المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en sciences

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux de construction

Effets des différents régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant à base de divers types de sable

Présentée par

Taha-Hocine DOUARA

Soutenue publiquement le : 17/11/2019

Devant le jury composé de :

Dr. MEZGHICHE Bouzidi	Maître de conférences « A »	Président	Université de Biskra
Dr. GUETTALA Salim	Professeur	Rapporteur	Université de Djelfa
Dr. ZEGHICHI Leila	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Dr. TAALLAH Bachir	Maître de conférences « A »	Examineur	Université de Biskra
Dr. BEDERINA Madani	Professeur	Examineur	Université de Laghouat
Dr. BELHADJ Belkacem	Maître de conférences « A »	Examineur	Université de Laghouat

Dédicace

À mon père : *Abdelhafid,*

« Mon père tu es essentiel et indispensable à mon vrai bonheur et à mon équilibre personnel... Ma réussite est la tienne ! Qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé ! »

À ma mère : *Yamna,*

« Ma Mère, tu es l'étoile de ma vie qui fait briller mes jours les plus sombres, qui réchauffe mon cœur quand il fait froid. Tu es l'amour à l'état brut ! Je te serai reconnaissant toute ma vie, qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé ! »

À ma femme « Zohra », pour la patience et le soutien dont elle a fait preuve pendant toute la durée de cette thèse, Merci ma chérie,

À mes chers enfants : Sohaib & Samah,

À ma grand-mère, que dieu la protège,

À tous mes frères et sœurs, toujours présents et disponibles,

À mes amis : Salim, Laid, Cheikh, Ali, Yacine et les autres.

Je dédie cette thèse



Remerciements |

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au laboratoire de matériaux de construction MDC du département du génie civil de l'université de Djelfa. Qu'il me soit permis d'exprimer ici ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé à mener à bien cette étude

En premier lieu mes remerciements vont au professeur GUETTALA Salim, je suis très heureux de lui adresser ma profonde gratitude pour l'aide incessante et les encouragements qu'il a su me prodiguer tout au long de ce travail.

Je remercie tout particulièrement monsieur Dr. MEZGHICHE Bouzidi maître de conférences « A » à l'université Mohamed Khider de Biskra de m'avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens également remercie Mme ZEGHICHI Leila professeure à l'université Mohamed Khider de Biskra m'a fait l'honneur en acceptant d'examiner cette thèse.

Mes remerciements vont également à messieurs Dr. TAALLAH Bachir maître de conférences « A » à l'université Mohamed Khider de Biskra, Dr BEDERINA Madani Professeur à l'université de Laghouat et Dr. BELHADJ Belkacem maître de conférences « A » à l'université de Laghouat qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner cette thèse.

Mes remerciements vont également à Messieurs les administrateurs de la faculté des sciences et de la technologie : le professeur HFAIFA Ahmed doyen de la faculté, HARICHE Lazhar ex-doyen de la faculté, OUANOUKI Toufik ex-secrétaire général de la faculté et à Mr ALLOUT Naas chef de département du génie civil d'avoir accepté de réaliser ces travaux dans le laboratoire MDC du département.

Je tiens à remercier très particulièrement mon cher collègue HADJI Tarek maître assistant à l'université de Djelfa pour ses efforts considérables de m'aider à réaliser les expériences et pour l'ambiance qu'il m'a fournie au cours des travaux dans le laboratoire; sans lui je n'aurais pas pu de confectionner le béton en grande masse, merci beaucoup Tarek.

Mes remerciements vont également à mes collègues ATTIA Ahmed, BOUKHALKHAL Ahmed Lamine et ZAITRI Rebih de l'université de Djelfa pour leurs aides et soutiens de la finalisation de ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à Mme HASSAN Messaouda et Mr BENDJKINA Mohamed ingénieurs au laboratoire MDC et messieurs BOUZEKRI Abdelkader et Ramzi pour ses collaborations.

Mes remerciements vont également au directeur et personnels du laboratoire LNHC unité de Djelfa particulièrement à Mr TAHRAOUI Ali et Mebkhout pour me faciliter d'effectuer les expériences de l'écrasement.

Je tiens à remercier Mr SAADAT Mohmed ingénieur au centre de recherche nucléaire d'EL-Birine CRNB pour son aide à effectuer les analyses par DRX.

J'adresse mes plus sincères remerciements à monsieur MASMOUDI et monsieur DRISSI Mohamed pour les corrections linguistiques de la thèse.

Enfin ma reconnaissance va à tous mes collègues du département de génie civil de l'université de Djelfa qui ont participé par leur encouragement à rendre ce travail les plus agréables.

Résumés |

RÉSUMÉ

La composition du béton autoplaçant (BAP) est très particulière, ce béton contient un volume important de sable qui dépasse 40% de volume des agrégats. Toutes modifications de la nature ou de la qualité du sable reviennent positivement ou négativement sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de la durabilité du BAP. Le BAP est très susceptible au séchage en surface, en raison de la quantité élevée de la pâte, du faible rapport eau/liant et du manque d'eau ressuée à la surface, qui joue le rôle de protection contre la dessiccation. Cela peut entraîner des fissures dues à la perte précoce d'humidité ou à la formation de croûtes à la surface. Pour cela la méthode de durcissement du BAP est très importante. De plus, la demande en sable connaît, en Algérie, une augmentation considérable en rapport avec le développement du pays. Le sable alluvionnaire SA est le type le plus utilisé dans les constructions ; ses ressources semblent baisser, ce qui devrait être remplacé par d'autres types de sables abondants. L'utilisation du sable de dune (SD) et le sable concassé (SC), dans la composition de béton autoplaçant BAP, constitue une contribution technique, économique et environnementale importante. Vu la quantité importante des fines dans SC et SD, ces deux sables peuvent être deux composants intéressants du BAP. L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'étude expérimentale de l'effet des différentes combinaisons binaires et ternaires des sables SA, SC et SD sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du BAP ; ainsi, d'étudier l'effet des différents régimes de durcissement sur la résistance à la compression et à la traction du BAP fabriqués par des différentes proportions des sables. 21 compositions de BAP ont été examinées dans cette étude. Dans chaque composition le sable SA a été substitué par SC et/ou SD en combinaison binaire et ternaire avec un pas de 20% jusqu'au remplacement total. Trois régimes de durcissement ont été élaborés, à savoir le durcissement dans l'eau (comme milieu témoin), le durcissement à l'air ambiant et le durcissement par enveloppement dans une feuille de plastique. Les résultats de cette étude montrent que toute modification de la teneur ou de la qualité du sable a entraînée des effets sur les propriétés du BAP. Il est possible de substituer le sable SA par des proportions modérées de SC et SD sans influencer, fortement, la fluidité, la déformabilité, la stabilité, les propriétés mécaniques et la résistance dans le milieu agressif. L'optimum des proportions est de 20% de SC et 40% de SD dans la combinaison binaire SA-SC et SA-SD respectivement et de (20% SC+ 20% SD) dans le mélange ternaire. Pour la substitution de SA supérieure à 40% le BAP perd ses propriétés rhéologiques et devient un béton ordinaire. La porosité ou la compacité de mélange de sables est un facteur important qui influe sur les propriétés du BAP. L'étude montre aussi que les durcissements dans l'eau ou le durcissement enveloppé sont des milieux favorables du BAP à base de divers types de sables pour continuer l'évolution de sa résistance en fournissant suffisamment d'humidité pour que le ciment continue son hydratation.

Mots clés : Béton autoplaçant, types de sable, propriétés rhéologiques, régimes de durcissement, propriétés mécaniques, milieu agressif.

ABSTRACT

The composition of self-compacting concrete (SCC) is very particular; it contains a large volume of sand which exceeds 40% of volume of the aggregates. Any changes in the nature or quality of the sand positively or negatively affect the rheological, mechanical and durability properties of the SCC. SCC is very susceptible to surface drying because of the high pulp quantity, the low water/binder ratio and the lack of water on the surface, which acts as a protection against desiccation. This can lead to cracks due to early loss of moisture or crusting at the surface. For this, the curing regime of the SCC is very important. In addition, demand for sand in Algeria is increasing considerably in relation to the country's development. The river sand RS is the most used type in the constructions its resources seem to drop, which should be replaced by other types of abundant sands. The use of dune sand (DS) and crushed sand (CS) in the SCC composition is an important technical, economic and environmental contribution. Considering the large amount of fines in CS and DS, these two sands can be too interesting components of SCC. The aim of this thesis is to contribute with experimental study of the effects of different binary and ternary combinations of RS, CS and DS sands on the rheological and mechanical properties and durability of SCC. Thus, to study the effect of different curing regimes on the compressive and tensile strength of SCC made with different sands. 21 SCC compositions were examined in this study. In each composition, the RS sand was substituted by CS and/or DS in binary and ternary combination with a step of 20% until the total replacement. Three curing regimes were developed namely curing in water (as reference regime), air curing and wrapped in a plastic sheet. The results of this study show that any changes in content or quality of the sand have effects on the properties of SCC. It is possible to substitute RS sand with moderate proportions of CS and DS without greatly influencing fluidity, deformability, stability, mechanical properties and resistance in the aggressive medium. The optimum proportions are 20% of CS and 40% of DS in the binary combination RS-CS and RS-DS respectively and 20% of CS with 20% of DS in the ternary mixture. For RS substitution greater than 40%, the SCC loses its rheological properties and becomes an ordinary concrete. Porosity or compactness of sand mix is an important factor influencing the properties of SCC. The study also shows that curing in water or wrapped curing are beneficial environments for SCC made with various types of sands to continue the evolution of its strength by providing enough moisture for the cement to continue their hydration.

Keywords: *Self-compacting concrete, sand types, rheological properties, curing regimes, mechanical properties, aggressive medium.*

ملخص

تتمتع الخرسانة ذاتية التوضع (خ ذ ت) بتركيبة خاصة جداً، إذ تحتوي على حجم هام من الرمل يتجاوز 40% من حجم الحصىات. إن أية تغييرات في طبيعة أو نوعية الرمل يرجع بالسلب أو الايجاب على الخصائص الريولوجية، الميكانيكية و على ديمومة خ ذ ت. الخرسانة ذاتية التوضع معرضة بشدة للتجفيف السطحي نظراً لاحتوائها على كمية عجيبة كبيرة و على نسبة منخفضة من الماء/الرابط وكذلك لنقص الماء الراشح إلى السطح الذي يُكوّن طبقة حماية ضد التجفيف. هذا ما يمكن أن يؤدي إلى ظهور تشققات و إلى تقشر السطح بسبب فقدان المبكر للرطوبة. لهذا السبب، فإن إنضاج خ ذ ت مهم جداً. إضافة إلى ذلك، الطلب يزداد على الرمل مع زيادة التنمية في البلاد. يعتبر رمل الوديان (ر و) من الأنواع الأكثر استخداماً في مجال البناء و الذي يبدو أن موارده بدأت في الانخفاض حيث بات من الضروري استبداله بأنواع أخرى أكثر وفرة. يُعدّ استخدام رمل الكثبان (ر ك) و رمل المقالع (ر م) في تركيبة الخرسانة ذاتية التوضع مساهمة تقنية، اقتصادية و بيئية مهمة. نظراً للكمية المعتبرة من النواعم في (ر ك) و في (ر م)، فهذين الرملين يمكن أن يكونا مركبين مهمين في تركيبة خ ذ ت. الهدف من هذه الأطروحة هو المساهمة بدراسة تجريبية لتأثير مختلف التوليفات الثنائية و الثلاثية لرمل الوديان، رمل المقالع و رمل الكثبان على الخصائص الريولوجية الميكانيكية و على ديمومة خ ذ ت. و كذلك دراسة تأثير مختلف أنماط الانضاج على المقاومة للضغط و للشد للخرسانة ذاتية التوضع المحضرة بمختلف أنواع الرمال. في هذه الدراسة تم اختبار 21 تركيبة. في كل تركيبة يتم تعويض (ر و) بالرمل (ر ك) و (ر م) في توليفات ثنائية و ثلاثية و بخطوة 20% في كل مرة إلى غاية التعويض الكلي. تم اختبار ثلاثة أنماط من الانضاج: الانضاج داخل الماء (يعتبر كوسط مرجعي)، الانضاج في الهواء و الانضاج بواسطة التغليف البلاستيكي. أظهرت النتائج أنه من الممكن تعويض (ر و) بنسب معتبرة من (ر م) و (ر ك) دون التأثير القوي على السيولة، التشوه، الاستقرار، الخصائص الميكانيكية و على الديمومة في الأوساط العدوانية. النسب المثلى كانت 20% رمل المقالع و 40% من رمل الكثبان في التوليفات الثنائية (ر و-ر م) و (ر و-ر ك) على التوالي و 20% ر م مع 20% ر ك في التوليفات الثلاثية. من أجل تعويض أكبر من 40% لرمل (ر و)، الخرسانة تفقد خصائصها الريولوجية و الميكانيكية و تصبح خرسانة عادية. من ناحية أخرى، المسامية لخليط الرمال لها دور كبير في التأثير على خصائص خ ذ ت. بينت الدراسة كذلك أن الانضاج داخل الماء أو بالتغليف البلاستيكي يعتبران جد ملائمين للخرسانة ذاتية التوضع المحضرة بمختلف أنواع الرمال وذلك من أجل مواصلة تطور مقاومتها وذلك بتوفير الرطوبة الكافية ليوصل الاسمنت تفاعلاته.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية التوضع، أصناف الرمل، الخصائص الريولوجية، أنماط الانضاج، الخصائص الميكانيكية، الوسط العدواني

Table des matières |

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumés	iv
Table des matières	7
Liste des figures	12
Liste des tableaux	19
Introduction générale	21
Première Partie. Synthèse Bibliographiques	25
Chapitre I . Généralités sur le béton autoplaçant et les méthodes de durcissement de béton	26
I.1. Introduction :	27
I.2. Définition de BAP	27
I.3. Histoire du béton autoplaçant	27
I.4. Conditions de BAP	28
I.5. Avantages du BAP	29
I.6. Principes de base et exigences du BAP	29
I.7. Formulation des BAP	30
I.7.1. Méthode Japonaise :	31
I.7.2. Méthode LCPC : suggérée par DE LARRAD et al.[27]	33
I.7.3. Méthode suédoise : proposée par PETERSSON et al. [28]	34
I.7.4. Autres méthodes :	35
I.8. Constituants de Béton autoplaçant	35
I.8.1. Ciment	35
I.8.2. Additions minérales	36
I.8.3. Superplastifiants	37
I.8.4. Eau de gâchage	37
I.8.5. Gros granulats (Graviers)	38
I.8.6. Granulats Fin (Sables)	39
A. Sable Alluvionnaire SA	39
B. Sable concassé ou sable de carrière SC	40
C. Sable de dune SD	40
I.9. Caractéristiques du BAP	41
I.9.1. Caractéristiques du BAP à l'état frais :	41
I.9.1.1. Essai d'étalement (<i>Slump-flow</i>):	41
I.9.1.2. Essai de la boîte en L (L-box test) :	43
I.9.1.3. Essai de stabilité au tamis	44
I.9.2. Caractéristiques du BAP à l'état durci :	45
I.9.2.1. Résistance à la compression	45

I.9.2.2. Résistance à la traction-----	46
I.10. Méthodes de durcissement et leurs effets sur le béton -----	47
I.10.1. Introduction -----	47
I.10.2. Définition de la cure-----	47
I.10.3. Rôle de la cure-----	47
I.10.4. Effet de la cure sur le béton -----	48
I.10.5. La cure du béton autoplaçant -----	49
I.10.6. Méthodes de durcissement -----	49
I.10.6.1. Durcissement à l'air sec -----	49
I.10.6.2. Le durcissement dans l'eau-----	50
I.10.6.3. Le durcissement par recouvrement en film plastique : -----	50
I.10.6.4. Durcissement à la vapeur/chaleur -----	51
I.10.6.5. Revêtement humide saturé-----	53
I.10.6.6. Produits de cure-----	53
I.11. Conclusion -----	54
Chapitre II . Revue bibliographique sur l'effet des sables et les régimes de durcissement sur le BAP -----	55
II.1. Introduction :-----	56
II.2. Incorporation des Sable SA, SC et SD dans le BAP -----	56
II.2.1. Influence de la teneur en sable sur les propriétés du BAP-----	56
II.2.2. Influence de la nature de sable sur les propriétés du BAP-----	57
II.2.3. Synthèse -----	67
II.3. Comportement du BAP et bétons vis-à-vis des attaques acides -----	67
II.3.1. Introduction-----	67
II.3.2. Mécanisme d'attaques de HCL et H ₂ SO ₄ -----	68
II.3.2.1. Attaque de l'HCl -----	68
II.3.2.2. Attaque de H ₂ SO ₄ -----	68
II.3.3. Travaux réalisés sur la durabilité du BAP et BO : -----	69
II.3.4. Synthèse -----	79
II.4. Effets de différents régimes durcissement sur les propriétés du BAP et BO: -----	80
II.4.1. Synthèse -----	91
Deuxième partie. Étude expérimentale -----	92
Chapitre III . Caractéristiques des matériaux utilisés, formulation et méthodes d'essais-----	93
III.1. Introduction :-----	94
III.2. Caractéristiques des matériaux -----	94
III.2.1. Le ciment-----	94
III.2.2. Les fillers calcaires (FC) -----	95
III.2.3. Les gros granulats (le gravier) -----	95
III.2.4. Les granulats fins (les sables)-----	95
III.2.4.1. Sable alluvionnaire (SA) :-----	95

III.2.4.2. Sable de carrière (SC) : -----	96
III.2.4.3. Sable de dune (SD) : -----	96
III.2.4.4. Propriétés physiques des sables -----	97
III.2.5. Superplastifiant (SP) -----	98
III.2.6. Eau de gâchage (E) -----	99
III.3. Composition des BAP -----	99
III.3.1. Méthode de calcul de la composition de référence : -----	100
III.3.1.1. Étape 1: calcul volume de la pâte et volume des granulats -----	100
III.3.1.2. Étape 2: calcul la masse des granulats -----	101
III.3.1.3. Étape 3: Correction de la quantité d'eau -----	101
III.4. Procédures expérimentales et méthodes d'essais -----	103
III.4.1. Procédure expérimental -----	103
III.4.2. Méthodes d'essais -----	103
III.4.2.1. Mesure de la porosité de sable -----	103
III.4.2.2. Procédure de malaxage du béton -----	103
III.4.2.3. Caractérisation de l'ouvrabilité du BAP -----	104
A. Essai de l'étalement et la viscosité apparente T_{500} -----	104
B. Essai de l'écoulement dans la boîte-L -----	105
C. Essai de la stabilité au tamis -----	106
III.4.2.4. Caractérisation mécaniques du BAP (à l'état durci) -----	107
A. Régimes de durcissement -----	107
A.1. Durcissement dans l'eau : -----	107
A.2. Durcissement à l'air -----	107
A.3. Durcissement par enveloppement en plastique -----	108
B. Essai de la résistance à la compression -----	108
C. Essai de la résistance à la traction par flexion -----	109
III.4.2.5. Essais de durabilité -----	110
A. Essai de l'absorption capillaire (sorptivité) -----	110
B. Essai de dégradation dans les acides HCl et H_2SO_4 -----	111
III.5. Conclusion : -----	113
Chapitre IV . Analyse des résultats et interprétation -----	114
IV.1. Introduction -----	115
IV.2. Porosité des différents mélanges de sables -----	115
IV.3. Étude de caractéristiques rhéologiques -----	117
IV.3.1. Fluidité et la viscosité -----	117
IV.3.2. Déformabilité et la stabilité -----	121
IV.4. Effet de la combinaison des sables et les régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques -----	124
IV.4.1. La résistance à la compression -----	124
A. Système de mélange SA-SC -----	124
B. Système de mélange SA-SD -----	126
C. Système de mélange SC-SD -----	127

D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD -----	130
IV.4.1.2. Comparaison entre les régimes de durcissement -----	134
A. Système de mélange SA-SC -----	134
B. Système de mélange SA-SD -----	136
C. Système de mélange SC-SD -----	137
D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD -----	139
IV.4.2. Résistance à la traction -----	141
A. Système de mélange SA-SC -----	141
B. Système de mélange SA-SD -----	143
C. Système de mélange SC-SD -----	145
D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD -----	147
IV.4.2.2. Comparaison entre les régimes de durcissement -----	149
A. Système de mélange SA-SC -----	149
B. Système de mélange SA-SD -----	151
C. Système de mélange SC-SD -----	153
D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD : -----	155
IV.5. Étude de la durabilité -----	157
IV.5.1. Absorption capillaire (la sorptivité) -----	157
IV.5.2. Résistance à l'attaque chimique H ₂ SO ₄ et HCl -----	158
IV.5.2.1. Conservation dans l'eau distillée -----	158
IV.5.2.2. Comportement des BAP vis-à-vis du milieu HCl -----	159
A. L'examen visuel -----	159
B. Effet de la dégradation du HCl sur la perte de masse -----	161
C. Effet de la dégradation du HCl sur la force à la rupture en compression -----	162
IV.5.2.3. Comportement des BAP vis-à-vis du milieu H ₂ SO ₄ -----	163
A. L'examen visuel -----	163
B. Effet de la dégradation du H ₂ SO ₄ sur la perte en masse -----	164
C. Effet de la dégradation de H ₂ SO ₄ sur la force à la rupture en compression -----	165
IV.6. Conclusion -----	167
Conclusion générale & perspectives -----	171
Références Bibliographiques -----	174
Annexes -----	189
Annexe « A ». Fiches techniques des produits -----	190
Annexe « B ». Tableaux des résultats -----	194

Liste des figures |

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Contexte de développement du béton autoplaçant au Japon [5].....	27
Figure I.2. Répartition géographique des pays publiant sur le BAP durant les 25 dernières années avant 2016 [8] ..	28
Figure I.3.Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [19]	30
Figure I.4. Critères requis pour obtenir une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage d'après Khayat [11]	31
Figure I.5. Méthode Japonaise de formulation d'un BAP proposée par Okamura et Ozawa [20] et par Ouchi et al.[25].....	32
Figure I.6. Dimensions de mini entonnoir V et mini-cône utilisés par[24,25].....	32
Figure I.7. Phénomène de blocage des granulats aux endroits d'un obstacle [26].....	33
Figure I.8. Essai d'étalement au cône (slump-flow) [117].....	42
Figure I.9. Entonnoir en forme V (V funnel) [117].....	43
Figure I.10. Essai de la boîte en L (L-box test)[117]	43
Figure I.11. Essai de la boîte en U (à gauche), essai de caisson de remplissage (à droite) [26].....	44
Figure I.12. Essai de stabilité au tamis[118]	45
Figure I.13. Évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BO (REF) correspondant [120].....	46
Figure I.14. Effet de la température de durcissement sur la résistance à un jour et à 28 jours[133]	48
Figure I.15. Effet de la période de murissement humide sur le gain de résistance du béton [133]	50
Figure I.16. Recouvrement en film plastique d'un élément horizontal en béton [133]	51
Figure I.17. Effet de température de cure sur le gain en résistance (à gauche) Par rapport à la résistance de 28 jours et (à droite) par rapport à la résistance du béton à 23°C [133]	51
Figure I.18. Cycle type de la cure à la vapeur atmosphérique[133]	52
Figure I.19. Application de revêtement humide sur un poteau	53
Figure I.20. Application de produit de cure sur surface de béton	54
Figure II.1. Effet de la teneur en sable sur la capacité de remplissage dans la boîte-U, par [152].....	56
Figure II.2. Effet du rapport sable/mortier sur (a) rapport eau/poudre (b) dosage en SP du mortier afin d'obtenir les propriétés nécessaires, par [155].....	57
Figure II.3. Effet de la teneur en sable sur l'étalement du mortier pour obtenir un étalement de béton de 65 cm, par [155]	57
Figure II.4. Comparaison des propriétés du béton avec différents types et module de finesse du sable (a) Temps d'écoulement dans l'entonnoir en V (b) Hauteur de remplissage dans la boîte-U (c) Ségrégation , par [156]	59
Figure II.5. Effet de module de finesse de sable sur les propriétés fraîches du BAP, par [157]	59
Figure II.6. Effet de module de finesse de sable sur la capacité de remplissage dans la boîte-U, par [158].....	60
Figure II.7. Variation de l'étalement, l'écoulement à l'entonnoir V et la capacité de remplissage en boîte L en fonction de sable et en fonction de pourcentage SP d'après Rmili [55,56]	60
Figure II.8. Variation de la résistance à la compression et à la traction des BAP choisis (R=RA, C=SC, D=SD) [55,56]	61
Figure II.9. Relation entre l'étalement l'excès de volume de pâte [52]	61
Figure II.10. Relation entre la résistance à la compression et le rapport w/p (Eau/pâte) [52].....	62

Figure II.11. Variation de l'étalement des mortiers fabriquer par : (a) sable binaire (SC/SA). (b) sable binaire (SC/SD). et (c) sable ternaire (SC/SA/SD) d'après [96].....	62
Figure II.12. Variation de la résistance à la compression des mortiers fabriquer par : (a) sable binaire (SC/SA). (b) sable binaire (SC/SD). et (c) sable ternaire (SC/SA/SD) d'après [96].....	63
Figure II.13. Tracé ternaire de propriétés frais de BAP en fonction de proportion SA, SC et SD. (a) étalement (cm). (b) écoulement entonnoir V (s). (c) rapport H2/H1 dans la boîte L. (d) stabilité au tamis (%) [159]	64
Figure II.14. Tracé ternaire de la résistance à la compression (MPa) en fonction des proportions de SA, SC et SD : (a) 2 jours. (b) 7 jours et (c) 28 jours[159]	64
Figure II.15. Étalement et H2/H1de la boîte L de BAP avec différent types de sable [160].....	65
Figure II.16. Résistance à la compression de BAP avec différent types de sable[160].....	65
Figure II.17. Variation de l'étalement et la capacité de remplissage H2/H1 (boîte-L) de BAPHP en fonctions de combinaisons de sables [161]	66
Figure II.18. Variation de la résistance à la compression et à la traction de BAPHP en fonctions de combinaisons de sables [161].....	66
Figure II.19. Variation de l'absorption initiale à 30, 60 et 120 minutes en fonction de la proportion de sable de dune [111]	69
Figure II.20. L'évolution de la masse du béton en fonction du temps dans chaque protocole d'attaque [170]	70
Figure II.21. Influence de mouillage- séchage sur la résistance des mortiers[172].....	71
Figure II.22. Résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition aux sulfates [172].....	72
Figure II.23. Résistance à la flexion en fonction de la durée d'exposition aux sulfates [172].....	72
Figure II.24. Perte de la résistance à la compression des échantillons après 9 mois d'immersion la solution MgSO ₄ [174]	73
Figure II.25. Variation de la masse des échantillons immergés dans 5% Na ₂ SO ₄ [175].....	73
Figure II.26. Développement de la résistance à la compression des cubes de BAP immergés dans 5% Na ₂ SO ₄ [175]	74
Figure II.27. Variation de dimension des éprouvettes immergées dans l'eau et dans la solution 5% Na ₂ SO ₄ [175] ..	74
Figure II.28. Comparaison de la résistance à la compression à 28 jours du béton avant et après traitement à l'acide en fonction de sable [177].....	75
Figure II.29. Résistance à la compression des bétons de classe C20 et C30 en fonction de taux en SC [179]	76
Figure II.30. Variation de masse des spécimens immergés dans la solution 5% Na ₂ SO ₄ : a) BAP et b) BSAP [180]	77
Figure II.31. Variation de la résistance à la compression des spécimens après un an d'immersion dans la solution 5% Na ₂ SO ₄ [180].	77
Figure II.32. Variation de masse des spécimens exposés aux cycles immersion/séchage dans la solution 5% Na ₂ SO ₄ : a) 60°C et b)105°C [180].....	77
Figure II.33. Variation de la résistance à la compression des spécimens exposés aux cycles immersion/séchage à 105°C dans la solution 5% Na ₂ SO ₄ [180].....	78
Figure II.34. Variation de coefficient d'absorption capillaire et la résistance à la compression dans la solution agressive des bétons BHP à base de sable de dune et sable concassé [181]	79
Figure II.35. Variation de la résistance à la compression, à la traction et la vitesse de propagation d'ultrason en fonction de la méthode et la durée de durcissement du BAP [146]	80
Figure II.36. Effet de la température maximale de durcissement sur la résistance à la compression des BAP : (à gauche) Variation de la résistance à la compression et (à droite) Résistance relative à la compression par rapport au durcissement dans 20°C [183].....	81

Figure II.37. Porosité et taille des pores de différents BAP durcissent à 20 °C, 60 °C and 80 °C [183].	81
Figure II.38. Résistance à la compression des BAP contenant la cendre volante : (a) Ciment = 550 kg/m ³ ; (b) Ciment = 450 kg/m ³ [184].	82
Figure II.39. Résistance à la compression des BAP contenant la fumée de silice : (a) Ciment = 550 kg/m ³ ; (b) Ciment = 450 kg/m ³ [184].	82
Figure II.40. Influence de type de cure sur la résistance à la compression d'un BAP en fonction des additions [141]	83
Figure II.41. Influence des additions minérales et le processus de traitement sur la résistance à la compression du BAP (ST : Cure standard- immersion dans l'eau et HT : traitement thermique) [185]	83
Figure II.42. Effet de mode de cure sur la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique de béton [138]	84
Figure II.43. Effet de mode de cure sur l'absorption initiale à la surface de béton [138].	85
Figure II.44. Effet de la durée et la méthode de durcissement sur la résistance à la compression et à la traction du béton [186].	85
Figure II.45. Effet de la durée et la méthode de durcissement sur la résistance à la flexion du béton [186].	86
Figure II.46. Variation de la résistance à la compression en fonction de de l'humidité (Température 30°C) [188].	87
Figure II.47. Effet de la température sur la résistance à la compression de BHP[188].	87
Figure II.48. Relations entre la résistance et degré d'hydratation (gauche) et porosité (droite) [189]	88
Figure II.49. Pourcentage de développement de la résistance à la compression du béton à base de CPA et CPJ en fonction de température [190].	89
Figure II.50. Pourcentage de développement de la résistance à la compression du mortier à base de CPA et CPJ en fonction de température [190].	89
Figure II.51. Chambre de traitement à la vapeur exposée aux rayons solaires utilisée par Benammar et al. [139]	90
Figure II.52. Effet des méthodes de durcissement, type de ciment et le rapport E/C sur le développement de la résistance à la compression [139].	90
Figure II.53. Effet de la température de cure sur la résistance à la compression de béton haute performance [191].	91
Figure III.1. Courbes granulométriques des granulats	96
Figure III.2. Observation microscopique des sables utilisés (Agrandissement= $\times 40$)	96
Figure III.3. Analyse par DRX des sables utilisés: (a): Sable alluvionnaire; (b):Sable Concassé et (c): Sable de dune.	97
Figure III.4. Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW30.	99
Figure III.5 : Image du malaxeur de béton utilisé	104
Figure III.6. Images de l'essai d'étalement : à gauche cône d'Abrams et table d'essai, à droite mesure de l'étalement	105
Figure III.7. Essai de la boîte-L : à gauche les dimensions de la boîte-L ; à droite mesure des hauteurs H ₁ et H ₂ ...	105
Figure III.8. Essai de stabilité au tamis : à gauche principe de l'essai ; à droite image de mesure	106
Figure III.9. Image des éprouvettes conservées dans l'eau	107
Figure III.10. Image des éprouvettes conservées à l'air	108
Figure III.11. Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression.	109
Figure III.12. Schéma statique et dispositif de l'essai traction par flexion	109
Figure III.13 : Principe de mesure de l'absorption capillaire (sorptivité).	110
Figure III.14. Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5% HCl et 5% H ₂ SO ₄	112

Figure IV.1. Variation de la porosité de la combinaison des sables : (a) binaires et (b) ternaires.....	115
Figure IV.2. Variation de l'étalement des BAP en fonction de la combinaison binaire et ternaire de sable.....	117
Figure IV.3. Variation de la viscosité T_{500} des BAP en fonction de la combinaison des sables en mélange binaire et ternaire	118
Figure IV.4. Variation de la capacité de remplissage du béton dans la boîte L et l'indice de ségrégation en fonction de sable en mélange binaire	121
Figure IV.5. Variation de la capacité de remplissage du béton dans la boîte L et l'indice de ségrégation en fonction de sable en mélange ternaire	122
Figure IV.6. Variation de la résistance en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SA-SC	124
Figure IV.7. Variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SC	125
Figure IV.8. Variation de la résistance en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SA-SD	126
Figure IV.9. Variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SD	127
Figure IV.10. Variation de la résistance à la compression en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SC-SD	128
Figure IV.11. Variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SC-SD	129
Figure IV.12. Observation microscopique de la compacité des différents BAP après durcissement dans l'eau (Agrandissement =120×) : (a) Témoin ; (b)80% SA+20% SC ; (c)60%SA+40%SD ; (d) 60%SC+40%SD	129
Figure IV.13. Variation de la résistance à la compression en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire SA-SC-SD.....	130
Figure IV.14. Variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système ternaire	131
Figure IV.15. Observation microscopique de la compacité des BAP (Agrandissement =120×) : (a) BAPC1 (témoin) ; (b) BAPC2	132
Figure IV.16. Comparaison de la résistance à la compression du système SA-SC à 7,28 et 90 jours en fonction de différents régimes de durcissement.....	134
Figure IV.17. Comparaison du rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SA-SC à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	135
Figure IV.18. Comparaison de la résistance à la compression du système SA-SD à 7,28 et 90 jours en fonction de différents régimes de durcissement.....	136
Figure IV.19. Comparaison de rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SA-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	137
Figure IV.20. Comparaison de la résistance à la compression du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement.....	138
Figure IV.21. Comparaison de rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	138
Figure IV.22. Comparaison de la résistance à la compression du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement.....	139

Figure IV.23. Comparaison de rapport $R_c/(R_c$ de C1 dans l'eau) du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	140
Figure IV.24. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire SA-SC	142
Figure IV.25. Variation du rapport $R_t/(R_t$ de témoin) en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SC	143
Figure IV.26. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire SA-SD	144
Figure IV.27 : Variation du rapport $R_t/(R_t$ de témoin) en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SD	145
Figure IV.28. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SC-SD	146
Figure IV.29 : Variation du rapport $R_t/(R_t$ de témoin) en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SC-SD	146
Figure IV.30. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire	147
Figure IV.31. Variation du rapport $R_t/(R_t$ de témoin) en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système ternaire	148
Figure IV.32. Comparaison de la résistance à la traction du système SA-SC à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	149
Figure IV.33. Comparaison de rapport $R_t/(R_t$ de C1 dans l'eau) du système SA-SC à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	150
Figure IV.34. Comparaison de la résistance à la traction du système SA-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	151
Figure IV.35. Comparaison de rapport $R_t/(R_t$ de C1 dans l'eau) du système SA-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	152
Figure IV.36. Comparaison de la résistance à la traction du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	153
Figure IV.37. Comparaison de rapport $R_t/(R_t$ de C1 dans l'eau) du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	154
Figure IV.38. Comparaison de la résistance à la traction du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	155
Figure IV.39. Comparaison de rapport $R_t/(R_t$ de C1 dans l'eau) du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement	156
Figure IV.40. Coefficient de sorptivité S des différents BAP à 28 jours	157
Figure IV.41. Corrélation entre le coefficient de sorptivité et la résistance à la compression à 28 jours des différents BAP	158
Figure IV.42. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans d'eau	158
Figure IV.43. Comparaison visuel des éprouvettes exposées aux différents milieux	160
Figure IV.44. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5% HCl	161
Figure IV.45. Corrélation entre la porosité de mélange de sable et la perte de la force de rupture en compression des BAP après 28, 90 et 180 jours d'exposition à 5% HCl	163
Figure IV.46. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5% H_2SO_4	164

Figure IV.47. Corrélation entre la porosité de mélange de sable et la perte de la force de rupture en compression des BAP après 28, 90 et 180 jours d'exposition à 5% H₂SO₄. 166

Liste des tableaux |

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. Proportions des constituants du BAP en fonction des types de sables, selon [156].....	58
Tableau II.2. Résistance à la compression des échantillons immergés dans NaCl et MgSO ₄ [160].....	74
Tableau II.3. Perte de masse et perte de la résistance à la compression dans solutions agressives [162]	75
Tableau II.4. Cycles de stockage adopté par [174]	88
Tableau III.1. Propriétés physiques de ciment	94
Tableau III.2 : Composition chimique de ciment.....	94
Tableau III.3 : Composition minéralogique de ciment.....	94
Tableau III.4 : Caractéristiques physiques de fillers	95
Tableau III.5 : Composition chimique de fillers	95
Tableau III.6 : Propriétés physiques de graviers	95
Tableau III.7. Propriétés physiques des sables.....	97
Tableau III.8. Analyse minéralogiques de l'eau de gâchage.....	99
Tableau III.9. Composition de référence.....	102
Tableau III.10. Proportions et masses des sables SA, SC et SD dans les compositions étudiées	102
Tableau III.11. Procédure de malaxage du BAP	104
Tableau IV.1. Perte de la force de rupture à la compression dans 5% HCl.....	162
Tableau IV.2. Perte de la force de rupture à la compression dans 5% H ₂ SO ₄	165

Introduction générale |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1) Contexte

Le béton autoplaçant BAP, est un béton spécial qui fournit des performances optimales des propriétés d'écoulement, de résistance et de durabilité, conformément aux exigences de durée de vie de certaines charges et conditions environnementales. Le BAP ayant une excellente capacité de remplissage et d'écoulement, et présente une bonne résistance à la ségrégation.

Le béton autoplaçant BAP connaît, aujourd'hui, une évolution rapide depuis sa création par les chercheurs japonais de l'université de technologie de Kochi au Japon, à la fin des années 80s [1-3]. L'idée du BAP a été éditée pour répondre au besoin d'un béton durable, de haute résistance, qui possède une grande fluidité et d'être capable à remplir les formes complexes des coffrages fortement ferrailés sans aucun recours aux moyens de vibration ou de compactage [1,2]. Le BAP a une capacité de déformation élevée sans ségrégation des constituants et sans ressuage grâce au volume important de la pâte cimentaire [4-6]. Le volume de gros granulats dans le BAP est généralement limité à 50% avec une taille maximale des grains de 16 mm, tandis que le volume de sable est à plus de 40% de volume total des agrégats [2,3]. Cette quantité de sable a pour rôle d'assurer la dispersion de gros granulats lors de l'écoulement de BAP par le fait de minimiser le frottement entre eux et ainsi d'assurer une bonne compacité de béton durci.

Le sable alluvionnaire SA est considéré comme l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés dans la production du béton en raison de ses propriétés physiques et morphologiques qui contribuent à l'augmentation de la densité du béton et à l'amélioration de ses propriétés rhéologiques et mécaniques. Les ressources de sable alluvionnaire SA semblent baisser, ce qui devrait être remplacé par d'autres types des sables abondants. Le sable de carrière SC et le sable de dune SD offrent de bonnes solutions à ce problème. L'utilisation du sable de carrière (SC) est très rare dans les constructions et est limitée à certaines constructions routières. Cependant, l'Algérie contient des quantités inépuisables du sable de dune (SD) qui n'a jamais été exploitées en pratique sérieusement dans les constructions. Les sables SC et SD qui renferment naturellement des teneurs élevées en fines peuvent constituer des composants intéressants pour la confection des BAP.

Il est évident qu'au moment de durcissement du béton les vides sont remplis par le gel silicates de calcium hydratés C-S-H et les grains de ciment nécessitent une humidité suffisante pour continuer leur hydratation. Pour cette raison, la cure est une étape importante après la mise

en œuvre du béton. Elle a une forte influence sur les propriétés du béton durci en vue de son effet significatif sur le processus d'hydratation de ciment. Parmi les techniques de cure employées on trouve: la cure par immersion dans l'eau, la cure à l'air libre à température ambiante et et la cure par l'enveloppement dans un film plastique.

Dans cette optique, la présente étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux (sable SD) et de réutilisation des déchets industriels (sable SC) pour la formulation du BAP. Cela intéresse non seulement l'économie du pays, mais résoudre également certains problèmes environnementaux en plus l'amélioration des propriétés du BAP.

Il faut noter que peu de travaux dans la littérature a traité la contribution combinée des effets des différents régimes de durcissement et l'utilisation des différents types de sable sur les propriétés mécaniques et la durabilité du BAP.

2) Objectifs visés

L'objectif de la présente thèse est multiple. Il s'agit d'évaluer d'abord les effets de la combinaison binaire et ternaire des sables SA, SC et SD sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP. Ensuite, l'étude des effets combinés de la nature du sable et des régimes de durcissement sur la résistance à la compression et à la traction du BAP. Une attention particulière sera attachée à l'effet de la combinaison binaire et ternaire de différents sables sur le comportement du BAP exposé aux milieux agressifs contenant la solution de l'acide HCl et de la solution sulfurique H₂SO₄.

3) Méthodologie de travail

Afin de répondre aux objectifs visés, la présente thèse est structurée en quatre chapitres divisés en deux parties :

La **première partie** est consacrée à une synthèse bibliographique, elle contient deux chapitres :

- ✚ **Chapitre I** : consacré à une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives au BAP et au durcissement du béton.
- ✚ **Chapitre II** : met le point sur les différentes études réalisées sur l'impact des sables SA, SC et SD de point de vue dosage et nature sur les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité du BAP. Nous présentons également une revue bibliographique sur l'effet des régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques de divers types de béton y compris le BAP.

La **deuxième partie** est consacrée au programme expérimental élaboré le long de cette étude, elle contient deux chapitres :

- ✚ **Chapitre III:** met en évidence les principales caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi qu'une explication de la procédure expérimentale approuvée, y compris les formulations des bétons testées et une description des différentes expériences effectuées au cours de ce travail.
- ✚ **Chapitre IV:** traite l'analyse et l'interprétation des différents résultats obtenus, il contient quatre parties :
 - ✓ Analyse et discussion de l'effet de la combinaison binaire et ternaire de SA, SC et SD sur la porosité du mélange de sables.
 - ✓ Discussion de l'effet des mélanges de sables sur l'ouvrabilité du BAP à savoir l'écoulement, dans les milieux non confinés et les milieux confinés, et la stabilité.
 - ✓ Analyse et discussion de l'effet des mélanges de sables en système binaire et ternaire sur la résistance à la compression et à la traction du béton, ainsi que l'effet combiné des combinaisons de sable et des régimes de durcissement sur ses propriétés mécaniques.
 - ✓ Analyse et discussion de l'effet de sable sur la durabilité du BAP exposé aux acides agressifs HCl et H₂SO₄.

Tout cela est enfin clôturé par une conclusion générale regroupant une synthèse générale de l'ensemble des résultats obtenus, suivie d'une présentation de quelques nouvelles perspectives de recherche.

Première Partie.
Synthèse Bibliographiques



Chapitre I .
Généralités sur le béton autoplaçant et les
méthodes de durcissement de béton

I.1. Introduction :

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives au BAP et le durcissement du béton. La première section traite la définition du BAP, son historique développement, ses avantages, les principes de base de sa composition, sa méthode de formulation, les essais caractérisant de ses caractéristiques et l'influence de ses composants sur leurs propriétés rhéologiques et mécaniques. La deuxième partie porte sur la littérature relative aux techniques de durcissement et ses effets sur les propriétés mécaniques du béton.

I.2. Définition de BAP

Le béton autoplaçant BAP, est un béton spécial qui fournit des performances optimales des propriétés d'écoulement, de résistance et de durabilité, conformément aux exigences de durée de vie de certaines charges et conditions environnementales. Le BAP est un béton fluide qui s'écoule librement à travers les ferraillements condensés, il remplit convenablement le coffrage, et se consolide sous son propre poids sans nécessité de moyens de vibration ou de compactage. Le BAP ayant une excellente capacité de remplissage et d'écoulement, et présente une bonne résistance à la ségrégation [1–4].

I.3. Histoire du béton autoplaçant

L'histoire du béton autoplaçant (BAP) remonte aux années 1980. La nécessité du BAP était déclarée la première fois par le prof. Hajime Okamura à l'université de technologie de Kochi au Japon en 1986 [5]. Pendant cette période, il y avait un manque dans le nombre des ouvriers qualifiés au Japon qui a directement affecté la qualité du béton (Figure I.1) [5,6]. À ce problème, le BAP a été édifié pour répondre au besoin d'un béton durable de haute résistance qui possède une bonne fluidité et qui est capable de remplir les coffrages de forme complexe et fortement ferrailés sans aucune nécessité de moyens de vibration ou de compactage [5–7].

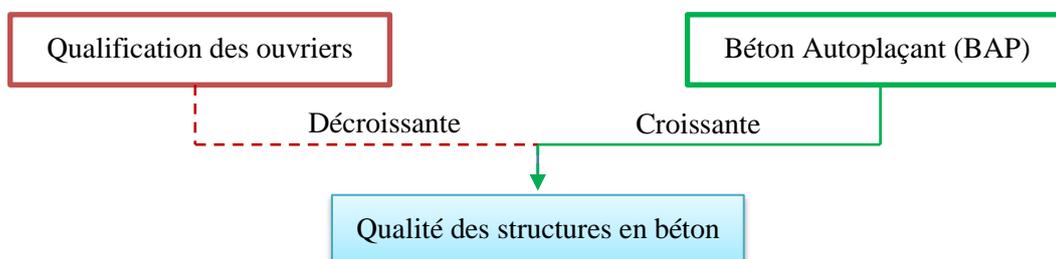


Figure I.1. Contexte de développement du béton autoplaçant au Japon [5]

À peu près à la même période, Aïtcin *et al.* [5] définissaient également le béton à haute performance comme un béton résistant à haute durabilité en raison du faible rapport eau/ciment. Depuis lors, le terme "béton hautes performances" est utilisé dans le monde entier pour désigner le béton à haute résistance. Par conséquent, Okamura a proposé de changer le terme de son nouveau béton en "béton autoplaçant à haute performance". En janvier 1989, Ozawa *et al.* [1] ont présenté le premier document sur le béton autoplaçant dans la deuxième conférence internationale sur l'ingénierie de structure et de la construction en Asie de l'Est et du Pacifique (EASEC-2) à Chlangmai-Thaïlande. En 1992 le concept de béton autoplaçant s'est répandu après la présentation d'Ozawa à la Conférence internationale CANMET/ ACI à Istanbul puis il est devenu un sujet d'intérêt commun pour les chercheurs et les ingénieurs intéressés par la durabilité du béton surtout après la publication d'Okamura en 1996 au congrès d'automne de l'ACI à New Orléans. En janvier 1997, le comité RILEM sur le béton autoplaçant a été formé et le 1^{er} symposium sur le BAP a eu lieu à Stockholm en septembre 1999 [5].

Depuis cette date, la recherche sur le BAP a commencé d'accroître dans le monde entier jusqu'à nos jours. Plusieurs études ont été publiées traitant les caractéristiques fraîches et durcies du BAP dans de nombreux pays. L'Algérie est l'un des 35 pays au monde qui publie de nombreuses recherches qui traite le sujet du BAP, selon l'étude statistique réalisée par Desnerck *et al.* [8] en 2016 (Figure I.2)

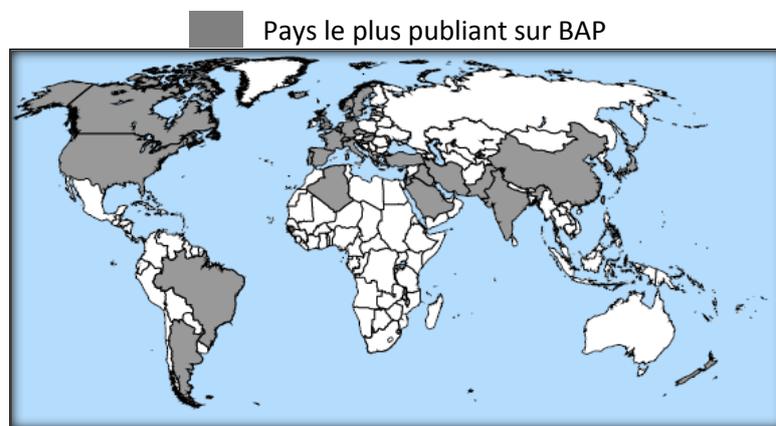


Figure I.2. Répartition géographique des pays publiant sur le BAP durant les 25 dernières années avant 2016 [8]

I.4. Conditions de BAP

Pour qu'un béton soit autoplaçant il doit avoir un niveau satisfaisant de capacité d'écoulement, de remplissage et de stabilité. Le BAP est un béton liquide hétérogène de grande densité, il est très difficile de maintenir ses composants sous une forme cohérente. Les composants qui ont de grandes masses ont tendance à se sédimenter (phénomène de ségrégation

des constituants). Toutefois, ce problème peut être résolu en ajoutant une quantité de matériaux fins et des superplastifiants SP. Les superplastifiants jouent un rôle prépondérant dans la réduction de la demande en eau du mélange, en produisant un béton très liquide avec moins d'eau possible [9]. Néanmoins, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation [10]. Dans cet axe, de nombreuses études de recherche ont été menées dans le but de définir les besoins en matières premières, les proportions du mélange, les exigences et les caractéristiques des matériaux, ainsi que les méthodes d'essai nécessaires pour produire et tester le BAP [7,11]. Généralement les études focalisent sur l'adaptation d'une bonne formulation du BAP et la prédiction de ses propriétés mécaniques et de sa durabilité [11–16].

I.5. Avantages du BAP

Le béton autoplaçant offre beaucoup d'avantages. Certains sont comme suit [2,9,17,18] :

- Écoulement facile à travers et autour de l'acier d'armature sous son poids propre et sans besoin d'équipement de vibration ou de compactage.
- Réduction des nuisances sonores grâce à l'absence de vibration.
- Favorise le bétonnage en grande masse dans les sections à géométrie complexe fortement ferrillée.
- Permet d'économiser le coût de coffrage grâce à son utilisation plus longtemps en raison de l'absence des équipements de vibration.
- Amélioration de la résistance grâce à l'augmentation de la compacité et la diminution de la porosité.
- Assure une bonne étanchéité à l'eau et offre ainsi des propriétés de transport réduites et une durabilité adéquate.
- Offre une résistance initiale élevée et permet ainsi une réutilisation plus rapide du moule de coffrage, ce qui diminue la durée de construction et améliore la productivité.
- Convient parfaitement aux moules minces à géométrie complexe.
- Mise en place rapide du béton ce qui augmente la capacité de construction.
- Nécessite moins de main-d'œuvre pour le transport et la mise en place du béton, améliorant ainsi l'environnement de travail et la sécurité.
- Améliore l'aspect esthétique du béton et fournit la bonne finition sans aucun pore extérieur.

I.6. Principes de base et exigences du BAP

En ce qui concerne sa composition, le BAP est composé à peu près des mêmes matériaux constitutifs que le béton ordinaire BO: ciment, granulats, eau plus les adjuvants chimiques et les additions minérales (cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau, filler calcaire,

pouzzolane, etc.) (Figure I.3) [19]. Habituellement, les adjuvants chimiques utilisés sont de type superplastifiant à haute réduction d'eau et éventuellement les agents modifiants de la viscosité. Les additions minérales sont utilisées, outre le ciment, comme matériau extra-fin et dans certains cas, elles remplacent le ciment. Cependant, il faut prendre un volume important en superplastifiant pour améliorer l'ouvrabilité et la viscosité apparente du BAP et pour tenir compte le volume important des éléments fins qui jouent le rôle de disperser les gros granulats afin de faciliter l'écoulement [20].

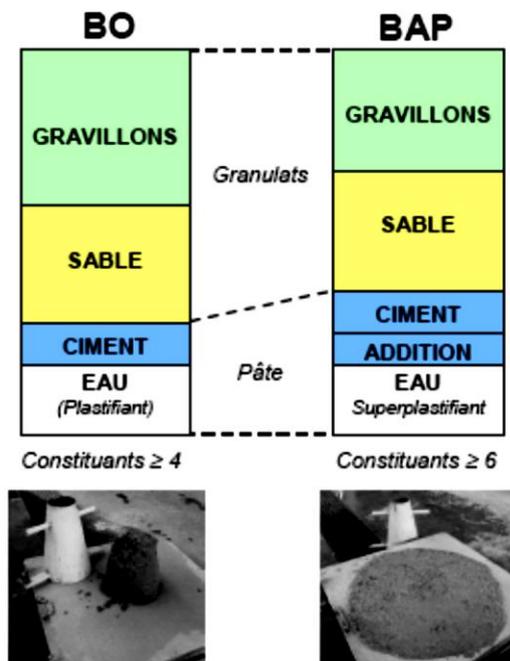


Figure I.3. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [19]

I.7. Formulation des BAP

Les objectifs de n'importe quelle méthode de formulation d'un béton sont [21]:

- Assurer une bonne maniabilité du béton après malaxage ;
- Le béton doit avoir un bon comportement mécanique, un aspect de parement lisse et une bonne durabilité ;
- Augmentation du rapport qualité/coût.

Il existe plusieurs méthode de formuler un BAP [22,23]. Trois approches pratiques ont été proposées par H. Okamura [6] :

- Augmentation de la quantité de pâte et l'utilisation d'un superplastifiant de manière à réduire le rapport eau sur liant E/L sans affecter la viscosité ;

- Utilisation d'un agent de viscosité, l'accroissement de la quantité de la pâte et l'utilisation d'un superplastifiant afin de d'augmenter la fluidité et diminuer le risque de ségrégation ;
- Faible augmentation de la quantité de liant ou de fibre et l'utilisation d'un superplastifiant et d'un agent de viscosité pour obtenir une fluidité et une viscosité satisfaisantes.

Les trois approches citées ci-dessus forment des lignes directrices de la formulation d'un BAP qui peuvent être améliorées selon les nécessités. Dans ce contexte, Khayat [11] a résumé les critères à prendre en considération pour concevoir un BAP (Figure I.4).

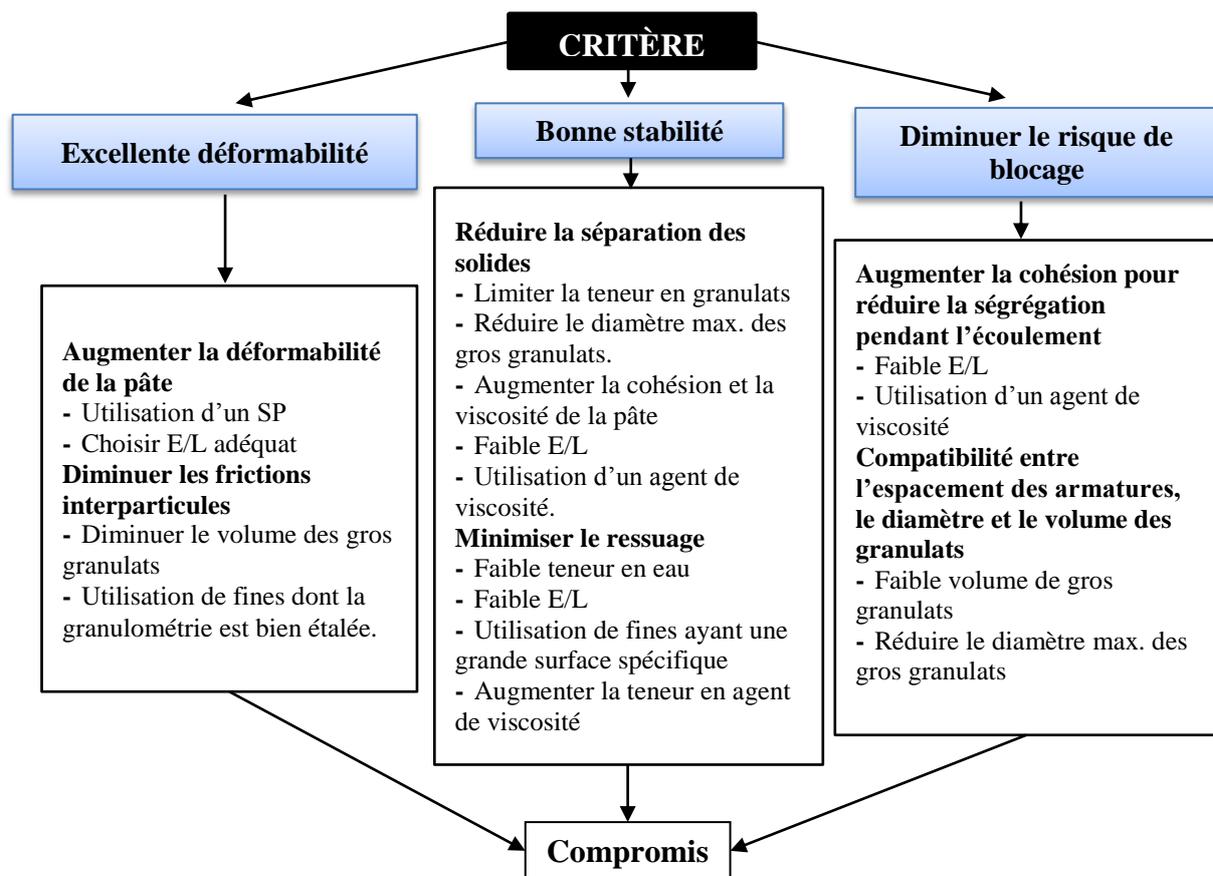


Figure I.4. Critères requis pour obtenir une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage d'après Khayat [11]

I.7.1. Méthode Japonaise :

cette méthode était la première approche de la formulation d'un béton autoplaçant ; elle a été proposée par Okamura et Ozawa en 1995 [24] et par Ouchi et *al.*[25] en 1997. Le principe de la méthode est le suivant :

- Limitation de la teneur volumique en gros granulats du BAP par 50% du volume de solide.

- Limitation de volume du sable à 40% du volume total de mortier.
- Optimisation de la pâte sur le mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- Ajustement de la quantité d'eau, de superplastifiant et des fines (additions minérales) pour mortier de manière à obtenir une viscosité suffisante mesurée par temps d'écoulement dans l'entonnoir en V, et une fluidité importante mesurée par l'étalement au mini-cône (Figure I.6). Les étapes précédentes sont organisées dans l'organigramme de la Figure I.5 ci-après.

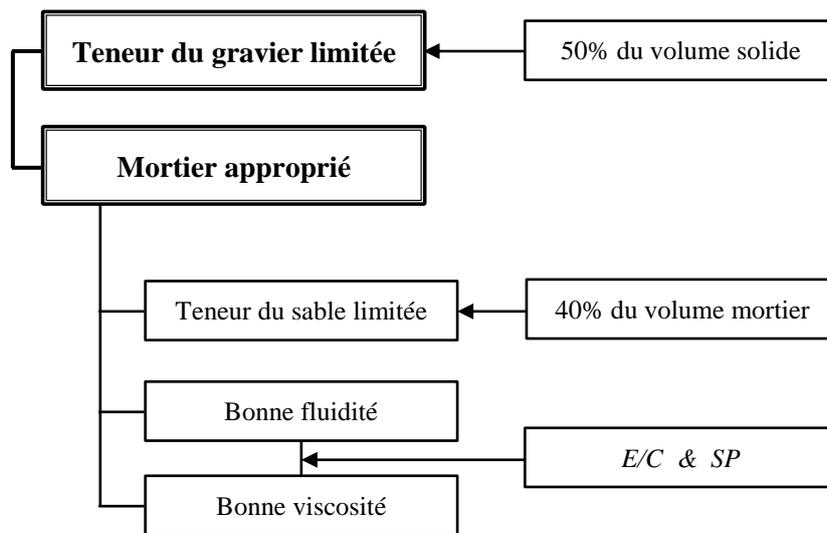


Figure I.5. Méthode Japonaise de formulation d'un BAP proposée par Okamura et Ozawa [20] et par Ouchi et al.[25]

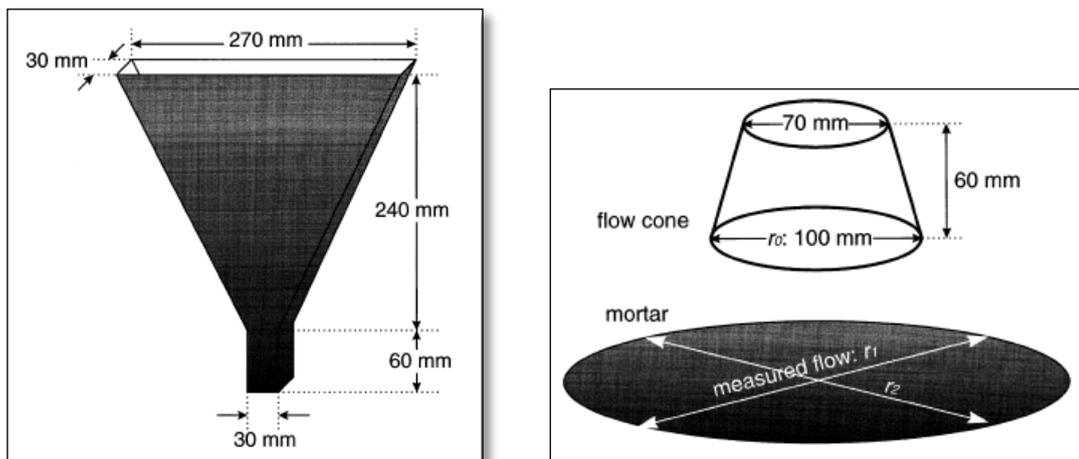


Figure I.6. Dimensions de mini entonnoir V et mini-cône utilisés par[24,25]

Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif Γ_m et vitesse relative d'écoulement R_m . La fluidité du mortier est donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2} \quad \text{Équation I-1}$$

Où r_1 et r_2 représentent les diamètres orthogonaux des étalements et $r_0 = 100 \text{ mm}$ le diamètre inférieur du mini-cône.

La viscosité relative du mortier est donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \quad \text{Équation I-2}$$

Avec : t le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en second.

Afin d'obtenir un BAP acceptable, il faut avoir simultanément : $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \text{ s}^{-1}$

Cette méthode est générale et simple. Il faut faire attention aux risques de blocage.

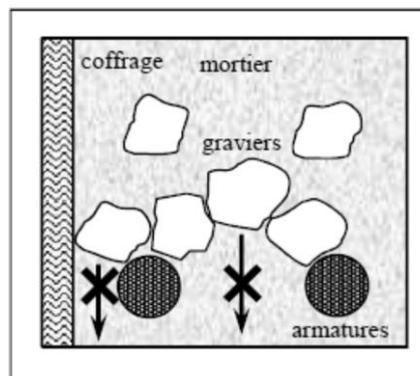


Figure I.7. Phénomène de blocage des granulats aux endroits d'un obstacle [26]

Dans le schéma de la [Figure I.7](#), l'entraînement des granulats au droit des armatures est facilité par des forces de viscosité (qui sont liées à la viscosité du mortier et la vitesse d'écoulement).

I.7.2. Méthode LCPC : suggérée par DE LARRAD et al.[27]

Au laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires ;
- Les proportions des mélanges ;
- La compacité propre ;
- La densité apparente.

La procédure adoptée pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- La proportion de liant est fixée à priori (70% de ciment et 30% d'addition par exemple) ;
- Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé ;
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé ;
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

Une formulation du BAP est donc basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance à la compression ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent, les propriétés requises en déformabilité, stabilité et résistance à la compression pour BAP sont atteintes.

I.7.3. Méthode suédoise : proposée par PETERSSON et al. [28]

La méthode est basée sur l'étude effectuée par TANGTERMSIRIKUL et al. [29]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. À l'aide de l'Équation I-3, ils estiment le volume de la pâte critique pour le blocage pour un confinement donné et pour chaque rapport granulats/sable (G/S).

$$R_b = (1 - V_p) \sum_i \frac{y_i}{v_{critique;d_i}} \quad \text{Équation I-3}$$

y_i : Proportion volumique de grains de taille d_i rapportée au volume de granulats ;

V_p : Proportion volume de la pâte dans le béton ;

$v_{critique;d_i}$: Fraction en volume de grain de taille « d_i » induisant un blocage.

Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées en ouvrabilité, stabilité et résistance à la compression.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulats.

I.7.4. Autres méthodes :

D'autres méthodes de formulation ont été publiées telle que la méthode basée sur le plan d'expérience proposée par Khayat [11] en 1999 et celle qui repose sur la théorie de « l'excès de pâte » [30].

Khayat [11] a prouvé que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition. Ils ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de liant (ciment et ajouts), le rapport massique eau/liant (E/L), la masse de superplastifiant et masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à vingt-cinq. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, celle-ci fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas aux requises pour les BAP en : étalement, capacité de remplissage, etc.

I.8. Constituants de Béton autoplaçant

Les matériaux constituants du BAP sont les mêmes que ceux utilisés dans le béton conventionnel. Dans la plupart des cas, le choix des matériaux dépend à sa disponibilité et au type de structures à construire. Toutefois, afin de garantir l'uniformité des performances du BAP, des précautions supplémentaires lors de la présélection des matériaux et contrôle périodique de ses propriétés sont nécessaires [31–36]

I.8.1. Ciment

Le ciment utilisé pour le BAP ne devrait pas contenir un taux élevé en C3A pour éviter les problèmes de chute de l'ouvrabilité [9]. Le choix du type de ciment dépend des exigences générales du béton, telles que la résistance et la durabilité.

Le ciment Portland ordinaire est le plus largement utilisé pour produire divers types de béton. Il est également un élément clé du BAP. Il est utilisé seul ou en combinaison avec additions. Le ciment Portland améliore la fluidité du BAP lorsqu'il est utilisé avec de l'eau pour lubrifier les agrégats [24]. Le ciment Portland peut également affecter la résistance à la ségrégation du BAP par influence sur la densité de la pâte de ciment constituant le béton. Après avoir réagi avec de l'eau, le ciment Portland réduit également la porosité et donne une structure de béton compacte conduisant à de faibles propriétés de transport et à une bonne durabilité [37].

I.8.2. Additions minérales

Les ajouts minéraux sont des matériaux finement divisés, qui contribuent aux propriétés du béton durci par une activité hydraulique ou pouzzolanique, ou les deux. Ils sont très bénéfiques pour les propriétés du béton et sa durabilité en raison de leurs effets physiques et chimiques sur la compacité et la microstructure des matériaux. [38–40]. Ils peuvent être utilisés comme compléments ou remplaçants partiels du ciment selon les propriétés et l'effet souhaité sur le béton [37,41].

Les additions minérales sont classés comme naturels et artificiels. Les fillers calcaires, la pouzzolane naturelle, l'argile calcinée et les schistes font partie du type naturel. Les sous-produits industriels tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau broyé sont fréquemment utilisés comme ajouts réactifs. De plus, les ajouts peuvent être fabriqués industriellement tels que le métakaolin à haute réactivité. Les fillers calcaires et les additions artificielles ont été le plus souvent utilisés dans le BAP [33,42–46]. Certaines additions éliminent le besoin d'agents de viscosité (réteneur d'eau) et améliore les propriétés du béton à l'état frais et durci [47,48].

La distribution granulométrique et l'absorption d'eau des additions minérales affectent directement la demande en eau lors de la préparation du BAP. Les fillers calcaires sont largement utilisés et offrent d'excellentes propriétés et un bon parement [49,50]. Les fillers améliorent probablement la viscosité du BAP et les propriétés mécaniques [51] et augmentent également la demande en eau et en superplastifiant vue leur finesse et leur capacité d'absorption [52–56]. En générale les fillers affectent les performances de béton ordinaire et BAP en sens positif ou négatif, tout dépend de la nature des fines [51,57]. Il a l'effet le plus positif d'améliorer la résistance à la compression et à la flexion [33,44,58,59].

Les cendres volantes de qualité appropriée peuvent être ajoutées pour améliorer la qualité et la durabilité du BAP [49,60]. Les cendres volantes augmentent la cohésion et réduisent la sensibilité aux changements de teneur en eau. [49,61,62].

La fumée de silice améliore la résistance à la ségrégation et les propriétés mécaniques en raison de son haut degré de finesse et de sa forme sphérique [44,60,63].

Le laitier de haut fourneau granulé broyé fournit une faible chaleur d'hydratation et améliore les propriétés rhéologiques [48,64].

I.8.3. Superplastifiants

Le superplastifiant (SP), haut réducteur d'eau, est un composant essentiel du BAP pour lui fournir l'ouvrabilité nécessaire [17,25]. Il réduit la viscosité plastique du béton par leur action lubrifiante [37]. Les SP sont des molécules organiques (polymères) chargées négativement alors que les particules solides de ciment sont chargés positivement en raison de la concentration importante d'ions calcium dans la solution interstitielle, et de l'adsorption de ces ions sur les C-S-H [65–69]. Lors de malaxage du béton, le SP est adsorbé à la surface des particules solide de ciment ce qui augmente les forces de répulsions électrostatiques ou stériques et induit à la diminution de contact entre ces particules [70,71]. De ce fait, l'eau retenue entre particules est libérée et l'ouvrabilité du béton sera améliorée. La capacité d'un superplastifiant à améliorer l'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs tels que le type et le dosage de SP, le rapport eau / liant, la nature du ciment et les additions minérales [35].

Les superplastifiants de nouvelle génération à base de poly-Carboxylate Éther (PCE) sont les plus utiles pour la confection de BAP [72,73]. Cette génération ne présente pas d'effets secondaires retardataires. Elle permet d'obtenir une excellente réduction du rapport E/L, bonne ouvrabilité et augmentation de la résistance dès le premier jour [49,74,75]. Cela est probablement lié au développement d'une microstructure plus dense lorsque les grains de ciment sont bien dispersés [34,73]. L'utilisation de SP permet de réduire la perméabilité et d'améliorer la durabilité grâce à la réduction du rapport eau/ciment et la création d'une structure plus compacte [10,76,77].

I.8.4. Eau de gâchage

L'eau est le composant le plus important du BAP. L'hydratation du ciment ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. Une eau adéquate est requise pour l'hydratation du ciment et elle est nécessaire en présence avec le superplastifiant pour atteindre la fluidité du BAP en lubrifiant la matrice [24].

L'eau destinée à être utilisée dans le béton doit être propre et exempte de substances nocives. Une eau contenant des substances nocives telles que des limons, des particules en suspension, des matières organiques, de l'huile ou du sucre peut affecter négativement la résistance et les propriétés de prise du ciment [37].

L'eau de mélange pour BAP doit être chimiquement sûre. Le pH de l'eau de mélange doit être compris entre 6,0 et 8,0 [37,72,78]. Il ne doit pas contenir de grandes quantités de solides

dissous, de chlorures, d'alcalis, de carbonates, de bicarbonates, de sulfates et d'autres sels pouvant nuire à la performance du béton. L'eau contenant des ions chlorures, des ions SO₃ et des solides dissous inférieurs à 500, 1000 et 2000 mg/L, respectivement, est généralement satisfaisante pour la fabrication de béton [37,78]. Par conséquent, l'adéquation de l'eau doit être examinée avant utilisation.

I.8.5. Gros granulats (Graviers)

Comme pour tout béton, les gros granulats sont également un élément-clé dans la composition du BAP. Il est possible d'utiliser des granulats naturels, arrondis, semi-concassés ou concassés pour confectionner du BAP [9,79,80]. Les recyclés issus des déchets de constructions ont peut-être utilisés comme remplacement partiel ou totale des granulats naturels dans BAP [81,82]. Les granulats influencent de manière significative les propriétés du BAP à savoir la fluidité, la résistance à la ségrégation, la résistance mécanique du béton et la durabilité [83]. Les caractéristiques des granulats doivent être prises en compte pour les performances requises du béton frais et durci [80]

Les caractéristiques physiques telles que la taille, la forme, la texture de la surface des grains et la porosité des gros granulats affectent les propriétés et la durabilité du béton. La taille maximale nominale pour BAP peut être de 20 ou 25mm. Cependant, une taille plus petite (10 à 20 mm) est préférable pour produire une résistance élevée [9,79,84] et pour réduire la ségrégation du BAP frais. La forme et la texture des gros granulats influencent la compacité du squelette granulaire et l'affectent considérablement les propriétés du BAP [85–87]. Pour une bonne fluidité du BAP, les granulats sphériques sont préférables que les granulats anguleuses (concassés) car ils diminuent la viscosité plastique du BAP grâce au faible frottement entre ses grains [9,88,89]. Inversement, les granulats anguleuses ou concassés sont bénéfiques pour développer une bonne résistance et à une forte liaison avec la pâte cimentaire grâce à la surface rugueuse de ses grains [90,91]. Cependant, la rugosité de la surface, l'aplatissement et l'angularité des grains des granulats concassés ne favorisent pas l'écoulement du BAP, dû au frottement important entre ses grains et à la viscosité plastique accrue [92]. Ce type de granulats nécessite plus d'eau et plus de superplastifiant pour maintenir l'ouvrabilité et l'écoulement du béton.

La granulométrie des gros granulats affecte également les propriétés d'écoulement et la résistance à la ségrégation du BAP [89]. La bonne distribution des grains contribue à la formation d'un mélange optimal moins poreux, à l'amélioration de l'ouvrabilité et à minimiser

le risque de ségrégation dans le béton frais [89]. Il améliore également les propriétés mécaniques et la durabilité du béton durci grâce à l'amélioration de la compacité [93]. Les mélanges du BAP peuvent utiliser des granulats mal gradués mais cela nécessite de fournir plus de viscosité pour éviter les problèmes de ségrégation.

I.8.6. Granulats Fin (Sables)

Selon la norme NF EN 12620+A1 [94], les sables destinés à la confection de béton est un ensemble des grains minéraux dont la dimension maximale d n'excédant pas 4 mm. Ils sont issus de l'altération naturelle ou de concassage des roches massives et meubles, ou du traitement des granulats artificiels.

Le sable est le granulat fin le plus couramment utilisé dans le béton. Il constitue le deuxième ingrédient dans la phase des granulats du BAP. Le sable occupe un volume très important dans le BAP où il dépasse 40% du volume de la pâte [5,17,91]. Comme les granulats grossiers, le sable influence également les performances du BAP. Il augmente la capacité d'écoulement et la résistance à la ségrégation du béton frais lorsqu'il est utilisé en quantité appropriée [24,95] dans laquelle il assure la bonne dispersion de gros granulats lors de l'écoulement par le fait de minimiser le frottement intergranulaires et assurer ainsi une bonne compacité de béton durci qui influe sur les performances mécaniques et la durabilité du BAP [83].

Il existe plusieurs types de sable dont naturels et artificiels tels que le sable alluvionnaire SA (rivière), sable de carrière SC, sable de dune SD, sable de mer, le sable recyclé etc. les trois sables SA, SC et SD sont les sables les plus disponibles en Algérie. Le sable SA est couramment utilisé dans les bétons de structures du génie civil, hydraulique et d'ouvrage d'art. Tandis que, le sable SC est utilisé dans le domaine des travaux publics et infrastructures routières. Bien que, SD est très peu utilisé dans le béton de structure son utilisation reste très limitée dans les travaux secondaires, il peut être utilisé comme lit de pose dans le revêtement du sol, remblai de protection des canaux des réseaux de l'AEP et de l'assainissement et aussi des réseaux d'électricité et du gaz etc.

A. Sable Alluvionnaire SA

Le sable alluvionnaire SA, également appelé « sable des rivières », est un sable naturel siliceux issu des rivières. Il provient de l'action de l'eau sur les rochers. Le sable SA caractérise par sa forme arrondie, sa dureté et sa granulométrie étalée. Ses classes granulométriques sont

généralement 0/3 et 0/5 mm. Le sable SA est l'un des matériaux de construction les plus importants utilisés dans la fabrication du béton en raison de ses propriétés physiques et morphologiques qui contribuent à l'augmentation de la densité du béton et à l'amélioration de ses propriétés rhéologiques et mécaniques. En raison de sa grande utilisation dans la construction, les ressources de sable alluvionnaire SA semblent baisser, ce qui devrait être remplacé par d'autres types de sables abondants. Le sable de carrière SC et le sable de dune SD offrent de bonnes solutions à ce problème.

B. Sable concassé ou sable de carrière SC

Le sable concassé SC obtenu par abattage et concassage des roches massives, ce qui leur donne des formes anguleuses à surfaces rugueuses. Il est considéré comme sous-produit issu de la production des granulats concassés. Le sable concassé SC contient généralement une teneur en particules fines ($<80\mu\text{m}$) très élevée ce qui le considère comme une deuxième source de filler [96–99]. La forme anguleuse, la rugosité et la capacité d'absorption d'eau des grains de SC favorisent une bonne adhérence des grains [100], puisqu'elles permettent d'augmenter les liaisons pâte-sable et densifient la couche de ces liaisons grâce à une réaction chimique entre les cristaux de calcite et le ciment pour former le monocaboaluminate [101]. Cette réaction est limitée à la surface des agrégats en raison de la faible mobilité des ions carbonates [102–105]. De ce fait, les caractéristiques mécaniques de béton sont améliorées à savoir la résistance à la compression et à la traction.

C. Sable de dune SD

Le sable dunaire SD est un sable fin siliceux disponible en quantités très abondantes dans les régions désertiques. Le SD se caractérise par une grande finesse et une capacité d'absorption d'eau élevée. La granulométrie de SD est très serrée où la taille des particules est dans la classe 0.08-0.8 mm, [106,107]. Les formes des grains de SD sont sphériques arrondies d'une surface lisse avec des grosseurs presque uniformes [107,108]. Cette forme des grains est un facteur bénéfique pour améliorer la maniabilité du béton. La masse volumique absolue de SD est dans l'intervalle 2.44 à 2.87 g/cm^3 selon le site de sa provenance [109,110]. L'utilisation de SD comme granulats fin jusqu'à certaine limite améliore l'ouvrabilité de béton, cette limite varie d'un sable à un autre selon leurs propriétés et leurs origines [55,111–115]. La forme sphérique arrondie de SD peut être une propriété utile pour améliorer l'écoulement du béton. Mais la forte absorption d'eau et la grande finesse de SD peuvent conduire à un béton cohérent avec une faible ouvrabilité ce qui nécessite d'ajouter une quantité d'eau supplémentaire et/ou d'utiliser un

superplastifiant afin de garder une maniabilité satisfaisante [110]. L'augmentation de la quantité du SD dans le béton peut causer la diminution de la résistance à la compression et à la traction vue que sa granulométrie serrée [110,111,113,116].

La revue bibliographique sur l'effet de différents types de sables sur les propriétés à l'état frais, à l'état durci et à la durabilité sera exposée en détail dans le chapitre II suivant.

I.9. Caractéristiques du BAP

I.9.1. Caractéristiques du BAP à l'état frais :

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures et coffrages).

Ils doivent donc offrir une bonne résistance à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage), mais aussi à la ségrégation « statique » (une fois en place), afin de garantir l'homogénéité de leurs caractéristiques, de ne pas présenter de ressuage ou de tassement et de garantir un remplissage optimal des coffrages.

Trois principaux paramètres permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP et leurs propriétés à l'état frais:

- ✦ **Fluidité et mobilité en milieu non confiné** : Signifie la capacité du BAP à s'écouler et à remplir les coffrages infinis avec une viscosité suffisante. Ce paramètre est caractérisé par la mesure d'étalement au cône d'Abrams selon norme NF EN 12350-8.
- ✦ **Déformabilité et mobilité en milieu confiné** : Il s'agit de la capacité du BAP à s'écouler à travers des obstacles et à remplir les coffrages fortement armés sans ségrégation dynamique. La déformabilité est caractérisée par l'essai de la boîte en L selon la norme NF EN 12350-10.
- ✦ **Stabilité du mélange et résistance à la ségrégation statique**: C'est la capacité du BAP à rester homogène après sa mise en œuvre. Ce paramètre est identifié par l'essai de stabilité au tamis selon norme NF EN 12350-11.

I.9.1.1. Essai d'étalement (*Slump-flow*):

La fluidité et la mobilité du BAP en milieu non confiné sont caractérisées par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou *slump-flow*). Le matériel utilisé pour réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique (Figure I.8). L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en 6 litres de béton, puis de le soulever et de

mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue (2 mesures correspondant à 2 diamètres perpendiculaires). Plus le diamètre est grand, plus le matériau est fluide.

La norme NF EN 12350-8 classe le BAP en trois catégories selon l'étalement :

- $550 \leq SF \leq 650 \text{ mm}$: BAP convient aux structures en béton non renforcées ou légèrement renforcées.
- $660 \leq SF \leq 750 \text{ mm}$: BAP convient aux applications courantes (murs, colonnes).
- $760 \leq SF \leq 850 \text{ mm}$: BAP convient aux applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes.

Des valeurs de $SF > 850 \text{ mm}$ peuvent être spécifiées dans quelques cas spéciaux mais le grand soin devrait être pris concernant la ségrégation et la taille maximum.

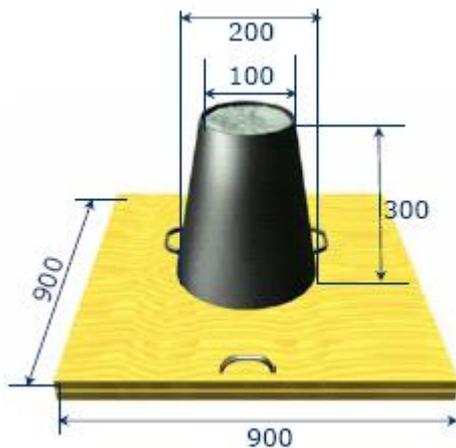


Figure I.8. Essai d'étalement au cône (slump-flow) [117]

Par ailleurs, il est possible de mesurer le temps T_{500} pour atteindre un étalement de 500 mm, ce qui donne la vitesse d'écoulement et par conséquent indique la viscosité apparente. La norme [NF EN 12350-8] classe le BAP en deux viscosités apparentes selon le temps T_{500} : VS1 ($T_{500} < 2 \text{ sec}$) et VS2 ($T_{500} \geq 2 \text{ sec}$).

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (*V-funnel*) (Figure I.9). Cet essai (*V-Funnel*) consiste à déterminer le temps d'écoulement du BAP à travers l'orifice d'un entonnoir en forme V, ce qui indique sa viscosité.

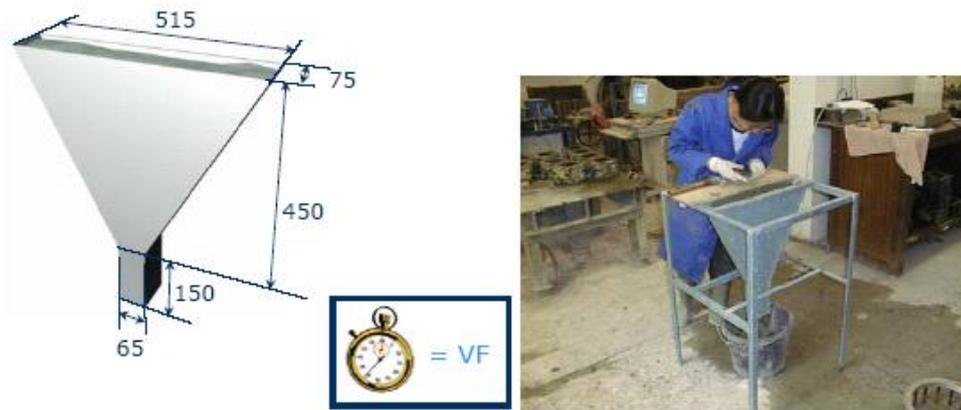


Figure I.9. Entonnoir en forme V (V funnel) [117]

I.9.1.2. Essai de la boîte en L (L-box test) :

La mobilité du BAP en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée, sont mesurées avec l'essai de la boîte en forme de L.

Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir du BAP dans la partie verticale d'une boîte en forme de L, puis en levant une trappe (séparant les parties verticale et horizontale de la boîte) de laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers des armatures de diamètre de 12 mm (ferraillage complexe : 3 barres distantes de 41 mm, ou simple : 2 barres distantes de 59 mm) (Figure I.10). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticale (H_1 côté trappe) et horizontale (H_2) [79].

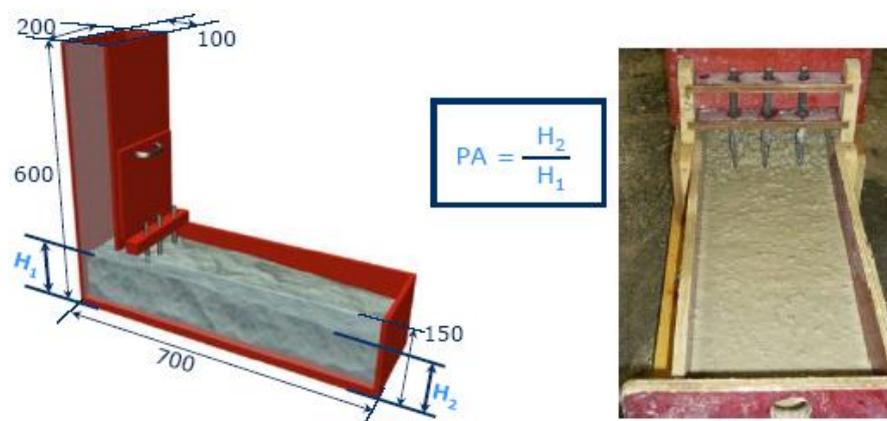


Figure I.10. Essai de la boîte en L (L-box test)[117]

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage $PL = H_2/H_1$ qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné.

Pour que le BAP soit accepté, la capacité de remplissage PL doit être supérieure à 0,8 selon la norme NF EN 12350-10. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

Il existe d'autres essais, tels que l'essai de tube en U et l'essai de caisson, qui permettent de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP (Figure I.11).

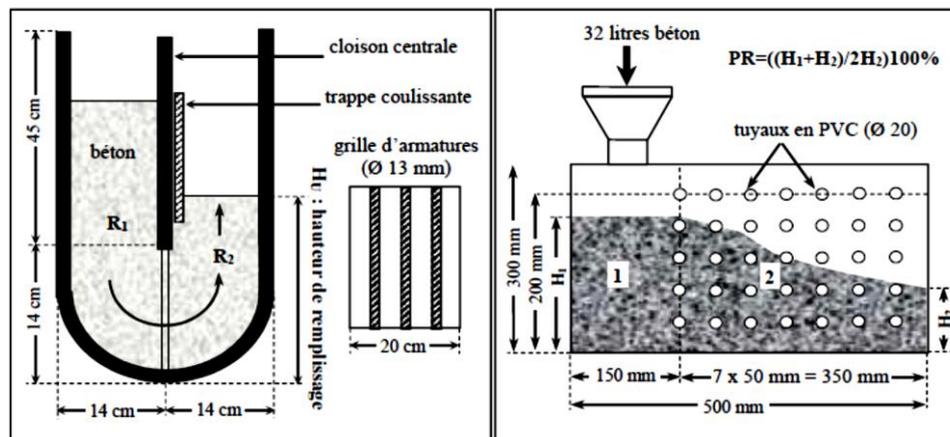


Figure I.11. Essai de la boîte en U (à gauche), essai de caisson de remplissage (à droite) [26]

I.9.1.3. Essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation « statique » et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité.

Il consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 15 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis (Figure I.12).

Le pourcentage en masse de laitance passée à travers le tamis, par rapport à la masse de l'échantillon initial, exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20%, Selon la norme NF EN 12350-11. Plus il est faible, plus le béton est stable. Au-delà de 20%, le béton présente un risque de ségrégation.

La norme NF EN 12350-11 classe le BAP en deux catégories selon l'indice de ségrégation :

- $SR1 \leq 20\%$: BAP applicable aux dalles de faible épaisseur, applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 m et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.
- $SR2 \leq 15\%$: BAP mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 m et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm et dans les applications verticales avec un intervalle d'écoulement maximum de 80 mm, si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5 m.

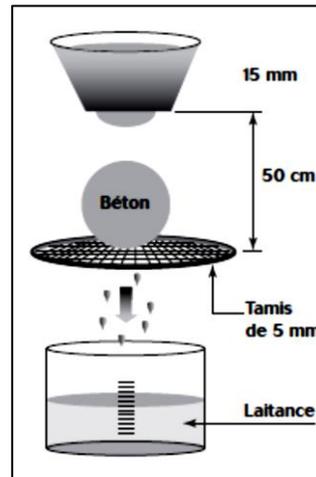


Figure I.12. Essai de stabilité au tamis[118]

I.9.2. Caractéristiques du BAP à l'état durci :

La résistance est l'une des propriétés les plus importantes spécifiées pour le béton car elle reflète directement la capacité de la structure à résister aux efforts et elle constitue un indicateur raisonnable des autres propriétés [119].

I.9.2.1. Résistance à la compression

Les bétons autoplaçants semblent développer en général des valeurs de résistance à la compression plus élevées par rapport au béton ordinaire BO de la même classe de résistance [120]. Ceci est attribué aux changements dans la zone d'interface de transition (ITZ) causés par les additions minérales. Zhu et *al.*[39] ont étudié les propriétés micromécaniques de la zone ITZ d'un BAP et d'un béton ordinaire BO. Ils ont rapporté que la zone ITZ était plus dense et significativement plus uniforme dans le BAP que dans le BO. Cependant, Lorsque les rapports E/L sont similaires, la résistance à la compression et le développement de la résistance du BAP et du BO ne sont pas significativement différents (Figure I.13). Le développement de la résistance du BAP et du BO sur une période de temps est presque similaire [40].

Le BAP peut facilement obtenir une résistance à la compression de 50 à 60 MPa à 28 jours [121]. La résistance pourrait être encore améliorée en utilisant les additions au ciment [122].

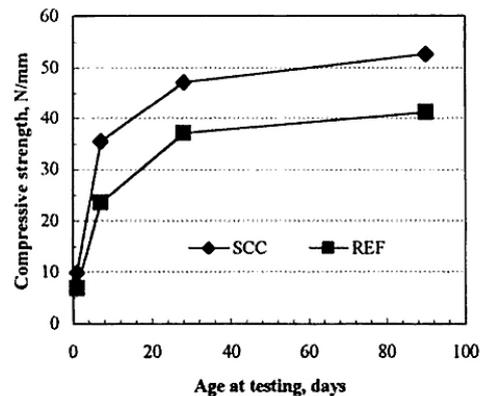


Figure I.13. Évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BO (REF) correspondant [120]

Les travaux de [123,124] montrent que la résistance mécanique s'accélère aux jeunes âges en utilisant les fillers. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

L'augmentation de la résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours. Le dosage en adjuvant, dans la formulation des BAP, peut aussi influencer sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Généralement les résistances caractéristiques à la compression et à la traction se situeraient, respectivement, autour de 60 MPa et 5 MPa [125].

I.9.2.2. Résistance à la traction

En général, la résistance à la traction du BAP est supérieure à celle du BO [119,126]. Cela peut être dû à la teneur élevée en pâte dans le BAP qui induit une déformabilité légèrement supérieure et également dû à une meilleure homogénéité par rapport au béton conventionnel [127].

Le rapport de résistance à la traction/compression du BAP était supérieur de 10 à 30% à celui du BO. Ceci résulte probablement d'une meilleure microstructure du BAP [128].

I.10. Méthodes de durcissement et leurs effets sur le béton

I.10.1. Introduction

Il est évident que les vides dans le béton sont remplis par le gel C-S-H durant le durcissement et les grains de ciment nécessitent une humidité suffisante pour continuer leur hydratation. Pour cette raison, la cure est une étape importante après la mise en œuvre du béton. Elle a une forte influence sur les propriétés du béton durci en vue de son effet significatif sur le processus d'hydratation de ciment [129]. Un durcissement adéquat en présence de l'humidité augmente la résistance mécanique et la durabilité de béton.

I.10.2. Définition de la cure

La cure du béton est la protection mise en œuvre pour éviter une dessiccation de la surface du béton, pour lui assurer une maturation satisfaisante et donc favoriser son bon durcissement. La vitesse d'évaporation de l'eau (dessiccation du béton) dépend de la température de l'air, de la vitesse du vent, de la température du béton, de l'humidité relative de l'air [130].

I.10.3. Rôle de la cure

La cure ou le mûrissement du béton est nécessaire pour garantir un bon service de la structure tout au long de sa vie. L'absence de la cure appropriée peut ruiner les propriétés essentielles du béton telles que les résistances mécaniques et la durabilité. La cure est encore plus importante aujourd'hui qu'auparavant pour au moins trois raisons [37]:

- **La Dessiccation précoce** : Les ciments d'aujourd'hui gagnent une bonne résistance au jeune âge qui permet aux constructeurs de décoffrer rapidement les moules de coffrages dans des temps courts après la mise en place du béton. Cela contribue à la dessiccation précoce du béton.
- **Le faible rapport E/C** : Les nouveaux bétons d'aujourd'hui, comme BAP et BHP, au faible rapport eau/ciment ont tendance à provoquer une auto dessiccation. Une alimentation en eau du béton, provenant de la cure adéquate, est nécessaire pour contrôler ce phénomène.
- **L'utilisation des additions minérales** : Les bétons modernes contiennent généralement des additions minérales, telles que les cendres volantes et le laitier de haut fourneau finement broyé, qui ont une vitesse de réaction plus lente. Un durcissement adéquat pour une longue période est nécessaire au développement correct des propriétés de ces bétons.

I.10.4. Effet de la cure sur le béton

Il est connu que les réactions chimiques entre le ciment et l'eau produisent un gel C-S-H qui lie les constituants du béton, à savoir granulats grossiers et fins, additions minérales, etc., et convertit ces fragments en masse solide. Après son malaxage avec de l'eau, les ciments nécessitent de l'humidité pour convertir l'hydroxyde de calcium en gel C-S-H qui remplit, après 10 jours de mûrissement, les vides dans le béton. De ce fait, pour une microstructure dense et une imperméabilité accrue, un durcissement prolongé est nécessaire pour que le béton soit durable [131].

Le régime de durcissement influe significativement sur les propriétés du béton durci, en particulier sur sa perméabilité, car il a un effet remarquable sur l'hydratation du ciment. L'importance d'un durcissement adéquat est très évidente dans son effet sur la perméabilité de la «peau» (surface) du béton. Un durcissement inapproprié affaiblit la surface du béton par augmentation de sa perméabilité.

La température de durcissement est l'un des principaux facteurs qui influent sur le taux de développement de la résistance. À température élevée, le béton ordinaire perd sa résistance en raison de la formation de fissures entre deux matériaux thermiquement incompatibles, la pâte de ciment et les agrégats. Lorsque le béton est durci à haute température, sa résistance initiale est normalement supérieure à celle du béton durci à basse température, mais elle est généralement réduite à 28 jours et plus (Figure I.14) [132].

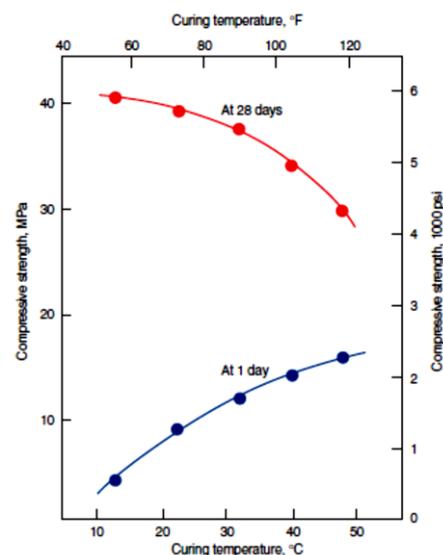


Figure I.14. Effet de la température de durcissement sur la résistance à un jour et à 28 jours [133]

I.10.5. La cure du béton autoplaçant

Il est clair que le durcissement est essentiel pour toute construction en béton, il l'est très particulièrement pour le béton autoplaçant. Le BAP est très susceptible au séchage en surface en raison de la quantité élevée de la pâte, du faible rapport eau/liant et du manque d'eau ressuée à la surface, qui joue le rôle de protection contre la dessiccation. Cela peut entraîner des fissures dues à la perte précoce d'humidité ou à la formation de croûtes à la surface [134].

I.10.6. Méthodes de durcissement

Trois méthodes de cure peuvent être utilisées pour maintenir le béton humide, même s'il l'est, à une température favorable [37,135,136] :

1. Méthodes qui maintiennent la présence d'eau de mélange dans le béton pendant la période de durcissement précoce. Elles peuvent être assurées par l'immersion, l'arrosage, la pulvérisation et les recouvrements humides saturés. Ces méthodes permettent un certain refroidissement par évaporation, ce qui est bénéfique par temps chaud.
2. Méthodes qui réduisent la perte d'eau de mélange à la surface du béton. Cela peut être fait en recouvrant le béton avec du papier imperméable ou avec des feuilles de plastique, ou en appliquant des produits de cure formant des membranes.
3. Méthodes qui accélèrent le gain de la résistance en apportant de la chaleur et de l'humidité supplémentaire au béton. Ceci est généralement réalisé par la vapeur vive des serpentins de chauffage ou des formes chauffées électriquement.

La section suivante décrit quelques techniques utilisées pour le durcissement de béton.

I.10.6.1. Durcissement à l'air sec

La cure à l'air est la technique la plus largement utilisée dans les structures en béton. Cette technique influe, généralement, sur le durcissement de la surface de béton en contact direct avec l'air. Un béton dans un environnement sec peut perdre jusqu'à 50% de sa résistance par rapport à celui-ci durci dans un état humide [133,137]. Ceci est dû au séchage précoce qui influe sur l'hydratation de ciment et qui cause des microfissures sur la surface et provoque par conséquent l'augmentation de l'absorption initiale du béton [138]. Les résultats expérimentaux indiquent que le durcissement à sec n'est pas une méthode efficace pour obtenir de bonnes propriétés du béton durci [139].

I.10.6.2. Le durcissement dans l'eau

Le durcissement dans l'eau est utilisé généralement pour de petites activités de construction. [140]. Cette méthode est la technique la plus efficace car elle empêche la perte de l'humidité et maintient une température uniforme dans le béton qui sert à éviter la fissuration thermique [138]. Cette technique est utilisée dans les expériences de laboratoire dans lesquelles les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau après leurs décoffrages jusqu'au jour de test. Les recherches indiquent plus la période de durcissement humide est longue, plus la résistance du béton est élevée [141–145]. Aussi bien, le durcissement par immersion dans l'eau donne des résistances mécaniques plus élevées que celles trouvées par durcissement en milieu sec ou d'enveloppement par un film plastique [146] (Figure I.15).

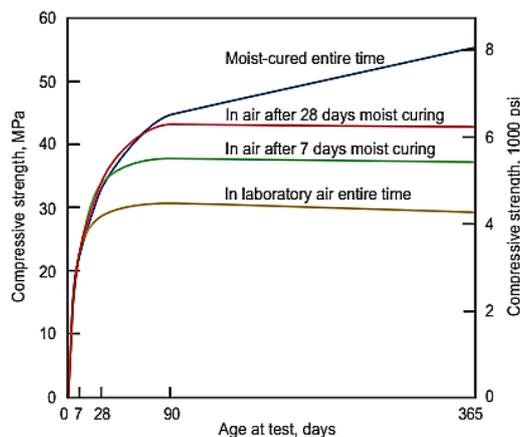


Figure I.15. Effet de la période de durcissement humide sur le gain de résistance du béton [133]

I.10.6.3. Le durcissement par recouvrement en film plastique :

Les feuilles de plastique telles que les films de polyéthylène sont utilisées pour durcir le béton. Les films de polyéthylène sont légers et imperméables.

Le durcissement par recouvrement en film plastique est une technique utilisée beaucoup plus dans les éléments horizontaux à faible épaisseur, comme les dalles par exemple, et peut-être utilisée sur des formes complexes ou simples (Figure I.16). Le recouvrement en plastique intercepte le mouvement d'évaporation et garde le béton humide, donc une bonne quantité d'humidité est disponible pour un long processus d'hydratation de ciment. L'inconvénient majeur de ce type de durcissement est qu'il provoque une décoloration inégale, surtout si le béton contient du chlorure de calcium. La décoloration est plus prononcée lorsque le film développe des rides. Pour un grand projet, il est difficile de placer les feuilles en plastique sans rides et prend beaucoup de temps. Des recherches indiquent que le durcissement par recouvrement en

plastique est plus efficace que le durcissement à l'air mais n'est mieux que celui dans l'eau [138,146]. Le changement de conditions de durcissement a également un effet sur la résistance à la compression du BAP [145,146].



Figure I.16. Recouvrement en film plastique d'un élément horizontal en béton [133]

I.10.6.4. Durcissement à la vapeur/chaleur

La cure à la vapeur est avantageuse lorsque l'on a besoin d'un béton ayant une forte résistance initiale ou lorsqu'il faut fournir une chaleur additionnelle pour favoriser la réaction d'hydratation comme par temps froid par exemple (Figure I.17).

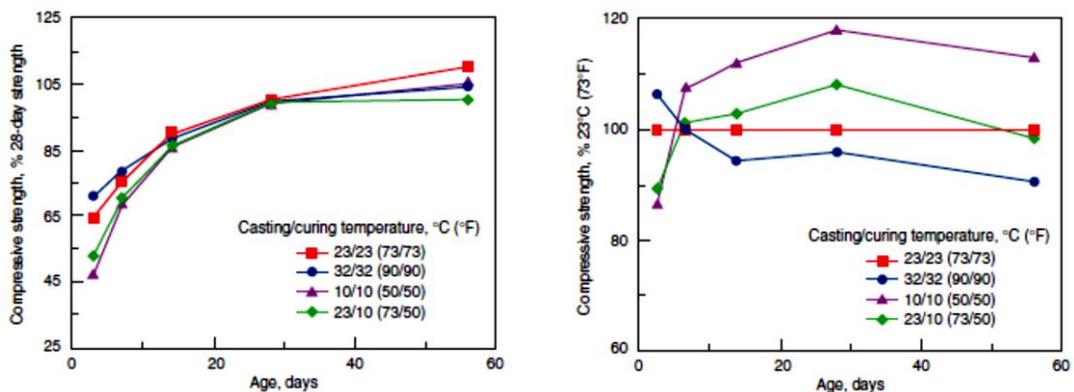


Figure I.17. Effet de température de cure sur le gain en résistance (à gauche) Par rapport à la résistance de 28 jours et (à droite) par rapport à la résistance du béton à 23°C [133]

La cure à la vapeur fait l'objet de la norme CSA A-23.4, Béton préfabriqué: Constituants et exécution des travaux. Celle-ci énumèrent les exigences concernant les cures à des températures élevées, ainsi que l'application et le contrôle de la chaleur pour le mûrissement accéléré du béton [147].

On peut utiliser l'une des deux méthodes suivantes : une cure à la vapeur à la pression atmosphérique (dans le cas de structures coulées en place dans une enceinte ou pour les grands

éléments préfabriqués) ou une cure à haute pression dans des autoclaves (pour des pièces plus petites).

Un cycle de cure à la vapeur comprend (Figure I.18):

- (1) un délai initial avant l'exposition à la vapeur (prise initiale),
- (2) une période de montée en température,
- (3) une période de maintien de la température maximale à un niveau constant,
- (4) une période de diminution de la température (refroidissement).

Un cycle optimal de cure à la vapeur à pression atmosphérique est représenté à la figure II.9

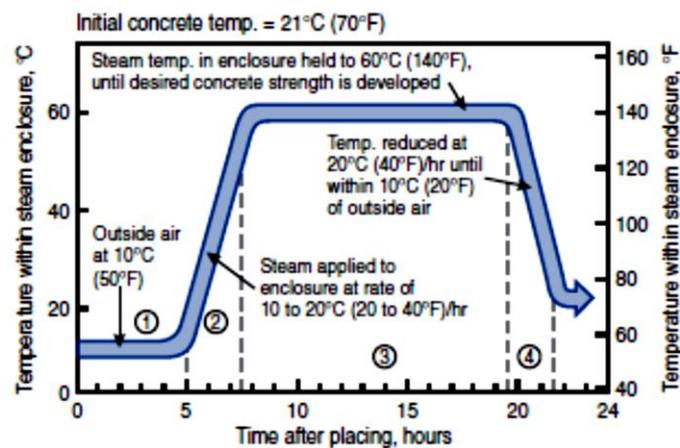


Figure I.18. Cycle type de la cure à la vapeur atmosphérique[133]

Avec :

- ① La prise initiale : 3 à 5 heures (température de béton 21°C);
- ② Montée de la température : 2 ½ heures (10 à 20°C /h);
- ③ Température constante : 6 à 12 heures (60°C).
- ④ Diminution de la température : 2 heures

La cure à la vapeur à la pression atmosphérique se fait généralement dans des enceintes pour minimiser les pertes de chaleur et d'humidité. Il faut attendre la prise initiale du béton ou au moins trois heures après sa finition avant d'appliquer la vapeur pour permettre un certain durcissement du béton. Toutefois, un délai de trois à cinq heures avant l'injection de la vapeur permet d'obtenir une résistance initiale maximale et peut affecter la résistance à la compression du BAP [148,149]. La température de la vapeur dans l'enceinte doit être maintenue autour de 60°C jusqu'à l'obtention de la résistance souhaitée du béton. La résistance du béton n'augmente pas de façon significative lorsque la température maximale de la vapeur passe de 60°C à 70°C. Des températures de cure à la vapeur supérieures à 70°C doivent être évitées : elles ne sont pas économiques et peuvent causer des dommages.

Outre le gain précoce de résistance, la cure du béton à des températures voisines de 60°C réduit le risque de retrait au séchage et de fluage comparativement à un béton mûri à 23°C pendant 28 jours [148–150].

I.10.6.5. Revêtement humide saturé

C'est la technique de durcissement la plus souvent utilisée dans l'industrie de la construction. Dans cette technique des tissus retenant l'humidité, tels que des bâches des nattes et des tapis en coton de jute, sont utilisés comme couvert humide pour maintenir le béton dans une condition humide pendant la période de cure (Figure I.19). Cette technique nécessite un arrosage périodique de couvert pour rester humide le long de la période de cure. Cependant, des cycles alternatifs de mouillage/séchage pendant la période de durcissement va provoquer une fissuration de la surface du béton. L'inconvénient majeur de cette technique est la décoloration du béton.



Figure I.19. Application de revêtement humide sur un poteau

I.10.6.6. Produits de cure

Selon la norme NF P 18-370 [151], un produit de cure est un produit dont l'application, sur les surfaces des bétons (ou des mortiers) exposées aux agents atmosphériques, permet de s'opposer à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton (ou le mortier) pendant la phase de prise et de durcissement (Figure I.20).

Le produit de cure forme un film protecteur à la surface du béton. Il est généralement composé d'un solvant organique ou d'eau (émulsion) appelé véhicule, d'un liant (résine ou polymère en général) et, éventuellement, de charges minérales (dioxyde de titane par exemple) [130].

Les produits de cure sont de plus en plus biodégradables (en phase aqueuse) et coloré (contrôle facile de la régularité et de la continuité de l'application). Ils sont pulvérisés sur le support : pulvérisation manuelle, rampe de pulvérisation.



Figure I.20. Application de produit de cure sur surface de béton

I.11. Conclusion

Le BAP présente de nombreux avantages par rapport au béton ordinaire BO, comme la rapidité de la mise en œuvre sans vibrations mécaniques. Les propriétés autoplaçantes du BAP peuvent s'assurer par: la limitation de la teneur de gros granulats à 50% du volume de béton et du sable à plus de 40% du volume du mortier, un faible rapport E / L et l'utilisation d'un dosage plus élevé de superplastifiant. Trois propriétés clés de l'ouvrabilité doivent être appréciées par le BAP : la fluidité (mobilité en milieu non confiné), la déformabilité (mobilité en milieu confiné) et la stabilité du mélange (résistance à la ségrégation statique). Les normes suggèrent trois essais essentiels pour caractériser l'ouvrabilité du BAP frais tels que l'essai de l'étalement (*slump-flow*) comprend le test de viscosité apparente T_{500} , l'essai de l'écoulement dans la boîte-L et l'essai de la stabilité au tamis. La résistance à la compression et à la traction du BAP sont meilleures que celle du BO.

Le durcissement a une forte influence sur les propriétés du béton durci. Un durcissement approprié augmentera les propriétés mécaniques et la durabilité. Le durcissement du béton est principalement régi par deux paramètres, Température et Période. D'une manière générale, le béton peut être durci par: des techniques qui maintiennent la présence d'eau de mélange dans le béton pendant la période de durcissement précoce, des techniques qui réduisent la perte d'eau de mélange à la surface du béton et les techniques qui accélèrent le gain de la résistance en apportant de la chaleur et de l'humidité supplémentaire au béton.

Chapitre II .
Revue bibliographique sur l'effet des
sables et les régimes de durcissement sur
le BAP

II.1. Introduction :

Comme nous avons indiqué dans le chapitre précédent (section I.8.6), le sable est un élément essentiel pour béton, il occupe un volume très important dans le BAP. Son rôle est d'assurer une bonne dispersion des gros granulats. La nature et les propriétés du sable influent certainement sur les propriétés physico-mécaniques du BAP. Dans ce chapitre nous soulignerons les différentes études réalisées sur l'impact des sables SA, SC et SD de point de vue dosage et nature sur les propriétés physiques, mécaniques et de la durabilité du BAP. Nous présenterons également une revue bibliographique sur l'effet des régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques de divers type de bétons y compris le BAP. Notons ici que très peu d'études traitent l'effet combiné de type de sable et les régimes de durcissement sur les caractéristiques des bétons autoplaçants.

II.2. Incorporation des Sable SA, SC et SD dans le BAP

II.2.1. Influence de la teneur en sable sur les propriétés du BAP

La teneur en sable, dans le BAP, est souvent exprimée en pourcentage par rapport au volume de mortier du béton. Il existe toute une gamme possible de teneurs en sable pour une bonne propriété rhéologique du BAP; en dehors de cette plage, le béton ne satisfera pas les critères de l'ouvrabilité en raison d'une ségrégation ou d'un écoulement insuffisant.

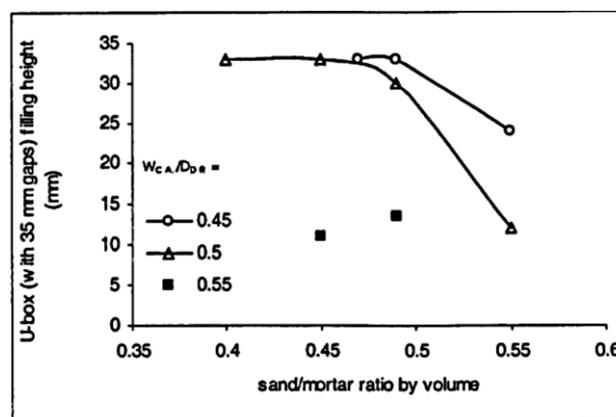


Figure II.1. Effet de la teneur en sable sur la capacité de remplissage dans la boîte-U, par [152]

Edamatsu et al. [152] ont constaté que la hauteur de remplissage maximale résultant dans l'essai boîte- U (U-box) est réduite lorsque la teneur en sable est supérieure à 50% en volume du mortier et la teneur en gros granulats est inférieure à 50% de la densité sèche du BAP sec (Figure II.1) [153].

Chai [154] a suggéré que la teneur en sable devrait être entre 40% et 47% de volume total du mortier.

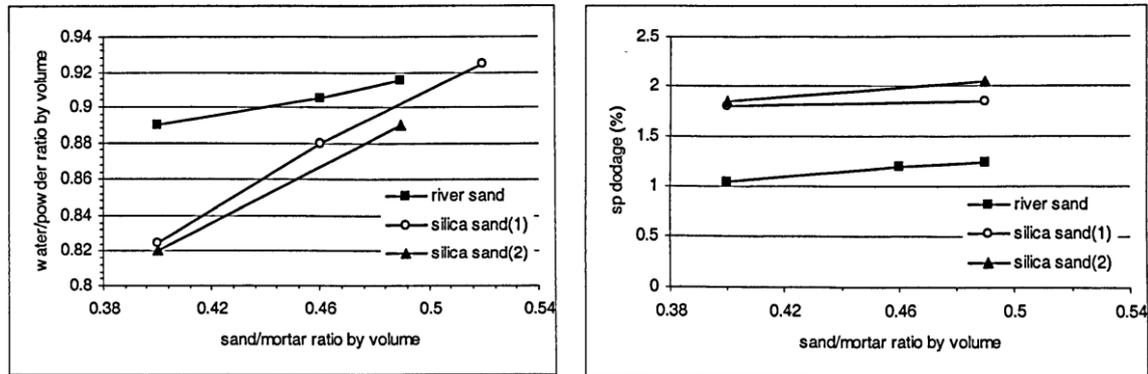


Figure II.2. Effet du rapport sable/mortier sur (a) rapport eau/poudre (b) dosage en SP du mortier afin d'obtenir les propriétés nécessaires, par [155]

Naoki et al. [155] ont étudié l'effet de la teneur en sable sur le rapport eau/liant et sur la demande en superplastifiant pour un mortier du BAP. L'étude porte sur l'ajustement de la quantité d'eau et de superplastifiant des mélanges avec différentes teneurs en sable afin d'obtenir un étalement de mortier de 245 mm et un temps d'écoulement dans l'entonnoir en V de 12,5 secondes. L'auteur a constaté une augmentation significative du rapport eau/Liant et une légère augmentation de la demande en superplastifiant avec l'augmentation de la teneur en sable (Figure II.2). Ils ont constaté aussi que l'étalement de mortier a augmenté avec l'augmentation de la teneur en sable (Figure II.3) [153].

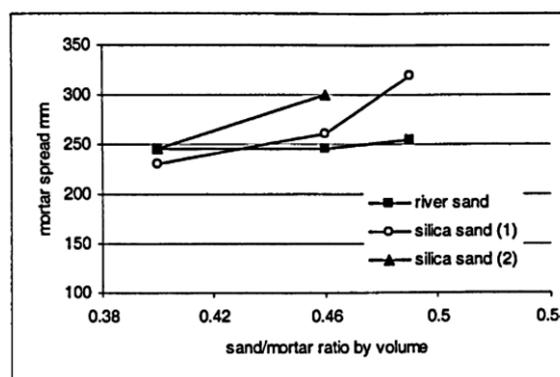


Figure II.3. Effet de la teneur en sable sur l'étalement du mortier pour obtenir un étalement de béton de 65 cm, par [155]

II.2.2. Influence de la nature de sable sur les propriétés du BAP

De nombreuses études ont été menées sur l'effet des caractéristiques du sable sur les propriétés fraîches et durcies du BAP; quelques-unes sont résumées ci-dessous.

Tableau II.1. Proportions des constituants du BAP en fonction des types de sables, selon [156]

Type de sable	E/L en poids	V_E/V_L en volume	CVP en (%)	Etal (cm)	S/G (%)	Constituants par (Kg/m^3)					
						Eau	C	CVP	S	G	Sp(%)
SA SC et SM	0.35	1.05	15	65 ± 5	52	175	425	75	864	800	1.5
		1.00	30				350	150	849	784	1.5
		0.97	45				275	225	833	771	1.8
		0.93	60				200	300	820	756	2.0

Kim et al [156] ont comparé l'effet du sable de rivière SA, du sable concassé SC et du sable de mer SM, de différents modules de finesse de 2.64, 2.87 et 3.38 respectivement sur les propriétés rhéologiques des mélanges de BAP, comme indiqué dans le [Tableau II.1](#). Trois paramètres ont été mesurés : le temps d'écoulement dans l'entonnoir en V, la capacité de remplissage dans la boîte-U et le degré de ségrégation en (%) mesuré par évaluation de la différence de teneur en gros granulats dans le béton entre les deux parties de la boîte-U après l'écoulement [153].

Les auteurs ont constaté que le temps d'écoulement dans l'entonnoir en V était plus long et varié dans les mélanges contenant du sable concassé ou du sable de mer ([Figure II.4](#)). Une faible hauteur de remplissage de la boîte en U et une ségrégation élevée ont été remarquées pour les mélanges contenant du sable concassé par rapport à ceux contenant du sable de rivière et du sable de mer. En général, les propriétés d'écoulement des mélanges contenant du sable concassé sont perdues par rapport à celles contenant du sable de mer et de rivière. La performance d'ouvrabilité a été améliorée pour les mélanges contenant du sable concassé et de teneur élevée (60%) de cendres volantes pulvérisées CVP, ce qui suggère l'avantage d'utiliser le CVP dans le BAP avec du sable concassé [153].

Les travaux de Hirata et al. [157] ont porté sur l'influence de finesse de sable sur les propriétés rhéologiques du BAP à savoir l'étalement et l'écoulement dans l'entonnoir en forme de « O ». Les auteurs ont constaté que pour un sable moyen d'un module de finesse compris entre 2,4 et 2,9 les performances rhéologiques du BAP sont meilleures. Au contraire, pour le sable grossier, le temps d'écoulement a augmenté rapidement, dû au blocage ([Figure II.5](#)) [153].

Dans le même contexte, Sudo et al. [158] ont comparé la capacité de remplissage dans la boîte en U des BAP préparés avec sable fin, sable moyen et sable grossier pour E/L de 0.35, 0.40 et 0.45. Un étalement de 65 ± 5 cm et un temps d'écoulement T50 de 5 ± 2 secondes de tous les BAP sont assurés par ajustement de dosage en superplastifiant. Les auteurs ont constaté que la capacité de remplissage a diminuée lorsque le sable grossier est utilisé, particulièrement pour les BAP avec un rapport eau/poudre élevé ([Figure II.6](#)), ce qui suggère que le blocage se produit

facilement pour le BAP contenant du sable grossier. Cependant, la meilleure hauteur de remplissage est obtenue dans les BAP contenant du sable fin ou moyen [153].

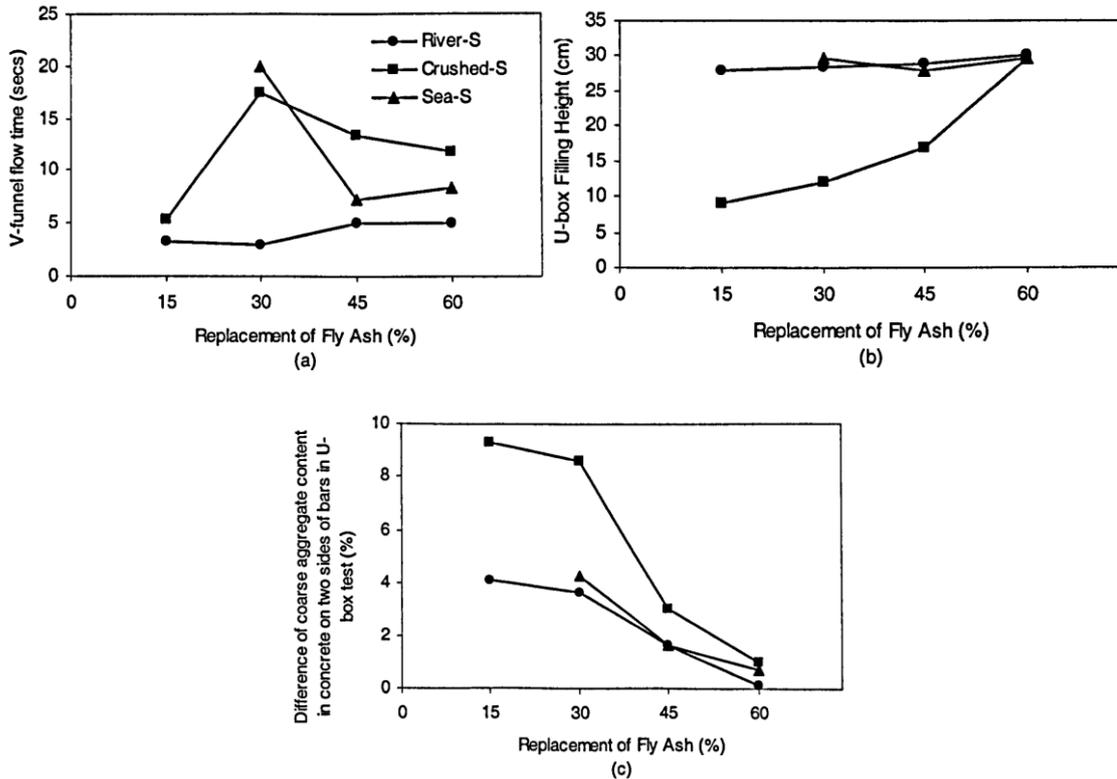


Figure II.4. Comparaison des propriétés du béton avec différents types et module de finesse du sable (a) Temps d'écoulement dans l'entonnoir en V (b) Hauteur de remplissage dans la boîte-U (c) Ségrégation, par [156]

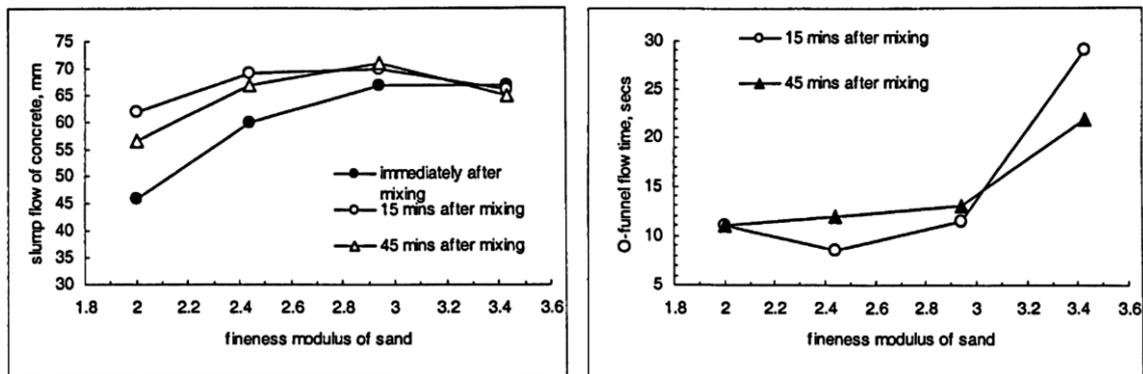


Figure II.5. Effet de module de finesse de sable sur les propriétés fraîches du BAP, par [157]

Par conséquent, un sable roulé de taille moyenne avec un module de finesse compris entre 2,4 et 2,9 est préférentiel pour le BAP, tandis qu'un sable concassé grossier avec un module de finesse supérieur à 3,0 peut entraîner un BAP de mauvaise qualité.

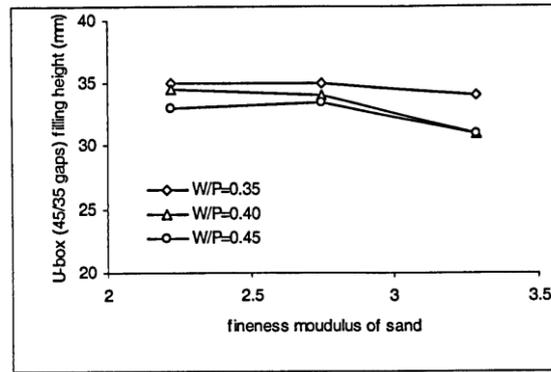


Figure II.6. Effet de module de finesse de sable sur la capacité de remplissage dans la boîte-U, par [158]

Les travaux de Rmili et al. [55,56] sur l'étude de la formulation du BAP à base de SC et SD ont conduit à conclure qu'il est difficile de réaliser un BAP avec 100% de SD en raison de sa grande finesse et sa capacité d'absorption élevée ce qui nécessite l'ajout d'une quantité élevée d'eau et de superplastifiant. Au-delà de 20% et 15% de SD, les propriétés rhéologiques et mécaniques sont diminuées respectivement dans les systèmes binaires SA/SD et SC/SD (Figure II.7).

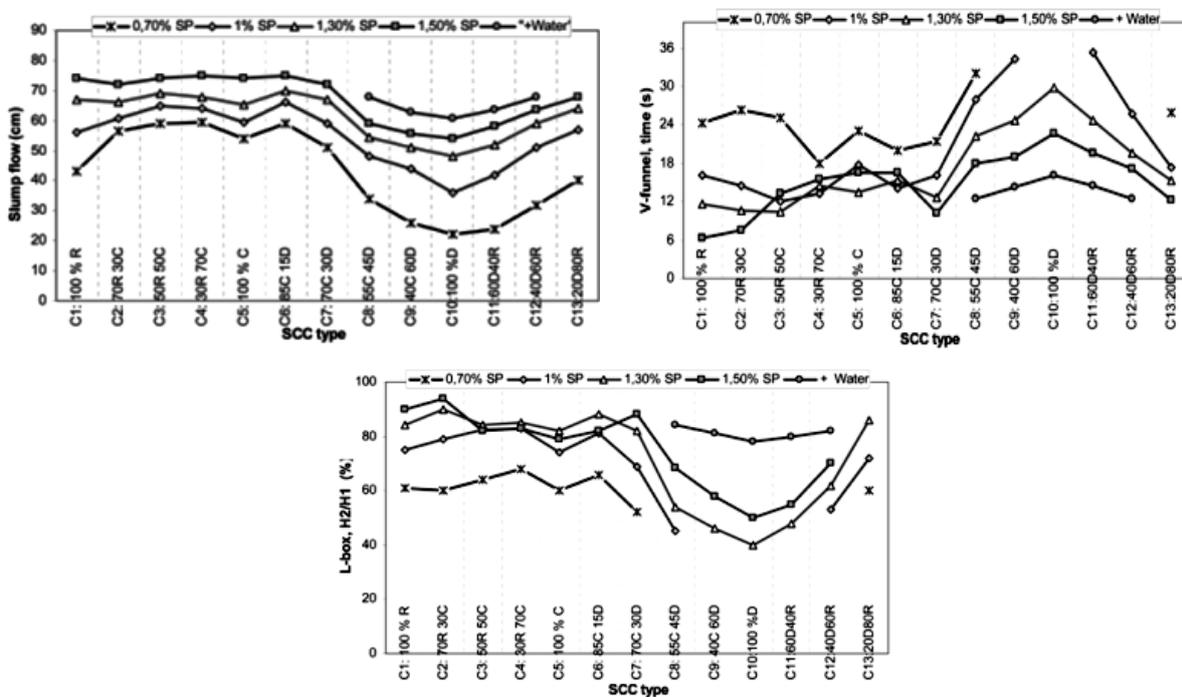


Figure II.7. Variation de l'étalement, l'écoulement à l'entonnoir V et la capacité de remplissage en boîte L en fonction de sable et en fonction de pourcentage SP d'après Rmili [55,56]

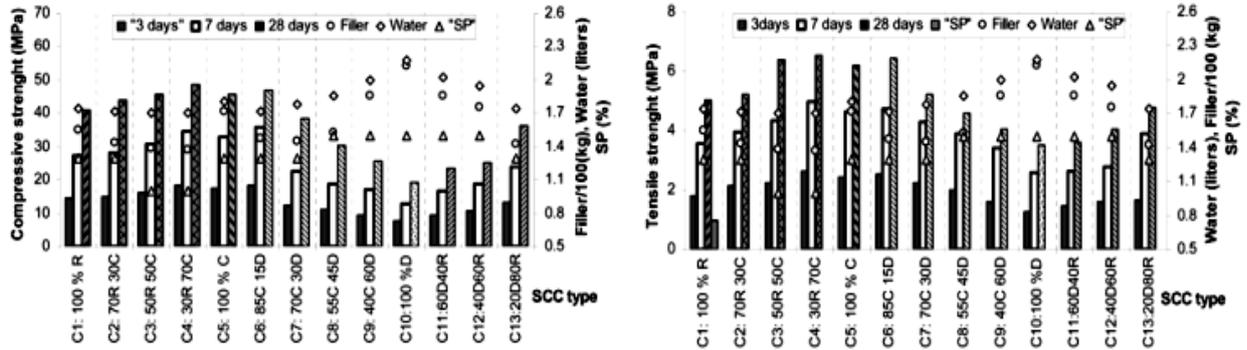


Figure II.8. Variation de la résistance à la compression et à la traction des BAP choisies (R=RA, C=SC, D=SD) [55,56]

D'autre part, la substitution de SA par SC jusqu'à 30% a amélioré la rhéologie et les propriétés mécaniques dans le système binaire SA/SC, au-delà de cette valeur les propriétés sont affectées négativement (Figure II.8).

Nanthagopalan et al. [52] Ont étudié la formulation d'un BAP à base de totalité en SC (Manufactured sand). Les auteurs ont trouvé que pour atteindre un diamètre d'étalement de 55cm, il faut augmenter le volume de pâte de 70-90 L afin de de remplir les vides entre les particules de SC (Figure II.9) et ainsi pour assurer un écoulement satisfaisant et une résistance à la compression dans l'ordre de 25-60MPa (Figure II.10).

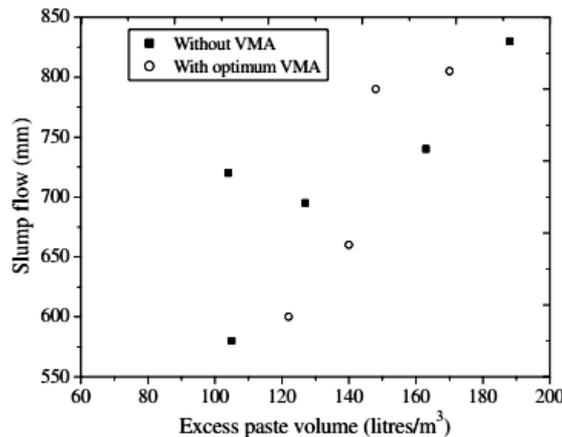


Figure II.9. Relation entre l'étalement l'excès de volume de pâte [52]

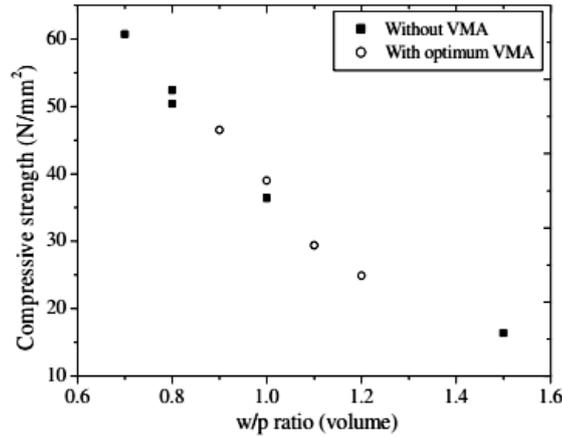


Figure II.10. Relation entre la résistance à la compression et le rapport w/p (Eau/pâte) [52]

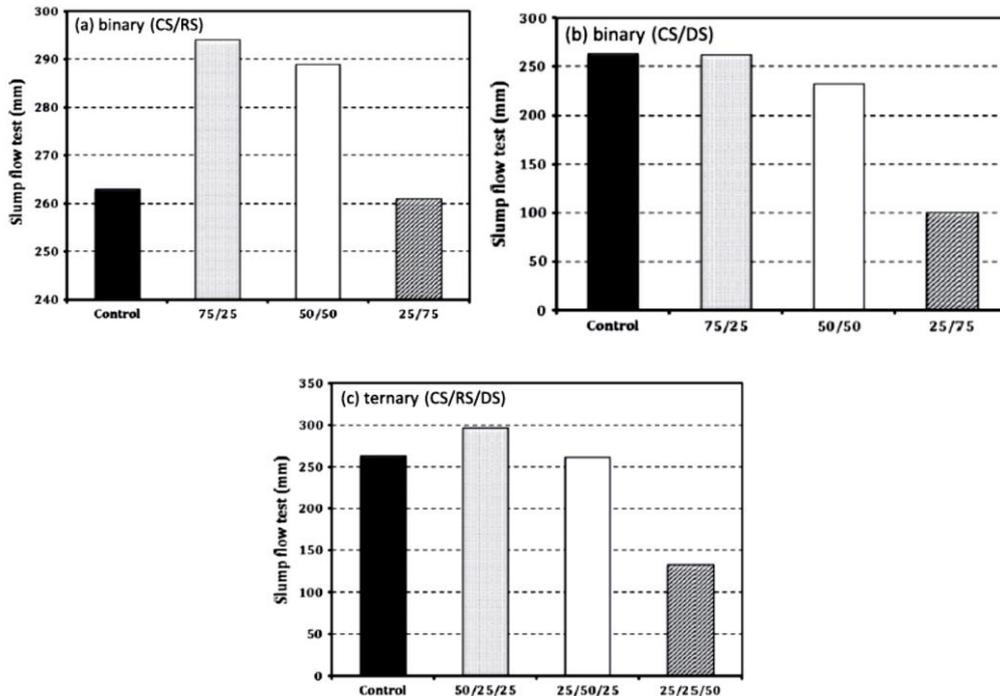


Figure II.11. Variation de l'étalement des mortiers fabriquer par : (a) sable binaire (SC/SA), (b) sable binaire (SC/SD), et (c) sable ternaire (SC/SA/SD) d'après [96]

Benchaa et al. [96] ont étudié l'influence de combinaison binaire et ternaire des trois sables SA, SC et SD sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplaçants MAP. Les résultats de cette investigation montre clairement que la combinaison des deux sables SA et SC a un effet favorable sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du MAP contrairement aux combinaisons SC et SD surtout pour des teneurs supérieures à 50% en SD (Figure II.11). Le sable concassé SC avec 10 à 15% des fines peut être utilisé dans MAP et qui peut offrir de bonnes propriétés rhéologiques et mécaniques (Figure II.12).

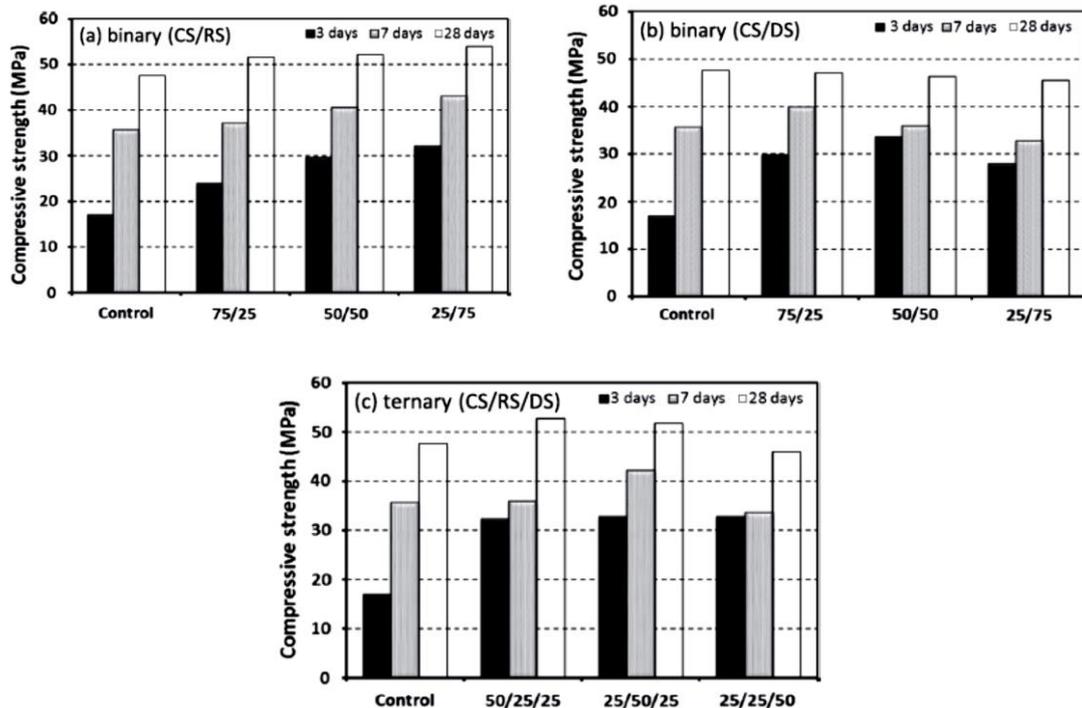


Figure II.12. Variation de la résistance à la compression des mortiers fabriqués par : (a) sable binaire (SC/SA), (b) sable binaire (SC/SD), et (c) sable ternaire (SC/SA/SD) d'après [96]

L'utilisation de SA, SC et SD en système binaire et ternaire a un effet favorable sur la résistance à la compression à condition que la quantité de SD soit limitée à 25%.

Bouziani [159] a évalué, par approche statistique, l'effet de la substitution partielle et totale de SA par SC et SD en système binaire et ternaire sur les propriétés du BAP. Il a trouvé que l'augmentation en SC et SD dans les systèmes binaires SA-SC et SA-SD et dans le système ternaire SA-SC-SD a conduit à une diminution de l'étalement et à l'augmentation du temps de l'écoulement. Ainsi que l'introduction de plus de 50% de SD dans les mélanges binaires peut diminuer le diamètre d'étalement à des valeurs hors celles recommandées de l'AFGC (limite inférieur à 55 cm). La capacité de remplissage dans la boîte-L est satisfaisante pour un dosage en SC au-delà de 30% et 65% pour SA-SC et SC-SD respectivement. En outre, pour des substitutions de plus de 50% SC dans SA-SC et de plus de 20% de SD dans SA-SD la stabilité à la ségrégation statique est satisfaisante (Figure II.13).

L'auteur [159] a constaté que la résistance à la compression est proportionnelle au dosage en SC et contrairement à celui en SD dans toutes les combinaisons binaires et ternaires (Figure II.14). L'auteur a conclu que, pour des propriétés rhéologiques adéquates, le remplacement du SA par SD ou SC doit être inférieur à 24% et 60% respectivement dans tous les systèmes binaires et ternaires.

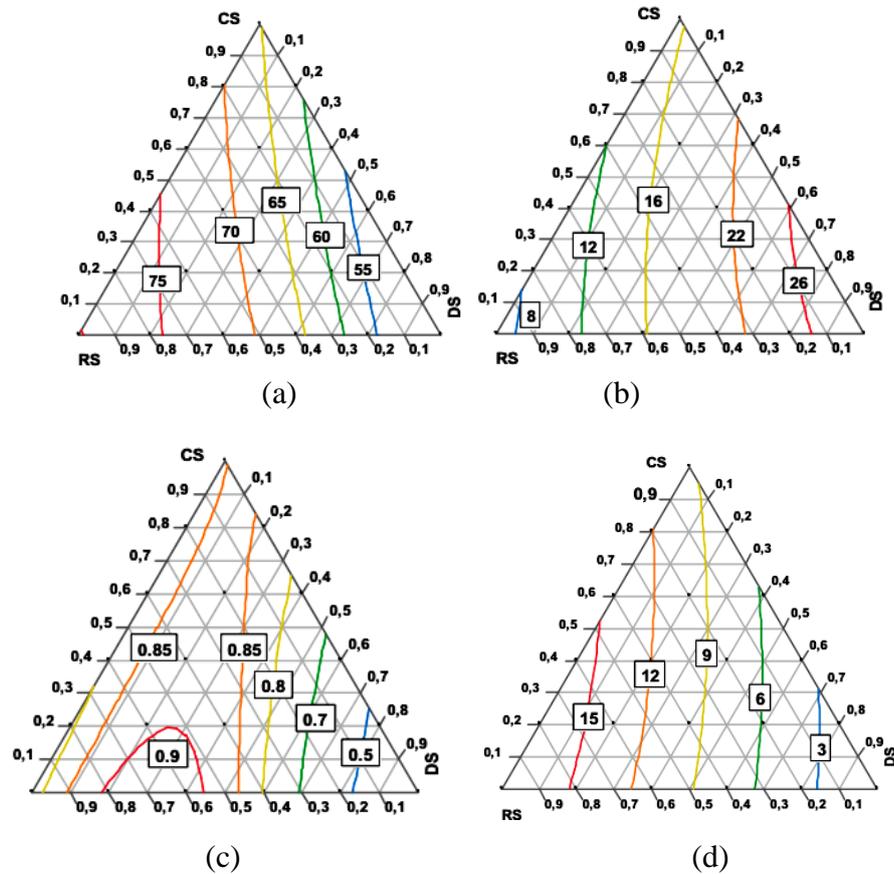


Figure II.13. Tracé ternaire de propriétés frais de BAP en fonction de proportion SA, SC et SD. (a) étalement (cm). (b) écoulement entonnoir V (s). (c) rapport H2/H1 dans la boîte L. (d) stabilité au tamis (%) [159]

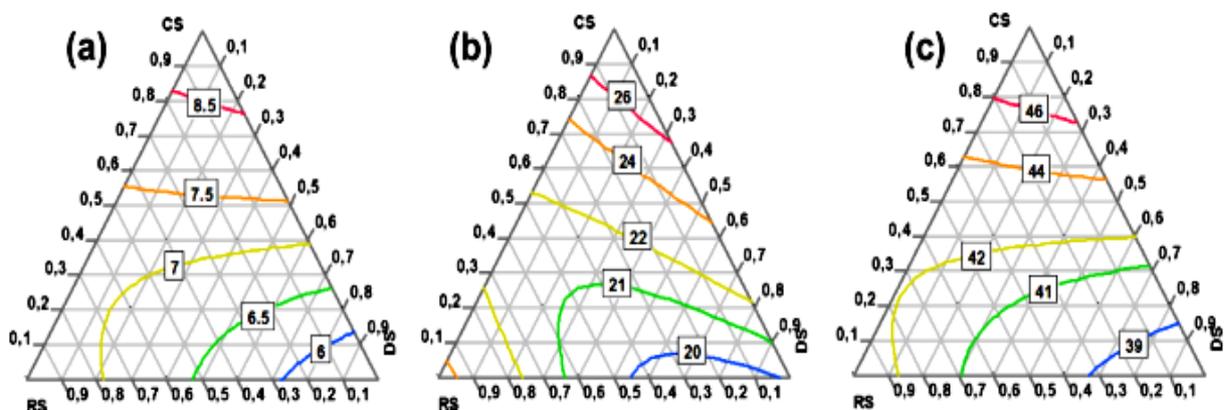


Figure II.14. Tracé ternaire de la résistance à la compression (MPa) en fonction des proportions de SA, SC et SD : (a) 2 jours. (b) 7 jours et (c) 28 jours [159]

Azzouz et al. [160] ont examiné l'effet de mélange binaire et ternaire des sables de différentes morphologies et de différentes origines SA, SC et SD sur les propriétés fraîches et durcies du BAP. Ils ont constaté que la rhéologie et les performances mécaniques du mortier et du béton s'améliorent avec le mélange de SA-SC et diminuent avec le mélange de SC-SD. Ils ont observé une forte diminution de l'étalement au-delà de 25% SD et que le béton est devenu un béton ordinaire et non plus un BAP. La capacité de remplissage et la stabilité s'améliorent avec les combinaisons de SC et SD, ceci est dû à l'augmentation du volume de la pâte (Figure II.15). Dans les propriétés mécaniques, ils ont trouvé que la résistance à la compression s'améliore aussi avec le mélange SA/SC et diminue avec l'augmentation de SD dans tous les mélanges en raison de sa finesse et sa porosité (Figure II.16).

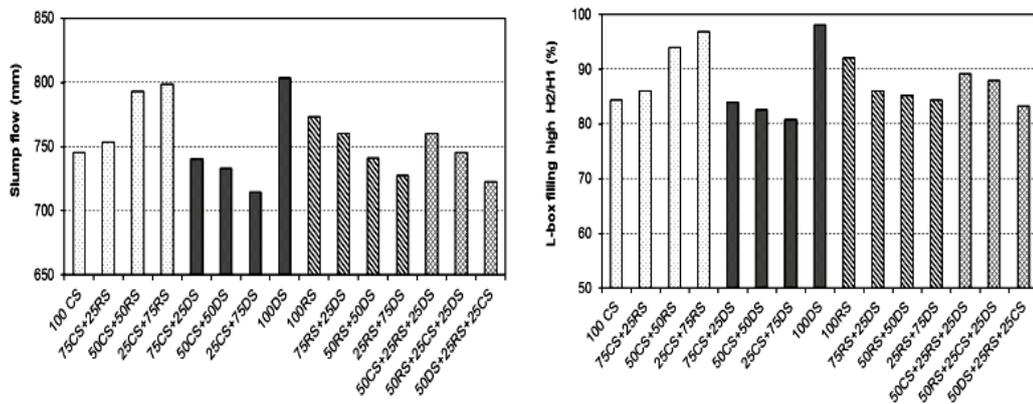


Figure II.15. Étalement et H2/H1 de la boîte L de BAP avec différent types de sable [160]

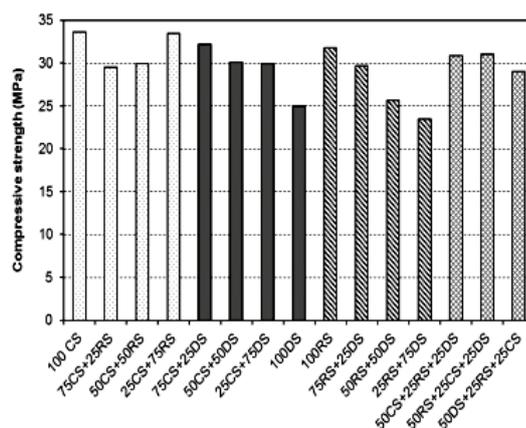


Figure II.16. Résistance à la compression de BAP avec différent types de sable[160]

Nécira et al. [26,161] ont étudié l'effet de mélange binaire des différents types de sable sur les propriétés frais et durci des bétons autoplaçant à hautes performances BAPHP. D'après

[161], la compacité du béton frais augmente avec la substitution de SA par SC ou SD jusqu'à un optimum de (20% SC + 80% SA), (40% SD + 60% SA) et (60% SC + 40% SD). Mais ces derniers ne donnent pas forcément de meilleures propriétés rhéologiques. Les auteurs ont constaté que les propriétés autoplaçantes se perdent au-delà de 40% et 20% de SC dans le système binaire SC-SA et SC-SD respectivement, contrairement au SD où tous les critères sont respectés (Figure II.17). Les critères de capacité de remplissage et la stabilité au tamis sont respectés pour l'ensemble des combinaisons binaires de sable.

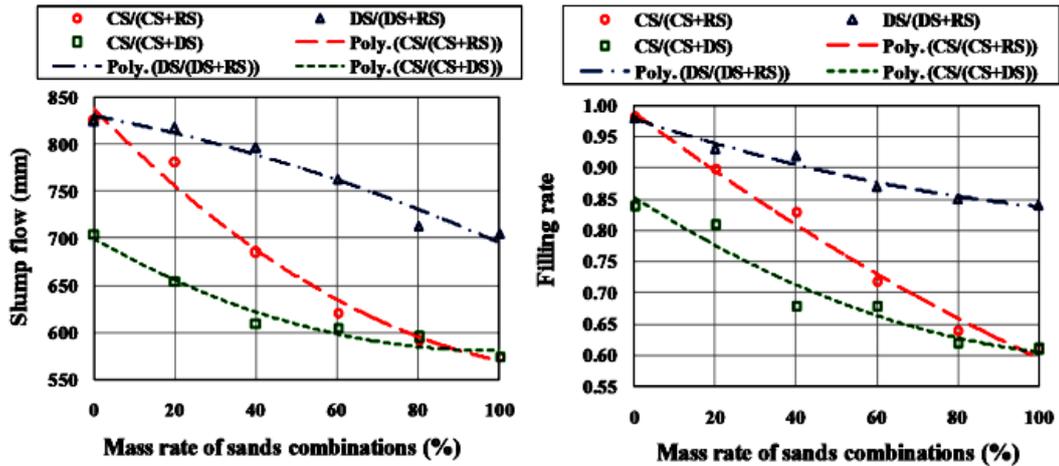


Figure II.17. Variation de l'étalement et la capacité de remplissage H2/H1 (boîte-L) de BAPHP en fonctions de combinaisons de sables [161]

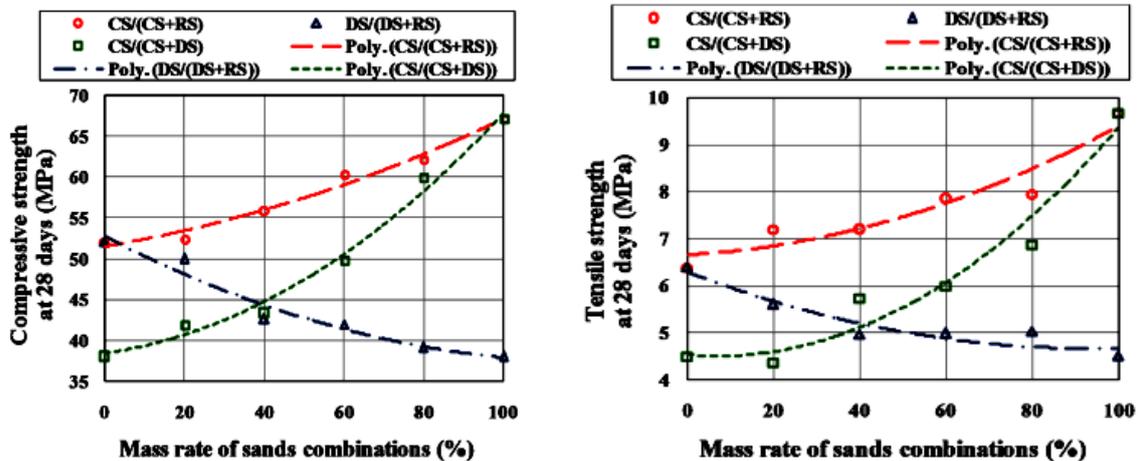


Figure II.18. Variation de la résistance à la compression et à la traction de BAPHP en fonctions de combinaisons de sables [161]

Les auteurs [161] ont conclu que la substitution de SA par SC diminue les propriétés rhéologiques mais conduit à une augmentation des résistances mécaniques à court et à long

terme contrairement au SD qui diminue les performances mécaniques par rapport à SA (Figure II.18).

II.2.3. Synthèse

Plusieurs chercheurs ont valorisé l'utilisation des sables de carrière et de dune dans les BO et BAP. Les recherches suggèrent que la teneur en sable dans un BAP devrait être entre 40% et 47% de volume total du mortier tandis que les normes suggérées une teneur entre 48-55% de volume total des agrégats. Un sable roulé de taille moyenne avec un module de finesse compris entre 2,4 et 2,9 est préférentiel pour le BAP, tandis qu'un sable concassé grossier avec un module de finesse supérieur à 3,0 peut entraîner un BAP de mauvaise qualité. L'incorporation des sables SA, SC et SD des formes et de granularités différentes permet d'augmenter la compacité du BAP. La forme anguleuse, la rugosité et la capacité d'absorption d'eau des grains de SC pourraient diminuer les propriétés de la maniabilité du BAP, mais tout en améliorant les performances mécaniques du BAP à savoir la résistance à la compression et à la traction. Jusqu'à certaine limite, le SD améliore l'ouvrabilité et la résistance du BAP grâce à sa forme sphérique arrondie selon ses propriétés et ses origines.

II.3. Comportement du BAP et bétons vis-à-vis des attaques acides

II.3.1. Introduction

En général, les structures en béton sont soumises à des conditions environnementales agressives. À cause de ces milieux, les propriétés mécaniques et physiques du béton peuvent être menacées et perdues. Depuis le milieu du XIXe siècle, L. Vicat [162] a étudié la dégradation chimique des bétons due à la présence d'ions sulfates ou de chlorures dans l'eau de mer. Il a montré que les sels de magnésium $MgCl_2$ et $MgSO_4$ sont les plus agressifs pour le béton. De plus, l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl) sont classés comme les menaces naturelles les plus agressives pour les structures en béton [163]. Ces acides proviennent généralement de processus industriels ou peuvent être dus à une activité urbaine comme les systèmes d'égouts [164]. L'attaque acide se caractérise par les processus de décomposition et de lixiviation des constituants de la pâte de ciment. Vu à son volume de la pâte élevé, l'étude de la résistance du BAP vis-à-vis de l'attaque des acides est très importante. Le BAP peut être influencé positivement ou négativement aux agressions d'acides toute en fonction des propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés [47].

II.3.2. Mécanisme d'attaques de HCl et H₂SO₄

II.3.2.1. Attaque de l'HCl

L'acide chlorhydrique HCl a réagi avec une partie d'hydroxyde de calcium (la portlandite Ca(OH)₂) libérée au cours de l'hydratation des silicates de ciment et a formé un sel de chlorure de calcium CaCl₂ fortement soluble dans l'eau selon la réaction suivante :



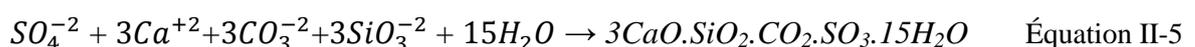
Les sels chlorures de calcium CaCl₂ sont facilement enlevés de la pâte de ciment, ce qui fragilise sa structure totale et devient moins cohésif [48,165,166]. De ce fait la masse de béton est perdue et les propriétés mécaniques sont diminuées.

II.3.2.2. Attaque de H₂SO₄

Contrairement à la solution HCl, l'effet de l'acide sulfurique H₂SO₄ est très agressif. La migration des ions sulfates dans le béton peut entrer en réaction chimique avec des matériaux à base de ciment, provoquant une expansion, fissurations, écaillages et décomposition du béton. L'acide sulfurique (H₂SO₄) a réagi avec la portlandite (Ca(OH)₂), le monosulfoaluminate (C₃A.CaSO₄.12H₂O) et le C₃A résiduel pour former du gypse (CaSO₄.2H₂O) et de l'ettringite secondaire (C₃A.3CaSO₄.32H₂O) qui sont des produits expansifs provoquant la fissuration et la détérioration de la surface du béton [167,168]. Les réactions sont comme suit :



Si les carbonates et bicarbonates sont disponibles dans la matrice cimentaire avec la présence d'humidité suffisante et une température ambiante basse (moins de 15°C), la thaumasite (3CaO.SiO₂.CO₂.SO₃.15H₂O) peut facilement se former et éventuellement conduire à une attaque au sulfate de thaumasite [169]. La thaumasite se forme directement à partir de C-S-H suivant la réaction :



Par conséquent, pour prolonger la durée de vie des structures en béton exposées à une attaque aux acides, il est recommandé de minimiser la teneur en matières à base de ciment dans le béton ou le mortier, car l'acide attaque spécifiquement les constituants du ciment. De cette

manière, avec une fraction de volume de ciment élevé, la vulnérabilité, exprimée par la perte de la masse, sera plus grande.

II.3.3. Travaux réalisés sur la durabilité du BAP et BO :

Après des recherches dans la littérature, nous avons constaté que la plupart des études de durabilité du BAP porte sur l'investigation de l'effet des additions minérales sur les indicateurs de durabilité tels que l'attaque par acide, l'attaque par des sulfates, la pénétration des ions chlorures et la perméabilité à l'eau etc. Très peu d'études traitent l'effet des sables SA, SC et SD sur l'attaque des acides dans le BAP. La section suivante regroupe une revue bibliographique des recherches réalisés sur l'influence de la nature du sable sur les paramètres de durabilité de différents bétons (béton ordinaire, BHP, béton de sable etc.) et un aperçu sur l'effet des différents constituant du BAP sur la résistance vis-à-vis des solutions acides agressives .

Dans l'étude Al-Harthy et al [111] portant sur l'évaluation de l'effet de sable de dune SD comme substituant au sable concassé sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et sur l'absorption initiale du béton. Cette dernière propriété (absorption initiale à la surface) est un paramètre pour évaluer la durabilité du béton. Dans cette étude, la quantité d'eau absorbée a été mesurée sur des éprouvettes cubiques de béton 15×15×15 cm après 30, 60 et 120 min. D'après les résultats présentés dans la Figure II.19, les auteurs ont observé que l'absorption initiale à la surface du béton augmente quand la teneur en sable des dunes augmente. Aux faibles teneurs en sable de dunes (jusqu'à 30%), l'absorption n'est pas sensible à la quantité de SD. Dans les mélanges contenant de grandes quantités de sable dunaire (80 à 100%), l'absorption était la plus élevée.

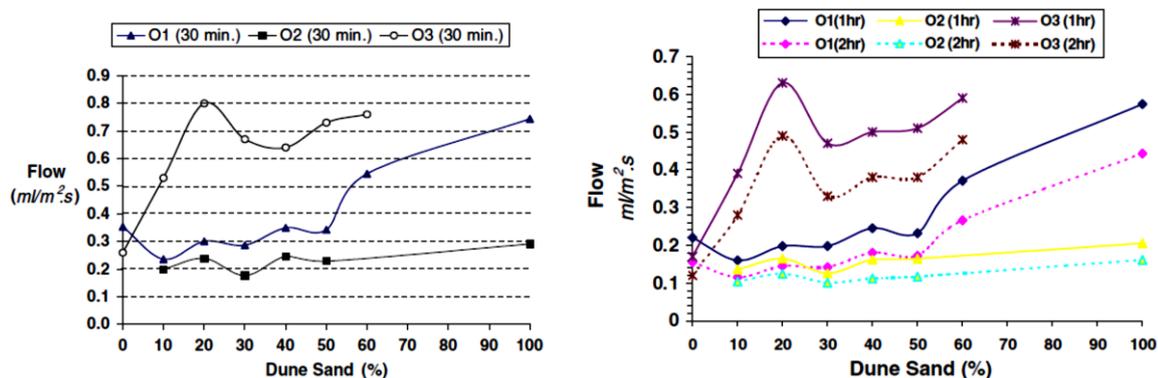


Figure II.19. Variation de l'absorption initiale à 30, 60 et 120 minutes en fonction de la proportion de sable de dune [111]

Khelifa [170] a étudié la durabilité du BAP exposé à l'attaque de sulfate externe. Les échantillons de béton ont été soumis à quatre protocoles d'attaque sulfurique externe pendant six

mois. Les trois premiers sont l'immersion totale, l'exposition à des cycles d'immersion totale/séchage à 105°C et à des cycles d'immersion totale/séchage à 60°C dans une solution de Na₂SO₄ concentrée à 5%. Le quatrième protocole et l'exposition à un brouillard salin dosé à 1% de SO₂ à 30°C. L'auteur a observé que la dégradation de l'échantillon par attaque externe au sulfate dépend du type de ciment utilisé et du rapport E/C (Figure II.20). Les résultats expérimentaux ont également montré que les dommages étaient plus prononcés dans le cas des cycles d'immersion/séchage à 60°C que les autres régimes.

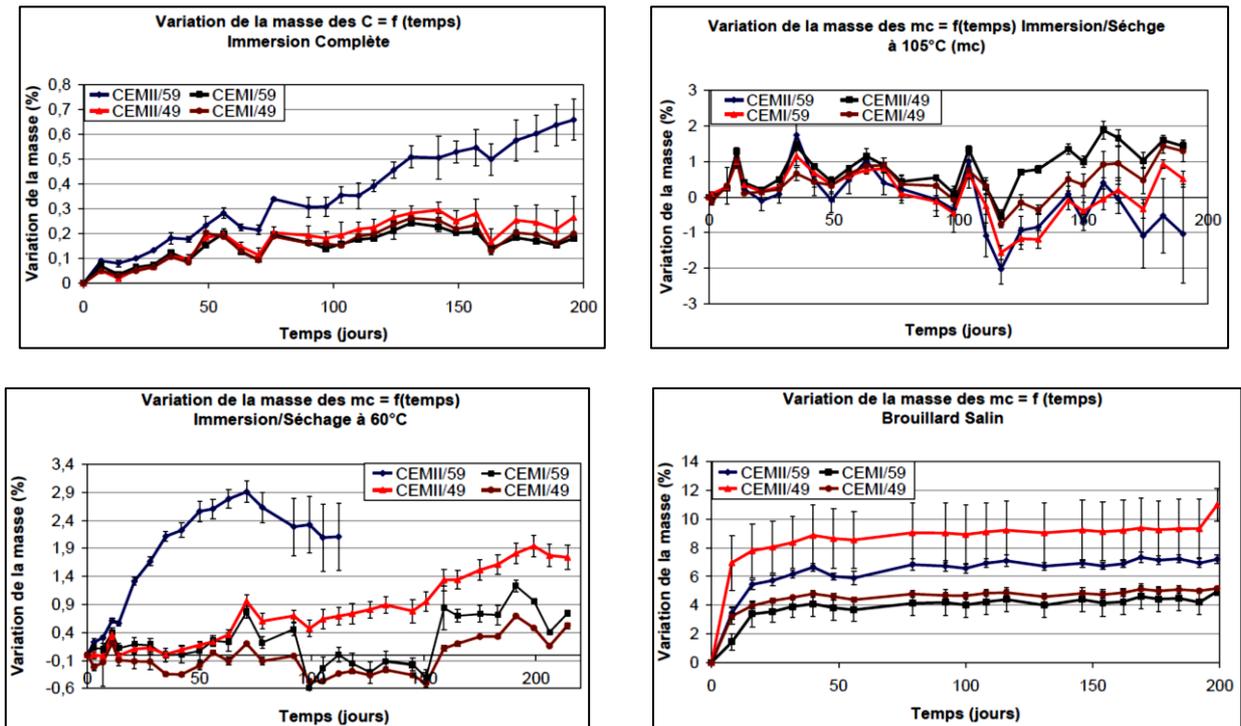


Figure II.20. L'évolution de la masse du béton en fonction du temps dans chaque protocole d'attaque [170]

L'étude de Shanmugavadivu et Malathy [171] porte sur l'effet de l'incorporation de sable concassé par remplacement de sable de rivière, de 0 à 100% par un pas de 10%, sur la durabilité de béton. Plusieurs paramètres de durabilité ont été étudiés à savoir la réaction l'alcali-granulats, la pénétration des ions chlorures, la perméabilité à l'eau et l'attaque chimique des solutions agressives. Dans la partie de l'attaque chimique les auteurs ont testé la perte de masse et la perte de la résistance à la compression après 7, 14, 21, 28, 56, 90, 180 et 365 jours sur des échantillons immergés dans des solutions 0.1N de l'acide sulfurique H₂SO₄, de chlorure de sodium NaCl et de sulfate de sodium Na₂SO₄. Les résultats montrent l'effet bénéfique de l'incorporation de sable concassé par substitution de sable naturel. L'utilisation de sable SC a réduit la pénétration des ions chlorures de 15%, l'expansion due à la réaction alcali-granulats de 17% et la perméabilité du béton de 20%. Pour le remplacement par 70% de SC, la perte de masse

due à l'attaque chimique est réduite de 25 à 40% et la perte de la résistance à la compression est réduite de 2 à 8%. Les auteurs concluent que la substitution par 70% de SC est la proportion optimale pour de meilleures propriétés de durabilité.

Benchaa *et al.* 2012 [172] ont étudié l'influence de l'environnement et de la nature de sable sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et la durabilité. Trois mortiers ont été préparés, un mortier MSD à base de 100% de sable de dune sans plastifiant, un mortier MSDP à base de 100% de sable de dune avec 2% de plastifiant et un mortier MSAD composé de 1/3 sable de dune et de 2/3 de sable alluvionnaire avec 2% de plastifiant. La durabilité a été évaluée par deux tests : le premier est d'examiner les propriétés mécaniques du mortier vis-à-vis du vieillissement par le cycle mouillage-séchage dans lequel les éprouvettes sont soumises à 12 cycles de mouillage pendant 5h et séchage à 71°C pendant 42h. Le deuxième test est d'examiner l'effet de la durée d'immersion totale des échantillons du mortier 4×4×16 cm dans une solution Na₂SO₄ sur la résistance à la compression et à la traction après 1, 2, 3 et 6 mois d'immersion. Les résultats de cette recherche montrent que les résistances des mortiers à la compression ne sont pas très affectées par l'effet de cycles de mouillage-séchage. Par contre une diminution de la résistance à la flexion des mortiers a été observée (Figure II.21).

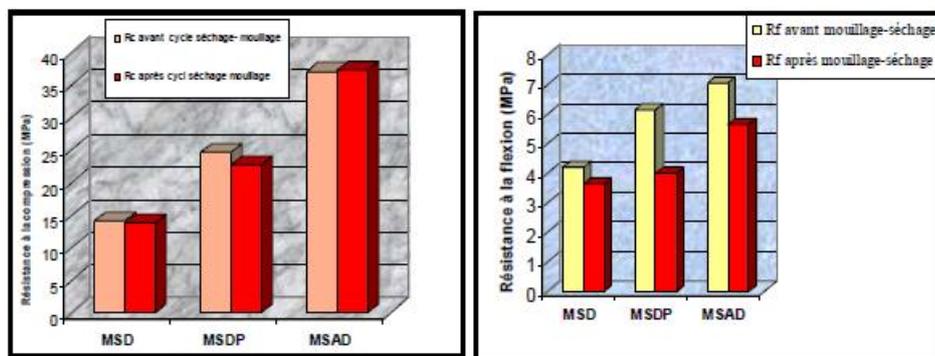


Figure II.21. Influence de mouillage- séchage sur la résistance des mortiers[172]

Les résistances mécaniques des trois mortiers MSD, MSDP et MSAD immergés dans 5% de Na₂SO₄ augmentent jusqu'à l'âge de 90 jours puis elles diminuent à l'âge de 180 jours (Figure II.22 et Figure II.23). Les auteurs concluent que les mortiers à base de sable mélange (1/3 SD + 2/3 SA) sont plus durables vis-à-vis de l'attaque par les sulfates que les mortiers de sable dunaire. Les mortiers de sable de dunes sont plus poreux, ce qui facilite la pénétration des agents agressifs, en diminuant les propriétés liantes et les caractéristiques mécaniques des mortiers [172].

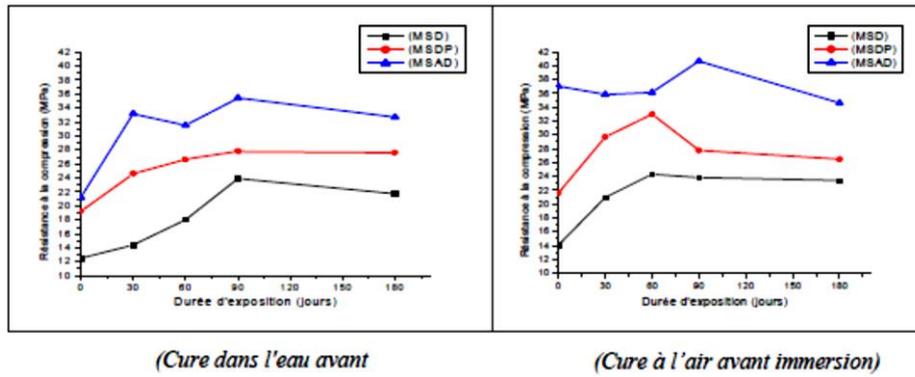


Figure II.22. Résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition aux sulfates [172]

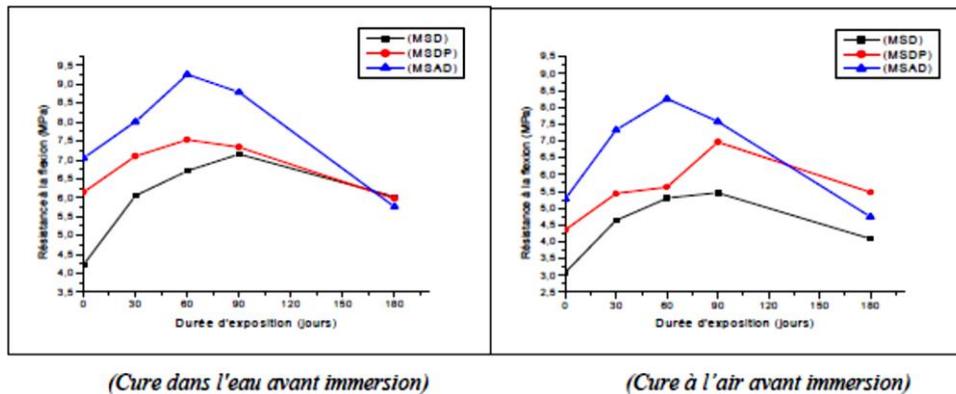


Figure II.23. Résistance à la flexion en fonction de la durée d'exposition aux sulfates [172]

Lohani et *a.l* [173] ont étudié l'influence du sable recyclé comme substituant partiel au sable de rivière sur la durabilité du béton. Trois paramètres d'évaluation de la résistance vis-à-vis de la durabilité, la résistance à la compression, à la traction et à la flexion. L'étude était basée sur l'immersion totale des échantillons du béton dans trois solutions agressives 5% de $MgSO_4$, 5% de NaCl et 2N d'HCl pendant 28 et 91 jours. Les résultats ont montré que la résistance à la compression du béton était maximale pour 30% de remplacement. La résistance à la flexion et à la traction était maximale avec un remplacement de 20%.

Behfarnia et Farshadfar [174] ont étudié l'effet des additions pouzzolaniques tel que la fumée de silice FS, la zéolite Z et la métakaoline MK sur la perte de masse, la modification de la résistance à la compression et la variation des dimensions des échantillons du BAP après 6 et 9 mois d'immersion dans deux milieux de $MgSO_4$ de concentration 5% et 10%. Les résultats de cette étude montrent l'effet positif de MK et Z sur la résistance du BAP à l'attaque des sulfates tandis que les échantillons contenant FS ont de faibles résistances. Selon les auteurs, la faiblesse était due à la formation de M-S-H non liant dans ce type de béton (Figure II.24).

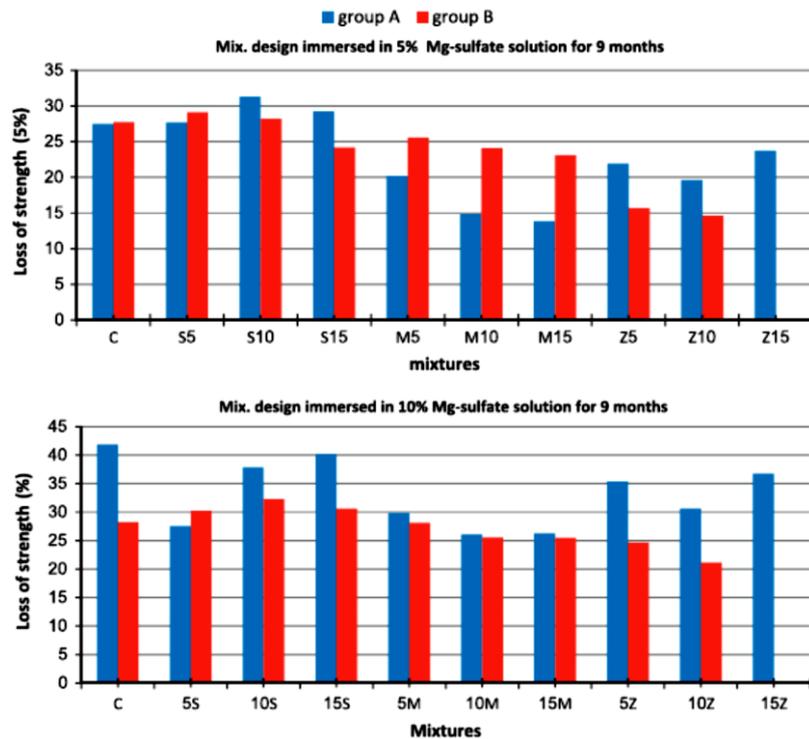


Figure II.24. Perte de la résistance à la compression des échantillons après 9 mois d'immersion la solution $MgSO_4$ [174]

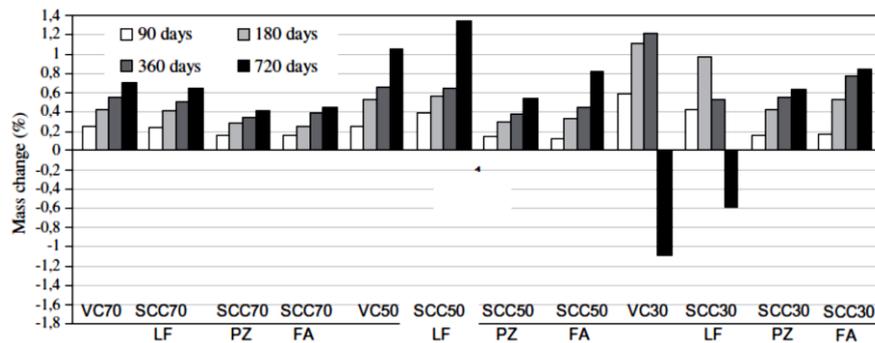


Figure II.25. Variation de la masse des échantillons immergés dans 5% Na_2SO_4 [175]

Siad et al. [175] ont étudié l'effet des additions minérales telles que les fillers calcaires FC, les cendres volantes CV et la pouzzolane naturelle PZ sur la perte en masse, la perte de la résistance à la compression et la variation des dimensions des échantillons du BAP immergés dans 5% Na_2SO_4 jusqu'à 720 jours. Les résultats de cette étude montrent l'effet bénéfique de l'incorporation de la pouzzolane naturelle PZ comme addition minérale dans le BAP sur la résistance à l'attaque des sulfates et elle présente presque le même comportement que la cendre volante CV (Figure II.25, Figure II.26 et Figure II.27). Les auteurs ont conclu qu'il n'est pas recommandé d'utiliser les fillers calcaires dans un BAP exposé à un environnement contenant des sulfates en raison de sa faible résistance vis-à-vis de ce milieu.

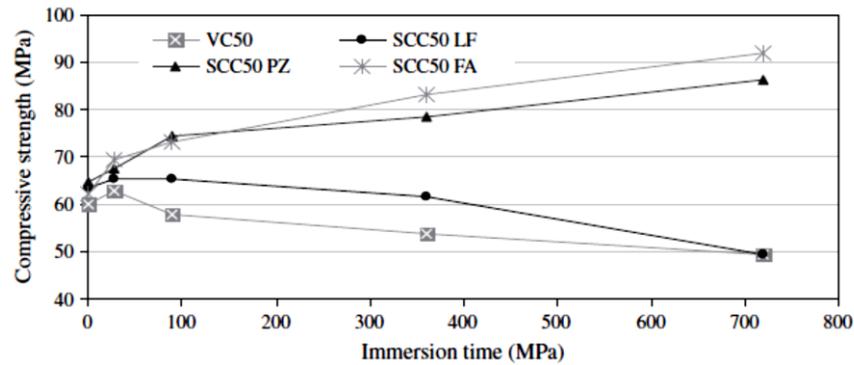


Figure II.26. Développement de la résistance à la compression des cubes de BAP immergés dans 5% Na_2SO_4 [175]

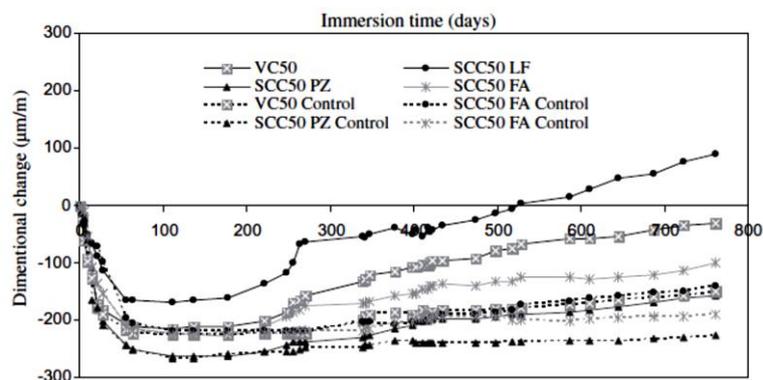


Figure II.27. Variation de dimension des éprouvettes immergées dans l'eau et dans la solution 5% Na_2SO_4 [175]

Deepthy et Mathews [176] ont étudié la variation de la masse et de la résistance à la compression d'un BAP à base de sable concassé sous l'effet d'attaque chimique de 0.25M, 0.5M et 0.75M de NaCl et de 4%, 5% et 6% de MgSO_4 après 7, 14 28 et 56 jours d'immersion totale (Tableau II.2). Les auteurs ont conclu que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la concentration des acides et que la perte de masse des cubes de béton augmente avec le temps d'immersion dans MgSO_4 à cause de la dégradation du béton.

Tableau II.2. Résistance à la compression des échantillons immergés dans NaCl et MgSO_4 [160]

Solution	Résistance à la compression (MPa)			
	7 j	14j	28j	56j
Béton Témoin	46.65	54.51	67.70	69.18
NaCl 0.25M	43.55	50.51	60.40	61.23
NaCl 0.5M	40.42	46.82	56.21	57.30
NaCl 0.75M	37.32	43.21	52.32	53.62
4% MgSO_4	45.46	51.56	60.00	60.89
5% MgSO_4	43.56	49.16	58.20	57.24
6% MgSO_4	42.52	47.26	56.80	55.45

Daisy Angelin et *al.* [177] ont étudié l'effet de la substitution de 20, 40, 60, 80 et 100% de sable naturel par sable concassé SC d'un module de finesse $Mf=2.75$ sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du béton. Deux classes de résistance du béton ont été étudiées C20 et C30. La durabilité est évaluée par la mesure de la variation de la résistance à la compression, à la traction par fendage et à la flexion après 28 jours d'immersion totale des échantillons dans une solution chlorhydrique 5% HCl. Les résultats montrent que la résistance à l'attaque de l'acide est améliorée pour 60% de SC. La diminution de résistance à la compression, à la traction et à la flexion était de 7.12%, 7.38% et 10.29% pour C20 et de 6.43%, 5.73% et 8.28% pour C30 respectivement (Figure II.28).

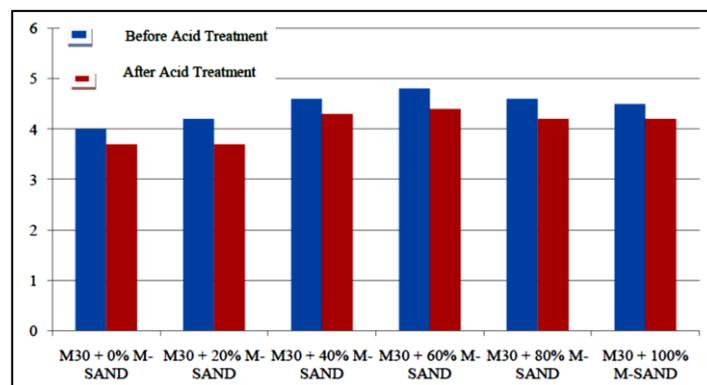


Figure II.28. Comparaison de la résistance à la compression à 28 jours du béton avant et après traitement à l'acide en fonction de sable [177]

Vijaya et Senthil Selvan [178] ont étudié l'effet de la substitution par 30, 40, 50, 60, 70 et 100% de sable de rivière par sable concassé ($Mf=2.68$) sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Pour la durabilité, la perte de masse et la perte de la résistance à la compression ont été évaluées sur les éprouvettes cubiques $15 \times 15 \times 15$ cm après 28 jours d'immersion totale dans deux solutions de 5% H_2SO_4 et de 5% Na_2SO_4 (Tableau II.3). Les résultats de cette étude montrent qu'il y a une amélioration de la résistance aux attaques par acides et sulfates lorsque le sable de rivière est substitué partiellement par 60% de sable concassé.

Tableau II.3. Perte de masse et perte de la résistance à la compression dans solutions agressives [162]

Composition	Sable concassé (%)	Dans 5% H_2SO_4		Dans 5% Na_2SO_4	
		Perte de masse (%)	Perte de Rc (%)	Perte de masse (%)	Perte de Rc (%)
M30	0	2.65	9.73	1.78	6.98
M30	60	2.36	9.54	1.60	6.74
M40	0	2.46	8.49	1.55	5.45
M40	60	2.25	8.31	1.40	5.21
M50	0	2.23	8.08	1.12	4.87
M50	60	2.09	7.98	0.97	4.31

Yajurved et *al.* [179] ont focalisé leur recherche sur l'optimisation de la substitution de sable de rivière par sable concassé avec des proportions 0, 20, 40, 60 et 100% dans le béton. Les chercheurs ont élaboré l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité vis-à-vis de l'attaque par acide sur deux bétons de classe de résistance C20 et C30. La durabilité est évaluée par mesure de la perte de la résistance à la compression, à la traction par fendage et à la flexion après avoir immergé des éprouvettes cubiques, cylindriques et prismatiques pendant 30 jours dans une solution d'acide chlorhydrique HCl. Les auteurs concluent que le remplacement de sable naturel par 60% du sable concassé a monté une bonne résistance au traitement à l'acide en matière de résistances mécaniques (Figure II.29).

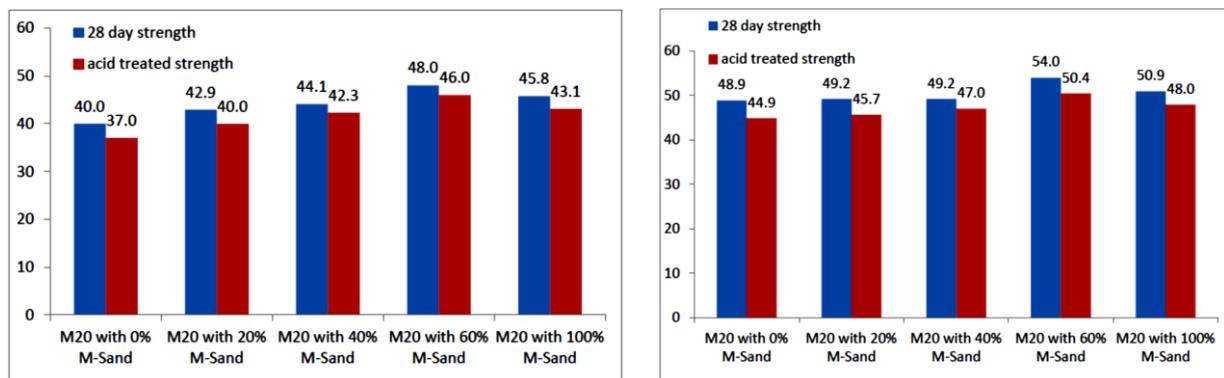


Figure II.29. Résistance à la compression des bétons de classe C20 et C30 en fonction de taux en SC [179]

Boudali S. et *al.* [180] ont étudié l'effet des agrégats recyclés AR, les fines recyclés FC et la pouzzolane naturelle PZ sur la résistance aux attaques des sulfates des BAP et du béton de sable autoplaçant BSAP. La perte de masse, la réduction de la résistance mécanique, l'examen visuel et l'analyse microscopique par ATG et MEB ont été mesurés sur huit (08) mélanges après 2, 3, 6 et 12 mois d'exposition aux trois environnements agressifs de sulfate. Une immersion totale à 5% Na_2SO_4 , des cycles 4h/20h d'immersions/séchages à 60°C et des cycles immersion/séchages à 105°C. Les auteurs ont constaté que la vitesse d'endommagement était lente pour les échantillons de BAP et de BSAP totalement immergés dans les solutions de sulfate de sodium (Figure II.30 et Figure II.31). Les résultats montrent, aussi, que l'incorporation des granulats AR ou NA avec les fillers FC contribue à l'amélioration des performances des BAP vis-à-vis de l'environnement sulfurique très sévère (environnement cyclique) au contraire avec ceux qui contiennent les granulats NA et la pouzzolane naturelle PZ (Figure II.32 et Figure II.33). Les auteurs ont attribué cette différence au volume important des aluminates dans la pouzzolane >15% qui est susceptible à l'attaque par les sulfates

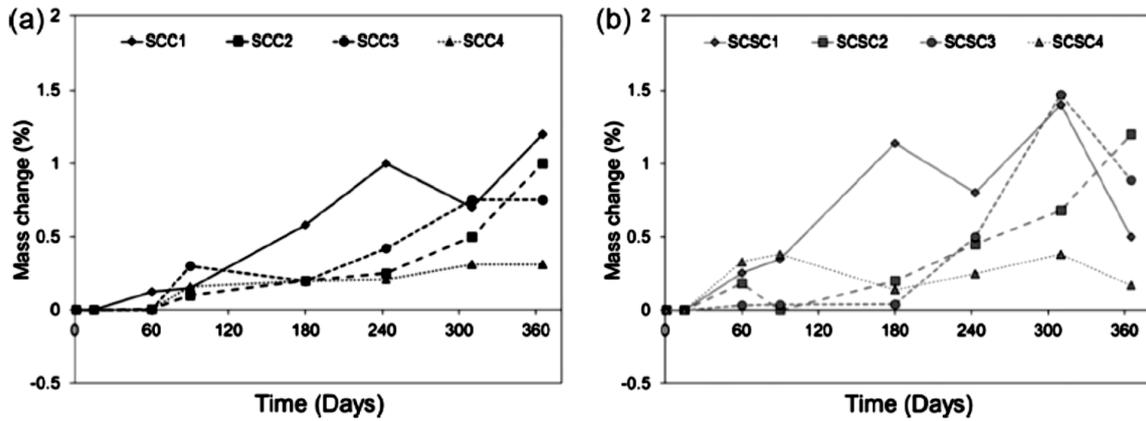


Figure II.30. Variation de masse des spécimens immergés dans la solution 5% Na₂SO₄ : a) BAP et b) BSAP [180]

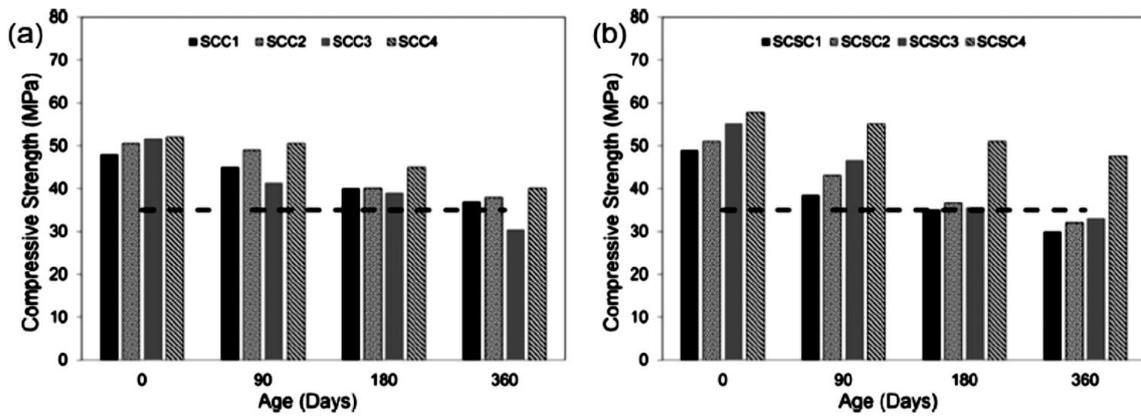


Figure II.31. Variation de la résistance à la compression des spécimens après un an d'immersion dans la solution 5% Na₂SO₄ [180].

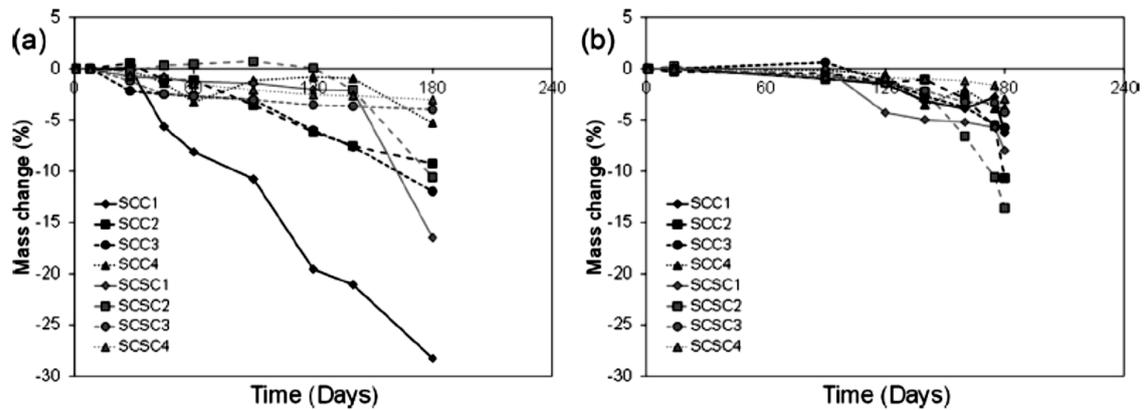


Figure II.32. Variation de masse des spécimens exposés aux cycles immersion/séchage dans la solution 5% Na₂SO₄ : a) 60°C et b) 105°C [180]

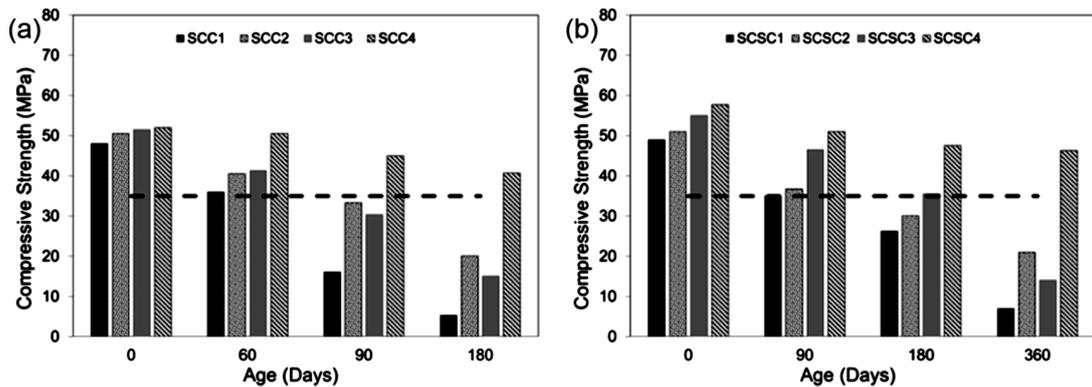


Figure II.33. Variation de la résistance à la compression des spécimens exposés aux cycles immersion/séchage à 105°C dans la solution 5% Na₂SO₄ [180]

L'étude de Tebbal & Rahmouni [181] porte sur l'influence de remplacement du sable concassé par le sable dunaire SD sur les propriétés d'un béton de haute performance BHP. Dans la phase de durabilité, l'auteur a étudié la variation des indicateurs de durabilité telle que l'absorption capillaire (la sorptivité) et la résistance vis-à-vis de l'attaque chimique pour différentes teneurs en SD (0, 1/3, 2/3 et 1) par remplacement du SC. La sorptivité a été mesurée sur des échantillons de béton de formes cylindriques de 10 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur, mis en contact avec l'eau libre de 1 cm de hauteur maintenue à un niveau constant et les faces latérales sont recouvertes d'une feuille d'aluminium. La masse d'eau absorbée est déterminée par pesées successives d'échantillons en fonction de \sqrt{h} (h instant de mesure). La résistance de l'attaque chimique a été mesurée par l'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes cubiques 10×10×10 cm du béton immergées dans 5% de MgSO₄ après 28, 270 et 365 jours. Les résultats montrent que l'absorption d'eau du béton augmente avec l'augmentation de la proportion de sable de dune (Figure II.34). D'après les auteurs, l'augmentation est due à la variation de la densité et de la porosité entre les différents sables utilisés. Le remplacement partiel du sable de dune par du sable concassé (1/3 SD+ 2/3SC) dans des échantillons de béton a amélioré la résistance mécanique dans l'environnement agressif.

Kavitha & Partheeban [182] se sont concentrés sur l'optimisation du remplacement de sable naturel par un sable concassé dans le BHP de classe de résistance C60 en vue d'améliorer sa performance à la pénétration des ions chlorures et à l'absorption d'eau. Les auteurs ont observé que les propriétés de durabilité s'améliorent lorsque le sable naturel est remplacé par celui concassé. Ils ont constaté que la pénétration des ions de chlorure et l'absorption d'eau diminuent avec l'augmentation de taux de SC jusqu'à l'optimum de 75%. Les auteurs ont conclu qu'il est possible de substituer 75% de sable naturel par le sable concassé pour une durée de vie des structures plus longue.

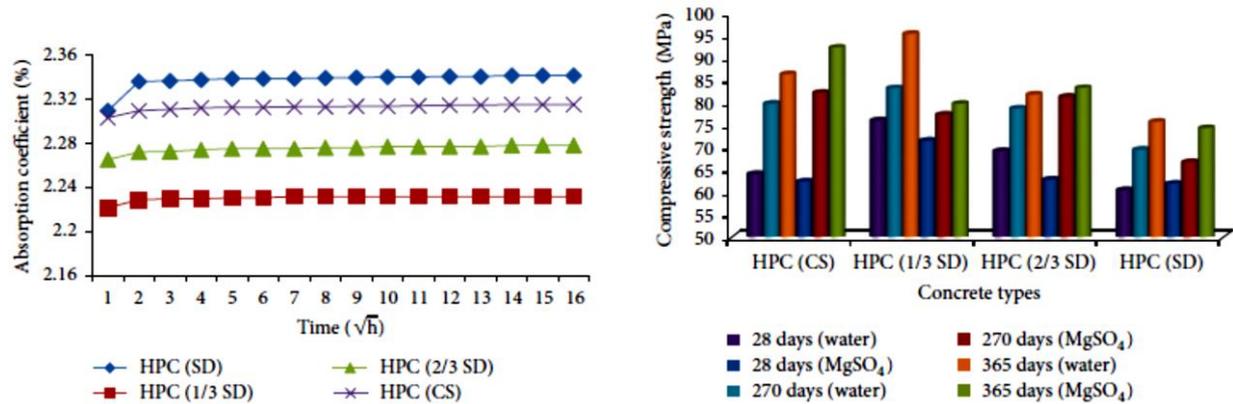


Figure II.34. Variation de coefficient d'absorption capillaire et la résistance à la compression dans la solution agressive des bétons BHP à base de sable de dune et sable concassé [181]

II.3.4. Synthèse

L'étude de la résistance du BAP vis-à-vis de l'attaque des acides est très importante vu de son volume de pâte élevé. La pâte est très sensible à la dégradation par acide fort ou par les sulfates. La plupart des études focalisent sur l'étude de l'impact des additions minérales sur la durabilité du BAP. Généralement, le BAP contenant des ajouts minéraux a une bonne résistance aux attaques par acides grâce à l'amélioration de la compacité et à la consommation de la portlandite. La durabilité du BAP est très affectée par la nature du ciment et par le rapport E/C. Très peu d'études traitent l'effet des combinaisons des sables sur la résistance à l'attaque par les acides chlorhydriques ou sulfuriques.

Les études montrent l'effet bénéfique de l'incorporation de sable concassé par substitution de sable naturel. L'utilisation de sable SC a réduit la pénétration des ions chlorures, l'expansion due à la réaction alcali-granulats et la perméabilité du béton. La plupart des études montrent que la résistance à l'attaque des acides ou des sulfates s'améliore pour 60% de SC. Pour des quantités modérées de sable de dune SD, la résistance aux agressions chimiques s'améliore et l'absorption initiale à la surface du béton augmente quand la teneur en sable des dunes augmente.

II.4. Effets de différents régimes durcissement sur les propriétés du BAP et BO:

Yazicioglu et al. [146] ont réalisé des expériences sur un BAP fait avec des cendres volantes et de la fumée de silice et durci dans trois conditions différentes: les éprouvettes du BAP immergées dans l'eau normale à 20 ° C, enveloppées (scellées) et durcies à l'air pendant 3, 7, 14 et 28 jours de. La résistance à la compression, à la traction et la vitesse de propagation d'ultrason. Les résultats ont montré que le durcissement à l'eau donnait les valeurs les plus élevées, suivis du durcissement par enveloppement et à l'air quels que soient le type et l'âge du durcissement. Pour les tests de résistance à la compression et à la traction, le BAP avec des fumées de silice donne de meilleurs résultats que le BAP fabriqué avec des cendres volantes (Figure II.35).

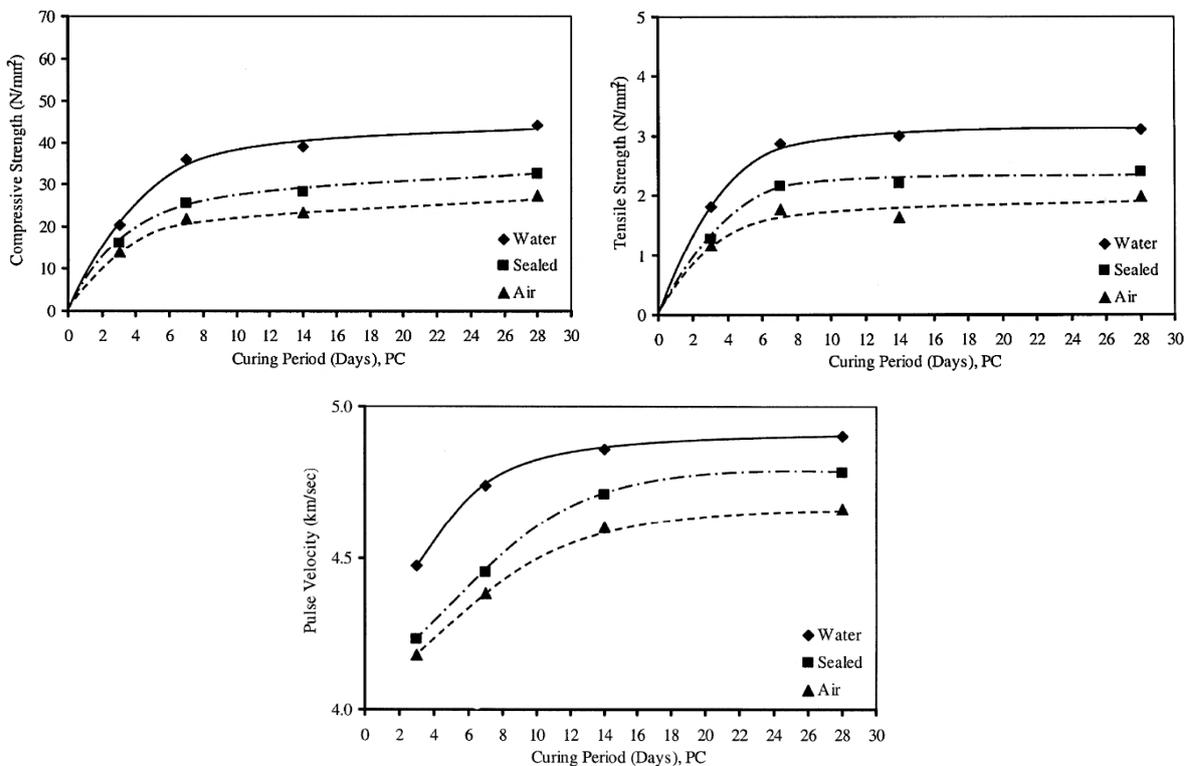


Figure II.35. Variation de la résistance à la compression, à la traction et la vitesse de propagation d'ultrason en fonction de la méthode et la durée de durcissement du BAP [146]

L'étude de Reinhardt et Stegmaier [183] porte sur l'influence d'un traitement thermique sur la résistance à la compression du BAP. Quatre régimes de traitement du BAP de classe C20/25 et C70/85 ont été examinés, à 20°C (la cure standard), à 40°C pendant 14 heures, à 60°C pendant 5 heures et à 80°C pendant 3 heures. Les résultats de cette étude montrent que la résistance à la compression du BAP après un traitement thermique est fortement influencée par les paramètres de la composition en particulier au rapport E/C (Figure II.36).

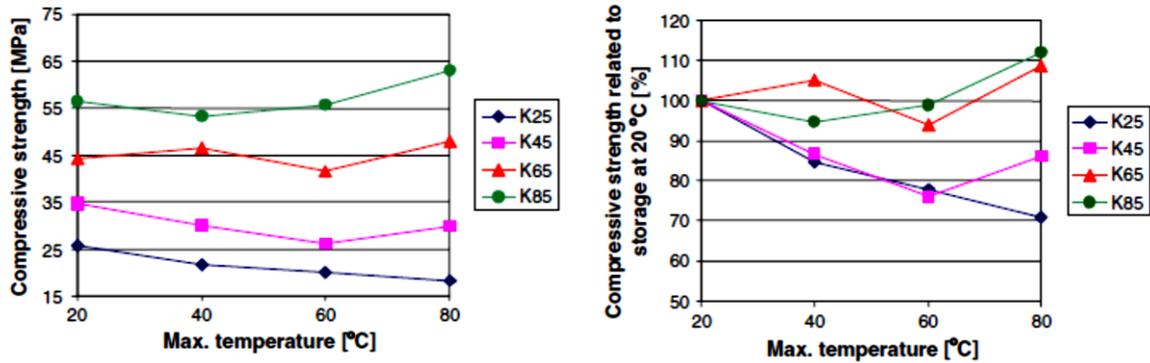


Figure II.36. Effet de la température maximale de durcissement sur la résistance à la compression des BAP : (à gauche) Variation de la résistance à la compression et (à droite) Résistance relative à la compression par rapport au durcissement dans 20°C [183]

Les auteurs ont attribué la perte substantielle de la résistance dans certains cas à la modification de la distribution de la taille des pores qui peuvent éventuellement être expliquée par les différents rapports (E/C) des BAP (Figure II.37).

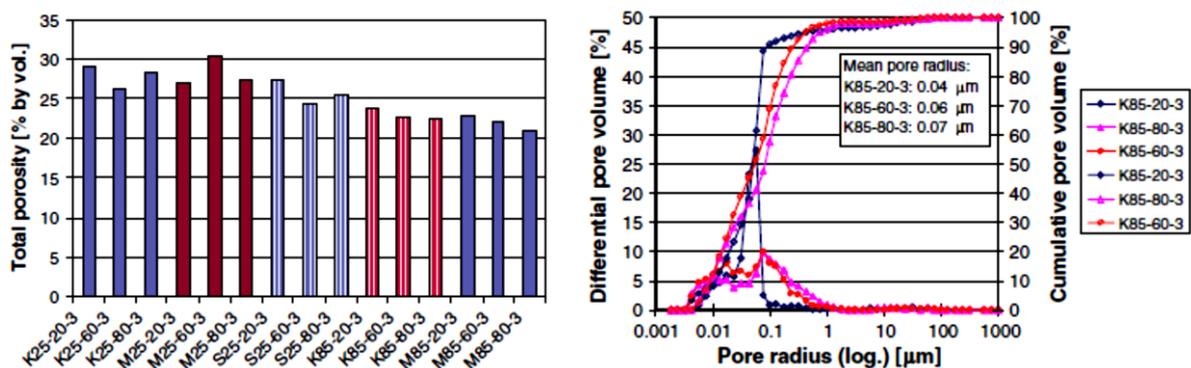


Figure II.37. Porosité et taille des pores de différents BAP durcissent à 20 °C, 60 °C and 80 °C [183].

Heba [184] a travaillé sur l'effet de différents régimes de durcissement sur la résistance à la compression du BAP à base des mélanges binaires et ternaires de ciment, de cendre volante et de la fumée de silice. Deux dosages en ciment ont été élaboré 450Kg/m³ et 550 Kg/m³. Neuf échantillons cylindriques de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur ont été préparés pour chaque mélange, trois échantillons ont été durcis dans l'eau pendant 28 jours, trois autres dans l'eau pendant 7 jours et trois qui restent ont été laissés à l'air libre pendant 28 jours. Les résultats montrent que le BAP avec 15% de SF donne des valeurs de résistance à la compression plus élevées que celles avec 30% de FA et que les échantillons durcis dans l'eau pendant 28 jours donnent les valeurs les plus élevées de résistance à la compression (Figure II.38 et Figure II.39).

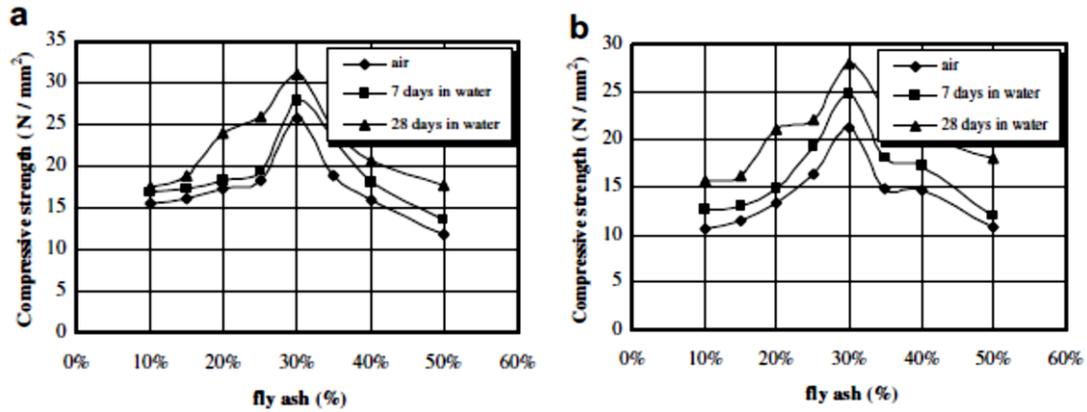


Figure II.38. Résistance à la compression des BAP contenant la cendre volante : (a) Ciment = 550 kg/m³; (b) Ciment = 450 kg/m³ [184]

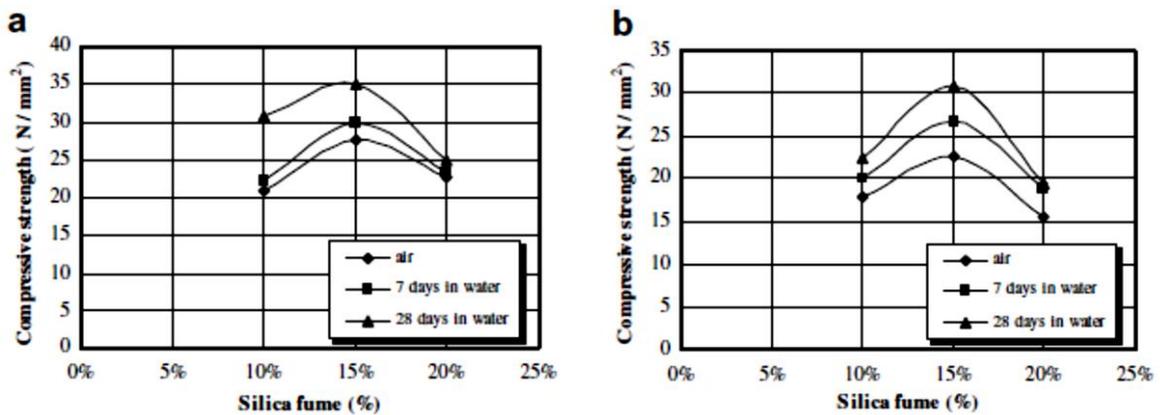


Figure II.39. Résistance à la compression des BAP contenant la fumée de silice : (a) Ciment = 550 kg/m³; (b) Ciment = 450 kg/m³ [184]

Les travaux de Bingöl & Tohumcu [141] portent sur l'étude de l'effet du durcissement à l'air, de l'eau et de la vapeur sur la résistance à la compression du béton autoplaçant BAP. Le BAP a été préparé par la substitution partielle massique de ciment par 5%, 10% et 15% de la fumée de silice et par 25%, 40% et 55% des cendres volantes. La résistance à la compression la plus élevée a été observée dans les échantillons de béton avec 15% de fumée de silice et pendant 28 jours de durcissement dans l'eau. Le durcissement à l'air a entraîné des pertes de résistance à la compression dans tous les mélanges (Figure II.40). Les résistances relatives les plus élevées ont été déterminées pour les bétons contenant des additions minérales et exposés aux conditions de durcissement à la vapeur.

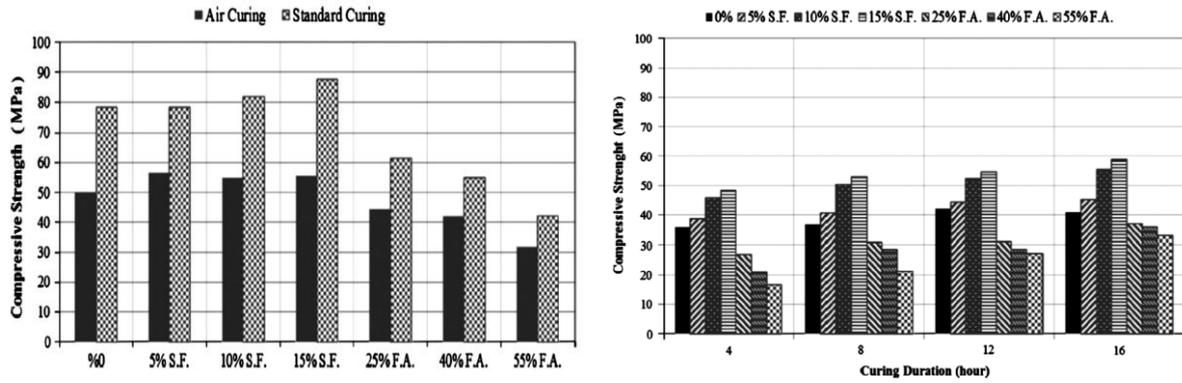


Figure II.40. Influence de type de cure sur la résistance à la compression d'un BAP en fonction des additions [141]

Derabla & Benmalek [185] ont étudié l'effet de l'incorporation des ajouts minéraux sur le comportement du béton autoplaçant BAP traité thermiquement à un âge précoce (1 jour) et à long terme (28 et 180 jours). Le cycle de traitement adopté a atteint une température maximale de 60 ° C et une durée totale de 24 h. Trois additions au ciment au niveau de 20% et 40% ont été utilisées. Il s'agissait de filler calcaire (LF), de laitier granulé (GS) et de laitier cristallisé (CS). Les résultats de cette étude montrent qu'à niveau de substitution de 40% de laitier cristallisé et par un traitement thermique le BAP devient moins poreux et plus résistant. Pour les deux modes de traitement, la résistance à l'âge de 28 et 180 jours des deux BAP contenant de 20% de laitier granulé et 20% de laitier cristallisé sont respectivement les plus résistants (Figure II.41). Les auteurs concluent que le traitement thermique à 60°C pendant 24 heures permet d'obtenir des BAP très résistants tout en fonction de sa composition.

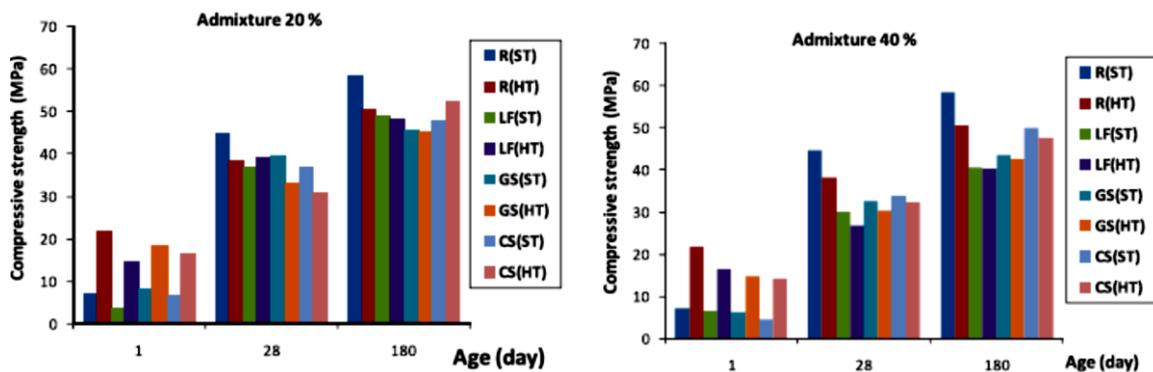


Figure II.41. Influence des additions minérales et le processus de traitement sur la résistance à la compression du BAP (ST : Cure standard- immersion dans l'eau et HT : traitement thermique) [185]

Safuddin *et al.* [138] ont étudié l'effet de différentes techniques de durcissement sur les propriétés du béton à base micro-silice (utilisé en remplacement du ciment à 10% en poids) avec un rapport eau/liant de 0,35. Trois méthodes de durcissement telles que le durcissement à l'eau

(WAC), le durcissement par enveloppement en plastique (WRC) et le durcissement à l'air sec (DAC) ont été appliquées à 20 ± 20 ° C pour durcir les éprouvettes du béton. Plusieurs propriétés ont été testées, la résistance à la compression, le module d'élasticité dynamique et l'absorption initiale à la surface. L'étude a révélé que le durcissement dans l'eau (WAC) était la méthode de cure la plus efficace, car elle produisait les plus hautes valeurs de la résistance à la compression et de module d'élasticité dynamique et ainsi de faible absorption en raison de la plus faible porosité. Le durcissement à l'air sec (DAC) a influé négativement sur la résistance à la compression, sur le module d'élasticité dynamique et sur l'absorption initiale après 10 et 120 minutes. Cela pourrait être dû au séchage précoce du béton qui a pratiquement cessé l'hydratation du ciment et qui a produit des microfissures ou a eu des fissures de retrait. Les résultats expérimentaux indiquent que le durcissement à sec (DAC) n'est pas une méthode efficace pour obtenir de bonnes propriétés de durcissement du béton (Figure II.42) . Safiuddin a constaté que le durcissement par enveloppement (WRC) en plastique est plus efficace que le durcissement à l'air sec (DAC), car il entraîne de bonnes performances du béton (une résistance à la compression et un module d'élasticité dynamique supérieure et faible coefficient d'absorption (Figure II.43)). Ceci est dû au fait que la couche imperméable du film empêchait les mouvements d'humidité de durcissement enveloppés à partir de la surface du béton et, par conséquent, une bonne quantité d'humidité était disponible pour être utilisée tout au long du processus d'hydratation.

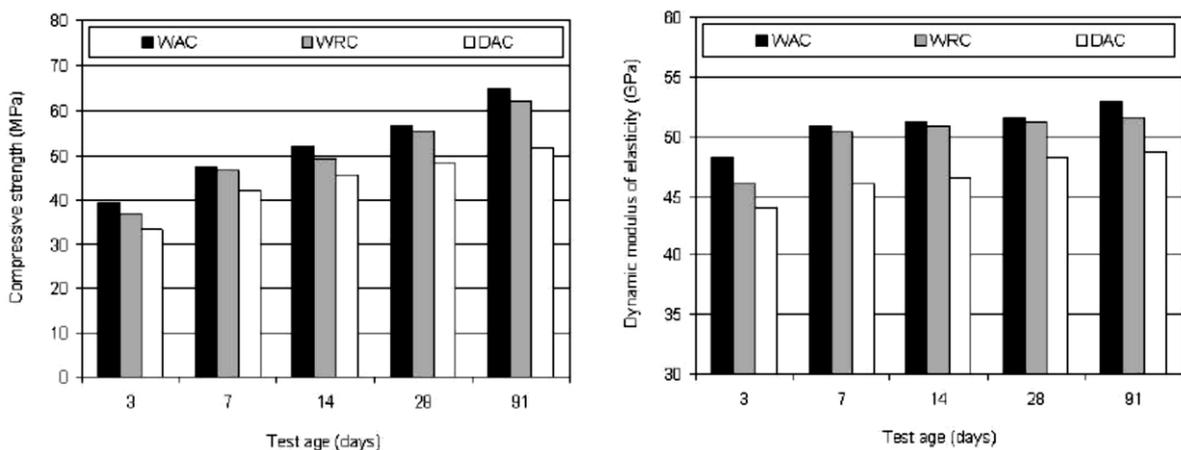


Figure II.42. Effet de mode de cure sur la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique de béton [138]

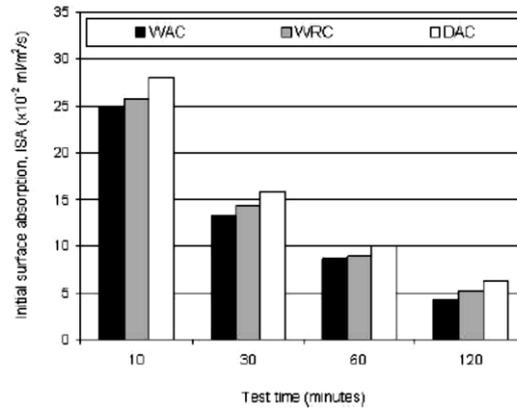


Figure II.43. Effet de mode de cure sur l'absorption initiale à la surface de béton [138].

Goel *et al.* [186] ont étudié l'effet de la méthode et la durée de durcissement sur la résistance à la compression, à la traction par fendage et à la flexion d'un béton ordinaire. Les paramètres de l'étude comprennent la période de durcissement (3, 7, 28 et 56 jours) et la méthode de durcissement (durcissement à l'air, recouvrement en film plastique et immersion dans l'eau). Les résultats montrent que pour la cure dans l'eau, une augmentation de 42,1% de la résistance à la compression après 7 jours d'immersion par rapport à sa résistance de 3 jours et une augmentation de 61% de la résistance à la compression à 28 jours par rapport à sa résistance à 7 jours (Figure II.44). Les mêmes observations ont été soulevées pour la résistance à traction et à la flexion (Figure II.45). Les auteurs concluent que le durcissement par immersion dans l'eau est la méthode la plus efficace par rapport au durcissement à sec et par enveloppement en film plastique.

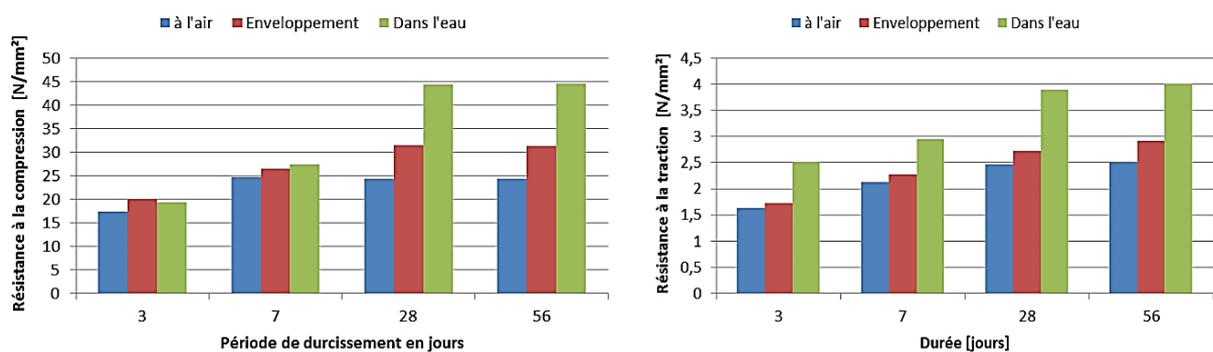


Figure II.44. Effet de la durée et la méthode de durcissement sur la résistance à la compression et à la traction du béton [186]

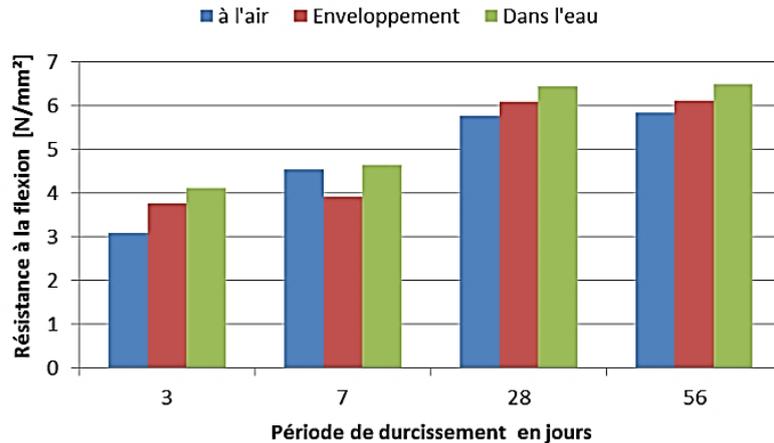


Figure II.45. Effet de la durée et la méthode de durcissement sur la résistance à la flexion du béton [186]

Ibrahim et al. [187] ont évalué l'effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression, sur l'absorption d'eau et sur la perméabilité aux chlorures des bétons à base de deux ciments différents. Les échantillons de dalle et de poutre ont été préparés et durcis en les recouvrant d'une toile de jute humide ou en appliquant un produit de cure dans des conditions réelles. Quatre types de composés de cure, à savoir des résines époxy à base d'eau, d'acrylique, de bitume et de goudron de houille, ont été appliqués sur les éprouvettes de béton. Les résultats de cette étude montrent que les propriétés des échantillons du béton qui durcit par les produits de cure sont similaires ou meilleures que ceux qui durcissent par recouvrement en jute humide. La meilleure performance a été démontrée par des échantillons de béton durcis en appliquant le produit de cure à base de bitume, suivis de ceux durcis en appliquant un produit de cure époxy à base de goudron de houille. La période initiale de mûrissement à l'eau, avant l'application du produit de cure, est bénéfique pour augmenter la durabilité du béton.

Le travail expérimental de Kumbhar et Murnal [188] porte sur l'étude de l'effet de l'humidité et de la température sur les propriétés du béton à haute performance BHP. Les auteurs ont observé que la résistance du béton est affectée par un certain nombre de facteurs tels que la durée de cure humide, la méthode de cure et la température (Figure II.46). Un durcissement inadéquat ou insuffisant est l'un des principaux facteurs contribuant à la fragilité des surfaces du béton, à sa faible résistance à l'abrasion et à sa faible durabilité (Figure II.47).

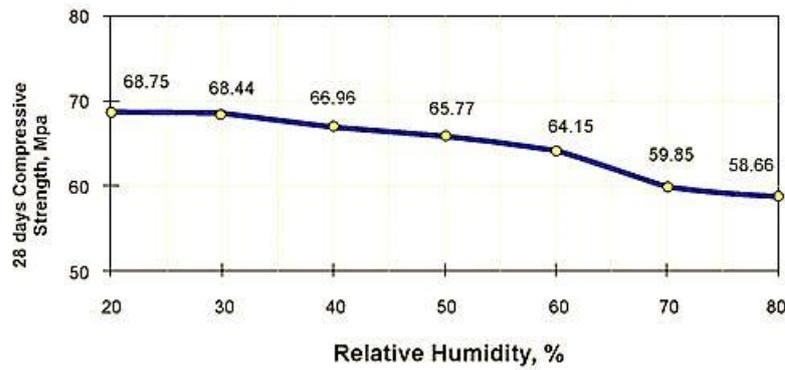


Figure II.46. Variation de la résistance à la compression en fonction de de l'humidité (Température 30°C) [188]

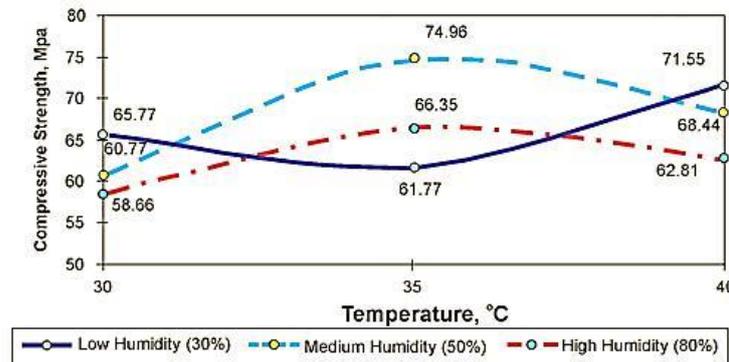


Figure II.47. Effet de la température sur la résistance à la compression de BHP[188].

Gallucci et al. [189] ont étudié l'influence de la cure à différentes températures sur les propriétés et la microstructure du béton. Les échantillons du béton ont été plongés dans un bain isotherme à 5°C, 20°C, 40°C et 60°C avec 100% d'humidité. À échéances fixes, les résistances en compression et flexion, module d'Young, sorptivité capillaire ont été mesurées. Les résultats montrent que la cure du béton dans une température basse conduit à une résistance mécanique supérieure et à moins de porosité par rapport à ceux durcis dans une haute température sans pour autant que leur hydratation soit plus élevée. Ceci est dû, d'après les chercheurs, à un développement microstructural plus grossier : les hydrates (notamment le C-S-H) étant plus denses à haute température et distribués de manière plus hétérogène, permettent ainsi le développement d'un réseau poreux plus large, qui est à l'origine de la perte de la résistance. Les auteurs ont conclu que pour une température donnée, il existe une relation linéaire entre le degré d'hydratation et la résistance en compression du béton (Figure II.48). Le fait que ces relations soient dépendantes de la température montre bien que c'est le développement microstructural qui est à l'origine de ces différences et non pas le degré d'hydratation lui-même : à degré d'hydratation égal, plus la température est élevée, plus la résistance est faible.

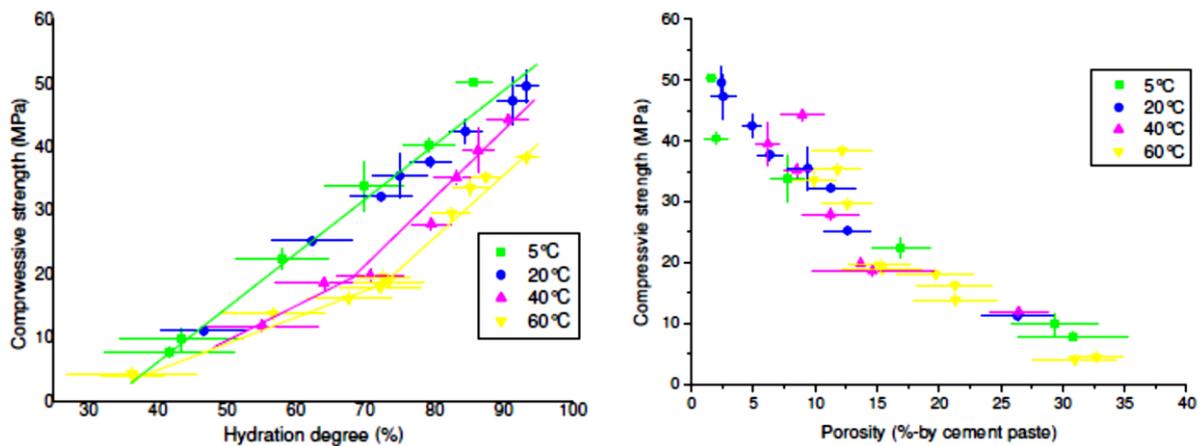


Figure II.48. Relations entre la résistance et degré d'hydratation (gauche) et porosité (droite) [189]

Mezghiche et *al.* [190] Ont étudié l'effet de type de ciment et de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire sur le développement de la résistance à la compression des éléments en béton préfabriqué. Pour cette raison, les auteurs ont mis des éprouvettes de béton et de mortier dans un conteneur métallique humide fermé avec couvercle métallique et exposé aux rayons solaires. Les éprouvettes sont exposées à des régimes de chauffage/traitement/refroidissement comme indiqué dans le tableau (Tableau II.4). La résistance à la compression a été mesurée après 1, 3, 7, 14 et 28 jours de traitement. Les auteurs ont trouvé, qu'à des températures ambiantes de 25 ° C et plus, la température interne dans le conteneur atteint 50 à 70 ° C et la résistance du béton après 8 heures de stockage atteint 70 à 75% de la résistance nominale (Figure II.49 et Figure II.50). Ils ont conclu que, dans ces conditions, le taux de production d'éléments préfabriqués en béton peut considérablement s'améliorer.

Tableau II.4. Cycles de stockage adopté par [174]

Régime	Chauffage	Traitement	Refroidissement
2/10/2	2	10	2
2/8/2	2	8	2
2/6/2	2	6	2
2/4/2	2	4	2
1/2/1	1	2	1

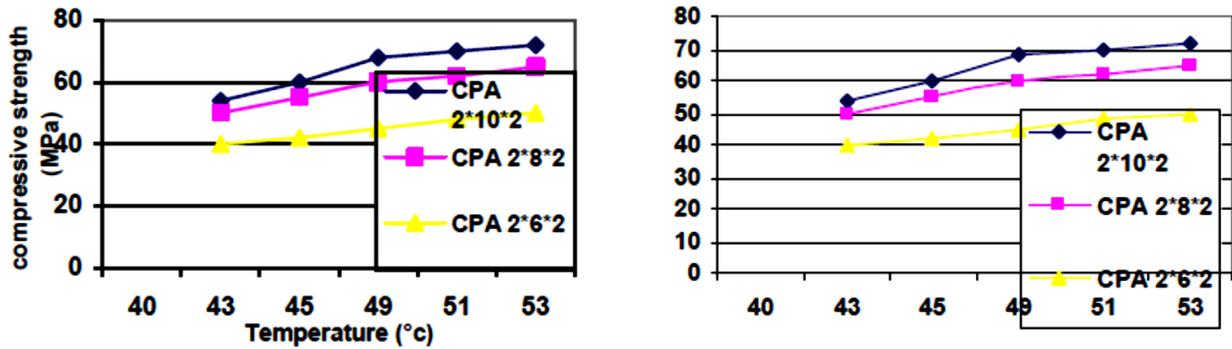


Figure II.49. Pourcentage de développement de la résistance à la compression du béton à base de CPA et CPJ en fonction de température [190]

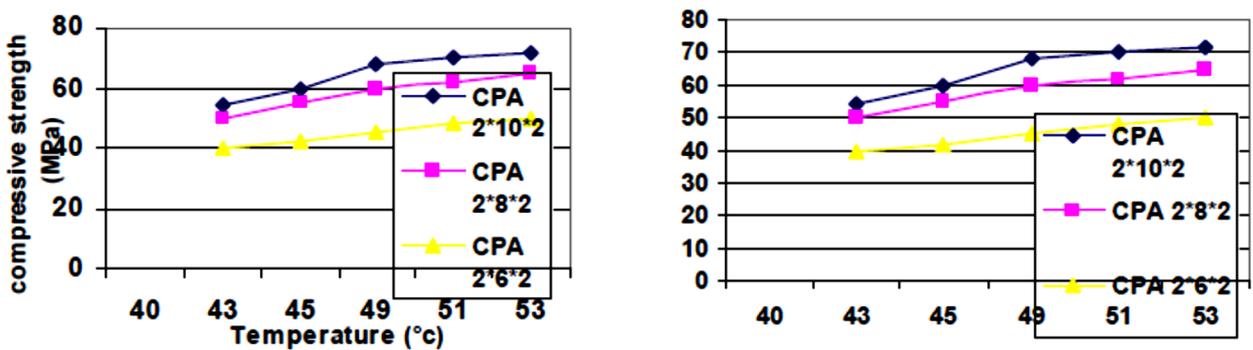


Figure II.50. Pourcentage de développement de la résistance à la compression du mortier à base de CPA et CPJ en fonction de température [190]

Dans le même contexte Benammar et al. [139] ont étudié l'influence du durcissement à la vapeur atmosphérique par l'énergie solaire sur la résistance à la compression et à la flexion des bétons pour éléments préfabriqués. Quatre méthodes de cure ont été utilisées: cure à l'eau, cure à l'air, durcissement à la vapeur à 29°C et à la vapeur à 45°C (Figure II.51). D'autres paramètres ont été étudiés en parallèle à savoir l'effet du rapport eau/ciment et l'influence du type de ciment (CEM I 42.5 et CEM II / B 42.5). Les résultats montrent l'effet bénéfique de la technique de durcissement à la vapeur pour une meilleure résistance à la compression et à la flexion, en particulier au début du mûrissement. L'étude montre qu'il est possible d'obtenir une résistance similaire à celle de 28 jours de durcissement à l'air après uniquement un jour de durcissement à la vapeur pour les deux types de ciment et les différents rapports E/C (Figure II.52). Les auteurs concluent que la technique de durcissement à la vapeur par énergie solaire est une technique très efficace pour le durcissement accéléré des bétons, pour une bonne résistance et une économie d'énergie électrique pour la production de bétons préfabriqués.



Figure II.51. Chambre de traitement à la vapeur exposée aux rayons solaires utilisée par Benammar et al. [139]

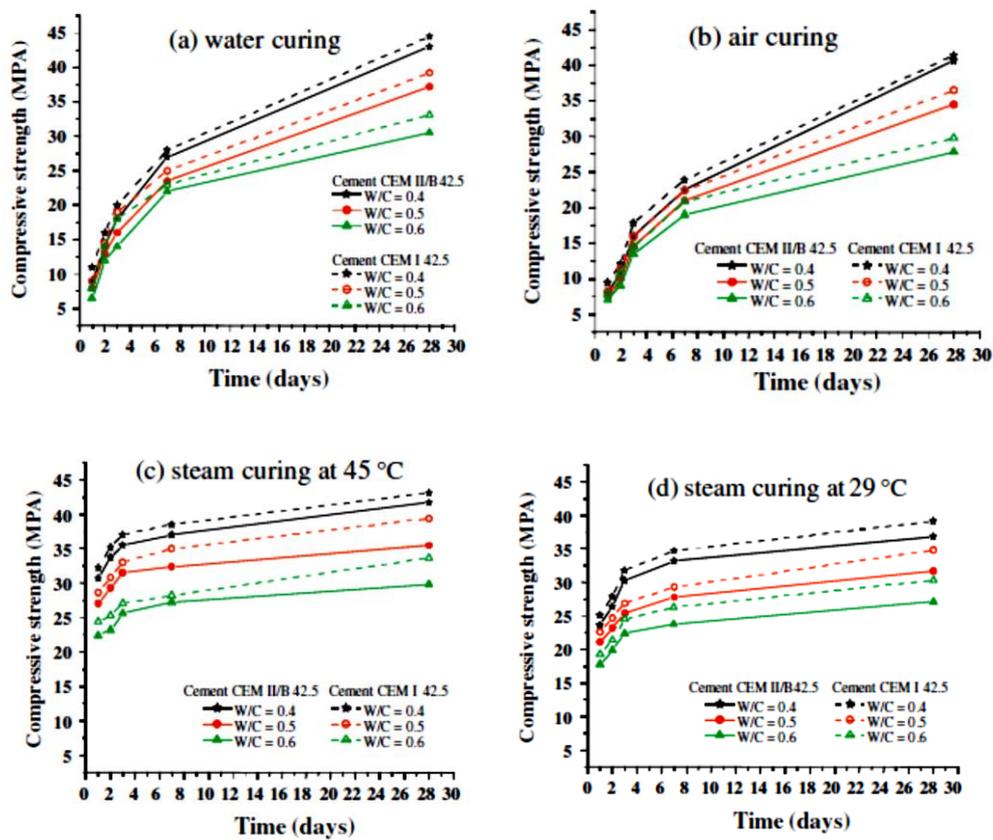


Figure II.52. Effet des méthodes de durcissement, type de ciment et le rapport E/C sur le développement de la résistance à la compression [139].

L'étude expérimentale de Mahdi-Fawzi et Tawfeeq-Agha [191] examine l'effet des températures de durcissement (21, 30, 40 et 50 °C) et le produit de cure sur le développement de la résistance à la compression à 7, 28, 56 et 91 jours du béton haute performance BHP. Les résultats ont montré qu'à un âge précoce, le taux de développement de la résistance à une température élevée était supérieur à celui à une température de durcissement basse, une amélioration de 10,83% à 50°C par rapport à 21 °C après 7 jours de durcissement

(Figure II.53). Cependant, à des âges plus avancés, la résistance a été réduite de 5.70% à une température de durcissement de 50°C par rapport à une température de durcissement de 21°C après 91 jours de durcissement.

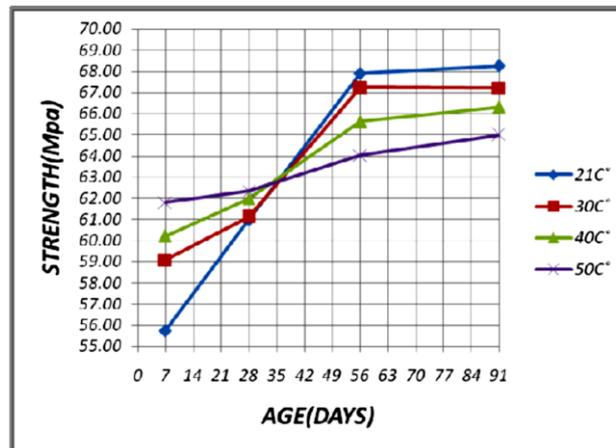


Figure II.53. Effet de la température de cure sur la résistance à la compression de béton haute performance [191]

II.4.1. Synthèse

Le durcissement par immersion dans l'eau est la méthode la plus efficace par rapport au durcissement à l'air sec ou par enveloppement en film plastique. Le durcissement à l'air sec a entraîné des réductions des propriétés mécaniques en raison du séchage précoce du béton qui a pratiquement cessé l'hydratation du ciment. Le durcissement par enveloppement en plastique est plus efficace que le durcissement à l'air sec car il protège le béton contre la dessiccation de la surface. En cas de traitement thermique à la vapeur ou par d'autres techniques, la température dans l'enceinte doit être maintenue à environ 60°C, elle donne un gain de résistance rapide par rapport au béton durci à 23°C pendant 28 jours. Les températures supérieures à 70 °C doivent être évitées car elles pourraient endommager la résistance ultime.

Les recherches citées précédemment ont la plupart étudié l'effet de la méthode de durcissement et les types des additions minérales sur les propriétés mécaniques du BAP. La résistance du BAP est affectée par la durée de cure humide, la méthode de cure et la température. Un durcissement inadéquat ou insuffisant est l'un des principaux facteurs contribuant à la fragilité des surfaces, à la faible résistance et à la faible durabilité. Dans le cas de traitement thermique, la résistance à la compression du BAP est fortement influencée par les paramètres de la composition en particulier au rapport E/C.

Deuxième partie.
Étude expérimentale

Chapitre III .
Caractéristiques des matériaux utilisés,
formulation et méthodes d'essais

III.1. Introduction :

L'effet des matériaux constituants du béton BAP nécessite une bonne compréhension de leurs diverses propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, afin que nous puissions comprendre le comportement du béton à l'état frais et durci et vis-à-vis de durabilité.

Ce chapitre met en évidence les principales caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi qu'une explication de la procédure expérimentale approuvée y compris les formulations des bétons testés et une description des différentes expériences effectuées au cours de ce travail.

Les essais sont effectués au niveau du laboratoire de matériaux du département de génie civil- université de Djelfa et au niveau de L.N.H.C Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction Sud-Est unité régionale Djelfa. L'analyse par diffraction aux rayons-X est effectuée au niveau du centre de recherche nucléaire d'EL-Birine CRNB.

III.2. Caractéristiques des matériaux

III.2.1. Le ciment

Un ciment portland composé de type CEM II/B-L 42.5N a été utilisé conformément à la norme Algérienne NA 442 [192], ce ciment est délivré par la société LAFARGE Holcim Algérie (cf. fiche technique annexe « A »), les caractéristiques physiques sont présentées dans le [Tableau III.1](#). Sa composition chimique et minéralogique est indiquée dans le

[Tableau III.2](#) et le [Tableau III.3](#) respectivement. La composition minéralogique est calculée en utilisant la formule de Bogue [193].

Tableau III.1. Propriétés physiques de ciment

Propriété	Valeur
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3917
Consistance (%)	27.48
Début de prise (mn)	140
Fin de prise (mn)	203
Masse volumique absolue (kg/m ³)	3050
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1100

Tableau III.2 : Composition chimique de ciment

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
17.49	4.51	3.02	62.78	2.15	2.38	0.05	0.64	8.10

Tableau III.3 : Composition minéralogique de ciment

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
55.41	13.65	2.25	14.83

III.2.2. Les fillers calcaires (FC)

Le filler calcaire (FC) utilisé a été préparé par l'opération de tamisage au tamis 80 μ m d'une poudre récupérée de la carrière de concassage. Ces propriétés physiques et chimiques sont illustrées dans le [Tableau III.4](#) et [Tableau III.5](#) respectivement.

Tableau III.4 : Caractéristiques physiques de fillers

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m ³)	980
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2670
Finesse (cm ² /g)	3120

Tableau III.5 : Composition chimique de fillers

CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	LOI
55.2	0.04	0.71	43.98

III.2.3. Les gros granulats (le gravier)

Deux classes de graviers G 3.15/8 et G 8/16 ont été utilisées durant cette étude. Ils sont de type concassé préparé à partir d'une roche d'origine calcaire de provenance d'une carrière située au sud de Djelfa –Algérie. Le [Tableau III.6](#) regroupe les propriétés physiques des graviers et la [Figure III.1](#) présente leurs courbes granulométriques.

Tableau III.6 : Propriétés physiques de graviers

Propriété	G 3.15/8	G 8/16
Masse volumique apparente (Kg/m ³)	1330	1380
Masse volumique absolue (Kg/m ³)	2640	2650
Coefficient los Angeles (%)	38,7	30.3
Coefficient d'absorption Ab (%)	0.47	0.47

III.2.4. Les granulats fins (les sables)

Trois types de sable ont été utilisés comme granulats fins: Sable alluvionnaire SA, Sable de carrière (concassé) SC et sable de dune SD.

III.2.4.1. Sable alluvionnaire (SA) :

Le sable SA est un sable siliceux récupéré d'Oued Messâd à 80 Km au sud de Djelfa-Algérie dont le diamètre max des grains ne dépasse pas 3 mm et ayant une forme géométrique sphérique arrondie avec la présence de plusieurs tailles des grains (cf. [Figure III.2](#)).

III.2.4.2. Sable de carrière (SC) :

Le sable SC a été récupéré de la carrière Zeccar à 30 Km au sud de Djelfa-Algérie. Ce sable est obtenu par concassage d'une roche calcaire dont la taille maximale des grains n'excède pas 3 mm et ayant une forme anguleuse et riche en fillers (cf. Figure III.2).

III.2.4.3. Sable de dune (SD) :

Le Sable SD est un sable siliceux très fin de classe granulaire 0/0.63 mm provenant de la zone Zaâfrane à 40 Km au nord-ouest de Djelfa-Algérie. Le diamètre équivalent de ses particules est uniforme, i.e. les grains de SD ont à peu près la même grosseur avec une forme sphérique arrondie (cf. Figure III.2).

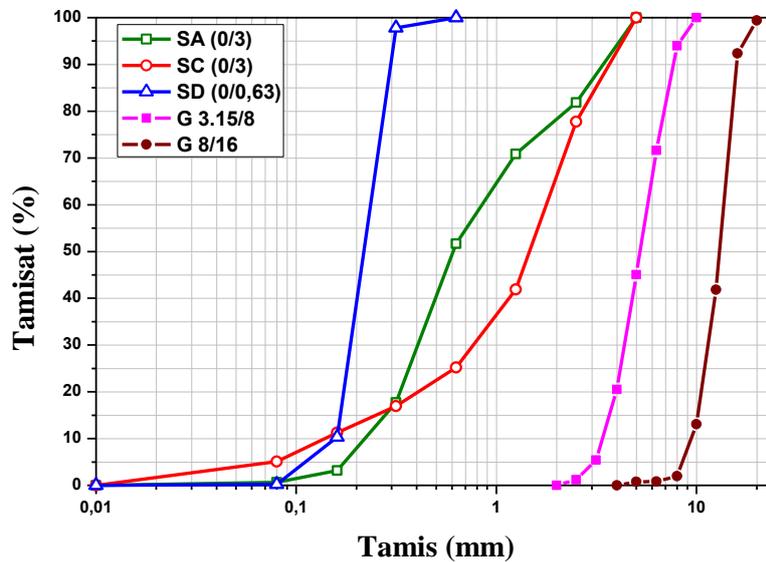


Figure III.1. Courbes granulométriques des granulats

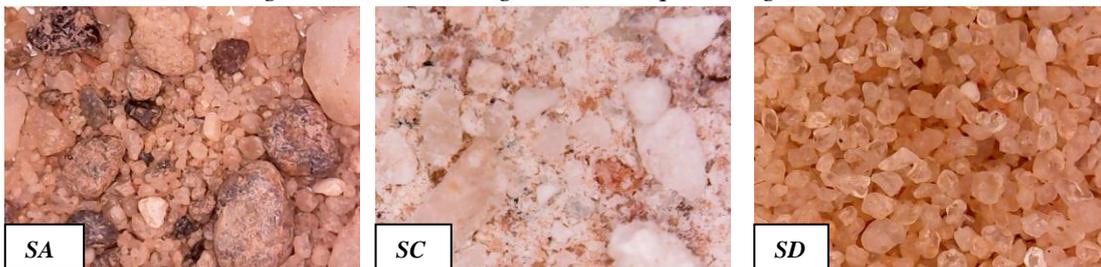


Figure III.2. Observation microscopique des sables utilisés
(Agrandissement= $\times 40$)

Dans la figure de l'analyse par diffraction aux rayons X (Figure III.3), on aperçoit clairement les pics de calcite ce qui montre que la nature du sable SC est essentiellement calcaire. Tandis que les sables SA et SD se composent en général de quartz, ce qui montre que leurs nature sont essentiellement siliceuse.

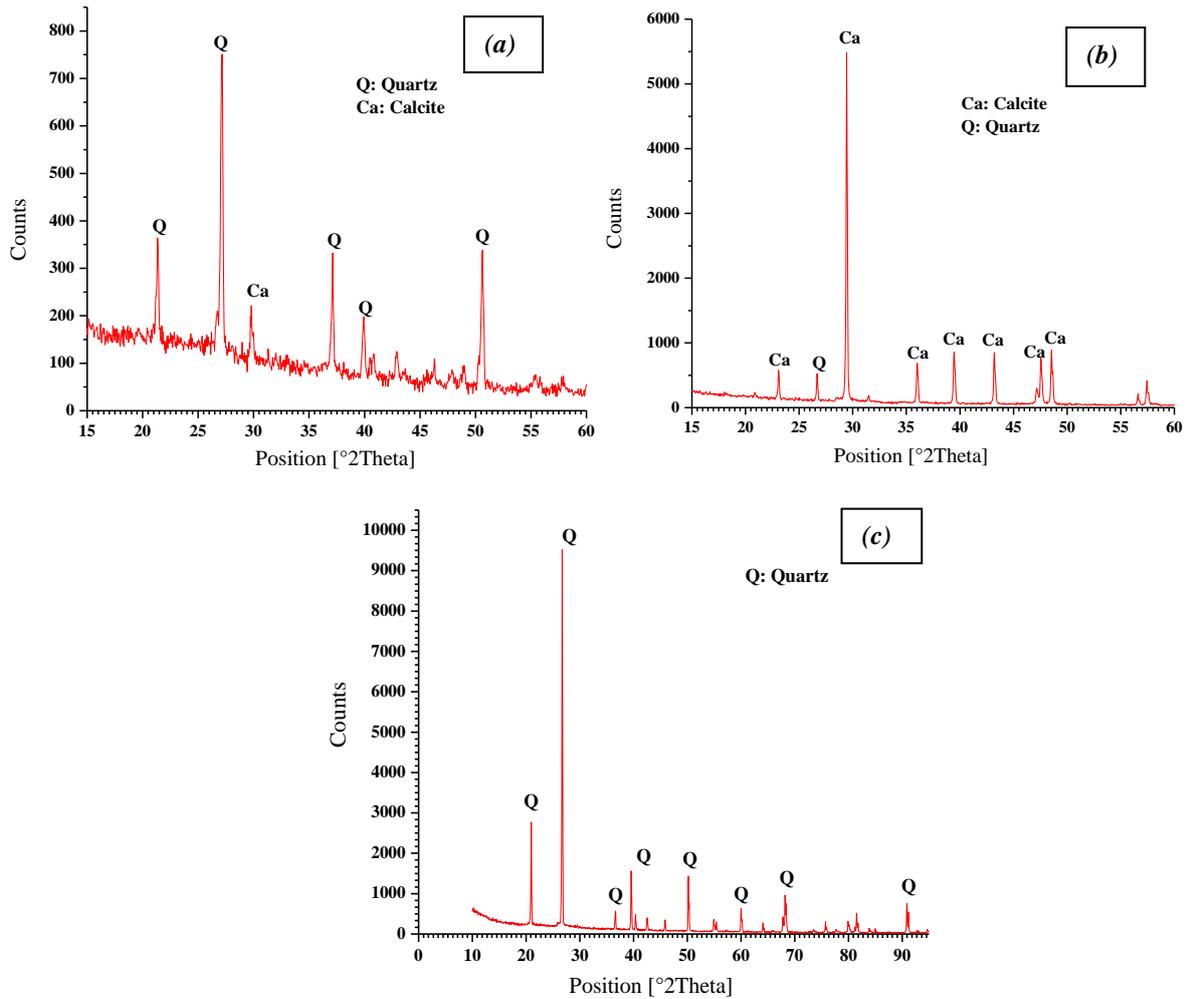


Figure III.3. Analyse par DRX des sables utilisés: (a): Sable alluvionnaire; (b): Sable Concassé et (c): Sable de dune.

III.2.4.4. Propriétés physiques des sables

Les propriétés physiques de divers types de sable sont regroupées dans le [Tableau III.7](#) et leurs distributions granulométriques sont présentées dans la [Figure III.1](#) au-dessus.

Tableau III.7. Propriétés physiques des sables

Propriété	SA	SC	SD
Densité apparente	1.59	1.50	1.25
Densité absolue	2.64	2.68	2.61
Module de finesse	2.79	2.93	0.92
Teneurs en fines < 80 µm (%)	0.65	5.04	0.24
Équivalent de sable (%) piston	73.23	65.73	64.33
Équivalent de sable (%) Visuel	73.84	68.05	70.85
Coefficient d'absorption Ab (%)	0.25	6.53	3.71

D'après le [Tableau III.7](#) et la [Figure III.1](#) on peut tirer les remarques suivantes:

En ce qui concerne la densité apparente:

Les deux sables SA et SC ayant une densité apparente proche (1.59 et 1.50 respectivement). La petite différence (environ de 6%) est attribuée à la forme des grains de chaque sable. La forme des grains du sable SA est proche de la sphéricité avec la présence de plusieurs tailles de grains ce qui améliore sa compacité. Cependant, la forme anguleuse du sable SC augmente l'espace entre ses grains et par conséquent la valeur de la densité apparente diminue. En outre, le sable de dune SD présente une valeur de 1.25 moins que les autres (diminution de 21% par rapport au sable SA et 17% par rapport au sable SC). Cette diminution est due à la forme des grains de ce dernier, rappelons que tous les grains de sable de dune ayant une forme sphérique arrondie uniforme ce qui crée un plus de vide entre les particules et par conséquent elle abaisse la valeur de la masse volumique apparente.

En ce qui concerne les autres propriétés:

- Les courbes granulométriques de tous les sables sont continués.
- Le sable de dune SD est un sable très fin de module de finesse égal à 0.92. Il nécessite une correction de granulométrie par l'ajout d'autres sables grossiers ou moyens.
- Le sable SA et le sable SC sont des sables moyens avec des modules de finesse de 2.79 et 2.93 respectivement, convenables à l'utiliser dans la fabrication du béton et de mortier.
- Au contraire de SA et SD, Le sable SC contient un volume important des fillers <80 μ m environ 5.04% donc leur utilisation dans le béton et le mortier demande une quantité d'eau supplémentaire pour assurer la bonne maniabilité.
- D'après les résultats de l'équivalent de sable on note que tous les sables avaient une propreté adéquate située dans l'intervalle 65% et 80%. Et cela veut dire qu'ils sont légèrement argileux admissibles pour des bétons de qualité courante.
- La capacité d'absorption d'eau $A_b(\%)$ du sable SC est très élevée (6.53%) suivie par le sable SD (3.71%). Cette capacité importante va influencer d'une manière considérable sur l'ouvrabilité du BAP.

III.2.5. Superplastifiant (SP)

Un Superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau conçu à base de polycarboxylate d'éther de troisième génération a été utilisé. Ce produit est délivré sous un nom commercial *MEDAFLOW 30* par la société *Granitex Algérie* (cf. [Figure III.4](#)). C'est un produit liquide de couleur jaunâtre

claire sa densité est de 1.07 ± 0.01 , son pH est 6 et sa concentration en particules solides est de 30% et il ne présente aucun effet retardant (cf. fiche technique, Annexe « A »).



Figure III.4. Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW30

III.2.6. Eau de gâchage (E)

L'eau (E) utilisée durant cette investigation est l'eau potable du robinet de l'université de Djelfa. Elle a une température 20 ± 2 °C et un pH=8.04. Le [Tableau III.8](#) représente quelques paramètres de l'analyse chimique de l'eau.

Tableau III.8. Analyse minéralogiques de l'eau de gâchage

Minéralisations globales	Valeur mg/l
Calcium Ca^{++}	104
Magnésium Mg^{++}	23.32
Chlorures Cl^-	92.3
Sulfates SO_4^{--}	170
Ammonium NH_4^+	0.04

D'après le [Tableau III.8](#), on observe que l'eau utilisée est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton. Elle répond aux exigences de la norme NF EN 1008 :2002 [78] qui détermine la limite maximale de la teneur en chlorures Cl^- de 500 mg/l pour béton précontraint ou coulis et de 1000 mg/l pour béton armé ou avec insert et détermine aussi la limite maximale de la teneur en sulfates SO_4^{--} de 2000 mg/l.

III.3. Composition des BAP

Les caractéristiques rhéologiques et la particularité de la composition d'un BAP, rend sa formulation sensible. Il existe plusieurs approches de formulation des BAP, certains sont basées sur l'optimisation du volume de pâte, et d'autres sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire, ces approches sont des approches empiriques. La méthode de formulation adoptée dans notre cas est la méthode empirique basée sur le volume de pâte ; le volume total V_t de mélange sec pour un mètre cube de béton est égal à la somme de volume de pâte de ciment V_p et le volume des agrégats V_g . Au début, nous avons déterminé le volume de pâte V_p qui représente

la somme des volumes de liant, d'eau, de superplastifiant et d'air, puis on extrait le volume des agrégats V_g par la soustraction de V_p du volume total V_t ($V_g=50\%$ sables + 25% G 3.15/8 + 25% G 8/16). Les deux rapports Eau/Liant et Gravier/Sables sont maintenus constants à 0.347 et 1 respectivement. Les quantités constantes en volume sont : le ciment C, Les fillers F, l'Eau E, superplastifiant SP, sables les graviers G 3.15 /8 et G 8/16 et le volume d'air qui a été fixé à 1%. La seule variante dans toute la série est la nature de sable. La section suivante détermine le détail de calcul.

III.3.1. Méthode de calcul de la composition de référence :

Paramètres Fixés dans $1 m^3$:

Le dosage en ciment : $M_c = 400Kg$

La masse de filler : $M_f = 90Kg$ (soit 22.5% de ciment)

Le rapport : $\frac{E}{L}=0.35$

Superplastifiant SP : 0.8 % de ciment

Volume d'air 1%

III.3.1.1. Étape 1: calcul volume de la pâte et volume des granulats

Le volume de la pâte est : $V_p = V_c + V_f + V_{sp} + V_e + V_{air}$

D'où :

$$V_c = \frac{M_c}{\rho_c} = \frac{400}{3.05} \rightarrow V_c = 131.15 l \text{ et } V_f = \frac{M_f}{\rho_f} = \frac{90}{2.67} \rightarrow V_f = 33.71 l$$

$$\frac{E}{L} = 0.35 \rightarrow E = 0.35(M_c + M_f) = 0.35(490) \rightarrow V_e = 171.50 l$$

$$V_{air} = \frac{1}{100} \times 1000 \rightarrow V_{air} = 10 l$$

Calcul de volume de SP : on a l'extrait sec du SP est $ext = 30\%$

$$\rho_s = \rho_{sp} \times ext = 1.07 \times 0.3 \rightarrow \rho_s = 0.321$$

d'où ρ_s est la densité de SP en solide ; ρ_{sp} est la densité du SP en liquide

Donc la masse d'adjuvant en solide :

$$M_{sp/solide} = \frac{\%SP}{100} \times M_c = \frac{0.8}{100} \times 400 \rightarrow M_{sp/solide} = 3.2 Kg$$

$$V_{sp} = \frac{M_{sp/solide}}{\rho_s} = \frac{3.2}{0.321} \rightarrow V_{sp} = 9.97 l$$

Le volume de la pâte est donc : $V_p = 131.15 + 33.71 + 9.97 + 171.50 + 10 \rightarrow V_p = 356.32 l$

Donc le volume des granulats sera : $V_g = 1000 - V_p$ d'où : $V_g = 643.68 l$

Nous avons $V_g=50\%$ sable + 25% $G_{3.15/8}$ + 25% $G_{8/16}$ la répartition volumique sera comme suit :

$$V_{G_{3.15/8}} = V_{G_{8/16}} = 160.92 \text{ l} \quad \text{et} \quad V_{\text{sable}} = 321.84 \text{ l}$$

III.3.1.2. Étape 2: calcul la masse des granulats

$$\text{Masse de sable : } \rho_s = \frac{M_s}{V_s} \rightarrow M_s = \rho_s V_s = 2.64 \times 321.84 \rightarrow M_s = 849.65 \text{ kg}$$

$$\text{Masse } G_{3.15/8} \text{ et } G_{8/16} : : \rho_G = \frac{M_G}{V_G} \rightarrow M_G = \rho_G V_G = 2.67 \times 160.92$$

$$\text{D'où : } M_{G_{3.15/8}} = M_{G_{8/16}} = 429.65 \text{ kg}$$

III.3.1.3. Étape 3: Correction de la quantité d'eau

La correction d'eau signifie d'enlever la quantité d'eau qui se trouve dans le superplastifiant et de rajouter une quantité d'eau qui sera absorbée par les granulats (sable et graviers) au cours de malaxage du béton.

- Correction due au superplastifiant V_1 :

$$V_1 = V_{sp} \times \rho_{sp} \left(\frac{100 - ext}{100} \right) = 9.97 \times 1.07 \times \left(\frac{100 - 30}{100} \right) \rightarrow V_1 = 7.47 \text{ l}$$

- Correction due à l'absorption des granulats

Le volume d'eau à rajouter pour le sable V_2 :

$$V_2 = \frac{Ab_s(\%)}{100} \times M_s = \frac{0.25}{100} \times 849.65 \rightarrow V_2 = 2.12 \text{ l}$$

Le volume d'eau à rajouter pour les graviers V_3 et V_4 :

$$V_3 = V_4 = \frac{Ab_G(\%)}{100} \times M_G = \frac{0.47}{100} \times 429.65 \rightarrow V_3 = V_4 = 2.02 \text{ l}$$

Le volume d'eau efficace est donc :

$$V_{eau} = V_e - V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 171.50 - 7.47 + 2.12 + 2.02 + 2.02$$

$$\text{D'où : } V_{eau} = 170.20 \text{ l} \quad \text{et} \quad \left(\frac{E}{L} \right)_{eff} = \frac{V_{eau}}{L} = \frac{170.20}{490} \rightarrow \left(\frac{E}{L} \right)_{eff} = 0.347$$

La formule de référence est regroupée dans [Tableau III.9](#) et le [Tableau III.10](#) illustre les compositions étudiées en fonction du sable:

Tableau III.9. Composition de référence

Constituants	Valeur
Gravier 8/16 (Kg/m ³)	429.65
Gravier 3.15/8 (Kg/m ³)	429.65
Sable alluvionnaire (Kg/m³)	849.65
Ciment (Kg/m ³)	400
Fillers (Kg/m ³)	90
Eau efficace (Kg/m ³)	170.20
Superplastifiant (Kg/m ³)	10.70
Superplastifiant (%)	0.8
Volume d'air (%)	1
Liant L (Kg/m ³)	490
La pâte P (Kg/m ³)	670.20
Rapport massique SP/L	0.022
Rapport massique E/L	0.347
Rapport massique FC/L	0.184
Rapport volumique S/G	1

Notre composition respecte la gamme typique des constituants en masse et en volume du BAP de la norme européenne EFNARC 2005 [79].

Tableau III.10. Proportions et masses des sables SA, SC et SD dans les compositions étudiées

	SA	SC	SD	Masse de SA (Kg/m ³)	Masse de SC (Kg/m ³)	Masse de SD (Kg/m ³)
1	1	0	0	849,65	0	0
2	0,8	0,2	0	679,72	172,51	0
3	0,6	0,4	0	509,79	345,01	0
4	0,4	0,6	0	339,86	517,52	0
5	0,2	0,8	0	169,93	690,02	0
6	0	1	0	0	862,53	0
7	0,8	0	0,2	679,72	0	168,00
8	0,6	0	0,4	509,79	0	336,00
9	0,4	0	0,6	339,86	0	504,00
10	0,2	0	0,8	169,93	0	672,00
11	0	0	1	0	0	840,00
12	0	0,8	0,2	0	690,02	168,00
13	0	0,6	0,4	0	517,52	336,00
14	0	0,4	0,6	0	345,01	504,00
15	0	0,2	0,8	0	172,51	672,00
16	0,6	0,2	0,2	509,79	172,51	168,00
17	0,4	0,4	0,2	339,86	345,01	168,00
18	0,2	0,6	0,2	169,93	517,52	168,00
19	0,4	0,2	0,4	339,86	172,51	336,00
20	0,2	0,4	0,4	169,93	345,01	336,00
21	0,2	0,2	0,6	169,93	172,51	504,00

III.4. Procédures expérimentales et méthodes d'essais

III.4.1. Procédure expérimental

La procédure expérimentale établie est partagée en quatre étapes essentielles. La première consiste à étudier la variation de la porosité P de la combinaison binaire et ternaire des sables SA, SC et SD pour pouvoir examiner leurs effets sur les propriétés du BAP. La deuxième étape a pour objectif de caractériser l'ouvrabilité du BAP à l'état frais. La troisième étape dédiée à l'évaluation de l'effet des différents milieux de durcissement sur les propriétés mécaniques des BAP à savoir la résistance à la compression et à la traction par flexion à 7, 28 et 90 jours. La dernière étape consiste à étudier la durabilité des différents BAP telle que l'absorption capillaire (sorptivité) et l'attaque de l'acide chlorhydrique HCl et de l'acide sulfurique H₂SO₄ après 28, 90 et 180 jours d'immersion totale.

III.4.2. Méthodes d'essais

III.4.2.1. Mesure de la porosité de sable

La porosité P des sables a été mesurée à l'aide d'un récipient de capacité connue. Pour chaque combinaison, les sables sont mélangés manuellement puis par malaxeur à mortier durant 30 seconde avec une vitesse constante afin d'assurer la bonne homogénéisation de mélange, l'opération suivante est de peser le récipient remplie avec le mélange des sables sans aucune vibration ou compactage, la formule suivante (Équation III-1) permet de calculer la porosité P .

$$P = 100 \left(1 - \frac{W_{rm} - W_r}{V_r \cdot \rho_m} \right) \quad \text{Équation III-1}$$

D'où P est la porosité du mélange (%), W_{rm} est la masse de récipient remplie avec le mélange de sables (g), W_r est la masse de récipient vide (g), V_r est le volume de récipient (cm³) et ρ_m est la masse volumique absolue de mélange (g/cm³).

III.4.2.2. Procédure de malaxage du béton

Tous les mélanges ont été gâchés, dans un malaxeur de béton à axe vertical d'une capacité de 70 litres (cf. Figure III.5). La durée totale de malaxage est de 4 minutes. L'opération est faite en plusieurs étapes comme montrer le Tableau III.11.

À la fin de malaxage, le béton frais a été vidé du malaxeur dans un bac afin d'examiner leurs caractéristiques d'ouvrabilité par l'essai d'étalement, l'essai de boîte-L et l'essai de stabilité au tamis puis il a été coulé dans les moules cubiques 10×10×10 cm pour mesurer sa résistance à la compression conformément à la norme EN 12390-3 : 2012 [194] et dans les moules

prismatiques 7×7×28 cm pour mesurer sa résistance à la traction par flexion. Après avoir coulé le béton dans les moules, les échantillons ont été recouverts en feuilles de plastique et maintenus dans des conditions ambiantes du laboratoire. Après 24 h, ils ont été démoulés et conservés selon les régimes de durcissement choisis jusqu'au jour des tests.

Tableau III.11. Procédure de malaxage du BAP

Etat de malaxeur	Arrêt	Marche		
Opération	Mettant les constituants par ordre : Gros à petits	Malaxage à sec	Mettant de 2/3 de l'eau de gâchage	Mettant 1/3 de l'eau restée mélangée avec superplastifiant
Durée	/	60s	90s	90s



Figure III.5 : Image du malaxeur de béton utilisé

III.4.2.3. Caractérisation de l'ouvrabilité du BAP

Dans cette phase, le béton frais doit passer par trois tests essentiels. Le premier est d'examiner la mobilité du BAP dans un milieu non confiné ceci est fait par l'essai de l'étalement (Slump-flow) au cône d'Abrams et la mesure de la viscosité apparente ou la vitesse d'étalement T_{500} . Le deuxième test est de contrôler la mobilité du BAP dans un milieu confiné, ce test est traduit par l'essai de l'écoulement dans la boîte-L. Le dernier test a pour objectif de vérifier la capacité du béton à résister à la ségrégation statique par l'essai de stabilité au tamis.

A. Essai de l'étalement et la viscosité apparente T_{500}

L'essai de l'étalement a été réalisé conformément à la norme européenne EN 12350-8 :2010 [195]. Le principe de l'essai est de couler le béton frais dans un moule ayant la forme d'un cône tronqué normalisé (cône d'Abrams), et ce sans compactage, puis on soulève le cône lentement dans moins de 5 secondes pour permettre au béton de s'écouler librement. Après l'étalement et l'arrêt complet de l'écoulement, on prend deux lectures perpendiculaires du diamètre de la galette de béton obtenue, la valeur finale de l'étalement est la moyenne des deux

lectures (cf. [Figure III.6](#)). Pour que le béton soit un BAP, l'étalement doit être supérieur à 550mm sans aucune ségrégation et aucun ressuage [79].

Au moment de l'essai de l'étalement, on mesure la vitesse d'étalement T_{500} en secondes (s), qui correspond au temps nécessaire au béton pour atteindre un étalement de 500mm (50 cm) après soulèvement du cône. .



Figure III.6. Images de l'essai d'étalement : à gauche cône d'Abrams et table d'essai, à droite mesure de l'étalement

B. Essai de l'écoulement dans la boîte-L

L'écoulement du BAP dans la boîte en L a été réalisé selon la norme EN 12350-10 :2010 [196], cet essai permet d'évaluer l'aptitude à l'écoulement du BAP à travers des zones confinées. Après remplissage de la partie verticale de la boîte-L et ouverture de la trappe, le béton est passé à travers les espaces entre les armatures verticales, avant de s'écouler dans la partie horizontale. Les hauteurs du niveau de béton dans la partie verticale H_1 et à l'extrémité de la partie horizontale H_2 sont mesurées et on établit un ratio H_2/H_1 qui exprime le taux de remplissage (cf. [Figure III.7](#)). Pour une bonne capacité de remplissage du BAP, le rapport H_2/H_1 doit être supérieur à 0.80.

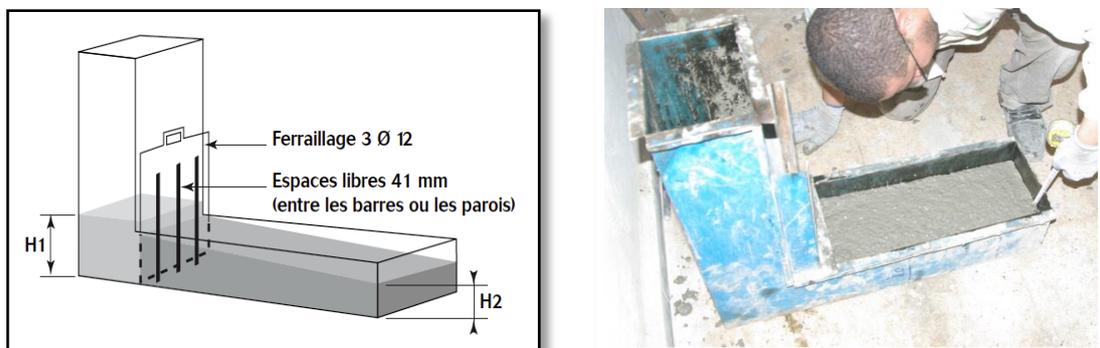


Figure III.7. Essai de la boîte-L : à gauche les dimensions de la boîte-L ; à droite mesure des hauteurs H_1 et H_2

C. Essai de la stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis a été réalisé selon la norme EN 12350-11 :2010 [197]. Cet essai permet d'évaluer la résistance du BAP à la ségrégation statique, c'est-à-dire à la sédimentation des granulats, lorsque le béton est au repos. Après une période de repos de 15 minutes de 10 litres de BAP, on déverse un échantillon de béton de $(4.8 \pm 0.2) \text{ Kg}$ sur un tamis d'ouverture 5mm depuis une hauteur de 50 cm. Après 2 minutes, on pèse la quantité de matière (laitance) écoulee à travers le tamis (Figure III.8). La résistance à la ségrégation statique est évaluée par l'indice de ségrégation $SI(\%)$ tel que (Équation III-2) :

$$SI(\%) = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \times 100 \quad \text{Équation III-2}$$

D'où :

P_{laitance} : La quantité de matière passée par le tamis.

$P_{\text{échantillon}}$: La quantité initiale du béton $(4.8 \pm 0.2) \text{ Kg}$

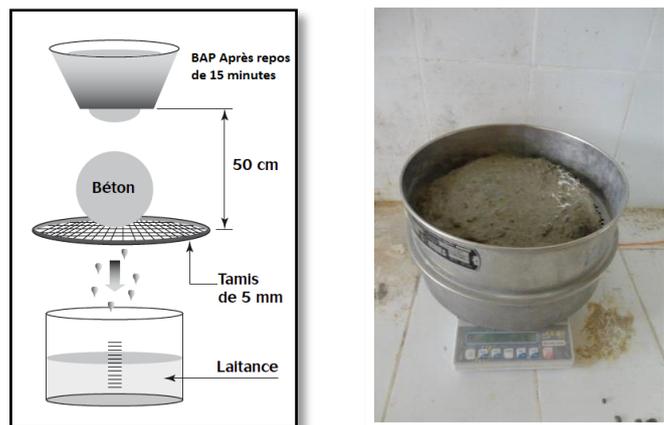


Figure III.8. Essai de stabilité au tamis : à gauche principe de l'essai ; à droite image de mesure

Si l'indice de ségrégation SI est compris entre 5 et 15%, la résistance à la ségrégation est considérée comme satisfaisante. En-dessous de 5%, la résistance est excessive et susceptible d'affecter l'état de surface. Au-dessus de 15% (particulièrement au-dessus de 30%), la stabilité est mauvaise et il y a une forte probabilité de ségrégation, selon EFNARC 2002 [9].

III.4.2.4. Caractérisation mécaniques du BAP (à l'état durci)

A. Régimes de durcissement

La cure est une étape importante après la mise en œuvre du béton. Elle a une forte influence sur les propriétés du béton durci en vue de son effet significatif sur le processus d'hydratation de ciment. Dans cette étude nous avons élaboré l'effet de trois régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques du BAP à savoir le durcissement dans l'eau, le durcissement à l'air et le durcissement par enveloppement en plastique. Après 24 heures de moulage, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon chaque mode de durcissement jusqu'au jour de test.

A.1. Durcissement dans l'eau :

Ce mode de durcissement est la méthode normalisée utilisée dans les laboratoires qui permette d'assurer l'humidité suffisante au béton pour être bien durci. Trois éprouvettes pour chaque échéance de 21 compositions élaborées sont immergées totalement dans un bassin d'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ après son décoffrage jusqu'au jour de test conformément à la norme EN 12390-2 : 2012 [198] (cf. [Figure III.9](#)).



Figure III.9. Image des éprouvettes conservées dans l'eau

A.2. Durcissement à l'air

Ce mode de durcissement est la technique la plus utilisée dans les structures en béton. Trois éprouvettes pour chaque échéance (7, 28 et 90 jours) des 21 compositions élaborées sont exposées directement à l'air dans les conditions ambiantes du laboratoire ($T^{\circ}=20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=60\%$) après son décoffrage jusqu'au jour de test (cf. [Figure III.10](#)).



Figure III.10. Image des éprouvettes conservées à l'air

A.3. Durcissement par enveloppement en plastique

Le durcissement par enveloppement en film plastique est une technique utilisée beaucoup plus dans les éléments horizontaux à faible épaisseur et à forme complexe ou simple. Un film plastique de type polyéthylène est utilisé dans notre cas grâce à sa légèreté et son application facile. Après son décoffrage, trois éprouvettes sont recouvertes par trois couches de plastique pour chaque composition de BAP et pour chaque échéance (7, 28 et 90 jours). L'extrémité de chaque éprouvette est renforcée par une couche de papier collant épaisse afin d'éviter la déchirure du plastique dans les angles de l'éprouvette pendant leur transfert (cf. [Figure III.10](#)). À la fin de cette opération, les éprouvettes enveloppées sont mises à côté de celles conservées à l'air dans le laboratoire jusqu'au jour de test.

B. Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression est un paramètre clé qui indique la qualité du BAP à l'état durci. Elle est mesurée sur des éprouvettes cubiques 10×10×10 cm. La valeur finale de la résistance représente la moyenne de six mesures. Les essais de la résistance à la compression sont effectués à 7, 28 et 90 jours pour chaque mode de durcissement de toutes les compositions à l'aide d'une presse de la marque CONROLAB à vérin hydraulique équipée d'un écran LCD asservi qui permettent de configurer les paramètres de l'essai et la lecture numérique des mesures. Sa capacité maximale en charge est de $1500 \pm 0,250$ kN (cf. [Figure III.11](#)). L'exécution de l'essai est effectué au niveau du laboratoire LNHC de Djelfa et conformément à la norme NF EN 12390-3:2012 [194,199].

Il convient de noter que les éprouvettes subies au régime de durcissement dans l'eau sont extraites 24 heures avant le test de résistance pour les sécher afin d'éviter le développement de la pression interstitielle de l'eau pendant l'écrasement.



Figure III.11. Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression

C. Essai de la résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion 3 points est mesurée sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$ cm. La Figure III.12 représente le schéma statique et le dispositif de l'essai. Ce test est réalisé par la même machine d'écrasement précédente qui permet de lire directement la valeur de la force de rupture ainsi que la contrainte grâce à la configuration préalable avant l'essai. La résistance à la traction par flexion est la moyenne de trois mesures pour chaque mode de durcissement et à chaque échéance à 7, 28 et 90 jours.

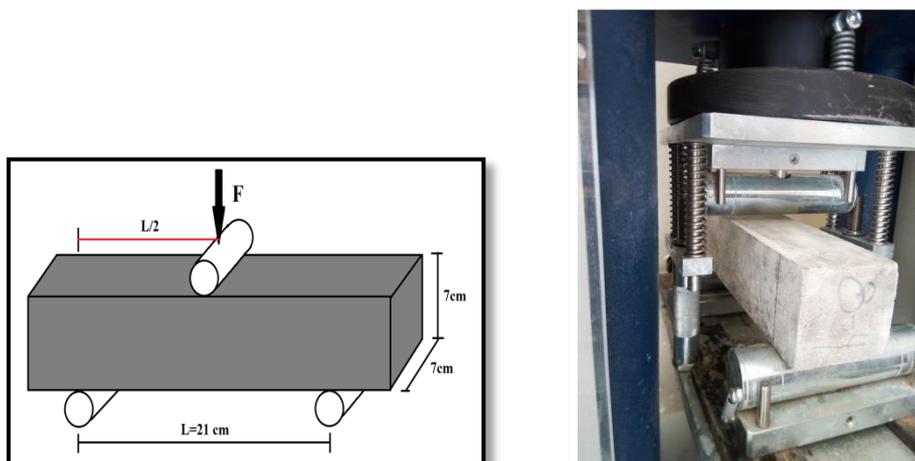


Figure III.12. Schéma statique et dispositif de l'essai traction par flexion

III.4.2.5. Essais de durabilité

Deux essais de durabilité ont été réalisés : essai de l'absorption capillaire ou la sorptivité et l'essai de l'évaluation de la résistance vis-à-vis l'attaque par les acides chlorhydrique HCl et sulfurique H₂SO₄.

A. Essai de l'absorption capillaire (sorptivité)

L'absorption capillaire ou la sorptivité est la capacité d'un béton non saturé à absorber de l'eau dans son réseau capillaire sans pression hydraulique. Cette propriété est traduite par le coefficient de sorptivité (S) qui est influé de plusieurs facteurs tels que l'âge du béton, la composition, la porosité, le temps d'immersion, la cure etc.

La sorptivité (S) des BAP testés est mesurée après 28 jours de la cure des éprouvettes cubiques 10×10×10 cm dans l'eau. Avant de mesurer la sorptivité, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à environ de 105°C jusqu'à l'atteint d'une masse constante afin d'éliminer l'eau emprisonnée dans les pores capillaires.

L'essai de sorptivité consiste à mesurer l'augmentation en masse d'une éprouvette en béton due à l'absorption après avoir immergé partiellement dans un bac d'eau de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que dans une hauteur de 5mm. La face inférieure de l'éprouvette est appuyée sur des supports et les faces latérales sont imperméabilisées par une résine époxydique afin d'avoir seulement une surface en contact avec l'eau et d'assurer une absorption unidimensionnelle à travers la face inférieure qui touche l'eau. La [Figure III.13](#) représente le schéma de l'essai.

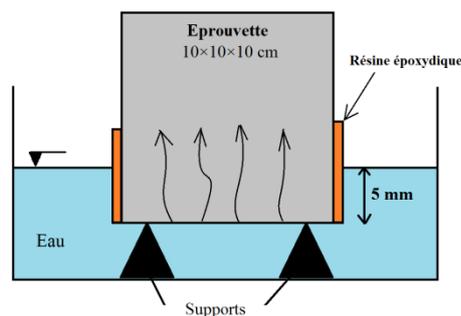


Figure III.13 : Principe de mesure de l'absorption capillaire (sorptivité).

L'augmentation en poids de l'éprouvette est mesurée après 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes de l'immersion. Pour chaque temps de mesure, l'éprouvette est retirée du bac d'eau, essuyée à l'aide d'un chiffon humide et pesée, puis retournée au récipient.

La sorptivité (S) est déterminée à l'aide de la formule :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad \text{Équation III-3}$$

Avec :

S : le coefficient de sorptivité en (cm/sec^{0,5}) ;

Q : le volume de l'eau absorbée en cm³ ;

A : la surface en contact avec l'eau en cm² ;

t : le temps écoulé en secondes ;

La sorptivité (S) représente graphiquement la pente de la régression linéaire de (Q/A) en fonction de \sqrt{t} .

B. Essai de dégradation dans les acides HCl et H₂SO₄

L'essai de l'attaque par les acides a pour objectif d'évaluer la capacité du béton à résister à la dégradation lorsqu'il est susceptible à un environnement agressif contenant des acides. Dans la présente étude, cinq compositions du BAP ont été testées à l'examen de l'agressivité, le BAP témoin et les BAP contenant les combinaisons de sables suivants : 80%SA+20%SC, 60%SA+40%SD, 60%SA+20%SC+20%SD et 60%SC+40%SD. Les éprouvettes cubiques 10×10×10 cm des cinq compositions du BAP, âgés de 28 jours et conservées dans l'eau, sont complètement immergées dans deux solutions : HCl et H₂SO₄ avec une concentration de 5%. Cette concentration est souvent choisie dans la littérature [48,167,168,200]. L'utilisation de faible concentration demanderait plus du temps d'essai. C'est pourquoi le choix s'est porté sur la concentration 5% qui représente le seuil maximal pour un milieu très agressif. Une concentration de 98% de l'acide H₂SO₄ et de 38 % de l'acide HCl a été utilisée pour préparer la solution agressive avec la concentration de 5%. Avant l'immersion, les échantillons ont été laissés à sécher à 20 °C et 50% d'humidité relative pendant 24 heures pour enregistrer leur masse initiale.

Les échantillons de toutes les compositions du BAP sont mis dans le même récipient pour chaque solution agressive. La [Figure III.14](#) représente les photos de l'essai.



Figure III.14. Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5% HCl et 5% H₂SO₄

L'évaluation de la dégradation par acides a été effectuée après 28, 90 et 180 jours d'immersion. À chaque mesure, Les échantillons ont été extraits de solution, rincés avec de l'eau du robinet pour éliminer les produits de réaction en vrac et laissé à sécher sous 20 °C et 50% HR pendant 30 min avant l'évaluation. La résistance à la dégradation par les acides a été évalué visuellement (examen visuel), physiquement (variation de masse) et mécaniquement (variation de la force à la rupture à la compression).

La variation de la masse de chaque échantillon est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\Delta M(\%) = \frac{M_0 - M_j}{M_0} \times 100 \quad \text{Équation III-4}$$

Avec :

ΔM : Perte de la masse de l'éprouvette en (%)

M_0 : La masse de l'éprouvette avant l'immersion dans l'acide en (g)

M_j : La masse après l'attaque (j=28, 90 et 180 jours) en (g)

Le pourcentage de variation de la résistance à la compression est calculé en utilisant la formule suivante:

$$\Delta F(\%) = \frac{F_0 - F_j}{F_0} \times 100 \quad \text{Équation III-5}$$

Avec

ΔF : Perte de la force de rupture à la compression en (%)

F_0 : La force de rupture à la compression avant l'immersion dans l'acide en (kN)

F_j : La force de rupture à la compression à « j » jours (j=28, 90 et 180 jours) en (kN)

III.5. Conclusion :

Le présent chapitre avait pour but de répondre aux objectifs de cette thèse. Les étapes expérimentales ont été étudiées en détail, y compris la caractérisation des différents matériaux utilisés, ainsi que la formulation des BAP avec les différentes combinaisons de sable. Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée de toutes les expériences réalisées telles que l'expérience d'étude de la porosité des combinaisons de sable, les expériences d'étude de l'ouvrabilité du BAP, les expériences d'étude de résistance mécanique y compris les régimes de durcissement adoptés et enfin les expériences d'étude de la durabilité vis-à-vis de l'attaque des acides.

Le chapitre suivant va consister à faire apparaître les résultats obtenus et de présenter une interprétation et une analyse de ces résultats. Il fait l'objet de l'étude de l'effet combiné entre les mélanges de sables SA, SC et SD en système binaire et ternaire, et de l'impact des régimes de durcissement sur les différentes propriétés d'un BAP.

Chapitre IV .

Analyse des résultats et interprétation

IV.1. Introduction

Ce chapitre traite l'analyse et la discussion des différents résultats obtenus au cours de cette étude. Le chapitre est structuré en quatre parties. Dans la première partie, nous discutons l'effet de la combinaison binaire et ternaire de SA, SC et SD sur la porosité du mélange de sables. Dans la deuxième partie, nous discutons l'effet des mélanges de sables sur l'ouvrabilité du BAP à savoir l'écoulement dans les milieux non confinés, les milieux confinés et la stabilité. Dans la troisième partie, nous analysons et discutons l'effet des mélanges de sables en système binaire et ternaire sur la résistance à la compression et à la traction du béton, ainsi que l'effet combiné des combinaisons de sable et des régimes de durcissement sur ses propriétés mécaniques. Dans la dernière partie, nous discutons l'effet de sable sur la durabilité du BAP exposé aux acides agressifs HCl et H₂SO₄.

Il faut indiquer que les tableaux des résultats numériques de ce chapitre sont regroupés dans l'annexe « B ».

IV.2. Porosité des différents mélanges de sables

Les variations de la porosité des mélanges binaires et ternaires des sables SA, SC et SD sont représentées dans la Figure IV.1.

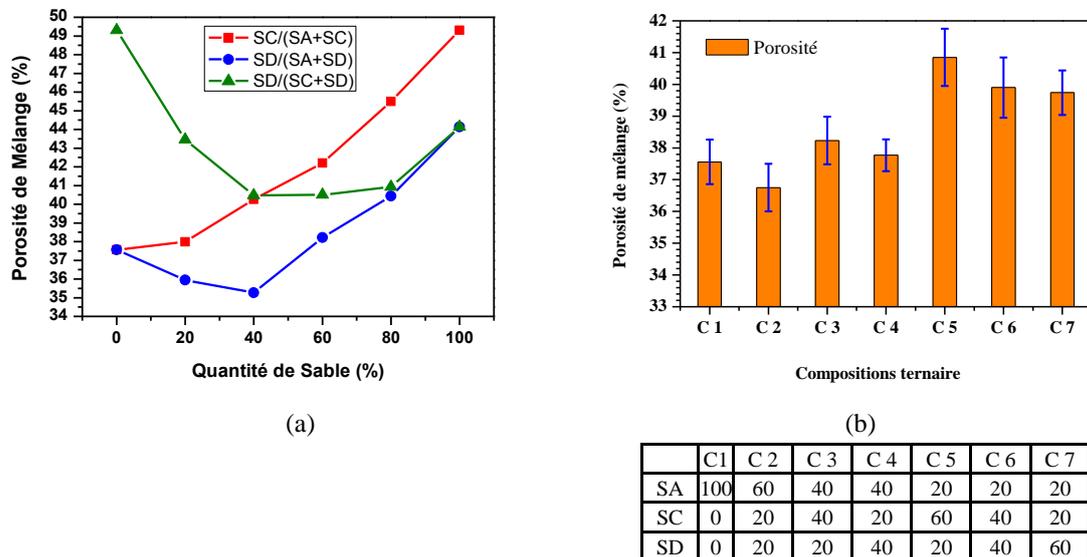


Figure IV.1. Variation de la porosité de la combinaison des sables : (a) binaires et (b) ternaires

Le graphique (a) de la Figure IV.1(a) montre la variation de la porosité des mélanges binaires des sables SA, SC et SD. La porosité de sable témoin SA est égale à 37.56% (c.-à-d. une compacité de 62.44%). Dans le système des mélanges SA-SC, la porosité est directement proportionnelle à la quantité de SC, plus la teneur de SC augmente plus la porosité augmente

jusqu'à la valeur maximale de 49.3% qui correspond à 100% SC (des augmentations entre 1.12% et 31.26% par rapport au sable témoin SA), ce qui traduit l'effet négatif de SC sur la compacité du mélange. Ceci est dû à la forme irrégulière de particules du SC, si la forme des particules s'éloigne de la sphéricité la porosité augmente [201]. Au contraire, la porosité des mélanges SA-SD est diminuée avec l'augmentation de SD, d'ordre 4.31% à 6.10% par rapport au sable témoin, jusqu'à un optimum de 40 % du SD ; au-delà de cette teneur la porosité est augmentée pour atteindre sa valeur maximale de 44.14% qui correspond à 100% SD. Ceci est dû au mal compacité des particules de SD causé par l'interaction entre les particules et par la prépondérance des forces cohésives par rapport aux forces gravitationnelles [201,202]. La même tendance est constatée en ce qui concerne les combinaisons SC-SD, la porosité est diminuée en contraste avec l'augmentation de la quantité du SD jusqu'à un optimum de 40%, mais elle reste toujours supérieure à celle témoin. Au-delà de cette teneur la porosité est directement proportionnelle à la quantité de SD.

En ce qui concerne les mélanges ternaires, la combinaison C2 (60SA-20SC-20SD) est la moins poreuse de 36.75% c'est-à-dire une amélioration par 2.16% contre témoin (Figure IV.1(b)). L'augmentation de la quantité de SD jusqu'à 40% dans le système ternaire augmente légèrement la porosité de 0.56% à 1.8% par rapport au sable témoin (37.77% pour C4 et 38.23% pour C3), au-delà de 40% de SD la porosité est augmentée de 5.08% par rapport au témoin (39.74% de porosité concernant C7). La substitution par SC entraîne toujours une augmentation de la porosité du mélange. Une porosité maximale de 40.85% est pour le mélange C5, c'est-à-dire une augmentation de 8.76% par rapport au sable témoin ce qui signifie qu'elle est la composition la plus poreuse dans les mélanges ternaires.

Les variations de la porosité des mélanges binaires et ternaires des sables, mentionnée ci-dessus, ont lié étroitement à la morphologie et à l'état de surface des grains. L'augmentation de la porosité dans le cas de l'utilisation de SC est due à la rugosité de la surface et à la forme anguleuse des grains, cette forme entraîne à l'augmentation des vides entre les particules par la création des lacunes résultantes de formation des ponts entre les angles des particules et donc empêchera l'imbrication des grains. Alors que l'utilisation de SD dans une proportion inférieure ou égale à 40% entraîne une diminution de la porosité interstitielle. Ceci est dû à la finesse, à la taille uniforme et à la forme arrondie et lisse des grains de SD, car les petites particules de ce dernier se loger dans les interstices créés entre les grains les plus gros [202] ce qui diminue le volume de vides et par conséquent améliore la compacité du mélange.

IV.3. Étude de caractéristiques rhéologiques

IV.3.1. Fluidité et la viscosité

La variation de la fluidité et la viscosité des différents bétons en fonction des mélanges de sables en combinaison binaire et ternaire sont représentées dans la Figure IV.2 et la Figure IV.3 respectivement.

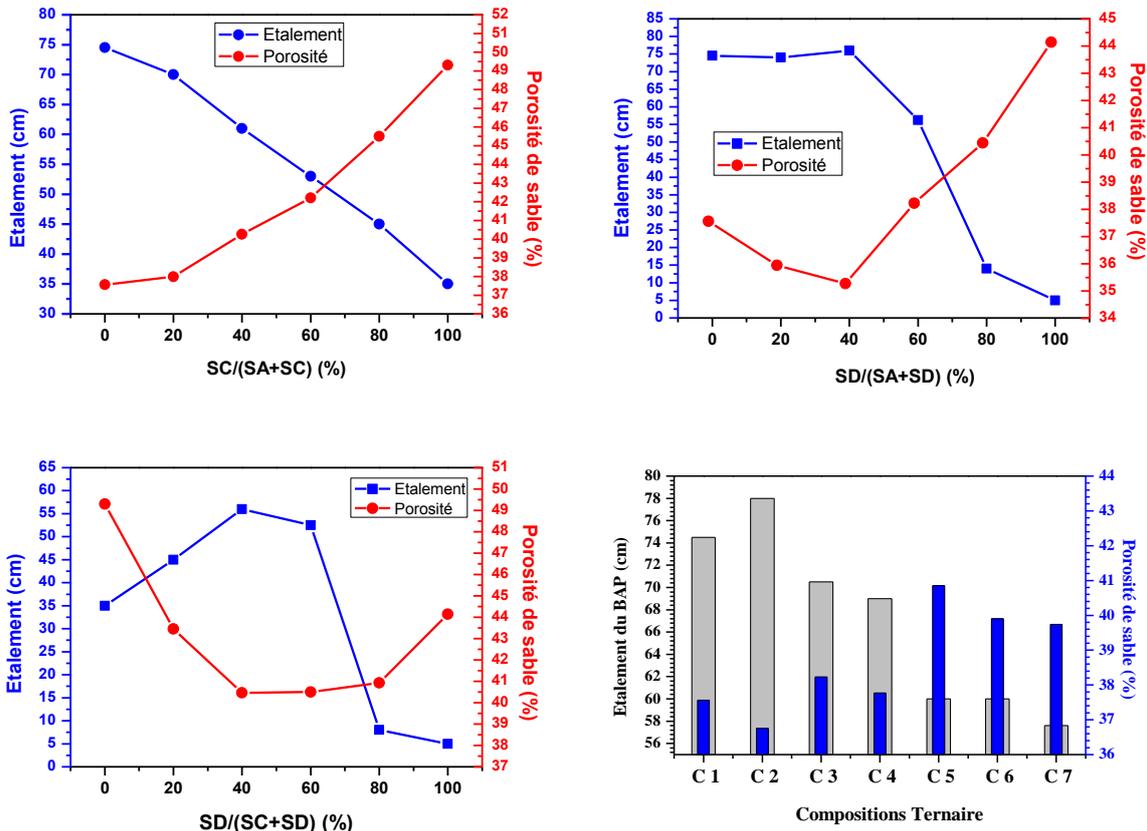


Figure IV.2. Variation de l'étalement des BAP en fonction de la combinaison binaire et ternaire de sable

Pour la composition témoin, avec 100% de SA, l'étalement est atteint à 74,5 cm sans aucun ressuage ou ségrégation des constituants.

Les graphiques de la Figure IV.2 montrent bien que l'étalement est inversement proportionnel à la porosité de mélange de SA, SC et SD en système binaires et ternaires. Ce résultat soutient que la maniabilité optimale (ou la meilleure viscosité apparente) est obtenue pour la plus forte compacité granulaire [123,203,204] ce qui en accord aussi avec les travaux de Rmili et al. [55,56] qui ont montré que l'optimisation de la compacité du BAP par la combinaison de divers types de sables conduit à la réduction de la pâte cimentaire et le volume d'eau nécessaire au mouillage de la matrice, ceci est par la libération de l'eau piégée dans les vides intergranulaires qui va participer à l'amélioration de la maniabilité et de l'ouvrabilité du

BAP. À l'opposé de ce qu'on a trouvé, Nécira et *al.* [26,161] ont affirmé que l'optimum de la compacité des mélanges binaires de sables ne donne pas nécessairement un meilleur comportement rhéologique et mécanique d'un BAPHP.

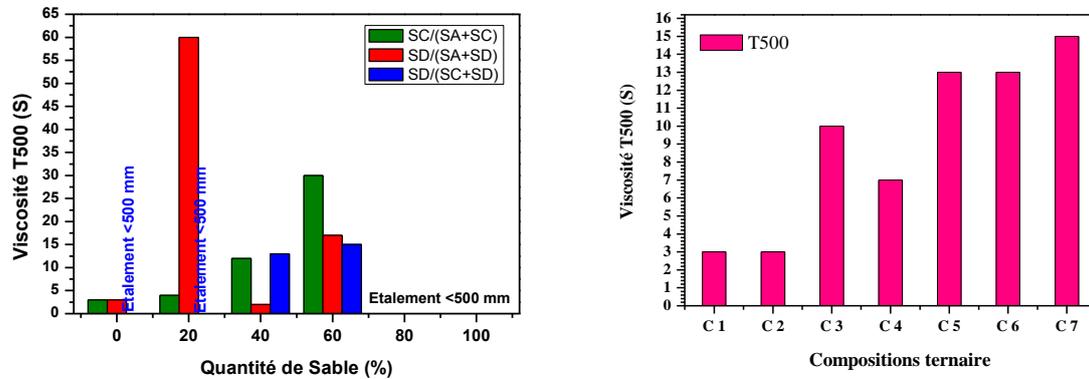


Figure IV.3. Variation de la viscosité T_{500} des BAP en fonction de la combinaison des sables en mélange binaire et ternaire

Dans le système binaire SA-SC il est clair que l'étalement est diminué linéairement avec la teneur en SC, c'est-à-dire il y a toujours une perte de l'ouvrabilité avec l'augmentation de la quantité de SC où le taux de perte allant de 6.04 à 53.02% par rapport au témoin. Il est également noter que si la quantité de SC dépasse 40% le béton se comporte comme un béton ordinaire et n'est plus un BAP (la limite inférieure de l'étalement est 55 cm, selon NF EN 12350-8 [195,205]). La viscosité est aussi très affectée par la teneur en SC (cf. Figure IV.3). À 20% de SC le temps de l'écoulement T_{500} est égal à 4s, mais au-delà de cette teneur le temps est augmenté considérablement. Pour des quantités très élevées en SC (80% et 100%) l'étalement n'a jamais atteint 50 cm, cela rend impossible de mesurer le temps T_{500} . Ces résultats sont en accord avec les travaux de Nécira et *al.*[161] et Bouziani et *al.* [206] qui ont constaté que l'augmentation de SC conduit à une diminution de la fluidité. Au contraire, Rmili et *al.* [56] Azzouz et *al.* [160] ont confirmé qu'à différentes teneurs en SA et SC les propriétés rhéologiques du BAP sont respectées. La perte de l'ouvrabilité et la viscosité est due à la forte capacité d'absorption d'eau et à la morphologie des grains du SC. Le sable concassé ayant une capacité élevée à retenir l'eau (coefficient d'absorption de 6.71%) parce qu'il contient un volume important de fillers flocculés autour de la surface des grains et aussi entre les particules. Lors de gâchages, les fillers absorbent une quantité considérable d'eau pour se disperser. De cette manière l'eau de mélange nécessaire au mouillage de l'ensemble est diminuée. À ce moment, les grains de sable SC seront très rapprochés et appliquent l'un sur l'autre des forces de frottement, d'une part. D'autre part, les angles des grains entravent le mouvement du mortier du béton ce qui gêne l'écoulement des gros granulats, par conséquent l'étalement est diminué. À cet effet, pour

améliorer l'ouvrabilité du béton, il est important d'ajouter une quantité supplémentaire d'eau et/ou de superplastifiant pour lubrifier les grains de SC et pour éviter le blocage des gros granulats.

En revanche, dans le système SA-SD l'étalement est amélioré par 2.01% avec l'augmentation de la teneur en SD jusqu'à un optimum de 40%. Tandis que, le remplacement de 60% de SA par SD entraîne une forte diminution de l'ouvrabilité atteint 24.56% (étalement de 56.2 cm) par rapport au témoin, au-delà de cette teneur le béton est devenu un béton ordinaire et n'est plus un BAP (une forte perte de 81.2 % et de 93.29% pour 80% et 100% SD respectivement). Idem pour la viscosité, la combinaison 60% SA et 40 % SD présente une très bonne viscosité apparente ($T_{500}=2s$) c'est-à-dire une amélioration par 33.33% contre témoin. Ces résultats sont en accord avec Rmili et *al.* [56], Benabed et *al.* [96] et Bouziani et *al.*[206]. Contrairement ce que nous avons rapporté, Nécira et *al.* [161] a confirmé que le sable de dune SD ne perd pas les propriétés autoplégantes. Les résultats précédents sont liés à la forme des grains, à la porosité et à l'état de l'eau dans la matrice. La forme sphérique arrondie de SD facilite le mouvement du béton. Lors de l'écoulement, les grains de SD se déplacent plus facilement que les grains de forme anguleuse ou irréguliers ceci est dû à l'effet de roulement à bille [111]. D'autre part, Selon [207], l'eau de mélange dans le béton existe sous trois formes : sous forme d'eau de couche adsorbée, d'eau de couche libre, et d'eau de remplissage. Les différentes formes d'eau jouent différents rôles dans la contribution à la maniabilité. L'eau adsorbée (ou l'eau liée) est une couche très proche de la surface du solide sur une distance moins de $0.5\mu m$, elle est liée à la surface de particule par des forces d'attraction, cette eau ne contribue pas à la maniabilité car elle nécessite une grande énergie pour se déplacer. L'eau de couche libre se trouve sous forme d'une couche qui enveloppe la surface de particule à une distance plus de $0.5\mu m$. Cette eau permet aux particules solides de se séparer et donc contribue à l'ouvrabilité. L'eau de remplissage ne remplit que l'espace entre les particules solides, elle s'écoule librement et donc ne contribue rien à l'ouvrabilité. À cet effet, lorsque la proportion de SD est appropriée au SA (60% SA+40 %SD), les particules fines de SD remplissent les porosités de la structure granulaires en libérant de l'eau dans ces pores qui vont adhérer à la surface des grains de SD sous forme d'eau de couche libre, ce qui participe, ensuite, à la maniabilité [113]. De cette manière, l'ouvrabilité sera améliorée. De l'autre côté, lorsque la teneur en SD dépasse 40% l'excès de grains fins, qui ne peuvent pas combler les porosités, absorbera de l'eau à leur surface, et comme le SD présente une surface spécifique très grande, les particules de sable de dune ont

une grande quantité d'eau adsorbée ce qui entrave l'écoulement de béton. Par conséquent, l'ouvrabilité est diminuée.

Dans le système SC-SD, une seule combinaison qui respecte le critère d'étalement (étalement supérieur à 55 cm) concerne la composition de 60% SC et 40% SD, mais elle reste toujours inférieure à celle témoin avec une diminution de 24.83%. De plus, la viscosité apparente T_{500} de cette composition ne respecte pas le critère de la viscosité du BAP (Figure IV.3). C'est-à-dire leurs composants sont très solidaires. Cela est attribué à la forte teneur en éléments fins dans les deux types de sables. Les éléments fins contribuent à l'absorption de la quantité d'eau nécessaire au mouillage des grains. Comme nous avons indiqué en-haut, les particules fines de SD participent à l'augmentation de la cohésion entre les grains par la création d'une couche d'eau adsorbée sur leur surface. Cette couche est en contact directe avec d'autres voisins qui vont exercer des forces de frottement l'un sur l'autre ce qui gêne le mouvement des grains et diminuant ainsi l'ouvrabilité. Ce type de béton n'a pas assez de capacité à remplir convenablement les coffrages fortement ferrailés et n'est pas s'écouler bien dans les zones confinées. Il est donc nécessaire d'augmenter la quantité d'eau et/ou de superplastifiant SP pour résoudre ce problème [56].

En ce qui concerne les mélanges ternaires (Figure IV.2), l'étalement de toutes les compositions est compris entre 55 et 85 cm, qui respectent le critère d'étalement selon la norme européenne NF EN 12350-8 [195]. La composition C2 (60SA-20SC-20SD) offre le meilleur diamètre d'étalement de 78 cm par une amélioration de 4.7% contre témoin. Cependant le remplacement partielle de SA par 40% SC et 20% SD ou de 20% SC et 40% SD diminue le diamètre d'étalement d'ordre 5.50% et 7.5% respectivement. Une perte importante de l'étalement a été enregistrée de 19.40% ,19.50% et 22.70% lorsque SA est remplacé par : 60%SC et 20%SD, 40% SC et 40% SD ou de 20% SC et 60% SD respectivement. Cela signifie qu'au-delà de 40% de remplacement de SA par SC et SD l'étalement est diminué progressivement. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bouziani [159]. Aussi, les résultats de la viscosité des BAP montrent qu'elle est en relation directe avec la nature de sable (Figure IV.3). La composition 60SA-20SC-20SD ayant la même vitesse d'étalement que le béton témoin, c'est-à-dire que la substitution de SA par 20% SC et 20% SD améliore l'étalement sans influencer la viscosité apparente du BAP. On remarque aussi qu'au plus de 40% de remplacement du SA par SC et SD la viscosité apparente est diminuée de plus de 2 à 5 fois par rapport au témoin. La perte de l'étalement et de la viscosité est due à la forte absorption d'eau et à la forme géométrique des grains de SC et SD. L'absorption élevée d'eau de SC cause la perte d'étalement et la perte de la

viscosité de BAP du fait que les grains de SC absorbent une quantité d'eau de gâchage et par conséquent elle diminue la quantité d'eau nécessaire au mouillage de la matrice. La forme anguleuse de SC provoque un frottement entre les grains et augmente les vides entre particules; à cause de ces deux facteurs la vitesse de l'écoulement est lente ainsi la viscosité du BAP sera diminué. À cet effet, les BAP avec une grande quantité de SC nécessitent une grande quantité de filler pour remplir les vides et pour minimiser le frottement de SC et ont également besoin d'un dosage supplémentaire en SP pour lubrifier les grains de SC et ainsi d'éviter toute ségrégation et blocage des gros granulats. Ces résultats sont en accord avec les résultats de [26,52,55,56,161,208]. La présence de SD en quantité importante conduit à une forte perte de l'ouvrabilité (22.7 % de perte d'étalement et 5 fois la perte de la viscosité dans le cas de mélange qui contient 60% de SD par rapport au béton témoin) ceci est due à la finesse et à l'absorption de SD qui causent la réduction de la quantité d'eau dans le mélange de fait qu'un film d'eau très mince est créé sur les grains de SD avec une forte adhérence ce qui augmente probablement la cohésion entre les grains et pourrait rendre l'écoulement de BAP difficile; donc les BAP avec une grande quantité de SD nécessitent une quantité importante en SP et une quantité supplémentaire d'eau pour lubrifier les grains de SD et pour améliorer son ouvrabilité. Ces résultats sont en accord avec les résultats de [26,56,110,161].

IV.3.2. Déformabilité et la stabilité

La déformabilité et la stabilité des différents BAP en sable binaire et ternaire sont illustrées dans la Figure IV.4 et la Figure IV.5 respectivement. Les deux figures montrent bien que la variation de la capacité de remplissage H_2/H_1 dans la boîte en L est presque la même variation que l'étalement en fonction de sables.

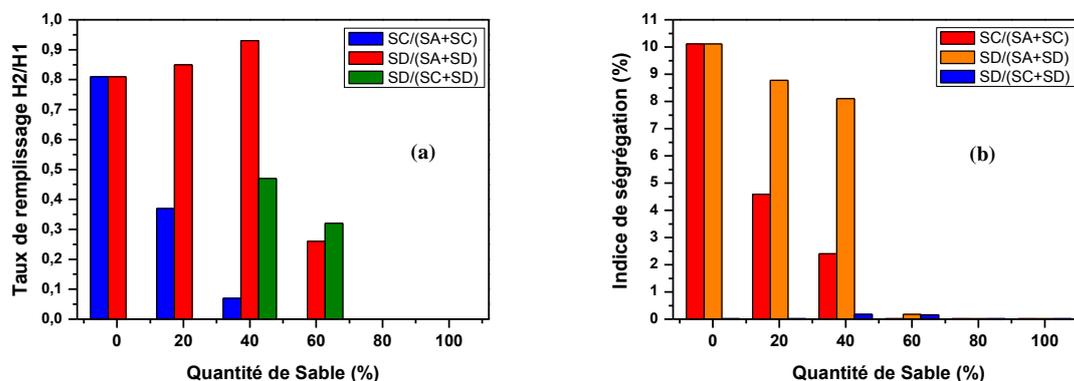


Figure IV.4. Variation de la capacité de remplissage du béton dans la boîte L et l'indice de ségrégation en fonction de sable en mélange binaire

La Figure IV.4(a) montre bien que le taux de remplissage est inversement proportionnel à la teneur en SC, c'est-à-dire l'écoulement du béton dans le milieu confiné est très affecté à la quantité de SC et n'atteint jamais les valeurs recommandés. À plus de 40% de SC l'écoulement est perdu totalement. En revanche, la substitution de SA par SD entraîne une amélioration de l'écoulement jusqu'à un optimum de 40% qui présente un taux de 0.93 (c.-à-d. une amélioration d'ordre 15% par rapport au témoin). Au-delà de cette quantité l'écoulement dans la boîte en L est diminué et presque perdu pour 60% de SD et plus. Pour les mélanges SD-SC, le taux de remplissage n'atteint jamais 50% ce qui traduit que l'écoulement de béton confectionné avec ces deux types de sables est très difficile dans les milieux confinés ce qui nécessite des corrections sur E et/ou SP pour rendre le béton plus ouvrable.

Pour les mélanges ternaires, il est clair, dans la Figure IV.5, que la composition C2 (60SA-20SC-20SD) présente le meilleur taux de remplissage de 0.84, tandis que la composition témoin offre un taux de 0.81, c'est-à-dire que l'introduction de 20% SC et 20% SD par remplacement de SA améliore l'écoulement dans le milieu confiné par 3.70%. Le mauvais taux de remplissage de 0.18 est constaté dans la composition avec une grande proportion de SC, cela signifie qu'une perte de 77.78% par rapport au témoin.

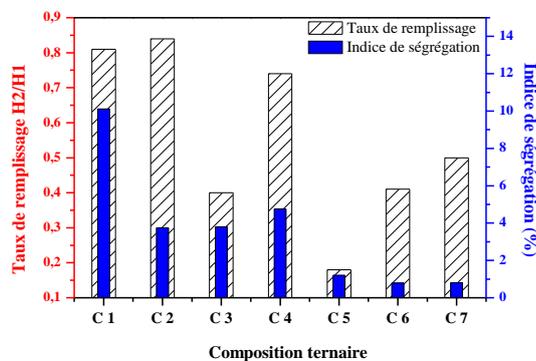


Figure IV.5. Variation de la capacité de remplissage du béton dans la boîte L et l'indice de ségrégation en fonction de sable en mélange ternaire

À la suite de ce qui précède, l'utilisation du sable SC en grande quantité influence négativement sur l'écoulement du BAP, plus la teneur en SC augmente dans le mélange plus l'écoulement est diminué. Ceci est dû à la quantité importante de fines dans le sable SC, provoquant une augmentation de la viscosité du BAP. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux de Yahia et al [209]. En outre, le sable SD a un effet considérable sur l'écoulement du BAP et moins que celui de SC, et ça revient à la forme des grains de SD qui ont la forme sphérique arrondie ce qui facilite relativement l'écoulement de béton contrairement au SC d'où la

forme anguleuse de ces grains peut entraver le mouvement de béton à côté des armatures. Il est important de noter que la perte de taux de remplissage dans la boîte-L (milieu confiné) est très grande par rapport à celle de l'étalement (milieu non confiné) pour la composition contenant 60% SC; cela peut être due à l'augmentation de la force de frottement entre les grains de SC dans le milieu confiné, d'où les parois de la boîte en L gênent le mouvement de béton ce qui gêne aussi la dispersion des grains de SC est donc conduit à l'augmentation des frottements inter granulaire.

En ce qui concerne la stabilité statique en remarque sur les [Figure IV.4 \(b\)](#) et [Figure IV.5](#) que toutes les compositions présentent une stabilité suffisante et répondent à l'exigence d'un BAP ($SI \leq 15\%$) et sont classées dans la classe SR2 conformément à la norme européenne [79]. La composition témoin présente le plus grand indice $SI = 10.11\%$, ce qui signifie que cette composition est la moins stable, cela peut être due à l'existence d'une quantité d'eau supplémentaire emprisonnée entre les particules. Dans le cas de la substitution de SA par SC ou SD (mélanges binaires) la stabilité est améliorée de 13 à 100% quel que soit le taux de substitution. En particulier pour la composition 60% SA et 40% SD l'amélioration atteint 20% qui est associée aussi avec une amélioration de l'étalement. De même allure, dans le cas des mélanges ternaires, la substitution partielle de SA par 20% SC et 20% SD peut améliorer la stabilité d'ordre 63% comparant au béton témoin sans influencer l'écoulement de BAP. Ces résultats sont en accord avec la littérature [159,161]

En général, la résistance à la ségrégation est variée proportionnellement avec la quantité de SC et/ou SD, lorsque le taux de SC et/ou SD augmente dans le mélange la résistance à la ségrégation est améliorée par le fait que tous les grains sont bien collés entre eux, on peut dire donc que les deux sables jouent un rôle prépondérant dans l'absorption d'eau interstitielle qui se trouve dans la matrice cimentaire mais avec un risque de perdre l'écoulement et la viscosité de BAP.

IV.4. Effet de la combinaison des sables et les régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques

IV.4.1. La résistance à la compression

A. Système de mélange SA-SC

Le développement de la résistance à la compression Variation du rapport $R_c/(R_c$ de témoin) en fonction du type de sable et en fonction de l'âge dans chaque milieu de durcissement sont illustrés dans la Figure IV.6 et la Figure IV.7 respectivement.

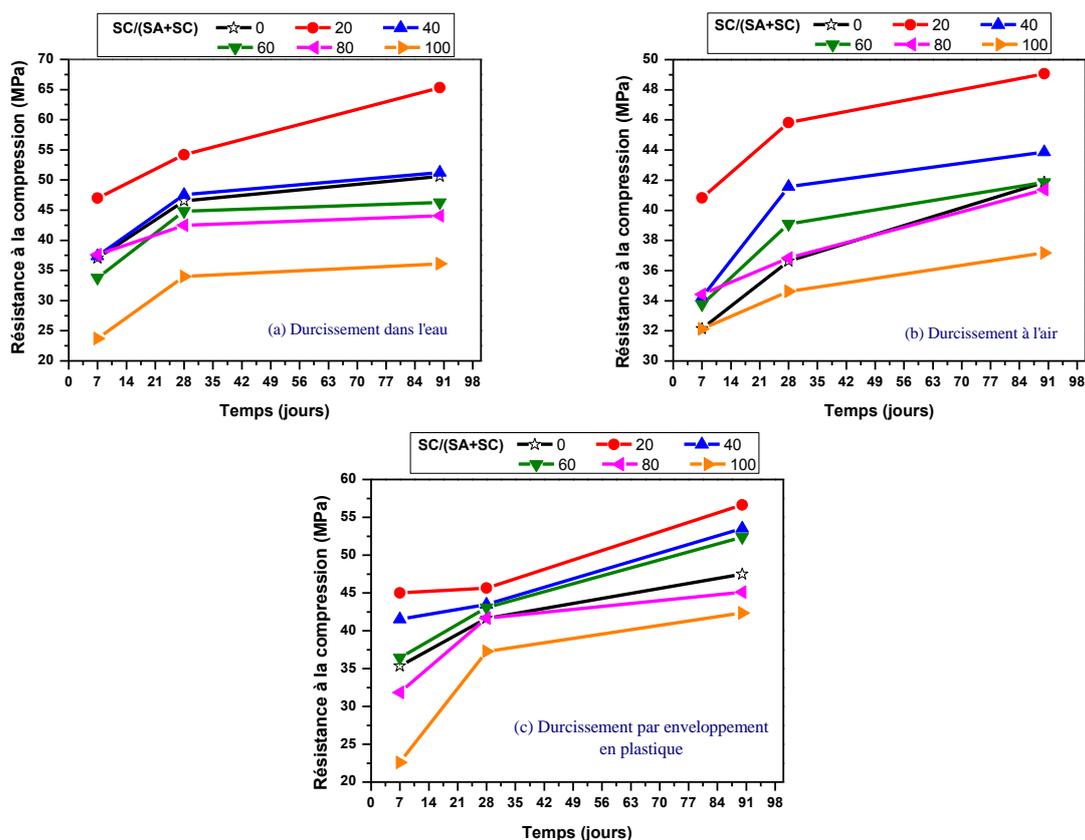


Figure IV.6. Variation de la résistance en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SA-SC

D'après les figures on constate que la résistance à la compression de tous les bétons sont évolués de avec le temps. Les résistances à la compression de la composition de référence à 7, 28 et 90 jours sont respectivement : 37.04MPa, 46.52 MPa et 50.60 MPa dans le cas de durcissement dans l'eau; 32.14 MPa, 36.63 MPa et 41.86 MPa dans le cas de durcissement à l'air libre et de 35.34 MPa, 41.36 MPa et 47.47 MPa dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique.

On remarque sur la [Figure IV.6](#) que, quel que soit le mode de durcissement, la substitution de SA par 20% SC offre toujours une amélioration de la résistance à la compression contre témoin. Dans le cas de durcissement dans l'eau l'amélioration est de 27% à 7 jours, 8% à 28 jours et 21% à 90 jours (soit 47 MPa, 54.18 MPa , et 65.30 MPa respectivement) ; dans le cas de durcissement à l'air l'amélioration est de 4% à 7 jours, 3% à 28 jours et de 3% à 90 jours (soit 40.82 MPa, 45.89MPa et 49.06MPa respectivement) ; et dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique l'amélioration est de 27% à 7 jours, 4 % à 28 jours et de 18% à 90 jours (soit 45.01 MPa, 45.66 MPa et 56.64 MPa respectivement) (cf. [Figure IV.7](#)).

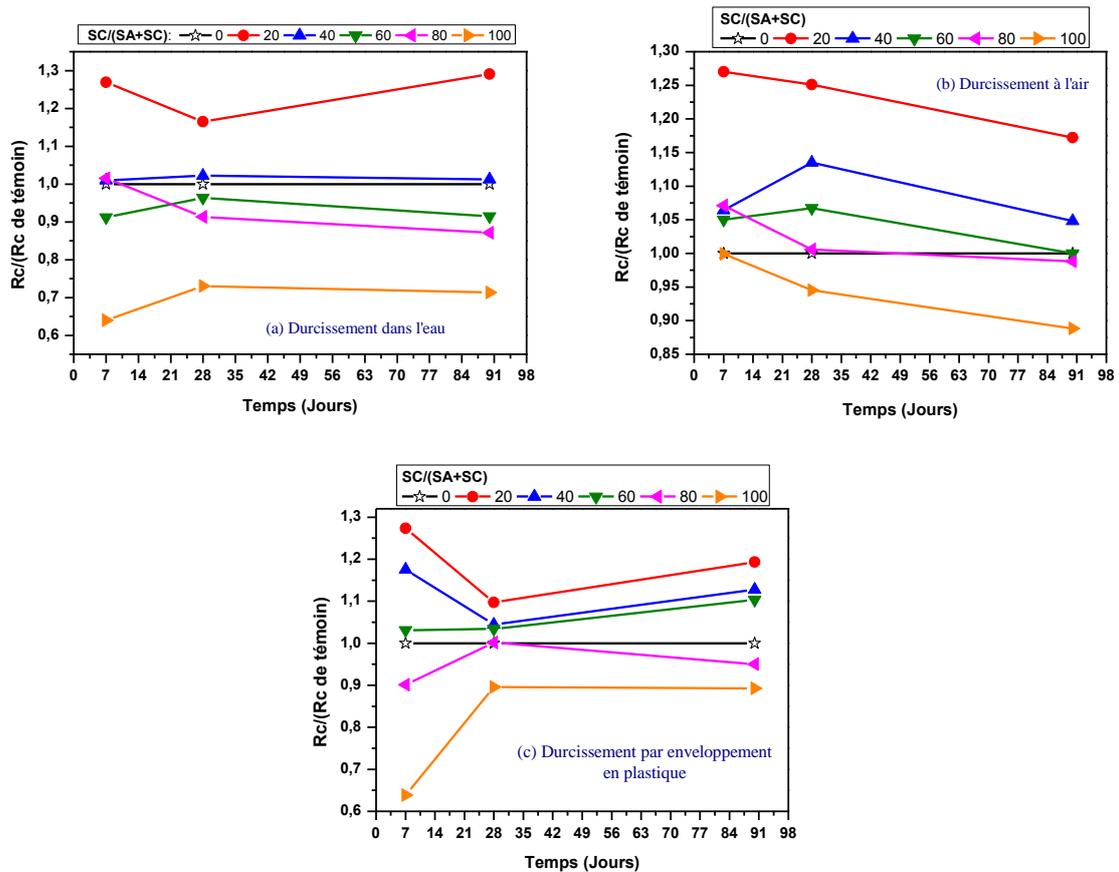


Figure IV.7. Variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SC

Le gain de la résistance est dû à la forme anguleuse, à la rugosité et à la capacité d'absorption d'eau des grains de SC. Ces derniers favorisent une bonne adhérence des grains, puisqu'ils permettent d'augmenter les liaisons pâte-agrégats et densifient la couche de ces liaisons grâce à une réaction chimique produite entre les cristaux de calcite et le ciment pour former le monocaboaluminate [210]. Cette réaction est limitée à la surface des agrégats en raison de la faible mobilité des ions carbonates [102–105]. La photo microscopique (b) dans la [Figure IV.12](#) montre une bonne adhérence des grains qui augmente les liaisons pâte-agrégats. Au-delà de 20%

SC la résistance est affectée négativement ; cela peut être dû à l'augmentation de la surface spécifique de SC qui contient un volume important de fines par rapport au SA ce qui influence négativement sur la quantité d'eau efficace pour l'hydratation de ciment et sur l'interface pâte-agrégats dans laquelle l'adhérence est diminuée à cause de la création d'une auréole autour des granulats et par conséquent elle diminue la capacité portante du béton. Le décroissement de la résistance R_c est aussi affecté par l'accroissement de la porosité du système induite par l'utilisation du SC.

B. Système de mélange SA-SD

Dans la Figure IV.8 il est clair que, quel que soit le mode de conservation, l'optimum de la résistance à la compression dans le cas de la substitution de SA par SD est pour 40% mais elle est toujours inférieure à celle témoin. La perte est estimée de 6% à 7 jours, 12% à 28 jours et 5% à 90 jours (soit 34.77 MPa, 44.56 MPa et 51.22 MPa respectivement) dans le cas de durcissement dans l'eau ; et de 14% à 7 jours, 8% à 28 jours et 10% à 90 jours (soit respectivement 33.85 MPa, 40.46 MPa et 43.11 MPa) ; finalement dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique la perte est estimée de 11% à 28 jours et 2% à 90 jours (soit 39.04 MPa et 47.05 MPa) et un gain de résistance à 7 jours par 1% soit 35.82 MPa (cf. Figure IV.9).

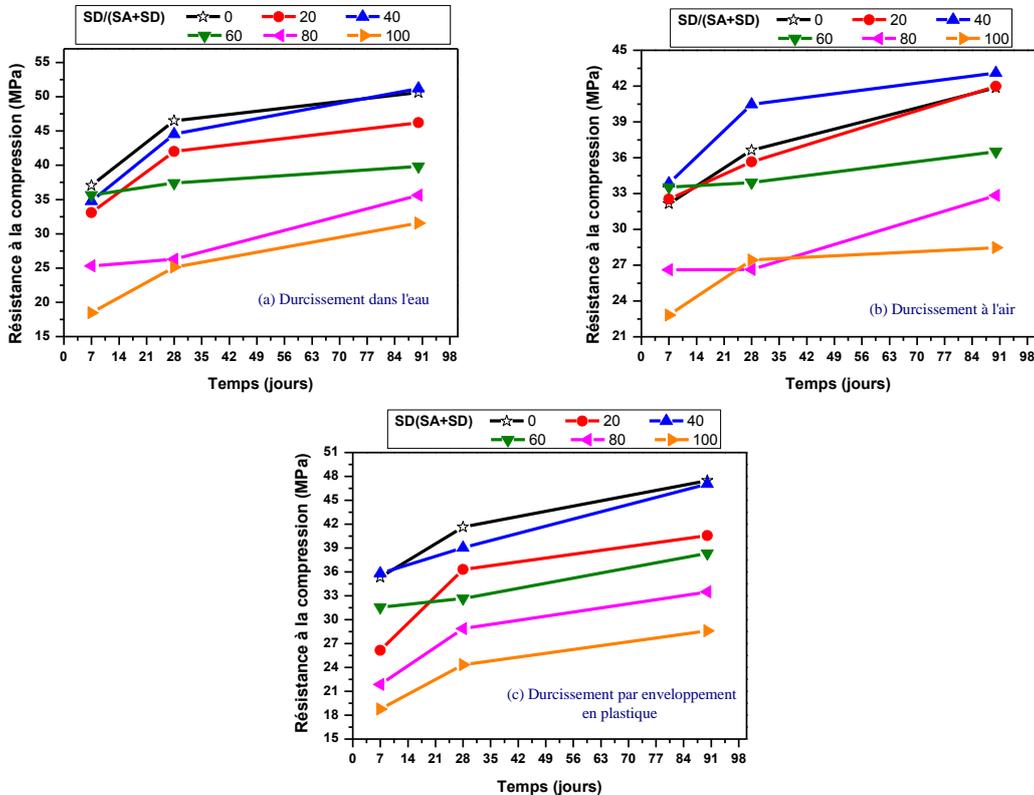


Figure IV.8. Variation de la résistance en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SA-SD

La diminution de la résistance est attribuée à réduction de l'adhérence entre la pâte de ciment et les grains de SD ceci est due d'un côté, à l'augmentation de la surface spécifique des grains fins du SD qui nécessitent davantage de pâte cimentaire afin de recouvrir leur surface [26,110,111,161]. De l'autre côté, à la haute capacité d'absorption du SD. Au moment du malaxage le SD absorbe un volume important de l'eau totale ce qui diminue la quantité d'eau efficace pour la bonne hydratation de ciment, de cette manière une partie des grains de ciment restent anhydres ce qui diminue la résistance à la compression. La résistance est affectée aussi par la morphologie du SD. La forme sphérique arrondie et le diamètre uniforme de ses particules causent une augmentation de la porosité et par conséquent elle diminue la résistance à la compression.

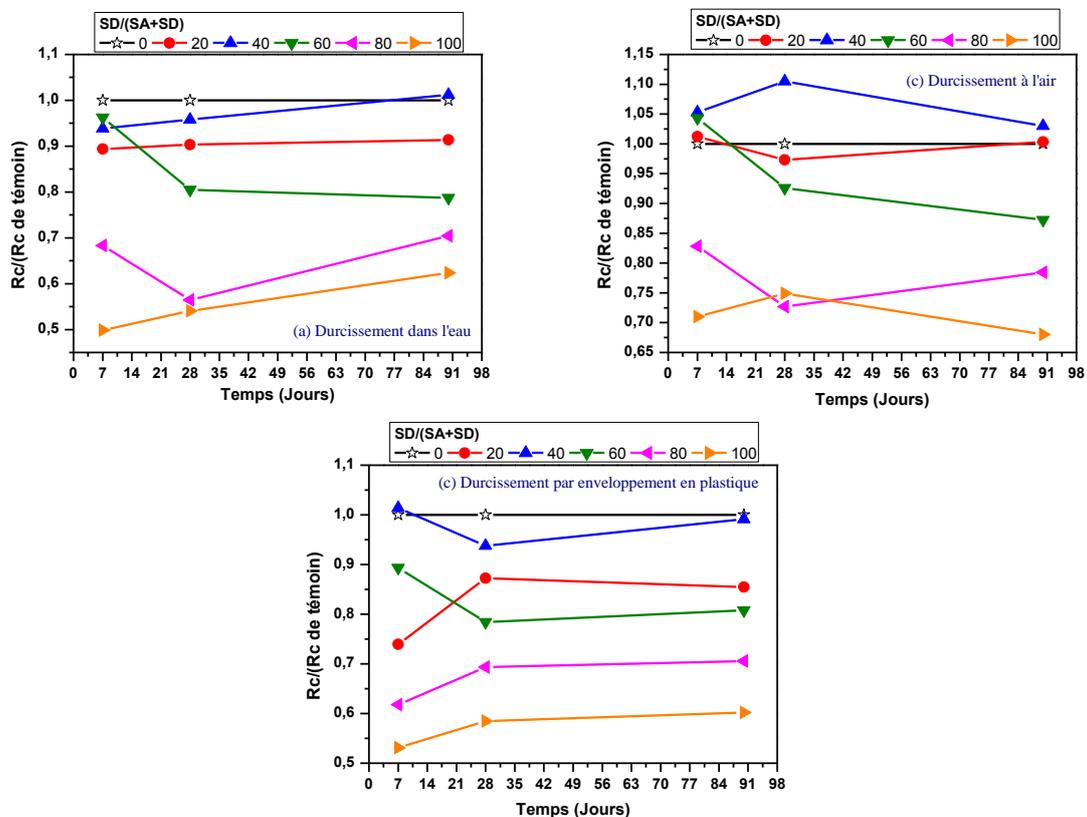


Figure IV.9. Variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SD

C. Système de mélange SC-SD

La Figure IV.10 représente la variation de la résistance à la compression du système binaire SC-SD en fonction du temps. Dans ce système la comparaison sera effectuée avec la composition de référence 100% SA et avec la composition avec 100%SC.

D'après la figure, il est évident que le mélange entre 40%SD et 60% SC permet d'obtenir un BAP ayant une bonne résistance par rapport à celle 100%SC mais inférieure à la composition de référence quelle que soit la méthode de durcissement. La résistance est entre 32 et 36.5 MPa à 7 jours, entre 39 et 43.5 MPa à 28 jours et entre 46 et 49 MPa à 90 jours dans tous les modes de durcissement. Les diminutions à 7, 28 et 90 jours sont : 3%, 14% et 10% dans le cas de durcissement dans l'eau, de 19%, 11% et 16% dans le cas de durcissement à l'air et de 5%, 4% et 4% dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique (cf. Figure IV.11). Pour les autres compositions au départ ne sont pas des bétons autoplaçants car ils ne respectent pas le critère de l'ouvrabilité selon [79]. À cet effet, leur comportement mécanique concernant la résistance à la compression est instable. Comme nous avons discuté auparavant la diminution peut être attribuée à la mauvaise compacité de mélange des sables induite par leur morphologie et aussi à la capacité très élevée d'absorption d'eau des deux sables SD et SC. La photo microscopique (d) dans Figure IV.12 illustre la mauvaise compacité du BAP préparé avec le mélange des sables 60%SC+40%SD

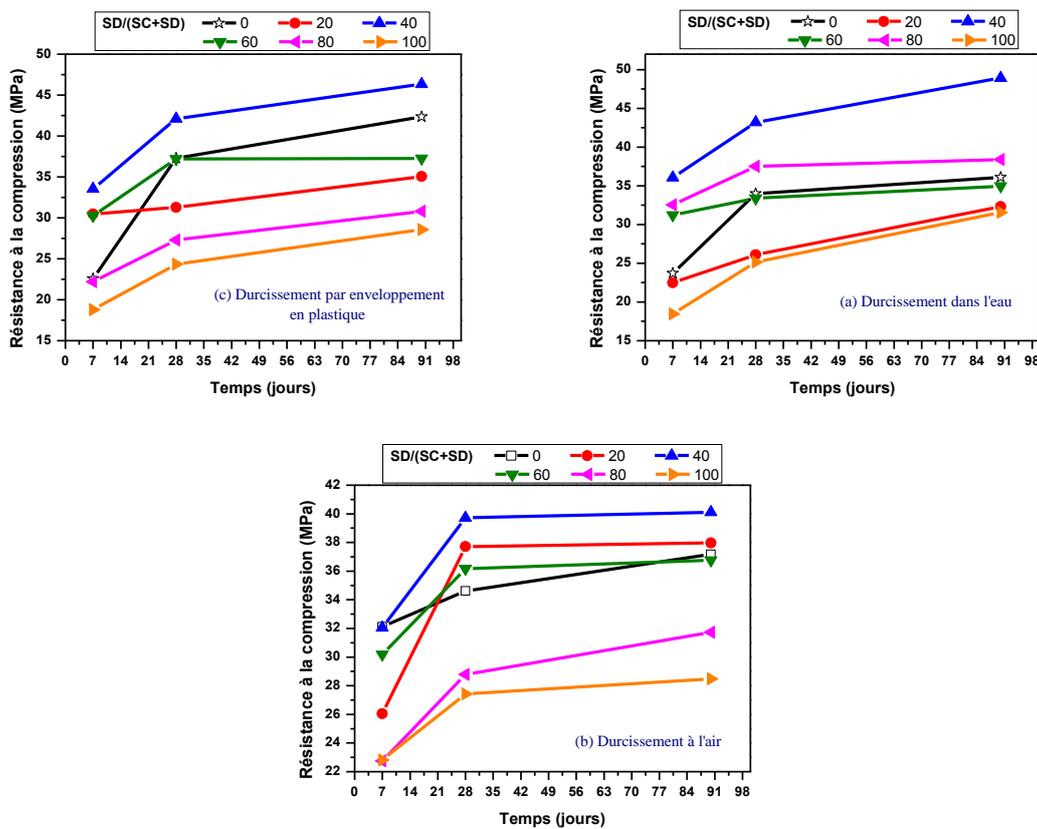


Figure IV.10. Variation de la résistance à la compression en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SC-SD

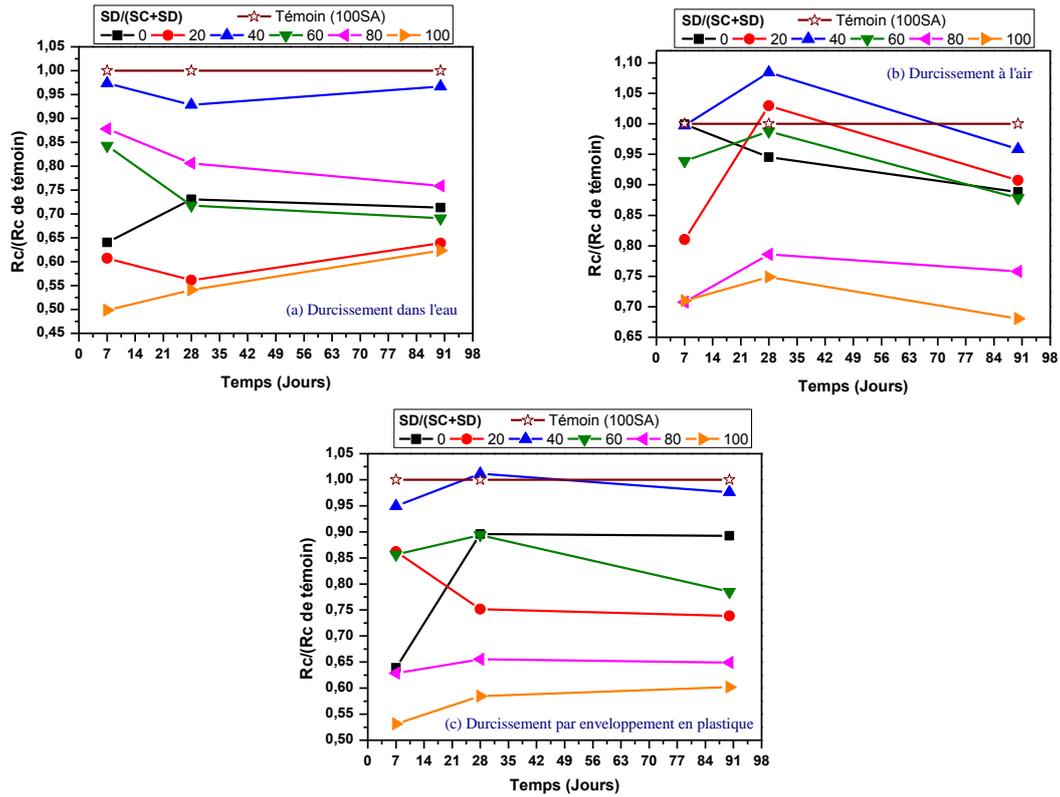


Figure IV.11. Variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SC-SD

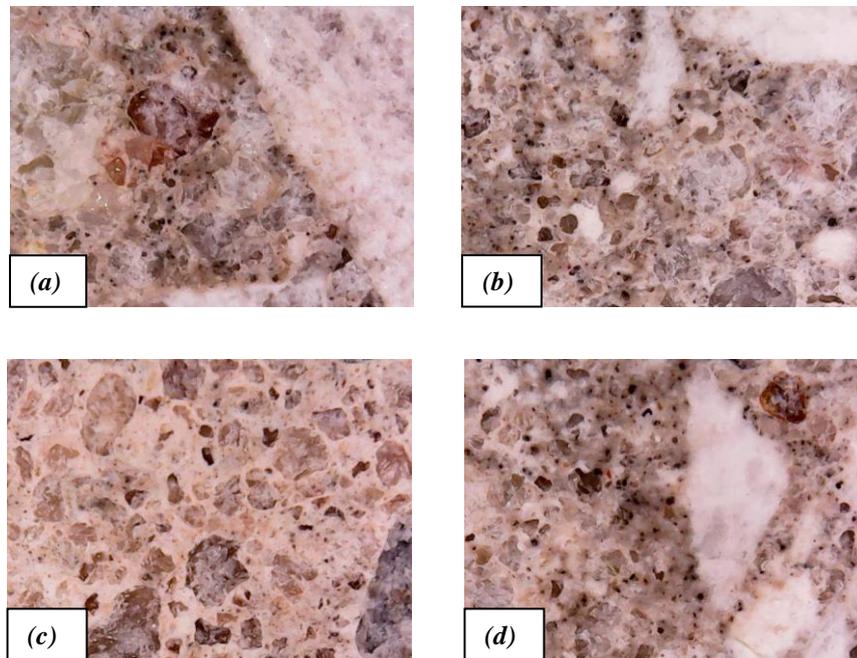


Figure IV.12. Observation microscopique de la compacité des différents BAP après durcissement dans l'eau (Agrandissement = 120 \times) : (a) Témoin ; (b) 80% SA+20% SC ; (c) 60% SA+40% SD ; (d) 60% SC+40% SD

D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD

La Figure IV.13 représente la variation de la résistance à la compression et le rapport entre la résistance à la compression des différents mélanges sur la résistance du béton témoin dans chaque échéance (7, 28 et 90 jours) et dans chaque mode de durcissement. D'après la figure Figure IV.13 on constate que la résistance est augmentée avec le temps. Pour le durcissement dans l'eau, le BAP contenant la combinaison de sable C2 (60SA-20SC-20SD) offre la meilleure résistance à la compression en tous âges (42.07 MPa à 7 jours, 50.39 MPa à 28 jours et 50.85 MPa à 90 jours), ça ce qui signifie que le remplacement partiel de SA par (20% SC-20% SD) peut améliorer la résistance à la compression par 13.60%, 8.30% et 0.50% à 7, 28 et 90 jours respectivement (cf. Figure IV.14) . La résistance à la compression est augmentée avec le remplacement partiel du SA par (20%SC+20%SD), cela est traduit par l'amélioration de la compacité du BAP.

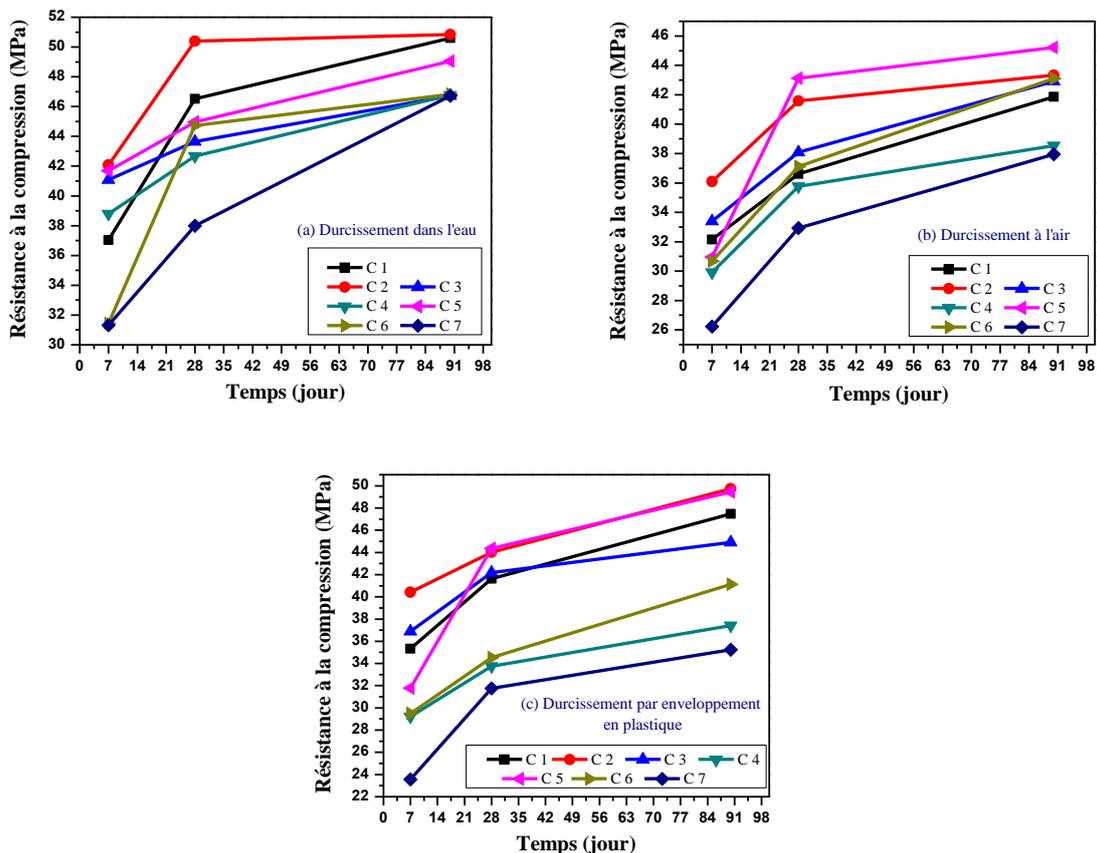


Figure IV.13. Variation de la résistance à la compression en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire SA-SC-SD

Pour confirmer l'effet de la combinaison de sable C2 sur la compacité du BAP, les deux BAP contenant la combinaison C1 et celle-ci contenant C2 sont passé à l'examen macroscopique à l'aide d'un microscope. Les images obtenues sont illustrés dans la Figure IV.15. Les images

montrent clairement la différence entre BAPC1 et celle BAPC2. La composition témoin BAPC1 est plus poreuse comparaison au BAPC2, il est clair que les pores sont développés autour des grains. En plus, la zone d'interface de transition ITZ est très mince dans BAPC2, la pâte est directement liée aux grains. Au contraire, dans la composition BAPC1 il existe des microfissures dans la zone d'interface qui séparent la pâte des grains. Sachant que le comportement du béton en compression est influencé par la porosité dans la zone ITZ, donc la présence d'une couche supplémentaire dans cette zone risque de diminuer le comportement en compression du BAPC1. Ces résultats sont en accord avec les résultats de Kapoor et *al.* [211]. En examinant l'image obtenue de la structure de BAPC2, on s'aperçoit rapidement que la structure de cette dernière apparaît beaucoup plus compacte, en particulier dans la zone de transition autour des grains, ce qui signifie que la distribution granulaire est plus homogène, plus uniforme et plus régulière.

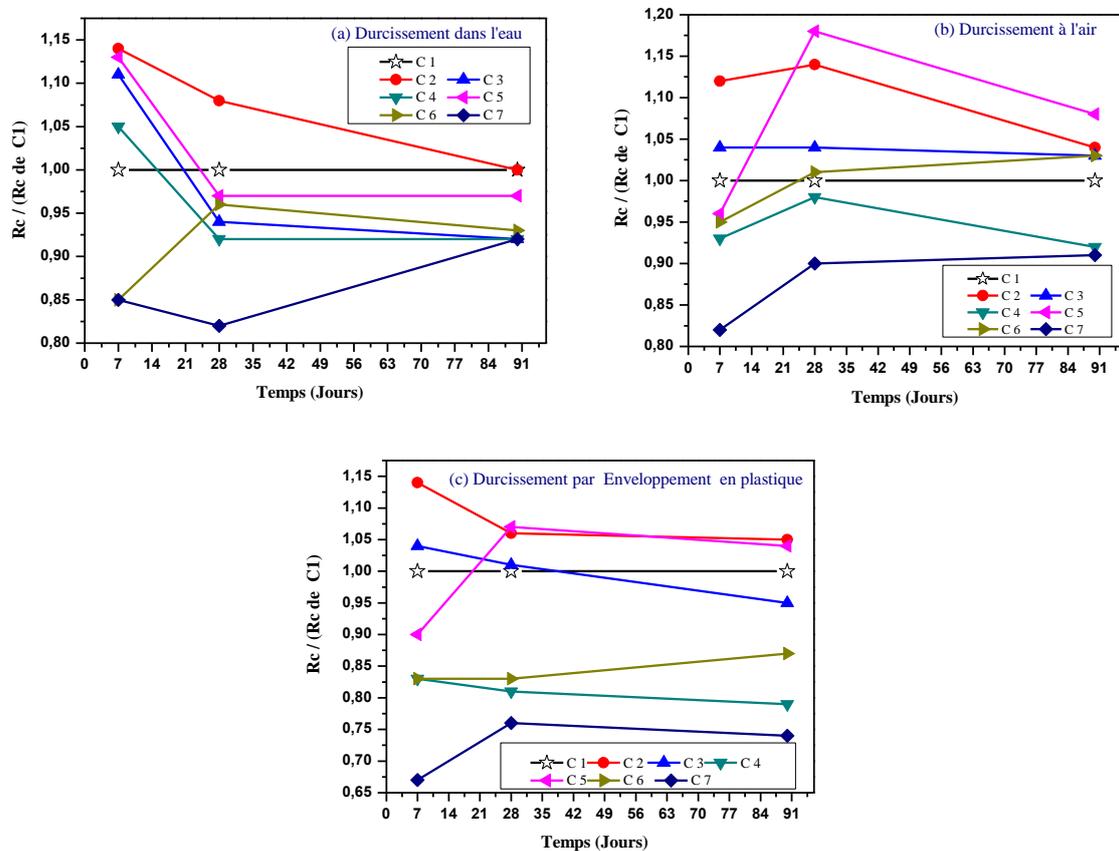


Figure IV.14. Variation du rapport $R_c / (R_c \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système ternaire

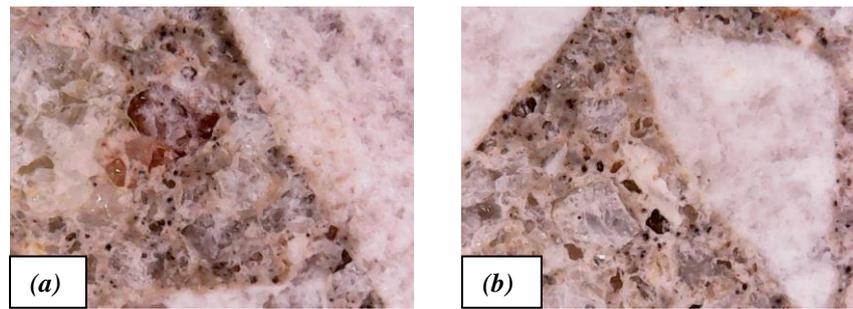


Figure IV.15. Observation microscopique de la compacité des BAP (Agrandissement = 120×) : (a) BAPC1 (témoin) ; (b) BAPC2

Les autres mélanges présentent une perte de résistance entre 3.30% et 18.30% à 28 jours et entre 3.10% et 7.70% à 90 jours en comparant avec la résistance du béton témoin. L'utilisation de 60% SC dans le mélange ternaire améliore la résistance à 7 jours par 12.50% et diminue légèrement à 28 et 90 jours avec une perte de 3.30 % et 3.10% par rapport au témoin respectivement. L'utilisation de 60%SD dans le mélange ternaire offre la plus basse résistance à 7 et 28 jours, c'est-à-dire une perte de 15.50% et 18.30% respectivement. Généralement la substitution de 60% ou 80% de SA par (SC+SD) ayant une influence négative sur la résistance à la compression à 28 et 90 jours. Des diminutions importantes de 7.70% et 18.30% sont remarquées dans le cas de remplacement de 80% SA par 40% SC et 40% SD ou par 20% SC et 60% SD respectivement.

Dans le cas de durcissement à l'air le BAP5 contenant le mélange de sable C5 (20SA-60SC-20SD) offre des bonnes résistances à 28 et 90 jours. Les résultats illustrés dans la [Figure IV.14](#) montre que les bétons contenant les mélanges de sable C2 et C3 offrent une augmentation de la résistance à la compression à 7 jours de 12.30% et 3.90% respectivement. Par contre, les autres mélanges ont présenté une diminution entre 3.50% et 18.50%. Dans 28 et 90 jours les combinaisons qui ont une proportion plus de 40% SC, présentent un accroissement de la résistance entre 1.40% et 17.80%. Cependant, l'utilisation de la combinaison C4 ou C7 peut réduire la résistance à la compression d'ordre de 2.30% à 10.10 % lorsque SD dépasse 40 %. C'est-à-dire l'utilisation de SD en grande quantité diminue la résistance à court et à long terme.

En ce qui concerne le durcissement par enveloppement en plastique, les deux BAP contenant la combinaison C2 et C5 offrent des bonnes résistances (44.02 MPa et 44.35 MPa) à 28, (49.74 MPa et 49.43 MPa) à 90 jours respectivement. Une diminution de la résistance par rapport à celle du béton témoin à l'ordre de 10.10% est pour BAP contenant la combinaison de sable C5 à 7 jours. L'utilisation de la combinaison C3 peut améliorer la résistance à 7 et 28 jours.

Les résultats ont montré qu'au-delà de 40% du SD, une réduction de la résistance à la compression entre 13.30% et 33.30% était observée.

L'amélioration de la résistance à la compression des BAP en cas de l'utilisation de SC est due, d'une part à son nature calcaire qui participe à l'augmentation de la cohésion entre les grains dans la pâte cimentaire ; et d'autre part à la forme anguleuse de SC qui améliore l'enchevêtrement des grains. Ceci est en accord avec [212]. De la même manière, Farran et *al.* [213] ont confirmé la formation d'un lien intime entre les grains de calcaire et la pâte de ciment résulterait de plusieurs mécanismes, notamment la forte adhérence mécanique due à la surface de contact rugueuse et la liaison physico-chimique produite entre les grains calcaires et la pâte de ciment. La perte de la résistance à la compression des compositions contiennent une quantité importante de SD est due à la forme géométrique des grains et à la capacité d'absorption d'eau de ce dernier. Cette perte de résistance est en accord avec les résultats rapportés dans la littérature [96,160,161,206]. Le SD absorbe un volume important d'eau de gâchage ce qui influe sur la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment de fait que des grains de ciment restent anhydres ce qui diminue la résistance à la compression. La forme sphérique arrondi et le diamètre uniforme des particules de SD causent une augmentation de la porosité ce qui diminue la résistance à la compression. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Azzouz et *al.*[160].

IV.4.1.2. Comparaison entre les régimes de durcissement

A. Système de mélange SA-SC

La Figure IV.16 et Figure IV.17 représentent la comparaison de l'effet des régimes de durcissement sur la résistance à la compression des bétons et sur la variation du rapport $R_c/(R_c$ de C1 dans l'eau) du système SA-SC en fonction de l'âge respectivement. Pour les compositions contenant plus de 60%SC (exception 100%SC), on remarque sur la Figure IV.16 que la résistance à la compression à 7 jours dans le cas de durcissement à l'air est proche aux autres régimes. Aussi, dans la Figure IV.17 on observe que le rapport dans le cas de durcissement à l'air est égal à 1.10 pour la composition contenant 20%SC (gain de 10%) et varié entre 0.85 et 0.95 pour un taux de sable SC supérieur ou égal à 40% c'est-à-dire une perte de résistance entre 5 et 15% par rapport au témoin conservé dans l'eau.

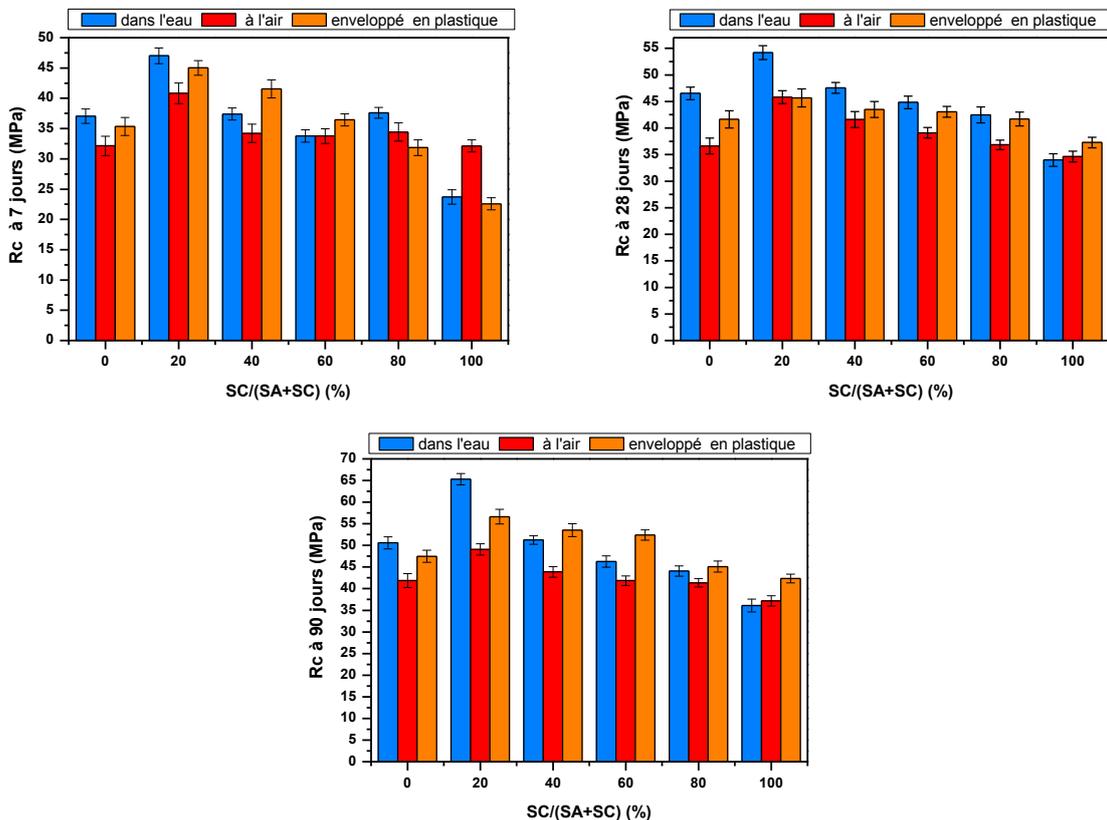


Figure IV.16. Comparaison de la résistance à la compression du système SA-SC à 7,28 et 90 jours en fonction de différents régimes de durcissement

Cela est peut-être dû au séchage précoce provoqué par la différence de température entre le béton et le milieu externe qui contribue à l'augmentation des hydrates du ciment par l'accélération de la vitesse de durcissement et aussi par l'accélération de la réaction du SC de

nature calcaire avec les aluminates du ciment pour former le monocaboaluminate qui densifie la couche des liaisons pâte-agrégats [102–105,210,214]. Mais, à 28 et 90 jours la résistance à la compression est diminuée. De plus, le rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ indique une perte significative de la résistance à la compression entre 10% et 35% (rapport varié entre 0.65 à 0.90).

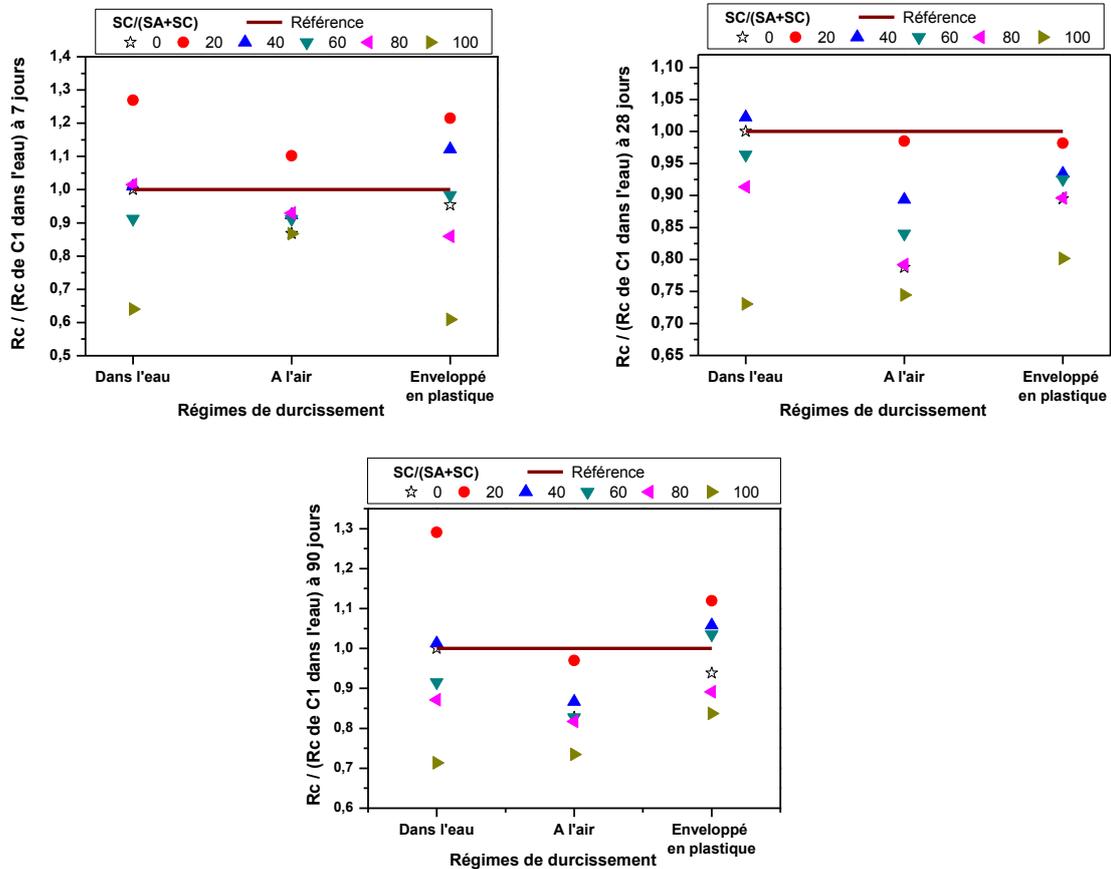


Figure IV.17. Comparaison du rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SA-SC à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

Il est bien clair sur la figure que l'évolution de la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours de tous bétons se comporte de même façon en cas de durcissement dans l'eau ou par enveloppement en plastique. En général pour le durcissement dans l'eau, le rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ prend presque la même tendance à 7, 28 et 90 jours (entre 0.65 et 0.95 pour la teneur en SC supérieur à 20%SC). Au contraire pour le durcissement par enveloppement en plastique où il y a une amélioration de la résistance entre 7, 28 et 90 jours pour les bétons contenant 40% de SC et plus mais reste toujours inférieure au témoin.

B. Système de mélange SA-SD

Les mêmes remarques que le système précédent sont constatées concernant le durcissement à l'air (Figure IV.18 et Figure IV.19). Mais cette fois-ci le rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ est varié entre 0.60 et 0.95 à 7 jours et entre 0.50 à 0.80 à 28 et 90 jours, c'est-à-dire la perte par rapport au témoin dans l'eau est entre 5% et 40% à 7 jours et entre 20 et 50% à 28 et 90 jours respectivement. Aussi, la perte augmente proportionnellement avec la quantité du SD. A 7 jours, Pour le teneur en SD de 40%, la résistance est presque proche à celle de témoin conservé dans l'eau dans les différents milieux de durcissement (le rapport varie entre 0.92 et 0.98, la perte entre 2 et 8%) mais ce rapport est décroît à 28 et 90 jours (entre 0.80 et 0.90 à 28 jours et entre 0.80 et 0.95 à 90 jours, c'est-à-dire la perte de la résistance est entre 10 et 20% et entre 5% et 20% respectivement).

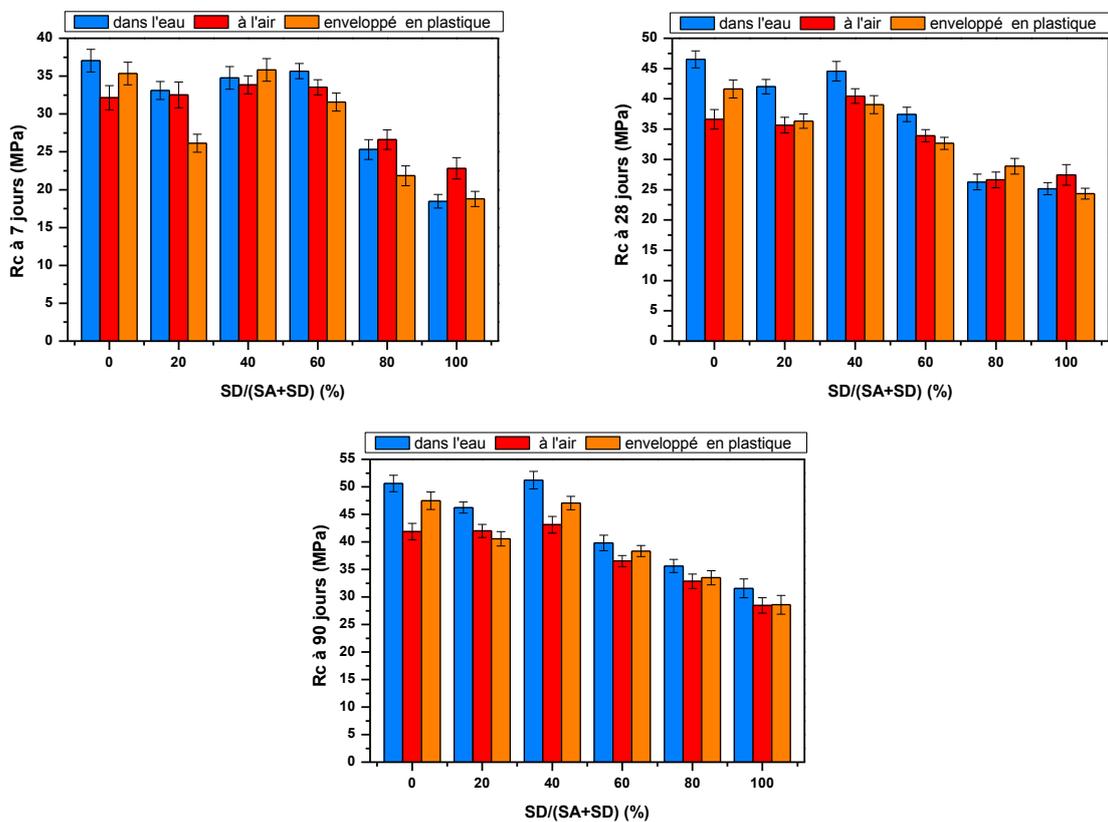


Figure IV.18. Comparaison de la résistance à la compression du système SA-SD à 7,28 et 90 jours en fonction de différents régimes de durcissement

On observe aussi sur la Figure IV.18 que la résistance à la compression des éprouvettes durci à l'air ou par enveloppement en plastique sont très similaire pour les différents teneurs en SD cela est probablement attribuée à la diminution de quantité d'eau dans la matrice à raison de

la forte absorption des grains de SD et aussi à la forte adhésion des pellicules d'eau sur la surface de grains.

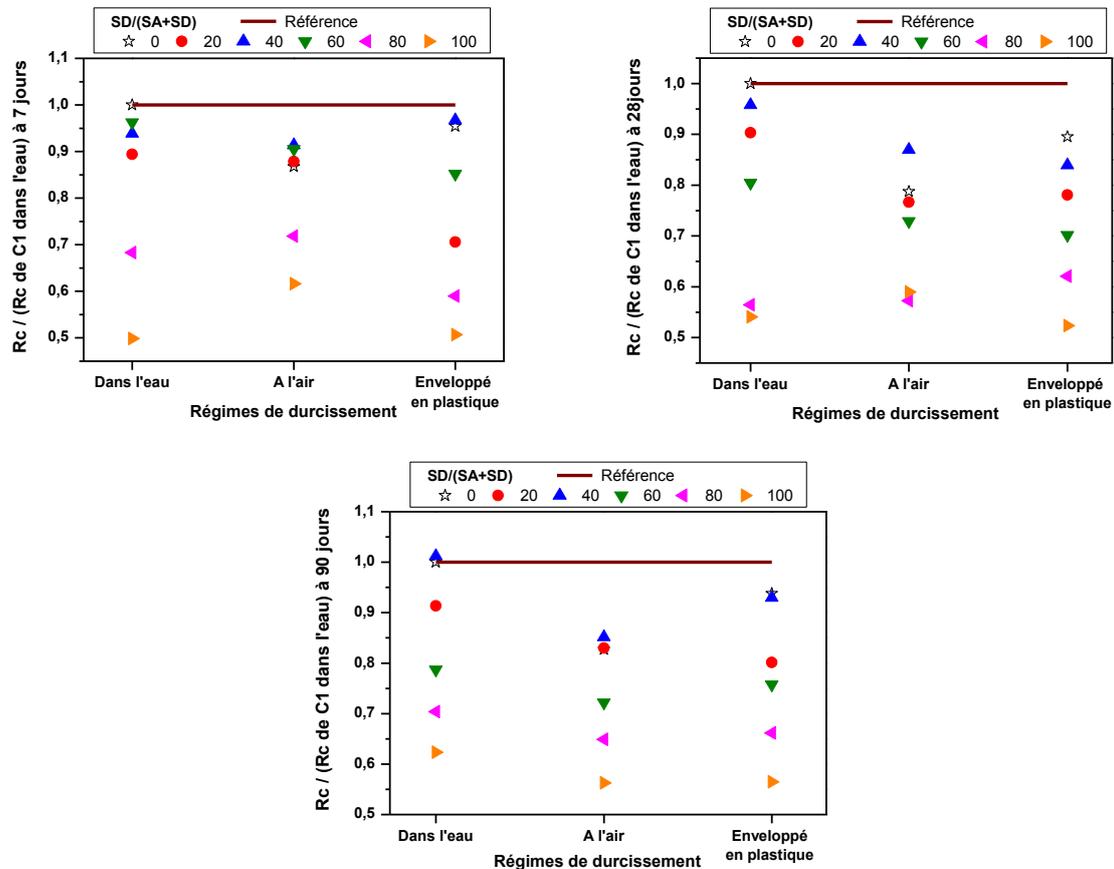


Figure IV.19. Comparaison de rapport $R_c / (R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SA-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

C. Système de mélange SC-SD

La remarque générale qu'on peut constater sur la Figure IV.20 et la Figure IV.21 c'est que la résistance à la compression est diminuée avec la combinaison de SC et SD et aussi qu'aux différents milieux de durcissement la résistance est toujours perdue par rapport à la référence (cf. Figure IV.21). La remarque qu'on peut tirer de la même figure est dans le durcissement à l'air les points sont proches à 7, 28 et 90 jours (généralement le rapport est entre 0.50 et 0.80) ce qui signifie que la différence de la résistance est due à la quantité de SD ou de SC présente dans le béton, cela peut expliquer par l'effet de l'absorption très élevée des deux sables sur la quantité d'eau efficace qui influe de ça part sur la cinétique d'hydratation des anhydres du ciment. En outre, pour le béton contenant la combinaison 40% SD toujours il y a une amélioration de la résistance dans tous les modes de conservation et que la même tendance de développement du R_c est remarquée pour le durcissement dans l'eau et celles enveloppés par plastique. Les pertes en générale sont situées entre 10 et 50% dans toutes les méthodes de durcissement.

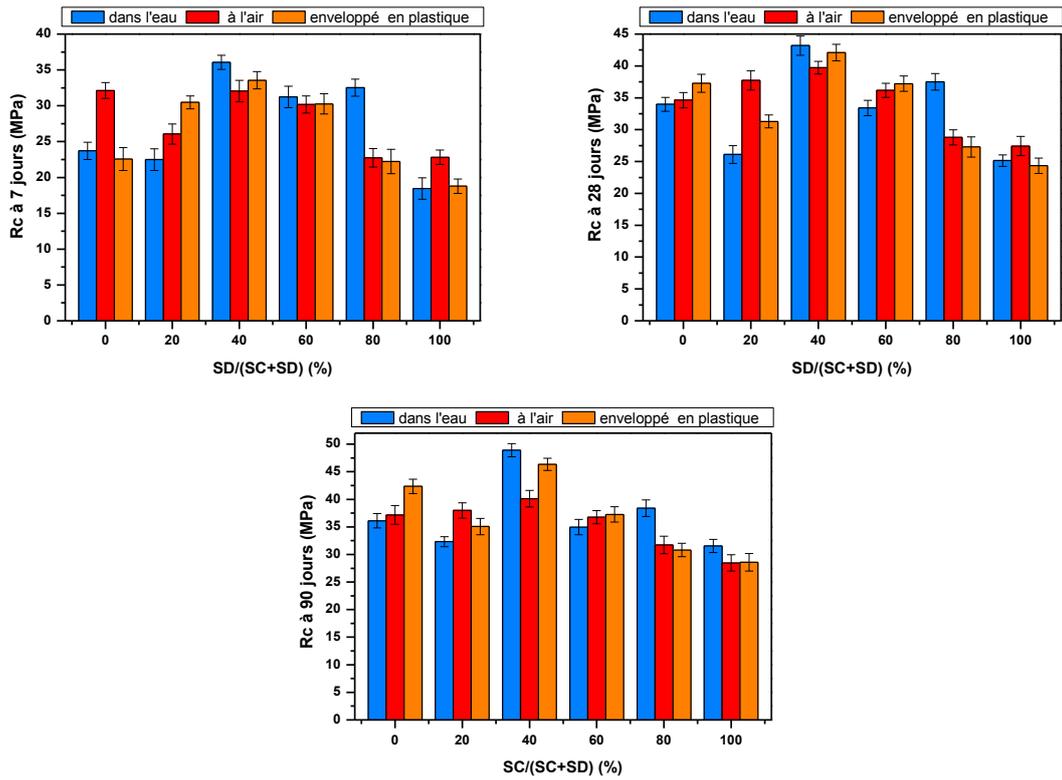


Figure IV.20. Comparaison de la résistance à la compression du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

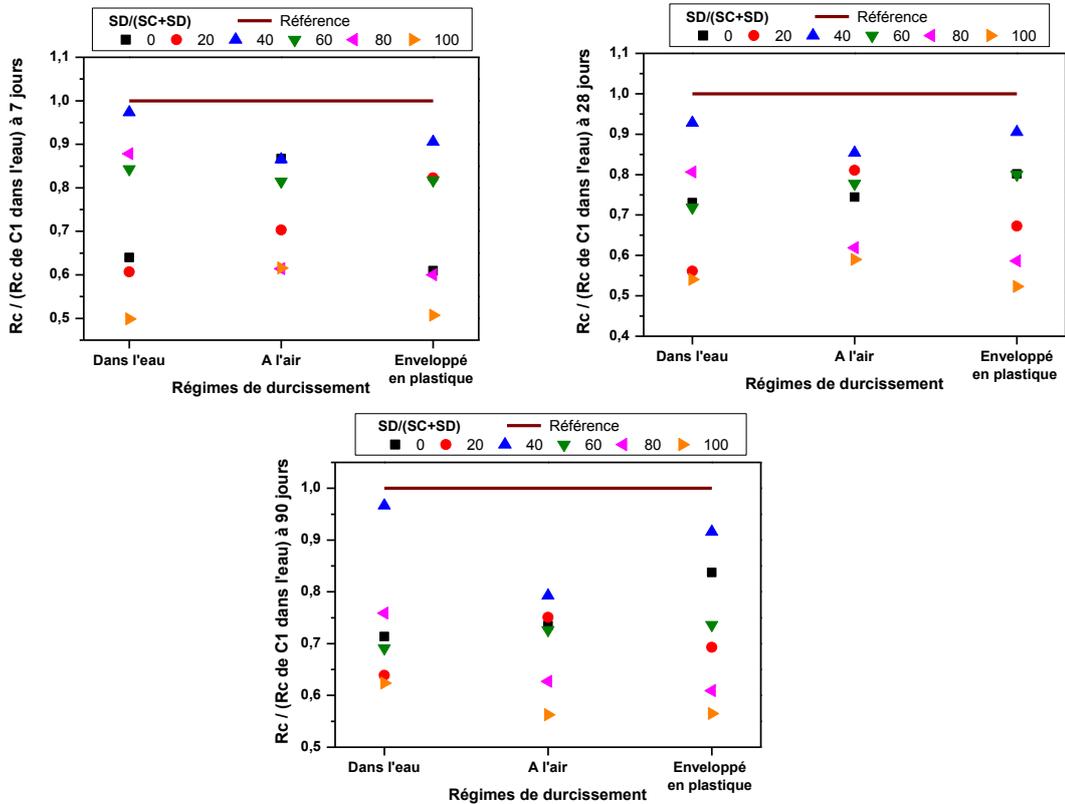


Figure IV.21. Comparaison de rapport $R_c / (R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD

Sur ce système (Figure IV.22) on observe que la tendance globale de la résistance à la compression des éprouvettes durcissant à l'air contenant les combinaisons de sable C4, C6 ou C7 était très similaire à celle des éprouvettes enveloppées dans une feuille de plastique à tous les âges; Cela est dû à la légère différence de la vitesse de durcissement entre les deux régimes. À 90 jours, une légère différence de la résistance à la compression entre les échantillons durcis à l'eau et les échantillons enveloppés dans le plastique pour les BAP contenant les combinaisons de sable C2, C3 ou C5. Dans la Figure IV.23 qui montre la variation du rapport de résistance à la compression $R_c/(R_c \text{ de C1})$ dans le durcissement à l'eau) du BAP en fonction des combinaisons de sable on remarque que à 7 jours, dans le cas où les échantillons sont exposés au durcissement dans le plastique, le BAP avec la combinaison C2 présente un gain de résistance à la compression par rapport à la composition de référence.

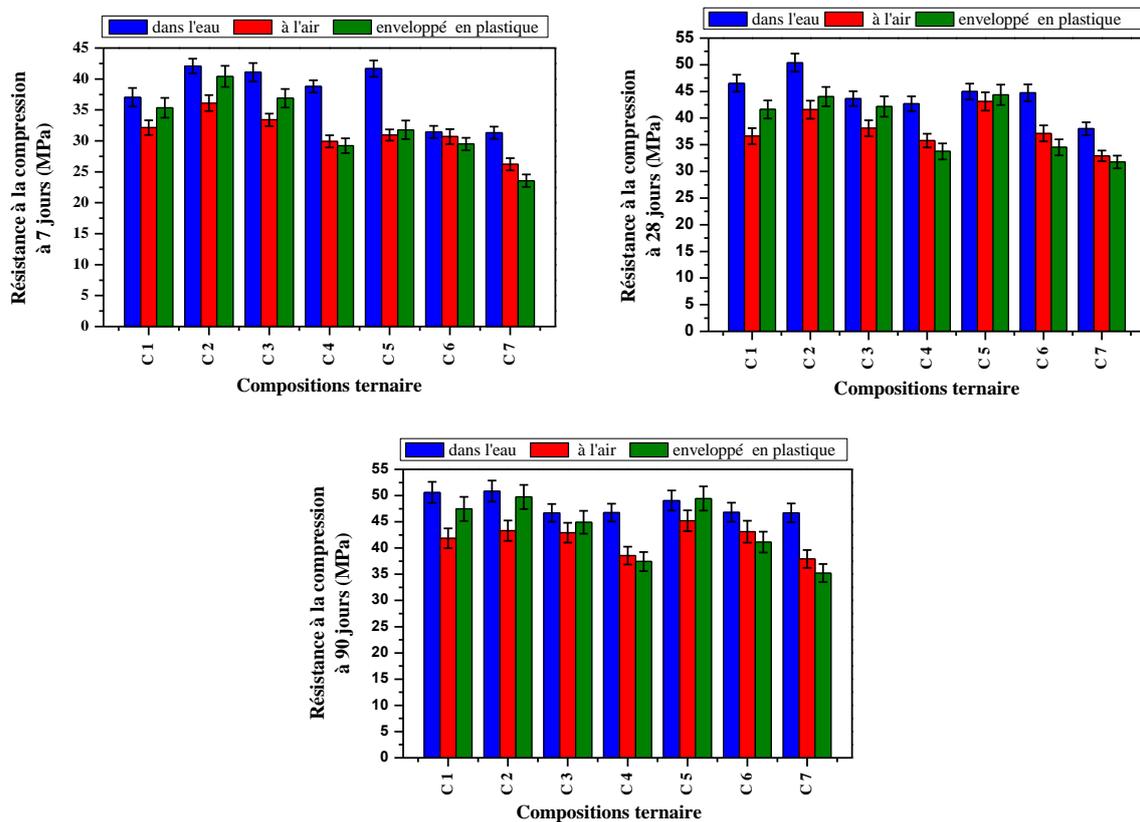


Figure IV.22. Comparaison de la résistance à la compression du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

Les échantillons enveloppés dans une feuille de plastique retiennent la quantité de chaleur résultante de l'hydratation du ciment; ces derniers peuvent contribuer à accélérer le processus de durcissement au plus jeune âge et ont un effet positif sur la résistance à la compression. Le BAP

avec la combinaison C2 est le seul qui montre l'augmentation de la résistance à la compression à 28 et 90 jours dans le cas de la conservation dans l'eau par rapport à la composition de référence.

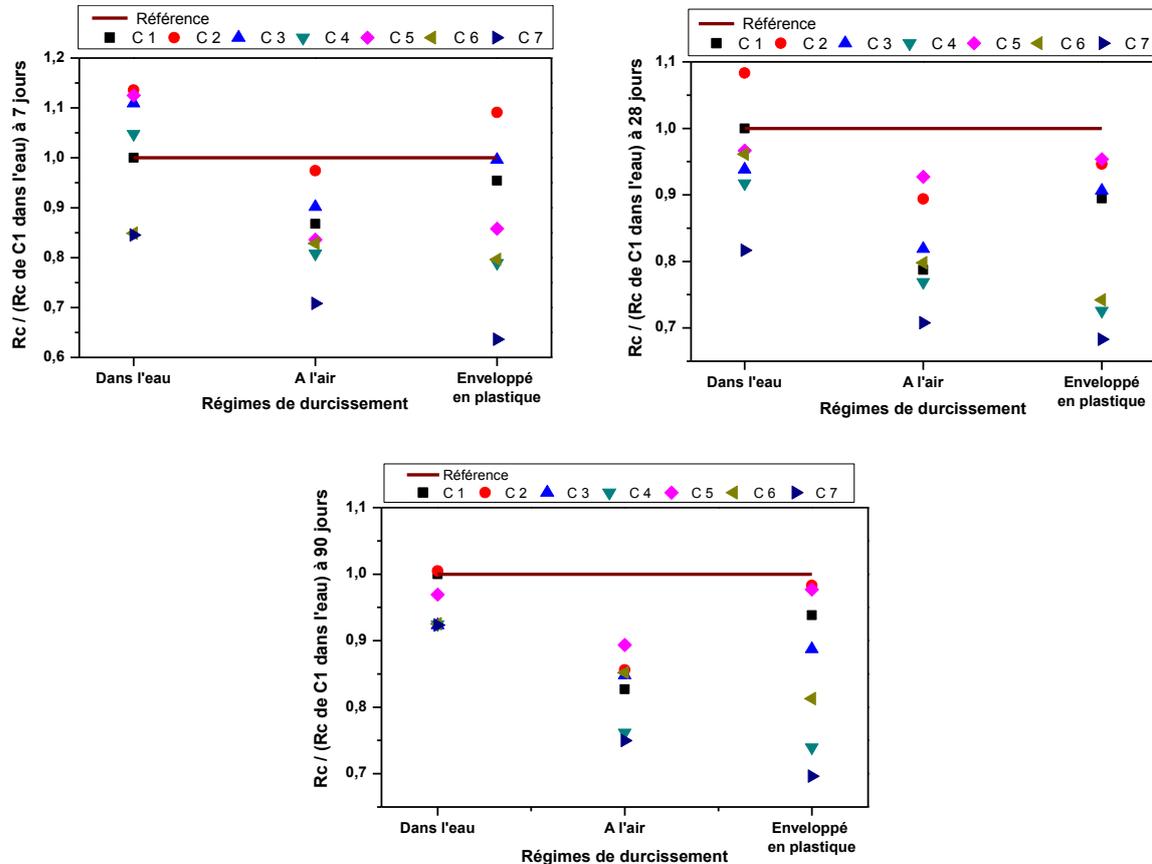


Figure IV.23. Comparaison de rapport $R_c/(R_c \text{ de } C1 \text{ dans l'eau})$ du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

En résumé, quelles que soit les combinaisons binaire ou ternaire des sables SA, SC et SD la résistance à la compression dans le cas de durcissement à l'air libre est toujours le plus faible par rapport aux autres. La raison de la réduction de la résistance à la compression est l'évaporation de l'eau des échantillons de béton. Pour que l'hydratation de ciment progresse, il faut au moins 80% d'humidité relative [141]. À cause du manque d'humidité, l'hydratation est arrêtée avant que les pores ne soient bouchés par les hydrates de silicate de calcium adéquat. Ainsi, des structures de pores plus continues ont été formées, réduisant la résistance à la compression du béton [210]. De la même manière, Mannan et *al.* [215] ont rapporté que la perte d'humidité dans les pores capillaires due à l'évaporation ou à une hydratation dissipée pouvait entraîner une réduction de l'hydratation et par conséquent la réduction de la résistance. Le durcissement à l'air a un impact négatif sur la résistance à la compression des BAP. Ceci est dû au manque d'humidité nécessaire à l'hydratation du ciment [216].

Les résultats présentés ont démontré l'effet bénéfique du durcissement à l'eau. Le développement d'une bonne résistance à la compression dans l'eau ou par enveloppement dans une feuille en plastique est attribué à une humidité suffisante maintenue de manière à conserver la bonne hydratation du ciment qui entraîne le colmatage des pores capillaires et le renforcement des liens intergranulaires des BAP à tous les âges quelles que soient les combinaisons des sables. Ceci est en accord avec les résultats présentés dans la littérature [217]. Les résultats de la résistance du durcissement enveloppé indiquent également qu'un bon gain de résistance à la compression peut être obtenu sans rajouter d'eau par des moyens externes si l'évaporation de l'humidité dans les éprouvettes est interdite [138]. Donc les durcissements dans l'eau ou par enveloppement en plastique sont des milieux favorables du BAP pour continuer l'évolution de sa résistance en fournissant suffisamment d'humidité pour que le ciment continue leur hydratation.

IV.4.2. Résistance à la traction

Dans tous les milieux de durcissement et dans chaque système de mélange des sables, la résistance à la traction du BAP est évoluée progressivement avec le temps. Pour la composition témoin, la résistance à traction à 7, 28 et 90 jours sont respectivement : 3.27 MPa, 4.73 MP et 5.51 MPa dans le cas de durcissement dans l'eau ; et de 3.05 MPa, 4.52 MPa et 5.38 MPa dans le cas de durcissement à l'air et de 3.05MPa, 4.56Mpa et 5.42 MPa dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique.

A. *Système de mélange SA-SC*

Une tendance similaire à celle de la résistance à la compression est observée. Nous remarquons sur la [Figure IV.24](#) que dans tous les milieux de durcissement la substitution de SA par 20%SC entraîne toujours une amélioration de la résistance à traction en tous âges. Dans la [Figure IV.25](#) l'amélioration à 7, 28 et 90 jours est respectivement 12%, 8.20% et 30.10% dans le cas de durcissement dans l'eau et de 10%, 10.50% et 11.20 % dans le cas de durcissement à l'air libre, et d'ordre 12.80%, 10.40% et 11.10% dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique. Pour la substitution par 40% SC la résistance à traction est pratiquement similaire à celle témoin à 7 et 28 jours et elle est supérieure à 90 jours. Comme nous avons indiqué précédemment dans la résistance à la compression, l'amélioration de la résistance à la traction dans ce système est probablement due à la forme et à la rugosité des grains du SC, ainsi à sa nature calcaire qui participe à la réaction d'hydratation ce qui densifie et améliorer les liaisons structurelles dans la matrice cimentaire par la formation de monocaboaluminate sur la surface des grains [56]. Au-delà de 40% de SC une amélioration de la résistance à traction à 90 jours

est remarquée en comparant à celle témoin cela peut-être expliquait par la réaction retardée des calcites dans SC avec les aluminates de ciment en présence de l'humidité infiltrée au cours du temps. Au contraire à 7 et 28 jours la résistance est inférieure au témoin. La diminution peut s'expliquer par la structure poreuse de mélange des sables SA-SC et aussi par la capacité d'absorption du SC qui entraine une réduction de l'eau libre dans les composites, donc après départ de cette eau, la création des pores est atténuée [218]. Rmili et *al.*[56] dans son étude a prouvé que pour un taux de substitution inférieur à 30% de SA par SC les propriétés mécaniques sont améliorés et au-delà de cette valeur les propriétés sont affectées négativement. En contraire, Nécira et *al.* [161] ont affirmé que l'ajout de SC au SA, quel que soit le contenu, augmente systématiquement la résistance à la traction à 28 jours.

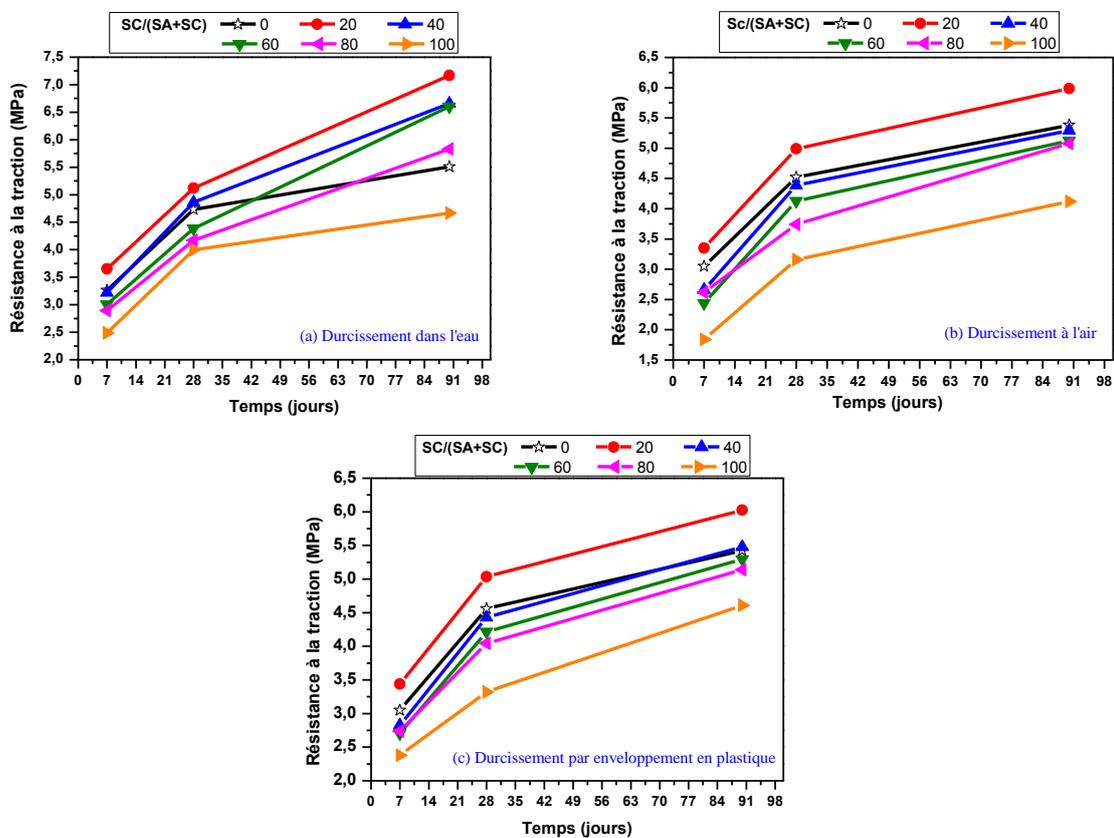


Figure IV.24. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire SA-SC

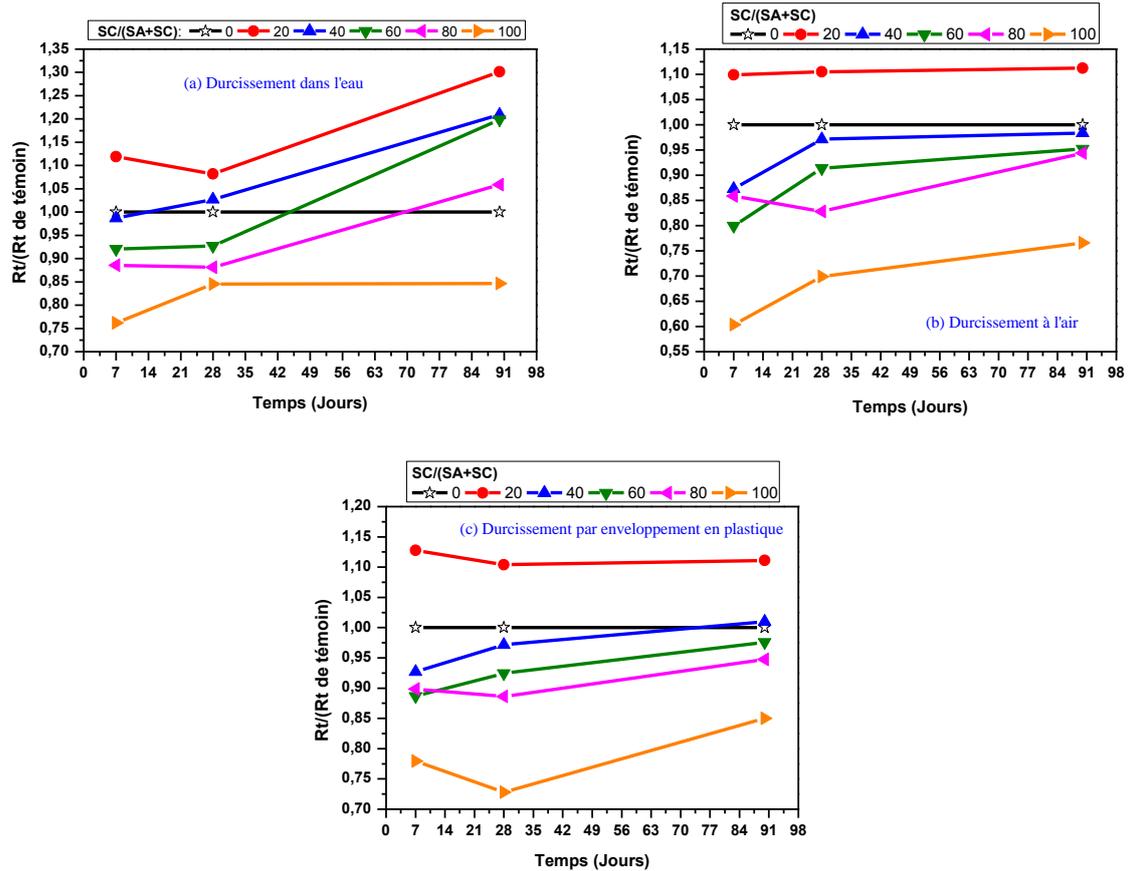


Figure IV.25. Variation du rapport $R_t/(R_t \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SC

B. Système de mélange SA-SD

La résistance à la traction de la composition contenant 40% SD est très semblable à celle de témoin dans le cas de durcissement dans l'eau ou à l'air libre (cf. Figure IV.26). Au contraire, la résistance à la traction est améliorée dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique (gain de résistance de 1 à 8%) (cf. Figure IV.27). En général, la substitution de SA par 40% SD conduit à un BAP ayant une résistance à la traction semblable à celle de la référence quel que soit le mode de durcissement. Ces valeurs sont dues probablement à l'amélioration de la compacité du mélange en raison du colmatage des pores par les petits grains de SD [56].

Au-delà de 40% SD la résistance à la traction est diminuée progressivement, la perte est de 3% à plus de 52% quel que soit le milieu de durcissement. Cette réduction est due, comme nous avons indiqué auparavant, à la perte de l'adhérence entre la pâte de ciment et les grains de SD vue à leur grande surface spécifique, à la diminution de la quantité d'eau efficace provoquée par la forte absorption d'eau et à l'augmentation de la porosité induit par la morphologie sphérique et uniforme des grains de SD. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Rmili et *al.*[56] et Nécira et *al.* [161] qui ont confirmé que la substitution de SA par SD diminue la résistance à la traction.

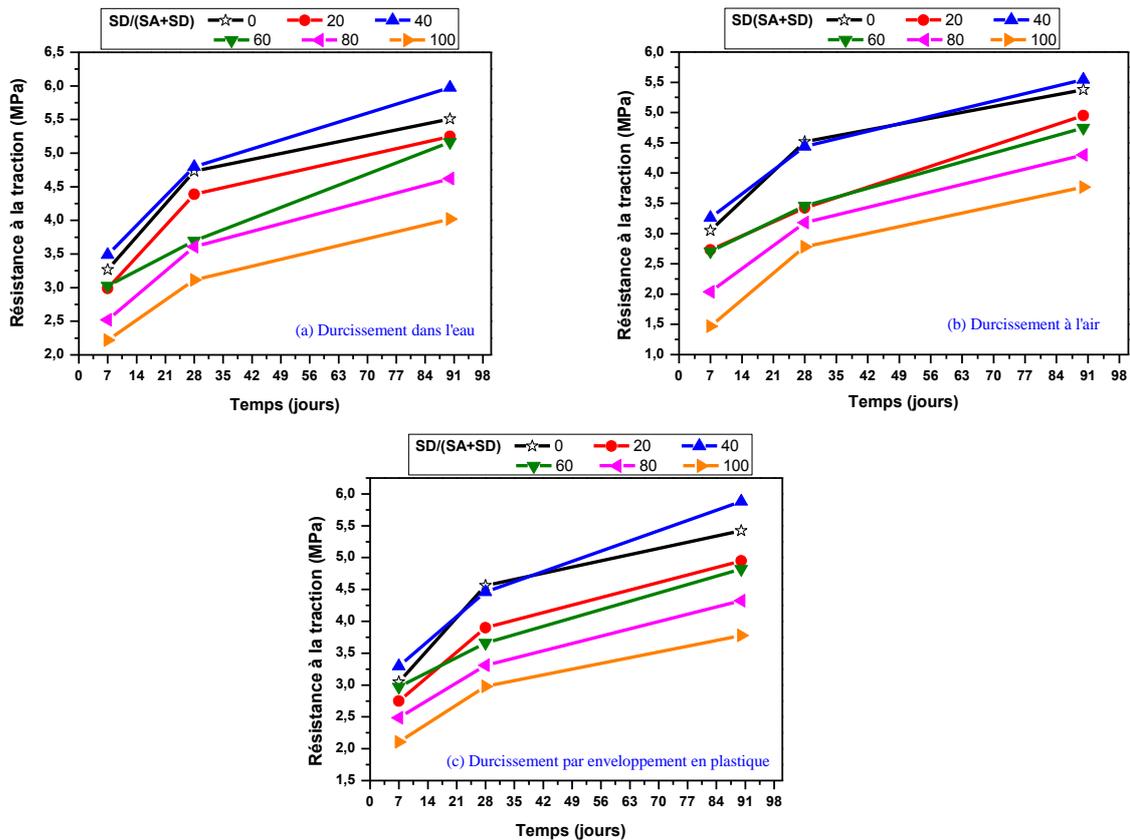


Figure IV.26. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire SA-SD

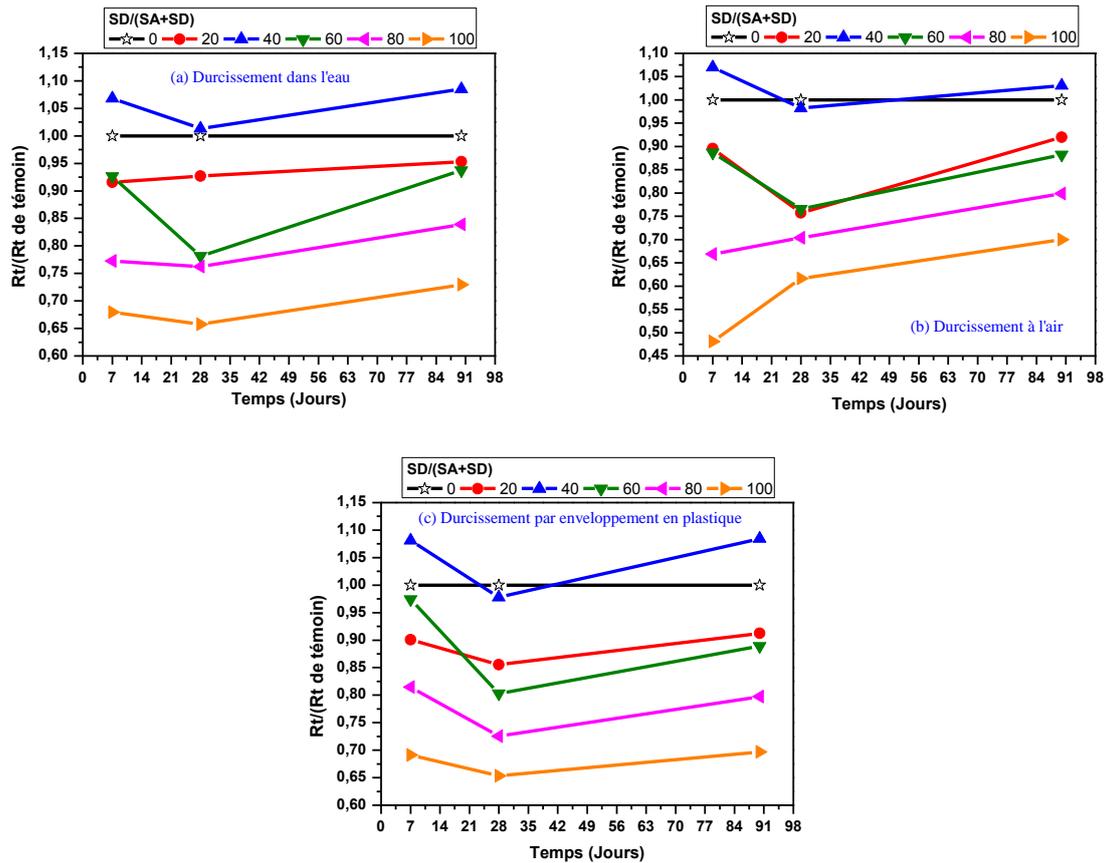


Figure IV.27 : Variation du rapport $R_t/(R_t \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SA-SD

C. Système de mélange SC-SD

D'après la Figure IV.28, il est clair que la combinaison de 40% SD et 60% SC offre un béton autoplaçant BAP ayant une résistance à la traction supérieure ou égale à la résistance de témoin dans toutes les méthodes de durcissement. Pour les autres compositions il y a une perte de la résistance à la traction contre témoin entre 2% et 52% (Figure IV.29). Cette diminution est peut s'attribuer à la mauvaise compacité de mélange des sables induite par leur morphologie et aussi à la capacité très élevée d'absorption des deux sables SD et SC qui auront une influence négative sur la quantité de l'eau efficace. Ces résultats sont en contraire avec celles trouvées par Nécira et al. [161] qui ont confirmé que la combinaison de SD et SC augmente toujours la résistance à la traction à 28 jours. Rmili et al. [56] ont prouvé que les propriétés mécaniques, tel que la résistance à la traction, sont affectées négativement pour des teneurs en SD supérieures à 15% dans la combinaison SC-SD.

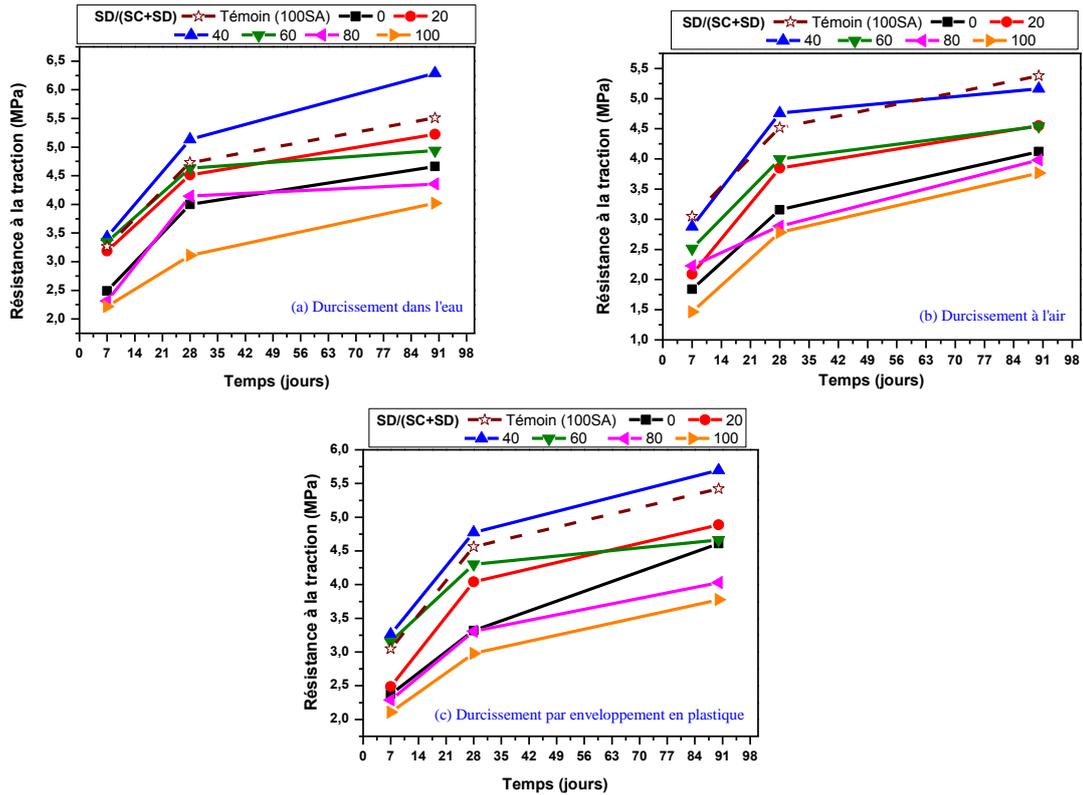


Figure IV.28. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système SC-SD

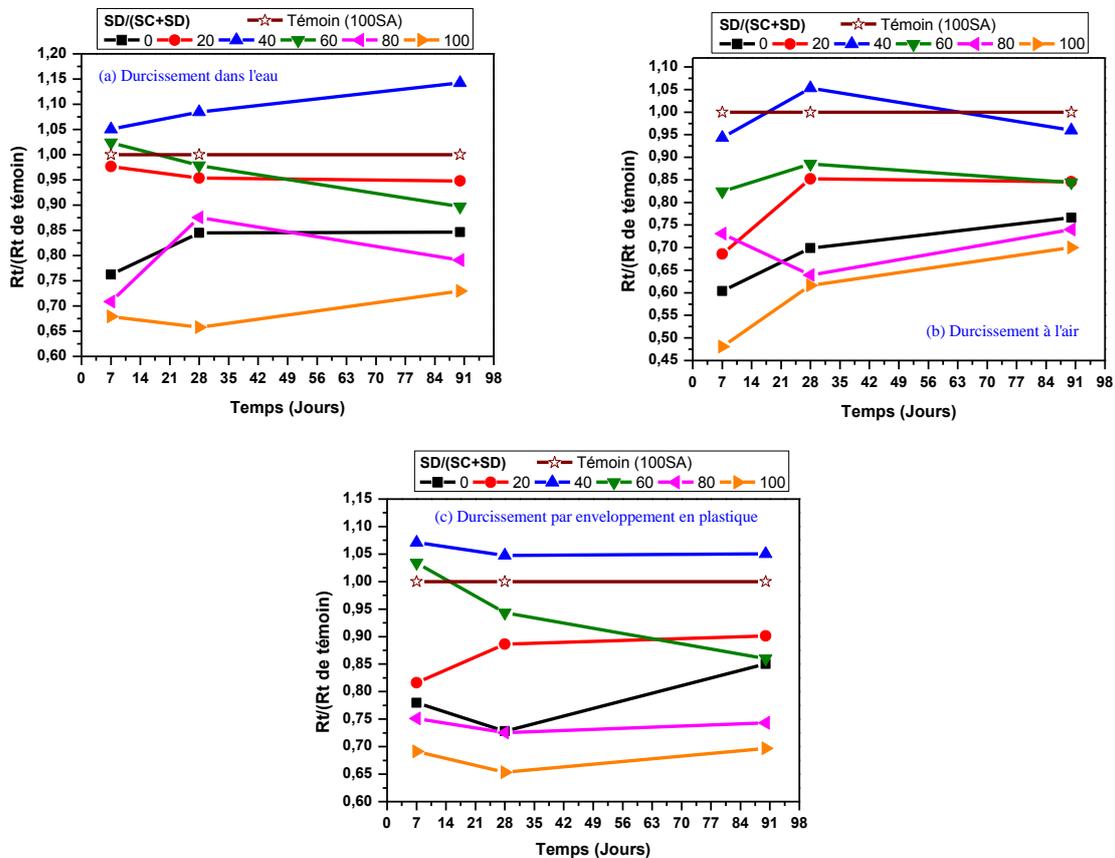


Figure IV.29 : Variation du rapport $R_t/(R_t \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système SC-SD

D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD

D'après la [Figure IV.30](#) la résistance à la traction par flexion est proportionnelle au temps. Toutes les combinaisons des sables assurent des résistances comprises entre 3MPa et 6MPa. La meilleure résistance à la traction était dans BAP constitué de la combinaison C2 (60% SA de 20% SC et de 20% SD) avec une croissance entre 0 et 32% à 7, 28 et 90 jours en comparant à celle du BAP témoin ([Figure IV.31](#)). Tandis que la basse résistance à la traction est dans le BAP avec la combinaison C7. La plupart des compositions présente une amélioration de la résistance à 7 jours dans tous les milieux de durcissement en comparant au témoin C1. Au-delà de 40% de substitution de SA par SC et SD la résistance est toujours diminuée. L'augmentation de la résistance à la traction par flexion des BAP qui possèdent 20%SC et 20% SD est probablement due, d'une part, à une très bonne liaison entre les grains de SC et la pâte cimentaire, d'où à la rugosité de la surface et l'aspérité des grains de SC qui joue un rôle favorable à une bonne adhérence mécanique puisqu'elle permet d'augmenter l'aire de contact pâte-sable [102].

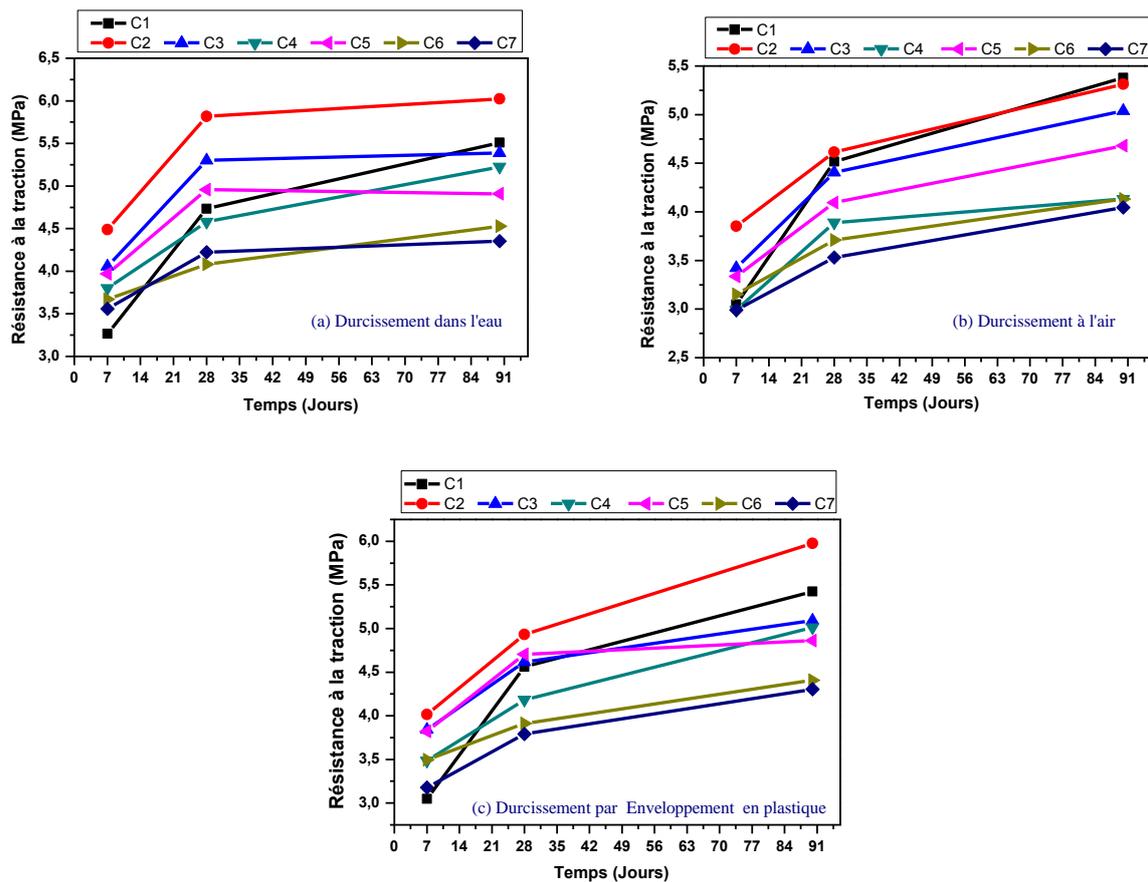


Figure IV.30. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps et fonction de régimes de durcissement du système ternaire

D'autre part, à 20% de SD et 20% SC les grains de ces derniers absorbent l'eau de remplissage dans la matrice en raison de sa grande capacité d'absorption ce qui entraîne également la migration des petits grains de ciment vers la surface de SD et SC, par conséquent l'amélioration de l'adhérence pâte-sable, la cohésion de pâte-SD est faible par rapport celle de SC due à la surface lisse des grains de SD. La diminution de la résistance à la traction des compositions contient des quantités supérieures à 20%SC et 20%SD est due à la perte de l'adhérence de l'interface pâte-sable [26,110,111]. La perte de la cohésion est peut être due à la diminution de E/L local dans cette zone qui s'accompagne par diminution des hydrates formés lors de l'hydratation de ciment ce qui entraîne l'augmentation de la porosité locale. De ce fait la résistance à la traction est diminuée [104].

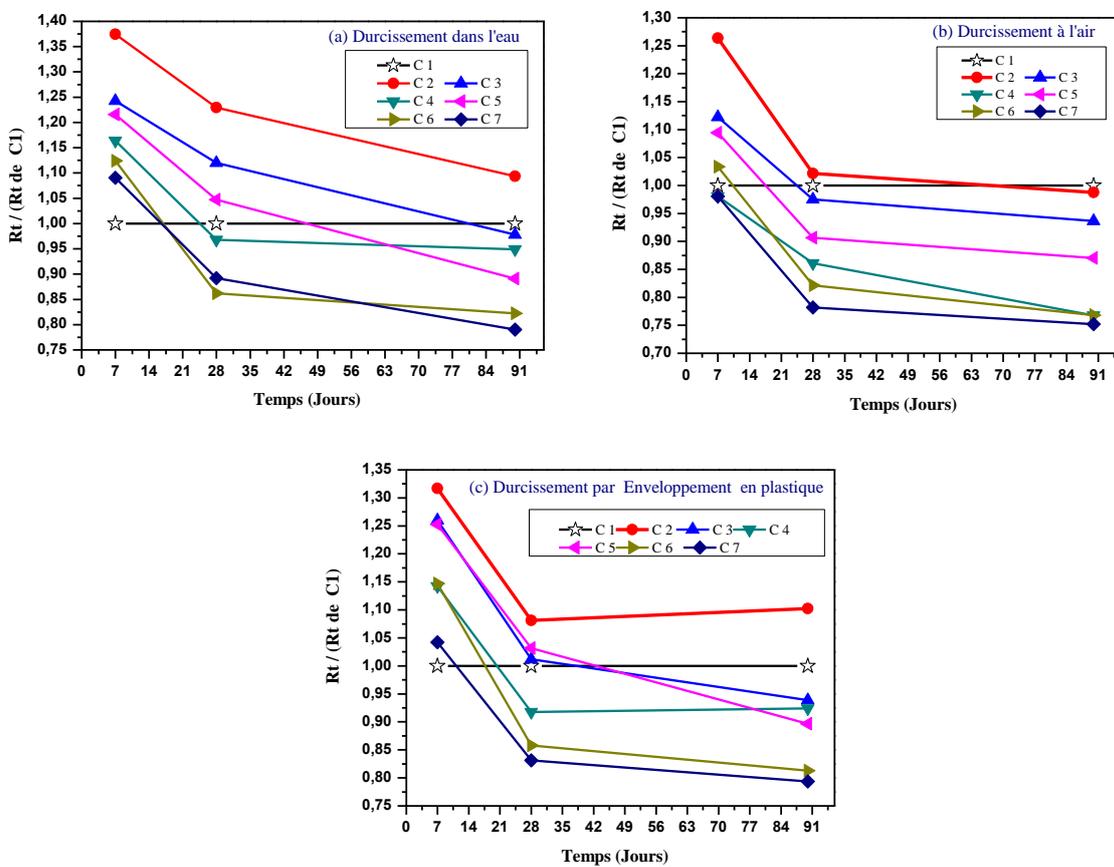


Figure IV.31. Variation du rapport $R_t/(R_t \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement du système ternaire

IV.4.2.2. Comparaison entre les régimes de durcissement

A. Système de mélange SA-SC

La Figure IV.32 et la Figure IV.33 représentent la comparaison de l'effet des régimes de durcissement sur la résistance à la traction des bétons et la variation du rapport $R_c/(R_c \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SA-SC en fonction de l'âge respectivement. On observe sur les figures que la substitution de 20% SA par SC offre toujours une meilleure résistance à la traction d'un BAP dans tous les régimes de durcissement. La deuxième remarque, c'est que la résistance à la traction à 7, 28 et 90 jours des éprouvettes exposés au durcissement dans l'eau est supérieure à ceux exposés au durcissement par enveloppement en plastique ou à l'air, indépendamment de type de béton. Ce résultat est en accord avec Yazicioglu *et al.* [146] où ils ont trouvés que les valeurs les plus élevées de la résistance à la traction des BAP sont obtenues des échantillons durcis dans l'eau suivis des échantillons scellés et puis celles durcis à l'air.

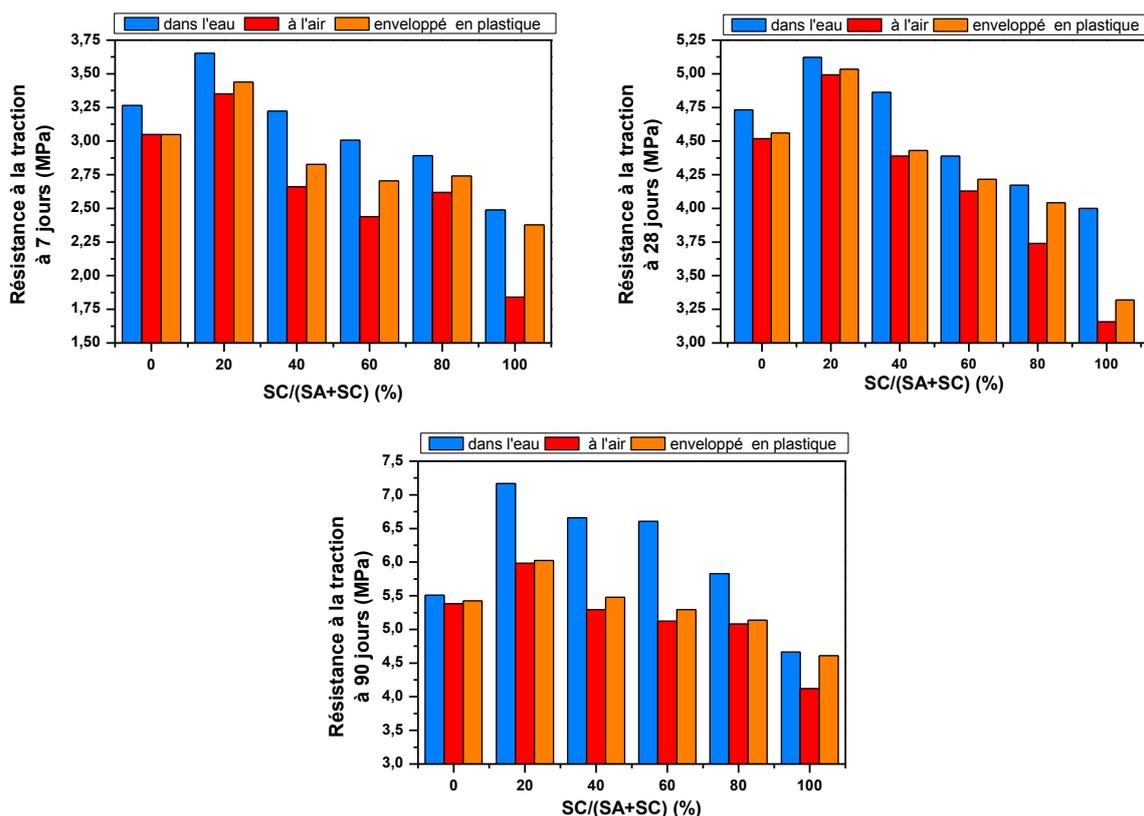


Figure IV.32. Comparaison de la résistance à la traction du système SA-SC à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

De même manière, plusieurs recherches indiquent que le durcissement dans l'eau augmente les résistances mécaniques [138,141–145]. On remarque aussi qu'à 7 et 28 jours l'ajout

de SC en quantité plus de 20% dans la composition du béton a diminué la résistance à la traction dans tous les milieux de conservation.

Au contraire, une amélioration de la résistance à la traction à 90 jours par rapport au témoin est remarquée dans le cas de durcissement dans l'eau pour les compositions contenant 40%, 60% et 80% de SC (amélioration de 6%, 20% et 21% respectivement) et qu'elle est très proche dans les deux autres modes de durcissement (des pertes entre 1.6% et 5.6%) (cf. Figure IV.33). L'amélioration est expliquée par la réaction retardée de la calcite avec les hydrates de ciment en présence de suffisamment d'humidité au cours du temps.

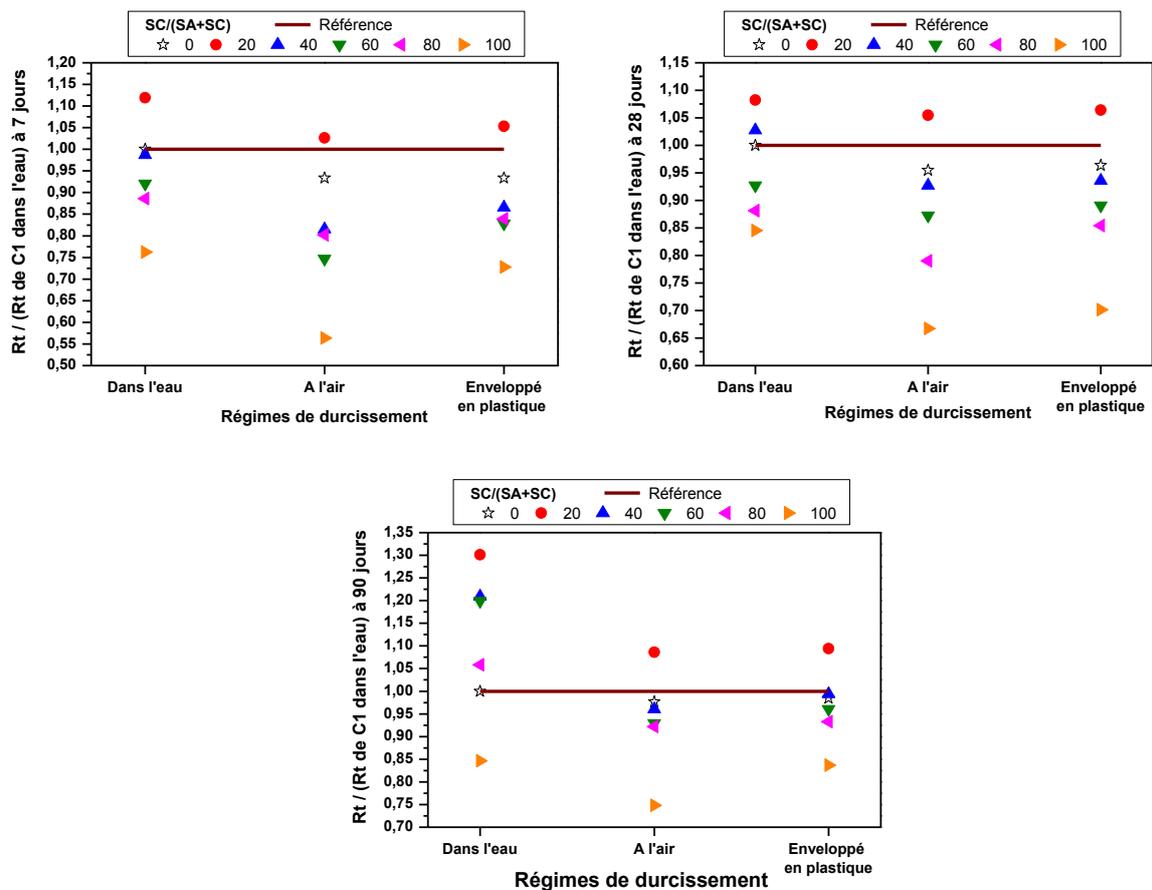


Figure IV.33. Comparaison de rapport $Rt/(Rt \text{ de } C1 \text{ dans l'eau})$ du système SA-SC à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

La comparaison de la résistance à la traction de toutes les compositions avec celle témoin exposé au durcissement dans l'eau (Figure IV.33) amène à dire que la seule composition qui présente toujours un gain de résistance à 7, 28 et 90 jours est la composition contenant 20% de SC dans chaque milieu de durcissement y a compris à le durcissement à l'air. Le gain est de 8% à 30% dans le cas de durcissement dans l'eau, de 3% à 9% dans le cas de durcissement à l'air et de 5% à 9% dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique, donc on peut dire que cette composition est la meilleure dans ce système

B. Système de mélange SA-SD

La même tendance est remarquée que celle de la résistance à la compression. La conservation dans l'eau est le milieu le plus favorable pour un bon durcissement. Il est clair sur la Figure IV.34 qu'à 7 jours la résistance à la traction est presque pareille pour les éprouvettes contenant une teneur en SD inférieure ou égale à 40% exposés à l'air ou enveloppés en plastique et se contraste si SD est supérieure à 40%. On remarque à 28 jours que la résistance à la traction des compositions contenant 40% SD se comporte de même façon que celle témoin. En général il y a une amélioration de la résistance à la traction dans tous les régimes de durcissement. Une amélioration entre 1% et 8 % dans le cas de durcissement dans l'eau et entre 3% et 7% dans le cas de durcissement à l'air et entre 8.0% et 8.5 % dans le cas de durcissement par enveloppement en plastique (sauf à 28 jours qu'il y a une perte environ 2% dans les deux derniers cas de durcissement).

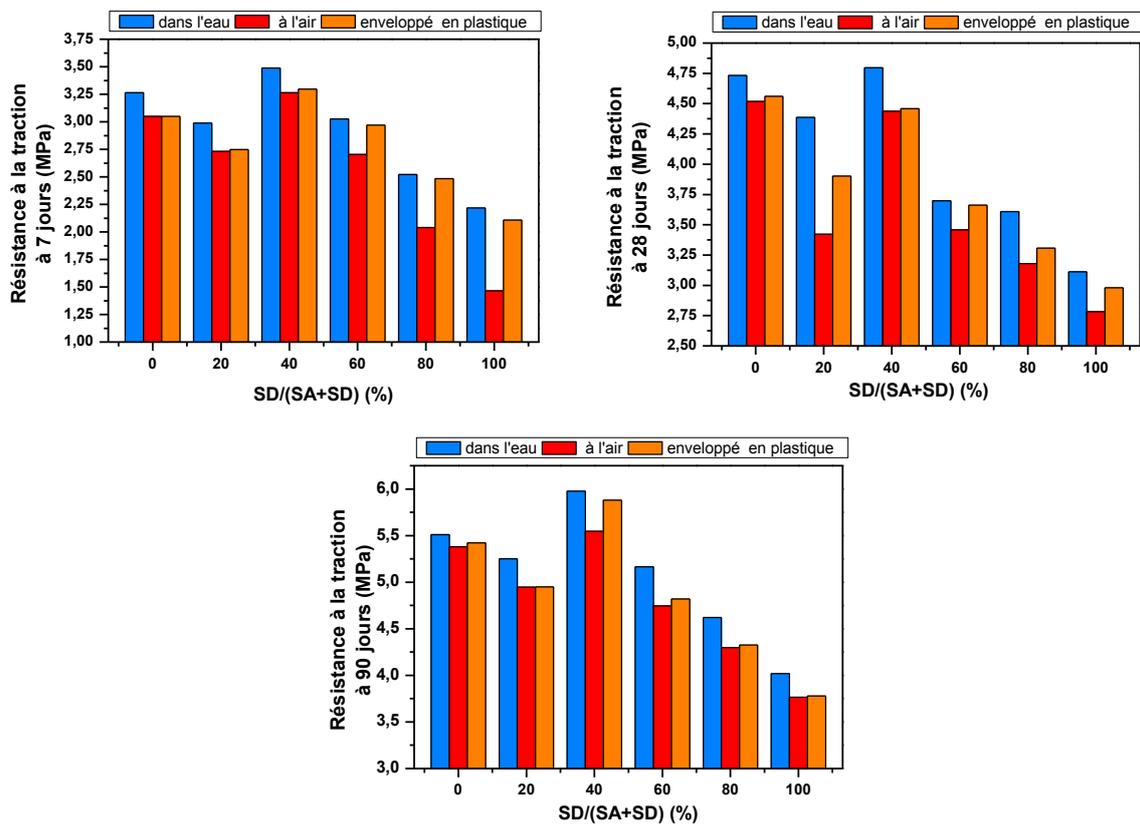


Figure IV.34. Comparaison de la résistance à la traction du système SA-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

On remarque à 90 jours que la résistance est presque identique des éprouvettes contenant 40%SD conservés dans l'eau ou enveloppés en plastique, cela est dû d'une part, à la présence d'une humidité suffisante pour que le ciment continue leur hydratation. L'enveloppement en plastique intercepte la voie de l'évaporation d'eau c'est ce qui garde les éprouvettes humides. D'autre part le film plastique maintient la chaleur d'hydratation dans le béton ce qui développe la résistance due à l'accélération des réactions de l'hydratation du ciment. La comparaison de la résistance à la traction des toutes les compositions par la composition de référence conservé dans l'eau amène à dire que la seule composition qui offre d'une résistance à la traction approche ou supérieure au témoin est celle qui contient 40% SD (cf. Figure IV.35).

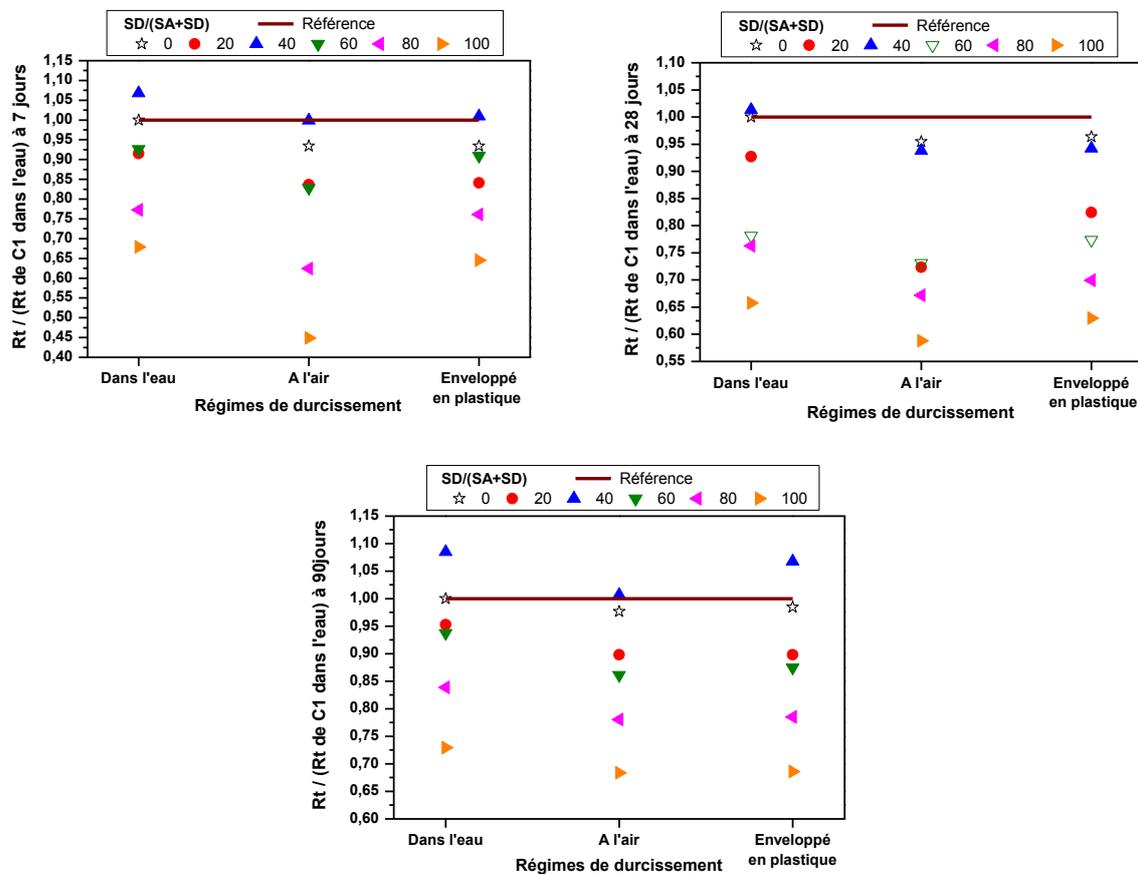


Figure IV.35. Comparaison de rapport $R_t/(R_t \text{ de C1 dans l'eau})$ du système SA-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

C. Système de mélange SC-SD

En général, la résistance à la traction des éprouvettes conservées dans l'eau ont toujours la meilleure résistance dans toutes les combinaisons de sable SC-SD et ont la plus faible résistance dans le cas de durcissement à l'air (Figure IV.36). La meilleure résistance du béton correspond à celle composé de 40% SD et 60% SC dans tous les milieux de durcissement. On remarque qu'à 7 jours la valeur de la résistance à la traction des éprouvettes enveloppées en plastique est rapprochée qu'à celles durcissent dans l'eau (sauf pour la deuxième composition où le béton contenant 20% SD). Au contraire, à 28 jours les résistances des éprouvettes conservées à l'air sont similaires à celles conservées par enveloppement en plastique, cela est dû à l'accélération de durcissement dans l'air sous l'effet de séchage précoce. Mais à 90 jours la résistance des éprouvettes conservées par enveloppement en plastique seront plus grande qu'à celles conservées à l'air, ceci est probablement dû à la présence d'une certaine humidité dans les éprouvettes à cause de l'enveloppement en film plastique qui empêche le dégagement de l'eau évaporée au cours de durcissement.

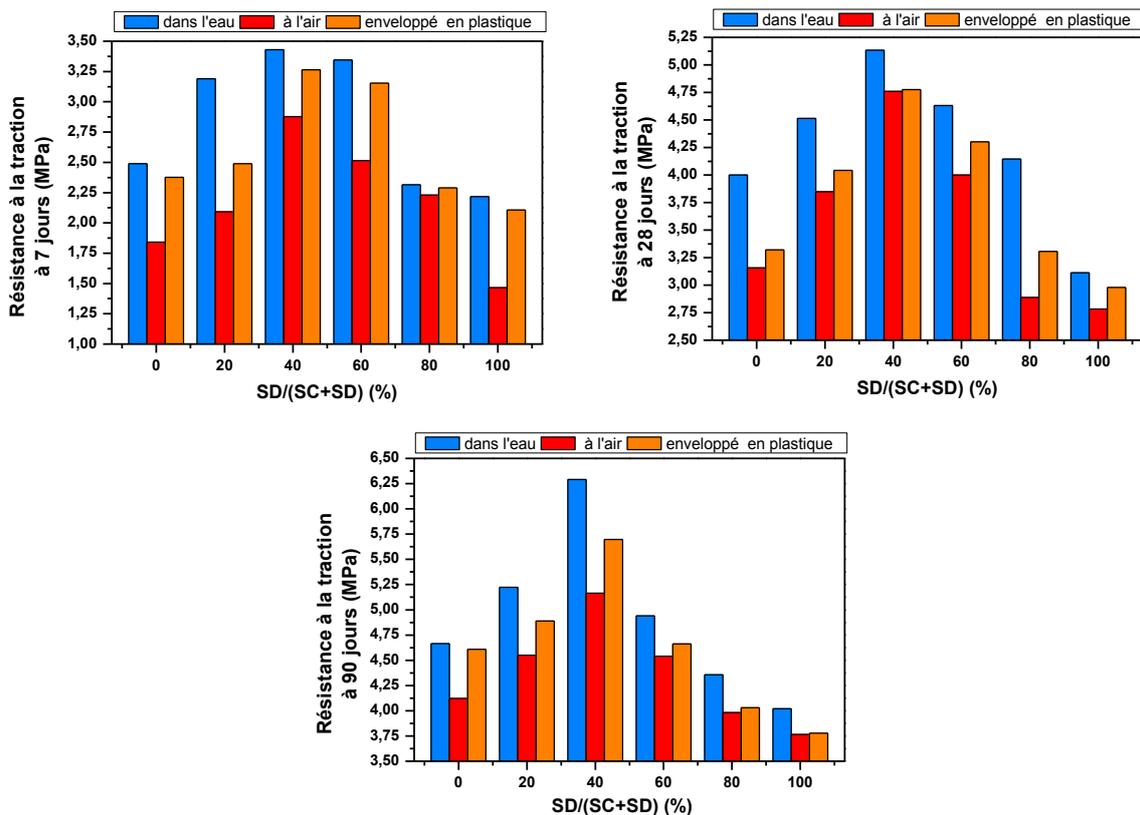


Figure IV.36. Comparaison de la résistance à la traction du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

Nous remarquons sur la [Figure IV.37](#) qui représente la variation du rapport (R_t/R_t de C1 dans l'eau) en fonction du type de durcissement que la valeur du rapport est diminuée avec l'ajout de SD de plus de 40% dans le durcissement à l'air à 7, 28 et 90 jours ce qui signifie qu'une perte de la résistance à la traction des éprouvettes contenant beaucoup de SD dans le cas de la conservation dans ce milieu (la perte est entre 5% et 55% selon le taux de SD par rapport à la référence). Les valeurs du rapport sont proches les uns aux autres dans le cas de durcissement dans l'eau ou par enveloppement en plastique (des pertes entre 5% et 35% par rapport à la référence). En conclusion, la comparaison de la valeur du rapport (R_t/R_t de C1 dans l'eau) de toutes les compositions et dans tous les modes de durcissement permet de dire que les seules éprouvettes du béton qui ont donné un gain de résistance à 7, 28 et 90 jours sont ceux qui ont été fabriqué avec la combinaison de 40% SD et 60% SC et avec leur durcissement dans l'eau ou d'enveloppée en plastique (gain de 5 à 14% dans le cas de conservation l'eau et de 0 à 3% dans le cas d'enveloppement en plastique).

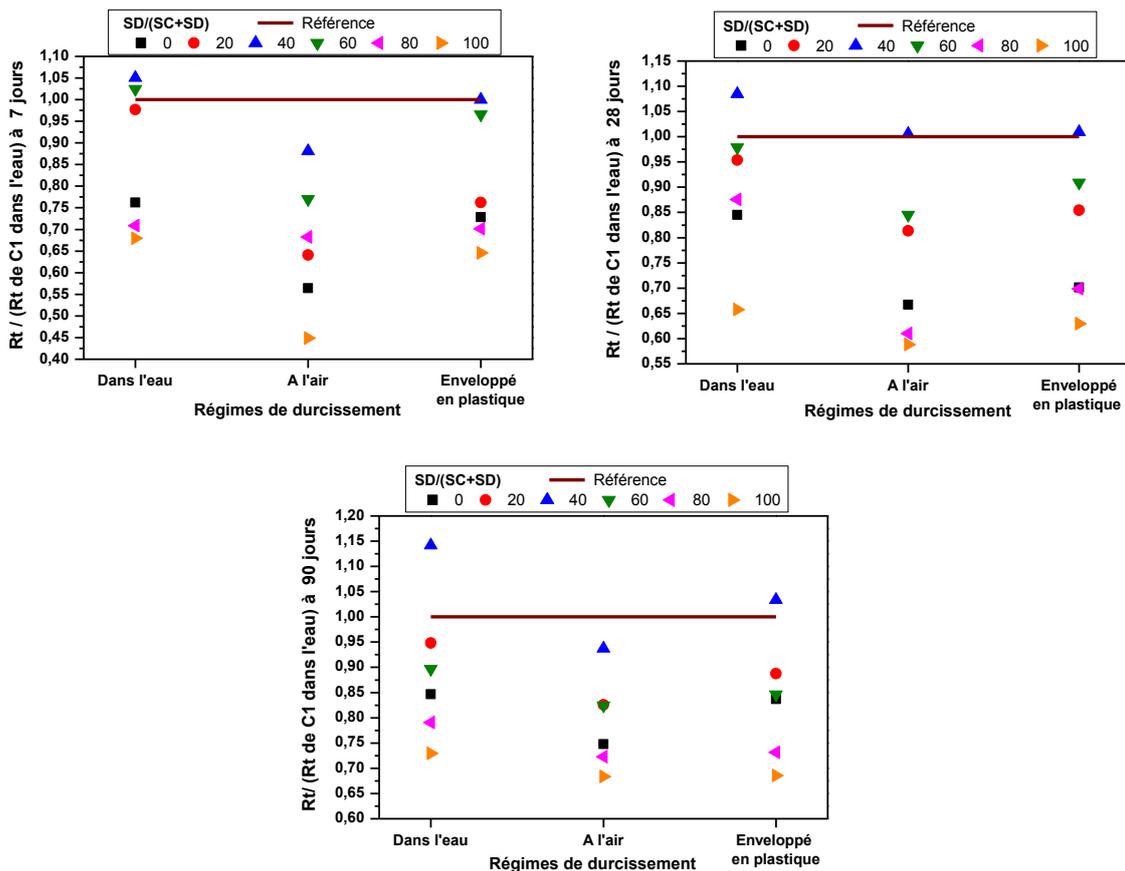


Figure IV.37. Comparaison de rapport $R_t/(R_t$ de C1 dans l'eau) du système SC-SD à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

D. Système de mélange ternaire SA-SC-SD :

Les résultats présentés dans la [Figure IV.38](#) montrent que les résistances à la traction des différentes compositions du BAP sont en très bon accord avec les résultats de la résistance à la compression ce qui est en accord avec les travaux de [26,161]. Les résultats montrent aussi que le durcissement dans l'eau est toujours le milieu le plus bénéfique pour que les résistances soient meilleures à 7, 28 et 90 jours. Tous les milieux de durcissement permettent d'obtenir un gain de résistance à 7 jours pour la plupart des bétons en comparant au témoin C1 ([Figure IV.39](#)). Mais à 28 et 90 jours, la différence de la résistance était évidente dans tous les régimes de durcissement et elle diminuait progressivement avec l'augmentation en SC et SD. A 90 jours le durcissement dans l'eau et celle par enveloppement en plastique sont très similaires ce qui traduit l'effet bénéfique de recouvrement à long terme. On peut dire que le durcissement dans l'eau accélère le développement de la résistance du béton sans influencer la résistance finale. Au contraire, le durcissement dans l'air est défavorable au développement d'une bonne résistance finale.

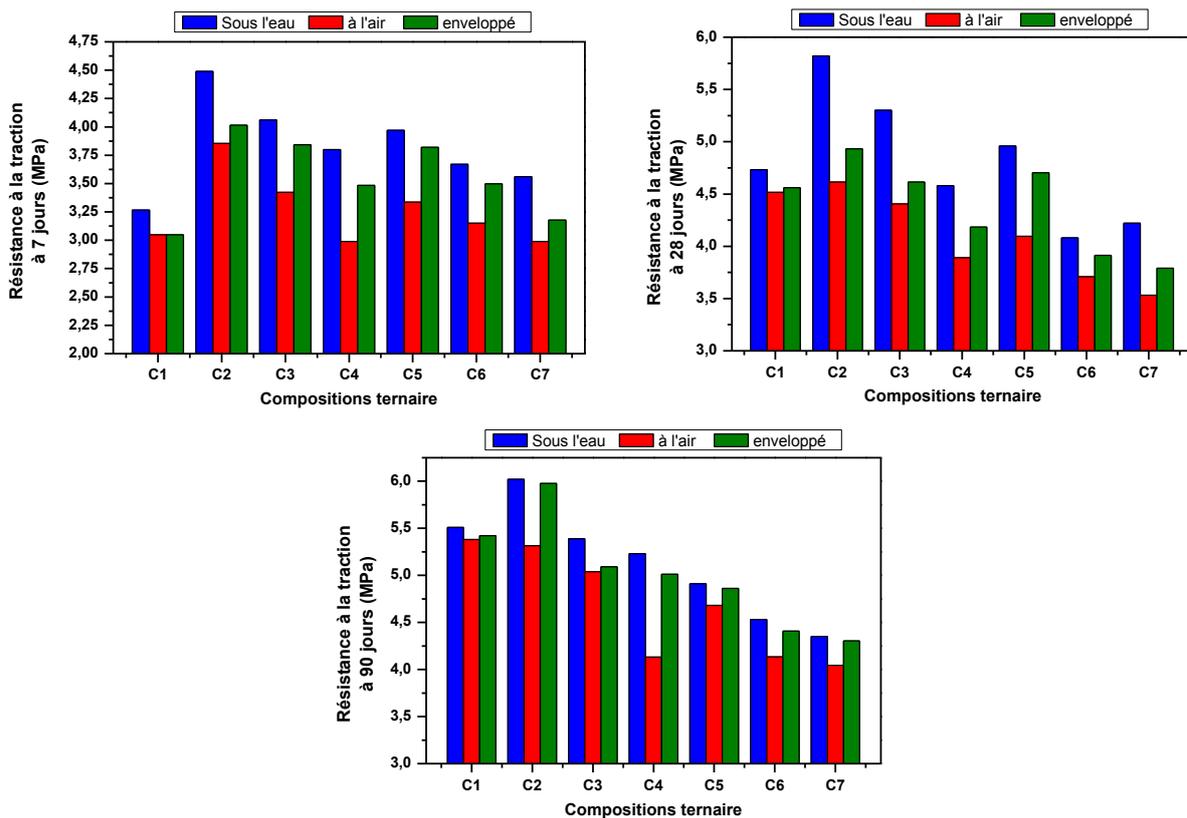


Figure IV.38. Comparaison de la résistance à la traction du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

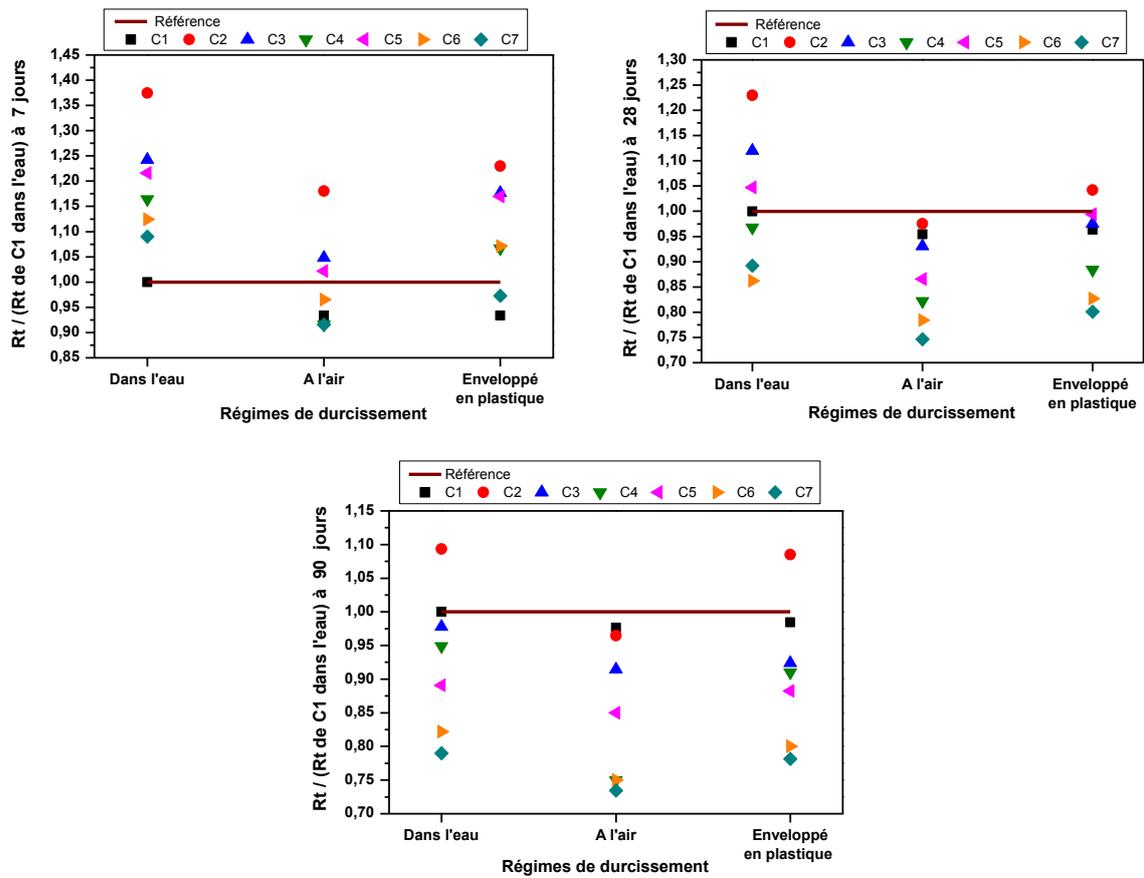


Figure IV.39. Comparaison de rapport $R_t / (R_t \text{ de } C1 \text{ dans l'eau})$ du système ternaire à 7, 28 et 90 jours en fonction des différents régimes de durcissement

IV.5. Étude de la durabilité

IV.5.1. Absorption capillaire (la sorptivité)

L'absorption capillaire est caractérisée par le coefficient de sorptivité (S) tel que:

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad \text{Équation IV-1}$$

Avec :

S : le coefficient de sorptivité en $(\text{cm}/\text{sec}^{0,5})$;

Q : le volume de l'eau absorbée en cm^3 ;

A : la surface en contact avec l'eau en cm^2 ;

t : le temps écoulé en secondes ;

La mesure de S est effectuée sur les cinq compositions qui contiennent les mélanges de sables suivants : 100 SA (témoin), 60SA+40SD, 80SA+20SC, 60SC+40SD et 60SA+20SC+20SD

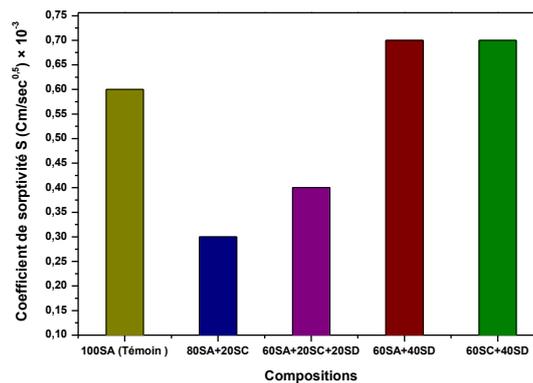


Figure IV.40. Coefficient de sorptivité S des différents BAP à 28 jours

À partir de la [Figure IV.40](#) ci-dessus, on remarque que le coefficient de sorptivité des deux BAP contenant les combinaisons (60SA+40SD) et (60SC+40SD) est supérieur à celui du témoin tandis qu'il était significativement plus faible pour les BAP contenant des combinaisons (80 SA+20 SC) et (60 SA+20 SC+20 SD). Cette différence est traduite par la diminution de la porosité capillaire par l'utilisation des deux mélanges derniers due à une modification de la structure des pores résultante de l'occupation des vides par les particules fines du sable SC et/ou SD, ce qui empêche la connectivité entre ces pores. En plus, la formation de monocarboaluminate issu de la réaction pouzzolanique entre les fillers calcaires du SC et les aluminates de ciment peut colmater les pores capillaires, ce qui influence positivement sur les performances mécaniques et la durabilité du BAP [219]. La [Figure IV.41](#) suivante représente la corrélation entre la sorptivité et la résistance à la compression à 28 jours. On remarque sur la

figure qu'il y a une relation inverse entre les deux, plus le coefficient de sorptivité est grand la résistance à la compression est diminuée. Ceci a également été observé par plusieurs chercheurs [77,220,221]. Au contraire, Leung et al. [222] ont conclu qu'il n'y a pas de corrélation évidente entre la sorptivité et la résistance à 28 jours et que le comportement de l'absorption d'eau de surface du BAP et sa résistance à la compression dépendent d'autres facteurs tels que l'utilisation des ajouts minéraux réactifs et l'environnement de cure.

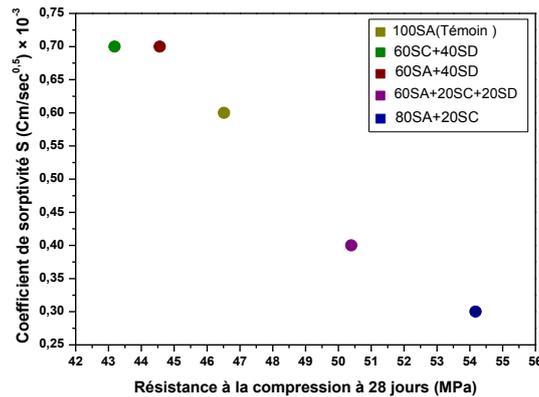


Figure IV.41. Corrélation entre le coefficient de sorptivité et la résistance à la compression à 28 jours des différents BAP

IV.5.2. Résistance à l'attaque chimique H₂SO₄ et HCl

IV.5.2.1. Conservation dans l'eau distillée

L'histogramme présenté dans la Figure IV.42 montre la variation de la masse en (%) mesurée à la fin de chaque période d'immersion de différents BAP conservé dans l'eau distillée.

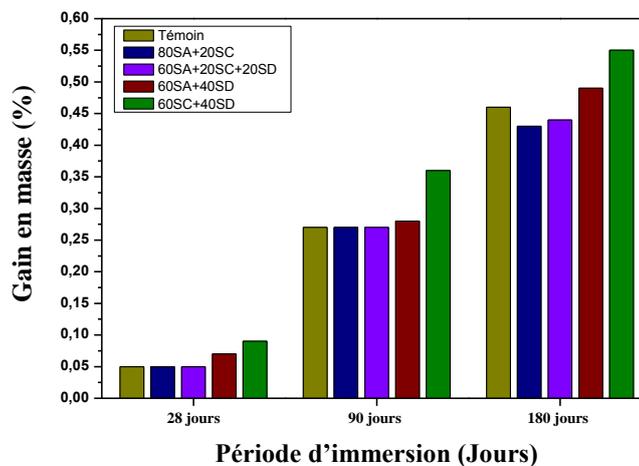


Figure IV.42. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans d'eau

Le graphique montre qu'il y a une augmentation progressive de la masse des BAP pendant toutes les périodes, c'est-à-dire que tous les BAP ont subi des gains de masse. Le gain en masse est varié entre 0.43% à 0.55% à 180 jours d'immersion. Les gains en masse enregistrés sont dus à l'hydratation continue des grains de ciment grâce à la présence de l'eau qui contribue à la formation de nouveau CSH rendant la structure du béton plus dense [165,223]. De plus, on peut constater que les deux BAP contenant les combinaisons (80SA+20SC) et (60SA+20SC+20SD) ayant le moins gain de masse à 180 jours, cette différence peut être expliquée par la grande compacité de ces deux bétons par rapport aux autres. Cette soustraction peut également justifier par le coefficient de sorptivité capillaire faible de ces deux bétons, c'est-à-dire ce sont les compositions les moins poreuses ce qui empêche l'infiltration de l'eau.

IV.5.2.2. Comportement des BAP vis-à-vis du milieu HCl

A. *L'examen visuel*

Les photos de [Figure IV.43](#) montrent clairement la dégradation des BAP par l'acide chlorhydrique HCl. On observe sur les photos que l'état de la surface de l'échantillon est superficiellement détérioré et l'attaque chimique était moins sévère. La lixiviation de pâte de ciment avait à des profondeurs moins importantes [166]. À chaque échéance et après l'extraction des éprouvettes de l'acide, nous avons remarqué des cristaux transparents sphériques arrondies attachés sur la surface de l'éprouvette. A partir les photos, on peut constater aussi que l'acide H_2SO_4 est très agressif par rapport à l'HCl.

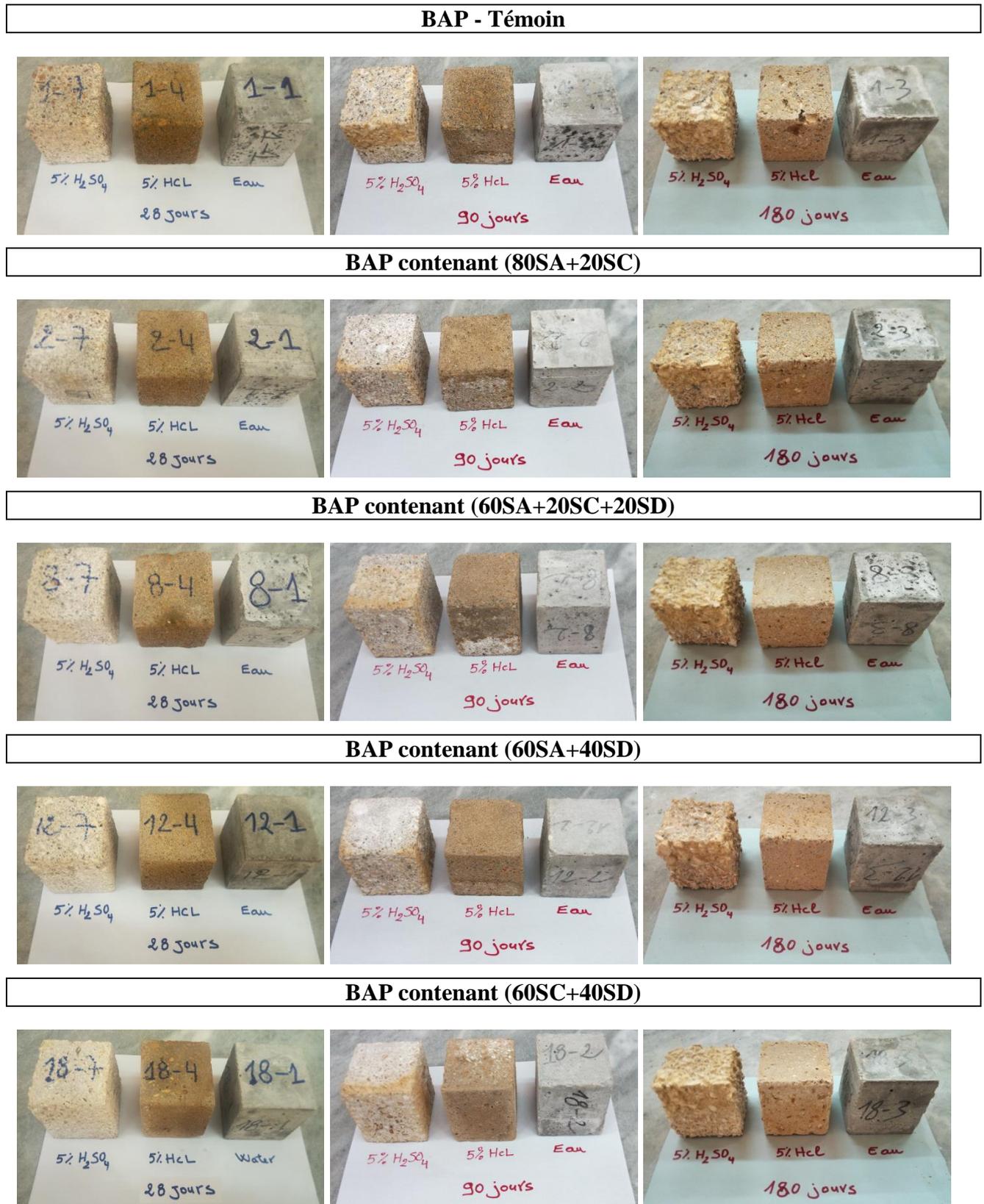


Figure IV.43. Comparaison visuelle des éprouvettes exposées aux différents milieux

B. Effet de la dégradation du HCl sur la perte de masse

L'histogramme présenté dans la [Figure IV.44](#) montre la variation de la masse en (%) mesurée à la fin de chaque période d'immersion de différents BAP conservé dans la solution HCl concentré à 5%.

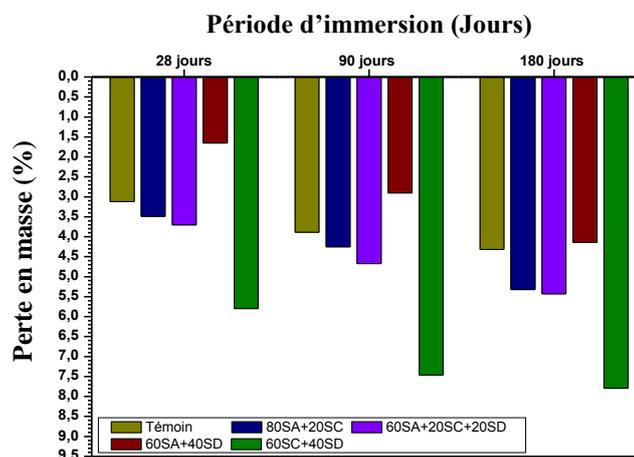


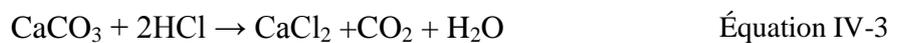
Figure IV.44. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5% HCl

Contrairement à la conservation dans l'eau, il est clair sur la [Figure IV.44](#) qu'il existe des pertes en masse du BAP exposé à la solution HCl dans toutes les périodes d'immersion quelle que soit la combinaison du sable. La cinétique de dégradation augmente progressivement jusqu'à 180 jours. On peut constater que la perte en masse atteint 8% à 180 jours du BAP contenant la combinaison (60SC+40SD) cela signifie qu'il est le BAP le plus susceptible à se dégrader dans toutes les périodes d'immersion et suivi de deux BAP contenant les combinaisons (80SA+20SC) et (60SA+20SC+20SD) qu'ont des pertes en masse après 180 jours d'immersion de 5.32% et 5.43% respectivement. Tandis que le BAP témoin et celui contenant la combinaison de sable (60SA+40SD) ayant une bonne résistance à l'attaque de HCl après toutes les périodes d'immersion. La perte en masse des échantillons des BAP préparés par les premières combinaisons des sables est due à deux réactions d'attaque possibles. La première, l'acide chlorhydrique HCl a réagi avec la portlandite libérée au cours de l'hydratation des silicates de ciment pour former un sel de chlorure de calcium CaCl_2 fortement soluble dans l'eau selon la réaction suivante :



Les sels chlorures de calcium CaCl_2 sont facilement décollés de la pâte de ciment, ce qui fragilise sa structure totale et provoque une perte en masse. De ce fait, la pâte de ciment devient moins cohésive[48,165,166].

La deuxième attaque peut être produite de la réaction entre l'acide HCl et les carbonates CaCO_3 des matériaux calcaires à savoir les fillers et le sable SC. Le calcaire est un sel, en solution aqueuse (dans l'eau), il peut se dissocier et former des ions $[\text{Ca}^{++}]$ et $[\text{CO}_3^{-}]$. Mais comme le calcaire est très peu soluble, cette réaction n'a pratiquement pas lieu, par contre il se dissout facilement en présence d'acide. Le gaz carbonique CO_2 contenus dans l'air réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique H_2CO_3 . Celui-ci réagit avec le carbonate insoluble pour former l'ion hydrogénocarbonate ou bicarbonate $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ qui est soluble dans l'eau. Selon les réactions suivantes :



À la base de ces réactions, le BAP qui contient le sable calcaire SC ayant le plus perte en masse. Au contraire, le BAP qui contient le sable siliceux SA et SD ayant une faible dégradation cela est due à l'élément de la silice SiO_2 qui est difficile à attaquer chimiquement. En plus, la combinaison de 60SA et 40SD permet au béton de bien résister à l'infiltration de l'acide grâce à sa structure plus compacte par rapport à celui de témoin.

C. Effet de la dégradation du HCl sur la force à la rupture en compression

La perte de la résistance à la compression due à l'attaque de l'acide HCl est très difficile à déterminer car la surface de l'éprouvette en contact avec le plateau de la machine est très altérée et ne permet pas d'avoir une section plane bien définie ce qui rend difficile l'analyse des résultats de résistances. Pour cette raison, on s'intéresse ici à présenter uniquement l'effet de la dégradation de l'acide sur la perte de la force à la rupture en compression.

Les résultats de perte de la force après 28, 90 et 180 jours d'immersion dans HCl sont regroupés dans le [Tableau IV.1](#).

Tableau IV.1. Perte de la force de rupture à la compression dans 5% HCl

	Perte de la force de rupture à la compression (%)		
	28 jours d'immersion	90 jours d'immersion	180 jours d'immersion
Témoin	6,96	11,74	23,63
80SA+20SC	8,22	13,15	33,92
60SA+20SC+20SD	7,55	11,46	17,65
60SA+40SD	4,21	9,36	15,45
60SC+40SD	10,12	15,43	37,25

D'après le tableau précédent, la perte en charge à la rupture est augmentée proportionnellement avec la durée d'immersion pour tous les BAP étudiés. La diminution de la capacité portante de différents BAP étudiés exposés à une solution d'acide chlorhydrique est due à l'attaque de la pâte de ciment par l'acide conduisant à la formation de chlorures de calcium solubles dans l'eau développant une porosité élevée ce qui entraîne une diminution de la durabilité des BAP et donc de la résistance mécanique [165,224]. On constate que les BAP contenant la combinaison ternaire des trois sables SA, SC et SD et celui du 60SA+40SD ayant les moins pertes de la force à la rupture en toutes périodes d'immersion malgré ses pertes en masse importantes. La variation de la résistance des BAP dans un milieu acide dépend d'autres paramètres autres que la solution agressive telle que la compacité de mélanges de sables. La Figure IV.45 suivante représente la corrélation entre la perte de force à la rupture et la porosité du mélange de sable. D'après la figure on remarque une corrélation linéaire entre la perte de la résistance et la porosité de sable pour toutes les périodes d'immersion dans 5% HCl. Pour un mélange de sable de faible porosité la perte de la force de rupture du BAP est minimale.

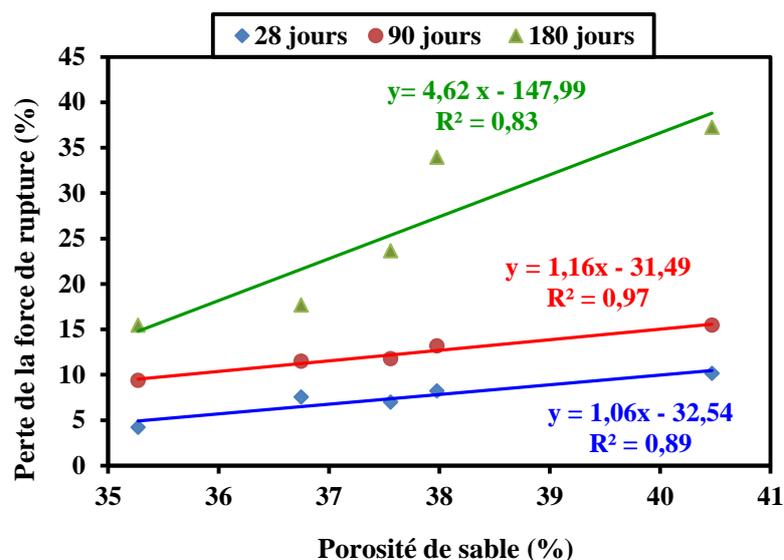


Figure IV.45. Corrélation entre la porosité de mélange de sable et la perte de la force de rupture en compression des BAP après 28, 90 et 180 jours d'exposition à 5% HCl.

IV.5.2.3. Comportement des BAP vis-à-vis du milieu H₂SO₄

A. L'examen visuel

L'immersion des éprouvettes du BAP dans l'acide H₂SO₄ a entraîné des dommages appréciables du béton et une lixiviation en ciment laissant les granulats grossiers visibles comme indiqué dans les photos de la Figure IV.43. Cet état de

dégradation a été observé aussi par plusieurs chercheurs [48,166,167]. À chaque échéance et après l'extraction des éprouvettes de l'acide, nous avons remarqué une couche de sous-produit blanchâtre couvrant la surface extérieure de l'échantillon ce qui est remarqué aussi par Samimi [48] et Omrane et *al.*[167]. Cette couche est facilement lavable à l'eau. Les photos de la Figure IV.43 ont été prises après lavage, elles montrent clairement l'état de dégradation après l'attaque de l'acide sulfurique.

B. Effet de la dégradation du H_2SO_4 sur la perte en masse

L'histogramme présenté dans la Figure IV.46 montre la variation de la masse en (%) mesurée à la fin de chaque période d'immersion de différents BAP conservé dans la solution H_2SO_4 concentré à 5%.

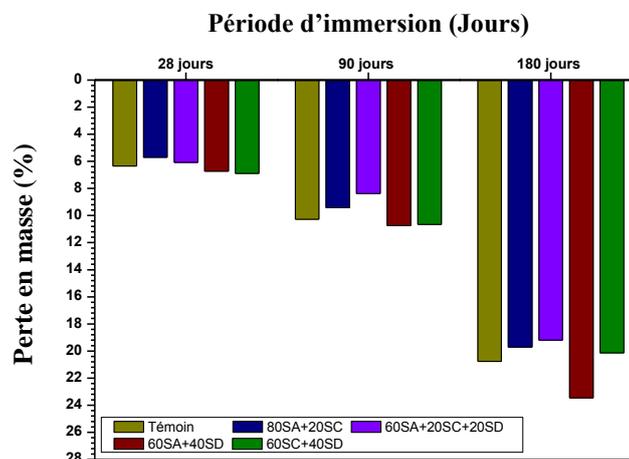
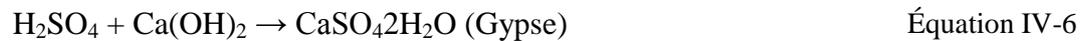


Figure IV.46. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5% H_2SO_4

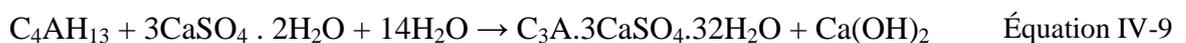
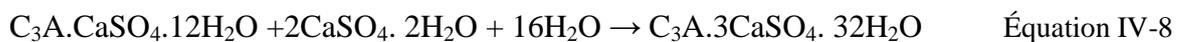
Contrairement à la solution HCl, l'effet de l'acide sulfurique H_2SO_4 est très agressif. On observe que la cinétique de dégradation augmente progressivement avec le temps jusqu'à 180 jours. La perte en masse de toutes les compositions après 28 jours d'immersion était entre 5.50% et 6.90%, et entre 8% et 10.8% après 90 jours et entre 19% et 23.50% après 180 jours. Le mécanisme de l'attaque sulfurique est expliqué par une série de réactions physico-chimique qui se développe depuis le premier contact avec l'acide. Après le dissous de l'acide dans l'eau, les ions de sulfates $[SO_4^{2-}]$ pénètrent dans la matrice et réagissent avec les carbonates $CaCO_3$ des matières calcaires et avec les constituants hydratés du ciment, principalement avec la portlandite $Ca(OH)_2$ pour former le gypse secondaire suivant les réactions (Équation IV-5 et Équation IV-6). De même manière, Bassouni et *al.* [164] ont confirmé que le filler calcaire de grande finesse a

accélération le taux de perte de masse des échantillons du BAP immergés dans le milieu acide extrêmement agressif:



La formation de gypse secondaire en milieu sursaturé en ions $[\text{SO}_4^{--}]$ et $[\text{Ca}^{++}]$ peut provoquer une pression interne qui conduit à l'augmentation du volume de l'éprouvette [225]. Ce processus de cristallisation du gypse fait éclater le béton essentiellement à la surface.

D'autres réactions au sein du béton peuvent se produire entre les aluminates de ciment hydratés, le C₃A résiduel et l'acide sulfurique. Lorsque la concentration en ions $[\text{SO}_4^{--}]$ dans la solution interstitielle est augmentée, le monosulfoaluminate (C₃A.CaSO₄.12H₂O), le C₄AH₁₃ et le C₃A résiduel ont transformé en ettringite secondaire (C₃A.3CaSO₄.32H₂O) mal cristallisé par un processus de dissolution-précipitation suivant les équations (Équation IV-7, Équation IV-8 et Équation IV-9). La croissance des aiguilles de l'ettringite secondaire dans un milieu durci et confiné peut générer une expansion très localisée provoquant fissurations du béton [223,226,227].



La comparaison de la dégradation entre les différents BAP amène à dire que l'utilisation de la combinaison 80SA+20SC ou 60SA+20SC+20SD dans le BAP à participer à une amélioration significative de la résistance à l'attaque sulfurique par 1% et 1.56% respectivement. L'amélioration de la résistance aux sulfates est probablement due à la diminution du volume poreux et ainsi à la faible absorption capillaire de ces deux BAP grâce à l'augmentation de la compacité totale.

C. Effet de la dégradation de H₂SO₄ sur la force à la rupture en compression

Les résultats de la perte de la force à la rupture en compression en fonction de l'âge d'immersion dans l'acide sulfurique sont représentés dans le [Tableau IV.2](#)

Tableau IV.2. Perte de la force de rupture à la compression dans 5% H₂SO₄

	Perte de la force de rupture à la compression (%)		
	28 jours d'immersion	90 jours d'immersion	180 jours d'immersion
Témoin	13,29	39,58	59,6
80SA+20SC	16,79	46,84	55,52

60SA+20SC+20SD	10,6	41,87	52,3
60SA+40SD	10,51	38,29	49,03
60SC+40SD	28,87	51,12	64,26

D'après le tableau, l'augmentation de l'âge de l'immersion dans H_2SO_4 entraîne une diminution de capacité portante aux efforts de compression de tous les BAP. La diminution de la capacité portante des échantillons immergés dans la solution H_2SO_4 est due à l'altération sévère de la surface des éprouvettes ce qui cause la séparation du gravier de la pâte cimentaire et qui crée des fissures au sein du béton. De ce fait, la section de l'éprouvette exposée à la charge n'est pas plane ce qui réduit donc sa capacité de résister aux efforts de compression. On remarque sur le tableau qu'après une période d'immersion de 180 jours la perte de la force à la rupture est très importante environ de 64% pour le BAP contenant la combinaison 60SC+40SD. Tandis qu'elle est de 49% pour le BAP contenant la combinaison 60SA+40SD. Cette différence peut s'attribuer à la porosité de mélanges de sables. La Figure IV.47 suivante représente la corrélation entre la perte de la force à la rupture et la porosité de sable. D'après la figure, il est bien clair qu'il existe une relation linéaire entre la porosité de sable et la perte de la force à la rupture en compression. En général, la perte de la force à la rupture en compression des BAP immergés dans une solution d'acide sulfurique dépend de l'état de surface dégradée de l'éprouvette et dépend aussi de la compacité de mélange de sable utilisé.

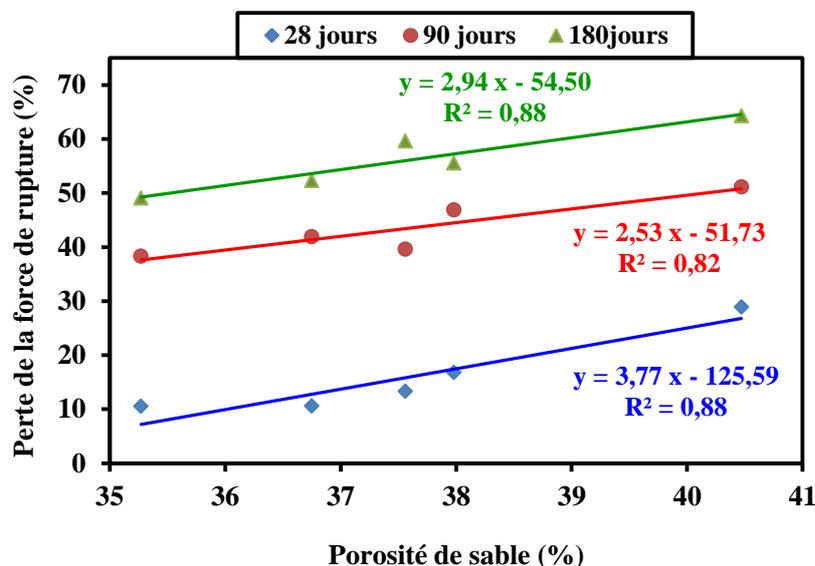


Figure IV.47. Corrélation entre la porosité de mélange de sable et la perte de la force de rupture en compression des BAP après 28, 90 et 180 jours d'exposition à 5% H_2SO_4 .

IV.6. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'analyser les résultats de l'effet combiné de la combinaison binaire et ternaire des sables SA, SC et SD et du régime de durcissement sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de la durabilité vis-à-vis de l'attaque des acide HCl et H₂SO₄ sur le béton autoplaçant.

Sur la base des résultats obtenus, les principales conclusions peuvent être énoncées comme suit:

Concernant les mélanges de sable :

- La porosité de mélange binaire SA-SC et ternaire est directement proportionnelle à la quantité de SC, ce qui traduit l'effet négatif de SC sur la compacité de mélange.
- Dans le système SA-SD et SC-SD et ternaire, la porosité de sable est diminuée avec l'augmentation de la teneur en SD jusqu'à 40%, puis elle a augmenté avec la teneur en SD.

Concernant les propriétés rhéologiques du BAP :

- En systèmes binaires et ternaires des mélanges de sable, l'étalement est inversement proportionnel à la porosité de mélange de SA, SC et SD, L'optimisation de la compacité du BAP par la combinaison de divers types de sables conduit à la réduction de la pâte cimentaire et le volume d'eau nécessaire au mouillage de la matrice.
- Dans le système binaire SA-SC, l'étalement et le taux de remplissage sont diminués linéairement avec la teneur en SC et se comporte comme un béton ordinaire pour plus de 40% de SC. À 20% de SC la viscosité apparente T₅₀₀ est égale à 4s ce qui considère comme valeur optimale dans ce système.
- Dans le système SA-SD, l'étalement, la viscosité apparente et le taux de remplissage dans la boîte-L sont améliorés avec l'augmentation de la teneur en SD jusqu'à un optimum de 40%, puis ils diminuent pour des teneurs supérieures.
- Dans le système SC-SD, une seule combinaison qui respecte le critère d'étalement (étalement supérieur à 55 cm) concerne la composition de 60% SC et 40% SD, mais elle ne respecte pas le critère de la viscosité apparente T₅₀₀. Le taux de remplissage dans la boîte-L n'atteint jamais 50%.
- Pour les mélanges ternaires, l'étalement de toutes les compositions est compris entre 55 et 85 cm, qui respectent le critère d'étalement selon la norme européenne NF EN 12350-8. L'étalement, la viscosité apparente et le taux de remplissage dans la boîte-L sont

améliorés lorsque la substitution de SA par SC + SD est inférieure ou égale à 40% puis ils diminuent pour des teneurs supérieures à 40%.

- Toutes les compositions présentent une stabilité suffisante et répondent à l'exigence d'un BAP ($SI \leq 15\%$).
- La résistance à la ségrégation est variée proportionnellement avec la quantité de SC et/ou SD, lorsque le taux de SC et/ou SD augmenté dans le mélange la résistance à la ségrégation est améliorée.

Concernant les propriétés mécaniques :

- Dans le système SA-SC, la substitution de SA par 20% SC offre toujours une amélioration de la résistance à la compression et à la traction contre témoin, au-delà de 20% SC la résistance à la compression et à la traction sont affectées négativement.
- L'optimum de la résistance à la compression et à la traction dans le cas de la substitution de SA par SD est de 40%, mais elle est toujours inférieure à celle témoin.
- Le mélange entre 40%SD et 60% SC permet d'obtenir un BAP ayant des bonnes résistances par rapport à celle 100%SC mais inférieure à la composition de référence.
- Dans le système ternaire, le BAP contenant la combinaison de sable (60SA-20SC-20SD) offrant la meilleure résistance à la compression et à la traction en toutes périodes. Les résultats ont montré qu'au-delà de 40% du SD dans le système ternaire, la résistance à la compression et à la traction sont très affectées.
- L'utilisation du sable ternaire C2 (60SA-20SC-20SD) contribue également à l'amélioration de la compacité du SCC.
- L'amélioration des résistances du BAP en cas d'utilisation de SC est due à sa nature calcaire; à la forme anguleuse des grains et à la formation d'un lien intime entre (grains de calcaire - pâte de ciment).
- La perte de résistance des compositions contenant une quantité importante de SD est due à la forme sphérique arrondie des grains, au diamètre uniforme des particules de SD et à la capacité d'absorption d'eau de ces dernières.

✚ Concernant L'effet des régimes de durcissement :

- L'évolution de la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours de tous bétons se comporte de même façon en cas de durcissement dans l'eau ou par enveloppement en plastique.
- la résistance à la compression des éprouvettes durcies à l'air ou par enveloppement en plastique est très similaire pour les différentes teneurs en SD
- La résistance à la compression est diminuée avec la combinaison de SC et SD et aussi qu'aux différents milieux de durcissement la résistance est toujours perdue par rapport à la référence.
- Dans le cas de durcissement à l'air, la différence de la résistance est due à la quantité de SD ou de SC présente dans le béton.
- Quelles que soient les combinaisons binaire ou ternaire des sables SA, SC et SD la résistance à la compression et la résistance à la traction dans le cas de durcissement à l'air libre est toujours le plus faible par rapport aux autres.
- Le développement d'une bonne résistance à la compression dans l'eau ou par enveloppement dans une feuille en plastique est attribué à une humidité suffisante maintenue de manière à conserver la bonne hydratation du ciment qui entraîne le colmatage des pores capillaires et le renforcement des liens intergranulaires des BAP à tous les âges quelles que soient les combinaisons des sables.
- Les durcissements dans l'eau ou par enveloppement en plastique sont des milieux favorables du BAP pour continuer l'évolution de sa résistance en fournissant suffisamment d'humidité pour que le ciment continue leur hydratation.

✚ Concernant l'effet de l'attaque par 5% HCl et 5% H₂SO₄ :

- Le coefficient de sorptivité des deux BAP contenant les combinaisons (60SA+40SD) et (60SC+40SD) est supérieur à celui du témoin tandis qu'il était significativement plus faible pour les BAP contenant des combinaisons (80 SA+20 SC) et (60 SA+20 SC+20 SD)
- La combinaison de 60SA et 40SD permet au béton de bien résister à l'infiltration de l'acide grâce à sa structure plus compacte par rapport à celui de témoin.

- La perte de charge à la rupture est augmentée proportionnellement avec la durée d'immersion pour tous les BAP étudiés, c'est-à-dire la perte de la résistance à la compression.
- Les BAP contenant la combinaison ternaire des trois sables SA, SC et SD et celui du 60SA+40SD ayant les moins pertes de la force à la rupture en toutes périodes d'immersion dans 5% HCL malgré ses pertes en masse importantes.
- Une corrélation linéaire entre la perte de la résistance et la porosité de sable pour toutes les périodes d'immersion dans 5% HCl ou 5% H₂SO₄
- L'effet de l'acide sulfurique H₂SO₄ est très agressif. L'immersion des éprouvettes du BAP dans l'acide H₂SO₄ a entraîné des dommages appréciables du béton et une lixiviation en ciment laissant les granulats grossiers visibles
- L'utilisation de la combinaison 80SA+20SC ou 60SA+20SC+20SD dans le BAP à participer à une amélioration significative de la résistance à l'attaque sulfurique par 1% et 1.56% respectivement due à la diminution du volume poreux et ainsi à la faible absorption capillaire de ces deux BAP grâce à l'augmentation de la compacité totale.
- La perte de la force à la rupture est très importante environ de 64% pour le BAP contenant la combinaison 60SC+40SD. Tandis qu'elle est de 49% pour le BAP contenant la combinaison 60SA+40SD, cette différence peut s'attribuer à la porosité de mélanges de sables
- La perte de la force à la rupture en compression des BAP immergés dans une solution d'acide H₂SO₄ ou HCl dépend de l'état de surface dégradée de l'éprouvette et dépend aussi de la compacité de mélange de sable utilisé.

Conclusion générale & perspectives |

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le béton autoplaçant BAP, est un béton spécial qui fournit des performances optimales des propriétés d'écoulement, de résistance et de durabilité. Aujourd'hui, la large utilisation du BAP et l'épuisement des ressources naturelles du sable alluvionnaire SA nécessite de chercher d'autres ressources plus abondantes remplaçant le sable SA. Dans ce cas, le sable de dune SD et le sable concassé SC sont parmi les bonnes solutions en Algérie. D'autres coter, Le durcissement du BAP est très important car il est très susceptible au séchage en surface en raison de la quantité élevée de la pâte et du faible rapport eau/liant.

Dans cette étude nous avons cherché à remplacer le sable SA, dans le BAP, par les deux sables SD et SC en mélange binaire et ternaire afin d'améliorer les propriétés rhéologiques, mécaniques et la résistance vis-à-vis de l'agressivité des solutions acides toute en gardant les mêmes paramètres de la composition avec 100% SA. Ainsi, nous avons examiné l'influence de la méthode de durcissement du BAP contenant les différentes combinaisons de sables sur les valeurs de la résistance à la compression et à la traction à court et à long terme.

D'après cette étude, le sable a un effet indispensable de lubrifier les gros granulats. Toutes modifications de la teneur ou de la qualité du sable entraînés des effets sur les propriétés du BAP.

Les résultats de l'étude montrent qu'on peut substituer le sable SA par des proportions modérées de SC et SD sans fortement influencer la fluidité, la déformabilité, la stabilité et les propriétés mécaniques et de la durabilité (les proportions atteignent 20% de SC, 40% de SD en système binaire et de 20% SC+ 20%SD en mélange ternaire). Nous avons montré aussi qu'au-delà de 40% de substitution de SA le BAP perd sa propriété liquide et devenait un béton ordinaire.

L'utilisation de SC et SD en grandes proportions nécessite davantage de l'eau ou de superplastifiant afin de régler la fluidité, la viscosité et la déformabilité du BAP perdus en raison de la forte absorption d'eau et la forme des grains de SC et de SD. Mais avec un risque d'influer les propriétés mécaniques surtout pour le sable SD.

Les résultats présentés ont démontré l'effet bénéfique du durcissement à l'eau. Le développement d'une bonne résistance à la compression dans l'eau ou par enveloppement dans une feuille en plastique est attribué à une humidité suffisante maintenue de manière à conserver

la bonne hydratation du ciment qui entraîne le colmatage des pores capillaires et le renforcement des liens intergranulaires des BAP à quelles que soient les combinaisons des sables.

Le durcissement dans l'eau reste la méthode la plus efficace pour un bon durcissement. En raison de la forte absorption d'eau de deux sables SC et SD, la cure dans l'eau ou par apport de l'eau est très nécessaire pour des BAP contenant des volumes importants en SD et/ou en SC.

La porosité ou la compacité du mélange de sables est très affectée les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du BAP. Le mélange du sable le moins poreux conduit à la bonne propriété du béton.

PERSPECTIVES

Cette recherche a ouvert la porte à des recherches nouvelles qui doivent s'intéresser à l'effet de régimes de durcissement et à la valorisation de sable dunaire SD et de sable concassé SC dans la confection des bétons autoplaçants (BAP). Ce travail ouvre différentes perspectives :

1. Étude de l'effet du durcissement sur d'autres propriétés telles que le module d'élasticité, l'adhérence, le retrait etc.
2. D'autres méthodes de durcissement peuvent être étudiées en combiné avec les sables telles que le durcissement à la vapeur par énergie solaire, le mûrissement interne par ajout des agrégats léger, le sable léger, les polymères super absorbants, etc.
3. Il convient d'étudier d'autres propriétés de durabilité du BAP, telles que la résistance à la corrosion, la réaction alcalino-agrégat, ainsi que le gel et le dégel.
4. Modélisation du comportement du BAP à base de sable de dune et/ou sable concassé et des régimes de durcissement par la méthode de plan d'expériences.

Références Bibliographiques |

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] K. Ozawa, K. Maekawa, M. Kunishima, H. Okamura, Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, in: Proceedings of the Second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Vol. 1, 1989: pp. 445–450.
- [2] K.H.C. Khayat, H. Monty, Stability of Self-Consolidating Concrete, Advantages, and Potential Applications, in: 1st International RILEM Symposium on Self - Compacting Concrete, RILEM Publications SARL, 1999: pp. 143–152.
- [3] M. Ouchi, Y. Edamatsu, A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete, in: First Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr., RILEM Publications SARL, 1999: pp. 121–130.
- [4] P. Nanthagopalan, M. Santhanam, Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of Self-Compacting Concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 3443–3449. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.029.
- [5] H. Okamura, K. Ozawa, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *Struct. Concr.* 1 (2000) 3–17. doi:10.1680/stco.2000.1.1.3.
- [6] H. Okamura, M. Ouchi, Self Compacting Concrete – Development, Present Use and Future, in: 1st International RILEM Symposium on Self - Compacting Concrete, RILEM Publications SARL, 1999: pp. 3–14.
- [7] M. Ouchi, Self-Compacting Concrete-Development, Applications and Investigations, *Nord. Concr. Res. Publ.* 23 (2000) 29–34.
- [8] P. Desnerck, B. Craeye, V. Boel, P. Van Itterbeeck, Mixture compositions and fresh properties of self- compacting concrete : analysis of 25 years of research, in: SCC 2016, 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Flowing toward Sustainability, 2016: pp. 1–10.
- [9] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 44 (2002) 1–32. doi:09539733 4 4.
- [10] S. Assié, Durabilité des bétons autoplaçants, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2004.
- [11] K.. Khayat, Workability , Testing , and Performance of Self-Consolidating, *ACI Mater. J.* (1999).
- [12] Y.-W. Chan, Y.-S. Chen, Y.-S. Liu, Development of bond strength of reinforcement steel in self-consolidating concrete, *ACI Struct. J.* 100 (2003) 490–498.
- [13] K.H. Khayat, J.J. Assaad, J. Daczko, Comparison of Field-Oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete View project Mix Design and Engineering properties of Semi-Flowable concrete View project, *ACI Mater. J.* (2004) 168–176. <https://www.researchgate.net/publication/271764053>.
- [14] S. Grünewald, J. Walraven, , "Characteristics and influence of paste on the behaviour of self-compacting concrete in the fresh state, in: 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium, 2007: pp. 137–142.
- [15] L. Zhuguo, Influencing factors of rheological test results of self-compacting concrete, in: 5th

- International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium, 2007: pp. 1113–1119.
- [16] S. Utsi, Performance based concrete mix-design, Lulea University of Technology, Lulea Sweden, 2008.
- [17] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *Adv. Concr. Technol.* 1 (2003) 5–15. doi:10.1016/B978-075065686-3/50295-0.
- [18] N.G. S.G. Ladkany, V.K. Doli, T.K. McEwan, High strength self-consolidating concrete for practical applications, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium. (2007) 1065–1070.
- [19] P. Turcry, Retrait et fissuration des bétons autoplaçants Influence de la formulation, Université de Nantes, 2004.
- [20] F. Dehn, K. Holschemacher, D. Weisse, Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour, LACER (Leipzig Annu. Civ. Eng. Report). (2000) 115–124.
<http://www.wilbertprecast.com/documents/scc.pdf%5Cnpapers3://publication/uuid/0DC98BE0-E13F-49DB-A5F3-CB28C9CEFB14>.
- [21] B. Abdi, La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures, université Sherbrooke, 2005.
- [22] S. Nan, M. Buquan, A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 215–222.
- [23] H.J.H. Brouwers, H.J. Radix, Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study, *Cem. Concr. Res.* 29 (2007) 1–12. doi:10.1016/j.cemconres.2005.06.002.
- [24] H. Okamura, K. Ozawa, Mix design for self-compacting concrete, *Concr. Libr. Japanese Soc. Civ. Eng.* 25 (1995) 107–120.
- [25] M. Ouchi, M. Hibino, H. Okamura, Effect of Superplasticizer on Self-Compactability of Fresh Concrete, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1574 (1997) 37–40. doi:10.3141/1574-05.
- [26] B. Nécir, Développement des bétons autoplaçants à hautes performances: influence de la composition, Thèse de Doctorat université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [27] F. De Larrard, T. Sedran, D. Angot, Préviation de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide - i - fondements théoriques et étalonnage du modèle, *Bull. Liaison Des Lab. Des Ponts Chaussées.* 194 (1994) 59–70.
- [28] O. Petersson, P. Billberg, B. Van, A model for self-compacting concrete. 1996., in: *Proceedings of International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete. RILEM, 1999.*
- [29] S. Tangtermsirikul, V. Bui, Blocking Criteria for Aggregate Phase of Self-Compacting High-Performance Concrete, in: *Proceedings of Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailand, 1995: pp. 58–69.*
- [30] S.G. Oh, T. Noguchi, F. Tomosawa, Toward mix design for rheology of self-compacting concrete, in: Å. Skarendahl and Ö. Petersson (Ed.), *First Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr., RILEM Publications SARL, 1999: pp. 361–372.*
- [31] R.K. Dhir, P.C. Hewlett, J.. Lota, T.D. Dyer, An investigation into the feasibility of formulating

- “self-cure” concrete, *Mater. Struct.* 27 (1994) 606–615.
- [32] J.-K. Kim, S.H. Han, Y.D. Park, J.H. Noh, Material properties of self-flowing concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 10 (1998) 244–249.
- [33] C.F. Ferraris, K.H. Obla, R. Hill, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 245–255. doi:10.1016/S0008-8846(00)00454-3.
- [34] C. Ozyildirim, S. Lane, Final report: Evaluation of self-compacting concret, 2003.
- [35] P. Aggarwal, Y. Aggarwal, S.M. Gupta, R. Siddique, Properties of Self-Compacting Concrete – an Overview, in: 30th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, Singapore, LTD, CI-Premier PTE, 2005: pp. 485–494.
- [36] M. Abdul Hameed, A study of mix design and durability of s self compacting concrete, Master of Science, King Fahd University of Petroleum and Minerals , Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, 2005. <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0188126>.
- [37] A.M. Neville, J.J. Brooks, *Concrete Technology*, Second Edi, Pearson Education Limited, 2010.
- [38] P. Mehta Kumar, J.M. paulo Monteiro, *Concrete- Microstructure, Properties and Materials*, Third Edit, McGraw-Hill, 2006.
- [39] W. Zhu, P.J. Bartos, Microstructure and Properties of Interfacial Transition Zone in SCC, in: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, RILEM Publications SARL, 2005: pp. 319–327. doi:10.1617/2912143624.033.
- [40] C. Selvamony, M.S. Ravikumar, S.U. Kannan, S. Gnanappa Basil, Investigations on Self-Compacted Self-Curing Concrete Using Limestone Powder and Clinkers, *ARNP J. Eng. Appl. Sci.* 5 (2010) 1–6.
- [41] R. Ilangovana, N. Mahendrana, K. Nagamanib, Strength and Durability Properties of Concrete Containing Quarry Rock Dust As Fine Aggregate, *ARNP J. Eng. Appl. Sci.* 3 (2008) 20–26.
- [42] L. Agulló, B. Toralles-Carbonari, R. Gettu, A. Aguado, Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer - A study based on the Marsh cone test, *Mater. Struct.* 32 (1999) 479–485.
- [43] N. Ghafoori, M. Sharbaf, M. Najimi, I. Batilov, Natural Pozzolan Contained Self-Consolidating Concrete, in: Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, SCMT4 Las Vegas, USA 2016, 2016.
- [44] P.L. Domone, Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 197–208. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003.
- [45] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, E. Özbay, Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1847–1854. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015.
- [46] A. Elahi, P.A.M. Basheer, S. V. Nanukuttan, Q.U.Z. Khan, Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 292–299. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045.
- [47] P. Dinakar, K.G. Babu, M. Santhanam, Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 880–886. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.06.011.

- [48] K. Samimi, Contribution à l'étude de la durabilité des BAP dans les milieux agressifs : effets des pouzzolanes naturelles, INSA Rennes, 2016.
- [49] M. Şahmaran, H.A. Christianto, I.O. Yaman, The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 432–440. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003.
- [50] M. Uysal, K. Yilmaz, M. Ipek, The effect of mineral admixtures on mechanical properties , chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 263–270. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.049.
- [51] B. Felekoğlu, A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 646–654. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.10.007.
- [52] P. Nanthagopalan, M. Santhanam, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 353–358. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.11.005.
- [53] A. Rmili, Study of the formulation and behavior of self-compacting concrete:incorporating crushed sand and desert sand, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2010.
- [54] A. R 'mili, M. Ben Ouezdou, Valorization of the crushed sand and of the desert sand in the composition of the self compacting concrete Valorisation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants, *MATEC Web Conf.* 2. 01001 (2012) 1–9. doi:10.1051/.
- [55] A. Rmili, Mongi, B. Ouezdou, M. Added, E. Ghorbel, Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes Part I: Study of Formulation, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 3 (2009) 3–9.
- [56] A. Rmili, Mongi, B. Ouezdou, M. Added, E. Ghorbel, Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes Part II: SCC Fresh and Hardened States Characteristics, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 3 (2009) 11–14.
- [57] I.B. Topçu, A. Uğurlu, Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 1071–1075. doi:10.1016/S0008-8846(03)00015-2.
- [58] A. Georgiadis, N. Anagnostopoulos, K.K. Sideris, Mechanical Characteristics of Self-Compacting Concretes Produced with Different Filler Materials, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium. (2007) 611–618.
- [59] W. Zhu, J.C. Gibbs, Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1457–1462. doi:10.1016/j.cemconres.2004.07.001.
- [60] L.A.P. de Oliveira, J.P. de C. Gomes, C.N.G. Pereira, Study of Sorptivity of Self-Compacting Concrete With Mineral Additives, *J. Civ. Eng. Manag.* 12 (2006) 215–220. doi:10.3846/13923730.2006.9636395.
- [61] J.M. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1963–1971. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011.
- [62] N. Bouzoubaâ, M. Lachemi, Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 413–420. doi:10.1016/S0008-8846(00)00504-4.
- [63] H. Yazici, The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties,

- chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 456–462. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002.
- [64] P. Diederich, Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, Université De Toulouse III- Paum Sabatier, 2010. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [65] D. Lowke, C. Gehlen, The zeta potential of cement and additions in cementitious suspensions with high solid fraction, *Cem. Concr. Res.* 95 (2017) 195–204. doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.016.
- [66] E. Nägele, The zeta-potential of cement, *Cem. Concr. Res.* 15 (1985) 453–462. doi:10.1016/0008-8846(85)90118-8.
- [67] H. Viallis-Terrisse, A. Nonat, J.-C. Petit, Zeta-Potential Study of Calcium Silicate Hydrates Interacting with Alkaline Cations, *J. Colloid Interface Sci.* 244., 244 (2001) 58–65. doi:10.1006/jcis.2001.7897.
- [68] P. Russell, *Concrete admixtures*, Leatherhead, Surrey : Eyre & Spottiswoode Publications, 1983.
- [69] B. Jönsson, H. Wennerström, A. Nonat, B. Cabane, Onset of cohesion in cement paste, *Langmuir.* 20 (2004) 6702–6709. doi:10.1021/la0498760.
- [70] G. Dreux, J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, 8eme édit, Eyrolles, 1998.
- [71] J. Hot, *Influence des polymères de type superplastifiants et agents entraîneurs d'air sur la viscosité des matériaux cimentaires*, Université Paris-Est, 2013.
- [72] M.S. Shetty, *Concrete technology- theory and practice*, Multicolou, S. Chand & Company Ltd, 2009.
- [73] B. Felekoğlu, H. Sarikahya, Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1972–1980. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.005.
- [74] M. Benaïcha, A.H. Alaoui, O. Jalbaud, Y. Burtschell, Dosage effect of superplasticizer on self-compacting concrete: Correlation between rheology and strength, *J. Mater. Res. Technol.* (2019) 1–7. doi:10.1016/j.jmrt.2019.01.015.
- [75] M. Sonebi, Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1199–1208. doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.022.
- [76] M. Nehdi, M. Pardhan, S. Koshowski, Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 2103–2112. doi:10.1016/j.cemconres.2004.03.018.
- [77] A. Kanellopoulos, M.F. Petrou, I. Ioannou, Durability performance of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 320–325. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.049.
- [78] AFNOR, *Eau de gâchage pour bétons: Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton*, (2003).
- [79] The European Project Group, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*, The European Guidelines for Self Compacting Concrete. (2005) 63. doi:0 9539733 4 4.
- [80] O.R. Khaleel, S.A. Al-Mishhadani, H. Abdul Razak, The effect of coarse aggregate on fresh and

- hardened properties of Self-Compacting Concrete (SCC), *Procedia Eng.* 14 (2011) 805–813. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.102.
- [81] J. Hu, I.L. Souza, F.C. Genarini, Engineering and environmental performance of with low powder content and recycled concrete aggregate, *J. Sustain. Cem. Mater.* ISSN. 0373 (2016) 2–16. doi:10.1080/21650373.2016.1230901.
- [82] J.J. Assaad, Influence of recycled aggregates on dynamic/static stability of self-consolidating concrete, *J. Sustain. Cem. Mater.* 6 (2017) 345–365. doi:10.1080/21650373.2017.1280427.
- [83] Y. Xie, B. Liu, J. Yin, S. Zhou, Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 477–480. doi:10.1016/S0008-8846(01)00708-6.
- [84] Ö. Petersson, Self-compacting concrete: Preliminary Mix Design- FINAL REPORT OF TASK 1, 1997.
- [85] S. V Rao, M.V.. Rao, P.R. Kumar, Effect of Size of Aggregate and Fines on Standard And High Strength Self Compacting Concrete, *J. Appl. Sci. Res.* 6 (2010) 433–442. doi:10.21275/ART20161444.
- [86] O. Oladele-John, A.-O. Wale, O.-J. Olusoji, O.-D. Ihotu, Influence of Aggregate Size on Self Compacting Concrete using Nafores 801 Liquid as Plasticizer, *IOSR J. Mech. Civ. Eng.* 13 (2016) 125–133. doi:10.9790/1684-130502125133.
- [87] Vishnukanth, R. Tilaganji, Experimental Investigation on Self Compacting Concrete by Introducing Fly Ash with Varied Size of Aggregate, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 4 (2017) 2579–2586. <https://irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7526.pdf>.
- [88] M. Geiker, M. Brandl, L. Thrane, L. Nielsen, On the Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete, *Cem. Concr. Aggregates.* 24 (2002) 3–6. doi:<https://doi.org/10.1520/CCA10484J>.
- [89] B. Nécira, Étude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants, Mémoire Magister, Université Mohamed Khider- Biskra, 2006.
- [90] M.R. Taylor, F.D. Lydon, B.I.G. Barr, Mix proportions for high strength concrete, *Constr. Build. Mater.* 10 (1996) 445–450. doi:10.1016/0950-0618(96)00012-8.
- [91] D. Bonen, S.P. Shah, Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete, *Prog. Struct. Eng. Mater.* 7 (2005) 14–26. doi:10.1002/pse.186.
- [92] A. Krishna, A. V. , Krishna Rao, B., Rajagopal, Effect of different sizes of coarse aggregate on the properties of NCC and SCC, *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 2 (2010) 5959–5965.
- [93] C. Tasi, L. Li, C. Hwang, The Effect of Aggregate Gradation on Engineering Properties of High Performance Concrete, *J. ASTM Int.* 3 (2006) 1–12. doi:<https://doi.org/10.1520/JAI13410>.
- [94] AFNOR, NF EN 12620+A1: Granulats pour béton, (2008).
- [95] N. Su, K.C. Hsu, H.W. Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1799–1807. doi:10.1016/S0008-8846(01)00566-X.
- [96] B. Benabed, E.H. Kadri, L. Azzouz, S. Kenai, Properties of self-compacting mortar made with various types of sand, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 1167–1173. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007.
- [97] S. Care, R. Linder, V.B. Bouny, Effect of mineral additions on the concrete use properties–

- experience plan and static analysis, in: LCPC Ouvrages d'art OA 33, Paris, Fr., 2002.
- [98] R.J. Detwiler, P.D. Tennis, THE USE OF LIMESTONE IN PORTLAND CEMENT: A STATE-OF-THE-ART REVIEW, RP 118, Portl. Cem. Assoc. Skokie. (1996) P. 39.
- [99] M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 264–277. doi:10.1016/j.cemconres.2005.07.001.
- [100] F. De Larrard, A. BELLOC, The influence of aggregate on the compressive strength of concretes, *Bull. Liaison Des Lab. Des Ponts Chaussées.* 219 (1999) 41–52.
- [101] A.A. Ramezani pour, M. Esmaili, S.A. Ghahari, M.H. Najafi, Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 411–418. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.
- [102] P.J.M. Monteiro, P.K. Mehta, C.J.P. Skalny, Interaction between carbonate rock and cement paste, *Cem. Concr. Compos.* 16 (1986) 127–134.
- [103] J.P. Ollivier, J.C. Maso, B. Bourdette, Interfacial Transition Zone in Concrete, *Adv. Cem. Based Mater.* 2 (1995) 30–38.
- [104] T.D. Nguyen, Etude de la zone d'interphase granulats calcaire poreux-pâte de ciment: influence des propriétés physico-mécaniques des granulats; conséquence sur les propriétés mécaniques de mortier, , Thèse doctorat ,École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France, 2013.
- [105] N. S, L'adhérence entre les agrégats et le mortier, *Bull. Du Cim.* 22 (1959).
- [106] H.A. Al-Sanad, N.F. Ismael, A.J. Nayfeh, Geotechnical properties of dune sands in Kuwait, *Eng. Geol.* 34 (1993) 45–52. doi:10.1016/0013-7952(93)90042-B.
- [107] A. Ghrieb, R. Mitiche-Kettab, A. Bali, Stabilization and utilization of dune sand in road engineering, *Arab. J. Sci. Eng.* 39 (2014) 1517–1529. doi:10.1007/s13369-013-0721-z.
- [108] M.I. El-Sayed, Sedimentological characteristics and morphology of the aeolian sand dunes in the eastern part of the UAE: A case study from Ar Rub' Al Khali, *Sediment. Geol.* 123 (1999) 219–238. doi:10.1016/S0037-0738(98)00116-X.
- [109] M.G.M. Elipe, S. López-Querol, Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction - The State-of-the-art, *Constr. Build. Mater.* (2014) 728–739. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.008.
- [110] E. Lee, S. Park, Y. Kim, Drying shrinkage cracking of concrete using dune sand and crushed sand, *Constr. Build. Mater.* (2016). doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.141.
- [111] A.S. Al-Harthy, M.A. Halim, R. Taha, K.S. Al-Jabri, The properties of concrete made with fine dune sand, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1803–1808. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053.
- [112] T. Bouziani, M. Bederina, M. Hadjoudja, Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC), *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 6 (2012) 59–64. doi:10.1007/s40069-012-0006-z.
- [113] F.J. Luo, L. He, Z. Pan, W.H. Duan, X.L. Zhao, F. Collins, Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 131–137. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005.
- [114] G. Zhang, J. Song, J. Yang, X. Liu, Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand, *Build. Environ.* 41 (2006) 1478–1481.

doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.033.

- [115] B. Belhadj, M. Bederina, N. Montrelay, J. Houessou, M. Quéneudec, Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete, *Constr. Build. Mater.* 66 (2014) 247–258. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.090.
- [116] B. Jin, J. Song, H. Liu, Engineering characteristics of concrete made of desert sand from Maowusu sandy land, *Appl. Mech. Mater.* Vols. 174–177 (2012) 604–607. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.174-177.604.
- [117] B. Kilanowski, Self Compacting Concret: Actual status (and future development) in Europe, (n.d.) 1–50. <https://anfah.org/wp-content/uploads/pdf/6-scc-presentation-for-anfah.pdf>.
- [118] P. Guiraud, Les bétons autoplaçants, *Solut. Bét.* (2015). <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/SB-OA-2015-3.pdf>.
- [119] K. Holschmacher, Y. Klug, A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC., *Lacer.* 7 (2002) 123–134.
- [120] J.C. Gibbs, W. Zhu, Strength of hardened self-compacting concrete, in: *First Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr.*, RILEM Publications SARL, 1999: pp. 199–209.
- [121] F. Gussigh, Bétons auto-plaçants (BAP), *Tech. l'ingénieur.* (2014) 12.
- [122] Y.P. Kapoor, Self Compacting Concrete An Economical Approach, *Masterbuilder.* (2012) 92–96. <https://www.masterbuilder.co.in/data/edata/Articles/July2012/92.pdf>.
- [123] F. De Larrard, Concrete Mixture Proportioning, A Scientific Approach, MODERN CON, 1999.
- [124] J. Péra, S. Husson, B. Guilhot, Influence of finely ground limestone on cement hydration, *Cem. Concr. Compos.* 21 (1999) 99–105.
- [125] P.L. Domone, A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 1–12. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.07.010.
- [126] W. Zhu, J.C. Gibbs, P.J.M. Bartos, Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements, *Cem. Concr. Compos.* 23 (2001) 57–64. doi:10.1016/S0958-9465(00)00053-6.
- [127] P. Dinakar, K. Babu, M. Santhanam, Mechanical Properties of High Volume Fly Ash Self, in: *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium, 2007: pp. 651–657.
- [128] C. Druta, Tensile Strength and Bonding Characteristics of Self-Compacting Concrete, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Master's Theses, 2003.
- [129] D. P. Bentz, K. A. Snyder, P. E. Stutzman, Hydratation of portland cement: the effects of curing conditions, in: *10th International Congress on the Chemistry of Cement*, 1997.
- [130] P. Guiraud, Cure du béton, *Infociment.Fr.* (2018) 5. <https://www.infociments.fr/betons/cure-du-beton>.
- [131] S.. Kulkarni, C. Pereira, Significance of Curing of Concrete for Durability of Structures, *NBM Constr. World.* (2011). <https://www.nbmcw.com/tech-articles/concrete/25057-significance-of-curing-of-concrete-for-durability-of-structures.html>.
- [132] ACI Committee 305, ACI 305R-99 Hot Weather Concreting Reported by ACI Committee 305, *J. Am. Concr. Inst.* (2000) 1–20.

- [133] H. Kosmatka Steven, L. Michelle Wilson, Design and control of concrete mixtures - The guide to application, methods, and materials., Fifteenth, PCA Portland Cement Association, 2011.
- [134] RMACO, Best Practices Guidelines for Self-Consolidating Concrete, (2009) 18.
- [135] CCAA, Curing of concrete, Tech. Publ. - Data Sheets. (2006) 7.
- [136] N. Bozkurt, S. Yazicioglu, Strength and capillary water absorption of lightweight concrete under different curing conditions, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 17 (2010) 145–151.
- [137] ACC, Design and control of concrete mixtures, Association canadienne du ciment , canada, 2004.
- [138] M. Safiuddin, S.N. Raman, M.F.M. Zain 12, Effect of Different Curing Methods on the Properties of Microsilica Concrete, *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 1 (2007) 87–95.
- [139] B. Benammar, B. Mezghiche, S. Guettala, Influence of atmospheric steam curing by solar energy on the compressive and flexural strength of concretes, *Constr. Build. Mater. J.* 49 (2013) 511–518. <http://www.elsevier.com/authorsrights>.
- [140] P. Klieger, Curing Requirements for Scale Resistance of Concrete, *Res. Dep. Bull. RX082, Portl. Cem. Assoc.* (1957) 14.
- [141] A.F. Bingöl, I. Tohumcu, Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume, *Mater. Des.* 51 (2013) 12–18. doi:10.1016/j.matdes.2013.03.106.
- [142] W.H. Prise, Factors influencing concrete strength, *J. Proc. ACI.* 47 (1951) 417–432.
- [143] J.P. Balayssac, Ch.H. Détriché, N. Diafat, Influence of duration of humid curing on the characteristics of mechanical concretes common use, *Mater. Struct.* 30 (1997) 284–292.
- [144] N.D. J.P. Balayssac, Ch.H. Détriché, Influence of duration of humid curing on the characteristics of cover concrete, *Mater. Struct.* 31 (1998) 325–328.
- [145] H. Zhao, W. Sun, X. Wu, B. Gao, Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete, *Mater. Des.* (2012). doi:10.1016/j.matdes.2011.09.053.
- [146] S. Yazicioglu, S. Caliskan, K. Turk, Effect of curing conditions on the engineering properties of self-compacting concrete, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 13 (2006) 25–29.
- [147] ACI Committee 517, Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure-State of the Art, *Am. Concr. Inst. ACI 517.2R* (1992) 17.
- [148] A.M. Ramezianpour, K. Esmaili, S.A. Ghahari, A.A. Ramezianpour, Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 187–194. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.072.
- [149] A. Ramezianpour, S. Ghahari, Effect of Steam Curing on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Containing Pozzolan, *ACI Spec. Publ.* 303 (2015) 45–56.
- [150] P. Klieger, Some aspects of durability and volume change of concrete for prestressing, Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, 1960.
- [151] AFNOR, NF P18-370 :Adjuvants - Produits de cure pour bétons et mortiers - Définition, spécifications et marquage, (2013).
- [152] Y. Edamatsu, A. Yasumoto, S. Mizukoshi, M. Nagaoka, Influence of sand or gravel volume on

- self-compactability of fresh concrete, Proceedings of the Japan Concrete Institute. 19 (1997) 49–54.
- [153] J. Jinhua, Properties of mortar for self-compacting concrete, University of London, 2002.
- [154] H.-W. Chai, Design and testing of self-compacting concrete, thesis, University College London, University of London, 1998.
- [155] N. Naoki, K. Ozawa, Effect of fine aggregate on the filling ability of fresh concrete, Proceedings of FJSCE. 18 (1996) 105–109.
- [156] M.H. Kim, Y. Koh, E. Kamata, Y. Kim, An experimental study on the fluidity and evaluation of high fluidity concrete according to the kinds of fine aggregate, Proceedings of the Japan Concrete Institute. 19 (1997) 67–72.
- [157] T. Hirata, N. Takeda, N. Miura, S. Sogo, The influence of the aggregate grading on fresh highly-workable-concrete, Proceeding of the Japan Concrete Institute. 17 (1995) 81–86.
- [158] F. Sudo, Y. Masuda, S. Gomi, The influence of fine aggregate grading on workability of high-fluidity concrete, Proceedings of the Japan Concrete Institute. 18 (1996) 23–128.
- [159] T. Bouziani, Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach, Constr. Build. Mater. 49 (2013) 308–314. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.039.
- [160] L. Azzouz, B. Benabed, E.-H. Kadri, S. Kenai, Effect of sand type on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, in: 2nd International Sustainable Buildings Symposium ISBS, ANKARA (TURKIYE), 2015.
- [161] B. Nécira, A. Guettala, S. Guettala, Study of the combined effect of different types of sand on the characteristics of high performance self-compacting concrete, J. Adhes. Sci. Technol. 31 (2017) 1912–1928. doi:10.1080/01694243.2017.1289829.
- [162] M. Tennich, M. Ben Ouezdou, A. Kallel, Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack, Constr. Build. Mater. 135 (2017) 335–342. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.193.
- [163] S. Türkel, B. Felekoğlu, S. Dulluç, Influence of various acids on the physico-mechanical properties of pozzolanic cement mortars, Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci. 32 (2007) 683–691. doi:10.1007/s12046-007-0048-0.
- [164] M.T. Bassuoni, M. Nehdi, M. Amin, Self-compacting concrete: using limestone to resist sulfuric acid, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials. 160 (2007) 113–123. doi:10.1680/coma.2007.160.3.113.
- [165] M. Bederina, Z. Makhloufi, A. Bounoua, T. Bouziani, M. Quéneudec, Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions, Constr. Build. Mater. (2013). doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037.
- [166] M. Cherrak, A. Bali, K. Silhadi, Concrete mix design containing calcareous tuffs as a partial sand substitution, Constr. Build. Mater. (2013). doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.051.
- [167] M. Omrane, S. Kenai, E.H. Kadri, A. Aït-Mokhtar, Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan, J. Clean. Prod. 165 (2017) 415–430. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.139.

- [168] A. Benosman, Performances mécaniques et durabilité des matériaux cimentaires modifiés par ajout de polymère (PET), Thèse Doctorat, Université d'Oran, 2011.
- [169] N.J. Crammond, The thaumasite form of sulfate attack in the UK, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 809–818. doi:10.1016/S0958-9465(03)00106-9.
- [170] M.R. Khelifa, Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat, Université De Constantine Et Université d'Orléans, 2010. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00464699>.
- [171] P.M. Shanmugavadivu, R. Malathy, Durability Properties of Concrete with Natural sand and Manufactured sand, in: *International Conference on Science and Engineering (ICSE 2011)*, 2011: pp. 368–372. <http://rgconferences.com/proceed/icse11/pdf/261.pdf>.
- [172] B. Benabed, L. Azzouz, E. Kadri, S.E. Belaidi, H. Soualhi, Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes, in: *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA*, Chambéry, Savoie, 6 Au 8 Juin 2012, 2012: pp. 1–11.
- [173] T.K. Lohani, M. Padhi, K.P. Dash, S. Jena, Optimum utilization of quarry dust as partial replacement of sand in concrete, *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.* 1 (2013) 391–404. doi:10.6088/ijaser.0020101040.
- [174] K. Behfarnia, O. Farshadfar, The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 64–71. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.035.
- [175] H. Siad, S. Kamali-Bernard, H.A. Mesbah, G. Escadeillas, M. Mouli, H. Khelafi, Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment: Influence of different mineral admixtures, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1188–1200. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.086.
- [176] R. Deepthy, P. Mathews, Durability study of self-compacting concrete using manufactured sand, *Int. J. Res. Eng. Technol. (IMPACT IJRET)*. 2 (2014) 45–50.
- [177] P. Daisy Angelin, P. Ravi Kishore, Durability Studies on Concrete with Manufacturing Sand As A Partial Replacement of Fine Aggregate In HCL Solution, *Int. J. Eng. Res.* 11 (2015) 44–50. www.ijerd.com.
- [178] B. Vijaya, S. Senthil Selvan, Comparative study on the strength and durability properties of concrete with manufactured sand, *Indian J. Sci. Technol.* 8 (2015) 1–7. doi:10.17485/ijst/2015/v8i36/88614.
- [179] M. Yajurved Reddy, D.. Swetha, S.. Dhani, Study on Properties of Concrete With Manufactured Sand As Replacement to natural sand, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 6 (2015) 29–42.
- [180] S. Boudali, D.E. Kerdal, K. Ayed, B. Abdulsalam, A.M. Soliman, Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 705–713. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.058.
- [181] N. Tebbal, Z.E.A. Rahmouni, Influence of Local Sand on the Physicomechanical Comportment and Durability of High Performance Concrete, *Adv. Civ. Eng.* 2016 (2016) 1–10. doi:10.1155/2016/3897064.
- [182] T. Kavitha, P. Partheeban, Investigation of Durability Properties of Manufactured Sand in concrete, *Int. J. Adv. Res. Eng. Manag.* 03 (2017) 22–28.
- [183] H.W. Reinhardt, M. Stegmaier, Influence of heat curing on the pore structure and compressive

- strength of self-compacting concrete (SCC), *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 879–885. doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.004.
- [184] H.A. Mohamed, Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions, *Ain Shams Eng. J.* (2011). doi:10.1016/j.asej.2011.06.001.
- [185] R. Derabla, M.L. Benmalek, Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term, *Constr. Build. Mater.* 66 (2014) 787–794. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.029.
- [186] A. Goel, J. Narwal, V. Verma, D. Sharma, B. Singh, A Comparative Study on the Effect of Curing on The Strength of Concrete, *Int. J. Eng. Adv. Technol.* (2013) 401–406.
- [187] M. Ibrahim, M. Shameem, M. Al-Mehthel, M. Maslehuddin, Effect of curing methods on strength and durability of concrete under hot weather conditions, *Cem. Concr. Compos.* 41 (2013) 60–69. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.04.008.
- [188] P.D. Kumbhar, P. Murnal, Effect of Humidity and Temperature on Properties of High Performance Concrete, *NBM Constr. Inf.* (2011). <https://www.nbmcw.com/tech-articles/concrete/23363-effect-of-humidity-and-temperature-on-properties-of-high-performance-concrete.html>. consulté le 22/05/2019.
- [189] E. Gallucci, X. Zhang, K. Scrivene, Influence de la température sur le développement microstructural des bétons, in: *Septième Édition Des Journées Sci. Du Regroupement Francoph. Pour La Rech. La Form. Sur Le Bét. (RF)2B*, Toulouse, Fr. 19-20 Juin, 2006.
- [190] B. Mezghiche, L. Zeghichi, R. Chebili, M. Mellas, Curing methods of precast concrete elements, *Asian J. Civ. Eng. (Building Housing)*. 7 (2006).
- [191] N. Mahdi Fawzi, A. saher Tawfeeq Agha, The effect of curing types on compressive strength of high performance concrete, *J. Eng.* 18 (2012) 768–783.
- [192] Institut Algérien de normalisation, NA 442: Ciments-Composition, Spécifications et Critères de Conformité des ciments courants, (2005) 21.
- [193] R. Bogue, *Chemistry of Portland cement*, 2nd ed., Publishing Reinhold Corp New York (NY), 1955.
- [194] AFNOR, NF EN 12390-3. Essais pour béton durci – Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes, (2012).
- [195] AFNOR, NF EN 12350-8: Essai pour béton frais - Partie 8 : béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams, (2010).
- [196] AFNOR, NF EN 12350-10:Essai pour béton frais - Partie 10: béton auto-plaçant-Essai de la boîte en L, (2010).
- [197] AFNOR, NF EN 12350-11. Essai pour béton frais – Partie 11: béton auto-plaçant – Essai de stabilité au tamis, (2010).
- [198] AFNOR, NF EN 12390-2 : Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, (2012).
- [199] B. Mezghiche, *Laboratory Testing of Construction Materials*, Publ. Univ. Biskra, Algérie. (2005) 120.
- [200] M. Omrane, Performance et durabilité d'un béton autoplaçant a base d'agrégats recycles et de

- pouzzolane naturelle, thèse de doctorat, Université Saâd Dahleb de Blida, 2018.
- [201] A.B. Yu, N. Standish, Characterisation of non-spherical Particles From Their Packing, *Powder Technol.* 74 (1993) 205–213. doi:10.7763/IJMMM.2014.V2.108.
- [202] W. Hanini, Etude de l'incidence de la granularité sur la compacité des mélanges granulaires, mémoire magister univ. Aboubeker BELKAID - TLEMCEM, 2012.
- [203] J. Baron, R. Lesage, Rapport de recherche LPC N°64: La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier, Lab. Des Ponts Chaussées. (1976).
- [204] A. Lecomte, F. De Larrard, Résistance à la compression de bétons hydrauliques au squelette granulaire non optimisé, *Bull. Liaison Des Lab. Des Ponts Chaussées.* 234 (2001) 89–105.
- [205] AFNOR, NF EN 12350-9: Testing fresh concrete - Part 9: Self-compacting concrete - V-funnel test, (2010).
- [206] T. Bouziani, Bédérina M, Makhloufi Z, Hadjoudja M, Mixture design approach to evaluate fresh properties of SCC made with various sands, *J. Build. Mater. Struct.* 1 (2014) 1–9.
- [207] A. Wang, C. Zhang, W. Sun, Fly ash effects : I . The morphological effect of fly ash, 33 (2003) 2023–2029. doi:10.1016/S0008-8846(03)00217-5.
- [208] A. Rmili, M. Ben Oueddou, Valorization of the crushed sand and of the desert sand in the composition of the self compacting concrete, in: MATEC Web Conf. 2, Rabat, Morocco, EDP sciences, 2012: pp. 1–9.
- [209] A. Yahia, M. Tanimura, Y. Shimoyama, Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 532–539. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.008.
- [210] O. Chowaniec, Limestone Addition in Cement PAR, thèse Doctorat és-sciences , école Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2012.
- [211] K. Kapoor, S.P. Singh, B. Singh, Permeability of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin, *J. Sustain. Cem. Mater.* 6:5 (2017) 293–313. doi:10.1080/21650373.2017.1280426.
- [212] A. Bedday, M. Added, Using crushed limestone sand in the concrete, *Ann. l'Equipment XIII.* 2 (2003) 35–61.
- [213] J. Ferran, R. Javelas, J.C. Maso, Study of the existing transition aureole between the aggregates of a mortar and the mass of paste cement hydrated, *Colloq. Int. Liaison Contact Dans Les Matériaux Compos. Util. En Génie Civ.* 1 (1972) 60–76.
- [214] J.P. Ollivier, J. Grandet, F. Hakim, 1984 I, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 30 (1984) 278–283.
- [215] M. Mannan, H. Basri, M. Zain, M. Islam, Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete, *Build. Environ.* 37 (2002) 1167–1171.
- [216] A.A. Ramezani pour, V.M. Malhotra, Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume, *Cem. Concr. Compos.* 17 (1995) 125–133.
- [217] M. Rabehi, B. Mezghiche, S. Guettala, Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth, *Constr. Build. Mater.* 45 (2013) 123–129.

- [218] C. Ramadj, Influence du rapport E / C sur les propriétés mécaniques du mortier à base du sable de mâchefer, mémoire master, Institut International d'Ingénierie Burkina Faso, 2015.
- [219] B. Aïssoun, K. Khayat, J.L. Gallias, Variations of sorptivity with rheological properties of concrete cover in self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.* 113 (2016) 113–120. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.006.
- [220] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, S. Karaoğlu, K. Mermerdaş, Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes, *Constr. Build. Mater.* 34 (2012) 120–130. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.017.
- [221] A. Benli, M. Karataş, Y. Bakir, An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume, *Constr. Build. Mater.* 144 (2017) 552–562. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.228.
- [222] H.Y. Leung, J. Kim, A. Nadeem, J. Jaganathan, M.P. Anwar, Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume, *Constr. Build. Mater.* 113 (2016) 369–375. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.071.
- [223] Z. Makhoulfi, E.H. Kadri, M. Bouhicha, A. Benaïssa, Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 497–504. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.050.
- [224] A. Benosman, M. Mouli, M. Taïbi, M. Belbachir, Y. Senhadji, I. Bahlouli, D. Houivet, L'influence de l'ajout polymère sur la résistance des mortiers vis-a-vis d'une attaque chimique d'acide chlorhydrique, in: SBEIDCO. In: 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. ENSET Oran (Algeria), 2009: pp. 383–90.
- [225] N. Kaid, K. Ayed, A. Abidelah, H. Khelafi, D. Kerdal, Etude de la durabilité des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs, in: "SICZS_2010" Symp. Int. Sur La Constr. En Zo. Sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 2010: pp. 1–10.
- [226] L. Guanshu, Etude du phénomène de l'expansion sulfatique dans les bétons : comportement des enrobés de déchets radioactifs sulfatés, Ecole nationale des ponts et chaussées, 1994.
- [227] R. Zaitri, Effet de l'ajout de calcaire et de sable de dune broyés sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons à hautes performances, Thèse de Doctorat, Université Amar Telidji De Laghouat (Algérie), 2016.

Annexes |

Annexe « A ».
Fiches techniques des produits

 **Fiche technique du ciment**



50kg

متين
Matine

ALGÉRIE



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine
NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT 

- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

 A member of
LafargeHolcim

 **Fiche technique du superplastifiant**

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

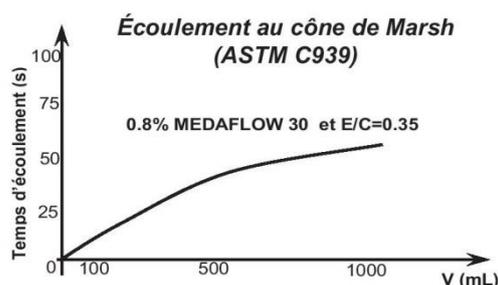
DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



59

Annexe « B ».
Tableaux des résultats



✚ **Résultats de la porosité des mélanges de sables, l'étalement, la viscosité T500, le taux de remplissage et la stabilité dans chaque système de mélanges**

SC/(SA+SC) (%)	Mélange SA-SC				
	Porosité de mélange (%)	Étalement (cm)	T500 (s)	H ₂ /H ₁	SI (stabilité) (%)
0	37,56	74,5	3	0,81	10,11
20	37,98	70	4	0,37	4,59
40	40,26	61	12	0,07	2,4
60	42,21	53	30	0	0,01
80	45,5	45	/	0	0,02
100	49,3	35	/	0	0,02

SD/(SA+SD) (%)	Mélange SA-SD				
	Porosité de mélange (%)	Étalement (cm)	T500 (s)	H ₂ /H ₁	SI (stabilité) (%)
0	37,56	74,5	3	0,81	10,11
20	35,94	74	60	0,85	8,78
40	35,27	76	2	0,93	8,1
60	38,22	56,2	17	0,26	0,175
80	40,44	14	/	0	0
100	44,14	5	/	0	0

SD/(SC+SD) (%)	Mélange SC-SD				
	Porosité de mélange (%)	Étalement (cm)	T500 (s)	H ₂ /H ₁	SI (stabilité) (%)
0	49,3	35	/	0	0
20	43,45	45	/	0	0
40	40,47	56	13	0,47	0,18
60	40,5	52,5	15	0,32	0,156
80	40,93	8	/	0	0
100	44,14	5	/	0	0

Compositions ternaire	Mélange ternaire SA-SC-SD				
	Porosité de mélange (%)	Étalement (cm)	T500 (s)	H ₂ /H ₁	SI (stabilité) (%)
C 1	37,56	74,5	3	0,81	10,11
C 2	36,75	78	3	0,84	3,74
C 3	38,23	70,5	10	0,4	3,8
C 4	37,77	69	7	0,74	4,76
C 5	40,85	60	13	0,18	1,2
C 6	39,9	60	13	0,41	0,79
C 7	39,74	57,6	15	0,5	0,81

✚ *Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et en fonction de régimes de durcissement dans chaque système de mélanges [MPa]*

Régime	Temps (jours)	SC/(SA+SC) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	37,04	47,01	37,40	33,77	37,60	23,71
	28	46,52	54,18	47,56	44,82	42,48	33,98
	90	50,60	65,30	51,25	46,29	44,08	36,10
À l'air	7	32,14	40,82	34,21	33,76	34,43	32,12
	28	36,63	45,82	41,58	39,09	36,84	34,63
	90	41,86	49,06	43,87	41,86	41,36	37,18
Enveloppement en plastique	7	35,34	45,01	41,54	36,43	31,85	22,57
	28	41,63	45,66	43,47	43,05	41,68	37,28
	90	47,47	56,64	53,54	52,38	45,11	42,36

Régime	Temps (jours)	SD/(SA+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	37,04	33,11	34,77	35,65	25,31	18,47
	28	46,52	42,01	44,56	37,43	26,26	25,15
	90	50,60	46,23	51,22	39,82	35,63	31,55
À l'air	7	32,14	32,54	33,85	33,53	26,61	22,82
	28	36,63	35,65	40,46	33,91	26,62	27,43
	90	41,86	41,99	43,11	36,52	32,84	28,47
Enveloppement en plastique	7	35,34	26,13	35,83	31,57	21,84	18,78
	28	41,63	36,32	39,04	32,65	28,87	24,34
	90	47,47	40,56	47,05	38,33	33,48	28,58

Régime	Temps (jours)	SD/(SC+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	23,71	22,48	36,06	31,22	32,53	18,47
	28	33,98	26,10	43,18	33,40	37,51	25,15
	90	36,10	32,32	48,92	34,96	38,39	31,55
À l'air	7	32,12	26,05	32,06	30,18	22,74	22,82
	28	34,63	37,72	39,72	36,17	28,79	27,43
	90	37,18	37,98	40,11	36,76	31,72	28,47
Enveloppement en plastique	7	22,57	30,47	33,55	30,26	22,22	18,78
	28	37,28	31,29	42,11	37,21	27,28	24,34
	90	42,36	35,06	46,34	37,26	30,81	28,58

Régime	Temps (jours)	Composition ternaire						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Dans l'eau	7	37,04	42,07	41,08	38,79	41,68	31,44	31,31
	28	46,52	50,39	43,64	42,68	44,97	44,72	38,00
	90	50,60	50,85	46,72	46,77	49,05	46,83	46,72
À l'air	7	32,14	36,09	33,40	29,92	30,96	30,68	26,23
	28	36,62	41,58	38,09	35,77	43,12	37,12	32,92
	90	41,86	43,32	42,92	38,54	45,21	43,11	37,95
Enveloppement en plastique	7	35,34	40,41	36,89	29,23	31,79	29,50	23,56
	28	41,63	44,02	42,18	33,75	44,36	34,53	31,76
	90	47,47	49,74	44,91	37,42	49,43	41,14	35,24

✚ *Évolution de la résistance à la traction en fonction du temps et en fonction de régimes de durcissement dans chaque système de mélanges [MPa]*

Régime	Temps (jours)	SC/(SA+SC) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	3,27	3,65	3,22	3,01	2,89	2,49
	28	4,73	5,12	4,86	4,39	4,17	4,00
	90	5,51	7,17	6,66	6,60	5,83	4,66
À l'air	7	3,05	3,35	2,66	2,44	2,62	1,84
	28	4,52	4,99	4,39	4,13	3,74	3,16
	90	5,38	5,98	5,29	5,12	5,08	4,12
Enveloppement en plastique	7	3,05	3,44	2,83	2,70	2,74	2,38
	28	4,56	5,03	4,43	4,22	4,04	3,32
	90	5,42	6,03	5,48	5,29	5,14	4,61

Régime	Temps (jours)	SD/(SA+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	3,27	2,99	3,49	3,03	2,52	2,22
	28	4,73	4,39	4,80	3,70	3,61	3,11
	90	5,51	5,25	5,98	5,16	4,62	4,02
À l'air	7	3,05	2,73	3,26	2,70	2,04	1,47
	28	4,52	3,42	4,44	3,46	3,18	2,78
	90	5,38	4,95	5,55	4,75	4,30	3,77
Enveloppement en plastique	7	3,05	2,75	3,30	2,97	2,48	2,11
	28	4,56	3,90	4,46	3,66	3,31	2,98
	90	5,42	4,95	5,88	4,82	4,33	3,78

Régime	Temps (jours)	SD/(SC+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	2,49	3,19	3,43	3,34	2,31	2,22
	28	4,00	4,51	5,13	4,63	4,14	3,11
	90	4,66	5,22	6,29	4,94	4,36	4,02
À l'air	7	1,84	2,09	2,88	2,51	2,23	1,47
	28	3,16	3,85	4,76	4,00	2,89	2,78
	90	4,12	4,55	5,17	4,54	3,98	3,77
Enveloppement en plastique	7	2,38	2,49	3,27	3,15	2,29	2,11
	28	3,32	4,04	4,78	4,30	3,31	2,98
	90	4,61	4,89	5,70	4,66	4,03	3,78

Régime	Temps (jours)	Composition ternaire						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Dans l'eau	7	3,27	4,49	4,06	3,80	3,97	3,67	3,56
	28	4,73	5,82	5,30	4,58	4,96	4,08	4,22
	90	5,51	6,02	5,39	5,23	4,91	4,53	4,35
À l'air	7	3,05	3,85	3,42	2,99	3,34	3,15	2,99
	28	4,52	4,62	4,41	3,89	4,10	3,71	3,53
	90	5,38	5,31	5,04	4,13	4,68	4,13	4,05
Enveloppement en plastique	7	3,05	4,02	3,84	3,48	3,82	3,50	3,18
	28	4,56	4,93	4,62	4,18	4,70	3,91	3,79
	90	5,42	5,98	5,09	5,01	4,86	4,41	4,30

✚ *Variation du rapport: Rc / (Rc de C1 dans l'eau) en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement de chaque système de mélanges*

Temps (jours)	Régime	SC/(SA+SC) (%)					
		0	20	40	60	80	100
7	Dans l'eau	1,00	1,27	1,01	0,91	1,02	0,64
	À l'air	0,87	1,10	0,92	0,91	0,93	0,87
	Enveloppement en plastique	0,95	1,22	1,12	0,98	0,86	0,61
28	Dans l'eau	1,00	1,16	1,02	0,96	0,91	0,73
	À l'air	0,79	0,98	0,89	0,84	0,79	0,74
	Enveloppement en plastique	0,89	0,98	0,93	0,93	0,90	0,80
90	Dans l'eau	1,00	1,29	1,01	0,91	0,87	0,71
	À l'air	0,83	0,97	0,87	0,83	0,82	0,73
	Enveloppement en plastique	0,94	1,12	1,06	1,04	0,89	0,84

Temps (jours)	Régime	SD/(SA+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
7	Dans l'eau	1,00	0,89	0,94	0,96	0,68	0,50
	À l'air	0,87	0,88	0,91	0,91	0,72	0,62
	Enveloppement en plastique	0,95	0,71	0,97	0,85	0,59	0,51
28	Dans l'eau	1,00	0,90	0,96	0,80	0,56	0,54
	À l'air	0,79	0,77	0,87	0,73	0,57	0,59
	Enveloppement en plastique	0,89	0,78	0,84	0,70	0,62	0,52
90	Dans l'eau	1,00	0,91	1,01	0,79	0,70	0,62
	À l'air	0,83	0,83	0,85	0,72	0,65	0,56
	Enveloppement en plastique	0,94	0,80	0,93	0,76	0,66	0,56

Temps (jours)	Régime	SD/(SC+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
7	Dans l'eau	0,64	0,61	0,97	0,84	0,88	0,50
	À l'air	0,87	0,70	0,87	0,81	0,61	0,62
	Enveloppement en plastique	0,61	0,82	0,91	0,82	0,60	0,51
28	Dans l'eau	0,73	0,56	0,93	0,72	0,81	0,54
	À l'air	0,74	0,81	0,85	0,78	0,62	0,59
	Enveloppement en plastique	0,80	0,67	0,91	0,80	0,59	0,52
90	Dans l'eau	0,71	0,64	0,97	0,69	0,76	0,62
	À l'air	0,73	0,75	0,79	0,73	0,63	0,56
	Enveloppement en plastique	0,84	0,69	0,92	0,74	0,61	0,56

Temps (jours)	Régime	Composition ternaire						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
7	Dans l'eau	1,00	1,14	1,11	1,05	1,13	0,85	0,85
	À l'air	0,87	0,97	0,90	0,81	0,84	0,83	0,71
	Enveloppement en plastique	0,95	1,09	1,00	0,79	0,86	0,80	0,64
28	Dans l'eau	1,00	1,08	0,94	0,92	0,97	0,96	0,82
	À l'air	0,79	0,89	0,82	0,77	0,93	0,80	0,71
	Enveloppement en plastique	0,89	0,95	0,91	0,73	0,95	0,74	0,68
90	Dans l'eau	1,00	1,00	0,92	0,92	0,97	0,93	0,92
	À l'air	0,83	0,86	0,85	0,76	0,89	0,85	0,75
	Enveloppement en plastique	0,94	0,98	0,89	0,74	0,98	0,81	0,70

✚ *Variation du rapport: Rt / (Rt de CI dans l'eau) en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement de chaque système de mélanges*

Temps (jours)	Régime	SC/(SA+SC) (%)					
		0	20	40	60	80	100
7	Dans l'eau	1,00	1,12	0,99	0,92	0,89	0,76
	À l'air	0,93	1,03	0,82	0,75	0,80	0,56
	Enveloppement en plastique	0,93	1,05	0,87	0,83	0,84	0,73
28	Dans l'eau	1,00	1,08	1,03	0,93	0,88	0,85
	À l'air	0,95	1,05	0,93	0,87	0,79	0,67
	Enveloppement en plastique	0,96	1,06	0,94	0,89	0,85	0,70
90	Dans l'eau	1,00	1,30	1,21	1,20	1,06	0,85
	À l'air	0,98	1,09	0,96	0,93	0,92	0,75
	Enveloppement en plastique	0,98	1,09	0,99	0,96	0,93	0,84

Temps (jours)	Régime	SD/(SA+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
7	Dans l'eau	1,00	0,92	1,07	0,93	0,77	0,68
	À l'air	1,00	0,93	1,01	0,78	0,76	0,66
	Enveloppement en plastique	1,00	0,95	1,08	0,94	0,84	0,73
28	Dans l'eau	1,00	0,93	1,01	0,78	0,76	0,66
	À l'air	0,95	0,72	0,94	0,73	0,67	0,59
	Enveloppement en plastique	0,96	0,82	0,94	0,77	0,70	0,63
90	Dans l'eau	1,00	0,95	1,08	0,94	0,84	0,73
	À l'air	0,98	0,90	1,01	0,86	0,78	0,68
	Enveloppement en plastique	0,98	0,90	1,07	0,87	0,79	0,69

Temps (jours)	Régime	SD/(SC+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
7	Dans l'eau	0,76	0,98	1,05	1,02	0,71	0,68
	À l'air	0,56	0,64	0,88	0,77	0,68	0,45
	Enveloppement en plastique	0,73	0,76	1,00	0,97	0,70	0,65
28	Dans l'eau	0,85	0,95	1,08	0,98	0,88	0,66
	À l'air	0,67	0,81	1,01	0,85	0,61	0,59
	Enveloppement en plastique	0,70	0,85	1,01	0,91	0,70	0,63
90	Dans l'eau	0,85	0,95	1,14	0,90	0,79	0,73
	À l'air	0,75	0,83	0,94	0,82	0,72	0,68
	Enveloppement en plastique	0,84	0,89	1,03	0,85	0,73	0,69

Temps (jours)	Régime	Composition ternaire						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
7	Dans l'eau	1,00	1,37	1,24	1,16	1,22	1,12	1,09
	À l'air	0,93	1,18	1,05	0,92	1,02	0,97	0,92
	Enveloppement en plastique	0,93	1,23	1,18	1,07	1,17	1,07	0,97
28	Dans l'eau	1,00	1,23	1,12	0,97	1,05	0,86	0,89
	À l'air	0,95	0,98	0,93	0,82	0,87	0,78	0,75
	Enveloppement en plastique	0,96	1,04	0,98	0,88	0,99	0,83	0,80
90	Dans l'eau	1,00	1,09	0,98	0,95	0,89	0,82	0,79
	À l'air	0,98	0,96	0,91	0,75	0,85	0,75	0,73
	Enveloppement en plastique	0,98	1,08	0,92	0,91	0,88	0,80	0,78

✚ *Variation du rapport Rc/(Rc de témoin) en fonction de l'âge et en fonction de régimes de durcissement de chaque système de mélanges*

Régime	Temps (jours)	SC/(SA+SC) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	1,00	1,27	1,01	0,91	1,02	0,64
	28	1,00	1,16	1,02	0,96	0,91	0,73
	90	1,00	1,29	1,01	0,91	0,87	0,71
À l'air	7	1,00	1,27	1,06	1,05	1,07	1,00
	28	1,00	1,25	1,14	1,07	1,01	0,95
	90	1,00	1,17	1,05	1,00	0,99	0,89
Enveloppement en plastique	7	1,00	1,27	1,18	1,03	0,90	0,64
	28	1,00	1,10	1,04	1,03	1,00	0,90
	90	1,00	1,19	1,13	1,10	0,95	0,89

Régime	Temps (jours)	SD/(SA+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	1,00	0,89	0,94	0,96	0,68	0,50
	28	1,00	0,90	0,96	0,80	0,56	0,54
	90	1,00	0,91	1,01	0,79	0,70	0,62
À l'air	7	1,00	1,01	1,05	1,04	0,83	0,71
	28	1,00	0,97	1,10	0,93	0,73	0,75
	90	1,00	1,00	1,03	0,87	0,78	0,68
Enveloppement en plastique	7	1,00	0,74	1,01	0,89	0,62	0,53
	28	1,00	0,87	0,94	0,78	0,69	0,58
	90	1,00	0,85	0,99	0,81	0,71	0,60

Régime	Temps (jours)	SD/(SC+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	0,64	0,61	0,97	0,84	0,88	0,50
	28	0,73	0,56	0,93	0,72	0,81	0,54
	90	0,71	0,64	0,97	0,69	0,76	0,62
À l'air	7	1,00	0,81	1,00	0,94	0,71	0,71
	28	0,95	1,03	1,08	0,99	0,79	0,75
	90	0,89	0,91	0,96	0,88	0,76	0,68
Enveloppement en plastique	7	0,64	0,86	0,95	0,86	0,63	0,53
	28	0,90	0,75	1,01	0,89	0,66	0,58
	90	0,89	0,74	0,98	0,78	0,65	0,60

Régime	Temps (jours)	Composition ternaire (%)						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Dans l'eau	7	1,00	1,14	1,11	1,05	1,13	0,85	0,85
	28	1,00	1,08	0,94	0,92	0,97	0,96	0,82
	90	1,00	1,00	0,92	0,92	0,97	0,93	0,92
À l'air	7	1,00	1,12	1,04	0,93	0,96	0,95	0,82
	28	1,00	1,14	1,04	0,98	1,18	1,01	0,90
	90	1,00	1,04	1,03	0,92	1,08	1,03	0,91
Enveloppement en plastique	7	1,00	1,14	1,04	0,83	0,90	0,83	0,67
	28	1,00	1,06	1,01	0,81	1,07	0,83	0,76
	90	1,00	1,05	0,95	0,79	1,04	0,87	0,74

✚ *Variation du rapport $R_t/(R_t \text{ de témoin})$ en fonction de l'âge et en fonction de régime de durcissement de chaque système de mélanges*

Régime	Temps (jours)	SC/(SA+SC) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	1,00	1,12	0,99	0,92	0,89	0,76
	28	1,00	1,08	1,03	0,93	0,88	0,85
	90	1,00	1,30	1,21	1,20	1,06	0,85
À l'air	7	1,00	1,10	0,87	0,80	0,86	0,60
	28	1,00	1,10	0,97	0,91	0,83	0,70
	90	1,00	1,11	0,98	0,95	0,94	0,77
Enveloppement en plastique	7	1,00	1,13	0,93	0,89	0,90	0,78
	28	1,00	1,10	0,97	0,92	0,89	0,73
	90	1,00	1,11	1,01	0,98	0,95	0,85

Régime	Temps (jours)	SD/(SA+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	1,00	0,92	1,07	0,93	0,77	0,68
	28	1,00	0,93	1,01	0,78	0,76	0,66
	90	1,00	0,95	1,08	0,94	0,84	0,73
À l'air	7	1,00	0,90	1,07	0,89	0,67	0,48
	28	1,00	0,76	0,98	0,77	0,70	0,62
	90	1,00	0,92	1,03	0,88	0,80	0,70
Enveloppement en plastique	7	1,00	0,90	1,08	0,97	0,81	0,69
	28	1,00	0,86	0,98	0,80	0,73	0,65
	90	1,00	0,91	1,08	0,89	0,80	0,70

Régime	Temps (jours)	SD/(SC+SD) (%)					
		0	20	40	60	80	100
Dans l'eau	7	0,76	0,98	1,05	1,02	0,71	0,68
	28	0,85	0,95	1,08	0,98	0,88	0,66
	90	0,85	0,95	1,14	0,90	0,79	0,73
À l'air	7	0,60	0,69	0,94	0,82	0,73	0,48
	28	0,70	0,85	1,05	0,89	0,64	0,62
	90	0,77	0,85	0,96	0,84	0,74	0,70
Enveloppement en plastique	7	0,78	0,82	1,07	1,03	0,75	0,69
	28	0,73	0,89	1,05	0,94	0,73	0,65
	90	0,85	0,90	1,05	0,86	0,74	0,70

Régime	Temps (jours)	Composition ternaire						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Dans l'eau	7	1,00	1,37	1,24	1,16	1,22	1,12	1,09
	28	1,00	1,23	1,12	0,97	1,05	0,86	0,89
	90	1,00	1,09	0,98	0,95	0,89	0,82	0,79
À l'air	7	1,00	1,26	1,12	0,98	1,09	1,03	0,98
	28	1,00	1,02	0,98	0,86	0,91	0,82	0,78
	90	1,00	0,99	0,94	0,77	0,87	0,77	0,75
Enveloppement en plastique	7	1,00	1,32	1,26	1,14	1,25	1,15	1,04
	28	1,00	1,08	1,01	0,92	1,03	0,86	0,83
	90	1,00	1,10	0,94	0,92	0,90	0,81	0,79

RÉSUMÉ

La composition du béton autoplaçant (BAP) est très particulière, il contient un volume important de sable qui dépasse 40% de volume des agrégats. Toutes modifications de la nature ou de la qualité du sable revient positivement ou négativement sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de la durabilité du BAP. Le BAP est très susceptible au séchage en surface en raison de la quantité élevée de la pâte, du faible rapport eau/liant et du manque d'eau ressuée à la surface, qui jouent le rôle de protection contre la dessiccation. Cela peut entraîner des fissures dues à la perte précoce d'humidité ou à la formation de croûtes à la surface. Pour cela la méthode de durcissement du BAP est très importante. De plus, la demande en sable connaît, en Algérie, une augmentation considérable en rapport avec le développement du pays. Le sable alluvionnaire SA est le type le plus utilisé dans les constructions ses ressources semblent baisser, ce qui devrait être remplacé par d'autres types des sables abondants. L'utilisation du sable de dune (SD) et le sable concassé (SC) dans la composition de béton autoplaçant BAP, constitue une contribution technique, économique et environnementale importante. Vu la quantité importante des fines dans SC et SD, ces deux sables peuvent être deux composants intéressants du BAP. L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'étude expérimentale de l'effet des différentes combinaisons binaires et ternaires des sables SA, SC et SD sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du BAP. Ainsi d'étudier l'effet des différents régimes de durcissement sur la résistance à la compression et à la traction du BAP fabriqués par des différentes proportions des sables. 21 compositions de BAP ont été examinées dans cette étude. Dans chaque composition le sable SA a été substitué par SC et/ou SD en combinaison binaire et ternaire avec un pas de 20% jusqu'au remplacement total. Trois régimes de durcissement ont été élaborés à savoir le durcissement dans l'eau (comme milieu témoin), le durcissement à l'air ambiant et enveloppé dans une feuille de plastique. Les résultats de cette étude montrent que toutes modifications de la teneur ou de la qualité du sable à entraîner des effets sur les propriétés du BAP. Il est possible de substituer le sable SA par des proportions modérées de SC et SD sans fortement influencer la fluidité, la déformabilité, la stabilité, les propriétés mécaniques et de la résistance dans le milieu agressif. L'optimum des proportions est de 20% de SC et 40% de SD dans la combinaison binaire SA-SC et SA-SD respectivement et de (20% SC+ 20% SD) dans le mélange ternaire. Pour la substitution de SA supérieure à 40% le BAP perd ses propriétés rhéologiques et devenait un béton ordinaire. La porosité ou la compacité de mélange de sables est un facteur important qui influe les propriétés du BAP. L'étude montre aussi que les durcissements dans l'eau ou le durcissement enveloppé sont des milieux favorables du BAP à base de divers types de sables pour continuer l'évolution de sa résistance en fournissant suffisamment d'humidité pour que le ciment continue leur hydratation.

Mots clés : Béton autoplaçant, types de sable, propriétés rhéologiques, régimes de durcissement, propriétés mécaniques, milieu agressif.

ملخص

تتمتع

الخرسانة ذاتية التوضع (خ ذ ت) بتركيبية خاصة جدا، إذ تحتوي على حجم هام من الرمل يتجاوز 40% من حجم الحصىات. إن أية تغييرات في طبيعة أو نوعية الرمل يرجع بالسلب أو الايجاب على الخصائص الريولوجية، الميكانيكية و على ديمومة خ ذ ت. الخرسانة ذاتية التوضع معرضة بشدة للتجفيف السطحي نظرا لاحتوائها على كمية العجينة كبيرة وعلى نسبة منخفضة من الماء/الرابط وكذلك لنقص الماء الراشح إلى السطح الذي يُكوّن طبقة حماية ضد التجفيف. هذا ما يمكن أن يؤدي إلى ظهور تشققات و إلى تقشر السطح بسبب فقدان المبكر للرطوبة. لهذا السبب، فإن إنضاج خ ذ ت مهم جداً. إضافة إلى ذلك، الطلب يزداد على الرمل مع زيادة التنمية في البلاد. يعتبر رمل الوديان (ر و) من الأنواع الأكثر استخداما في مجال البناء و الذي يبدو أن موارده بدأت في الانخفاض حيث بات من الضروري استبداله بأنواع أخرى أكثر وفرة. يُعد استخدام رمل الكثبان (ر ك) و رمل المقالع (ر م) في تركيبية الخرسانة ذاتية التوضع مساهمة تقنية، اقتصادية و بيئية مهمة. نظرا للكمية المعتمدة من النواعم في (ر ك) و في (ر م)، فهذين الرملين يمكن أن يكونا مركبين مهمين في تركيبية خ ذ ت. الهدف من هذه الأطروحة هو المساهمة بدراسة تجريبية لتأثير مختلف التوليفات الثنائية والثلاثية لرمل الوديان، رمل المقالع و رمل الكثبان على الخصائص الريولوجية الميكانيكية وعلى ديمومة خ ذ ت. و كذلك دراسة تأثير مختلف أنماط الانضاج على المقاومة للضغط و للشد للخرسانة ذاتية التوضع المحضرة بمختلف أنواع الرمال. في هذه الدراسة تم اختبار 21 تركيبية. في كل تركيبية يتم تعويض (ر و) بالرمل (ر ك) و (ر م) في توليفات ثنائية وثلاثية و بخطوة 20% في كل مرة إلى غاية التعويض الكلي. تم اختبار ثلاثة أنماط من الانضاج: الانضاج داخل الماء (يعتبر كوسط مرجعي)، الانضاج في الهواء و الانضاج بواسطة التغليف البلاستيكي. أظهرت النتائج أنه من الممكن تعويض (ر و) بنسب معتبرة من (ر م) و (ر ك) دون التأثير القوي على السيولة، التشوه، الاستقرار، الخصائص الميكانيكية وعلى الديمومة في الأوساط العدوانية. النسب المثلى كانت 20% رمل المقالع و 40% من رمل الكثبان في التوليفات الثنائية (ر-و-م) و (ر-و-ك) على التوالي و 20% ر م مع 20% ر ك في التوليفات الثلاثية. من أجل تعويض أكبر من 40% لرمل (ر و)، الخرسانة تفقد خصائصها الريولوجية و الميكانيكية وتصبح خرسانة عادية. من ناحية أخرى، المسامية لخليط الرمال لها دور كبير في التأثير على خصائص خ ذ ت. بينت الدراسة كذلك أن الانضاج داخل الماء أو بالتغليف البلاستيكي يعتبران جد ملائمين للخرسانة ذاتية التوضع المحضرة بمختلف أنواع الرمال وذلك من أجل مواصلة تطور مقاومتها وذلك بتوفير الرطوبة الكافية ليوصل الاسمنت تفاعلاته.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية التوضع، أصناف الرمل، الخصائص الريولوجية، أنماط الانضاج، الخصائص الميكانيكية، الوسط العدواني