

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

Influence du durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire et de l'addition du sable de dune broyé au ciment sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons

Présentée par

Naas ALLOUT

Soutenue publiquement le : 29/09/2022

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. BEDERINA Madani	Professeur	Examineur	Université de Laghouat
Dr. TAALLAH Bachir	Professeur	Examineur	Université de Biskra

Dédicace

Je dédie cet humble travail à :

La mémoire de mon Père : MOHAMED

(رحمة الله عليه)

Ma Mère MAMA qui m'a soutenu et encouragé

durant toute ma Scolarité,

Ma chère femme, mes chers enfants :

Adam, Anfel.

Toute ma famille,

Mes professeurs, surtout à La mémoire de mon

cher professeur en primaire Miloud

(رحمة الله عليه)

Ainsi que tous mes amis.

Naas

Remerciements |

REMERCIEMENTS

*Ce travail de thèse a été effectué au Laboratoire de Génie-civil de l'Université Ziane Achour de Djelfa sous la direction du monsieur **GUETTALA Salim**, Professeur à l'université de Djelfa, Je tiens à lui manifester toute ma reconnaissance, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ses conseils qui ont éclairé le déroulement de mes travaux pour sa patience tout au long de ce travail.*

*J'adresse ma profonde gratitude à Mme **QUÉNEUDEC Michèle** Professeur à l'université de Picardie Jules Verne, Amiens, France, pour ses nombreux conseils, qui ont contribué au bon déroulement des travaux de cette thèse*

Je remercie vivement les membres du jury de soutenance de cette thèse :

*Monsieur **MEZGHICHE Bouzidi** Maître de conférences « A » à l'université Mohamed Khider de Biskra de m'avoir accepté de présider ce jury.*

*Monsieur **BEDERINA Madani** Professeur à l'université de Laghouat, qui m'ont fait l'honneur d'être membre du jury de soutenance de cette thèse. Je le remercie de trouver le temps et la volonté de faire le déplacement pour examiner ce travail.*

*Monsieur **TAALLAH Bachir** Professeur à l'université Mohamed Khider de Biskra, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie de ce jury.*

*Je tiens également à remercier Monsieur le Doyen de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université Ziane Achour de Djelfa : le professeur **HFAIFA Ahmed** d'avoir accepté de réaliser ces travaux dans le laboratoire MDC de département du génie civil.*

*Je tiens à remercier très particulièrement mon cher collègue **DOUARA Taha Hocine** Maître de conférences « A » 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 infiniment **Taha**.*

*J'adresse aussi mes remerciements à Mme **HASSAN Messaouda** et Mr **BEN SGHIR Ali** ingénieurs au laboratoire MDC de département de génie civil pour ses collaborations.*

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

*J'adresse mes plus sincères remerciements à monsieur **Masmoudi** 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 |

ملخص

صناعة الأسمنت البورتلاندي تستهلك كمية معتبرة من الطاقة والموارد الطبيعية. إضافة رمل الكثبان المسحوق (ر.ك.م) في إنتاج الأسمنت يسمح بالإضافة إلى المكاسب الاقتصادية والبيئية بتحسين أداء الخرسانة. هذه التحسينات تنتج بشكل أساسي عن ثلاثة تأثيرات متزامنة ومتكاملة (التأثير الحبيبي والفيزيو-كيميائي والكيميائي). من ناحية أخرى، و خلال السنوات الأخيرة أدى الوعي العام والسياسي بقضايا البيئة وأمن الطاقة إلى تعزيز مصادر الطاقة المتجددة و استعمال هاته الاخيرة لانجاز المشاريع في فترة زمنية قصيرة. يلعب معدل إنتاج العناصر الخرسانية دورًا مهمًا. لذلك، فإن الانضاج الأولي بالبخر بواسطة الطاقة الشمسية ضروري للغاية لتحقيق مقاومة مبكرة كبيرة بحيث يمكن إعادة استخدام القوالب في عملية صب أخرى. لهذا كان الهدف من هذا العمل البحثي هو إجراء تقييم تجريبي للتأثير الثنائي للانضاج باستعمال البخر بواسطة الطاقة الشمسية و رمل الكثبان المسحوق (ر.ك.م) على الخواص الميكانيكية وديمومة الخرسانة. في البداية، تمت دراسة تأثير نسب (ر.ك.م) المختلفة على قابلية التشغيل. بعد ذلك، تمت دراسة تأثير محتوى (ر.ك.م) على المقاومة الميكانيكية في أعمار مختلفة للخرسانة المنضجة في الماء، وكذلك تم فحص تأثير مختلف أنماط الانضاج على المقاومة الميكانيكية للعينات التي تحتوي على (ر.ك.م). أخيرًا، تم دراسة التأثير المشترك لكمية (ر.ك.م) وأنظمة الانضاج على مؤشرات الديمومة المتمثلة في الامتصاص الشعيري و مقاومة الهجوم الكيميائي لحمض (HCl) وحمض الكبريتات (H₂SO₄). تم فحص خمسة أنظمة انضاج: الانضاج في الماء، الانضاج بالبخر بواسطة الطاقة الشمسية عند 42 درجة مئوية، الانضاج بالبخر بواسطة الطاقة الشمسية عند 26 درجة مئوية، و الانضاج اللاحق لمدة يوم واحد في الماء بعد ثلاثة أيام من الانضاج بالبخر عند 42 درجة مئوية و الانضاج اللاحق لمدة ثلاثة أيام في الماء بعد ثلاثة أيام من الانضاج بالبخر عند 42 درجة مئوية. أظهرت النتائج أن الاستبدال الجزئي للأسمنت بواسطة (ر.ك.م) يلعب دورًا مفيدًا في قابلية التشغيل. تم الحصول على مقاومة ميكانيكية جيدة للخرسانة المحتوية على 10% من (ر.ك.م) بعد 28 يوم و 60 يوم من الانضاج. يعتبر الانضاج بالبخر عند 42 درجة مئوية ذو فائدة أكثر منه في 26 درجة مئوية، حيث يبدأ النشاط البوزولاني لعنصر السيليس في (ر.ك.م) ابتداء من اليوم الثالث. بغض النظر عن معدل (ر.ك.م) ونمط الانضاج بالبخر كانت مقاومة الانحناء جد متوافقة مع مقاومة الضغط الميكانيكية. أظهرت النتائج أيضًا أن تقنية الانضاج اللاحق لمدة ثلاثة أيام في الماء بعد ثلاثة أيام من الانضاج بالبخر عند 42 درجة مئوية لها تأثير جد مفيد على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المحتوية على 10% (ر.ك.م) وكذا على مقاومتها ضد الهجوم الكيميائي لأحماض HCl و H₂SO₄.

الكلمات المفتاحية: الاستبدال، رمل الكثبان المسحوق، قابلية التشغيل، المقاومة، التفاعل البوزولاني، الانضاج بالبخر بواسطة الطاقة الشمسية، الانضاج اللاحق في الماء.

RESUME

La fabrication du ciment Portland consomme une quantité considérable d'énergie et des ressources naturelles. L'introduction de l'addition du sable de dune broyé (SDB) dans la production cimentaire permet, en plus du gain économique et écologique, une amélioration des performances des bétons. Cette amélioration résulte essentiellement de trois effets qui agissent simultanément de manière complémentaire (effet granulaire, physico-chimique et chimique). D'autre part, au cours des dernières années, la sensibilité du public et la politique aux questions d'environnement et de sécurité énergétique ont conduit à la promotion des sources d'énergies renouvelables et utilisée cette dernière pour réalisés les projets dans une courte durée. Le taux de production d'éléments en béton joue un rôle important sur le plan économique. Par conséquent, le durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire est très nécessaire pour obtenir une résistance initiale considérable de sorte que les moules peuvent être réutilisés pour une autre coulée. C'est pour ça, l'objectif de ce travail de recherche est d'évaluer expérimentalement l'effet combiné de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire et le sable de dune broyé SDB sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En premier lieu, l'étude de l'effet de différents taux de SDB sur la maniabilité a été examinée. Par la suite, l'effet du taux de SDB sur les résistances mécaniques à différents âges du béton durci à l'eau a été étudié, ainsi que les effets des modes de durcissement sur les résistances mécaniques des éprouvettes incorporant du SDB ont été examinés. En fin une attention particulière a été faite sur l'effet combiné de taux de SDB et les régimes de durcissement sur les paramètres de durabilité tel que l'absorption capillaire et la résistance vis-à-vis de la l'attaque chimique des acides (HCl) et des sulfates (H_2SO_4). Cinq régimes de durcissement ont été examinés : le durcissement à l'eau, le durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C, le durcissement à la vapeur par énergie solaire à 26°C et le durcissement ultérieur pendant un jour dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C et le durcissement ultérieur pendant trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C. Les résultats révèlent que la substitution partielle du ciment par SDB joue un rôle bénéfique sur l'ouvrabilité. Une bonne résistance mécanique du béton à 10% (SDB) a été obtenue après 28 et 60 jours de durcissement. Le durcissement à la vapeur à 42°C est plus utile qu'à 26°C, car l'activité pouzzolanique de la silice de SDB commence à être significative dès le troisième jour. Indépendamment du taux de SDB et le cycle de durcissement à la vapeur la résistance à la flexion était en grande concordance avec celle de la compression. Les résultats montrent également l'effet bénéfique de la technique de durcissement ultérieur pendant trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C sur les propriétés physiques et mécaniques et sur la résistance vis-à-vis l'attaque chimique des acides HCl et H_2SO_4 des bétons contenant 10% SDB.

Mots clés : substitution, sable de dune broyé, maniabilité, résistances, activité pouzzolanique, durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire, durcissement ultérieur dans l'eau.

ABSTRACT

The manufacture of Portland cement consumes a considerable amount of energy and natural resources. The introduction of the addition of powdered dune sand (PDS) in the cement production allows, in addition to the economic and ecological gain, an improvement in the performance of concretes. This improvement essentially results from three effects which act simultaneously in a complementary manner (granular, physico-chemical and chemical effect). On the other hand, in recent years, public and political awareness of environmental and energy security issues have led to the promotion of renewable energy sources and the use of renewable energy to carry out projects in a short period of time. The production rate of concrete elements plays an important role. Therefore, initial steam curing by solar energy is very necessary to achieve considerable early strength so that the molds can be reused for another casting. This is why the objective of this research work is to experimentally evaluate the combined effect of initial steam curing by solar energy and powdered dune sand (PDS) on the mechanical properties and durability of concretes. First, the effect of different PDS rates on workability was investigated. Subsequently, the effect of (PDS) content on the mechanical strengths at different ages of concrete in water-curing was studied, as well as the effects of curing modes on the mechanical strengths of specimens incorporating PDS were examined. Finally, particular attention was paid to the combined effect of (PDS) levels and curing regimes on durability parameters such as capillary absorption and resistance to chemical attack by acids (HCl) and sulphates (H_2SO_4). Five curing regimes were examined: water curing, solar steam curing at $42^\circ C$, solar steam curing at $26^\circ C$, subsequent water-curing for one day after three days of steam curing at $42^\circ C$ and subsequent water-curing for three days three days of steam curing at $42^\circ C$. The results reveal that the partial substitution of cement by (PDS) plays a beneficial role on workability. Good mechanical strength of concrete made with 10%(PDS) was obtained after 28 and 60 days of curing. Steam curing at $42^\circ C$ is more useful than at $26^\circ C$, as the pozzolanic activity of (PDS) begins to be significant by the third day. Irrespective of (PDS) rate and steam curing method the flexural strength was very similar to that of compressive. The results also show the beneficial effect of the technique of subsequent water-curing for three days after three days of steam curing at $42^\circ C$ on the physical and mechanical properties and on the resistance against chemical attack of HCl and H_2SO_4 acids on concrete containing 10% PDS.

Keywords: substitution, powdered dune sand, workability, strengths, pozzolanic activity, solar steam curing, subsequent water-curing,

Table des matières |

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Résumés	iv
Table des matières	7
Liste des figures	12
Liste des tableaux	16
Introduction générale	18
Première Partie. Synthèse Bibliographiques	23
Chapitre I. Effet des additions cimentaires sur les propriétés des bétons.	24
I.1. Introduction :	25
I.2. Historique	25
I.3. Constituants de béton	26
I.3.1. Ciment	26
I.3.1.1. Principaux produits de l'hydratation du ciment	27
A. Le silicate de calcium hydraté ou gel CSH	27
B. La Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou l'hydroxyde de calcium	27
I.3.2. Eau de gâchage	28
I.3.3. Squelette granulaire	28
I.3.4. Additions cimentaires	29
I.3.4.1. Définition	29
I.3.4.2. Utilisation des additions minérales en Algérie	29
I.3.4.3. Classification des additions	30
A. Fillers calcaires	31
B. Laitier granulé des hauts fourneaux	31
C. Pouzzolane naturelle	32
D. Cendres volantes	33
E. Fumée de silice	33
I.3.4.4. Avantages des additions minérales	34
A. Avantages économiques	34
B. Avantages écologiques et environnementaux	34
C. Avantages techniques	34
I.3.4.5. Effets des additions minérales sur les matrices cimentaires	34
A. Les Laitiers	36
A.1. Effet sur la rhéologie	36
A.2. Effet sur la résistance mécanique	36
B. Les Pouzzolanes	38
B.1. Effet sur la rhéologie	38
B.2. Effet sur la résistance mécanique	39
C. Les fillers calcaires	40
C.1. Effet sur la rhéologie	40
C.2. Effet sur la résistance mécanique	41

D. Les cendres volantes -----	41
D.1. Effet sur la rhéologie -----	41
D.2. Effet sur la résistance mécanique -----	42
E. Les fumées de silice -----	42
E.1. Effet sur la rhéologie-----	42
E.2. Effet sur la résistance mécanique-----	44
E.3. Chaleur d'hydratation -----	47
F. Sable de dune broyé SDB-----	49
I.4. Durabilité des bétons -----	51
I.4.1. Résistances aux eaux agressives-----	51
I.4.1.1. Eaux contenant des sulfates -----	51
I.4.1.2. Eaux contenant des chlorures-----	52
I.4.2. Mécanisme d'attaques de HCL et H₂SO₄ -----	52
I.4.2.1. Attaque de l'HCl -----	52
I.4.2.2. Attaque de H₂SO₄ -----	53
I.5. Conclusion-----	54
Chapitre II . Effets des méthodes d'accélération du durcissement sur les propriétés du béton-----	55
II.1. Introduction :-----	56
II.2. Méthodes d'accélération du durcissement du béton :-----	56
II.2.1. Les ciments à durcissement rapide-----	56
II.2.2. Le surdosage en ciment -----	56
II.2.3. Utilisation d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement du béton :-----	56
II.2.4. Utilisation des ciments a forte chaleur d'hydratation initiale :-----	57
II.3. Traitement thermique de béton :-----	57
II.4. Les méthodes du traitement thermique -----	57
II.4.1. Méthode de traitement thermique par l'électricité -----	57
II.4.2. Le traitement thermique par rayonnement infrarouge-----	58
II.4.3. Le traitement thermique par l'eau chaude (Hydrothermale)-----	58
II.4.4. Le traitement thermique par la vapeur d'eau « étuvage » -----	58
II.4.5. Le traitement thermique par fluides caloporteurs recyclés -----	59
II.4.6. Le traitement thermique par air chaud-----	60
II.5. Cycle d'étuvage des bétons -----	60
II.6. Revue bibliographique sur l'effet combiné des additions minérales et les méthodes de durcissement par traitement thermique sur les bétons -----	61
II.6.1. Effet de la température sur les propriétés du béton -----	61
II.6.2. Effet des additions et de la température sur les propriétés du béton-----	66
II.6.3. Effet combiné de sable de dune broyé et le traitement thermique -----	79
II.7. Conclusion-----	80
Deuxième partie. Étude expérimentale -----	81
Chapitre III . Caractérisation des matériaux utilisés et techniques expérimentales -----	82

III.1. Introduction	83
III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés	83
III.2.1. Ciment	83
III.2.2. Sable De Dune Broyé (SDB)	84
III.2.3. Eau	86
III.2.4. Sable	86
III.2.5. Pierres Concassées	87
III.3. Méthode de formulation de béton	88
A. Données de base	88
B. Méthode de calcul	88
C. Composition	89
III.4. Programme expérimental et méthodes d'essais	91
III.4.1. Programme expérimental	91
III.4.2. Méthodes d'essais	92
III.4.2.1. Malaxage du béton et confection des échantillons	92
III.4.2.2. Mesure de la consistance du béton	93
III.4.2.3. Les caractéristiques mécaniques	94
A. Les méthodes du durcissement	94
A.1. Durcissement dans l'eau :	94
A.2. Durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire (enceinte d'étuvage)	95
B. Essai de la résistance à la compression	98
C. Essai de la résistance à la flexion	99
III.4.2.4. La durabilité de béton	100
A. Essai de l'absorption capillaire (sorptivité)	100
B. Essai de dégradation dans les acides HCl et H ₂ SO ₄	101
III.5. Conclusion :	103
Chapitre IV . Analyse des résultats et interprétation	104
IV.1. Introduction	105
IV.2. Effet de la teneur de SDB sur la consistance du béton	105
IV.3. L'effet de la teneur en SDB sur les propriétés mécaniques	106
IV.3.1. Résistance à la compression	106
IV.3.2. Résistance à la flexion	109
IV.4. L'effet combiné de SDB et le durcissement à la vapeur initiale	110
IV.4.1. Résistance à la compression	110
IV.4.2. Résistance à la flexion	119
IV.5. Effet du de durcissement ultérieur dans l'eau après durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C	121
IV.6. Étude de la durabilité	122
IV.6.1. Méthodes de durcissement et compositions des bétons testées	122
IV.6.2. Mesure de coefficient d'absorption capillaire	123

IV.6.3. Résistance à l'attaque chimique d'HCl et H ₂ SO ₄ -----	124
IV.6.3.1. Conservation dans l'eau distillée (milieu témoin)-----	124
IV.6.3.2. Comportement des bétons vis-à-vis HCl-----	126
A. L'examen visuel -----	126
B. Effet de la dégradation du HCl sur la perte de masse-----	128
IV.6.3.3. Comportement des bétons vis-à-vis du milieu H ₂ SO ₄ -----	131
A. L'examen visuel -----	131
B. Effet de la dégradation du H ₂ SO ₄ sur la perte en masse-----	131
IV.7. Conclusion -----	134
Conclusion générale & perspectives-----	136
Références Bibliographiques -----	139

Liste des figures |

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Image de silicate de calcium hydraté, Portlandite et cristaux d'ettringite obtenue au MEB par Mehta et al. [15].	27
Figure I.2. Image au microscope électronique à balayage MEB de la silice fumée [25]	33
Figure I.3. Variation de la viscosité plastique relative des pâtes de ciment avec ajouts cimentaires [27].	35
Figure I.4. Influence du laitier sur la résistance à la compression du ciment [38]	37
Figure I.5. Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression [39].	38
Figure I.6. Effet d'incorporation des deux types de cendres volantes (pouzzolaniques) dans les CPA sur la perte d'affaissement du béton frais [19].	38
Figure I.7. Effet du pourcentage de pouzzolane sur la résistance à la compression [40]	39
Figure I.8. Essais mécaniques sur les bétons avec ajouts de pouzzolane naturelle de Bouhamidi [44].	40
Figure I.9. Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires [45].	40
Figure I.10. Évolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [47].	41
Figure I.11. Évolution de la résistance à la compression pour SCM binaire non métakaolin [50].	42
Figure I.12. Effets de fumée de silice sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [52].	43
Figure I.13. Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier selon De Larard & al [53].	43
Figure I.14. Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression de béton [54]	45
Figure I.15. Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression de béton contenant des cendres volantes [55].	45
Figure I.16. Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant, selon Kwan [59].	46
Figure I.17. Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction de temps (échelle logarithmique) à différentes teneurs en fumée de silice et différents rapport E/L [60].	47
Figure I.18. Taux d'évolution de la chaleur dans les pâtes de fumée ciment-silice	48
Figure I.19. Nature siliceuse d'un sable de dune broyé DRX	49
Figure I.20. Résistance à la compression des bétons contenant 10 et 20% SDB en fonction du temps.	50
Figure I.21. Résistance à la traction des bétons contenant 10 et 20% SDB en fonction du temps.	50
Figure II.1. Schéma d'un équipement servant au mûrissement du béton à l'eau chaude.	58
Figure II.2. Chauffage d'une poutre sous bâche par vapeur d'eau perdue	59
Figure II.3. Coffrage chauffant	59
Figure II.4. Cycle type de la cure à la vapeur atmosphérique [133]	60
Figure II.5. Variation de la résistance à la compression, à la traction et module d'élasticité en fonction de température selon [2]	61
Figure II.6. Cycles d'étuvage utilisé par Shi [6]	62
Figure II.7. La résistance à la compression du béton durci à la vapeur dans diverses conditions de durcissement ultérieur [6]	62
Figure II.8. Effet de la durée du durcissement initial à la vapeur à 50 C sur la résistance à la compression du béton avec un faible rapport eau/liant à un durcissement ultérieur de 90 jours [7]	63
Figure II.9. La relation entre la porosité grossière et la résistance à la compression du béton durcissant à la vapeur. [7]	63
Figure II.10. Microstructure d'échantillons de mortier hydraté : à Gauche pendant 91 jours à A) 40 °C et B) 5 °C. et Droite : pendant 150 jours à A) 50 °C et B) 5 °C	64
Figure II.11. Evolution de la quantité d'ettringite [12]	65

Figure II.12. Données TGA/DTG de la pâte de ciment SRPC (w/c = 0,4) à A) 5 °C et B) 50 °C en fonction du temps [11]	65
Figure II.13. Evolution des degrés d'hydratation [12]	66
Figure II.14. Cycle des régimes de durcissement à la température [4].....	67
Figure II.15. Variation de la résistance à la compression Vs la température [4].....	67
Figure II.16. Influence de la teneur en GGBFS et/ou FA et du régime de durcissement sur la résistance à la compression [18].	68
Figure II.17. Influence de la teneur en GGBFS et/ou FA et du régime de durcissement sur la résistance à la flexion [18].	68
Figure II.18. Images SEM du mélange témoin autoclavé (a) (pores sphériques remplis de structures de type jennite) (b) mélange F20 de tobermorite en forme d'aiguille. [18].	69
Figure II.19. Le cycle de durcissement à la vapeur utilisé par [19]	69
Figure II.20. Effet des durées de durcissement à la vapeur sur la résistance à la compression pour 60°C.	70
Figure II.21. Effet des durées de durcissement à la vapeur sur la résistance à la compression pour 70°C.	70
Figure II.22. Effet des durées de durcissement à la vapeur sur la résistance à la compression pour 80°C	71
Figure II.23. L'effet de différents types d'additifs minéraux et de calcaire sur la profondeur de pénétration de l'eau à 28 et 90 jours (mm).....	71
Figure II.24. Résultats de la résistance à la compression des éprouvettes durcies à la température maximale de 60° C [20].	72
Figure II.25. Résultats de la résistance à la compression des éprouvettes durcies à la température maximale de 70° C [20].	72
Figure II.26. Image SEM pour béton avec métakaolin	73
Figure II.27. Résultats de sorptivité, D, basés sur la profondeur de pénétration de l'eau pour les mélanges (a) OPC, (b) OPC/FA, (c) OPC/BFS, (d) OPC/SF et (e) OPC/FA/SF [24].....	74
Figure II.28. Effet du remplacement du laitier sur la résistance à la compression à la fin de chaque cycle de cure.[30]	75
Figure II.29. Résistance à la compression relative liée au stockage à 20 °C par rapport à la température de durcissement maximale pour les SCC de type combiné[33]	76
Figure II.30. Porosité totale de différents SCC durcis à 20 °C, 60 °C et 80 °C.[33].....	76
Figure II.31. Valeurs relatives de résistance à la compression des cycles avec une température de pointe de 50 C (les valeurs moyennes sont présentées en MPa) [35]	77
Figure II.32. Chambre de traitement à la vapeur exposée aux rayons solaires utilisée par Benammar et al. [139]	78
Figure II.33. Effet des méthodes de durcissement, type de ciment et le rapport E/C sur le développement de la résistance à la compression [139].	78
Figure II.34. Conditions dans les étapes de durcissement à la vapeur et de durcissement à l'autoclave.	79
Figure II.35. Effet du SiO2 contenu dans sable de quartz broyé de la température de cure à la vapeur sur la résistance à la compression du béton.....	79
Figure III.1. Sable de dune broyé SDB	84
Figure III.2. Spectre DRX du SDB	86
Figure III.3. Courbes granulométriques du sable et des pierres concassées.....	87
Figure III.4. Organigramme représentatif des différents essais effectués sur béton.....	91
Figure III.5. Image du malaxeur à béton utilisé	92
Figure III.6. Les étapes de malaxage de béton	92
Figure III.7. Images de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams : (a) matériels de l'essai, (b) Mesure de l'affaissement	94

Figure III.8. Image des éprouvettes conservées dans l'eau	95
Figure III.9. Enceinte d'étuvage utilisée et exposée aux rayons solaires	95
Figure III.10. Variation de la température dans l'enceinte d'étuvage et à l'air ambiant durant une année	96
Figure III.11. Cycles du traitement thermique adoptés	98
Figure III.12. Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression.....	99
Figure III.13. Dispositif de l'essai de flexion.....	99
Figure III.14. Principe de mesure de l'absorption capillaire (sorptivité).	100
Figure III.15. Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5% H ₂ SO ₄ et 5%HCl.....	102
Figure IV.1. Affaissement des bétons en fonction de la teneur de SDB	106
Figure IV.2. Effet de SDB sur la résistance mécanique à la compression en fonction du temps.	107
Figure IV.3. Effet de SDB sur la variation de la résistance à la compression du béton par rapport au béton témoin en fonction du temps	109
Figure IV.4. Effet du taux de SDB sur le développement de la résistance à la flexion des bétons en fonction du temps.	110
Figure IV.5. Effet de durcissement à la vapeur à 42°C et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la compression des bétons.	111
Figure IV.6. Effet de durcissement à la vapeur et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la compression des bétons.....	113
Figure IV.7. Effet combiné de teneur en SDB et de durcissement à la vapeur à 42°C sur rapport de la résistance à la compression (Rc durcis à la vapeur à 42°C / Rc durcit dans l'eau) en fonction du temps.	115
Figure IV.8. Effet combiné du taux de SDB et de durcissement à la vapeur à 26°C sur le rapport de la résistance à la compression (Rc durcis à la vapeur à 26°C / Rc durcit dans l'eau) en fonction du temps.	116
Figure IV.9. Effet combiné du taux de SDB et de durcissement à la vapeur à 42°C sur le développement du gain de résistance à la compression en fonction du temps.	117
Figure IV.10. Effet combiné du taux de SDB et de durcissement à la vapeur à 26°C sur le développement du gain de résistance à la compression en fonction du temps	118
Figure IV.11. Effets de durcissement à la vapeur à 42°C et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la flexion des bétons	119
Figure IV.12. Effets de durcissement à la vapeur à 26°C et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la flexion des bétons	120
Figure IV.13. Variation de coefficient de sorptivité S en fonction de SDB et en fonction de la méthode de durcissement	124
Figure IV.14. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans d'eau	125
Figure IV.15. État visuel des éprouvettes après 180 jours d'immersion dans 5%HCl	127
Figure IV.16. variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans l'acide 5%HCl	129
Figure IV.17. État visuel des éprouvettes après 180 jours d'immersion dans 5%H ₂ SO ₄	130
Figure IV.18. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5% H ₂ SO ₄	132

Liste des tableaux |

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Principales phases du ciment Portland	27
Tableau I.2. utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes [20]	30
Tableau I.3. Classification des additions selon leur réactivité	30
Tableau I.4. Effet de l'incorporation du laitier broyé d'El-Hadjar sur la maniabilité du béton [36].....	36
Tableau II.1. Régime de durcissement des échantillons pour les tests de sorptivité [24]	73
Tableau III.1. Composition chimique de ciment (%).....	83
Tableau III.2. Composition minéralogique de ciment (%).....	83
Tableau III.3. Propriétés physiques de ciment	84
Tableau III.4. Résultats de la distribution granulométrique de SD avant broyage	85
Tableau III.5. Analyse chimique du sable de dune finement broyé SDB (%).....	85
Tableau III.6. Propriétés physiques du SDB	85
Tableau III.7. Analyse chimique de l'eau	86
Tableau III.8. Propriétés physiques de sable.....	87
Tableau III.9. Propriétés physiques de pierres concassées.....	87
Tableau III.10. Valeurs des Coefficients de qualité A et A1 des matériaux utilisés (granulats et ciment)	89
Tableau III.11. Compositions des bétons étudiées	90
Tableau III.12. Cycles d'étuvage et températures maximales (T° de palier) (printemps - été).....	97
Tableau III.13. Cycles d'étuvage et températures maximales (T° de palier) (automne - hiver).....	97
Tableau IV.1. Variation de la résistance à la compression en fonction de SDB et en fonction du Temps.....	107
Tableau IV.2. Résultats du rapport Rc/(Rc de référence) durci dans l'eau.....	108
Tableau IV.3. Résultats de la résistance à la flexion -durcissement dans l'eau	109
Tableau IV.4. Résultats de la résistance à la compression des béton soumis au durcissement à la vapeur à 42°C	111
Tableau IV.5. Résultats de la résistance à la compression des béton soumis au durcissement à la vapeur à 26°C...	112
Tableau IV.6. Variation de rapport Rc de durcissement à la vapeur à 42°C/Rc de durcissement à l'eau.....	114
Tableau IV.7. Variation de rapport Rc de durcissement à la vapeur à 26°C/Rc de durcissement à l'eau.....	115
Tableau IV.8. Résultats de l'effet combiné du taux de SDB et du durcissement à la vapeur à 42°C sur le gain de la résistance à la compression.....	117
Tableau IV.9. Résultats de l'effet combiné du taux de SDB et du durcissement à la vapeur à 26°C sur le gain de la résistance à la compression.....	118
Tableau IV.10. Résultats de la résistance à flexion des béton soumis au durcissement à la vapeur à 42°C	119
Tableau IV.11. Résultats de la résistance à flexion des béton soumis au durcissement à la vapeur à 26°C	120
Tableau IV.12. Effet de durcissement dans l'eau après durcissement à la vapeur à 42 °C sur les résistances à la compression des bétons.	121
Tableau IV.13. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans l'eau , de la méthode de durcissement et du SDB.....	124
Tableau IV.14. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5%HCl , de la méthode de durcissement et du SDB.....	128
Tableau IV.15. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5%H ₂ SO ₄ , de la méthode de durcissement et du SDB.....	131

Introduction générale |

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte

Certains projets doivent être réalisés dans une courte durée de temps, surtout dans les régions urbaines. Comme les moules doivent être démoulés le plus tôt possible, le rythme de production des éléments en béton joue un rôle important dans l'avancement de l'ensemble du projet. Par conséquent, un durcissement initial à haute température est très nécessaire pour obtenir une résistance initiale considérable afin que les moules peuvent être utilisés pour une autre coulée.

Il est fréquemment mentionné que la température de durcissement élevée permet d'obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques au jeune âge en accélérant la maturation, mais il est possible d'affecter négativement les résistances mécaniques à un âge plus avancé [1–8]. L'effet bénéfique des additions minérales sur les caractéristiques des bétons, soumis à des températures élevées, a été étudié par de nombreux chercheurs. Ils ont indiqué que, dans des conditions de cure thermique, la résistance du béton, avec ajouts, était supérieure à celle du béton sans ajouts [4,9–14]. De plus, d'autres recherches ont prouvé que l'augmentation de la température de traitement peut considérablement améliorer la réactivité du laitier et des cendres volantes dans le béton [15,16]. Notons que la vitesse de réaction pouzzolanique est affectée par le rapport « eau/liant », la température de durcissement et la finesse de la pouzzolane [17]. Les bétons à additions pouzzolaniques, ne présentent aucun effet néfaste sur la résistance, lorsque la température de durcissement passe de 20 à 55°C [3]. Ho et al. [15] ont démontré que la température de durcissement optimale était d'environ 60°C et ont montré qu'un pré-durcissement plus important peut augmenter le taux de développement des résistances mécaniques et améliorer la durabilité, car il peut également accélérer la réactivité pouzzolanique. D'autres chercheurs [11,18] ont rapporté qu'une période d'exposition réduite à la température maximale est plus utile. En général, pour réduire les dommages thermiques, une température plus basse doit être utilisée pour le durcissement à la vapeur [18] et pour améliorer la durabilité du béton, un temps de durcissement plus court doit être envisagé [7]. Une fois que toutes les réactions possibles du ciment ont été épuisées, il n'est pas pratique d'augmenter la période de durcissement à la vapeur [19]. Selon Liu et al. [20], une cure humide ultérieure adéquate peut efficacement atténuer les effets néfastes du traitement à la vapeur sur les résistances mécaniques et les paramètres microstructuraux du béton. En effet, la cuisson à la vapeur est le système recommandé par rapport à la cuisson standard et à la cuisson en autoclave [21–25].

D'autre part, la réduction de l'utilisation du clinker de ciment Portland, dont la production est fortement consommatrice d'énergie et émettrice de CO₂, peut être obtenue en utilisant le sable de dune broyé (SDB). L'utilisation de SDB, en complément du ciment, n'a pas reçu beaucoup d'attention, car peu de thèmes scientifiques ont été menés à cet égard, généralement en substitution partielle du ciment [26–32], afin de valoriser le sable propre des dunes présent en abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa forte teneur en silice. Ce sable présente également un grand intérêt environnemental et économique. Dans le cas de la cure à l'eau, les chercheurs [26–28] ont mis en évidence l'apparition d'une réaction pouzzolanique partielle de SDB. Cette réactivité pouzzolanique est essentiellement attribuée à une amorphisation à la surface des grains cristallins (grains plus gros) par la présence de très fines particules amorphes adsorbées qui sont produites lors du broyage. Pratiquement, l'utilisation du SDB en remplacement partiel du ciment améliore les résistances de la pâte de ciment, du mortier et du béton, respectivement, lorsque sa proportion est inférieure à 20% [26,27,33]. Ceci a également été confirmé par Alhozaimy et al. [29–32] ; ils ont montré que le durcissement en autoclave stimulait la réactivité pouzzolanique partielle du SDB et augmentait considérablement les résistances à la compression. La résistance maximale du mortier ou du béton a été atteinte à un taux de remplacement du ciment de 30% en SDB. Néanmoins, l'autoclavage à haute température est coûteux car il consomme une quantité considérable d'énergie électrique. Cependant, ce coût peut être minimisé en utilisant une technique de durcissement efficace et alternative, telle que le durcissement à la vapeur utilisant l'énergie solaire. Des travaux très limités ont été réalisés sur l'utilisation de la cure à la vapeur utilisant l'énergie solaire pour évaluer leur influence sur les résistances mécaniques du béton sans ajout [34]. Au cours des dernières années, la sensibilité du public et la politique aux questions d'environnement et de sécurité énergétique ont conduit à la promotion des sources d'énergie renouvelables. L'énergie solaire peut être utilisée efficacement dans les régions où le rayonnement solaire est très important, soit en intensité ou sur une longue période annuelle. L'Algérie reçoit le rayonnement solaire annuel le plus élevé, plus de deux cent vingt jours d'ensoleillement par an. De nombreux chercheurs ont également considéré l'énergie solaire comme l'une des technologies les plus importantes et les plus prometteuses.

En bref, aucune recherche sur l'effet combiné du SDB et de la cuisson à la vapeur utilisant l'énergie solaire n'a été trouvée dans la littérature. Bien que la réaction pouzzolanique partielle du SDB se produise lors des phases d'hydratation ultérieures, la question est de savoir si cette réaction peut être accélérée lorsqu'un béton contenant du SDB durcit dans des conditions de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire. Si tel est le cas, les résistances mécaniques du béton peuvent être améliorées dès les premiers jours. Ainsi, une teneur en SDB appropriée et un durcissement à la

vapeur approprié utilisant l'énergie solaire peut permettre d'obtenir des bétons avec de meilleures résistances mécaniques, un faible coût et des avantages environnementaux significatifs. Cette idée est très importante pour le domaine de la préfabrication.

2. Objectifs visés

La technique de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire, non seulement accélère l'hydratation du ciment et l'activité pouzzolanique des additions minérales mais activé également la silice moins réactive (comme le SDB), pour une bonne résistance et une grande économie d'énergie électrique. Par conséquent, l'objectif principal de ce travail de recherche est d'évaluer expérimentalement l'effet combiné du SDB et du durcissement à la vapeur par l'énergie solaire sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons.

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 1** : expose une synthèse bibliographique assez riche sur les connaissances relatives aux bétons ordinaires et les additions cimentaires. Ensuite, on met l'accent sur une richesse naturelle disponible partout qui est le sable de dune et fait le point sur les différentes études réalisées sur l'effet de l'addition du SDB sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons.
- ✓ **Chapitre 2** : fait le point sur les méthodes d'accélération du durcissement du béton frais et s'intéresse particulièrement à l'intérêt d'un traitement thermique à la vapeur d'eau par l'énergie solaire, et l'influence de cette méthode de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons.

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

- ✓ **Chapitre 3** : également indispensable, a été consacré à la présentation des 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 techniques de mesures expérimentales employées.

- ✓ **Chapitre 4** : est concerné essentiellement l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux. Il comprend lui-même quatre parties :
 - Analyse et discussion de l'effet du taux de SDB sur les propriétés physico-mécaniques des bétons.
 - Discussion de l'effet combiné du taux de SDB et du durcissement à la vapeur utilisant l'énergie solaire.
 - L'effet du durcissement à l'eau ultérieur après le durcissement à la vapeur sur les caractéristiques mécaniques est également discuté.
 - Analyse et discussion de l'effet combiné de sable de dune broyé et des régimes de durcissement sur la durabilité du béton exposé aux acides agressifs HCl et H₂SO₄.

La thèse est enfin clôturée par une conclusion générale présentant les différents résultats obtenus, suivie de quelques perspectives sur les axes potentiellement exploitables dans la continuité du champ de la recherche investiguée.

Première Partie.
Synthèse
Bibliographiques



Chapitre I .
Effet des additions cimentaires sur les
propriétés des bétons.

I.1. Introduction :

Les additions minérales sont des substances à caractère minéralogique qui sont ajoutées aux matériaux cimentaires pour améliorer leurs qualités. Les additions minérales sont introduites directement dans les compositions cimentaires, y compris la pâte, le mortier et le béton, en substitution massive du ciment. Ce commutateur peut être utile non seulement d'un point de vue économique, mais également d'un point de vue rhéologique et occasionnellement d'un point de vue mécanique et de durabilité. Le but de ce chapitre est d'exposer une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives aux bétons ordinaires et les additions cimentaires. Ensuite, on met l'accent sur une richesse naturelle disponible partout qui est le sable de dune et fait le point sur les différentes études réalisées sur l'effet de l'addition du SDB sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons.

I.2. Historique

Bélidor l'auteur de l'Architecture hydraulique (1737) a étudié la composition du béton et a inventé le terme « béton » dans son sens moderne. La création du ciment par **Louis Vicat** en 1817, l'invention par **Joseph Aspdin** du ciment Portland en 1824 et la construction par Pavin de Lafarge des premiers fours au Teil en 1830 ont ouvert la voie au développement du béton entre 1850 et 1860, la Société des Ciments Français construit la première cimenterie de France dans le Boulonnais. C'est le mariage ciment-métal, appelé ciment armé et éventuellement béton armé, qui permettra au béton d'atteindre son plein potentiel. La première est la **barque Lambot** (1848), suivie par l'immeuble Hennebique à Paris (1898).

Au XXE siècle, le béton se développera considérablement et parallèlement l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint par Freyssinet. Plus récemment les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment avec une réalisation comme l'Arche de la Défense ou en génie civil : pont de l'Île de Ré, pont sur l'Élorn, pont de Normandie et Viaduc de Millau [35].

I.3. Constituants de béton

Les composants de base d'un béton sont l'eau, le ciment et les granulats. Les additions peuvent y être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes.

Les propriétés physico-mécaniques du béton à l'état frais et sous sa forme durcie dépendent de sa composition et nombreux actions mécaniques qu'il subit lors de sa fabrication. Le béton est soumis à diverses procédures de structuration (hydratation, floculation, etc.) et de déstructuration (malaxage, vibration, écoulement, etc.) jusqu'à sa mise en place dans le coffrage.

I.3.1. Ciment

Le ciment le plus utilisé dans le domaine de génie civil est le ciment « Portland » qui est composé de clinker, de gypse CaSO_4 finement broyé et d'additions éventuels. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse. Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface massique où surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elle s'exprime en cm^2/g . La finesse habituelle est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, elle passe à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange bien précis de calcaire (80%) et d'argile (20%) auquel on ajoute 5% de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) destiné à réguler la prise [36]. L'argile est composée de silice, d'alumine et d'autres phases qui sont présentes à de faible pourcentage telles que l'oxyde de fer, le magnésium...etc.

Les oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique C_3S dénommé alite, de silicate bicalcique $\beta\text{C}_2\text{S}$ ou bélite, d'aluminate C_3A ou célite, d'aluminoferrite tétracalcique C_4AF ou Felite et d'autres phases mineures. Le C_3S est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70% de sa masse. Le C_2S , le C_3A et le C_4AF représentent respectivement 15 à 30%, 5 à 10% et 5 à 15% du clinker classique [37].

La fonction du gypse dans le ciment Portland est d'éviter le phénomène de fausse prise du clinker.

Les principaux constituants d'un ciment Portland sont résumés dans le [Tableau I.1](#) suivant :

Tableau I.1. Principales phases du ciment Portland.

	Composition	Abréviation	Proportion (%)
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	60 – 65
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	20 – 25
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8 – 12
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8 – 10
Gypse	CaSO_4	-	3 – 8

En présence d'eau, ces constituants forment des produits d'hydratation qui donnent, avec le temps, une masse ferme et dure : la pâte de ciment hydraté.

I.3.1.1. Principaux produits de l'hydratation du ciment

A. Le silicate de calcium hydraté ou gel CSH

C'est le principal constituant du ciment Portland hydraté. En moyenne, une pâte de ciment durcie contient de 50 à 70% de CSH, ceci est favorable à l'augmentation de la résistance mécanique.

B. La Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou l'hydroxyde de calcium

Elle représente environ 25% de la pâte de ciment. Ses cristaux de taille importante et sa grande solubilité dans l'eau sont susceptibles de limiter la résistance en compression du béton et de diminuer sa durabilité. - D'autres hydrates : il s'agit des aluminates de calcium hydraté et de l'ettringite ([Figure I.1](#)).

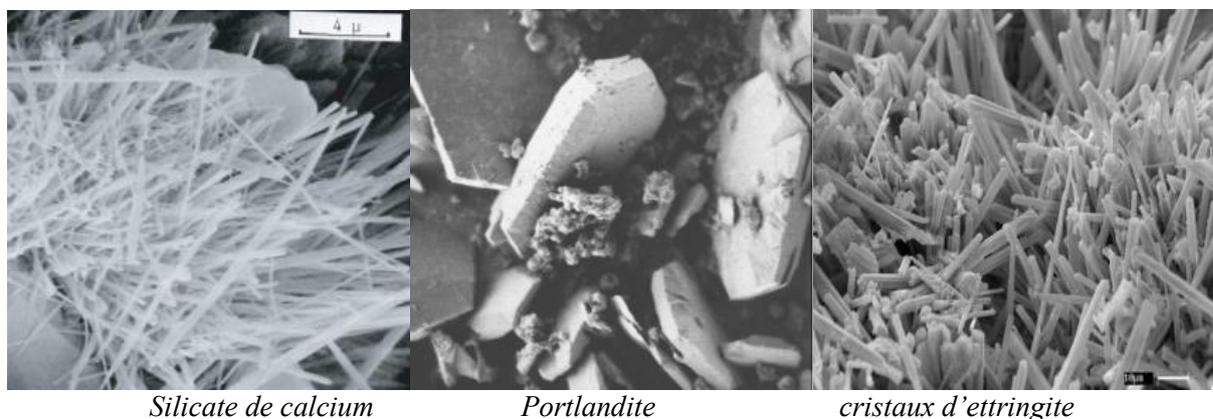


Figure I.1. Image de silicate de calcium hydraté, Portlandite et cristaux d'ettringite obtenue au MEB par Mehta et al. [38].

I.3.2. Eau de gâchage

L'eau dans le béton a deux fonctions principales : elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment et donc de la résistance mécanique. L'eau est constituée de molécules polaires de H₂O dont la taille est approximativement égale à 1 angström. Ces particules exercent les unes sur les autres des forces d'attraction de type Van der Waals qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques.

L'eau étant un milieu diélectrique, elle modifie les forces intergranulaires. Son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (ciments et fines). L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment & fines) avec elle [39].

L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton. Rappelons qu'un ciment Portland demande environ 25% de son poids en eau pour s'hydrater complètement (sous réserve des problèmes de floculation et d'expansion). Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications et des performances mécaniques. Le dosage en eau ne peut pas être augmenté au-delà d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entraîner des inconvénients. Les conséquences d'un excès d'eau sont :

- ☒ Risque de ressuage et de ségrégation.
- ☒ Augmentation de la porosité et le retrait.
- ☒ Diminution de la compacité et corrélativement la résistance.

Le dosage en eau doit donc être limité au (juste nécessaire) à l'hydratation du liant et aux exigences d'ouvrabilité. L'eau est le mal nécessaire de réglage le plus simple de la consistance, mais son augmentation entraîne une diminution de la résistance à la compression de béton et affecte la durabilité.

I.3.3. Squelette granulaire

Les granulats proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles, par criblage et concassage de silex, de calcaire dur, de silico-calcaire, de granite, de quartzite... ils occupent près de 3/4 du volume total du béton et constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau[40]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière

considérable sur le comportement du béton à l'état frais. La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats : Sable 0/D avec $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$, Gravillon d/D avec $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$ et Grave 0/D avec $D > 6,3 \text{ mm}$.

La granulométrie désirée est déterminée selon la surface spécifique du granulat, le volume relatif occupé par le granulat, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation et réduisent le ressuage du béton frais. La majorité des granulats peut être considérée comme inerte et inactive.

Selon les résultats de Rossi et Toutlemonde[41], la granulométrie joue un rôle important sur la déformation au seuil de non-linéarité, plus le volume de granulats grossiers est élevé, plus faible est cette déformation. Un volume plus élevé de granulats grossiers a donc tendance à anticiper la propagation des microfissures ce qui s'explique par le fait que les interfaces des granulats les plus grossiers sont plus faibles que ceux des granulats plus fins.

I.3.4. Additions cimentaires

I.3.4.1. Définition

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Les additions permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives.

Contrairement aux adjuvants, les additions doivent être prises en compte dans le calcul de la composition du béton.

Des additions, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire.

Les pays industrialisés tels que les États-Unis, Russie, France, Allemagne, Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau [42].

I.3.4.2. Utilisation des additions minérales en Algérie

Malgré le fait que l'utilisation d'additifs minéraux soit devenue omniprésente dans le monde, elle est encore extrêmement limitée en Algérie. Malgré la disponibilité d'énormes quantités d'additifs tels que le laitier granulé, le calcaire et la pouzzolane naturelle, et leur coût relativement

peu élevé par rapport au ciment, ces matériaux ne sont pas souvent utilisés dans le génie civil. De nombreuses recherches ont été menées sur l'influence des ajouts minéraux sur diverses caractéristiques du béton. L'utilisation d'additifs est désormais réservée à l'industrie cimentière pour la création de ciment composé. Le [Tableau I.2](#) présente un résumé des additifs utilisés par les cimentiers algériens.

Tableau I.2. utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes [43]

Cimenteries	Ajouts utilisés
Ain touta (Batna)	Pouzzolane
Ain El kebira (Skikda)	
Hamma Bouziane (Constantine)	
Hadjar Soud (Skikda)	Laitier granulé
Tebessa	
Meftah (Blida)	Tuf/Calcaire Calcaire/tuf
Rais Hamidou (Alger)	
Sour El Ghozlane (Bouira)	
Chlef	Calcaire
M'sila	Laitier granulé Pouzzolane
Beni Saf (Tlemcen)	Pouzzolane
Zahana (Oran)	
Saida	

I.3.4.3. Classification des additions

L'un des moyens efficaces qui existe pour augmenter la production du ciment est d'utiliser des additions qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs.

Tableau I.3. Classification des additions selon leur réactivité

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	Fortement Réactif	Ciments spéciaux, Chaux hydraulique.
Hydraulique Latent		Laitier granulé, Cendres volantes riches en calcium (Calciques).
Pouzzolanique	Fortement Réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvres en calcium, Pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, Tufs volcaniques, Trass, Phonolithe, terres à diatomées).
	Faiblement Réactif	Scories cristallines.
Inerte	Non Réactif	Filler (farine calcaire,), Fibres, Pigments colorants, Matières expansives, Dispersions synthétiques.

Les additions peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le [Tableau I.3](#).

A. Fillers calcaires

Le calcaire est une roche sédimentaire, composée majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 . Le calcaire a été introduit dans la fabrication des ciments à la suite des deux guerres mondiales pour augmenter la production et satisfaire la demande accrue de ce produit. Ainsi, son emploi a donné des résultats prometteurs de résistance et de durabilité.

Par la suite, plusieurs études ont conclu que les fillers calcaires ont une action bénéfique sur la maniabilité des liants hydrauliques, ainsi que sur les propriétés mécaniques des bétons.

En 1960, le Code Espagnol permit l'introduction de plus de 10% de filler pour des classes faibles de ciment. Puis en 1975, le code fut révisé pour permettre d'incorporer jusqu'à 35% de calcaire. En 1979, une nouvelle Norme Française a permis d'utiliser jusqu'à 35% de laitier, des cendres volantes, de calcaire et de pouzzolane naturelle pour un ciment composé nommé CPJ. En plus, l'introduction de ces quatre classes de ciments a encouragé l'utilisation du ciment au calcaire pour contrôler les classes inférieures tout en assurant une rhéologie satisfaisante. Dès les années 90, plusieurs pays européens révisaient leurs normes et permettaient l'introduction du calcaire en cimenterie comme le BS 7583 en 1992. En 2000, la Norme Européenne EN 197-1 définit quatre types de ciment au calcaire parmi 27 ciments normalisés, ce qui favorise la production de ce type de ciment qui s'élève à 40 millions de tonnes représentant 24% de la production européenne.

Il fut admis que ces fillers avaient principalement un effet physique de comblement de vide et d'amélioration de la porosité. De nos jours, des travaux laissent entrevoir une autre efficacité provenant de réactions superficielles entre les grains de calcite et le ciment, d'où on peut tirer les constatations suivantes :

- Le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydraté.
- L'ion CO_3 - peut se substituer aux ions SO_4 - dans les sulfates hydratés.
- Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du ciment et plus particulièrement celle de son composé principal ; le silicate tricalcique.
- Le ciment au calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments pouzzolaniques[44,45].

B. Laitier granulé des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une

fois sorti du four, il subit un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir en présence de l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ce sous-produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistra la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis aux USA (1896). Cependant, son utilisation a rencontré des difficultés à cause des faibles résistances engendrées. Progressivement, cette inquiétude a disparu grâce à une optimisation entre les propriétés chimiques, le taux de verre et l'activité, ce qui a rendu le ciment au laitier très répandu aujourd'hui. Son utilisation en cimenterie s'est étendue à travers le monde à cause de ses performances mécaniques, de son économie et de sa valeur écologique[46].

C. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques, scoriacées, essentiellement stromboliennes et basiques, c'est-à-dire d'une composition basaltique, sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétique ou d'hématite.

Avant la découverte du ciment Portland, on n'utilisait à l'échelle mondiale que des liants composés de pouzzolane et de chaux. Puis leur utilisation fut délaissée à cause de leurs faibles résistances et de la lenteur de leur prise. Toutefois grâce à ses avantages techniques, la pouzzolane naturelle est devenue très pratique dans la construction, en y substituant le ciment Portland.

Le ciment à la pouzzolane naturelle fut employé en Italie en 1910, seulement sa fabrication n'a pas été développée à cause de la baisse considérable de ses résistances mécaniques. Ainsi son utilisation s'est orientée uniquement vers les ouvrages maritimes. Après des progrès conséquents dans la maîtrise de son activité, le ciment à la pouzzolane devint normalisé dans le code italien en 1929. Aux USA, un ciment à la pouzzolane a été utilisé entre 1910 et 1912 pour la construction de l'aqueduc de Los Angeles. Dans les années trente, la California Division of High Ways s'est servi d'un ciment à la pouzzolane résistant aux sulfates pour la construction du Golden Gate à San Francisco. En 1935, un ciment Portland à la pouzzolane a été mis en œuvre dans la construction du barrage de Bonneville sur le fleuve Columbia. Aujourd'hui, plusieurs pays utilisent la pouzzolane naturelle dans l'industrie cimentaire tels que la Chine, l'Allemagne, la Grèce, la Turquie, le Mexique et l'Algérie[47].

D. Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Leurs particules ont une forme sphérique avec un diamètre allant de 1 à 150 μm . En 1937, Davis de l'Université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie. En 1948, la construction du barrage de Hungry Horse aux USA fut la première application pratique. Depuis, les études se sont multipliées et l'utilisation de ses cendres s'est énormément répandue grâce aux améliorations apportées au béton et à l'économie enregistrée par leur emploi[48].

E. Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du ferrosilicium (Figure I.2), est un matériau hautement pouzzolanique utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Il peut être ajouté directement au béton en tant qu'ingrédient individuel ou dans un mélange de ciment Portland et de fumée de silice. Le comité ACI 234 estime qu'au moins 120 000 tonnes métriques (130 000 tonnes) de fumée de silice sont utilisées chaque année dans le béton dans le monde. En utilisant ce chiffre, plus de 6 millions de mètres cubes (près de 8 millions de verges cubes) de béton de fumée de silice sont placés dans le monde chaque année[49].

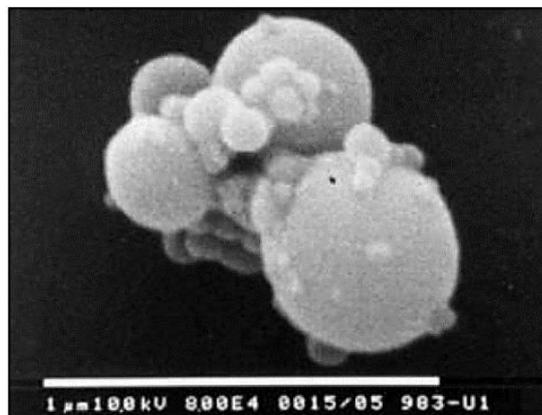


Figure I.2. Image au microscope électronique à balayage MEB de la fumée de silice [49]

La fumée de silice a été introduite dans le ciment par les Norvégiens en 1952 Bernhart mettait en évidence l'amélioration des résistances mécaniques apportées par cette addition. La première utilisation de la fumée de silice dans le béton de construction a eu lieu en 1971 à la fonderie de Fiskaa en Norvège Depuis 1979, les ciments Islandais renferment de 6 à 7 % de fumée de silice [49].

I.3.4.4. Avantages des additions minérales

La fabrication du ciment Portland consomme une quantité considérable d'énergie et des ressources naturelles. L'introduction d'un liant moins chère pour minimiser la consommation d'énergie en utilisant des matériaux locaux et naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment. Les ajouts permettent d'améliorer les caractéristiques du béton. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir des bénéfices économiques écologiques et techniques.

A. Avantages économiques

- Moins chers que le ciment Portland donc réduit le prix du ciment et du béton
- Minimiser les dépenses d'énergie pour broyer une grande quantité.
- Valorisation des matériaux locaux

B. Avantages écologiques et environnementaux

- Fabrication d'un ciment par des additions réduit d'autant les émissions de CO₂ par rapport un ciment sans ajout.
- Élimination des sous-produits non exploités dans la nature.

C. Avantages techniques

- Augmente la maniabilité de béton et réduit la quantité d'eau de gâchage dans le cas à l'utilisé des ajouts de particules très fines.
- Améliorent la résistance à la compression.
- Diminué la chaleur d'hydratation dégagée du béton.
- Amélioration de la durabilité du béton.

I.3.4.5. Effets des additions minérales sur les matrices cimentaires

Dans cette partie nous allons analyser les effets des différentes additions minérales sur les mortiers et bétons à l'état frais et à l'état durci en général et des additions siliceuses (sable de dunes broyé SDB) en particulier.

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. À l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions minérales interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés. En plus, certaines additions peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire.

Zhang et Han [50] étudient l'influence des ajouts ultrafins sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment et découvrent que la contrainte de cisaillement augmente avec la quantité d'ajout ultrafin intégré, tandis que la viscosité de la pâte change avec la nature et la quantité d'ajout. Lorsque le taux de substitution du ciment par des ajouts de fumée de silice, de cendres volantes ou de calcaire est inférieur à 15 %, la viscosité de la pâte est considérablement réduite. Cela n'a pas été remarqué pour les ajouts de laitier.

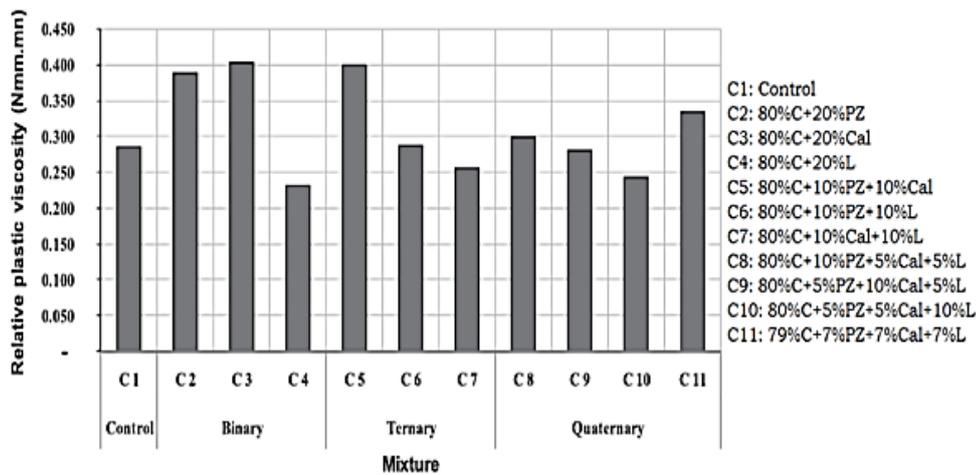


Figure I.3. Variation de la viscosité plastique relative des pâtes de ciment avec ajouts cimentaires [51].

Selon Bouglada et al [51], à monte que par rapport aux pâtes à base de pouzzolane ou de calcaire, la pâte à base de laitier présente les meilleures propriétés rhéologiques indiquant un bon comportement (Figure I.3). La double ou triple interaction du laitier avec les autres ajouts (pouzzolane, calcaire), joue un rôle important (régulateur) dans la diminution de la viscosité des pâtes ternaires (C6, C7) et les pâtes quaternaires (C10).

Bien que les mécanismes sous-jacents à ces modifications semblent particulièrement compliqués, plusieurs recherches récentes s'accordent sur trois effets principaux des ajouts dans un matériau cimentaire.[52–56] : **Un effet granulaire** provenant d'altérations de la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'un adjuvant, et agissant sur les

caractéristiques rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais. **Un effet physico-chimique et microstructural** formé par diverses interactions entre les particules d'addition et le processus d'hydratation du ciment, et qui influence l'évolution de l'hydratation du ciment lors de la prise et du durcissement[57]. **Un effet purement chimique** particulier à certains ajouts de ciment (principalement présents dans le cas d'ajouts tels que la fumée de silice, les cendres volantes de houille et le laitier vitrifié moulu de haut fourneau), qui intervient lors de l'hydratation du ciment et interagit fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural[55,58,59].

A. Les Laitiers

A.1. Effet sur la rhéologie

Hadjsadok et al, 2012 [60] à montre que la consistance et l'ouvrabilité des bétons et des mortiers au laitier sont plus grandes que celles des mortiers et des bétons ordinaires (Tableau I.4). Cette amélioration est due d'une part, à la surface caractéristique des particules du laitier. Ces particules sont en fait denses, lisses et n'absorbent pas beaucoup d'eau dans la phase initiale d'hydratation, et d'autre part à l'augmentation de la viscosité de la pâte des ciments au laitier en fonction de l'accroissement du pourcentage de substitution en laitier.

Tableau I.4. Effet de l'incorporation du laitier broyé d'El-Hadjar sur la maniabilité du béton [60].

Concrete	W/B	Binder (Kg/m ³)		Aggregates (kg/m ³)			SP(%)	Slump (mm)
		Cement	Slag	Sand 0/5	G1 8/15	G2 15/28		
A0	0.65	365	0	734	468	655	-	75
A15		310	55	734	468	655	-	80
A30		205	110	734	468	655	-	97
A50		182.5	182.5	734	468	655	-	104
B0	0.45	365	0	734	468	655	1.8	55
B15		310	55	734	468	655	1.8	61
B30		205	110	734	468	655	1.8	58
B50		182.5	182.5	734	468	655	1.8	64

A.2. Effet sur la résistance mécanique

Demirboga [61] a montré que l'influence des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers, que le laitier granulé de haut fourneau engendrait une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours.

Boldyrev et al. [62], rapportent que l'ajout de laitier réduit la résistance du ciment dans un premier temps. Cependant, après 28 jours, les ciments contenant 15% de laitier n'ont aucun effet sur les ciments témoins sans constituants secondaires.

L'ajout de laitier dans une proportion de 30 % réduit la résistance de 10 % par rapport au ciment témoin, mais même dans ce cas, l'effet pouzzolanique de l'ajout (laitier) est visible (Figure I.4).

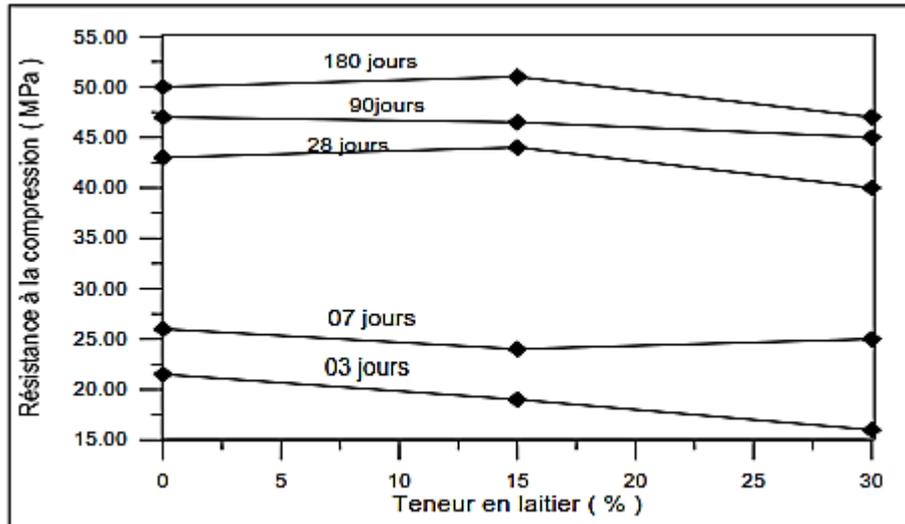


Figure I.4. Influence du laitier sur la résistance à la compression du ciment [62]

Boubekour et al. [63] ont démontré que le remplacement du ciment par du laitier entraînait de mauvaises résistances à la compression à un âge précoce (2 à 7 jours) (Figure I.5). Cela résulte de la faible activité hydraulique des scories granulées d'El Hadjar. A 90 jours, la résistance des ciments au laitier se rapproche de celle du CEM I, notamment pour les ciments contenant 20% et 30% de laitier.

Sharmila et al[64], à montre que la résistance à la compression du béton contient de laitier très fin était presque atteint la résistance à la compression désignée à l'âge de 28 jours. Le remplacement du ciment par laitier très fin au-delà de 10 % n'apporte pas d'amélioration significative des performances.

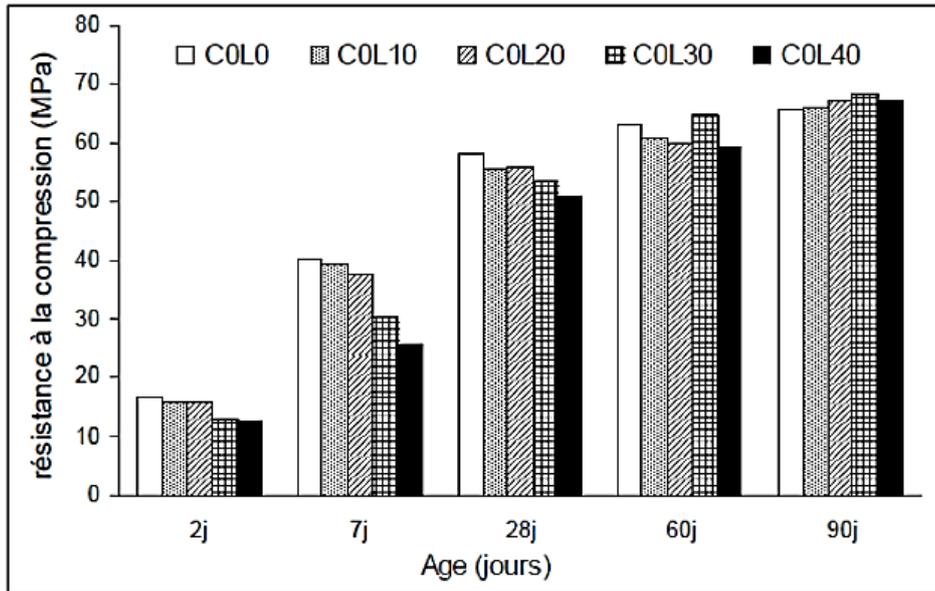


Figure I.5. Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression [63].

B. Les Pouzzolanes

B.1. Effet sur la rhéologie

Selon les recherches Soroka *et al.* [42], l'ajout pouzzolanique, réduit la perte de fluidité (maniabilité). Cette réduction est en fonction de pourcentage d'incorporation de l'ajout minéral (Figure I.6). Soroka a remarqué aussi que pour le béton ordinaire perd presque totalement son ouvrabilité après 90 mn de son gâchage, par rapport au béton pouzzolanique qui garde sa maniabilité avec le temps de malaxage[42].

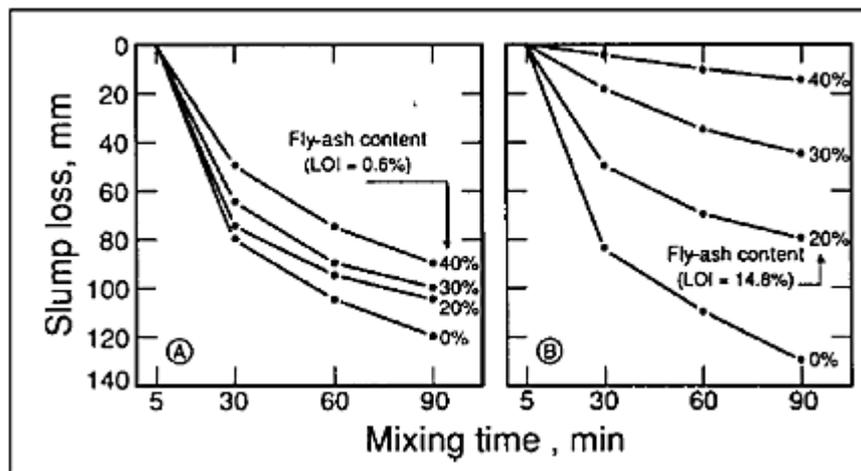


Figure I.6. Effet d'incorporation des deux types de cendres volantes (pouzzolaniques) dans les CPA sur la perte d'affaissement du béton frais[42].

B.2. Effet sur la résistance mécanique

Hammat et *al.* [65] a montré que L'incorporation de pouzzolane naturelle réduit la résistance à la compression premiers âges (Figure I.7). Des réductions allant jusqu'à 49 % ont été observées à l'âge de 1 jour. En revanche, à long terme, une amélioration de la résistance à la compression a été observée. Une amélioration d'environ 3 MPa a été notée à 180 jours [65].

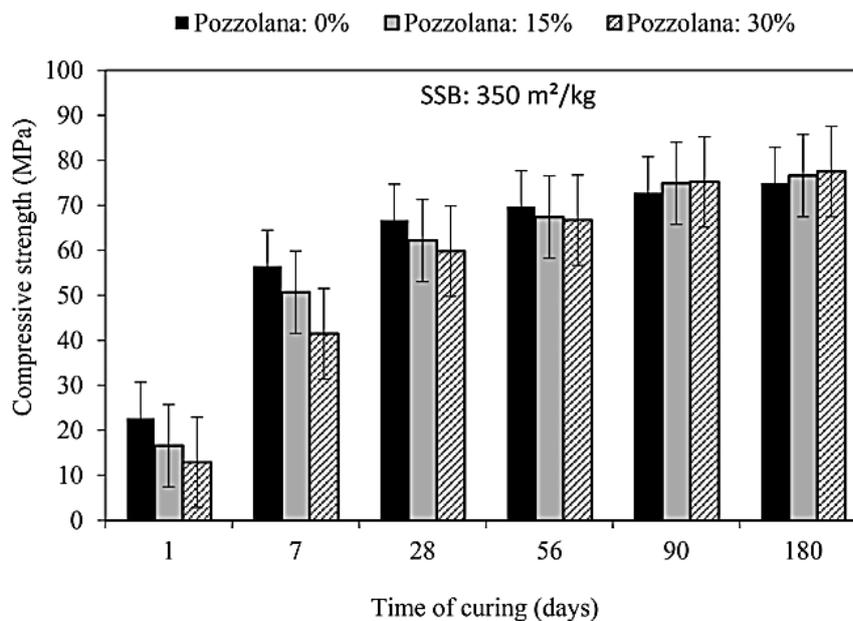


Figure I.7. Effet du pourcentage de pouzzolane sur la résistance à la compression[65]

Les travaux de Arroudj et *al.* [66] montrent que la structure minéralogique (semi-cristalline) de la pouzzolane et sa composition chimique (forte présence d'alumine et de chaux) sont les principales causes d'altérations rhéologiques et mécaniques comportement des mortiers.

Les travaux de Mouli et *al.* [67]et Deboucha et *al* [68] montrent que le développement des résistances mécaniques des ciments aux ajouts soit lent, les résistances à long terme dépassent, quelques fois, celles du ciment témoin, Cette augmentation des résistances est probablement due à l'augmentation de la quantité de C-S-H dans les mélanges, ainsi qu'à l'affinage des pores Toutes ont mis en évidence l'importance du choix d'un taux optimal de l'addition dans le mélange pour l'amélioration des performances mécaniques. D'après Binici et al, [69] l'évolution des résistances est liée à la variation de la chaleur d'hydratation des ciments, aux ajouts, et à leur finesse.

La Figure I.8. Figure I.8 montre les résultats d'essais de compression et de traction effectués sur des bétons avec ajouts de pouzzolane naturelle de Bouhamidi.

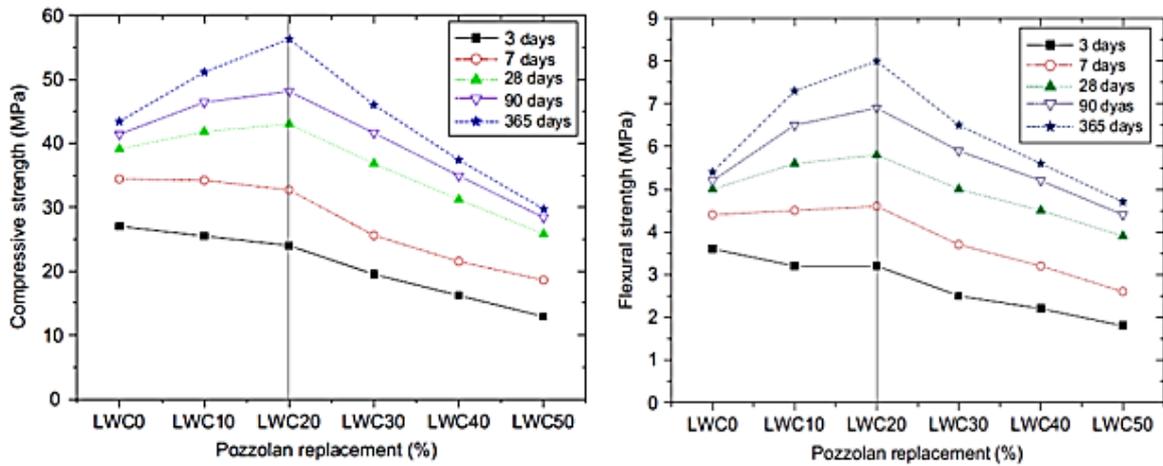


Figure I.8. Essais mécaniques sur les bétons avec ajouts de pouzzolane naturelle de Bouhamidi [67].

C. Les fillers calcaires

C.1. Effet sur la rhéologie

D'après les travaux de recherche de Nouari *et al.* [70], qui ont constaté que la maniabilité des ciments et des mortiers contenant des fines calcaires est affectée d'une manière très sensible. Elle passe de 55%, pour le témoin (0% d'ajout calcaire) à 45 % pour une teneur de 10 %, et atteint 36 % pour 20 % de fines, (Figure I.9).

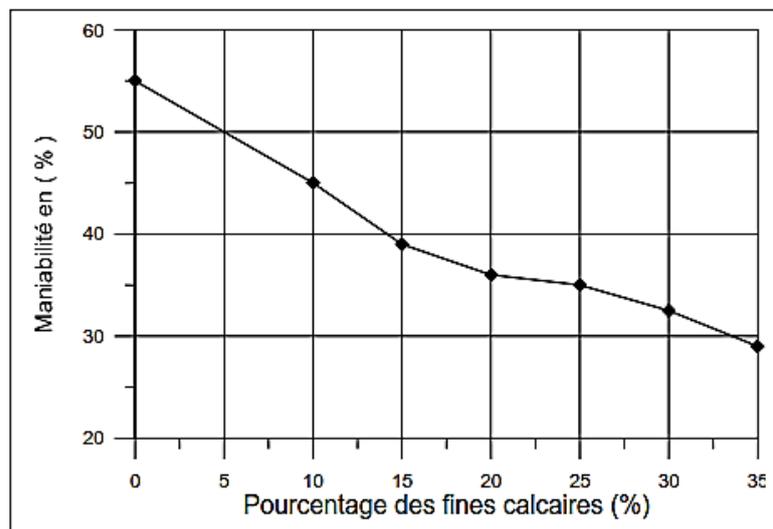


Figure I.9. Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires[70].

C.2. Effet sur la résistance mécanique

D'après les travaux de Pera et *al.*[71] qui ont comparé l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des BV. Ces auteurs ont observé une accélération de la résistance au jeune âge jusqu'à 28 jours. Ceci s'explique par l'hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler. Cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante (Figure I.10).

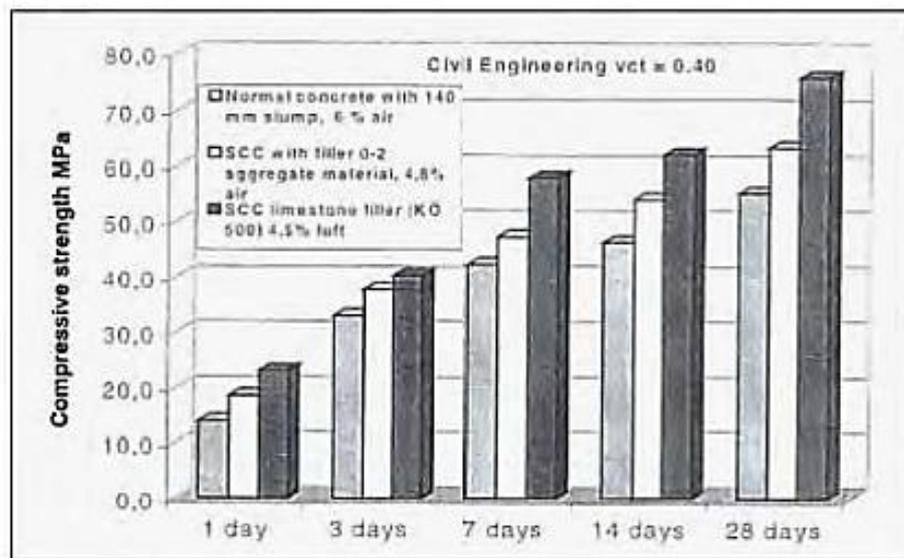


Figure I.10. Évolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [71].

D. Les cendres volantes

D.1. Effet sur la rhéologie

Les chercheurs Lange et *al.* [72]. Ont conclu que, pour une certaine fluidité, l'ajout d'une quantité déterminée de cendres volantes diminuait la quantité d'eau et augmentait la fluidité du mélange. La forme sphérique des particules, qui permet un empilement granulaire et diminue les frottements inter-particules, explique ce comportement. La forme sphérique réduit également le rapport de la surface des particules au volume, ce qui entraîne une diminution de la consommation d'eau [72,73].

D.2. Effet sur la résistance mécanique

En comparant les résistances mécaniques de mélanges ternaires à base de 15 % de métakaolin et 30% de laitier et ceux de mélanges binaires à base de 45% de cendres volantes ou de laitier au témoin, Sullivan et *al.* [74] obtiennent des résistances comparables à celles du témoin sauf dans le cas du mélange avec les cendres volantes seules (Figure I.11).

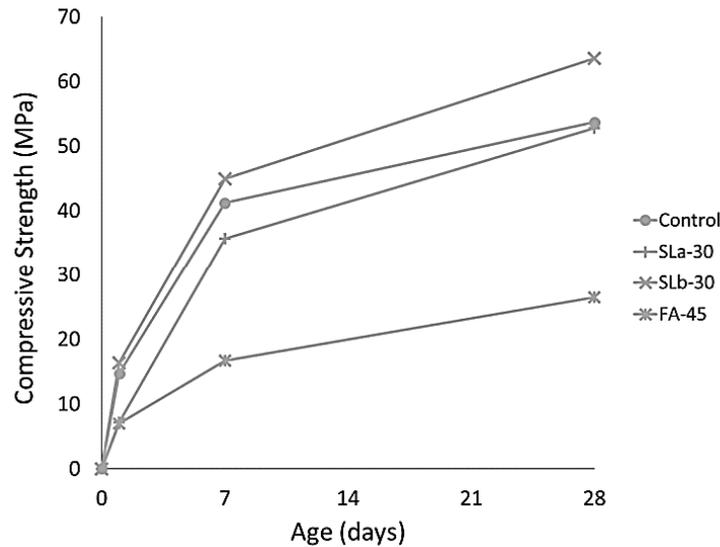


Figure I.11. Évolution de la résistance à la compression pour SCM binaire non métakaolin [74].

E. Les fumées de silice

E.1. Effet sur la rhéologie

Jahren [75] a montré que le béton frais contenant de la fumée de silice est plus cohésif et moins sujet à la ségrégation que le béton sans fumée de silice. L'expérience a montré qu'il est nécessaire d'augmenter l'affaissement initial du béton avec de la fumée de silice d'environ 50 mm au-dessus de celui requis pour le béton de ciment portland conventionnel pour maintenir la même maniabilité apparente.

L'incorporation de fumée de silice rend parfois le béton collant, bien que les avis soient partagés sur cet aspect. Pour Park et al, [76] elle augmente le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges.

Park et al[76]. En étudiant les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires contenant des additions minérales en utilisant le rhéomètre, que dans les mélanges ciment-additions de fumée de silice, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition (Figure I.12).

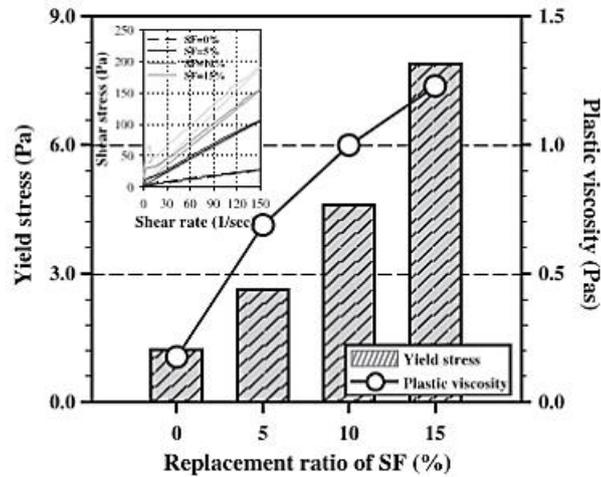


Figure I.12. Effets de fumée de silice sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [76].

De Larard et al.[77] ont montré que l'effet favorable de la fumée de silice sur l'empilement granulaire des matériaux cimentaire était représenté par une variation de la maniabilité d'un mortier en fonction de la quantité de la fumée de silice incorporée, (Figure I.13).

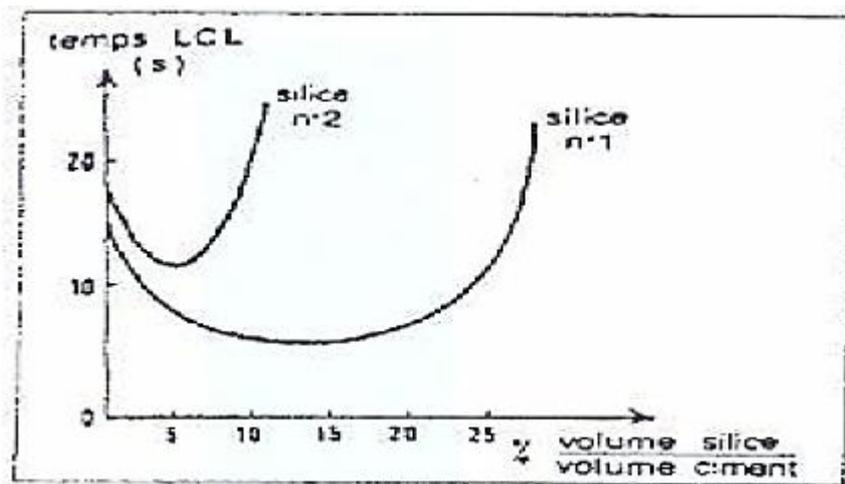


Figure I.13. Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier selon De Larard & al[77].

E.2. Effet sur la résistance mécanique

Cette section passe en revue sur les effets de la fumée de silice au caractéristiques mécaniques du béton. De nombreuses améliorations des propriétés mécaniques semblent être liées aux améliorations de la force de liaison entre la pâte et l'agrégat. Par conséquent, l'influence des propriétés du granulats sur les caractéristiques mécaniques du béton devient plus importante dans le béton à la fumée de silice. La taille, la durabilité et les propriétés techniques deviennent des facteurs importants à prendre en compte lors de la sélection du granulats approprié pour le béton.

Le développement de la résistance est caractérisé par une résistance plus élevée pour le même w/cm que le béton sans fumée de silice. Une plus grande partie de la résistance est développée à jeune âge, tandis que le gain de résistance tardif (au-delà de 90 jours) est généralement inférieur à celui du béton sans fumée de silice ;

La principale contribution de la fumée de silice au développement de la résistance du béton à des températures de cure normales (autres que des conditions de cure accélérées) a lieu à des âges précoces jusqu'à 28 jours.

D'après les études de Carette et Malhotra [78] [79], la résistance à la compression à 1 jour du béton à la fumée de silice est à peu près égale à celle du béton témoin lorsque la fumée de silice est utilisée en remplacement direct. Lorsque la fumée de silice est utilisée comme ajout au mélange de ciment Portland et de cendres volantes, les résistances à 1 jour peuvent être sensiblement plus élevées que le témoin, en fonction de la quantité de fumée de silice ajoutée. A 28 jours, la résistance à la compression du béton de fumée de silice est toujours plus élevée et, dans certains cas de manière très clair, comme le montrent les [Figure I.14](#) et [Figure I.15](#).

La contribution de la fumée de silice au développement de la résistance après 28 jours est minime. Cette situation est différente du béton fabriqué avec des cendres volantes, auquel cas les réactions pouzzolaniques sont très lentes aux premiers âges, et les contributions au développement de la résistance du béton sont généralement évidentes après 28 jours, puis se poursuivent pendant plus d'un an.

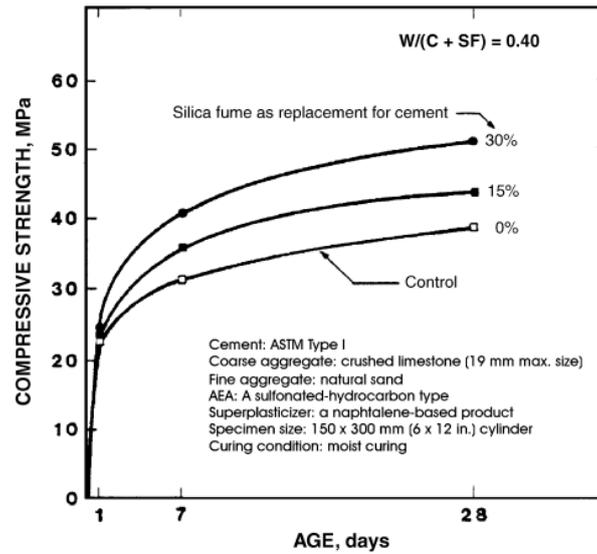


Figure I.14. Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression de béton[78]

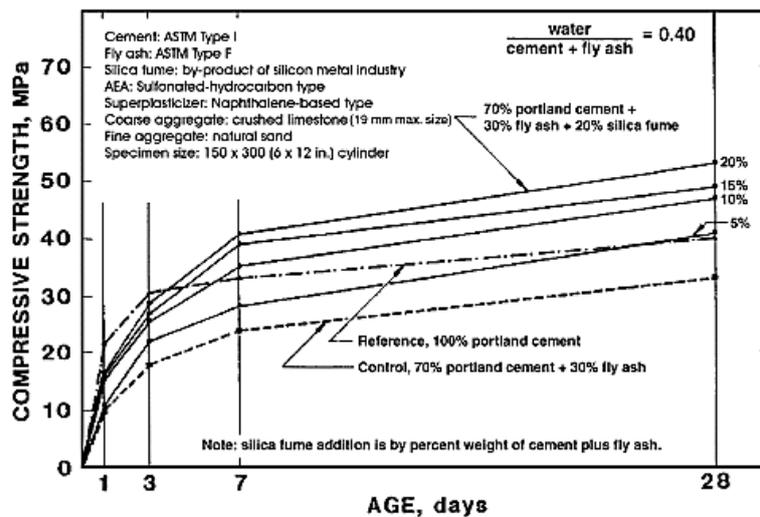


Figure I.15. Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression de béton contenant des cendres volantes[79].

En bref, Il existe un nombre limité des recherches qui montrent la réductions apparentes de la résistance à la compression du béton à la fumée de silice à des âges plus avancés (plus de 90 jours)[80].

Une perte de résistance a également été constatée pour certaines conditions dans le béton sans fumée de silice [81], où une « régression », par exemple une résistance plus faible mesurée à 1 an qu'à 90 jours a été observée.

Read et al. [82], ont étudié les caractéristiques de développement de la résistance du béton à haute résistance incorporant 8 et 12 % de fumée de silice par rapport à un béton témoin de ciment portland avec le même w/cm en utilisant des cylindres coulés et des noyaux forés à partir de gros éléments en béton et durcis sous différents régimes. Les résultats ont indiqué qu'à des âges allant jusqu'à 1 an, le béton de fumée de silice était moins affecté par les différentes conditions de cure que le béton témoin. Le béton à la fumée de silice avait une résistance au jeune âge plus élevée que le béton témoin ; cependant, cet avantage semble se perdre à des âges plus avancés. Indépendamment des conditions de durcissement, le béton de fumée de silice avait un développement de résistance plus rapide jusqu'à 91 jours, après quoi ses gains de résistance étaient généralement inférieurs à ceux du béton témoin.

Kwan [83] a montré que, la résistance en compression des mortiers à 28 jours, quel que soit le rapport eau/liant, augmente avec la teneur en fumée de silice dans la limite de 15% de substitution du ciment par l'addition (Figure I.16).

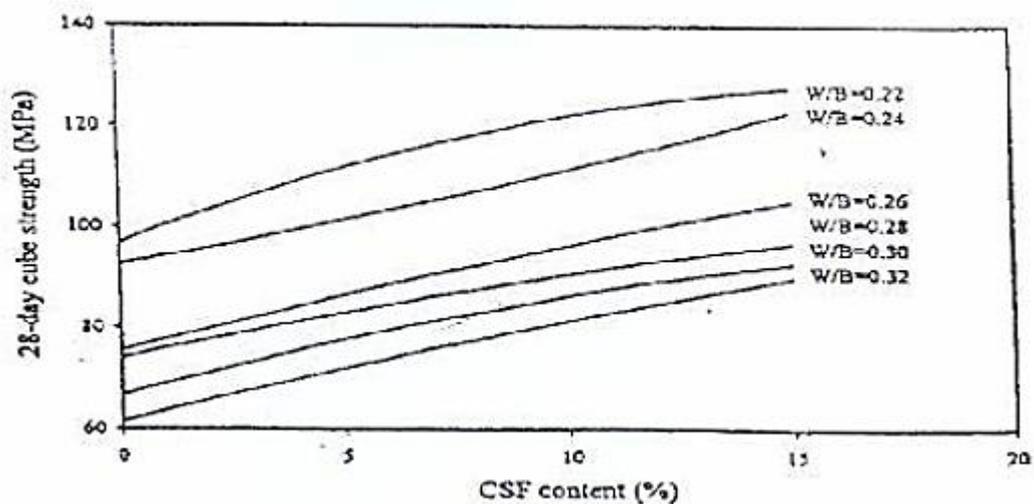


Figure I.16. Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant, selon Kwan[83].

De même, Rao [84] à conclure que pendant les premiers âges, 3 et 7 jours, la résistance des mortiers avec de la fumée de silice en général a été significativement élevée à n'importe quel rapport W/L (Figure I.17), les teneurs optimales en fumée de silice pour obtenir la résistance à la compression la plus élevée se situent entre 17,5 % et 22,5 % et la teneur optimale en fumée de silice augmente avec le rapport W/L à tout âge.

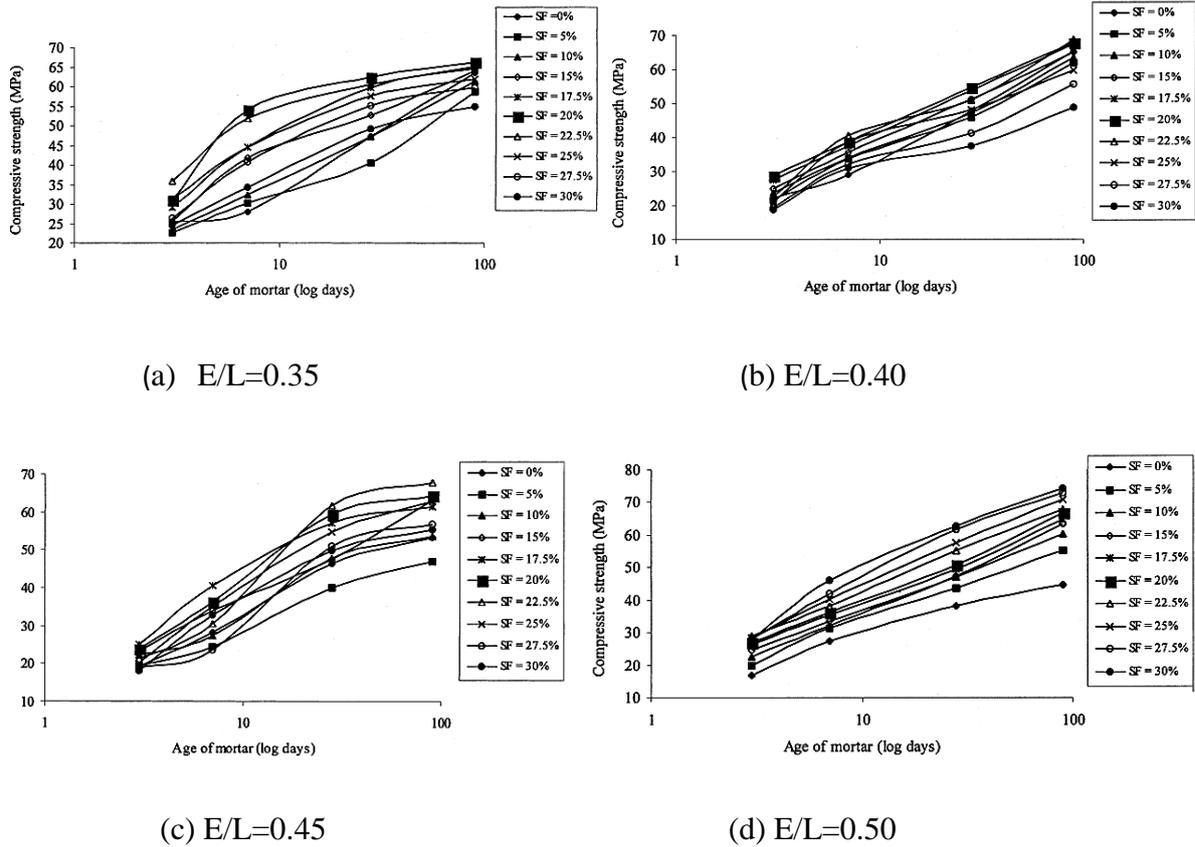


Figure I.17. Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction de temps (échelle logarithmique) à différentes teneurs en fumée de silice et différents rapport E/L [84].

E.3. Chaleur d'hydratation

La présence de fumée de silice augmente la vitesse d'évolution de la chaleur en raison de son effet accélérateur sur l'hydratation du ciment. Les données sur la quantité totale de chaleur dégagée sont contradictoires, certaines indiquant des augmentations et d'autres des diminutions. Il est conseillé à l'utilisateur de tester les matériaux de travail dans les combinaisons proposées pour les applications dans lesquelles le dégagement de chaleur est préoccupant.

La fumée de silice en raison de sa grande surface spécifique accélère l'hydratation de l'alite [79]. Le dégagement de chaleur initial de l'alite est intensifié en présence de silice active. Par conséquent on pourrait s'attendre à ce que le ciment Portland à haute teneur en alite bénéficie des fumées de silice plus de CH est créé qui à son tour est disponible pour réagir de manière pouzzolanique avec la fumée de silice. Cependant a utilisé de la fumée de silice avec du ciment Portland et a trouvé un taux réduit d'hydratation de l'alite[49].

Les données sur le développement de la chaleur dans les systèmes de fumée portland-ciment-silice se rapportent à des essais au jeune âge. Huang et Feldman (1985a)[85] ont étudié une pâte de ciment contenant 0, 10, 20 et 30 % de fumée de silice en utilisant la calorimétrie par conduction. Deux pics étaient discernables (Figure I.18) - un survenant à 5 heures et l'autre à environ 6 à 10 heures. Bien que le taux de dégagement de chaleur, exprimé sur une base de ciment, soit plus élevé à mesure que la quantité de fumée de silice augmente, la chaleur totale dégagée, exprimée sur la base des solides totaux dans le mélange, diminue quelque peu lorsque la fumée de silice se substitue au ciment. Les données de Kumar et Roy (1984)[86] indiquent que la chaleur totale peut être réduite de 15 à 30 %, selon le ciment particulier et la quantité de fumée de silice utilisée.

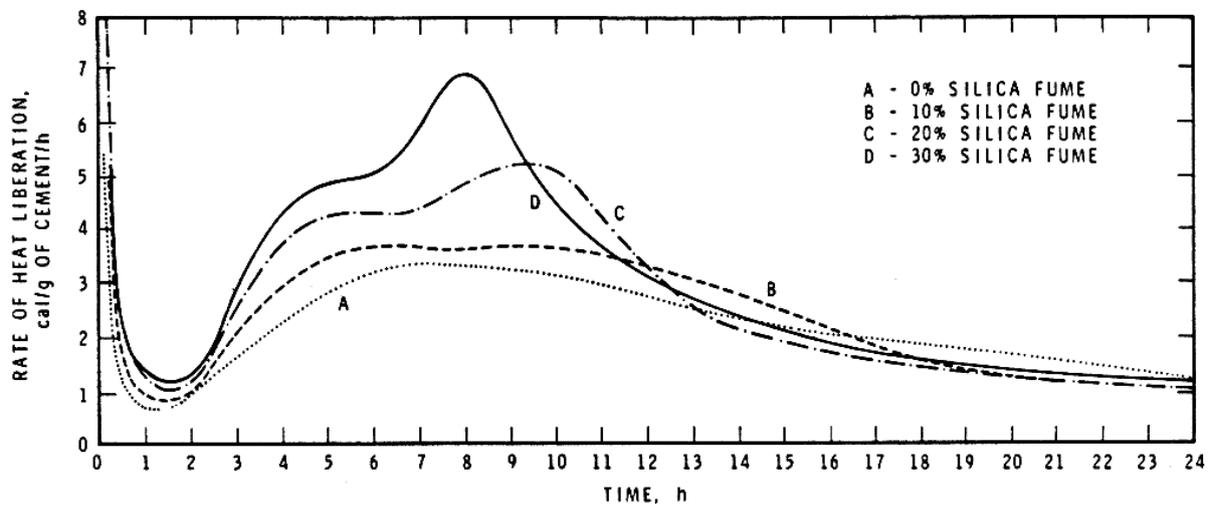


Figure I.18. Taux d'évolution de la chaleur dans les pâtes de fumée ciment-silice[86].

Meland (1983)[87] a réalisé une calorimétrie isotherme sur des pâtes dans lesquelles le ciment Portland était remplacé par 10 ou 20 % de fumée de silice. À l'exception de la combinaison de 10 % de fumée de silice et d'un lignosulfonate WRA, toutes les pâtes ont montré une diminution de la chaleur totale d'hydratation par rapport à une pâte de ciment portland sans fumée de silice. Meland (1983) a attribué le seul cas d'augmentation de la chaleur totale à une interaction possible entre la fumée de silice et le matériau lignosulfonate.

F. *Sable de dune broyé SDB*

Le sable de dunes broyé SDB est un sable obtenu par broyage de sable de dunes d'origine éolienne, est un matériau d'une grande disponibilité en sud Algérien (pratiquement non exploité). Le SDB est composé de minuscules grains de quartz et présente une structure siliceuse cristallisée du type low-quartz (Figure I.19) contrairement au à la fumée de silice qui compose d'une structure amorphe. Le quartz (c-à-d. du SiO_2 , soit du dioxyde de silicium ou de la silice) est l'un des minéraux les plus répandus sur terre.

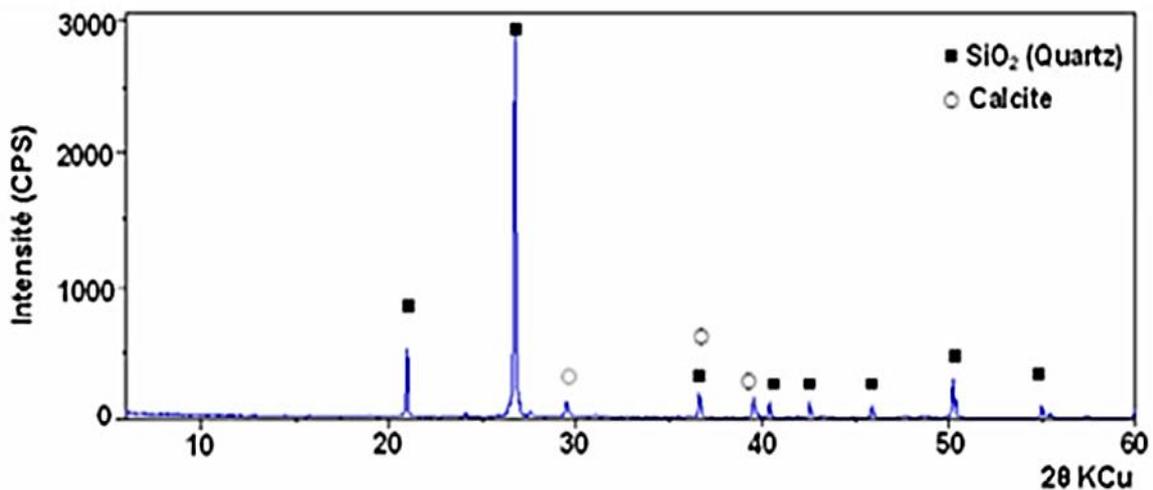


Figure I.19. Nature siliceuse d'un sable de dune broyé DRX [26]

La contribution de l'addition du sable de dune en poudre SDB à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : un effet physico- chimique et un effet chimique. Son rôle est d'une part de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, de réagir en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les propriétés des bétons. Le troisième effet physique est l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

L'analyse par diffractométrie aux rayons X d'une pâte de ciment a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune broyé SDB. En effet, la faible quantité de Portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence de SDB, traduit une réaction pouzzolanique partielle de cette addition, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte.

Selon Arroudj et al[88]. L'addition du sable de dune siliceux broyé SDB au ciment sous forme de substitution permet d'obtenir un nouveau ciment composé à des caractéristiques physico-mécaniques supérieures à celles du ciment sans SDB. De par leur réactivité pouzzolanique et leur rôle de remplissage dû aux fines particules du sable de dune broyé.

La silice cristalline présente une structure tridimensionnelle régulière, le motif de base est un tétraèdre dont chacun des sommets est occupé par un atome d'oxygène et le centre par un atome de silicium. D'après les recherches de Guettala et al[57], qui porte sur l'effet de l'addition du sable de dunes broyé au ciment ; la résistance mécanique à la compression des éprouvettes en béton, a été améliorée à partir de l'âge de 28 jour (Figure I.20)[26][27]. De même façon, l'effet du sable de dune finement broyé sur la résistance la traction est similaire à celui de la résistance à la compression (Figure I.21).

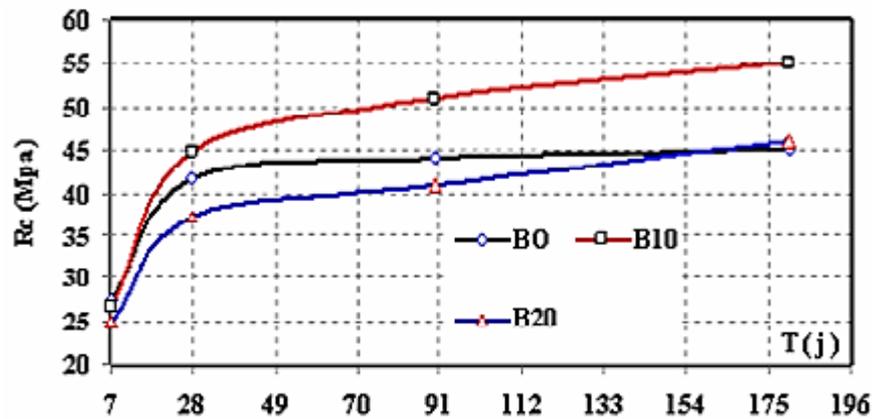


Figure I.20. Résistance à la compression des bétons contenant 10 et 20% SDB en fonction du temps.[26]

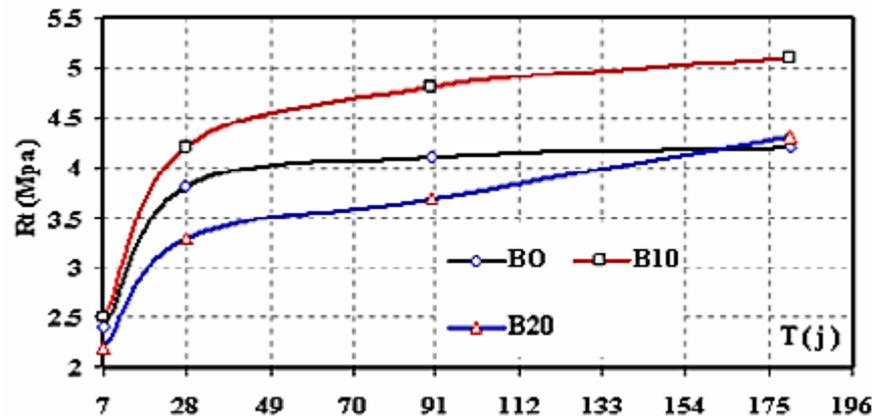


Figure I.21. Résistance à la traction des bétons contenant 10 et 20% SDB en fonction du temps[26].

I.4. Durabilité des bétons

Comme défini dans la littérature la durabilité est la capacité du béton à résister aux intempéries, aux attaques chimiques, à l'abrasion et à d'autres conditions de service. La durabilité est un sujet complexe, et un certain nombre de mécanismes peuvent être impliqués dans la dégradation du béton, concernant à la fois le transport de substances dans et hors du béton et l'effet de ces substances sur le béton.

La durabilité des structures en béton est largement considérée comme une préoccupation majeure pour la communauté scientifique au cours des dernières décennies. Une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins, on peut alors observer des dégradations des bétons par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatique.

I.4.1. Résistances aux eaux agressives

I.4.1.1. Eaux contenant des sulfates

Lorsque le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfates d'ammonium, magnésium, sodium et calcium. Le sulfate de calcium est le plus répandu, il n'est pas considéré comme un sulfate agressif. L'eau contenant de CaSO_4 attaque le béton à cause de la réaction entre CaSO_4 et l'aluminate de calcium hydraté du ciment durci avec la formation d'ettringite expansive. Ce sel est stable dans les solutions qui sont comparativement riches en CaSO_4 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$, comme le cas des pâtes du ciment Portland[89].

Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que CaSO_4 puisqu'il réagit non seulement avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ce dernier réagit avec l'aluminate hydraté et engendre l'ettringite expansive. L'importance de la détérioration due à l'eau sulfatique dépend de la perméabilité du béton et de la concentration des ions agressifs, aussi bien que sur la composition chimique du ciment[90].

Les additions des pouzzolanes naturelles et des fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact[90].

I.4.1.2. Eaux contenant des chlorures

A l'exception de l'eau de mer ou l'eau se trouvant à proximité de la mer, la teneur de l'eau en chlorure est généralement très faible et par conséquent non nocive. L'action des agents de dégivrage à base de chlore est révélée par gonflement, fissuration et désagrégation du béton[90].

Les chlorures, qui peuvent arriver en contact avec le béton, le plus souvent sont les chlorures de sodium et calcium, qui sont largement utilisés comme des sels de dégivrage, le chlorure de calcium est considéré comme le plus agressif[90].

Les mécanismes qui conduisent à la détérioration sont différents, et peuvent affecter le béton directement et indirectement. Pour ce qui est de l'attaque directe, on peut dire que quand le béton arrive en contact avec les solutions de chlorure, il se gonfle et perd sa résistance même si les solutions ne sont pas très concentrées. D'ailleurs, les chlorures contribuent au lessivage de la chaux à travers un mécanisme qui n'est pas encore complètement expliqué, et lequel dépend de nombreux facteurs d'environnement (pluie, température,...) mais aussi sur le type de ciment[89].

I.4.2. Mécanisme d'attaques de HCL et H₂SO₄

I.4.2.1. Attaque de l'HCl

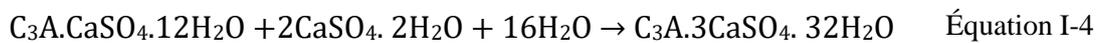
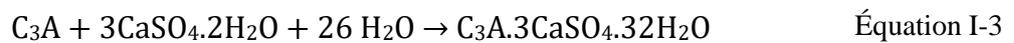
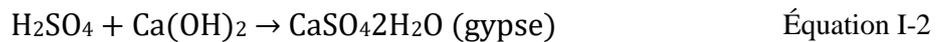
L'acide chlorhydrique HCl a réagi avec une partie d'hydroxyde de calcium (la portlandite Ca(OH)₂) libérée au cours de l'hydratation des silicates de ciment et a formé un sel de chlorure de calcium CaCl₂ fortement soluble dans l'eau selon la réaction suivante :



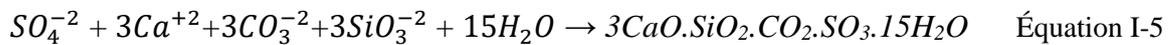
Les sels chlorures de calcium CaCl₂ sont facilement enlevés de la pâte de ciment, ce qui fragilise sa structure totale et devient moins cohésif. De ce fait la masse de béton est perdue et les propriétés mécaniques sont diminuées[91].

I.4.2.2. 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 [92,93]. 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 [94]. 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. la masse, sera plus grande[91].

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives aux bétons ordinaires, les additions cimentaires et les différentes études réalisées sur l'effet de l'addition du SDB sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons.

Les additions minérales au ciment, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire ternaire.

L'utilisation du sable de dune en poudre améliore globalement la structure poreuse des bétons et contribue aussi à la densification de l'interface mortier/gravier. De ce fait, le sable de dune en poudre modifie les propriétés mécaniques, ce qui permet une nette augmentation de la durabilité des bétons.

Chapitre II .

Effets des méthodes d'accélération du durcissement sur les propriétés du béton

II.1. Introduction :

Le traitement thermique du béton est une technique connue depuis des années, il est souvent appelé thermo-activation. Cette technique est d'utiliser pour accélérer le durcissement des éléments préfabriqués en béton par l'apport de l'énergie thermique au cours de la prise. A cet effet, ce chapitre fait le point sur les méthodes d'accélération du durcissement du béton frais et s'intéresse particulièrement à l'intérêt d'un traitement thermique à la vapeur d'eau par l'énergie solaire, et l'influence de cette méthode de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons.

II.2. Méthodes d'accélération du durcissement du béton :

Parmi les méthodes d'accélération du durcissement du béton le plus utilisée on peut citer :

II.2.1. Les ciments à durcissement rapide

Le ciment Portland à durcissement rapide (Type III), comme son nom l'indique, développe sa résistance plus rapidement que le ciment Portland ordinaire. La vitesse de durcissement ne doit pas être confondue avec la vitesse de prise, les ciments à durcissement rapide et les ciments ordinaire ont des temps de prise similaires.

L'augmentation du taux de gain de résistance du ciment Portland à durcissement rapide est obtenue par une teneur plus élevée en C_3S (supérieure à 55 %, mais parfois aussi élevée que 70 %) et par un broyage plus fin du clinker de ciment.

Le ciment Portland à durcissement rapide a une finesse plus élevée que le ciment Portland ordinaire. Le ciment ASTM (Type III) a une surface spécifique mesurée par la méthode de Blaine de 450 à 600 m^2/kg , contre 300 à 400 m^2/kg pour le ciment de type I.[95]

II.2.2. Le surdosage en ciment

C'est une méthode onéreuse et limitée en performance un surdosage de 50 kg de ciment par m^3 de béton augmente la résistance du béton de 10%, mais à partir de 400 kg de ciment en m^3 de béton, le surdosage devient un effet négatif sur le retrait et le coût du béton.[95]

II.2.3. Utilisation d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement du béton :

Un adjuvant accélérateur est utilisé pour accélérer la vitesse d'hydratation (prise) et développement de la résistance du béton à un jeune âge [96][97].

II.2.4. Utilisation des ciments à forte chaleur d'hydratation initiale :

Les ciments à forte chaleur d'hydratation initiale sont des ciments à particules très fins. La composition minéralogique bien spécifique et contient une grande quantité de C_3A et C_3S , (60% de C_3S et pourcentage en C_3A supérieure à 10%). Ce qui provoque un dégagement de chaleur très fort au début des réactions d'hydratation.[95]

II.3. Traitement thermique de béton :

Le traitement thermique, également appelé thermo-maturation, est une méthode d'accélération des réactions d'hydratation du béton en utilisant une source de chaleur. C'est souvent le moyen le plus efficace d'atteindre une résistance à la compression élevée à un jeune âge.

II.4. Les méthodes du traitement thermique

II.4.1. Méthode de traitement thermique par l'électricité

Il existe différents systèmes pour chauffer électriquement un béton frais placé dans son coffrage. En appliquant une tension de courant alternatif entre des coffrages métalliques, on produit un échauffement direct du béton. Mais l'effet diminue rapidement car la résistance électrique du béton augmente rapidement quand il durcit, en sorte qu'il faut augmenter la tension d'une façon qui peut devenir dangereuse. On peut aussi utiliser des barres d'armature comme électrodes, mais alors il faut bien étudier leur répartition afin que l'échauffement du béton soit régulier et conforme au programme établi. On pourrait aussi incorporer des fils chauffants perdus, mais cela se fait très rarement.

Ou bien avec une installation relativement coûteuse, on peut aussi chauffer le béton au moyen de courant à haute fréquence. En peu de temps, une température déterminée s'établit dans toute la masse de béton. Les éléments sont ensuite isolés et conservent leur chaleur pendant un certain temps comme dans les autres cas. On a pu déterminer par des essais qu'il faut environ 24 kWh pour 1 m³ de béton. En raison du mode de transmission de la chaleur, ce procédé devrait avoir une application particulièrement favorable pour le béton léger. Dans ce cas, la consommation d'énergie serait d'environ 15 kWh par m³ de béton[98].

II.4.2. Le traitement thermique par rayonnement infrarouge

Les rayons infrarouges et les micro-ondes ont eu une utilisation limitée dans le durcissement accéléré du béton. Le béton qui est durci par des méthodes infrarouges est généralement sous un revêtement ou enfermé dans des coffrages en acier.

II.4.3. Le traitement thermique par l'eau chaude (Hydrothermale)

L'accélération du durcissement du béton frais est réalisée en immergeant les éléments béton dans un bassin d'eau chaude. Il doit y avoir au moins 5 cm d'eau au-dessus des éléments de béton à traiter, ceux-ci doivent être espacés et déposés sur une plaque métallique perforée, pour obtenir une répartition homogène de la chaleur en différents points des éléments en béton afin d'éviter des macro et microfissures (Figure II.1).

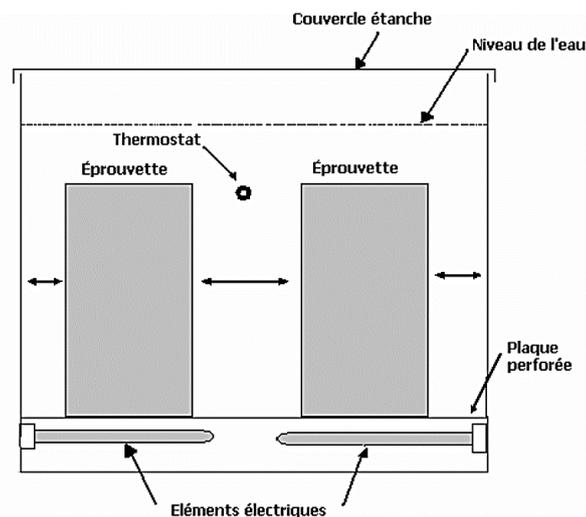


Figure II.1. Schéma d'un équipement servant au mûrissement du béton à l'eau chaude.[99]

II.4.4. Le traitement thermique par la vapeur d'eau « étuvage »

Le mûrissement à la vapeur à des pressions basses est réalisé par différents méthodes, parmi ces derniers on peut citer :

Etuvage en chambre fixe : est un procédé très utilisé en préfabrication pour la fabrication des produits démoulés sur un support. La vapeur ne doit pas jaillir directement sur les produits, il faut une répartition assez régulière de la température ainsi qu'une étanchéité suffisante de l'enceinte.

Etuvage en chambre mobile : les éléments sont démoulés à l'état frais et déposés sur une aire plane sans subir d'autres manipulations, ensuite l'enceinte est chauffée par injection de vapeur d'eau.

Etuvage en tunnel : le produit après sa mise en place est introduit dans un tunnel, transporté sur un convoyeur le produit subit un cycle complet d'étuvage (de la mise en place à l'enlèvement pour la mise en place sur stock). Le fonctionnement d'un tunnel est assez délicat à contrôler et le procédé nécessite des investissements élevés.

Procédé à vapeur perdue : le coffrage sur lequel est coulé le béton est placé sous une couverture en plastique, sous laquelle est injecté la vapeur. Les pertes d'énergie par cette méthode sont importantes (Figure II.2).[98]

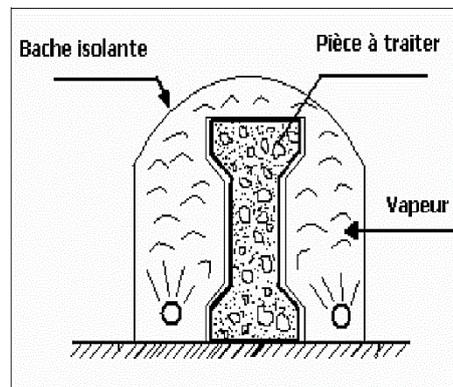


Figure II.2. Chauffage d'une poutre sous bâche par vapeur d'eau perdue.[99]

II.4.5. Le traitement thermique par fluides caloporteurs recyclés

Les moules, les coffrages, tables etc., sont chauffés par le contact de canalisations dans lesquelles circule un fluide chaud recyclé à la chaudière : eau vapeur sous pression ou huile (Figure II.3).

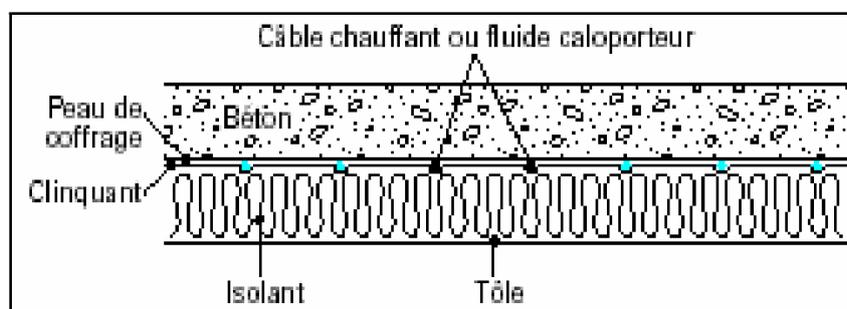


Figure II.4. Coffrage chauffant.[99]

II.4.6. Le traitement thermique par air chaud

On propose parfois un traitement du béton frais au moyen d'air chaud à 60-80°C. On obtient ainsi une certaine accélération du durcissement, mais c'est au prix d'une perte de résistance qui peut atteindre parfois 30 à 40% de la résistance normale à 28 jours. Toutefois, ce traitement à l'air chaud est parfois moins dangereux qu'on ne l'avait pensé.[98]

II.5. Cycle d'étuvage des bétons

Un cycle d'étuvage à la vapeur comprend (Figure II.5):

- (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

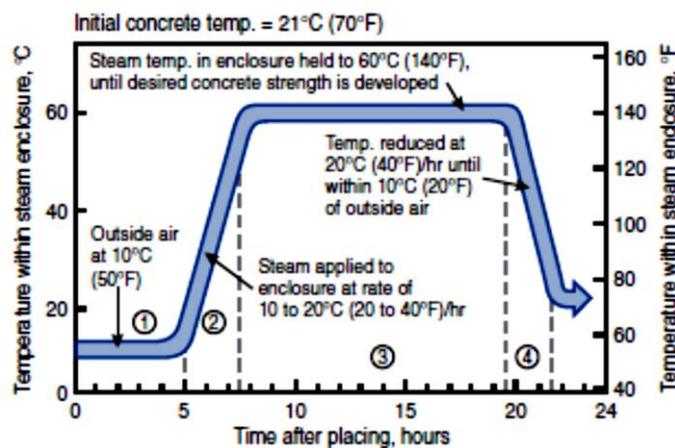


Figure II.5. Cycle type de la cure à la vapeur atmosphérique[100]

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

II.6. Revue bibliographique sur l'effet combiné des additions minérales et les méthodes de durcissement par traitement thermique sur les bétons

II.6.1. Effet de la température sur les propriétés du béton

Il est fréquemment mentionné que la température de durcissement élevée permet d'obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques au jeune âge en accélérant l'hydratation, [1–8].

Les travaux de Jin-Keun Kim et *al.*[2] porte sur l'effet de la température de durcissement et du vieillissement sur la résistance et le module d'élasticité. Les résultats montrent que le béton soumis à des températures élevées aux âges précoces atteint des résistances à la compression et à la traction plus élevées au jeune âge, mais une résistance à la compression et à la traction plus faible à l'âge ultérieur. Le module d'élasticité a la même tendance ; l'effet croisé de la température de durcissement sur le module d'élasticité n'est pas aussi évident que la résistance à la compression (Figure II.6).

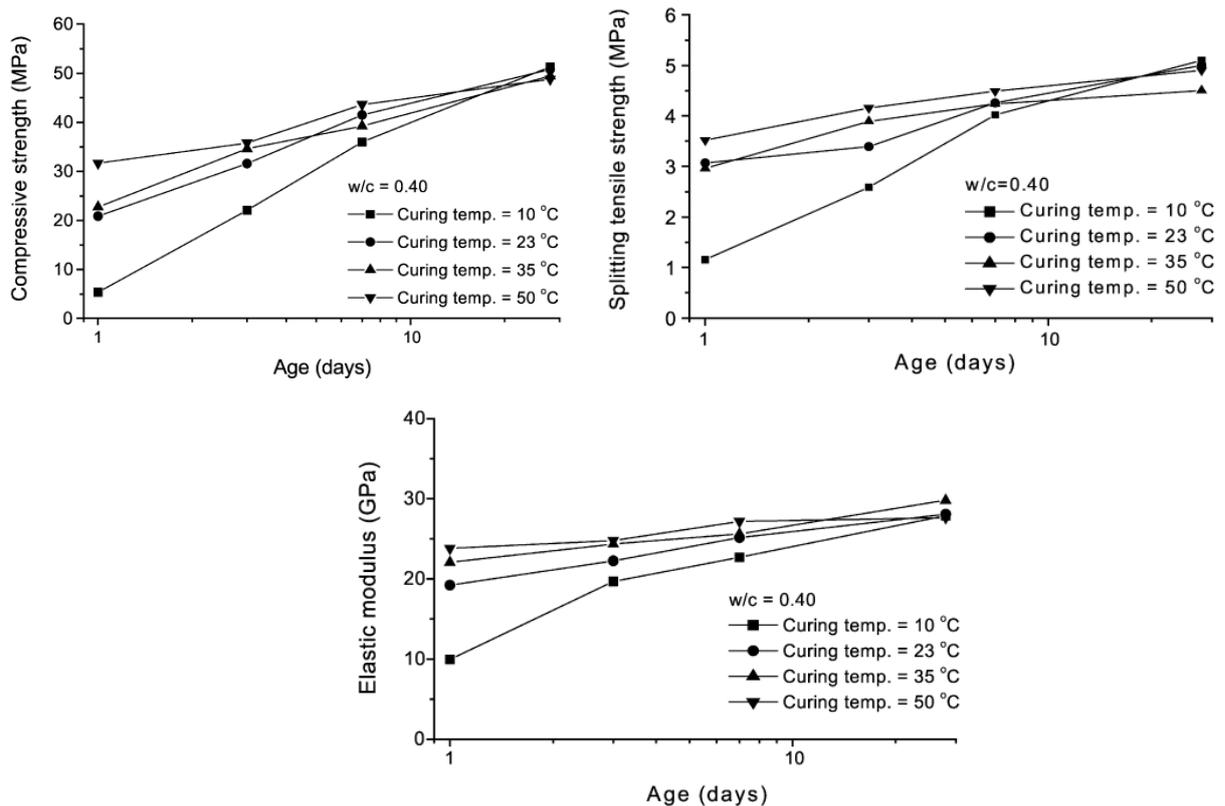


Figure II.6. Variation de la résistance à la compression, à la traction et module d'élasticité en fonction de température selon [2]

De même, Shi *et al.* [6] ont étudié l'effet du régime de cure sur la résistance mécanique à long terme et les propriétés de transport du béton durci à la vapeur. Les cycles élaborés sont représenté dans la Figure II.7. Les résultats indiquent que le durcissement par étapes est bénéfique et améliorant ainsi les propriétés mécaniques à long terme et l'imperméabilité du béton durci à la vapeur (Figure II.8).

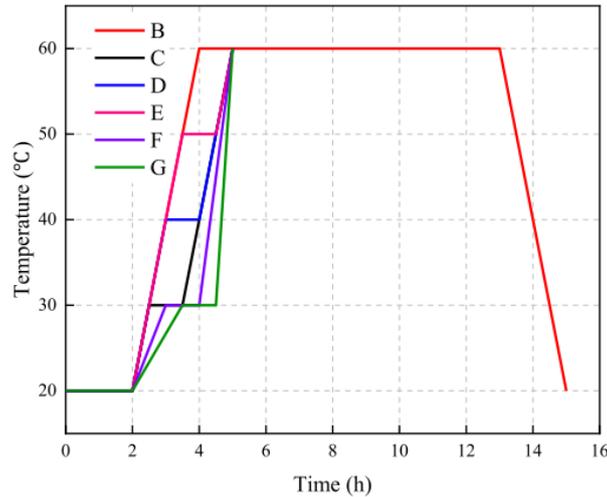


Figure II.7. Cycles d'étuvage utilisé par Shi [6]

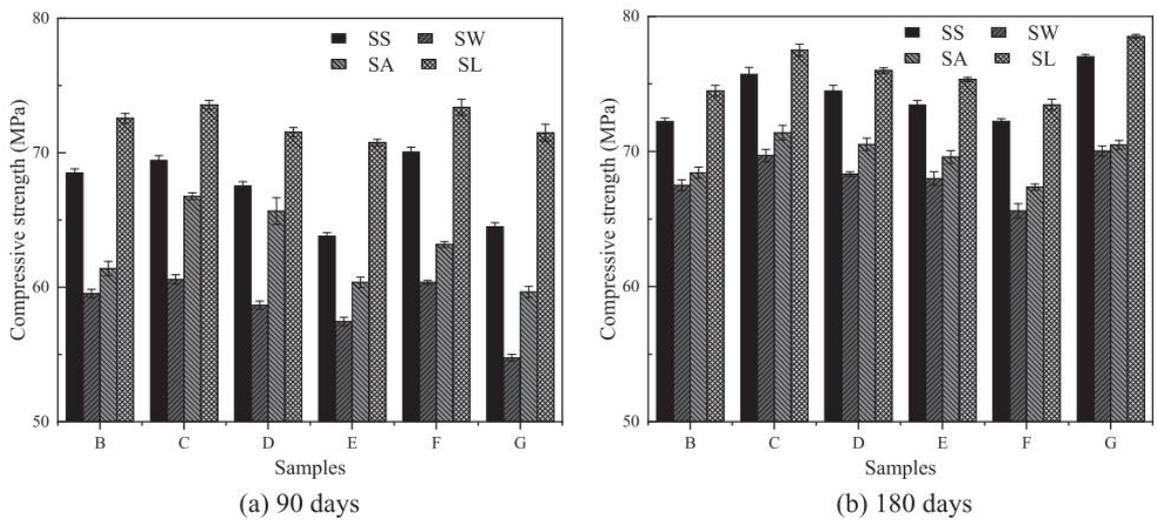


Figure II.8. La résistance à la compression du béton durci à la vapeur dans diverses conditions de durcissement ultérieur [6]

Les travaux de Ming-fang *et al.* [7] Portent sur l'effet de la durée du durcissement à la vapeur à 50°C sur la résistance et la structure poreuse. Les résultats expérimentaux ont indiqué que la résistance à la compression à 90 jours du béton haute performance durci à la vapeur était augmentée par rapport à l'échantillon de contrôle sans durcissement à la vapeur. Cela pourrait s'expliquer par le durcissement initial à la vapeur, qui a peut-être causé l'hydratation prolongée et

la réaction pouzzolanique. L'étude montre également la diminution de la porosité grossière avec l'augmentation de la durée du durcissement à la vapeur jusqu'à 14 h, la durée de 24 h a provoqué une augmentation de la porosité grossière (Figure II.10).

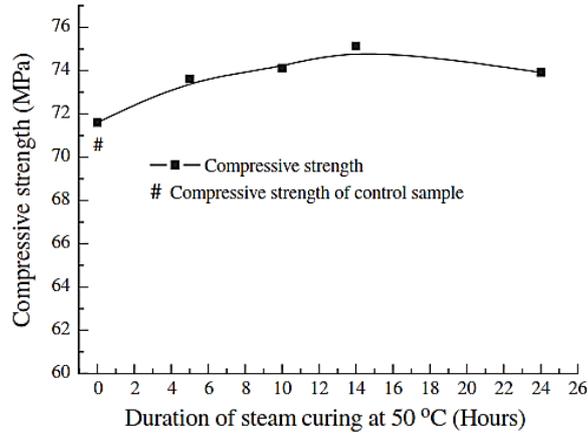


Figure II.9. Effet de la durée du durcissement initial à la vapeur à 50 C sur la résistance à la compression du béton avec un faible rapport eau/liant à un durcissement ultérieur de 90 jours [7]

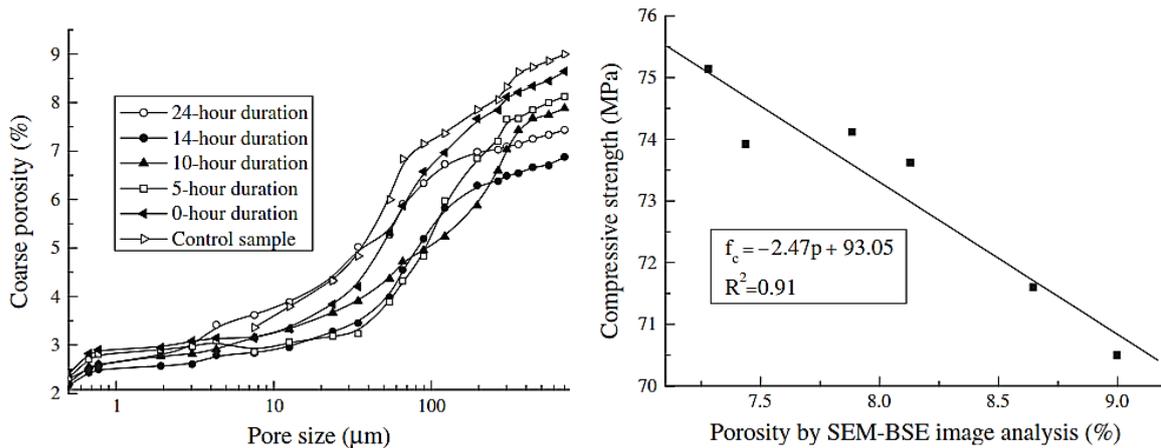


Figure II.10. La relation entre la porosité grossière et la résistance à la compression du béton durcissant à la vapeur. [7]

Le traitement thermique peut affecter négativement les résistances mécaniques à un âge plus avancé. Cet effet peut être dû au développement rapide de produits d'hydratation (à haute température) : avec une distribution irrégulière [89,101] qui se traduit par une structure poreuse ouverte dans le béton.

Lothenbach et al. [102] ont étudié l'effet de la température sur les produits d'hydratation et la composition de la solution interstitielle pour deux ciments Portland de 5 à 50 °C. Les résultats montrent que l'augmentation de la température conduit à une hydratation initialement rapide et à une résistance à la compression précoce élevée. A 40 et 50 °C, la formation de C-S-H plus dense, une distribution plus hétérogène des produits d'hydratation, une porosité plus grossière, une diminution

de la quantité d'ettringite ainsi que la formation d'aiguilles d'ettringite très courtes ont été observées (Figure II.11).

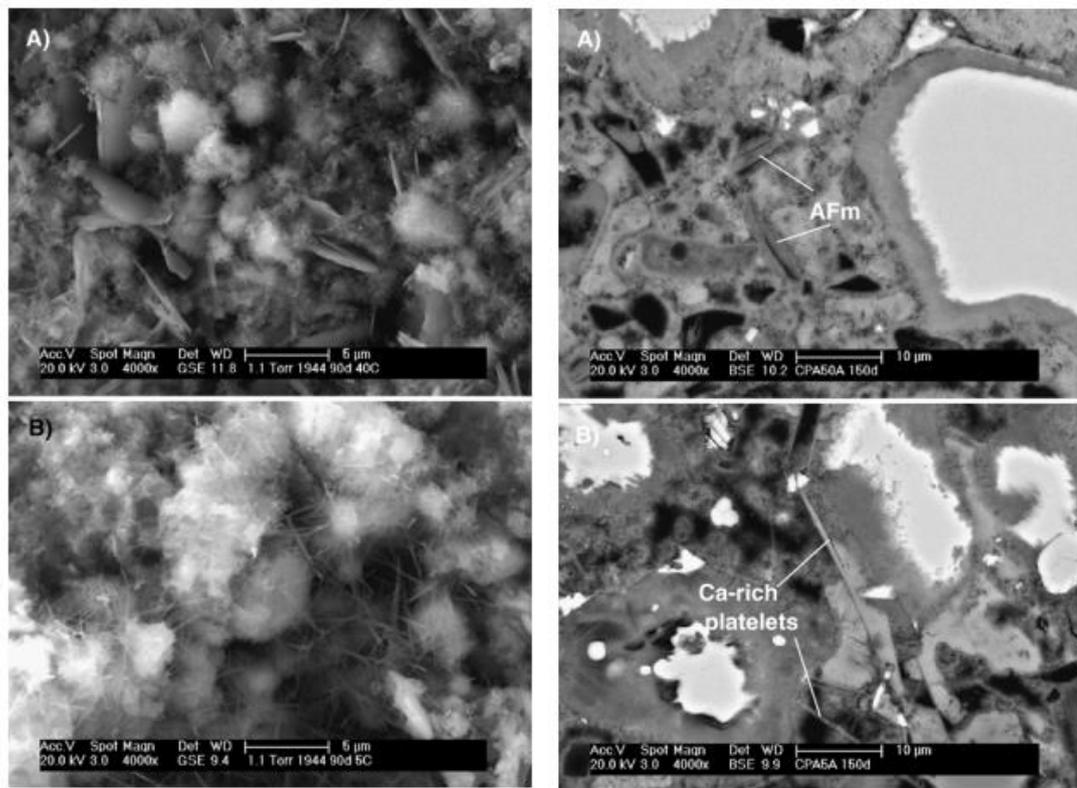


Figure II.11. Microstructure d'échantillons de mortier hydraté : à Gauche pendant 91 jours à A) 40 °C et B) 5 °C. et Droite : pendant 150 jours à A) 50 °C et B) 5 °C[102]

A 50 °C, du monosulfoaluminate de calcium s'est formé aux dépens de l'ettringite (Figure II.12). De plus, la quantité de monocarboaluminate de calcium présente semble diminuer (Figure II.13). La composition de la solution interstitielle reflète la progression plus rapide de l'hydratation à des températures plus élevées. Après 150 jours, cependant, la composition de la solution interstitielle est similaire pour la plupart des éléments à 5, 20 et 50 °C. Les exceptions sont les concentrations accrues de sulfate et les concentrations légèrement inférieures d'Al et de Fe à 50 °C.

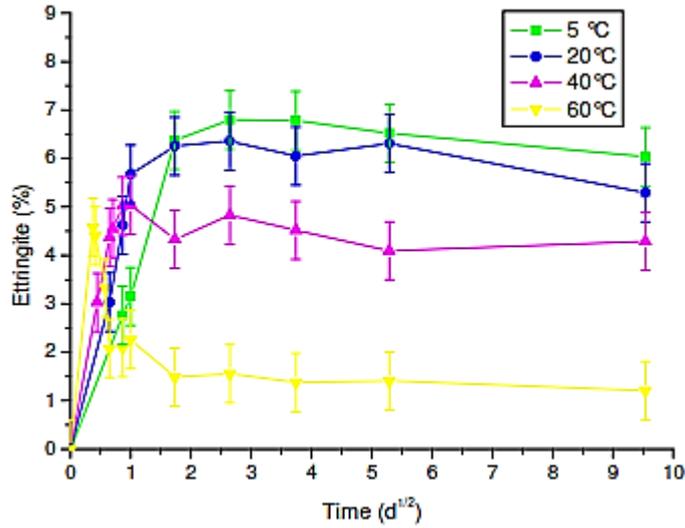


Figure II.12. Evolution de la quantité d'ettringite [103]

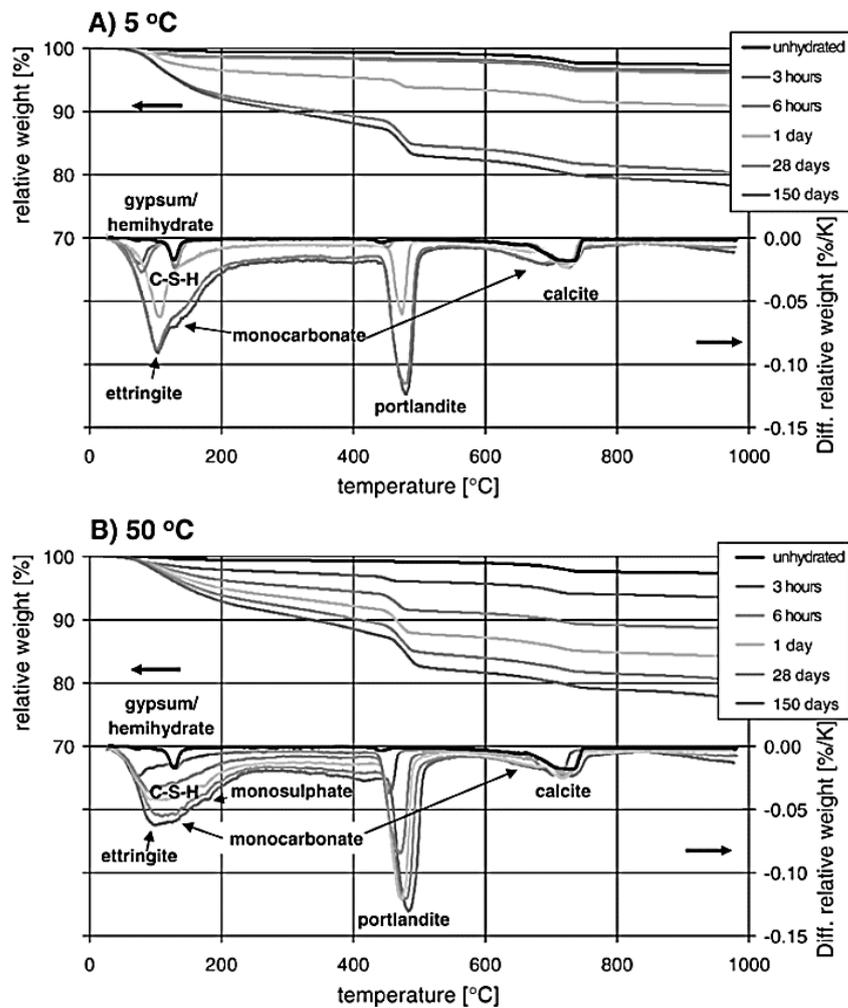


Figure II.13. Données TGA/DTG de la pâte de ciment SRPC ($w/c = 0,4$) à A) 5 °C et B) 50 °C en fonction du temps [102]

En effet, une hydratation initiale accélérée peut conduire à une structure moins compacte à long terme, provoquant ainsi une perte de résistance par rapport à un béton lentement hydraté dans l'eau (Figure II.14) [2,89,103,104].

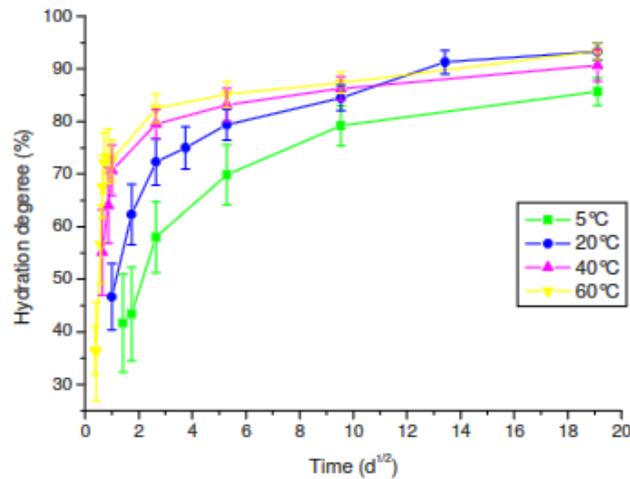


Figure II.14. Evolution des degrés d'hydratation[103]

II.6.2. Effet des additions et de la température sur les propriétés du béton

Comme nous avons énoncé dans le chapitre 1, les additions minérales ajoutées au ciment sont bénéfiques à plusieurs égards : économie, environnement et technologie. Ils confèrent de meilleures caractéristiques au béton et le rendent plus durable[26,105–107].

L'effet bénéfique des ajouts sur les caractéristiques des bétons, soumis à des températures élevées, a été étudié par de nombreux chercheurs. Ils ont indiqué que dans des conditions de cure thermique, la résistance du béton avec ajouts était supérieure à celle du béton sans ajouts [9–14]

Hayder et *al.*[4] ont évalué la performance des mélanges de mortier incorporant jusqu'à 70% de remplacement de ciment par des cendres volantes sous l'effet d'un durcissement accéléré. Différents régimes de durcissement accéléré ont été étudiés en termes de temps de préréglage, de température de durcissement et de temps de durcissement (Figure II.15).

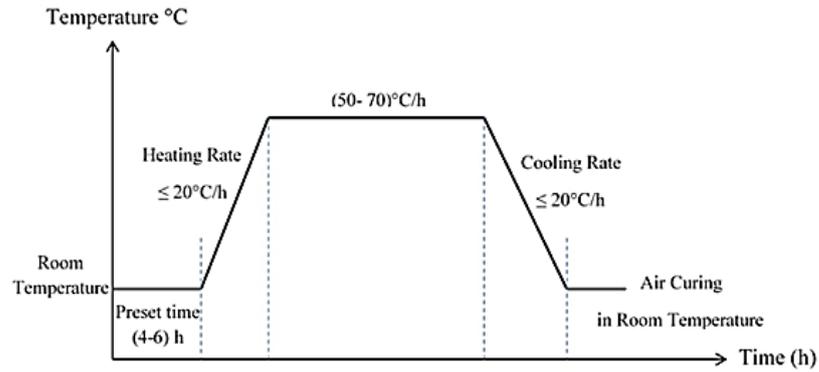
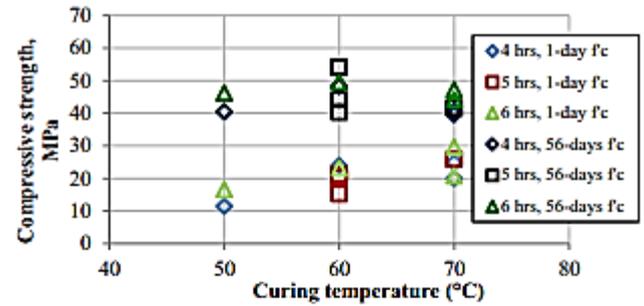
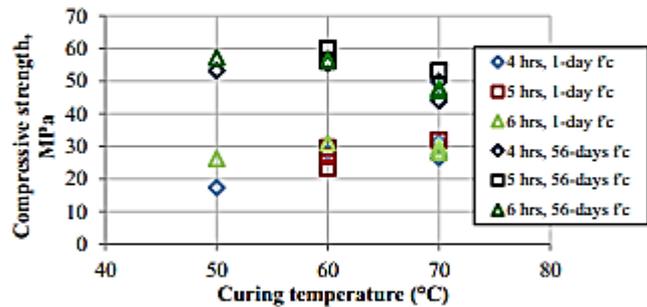


Figure II.15. Cycle des régimes de durcissement à la température [4].



a) Mixture 1 (70% cement replacement)



b) Mixture 2 (60% cement replacement)

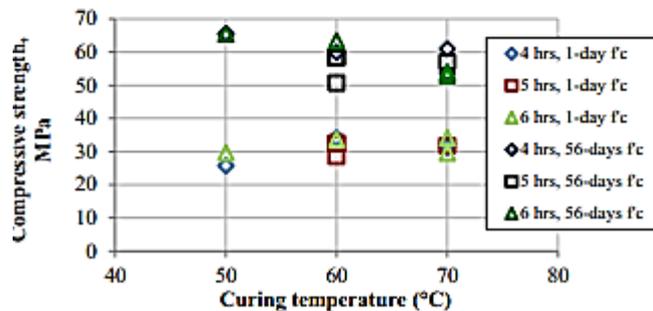


Figure II.16. Variation de la résistance à la compression Vs la température [4]

Les résultats de [4] montrent que l'introduction de la cendre volante FA par substitution au ciment était un paramètre très significatif sur la performance des bétons sous des régimes de durcissement accéléré. L'augmentation du niveau de remplacement à 70 % a réduit la résistance à court et à long terme par rapport à un niveau de remplacement de 50 % à 60 % (Figure II.16). Des

températures de durcissement accélérées élevées ont affecté négativement le comportement de retrait au séchage.

Les travaux de Yazici *et al.* [9] porte l'étude de l'effet des poudres réactives (RPC) produit avec des cendres volantes de classe C (FA) et du laitier de haut fourneau broyé (GGBFS) sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression et la résistance à la flexion) du béton dans différentes conditions de durcissement (milieu standard, autoclave et durcissement à la vapeur). Les résultats de cette étude indiquent que la résistance à la compression du RPC a considérablement augmenté après le durcissement à la vapeur et l'autoclavage par rapport au durcissement standard (Figure II.17). D'autre part, il a été observé que le durcissement à la vapeur et à l'autoclave diminuait la résistance à la flexion (Figure II.18).

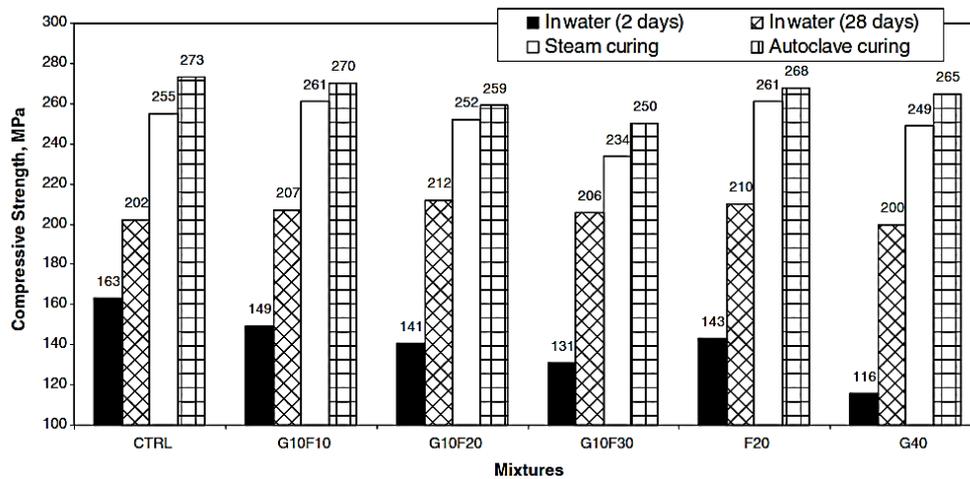


Figure II.17. Influence de la teneur en GGBFS et/ou FA et du régime de durcissement sur la résistance à la compression [9].

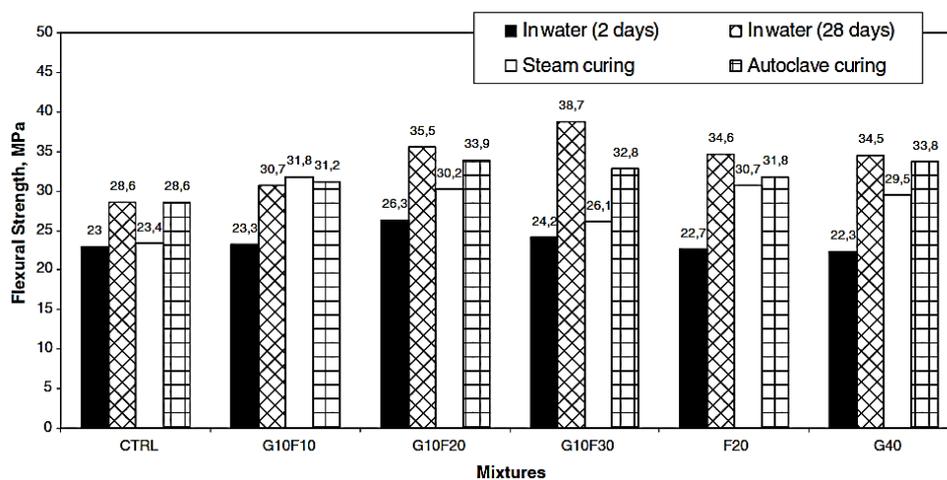


Figure II.18. Influence de la teneur en GGBFS et/ou FA et du régime de durcissement sur la résistance à la flexion [9].

De plus, les micrographies SEM ont révélé une microstructure dense de RPC. La [Figure II.19](#) montre que les pores sphériques ont été remplis de structures en forme d'aiguilles de tobermorite et de jennite après autoclavage dans les mélanges de contrôle et F20.

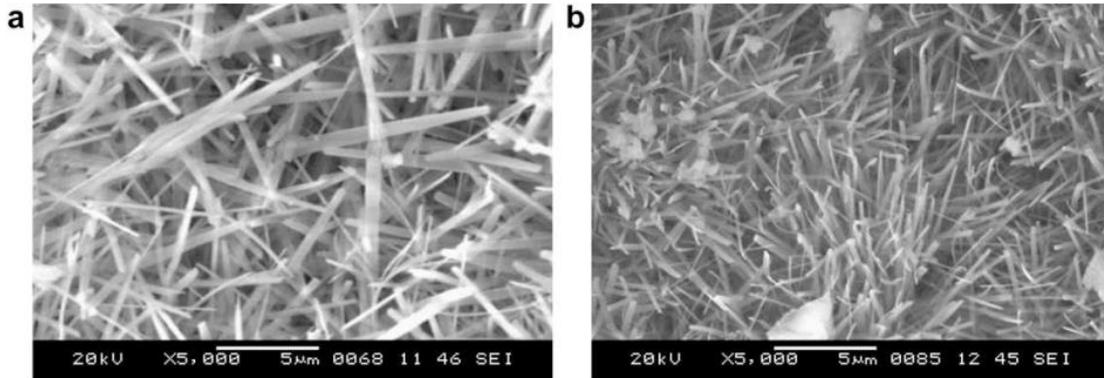


Figure II.19. Images SEM du mélange témoin autoclavé (a) (pores sphériques remplis de structures de type jennite) (b) mélange F20 de tobermorite en forme d'aiguille. [9].

L'étude de Ferhat Bingöl et *al.* [10] focalise sur l'effet du durcissement à l'air, à l'eau et à la vapeur sur la résistance à la compression du béton autoplaçant (BAP) ([Figure II.20](#)). Le BAP examiné est produit par substitution partielle de ciment par 5 %, 10 % et 15 %, de la fumée de silice (SF) et des cendres volantes (FA) dans les rapports de 25 %, 40 % et 55 %.

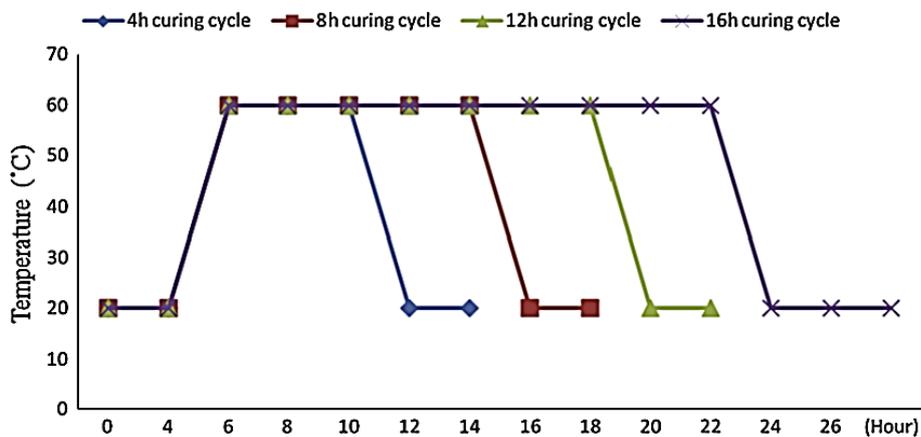


Figure II.20. Le cycle de durcissement à la vapeur utilisé par[10].

Les résultats de cette étude montrent que la résistance à la compression la plus élevée a été observée dans les échantillons de béton avec 15 % de SF après 28 jours de cure à l'eau. Pour le régime de durcissement à la vapeur, les performances optimales ont été obtenues à partir de remplacement de 55 % de FA à 70 °C pendant 16 h de période de durcissement ([Figure II.21](#), [Figure II.22](#) et [Figure II.23](#)). Pour ces bétons, la résistance à la compression représente 95 % de celle des échantillons durcis dans l'eau. Les échantillons contenant SF et FA et soumis au

durcissement à la vapeur sont subi à une amélioration de la résistance en comparaison à celle témoin sans aucune addition minérale

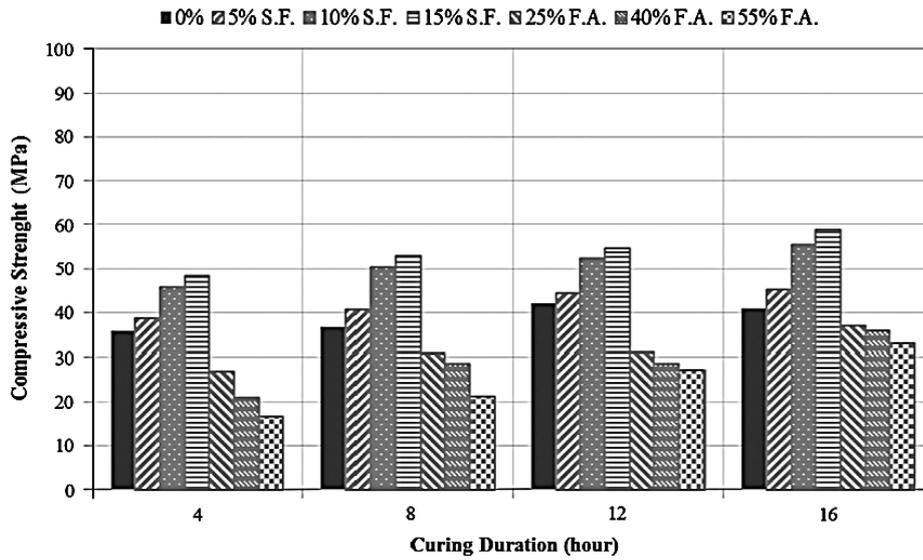


Figure II.21. Effet des durées de durcissement à la vapeur sur la résistance à la compression pour 60°C[10].

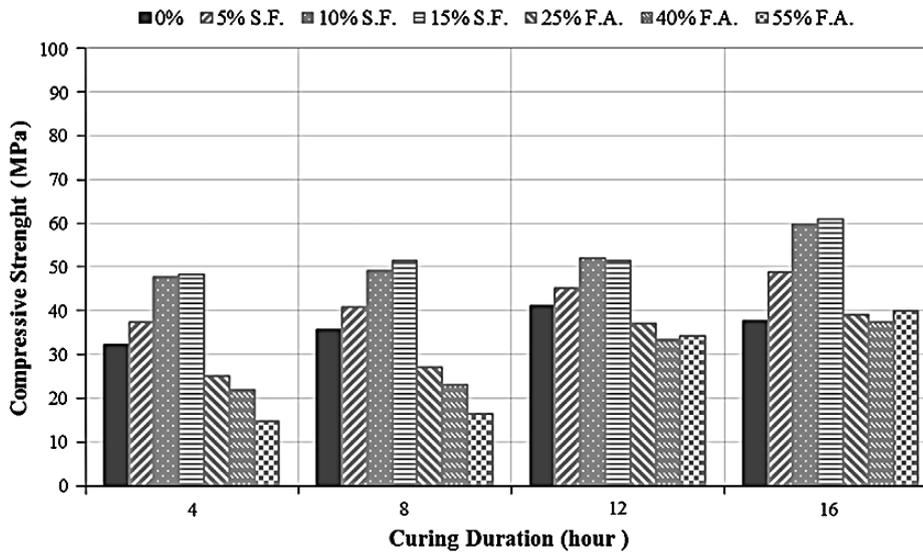


Figure II.22. Effet des durées de durcissement à la vapeur sur la résistance à la compression pour 70°C[10].

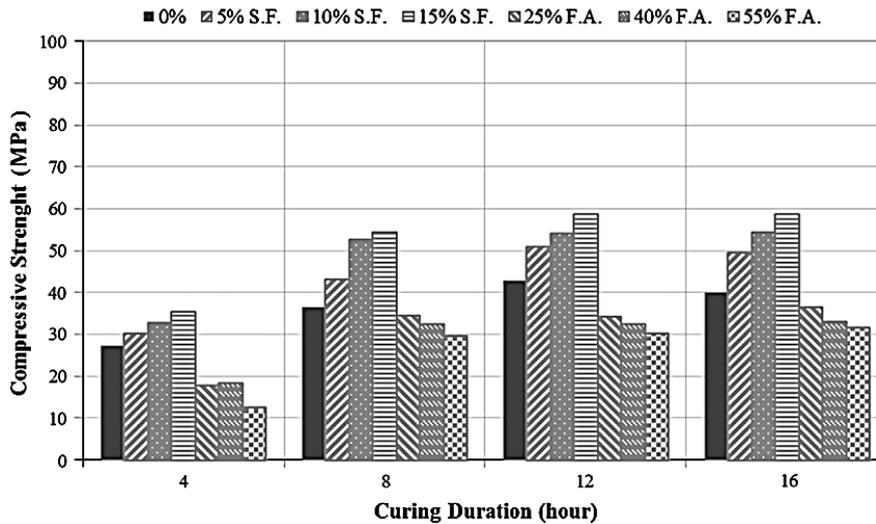


Figure II.23. Effet des durées de durcissement à la vapeur sur la résistance à la compression pour 80°C[10].

Les travaux de Ramezani pour et al. [11] qui s'intéresse à l'étude de l'effet du durcissement initial à la vapeur et de différents types d'addition minérales sur les caractéristiques mécaniques et de durabilité du béton auto-plaçant (BAP). Six régimes différents de durcissement à la vapeur après coulage ont été examinés, à savoir deux températures différentes (60 et 70 °C) et trois durées totales de durcissement à la vapeur (16, 18, 20 h). Les résultats ont montré l'effet positif de durcissement à la vapeur par températures sur les indicateurs de durabilité tels que l'absorption capillaire (Figure II.24), la résistivité électrique, la pénétration du chlorure et de résistance à la compression pour les propriétés mécaniques en favorisant l'hydratation (Figure II.25 et Figure II.26) ;

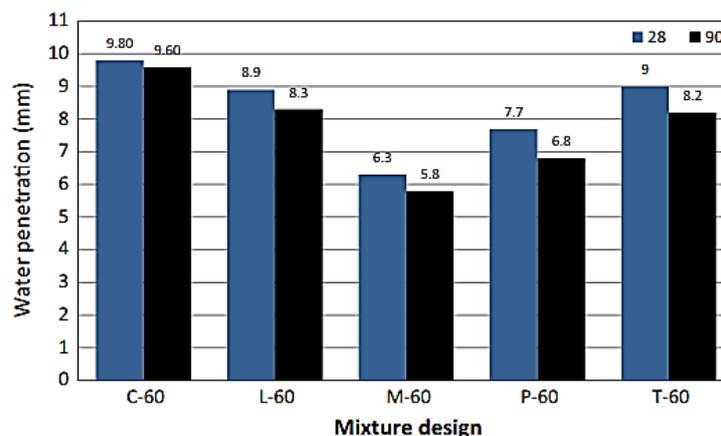


Figure II.24. L'effet de différents types d'additifs minéraux sur la profondeur de pénétration de l'eau à 28 et 90 jour[11].

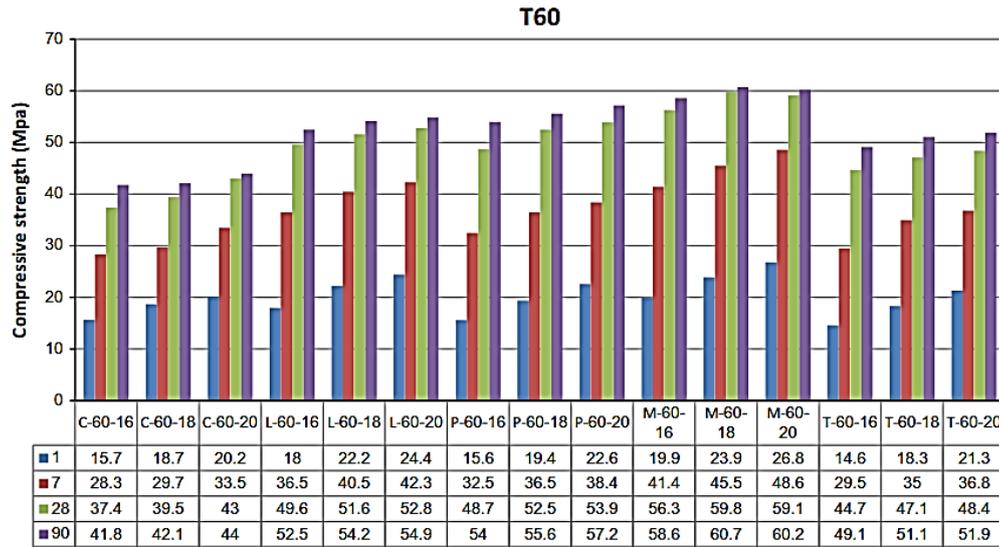


Figure II.25. Résultats de la résistance à la compression des éprouvettes durcies à la température maximale de 60° C [11].

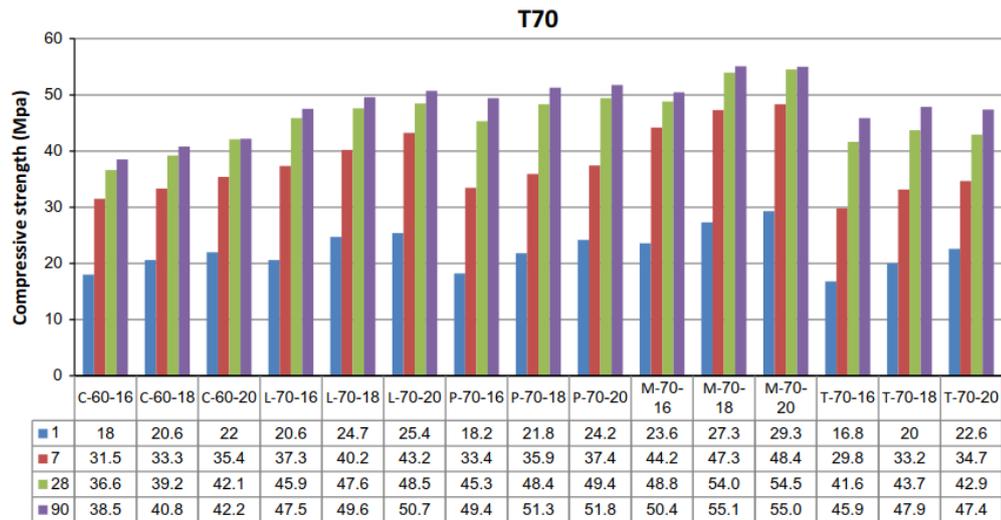


Figure II.26. Résultats de la résistance à la compression des éprouvettes durcies à la température maximale de 70° C [11].

Les auteurs [11] ont trouvé que les échantillons contenant du métakaolin avaient une microstructure plus homogène que d'autres types de mélanges (Figure II.27). L'amélioration de la microstructure a été fortement observée aux âges précoces, et à l'âge ultime de 90 jours, les différences de résistance à la compression n'étaient pas significatives. D'autre part, les effets physiques du calcaire, tels que l'effet de dilution et la nucléation hétérogène, ont entraîné une réduction du volume des pores, et certaines porosités capillaires ont été bloquées aux âges précoces.

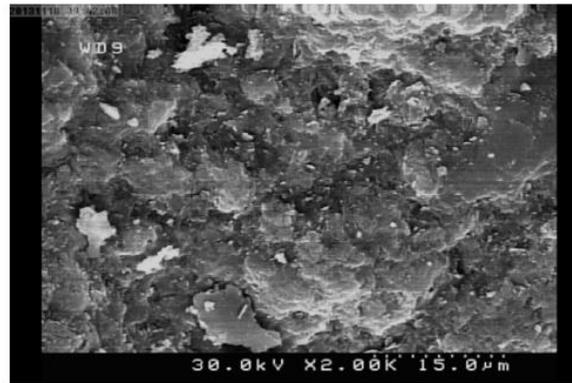


Figure II.27. Image SEM pour béton avec métakaolin[11].

De plus, d'autres recherches ont prouvé que l'augmentation de la température de traitement peut considérablement améliorer la réactivité du laitier et des cendres volantes dans le béton [15,16].

Dans ce sens, Ho et al. [15] ont exploré les avantages potentiels du béton durci à la vapeur, sur les bétons incorporant des additions minérales. Les auteurs ont examiné vingt mélanges avec diverses combinaisons de ciment Portland, de cendres volantes (FA), de laitier et de fumée de silice (SF). Pour chaque mélange, les échantillons ont été soit durcis de manière standard dans un bain-marie à 27 °C, soit durcis à la vapeur à une température maximale de 55 °C pendant 8 h (Tableau II.1).

Tableau II.1. Régime de durcissement des échantillons pour les tests de sorptivité [15]

Regime	Description
3-d Sd	1 day in mould+2 days in 27 °C water bath
7-d Sd	1 day in mould+6 days in 27 °C water bath
3-d HE	1 day of steam cycle+2 days wrapped in plastic envelope
7-d HE	1 day of steam cycle+6 days wrapped in plastic envelope

Les résultats trouvés à travers cette montrent que les bétons durcis à la vapeur étaient plus poreux, comme l'indiquent les valeurs de sorptivité qui sont plus élevées par rapport aux échantillons durcis dans l'eau (Figure II.28). Les mélanges avec SF ont les meilleures performances et sont prometteurs dans la fabrication de préfabriqués en raison de leur développement de résistance précoce élevé et de leurs faibles valeurs de sorptivité (Figure II.28).

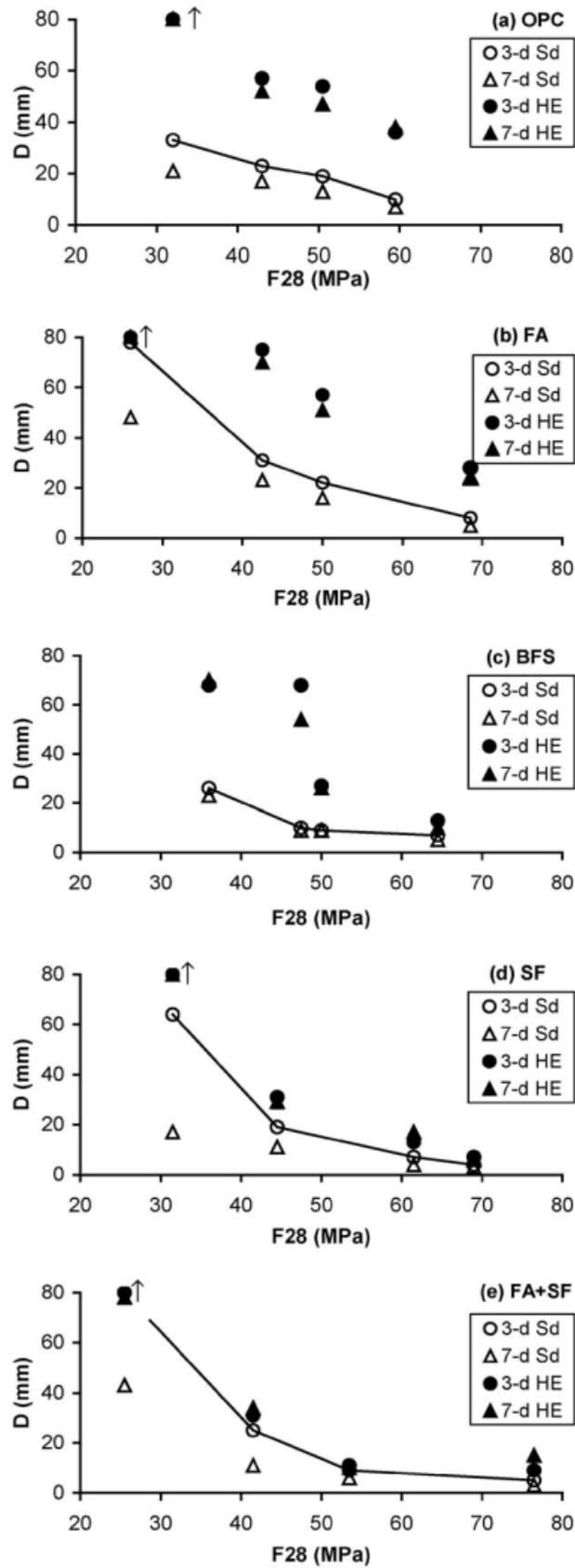


Figure II.28. Résultats de sorptivité, D , basés sur la profondeur de pénétration de l'eau pour les mélanges (a) OPC, (b) OPC/FA, (c) OPC/BFS, (d) OPC/SF et (e) OPC/FA/SF [15]

Notons que la vitesse de réaction pouzzolanique est affectée par le rapport « eau/liant », la température de durcissement et la finesse de la pouzzolane [17]. Grâce à un système de traitement à la vapeur de 24 heures, la résistance à la compression du béton avec des poudres réactives a augmenté d'environ 30 MPa, par rapport à celle soumise à une cure standard de 28 jours (Figure II.29). Si l'autoclave est utilisé pendant 8 heures, une résistance supérieure à 200 MPa est obtenue [7,108–110]. Ceci s'explique par le fait que le durcissement à haute température peut entraîner une augmentation de la réactivité pouzzolanique des fumées de silice, du quartz broyé et de la longueur de chaîne C-S-H [109].

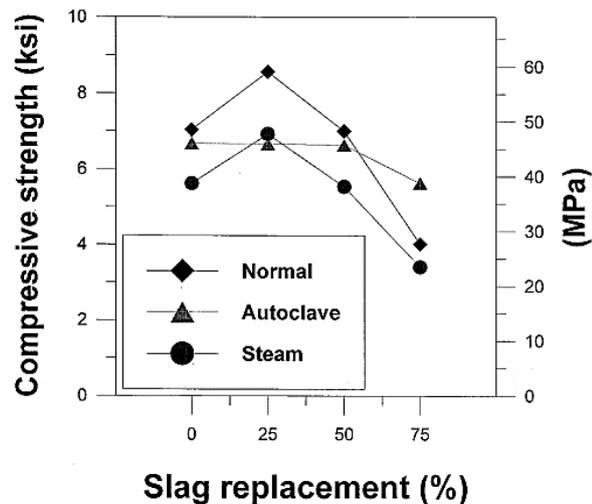


Figure II.29. Effet du remplacement du laitier sur la résistance à la compression à la fin de chaque cycle de cure [110].

La même observation a également été faite dans les travaux de Yang et al. [111], pour les cendres volantes ; de plus, la quantité de portlandite, après traitement à la vapeur, était inférieure à celle du béton soumis à une cure standard. Après durcissement à 20°C, l'activité pouzzolanique est faible et la longueur de la chaîne C-S-H est en moyenne courte [108]. De plus, à haute température de durcissement, et en présence de fumée de silice, il se forme de la tobermorite qui contribue à améliorer la résistance en réduisant la porosité [110,112]. Les bétons à additions pouzzolaniques, ne présentent aucun effet néfaste sur la résistance, lorsque la température de durcissement passe de 20 à 55°C [3]. De plus, il n'y a pas d'effet néfaste sur le béton autoplaçant à haute résistance causé par une température élevée [113], tandis que le durcissement thermique provoque des pores plus grossiers sans augmenter le volume poreux total (Figure II.30, Figure II.31). Une stabilisation des paramètres mécaniques et microstructuraux a été constatée, après 7 jours de cure à haute température, dans le cas du béton autoplaçant [114].

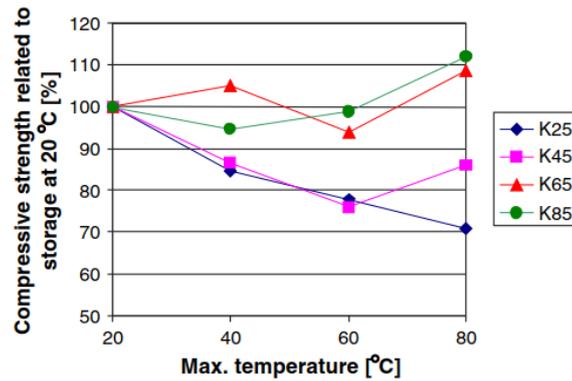


Figure II.30. Résistance à la compression relative liée au stockage à 20 °C par rapport à la température de durcissement maximale pour les SCC de type combiné [113]

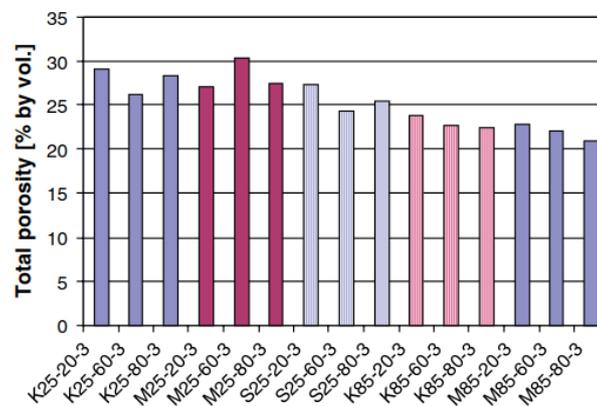


Figure II.31. Porosité totale de différents SCC durcis à 20 °C, 60 °C et 80 °C.[113]

La température optimale de cure à la vapeur, pour un béton autoplaçant contenant de la fumée de silice et des cendres volantes, est de 70°C [10]. Cependant, d'autres auteurs [18] ont montré que le durcissement à la vapeur à 70°C affectait négativement la durabilité du béton autoplaçant (Figure II.32). Cela était dû à la formation rapide d'hydrates inégalement répartis, ce qui rend les pores hétérogènes et plus grossiers. De même, pour des températures de 60°C et 75°C, les chercheurs ont fourni la même interprétation, respectivement [115,116]. De plus, le béton durci à la vapeur à haute température a une structure plus poreuse, souvent avec une porosité plus élevée sur les surfaces, par rapport à celle à l'intérieur de l'échantillon. Pour une température de cuisson de 75°C, la porosité est supérieure à celle à 60°C. La température élevée conduit à un gradient de température élevé dans la structure interne du béton, ce qui est préjudiciable à la formation des hydrates et à leur densification [117–119].

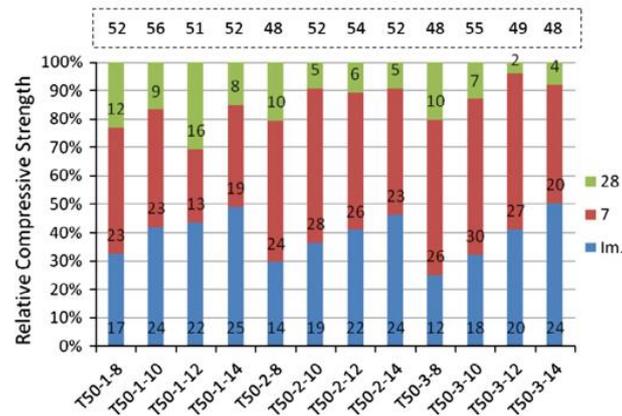


Figure II.32. Valeurs relatives de résistance à la compression des cycles avec une température de pointe de 50 C (les valeurs moyennes sont présentées en MPa) [18]

En général, pour réduire les dommages thermiques, une température plus basse doit être utilisée pour le durcissement à la vapeur [18] et pour améliorer la durabilité du béton, un temps de durcissement plus court doit être envisagé [7]. Une fois que toutes les réactions possibles du ciment ont été épuisées, il n'est pas pratique d'augmenter la période de durcissement à la vapeur [19]. Selon Liu et al. [20], une cure humide ultérieure adéquate peut efficacement atténuer les effets néfastes du traitement à la vapeur sur les résistances mécaniques et les paramètres microstructuraux du béton. En effet, la cuisson à la vapeur est le système recommandé par rapport à la cuisson standard et à la cuisson en autoclave [21–25].

Des travaux très limités ont été réalisés sur l'utilisation de la cure à la vapeur utilisant l'énergie solaire pour évaluer leur influence sur les résistances mécaniques du béton sans ajout [34]. La seule recherche qui a été réalisée sur l'utilisation de la technique de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire est de Benammar et al. [34] en 2013. Dans cette étude, 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.33). 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.34). 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.33. Chambre de traitement à la vapeur exposée aux rayons solaires utilisée par Benammar et al. [120]

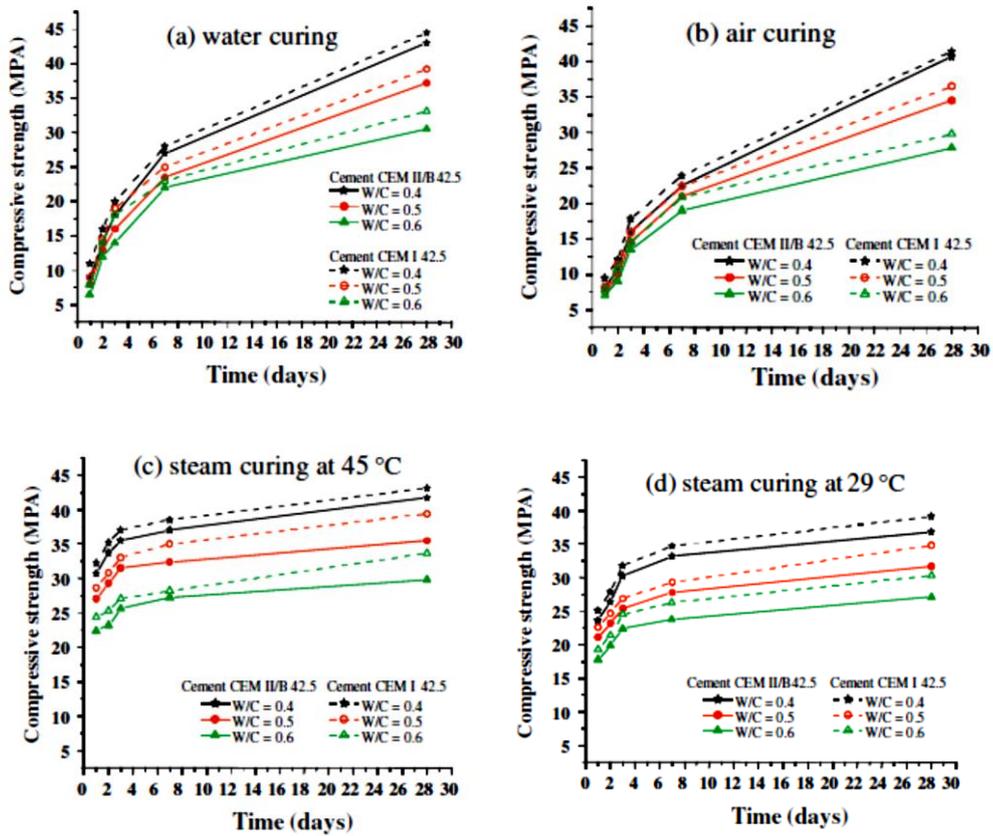


Figure II.34. Effet des méthodes de durcissement, type de ciment et le rapport E/C sur le développement de la résistance à la compression [120].

II.6.3. Effet combiné de sable de dune broyé et le traitement thermique

Des travaux très limités ont été réalisés sur l'effet combiné de sable de dune broyé et le traitement thermique sur les résistances mécaniques du béton [34].

Les travaux de Yang et al. [112] porte sur l'étude de l'effet du sable de quartz broyé sur les propriétés du béton à haute résistance lors du durcissement à l'autoclave à la vapeur. Les auteurs ont mis des échantillons dans les conditions de durcissement présentées dans de la [Figure II.35](#). La température constante dans l'étape de durcissement à la vapeur est d'environ 85°C. La pression de la vapeur saturante dans l'étape d'autoclavage est d'environ 1,0 MPa. Certains éprouvettes après passage à l'autoclave ont été durcis dans l'eau pendant 27 jours à 20±2°C.

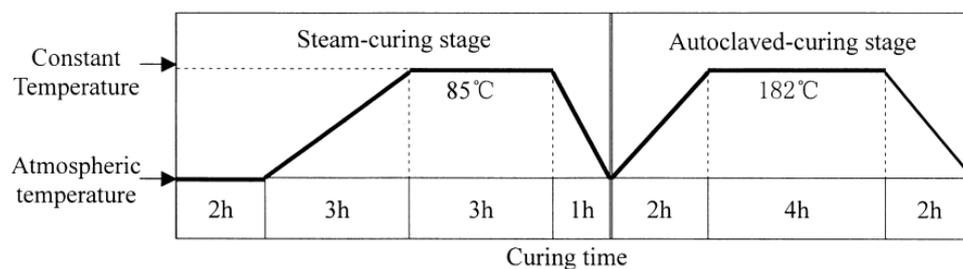


Figure II.35. Conditions dans les étapes de durcissement à la vapeur et de durcissement à l'autoclave.

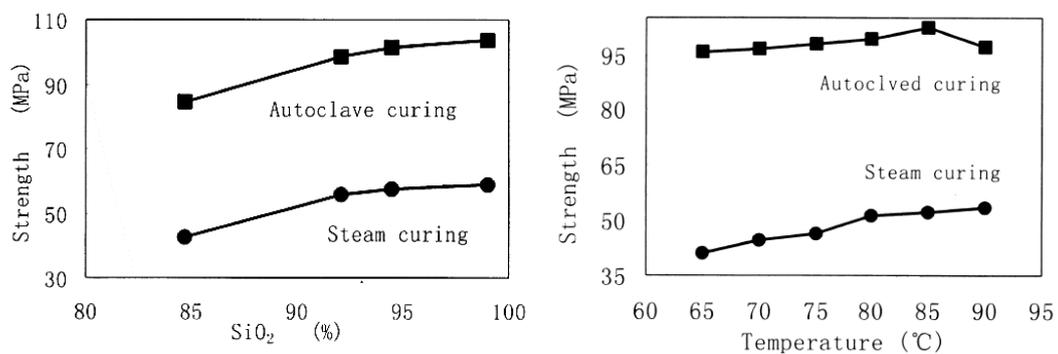


Figure II.36. Effet du SiO₂ contenu dans sable de quartz broyé de la température de cure à la vapeur sur la résistance à la compression du béton[112].

L'étude de Yang et al. [112] a montré que lors de l'autoclavage, la résistance du béton à haute résistance augmente avec l'augmentation de la teneur en quartz broyé. Néanmoins, l'autoclavage à haute température est coûteux car il consomme une quantité considérable d'énergie électrique. Cependant, ce coût peut être minimisé en utilisant une technique de durcissement efficace et alternative, telle que le durcissement à la vapeur utilisant l'énergie solaire.

II.7. Conclusion

Suite à la recherche bibliographique établie dans ce chapitre, aucune recherche sur l'effet combiné du SDB et de la cuisson à la vapeur utilisant l'énergie solaire n'a été trouvée dans la littérature. Bien que la réaction pouzzolanique partielle du SDB se produise lors des phases d'hydratation ultérieures, la question est de savoir si cette réaction peut être accélérée lorsqu'un béton contenant du SDB durcit dans des conditions de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire. Une teneur en SDB appropriée et un durcissement à la vapeur appropriée utilisant l'énergie solaire peuvent permettre d'obtenir des bétons avec de meilleures résistances mécaniques, un faible coût et des avantages environnementaux significatifs. Cette idée est très importante pour le domaine de la préfabrication.

À la lumière de ce qui précède, la partie suivante traite l'étude expérimentale de l'effet combiné du SDB et du durcissement à la vapeur initiale utilisant l'énergie solaire. Cette partie comporte deux chapitres III et IV. Dans le chapitre III, nous traitons les caractéristiques des matériaux utilisés et techniques expérimentales et dans le chapitre IV a pour but d'Analyser et interpréter les résultats trouvés.

Deuxième partie.
Étude expérimentale



Chapitre III .
Caractérisation des matériaux utilisés et
techniques expérimentales

III.1. Introduction

L'emploi judicieux des constituants du béton nécessite une bonne compréhension de leurs diverses propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques pour faire un meilleur choix répondant à leur destination. À cet effet le présent chapitre a pour objectif de présenter les différentes caractéristiques des matériaux utilisés, la procédure expérimentale suivie y a compris la formulation des différentes compositions de béton, la procédure de malaxage, la préparation des éprouvettes et une description des méthodes d'essais effectués au cours de ce travail.

Les essais expérimentaux menés, dans le cadre de cette thèse, ont été effectués au sein du laboratoire de matériaux du département de génie civil à l'université de Djelfa et au niveau de Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction Sud-Est unité régionale Djelfa (L.N.H.C).

III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

L'ensemble des matériaux utilisés dans cette étude sont :

- ☒ Ciment Portland CEM I 42.5
- ☒ Sable de dune broyé (SDB)
- ☒ Sable roulé de rivière de classe (0/5)
- ☒ Deux fractions de pierres concassées (7/15) et (15/25).
- ☒ Eau de gâchage : Eau potable du laboratoire

III.2.1. Ciment

Un ciment Portland de classe CEM I 42,5 a été utilisé. Il est fabriqué dans la cimenterie LAFARGE Algérie de la région de M'sila conformément à la norme Algérienne NA 442 [121]. L'analyse chimique et la composition minéralogique du ciment sont données respectivement dans le [Tableau III.1](#) et [Tableau III.2](#). La composition minéralogique a été déterminée en utilisant la formule de Bogue[122] . Les caractéristiques physiques du ciment sont présentées dans le [Tableau III.3](#).

Tableau III.1. Composition chimique de ciment (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	LOI
21.36	4.98	3.63	65.86	2.06	0.93	0.08	0.77	0.02	2.48

Tableau III.2. Composition minéralogique de ciment (%)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
61.54	14.83	7.04	11.05

Tableau III.3. Propriétés physiques de ciment

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1120
Masse volumique absolue (kg/m^3)	3050
Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	3500

III.2.2. Sable De Dune Broyé (SDB)

L'utilisation d'une addition par rapport à une autre est en fonction de plusieurs paramètres tel que la disponibilité locale et le coût raisonnable. Dans cette étude nous avons utilisé un sable de dune broyé (SDB) sous forme de poudre (cf. [Figure III.1](#)) préparé par broyage du sable des dunes (SD) de la région de Biskra de classe granulaire (0/0,63 mm) et de nature siliceuse.



Figure III.1. Sable de dune broyé SDB

La granularité du SD est très serrée avec une forme sphérique arrondie et contient 0,24% d'éléments fins et leur module de finesse est égal à 0,92. La distribution granulométrique du SD est présentée dans le

Tableau III.4. Le sable de dune a été broyé mécaniquement à l'aide d'un broyeur à boulets jusqu'à une finesse d'environ $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ où 95 % des éléments fins sont inférieure à $45 \mu\text{m}$. Du point de vue chimique, la constatation importante que l'on peut observer est la présence d'une quantité élevée en silice SiO_2 supérieure à 74% ([Tableau III.5](#)) qui présente une grande dureté et permet en outre d'améliorer l'adhérence des interfaces pâte/granulat. Les propriétés physiques du SDB sont présentées dans le [Tableau III.6](#).

Tableau III.4. Résultats de la distribution granulométrique de SD avant broyage

Tamis (%)	Tamisât (%)
0.63	99.98
0.315	97.78
0.16	10.33
0.08	0.24
0.01	0

Tableau III.5. Analyse chimique du sable de dune finement broyé SDB (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	LOI
74.61	1.35	0.86	17.3	0.29	0.04	0.47	0.005	5.04

Tableau III.6. Propriétés physiques du SDB

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1300
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2770
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4000
Équivalent de sable visuel (%)	80
Équivalent de sable piston (%)	75

Afin de mettre en évidence sa composition minérale, nous avons analysé le SDB par diffraction aux rayons X. La [Figure III.2](#) représente le spectre DRX où il montre les différents composants minéralogiques qui compose du SDB. Il est clair dans la figure que le SDB se compose principalement de quartz ce qui montre sa structure siliceuse cristallisée. D'après la littérature, le SDB est amorphe en surface qu'il lui donnée une propriété réactive où il peut être réagir avec la chaux issue de l'hydratation du ciment selon la réaction pouzzolanique [26–28].

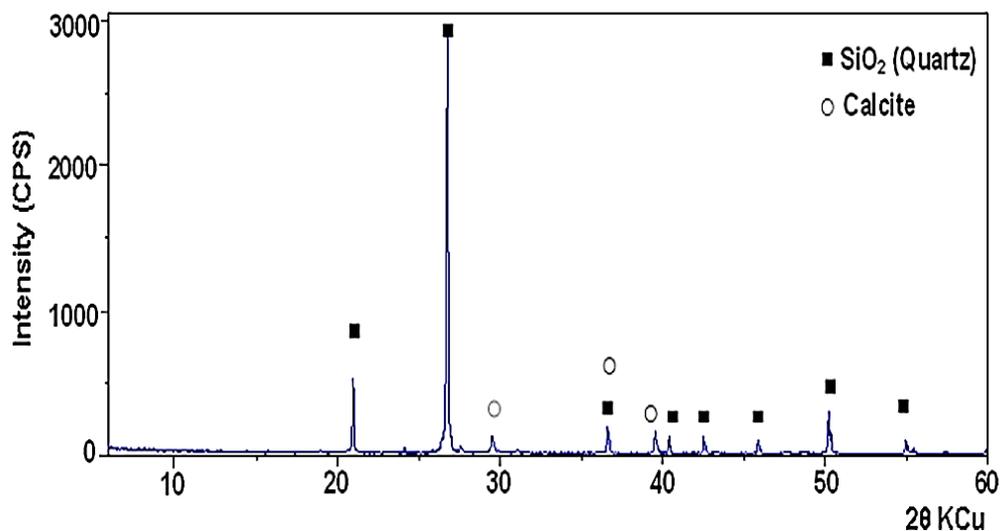


Figure III.2. Spectre DRX du SDB

III.2.3. Eau

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet disponible au réservoir de laboratoire de matériaux du département de génie civil de l'université de Djelfa. Elle a une température de 20 ± 2 °C et un pH=8. Le [Tableau III.7](#) représente les valeurs des composants chimiques de l'eau.

Tableau III.7. Analyse chimique de l'eau

Composants	Valeur mg/l
Calcium Ca^{++}	101
Magnésium Mg^{++}	22.92
Chlorures Cl^-	90.7
Sulfates SO_4^{--}	167
Ammonium NH_4^+	0.04

D'après le [Tableau III.7](#), on remarque que l'eau utilisée est considérée comme une eau conforme à la fabrication du béton. Par ce qu'elle répond aux exigences de la norme NF EN 1008 :2002 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. [123]

III.2.4. Sable

Le sable utilisé est un sable de rivière provient de la région de Djelfa-Algérie dont le diamètre max des grains ne dépasse pas 5 mm et ayant une forme géométrique sphérique arrondie avec la présence de plusieurs tailles des grains. La courbe granulométrique du sable s'inscrit dans

le fuseau recommandé. L'analyse granulométrique est donnée dans la [Figure III.3](#). Les propriétés physiques de sable sont regroupées dans le [Tableau III.8](#)

Tableau III.8. Propriétés physiques de sable

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1440
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2502
Module de finesse	2.37

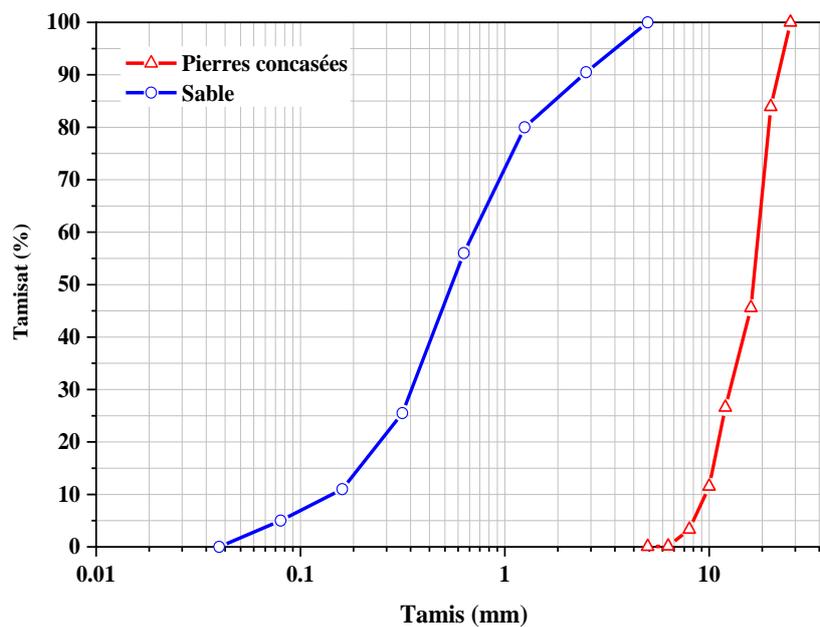


Figure III.3. Courbes granulométriques du sable et des pierres concassées

III.2.5. Pierres Concassées

Deux fractions de pierres concassées de la région de Djelfa ont été utilisées à savoir 7/15mm et 15/25mm. La distribution granulométrique et les propriétés physiques des pierres concassées sont données respectivement dans la [Figure III.3](#) et le [Tableau III.9](#).

Tableau III.9. Propriétés physiques de pierres concassées

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1420
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2610
Coefficient los Angeles (%)	24

III.3. Méthode de formulation de béton

La formulation d'un béton consiste à définir les proportions massiques ou volumiques optimales des mélanges des différents constituants (granulat, ciment, eau, etc.) pour pouvoir réaliser un béton qui soit le plus possible compact et faiblement perméable pour la construction des ouvrages en béton.

La formulation de béton basée sur plusieurs paramètres qui doivent faire l'objet d'un compromis : la résistance, la consistance, l'économie et la durabilité. La qualité du béton est étroitement liée à la qualité et le choix judicieux des proportions intime des constituants[124][125].

Les méthodes de formulation des bétons courants sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire en fonction de la granularité des principaux composants afin d'obtenir une compacité maximale du mélange pour une consistance fixée. Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition du béton, on a utilisé celle qui semble être la moins connue. C'est la méthode de B. Scramtaiev. Cette dernière basée sur l'effet qu'un béton lourd, damé à l'état frais, se rapproche de la compacité absolue, ce qui signifie que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un m^3 est égale au volume de la composition du béton damé[126][127].

A. Données de base

Les données de base servant à calculer la composition du béton sont :

- D_{max} (diamètre des granulats).
- Résistance à la compression après 28 jours.
- Ouvrabilité (AC).
- Caractéristiques techniques des matières premières.

B. Méthode de calcul

- Détermination du dosage en eau

$$E = f(AC, D_{max}, \text{Nature des granulats})$$

- Calcul du rapport C/E

Pour un béton courant : $C/E \leq 2.5$, béton plastique et fluide.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0.5$$

Pour un béton de qualité : $C/E > 2.5$, béton fermé et très fermé.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A_1 \cdot R_c} - 0.5$$

R_b : la résistance à la compression à 28 jours de durcissement normal.

R_c : l'activité du ciment.

A et A_1 : Coefficients de qualité des matériaux utilisés (granulats et ciment) définis dans le [Tableau III.10](#).

Tableau III.10. Valeurs des Coefficients de qualité A et A_1 des matériaux utilisés (granulats et ciment)

Agrégat et liants	A	A_1
Bonne Qualité	0.65	0.43
Qualité moyenne	0.60	0.40
Mauvaise qualité	0.55	0.37

- Calcul du dosage en ciment $C = C/E \times E$
- Calcul du dosage en agrégats (pierres concassées) $G = 35G_1 + 65G_2$

G_1 : (7/15) et G_2 : (15/25)

$$G = \frac{1000}{V_v \frac{\alpha}{\gamma_{app}^G} + \frac{1}{\rho_{abs}^G}}$$

V_v : porosité des pierres concassées. $V_v = 1 - \frac{\gamma_{app}}{\rho_{abs}}$

Coefficient d'écartement de grains $\alpha = 1.24$ (d'après l'abaque).

- Calcul du dosage en sable

$$S = \left[1000 - \left(\frac{G}{\rho_{abs}^G} + \frac{C}{\rho_{abs}^C} + E \right) \right] \cdot \rho_{abs}^S$$

C. Composition

On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne à la compression à 28 jours ≥ 36 MPa et dont la consistance est telle que son affaissement au cône varie de 5 à 9 cm. Dans tous les essais le rapport $E/L = 0.52$, $A = 0.6$, $D_{max} = 25$ mm et les fractions de pierres concassées 7/15 et 15/25 mm étaient respectivement de 0,35 et 0,65 de la masse totale de pierres concassées.

L'utilisation d'un rapport E/L constant permet de mettre en évidence le seul effet du SDB sur l'affaissement et les résistances mécaniques des bétons. Pour la comparaison, un béton sans SDB (C0) a été réalisé pour servir d'éprouvette de référence.

Les compositions des trois mélanges de bétons sont reportées dans le [Tableau III.11](#).

Tableau III.11. Compositions des bétons étudiées

Constituants	C0	C5	C10	C15	C20
Eau (kg/m ³)	183	193	193	193	193
Ciment (kg/m ³)	350	351.5	333	314.5	296
SDB (kg/m ³)	0	18.5	37	55.5	74
E/L			0.52		
Sable (0/5) (kg/m ³)	528	486.6	486.6	486.6	486.6
Gravier (7/15) (kg/m ³)			449		
Gravier (15/25) (kg/m ³)			833		

D'où :

C0 : à base de béton (CEM I)

C5 : à base de béton (CEM I + 5% SDB)

C10 : à base de béton (CEM I + 10% SDB)

C15 : à base de béton (CEM I + 15% SDB)

C20 : à base de béton (CEM I + 20% SDB)

III.4. Programme expérimental et méthodes d'essais

III.4.1. Programme expérimental

Un programme expérimental constitué en plusieurs étapes a été suivi comme illustré dans l'organigramme de la [Figure III.4](#).

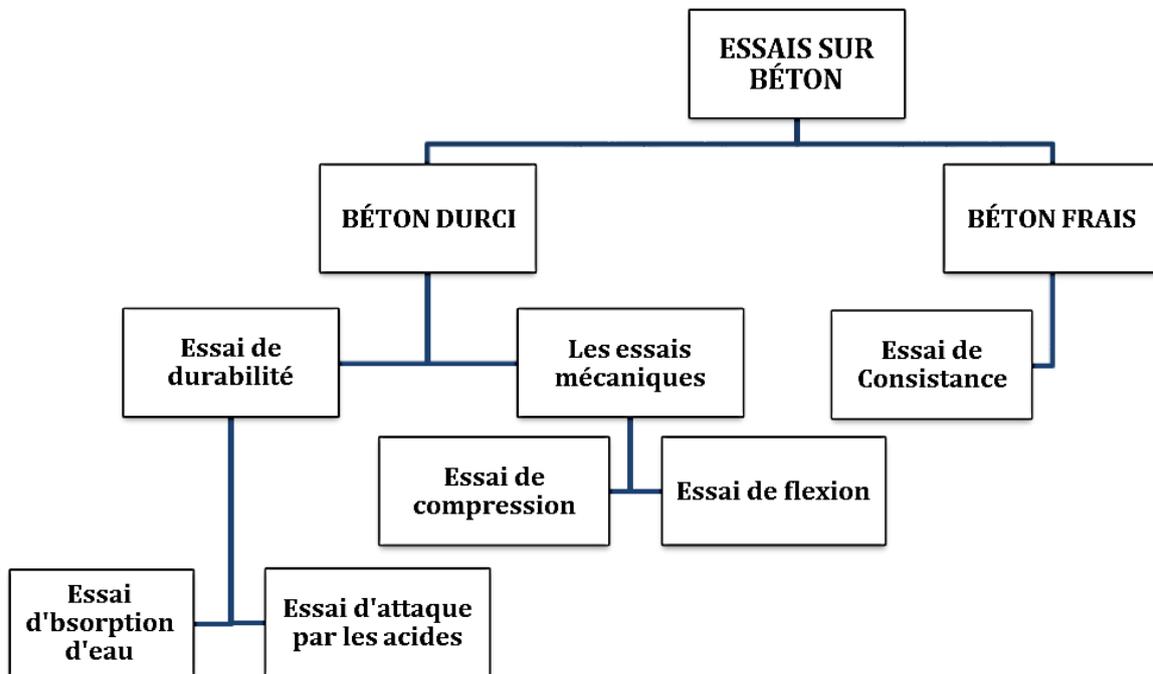


Figure III.4. Organigramme représentatif des différents essais effectués sur béton

La première étape consiste à étudier l'effet de substitution massique partielle du ciment par 5%, 10%, 15% et 20% du sable de dune broyé (SDB) sur les propriétés du béton. Pour cette raison, des mélanges de béton frais ont été préparés pour étudier l'effet du SDB sur la consistance du béton traduit par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Ensuite, les échantillons de béton préparés sont durcis dans l'eau pendant différents âges (1, 2, 3, 7, 28 et 60 jours) afin d'étudier l'effet du SDB sur les propriétés mécaniques du béton en fonction du temps à savoir la résistance à la compression et celle à la flexion. La deuxième étape, consiste à étudier l'effet des différents milieux de durcissement sur la résistance à la compression et à la flexion des échantillons incorporant du SDB à 1, 2, 3, 7 et 28 jours. Trois méthodes de durcissement différentes ont été examinées, le durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C, le durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 26°C et le durcissement par immersion total dans l'eau. Le but de l'étude de ces effets combinés est la détermination de la teneur optimale en SDB et la méthode de durcissement à la vapeur appropriée.

La troisième étape consiste à étudier l'effet du durcissement dans l'eau des éprouvettes durcis durant 3 jours dans la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C. Dans la dernière étape, consacré a évaluée la durabilité des différentes compositions optimales du béton par l'étude de l'absorption capillaire (sorptivité), l'attaque de l'acide chlorhydrique HCl et l'attaque de l'acide sulfurique H₂SO₄ après 28, 90 et 180 jours d'immersion totale.

III.4.2. Méthodes d'essais

III.4.2.1. Malaxage du béton et confection des échantillons

Tous les mélanges ont été gâchés, dans un malaxeur de béton à axe vertical d'une capacité de 70 litres (Figure III.5). La durée totale de malaxage est de trois (03) minutes. L'opération est faite en trois étapes comme montré dans la Figure III.6.



Figure III.5. Image du malaxeur à béton utilisé

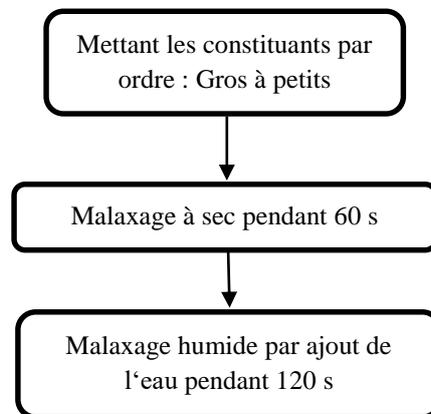


Figure III.6. Les étapes de malaxage de béton

À la fin du malaxage, le béton frais a été vidé du malaxeur dans un bac afin d'examiner leur consistance par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme NF P18-451, puis il a été coulé dans les moules cubiques 10×10×10 mm pour mesurer sa résistance à la compression conformément à la norme EN 12390-3 (2012) [128] et dans les moules prismatiques 10×10×40 cm pour mesurer sa résistance à la flexion conformément à la norme EN 12390-5 (2012). 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. Les échantillons sont démoulés, après 24 h de confection, et conservés jusqu'à le jour de test selon deux modes de durcissement : durcissement par immersion totale dans l'eau à 20 ± 1 °C et le durcissement à la vapeur initiale dans l'enceinte métallique exposé à l'énergie solaire.

III.4.2.2. Mesure de la consistance du béton

Selon la norme NF P18-451, la consistance est une mesure de la fluidité ou de l'ouvrabilité du béton et se définit comme l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages (ou les moules) et à enrober convenablement les armatures. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est actuellement le plus fréquemment utilisés pour mesurer la consistance du béton (Figure III.7) ; il fournit des mesures simples et fiables. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être exécuté par des étapes simples.

Dans cette étude nous avons respectés les étapes suivantes pour mesurer la consistance du béton par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme NF P18-451 :

- Remplir de béton frais dans le moule tronconique normalisé de dimensions ($D = 20\text{cm}$, $d = 10\text{cm}$, $h = 30\text{cm}$) ;
- Le remplissage s'effectue en trois couches compactées avec une tige d'acier de 16mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche ;
- On soulève ensuite le moule avec précaution ;
- On mesure l'affaissement du béton.



Figure III.7. Images de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams : (a) matériels de l'essai, (b) Mesure de l'affaissement

III.4.2.3. Les caractéristiques mécaniques

A. Les méthodes du durcissement

La cure du béton est la protection mise en œuvre pour éviter une dessiccation de surface du béton, pour lui assurer une maturation satisfaisante et donc favoriser son bon durcissement. Elle a une forte influence sur les caractéristiques 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 de béton à savoir le durcissement dans l'eau et le durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire par l'enceinte d'étuvage à 42°C et à 26°C. Après 24 heures de moulage, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon chaque mode de durcissement jusqu'au jour d'écrasement.

A.1. Durcissement dans l'eau :

Le mode de durcissement dans l'eau c'est le mode le plus utilisée dans les laboratoires qui permette d'assurer l'humidité suffisante au béton pour être bien durci. six éprouvettes pour chaque échéance 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) [132] (Figure III.8).



Figure III.8. Image des éprouvettes conservées dans l'eau

A.2. Durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire (enceinte d'étuvage)

Cette technique de durcissement a été proposée la première fois en 2013 par les chercheurs Benammar *et al.* [120][129]. L'idée est basée sur l'exploitation de l'énergie solaire (rayons du soleil) comme activateur des réactions des ciments, au lieu d'utiliser l'énergie électrique qui est très coûteux, pour donner au béton des bonnes propriétés mécaniques. L'enceinte utilisée constituée d'une boîte métallique peinte en noire afin d'absorber le maximum quantité des rayons solaires pour augmenter la chaleur à l'intérieur de la boîte. Les éprouvettes sont placés dans la boîte sur un treillis métallique au-dessus d'une couche d'eau qui ne touche pas les échantillons, cette eau a pour but d'assurer une quantité de vapeur pendant l'échauffement au moment de l'essai (cf. [Figure III.9](#)).



Figure III.9. Enceinte d'étuvage utilisée et exposée aux rayons solaires

La première étape consiste à mesurer d'abord les températures l'aide d'un thermomètre à l'extérieur à l'air ambiant et à l'intérieur de l'enceinte d'étuvage exposée aux rayons solaire pendant 12 mois de l'année (du 01 Janvier au 31 Décembre), la moyenne de ces enregistrements mensuels sont illustrés dans la [Figure III.10](#).

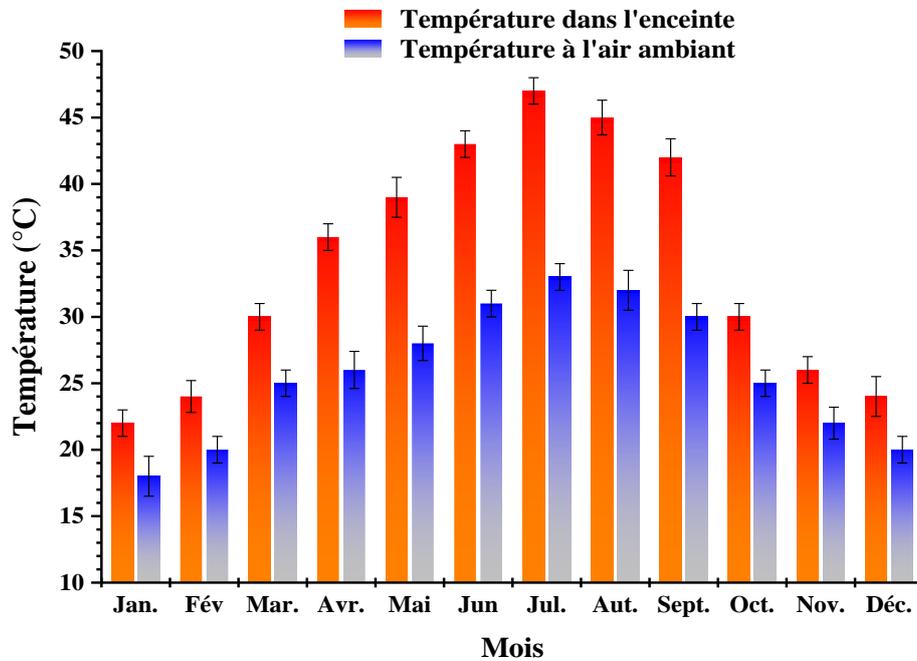


Figure III.10. Variation de la température dans l'enceinte d'étuvage et à l'air ambiant durant une année (2019)

À partir de la variation de températures avec le temps dans les 12 mois de l'année, nous pouvons dire que pendant les six mois d'Octobre à Mars la température moyenne dans l'enceinte d'étuvage est augmentée par 1.2 et augmentée par 1.45 du mois d'Avril à Septembre par rapport à celle enregistrée à l'air ambiant à l'extérieure de l'enceinte, c'est-à-dire :

$$T^{\circ}_{\text{Température dans l'enceinte d'étuvage}} = K_i \times T^{\circ}_{\text{Température à l'air ambiant}}$$

Avec :

T° : température (°C).

K_i : coefficient de variation de la température moyenne ($K_1=1.2$ et $K_2=1.45$).

Sur la base des résultats déduits de la variation de température en fonction du temps à l'intérieur de l'enceinte, nous sélectionnons les six mois (printemps et été), comme indiqué dans le [Tableau III.12](#). On choisit deux cycles d'étuvage : (3×8×3) et (3×9×3) avec un palier de température maximale de 42°C (Cycle1). Nous faisons le même raisonnement pour les six autres

mois (automne et hiver), comme l'indique le [Tableau III.13](#). On choisit les deux cycles d'étuvage : (3×8×3) et (3×7×3) avec un palier de température maximale de 26°C (Cycle 2) comme le montre la [Figure III.11](#).

*Tableau III.12. Cycles d'étuvage et températures maximales (T° de palier)
(printemps - été)*

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre
Cycles (h×h×h)	3×8×3	3×8×3	3×8×3	3×9×3	3×9×3	3×8×3
Températures Maximales dans l'enceinte (°C)	36	39	43	47	45	42

*Tableau III.13. Cycles d'étuvage et températures maximales (T° de palier)
(automne - hiver)*

Mois	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Cycles (h×h×h)	3×8×3	3×7×3	3×7×3	3×7×3	3×7×3	3×8×3
Températures Maximales Dans l'enceinte (°C)	30	26	24	22	24	30

Le cycle d'étuvage comporte quatre phases : la préprise, la montée de la température, le maintien de la température (température maximale) et le refroidissement. Par exemple, pour le cycle 1 (3×8×3), après le démoulage, les éprouvettes sont placés dans l'enceinte d'étuvage à sept heures du matin avec mesure de la température dans l'enceinte à l'aide d'un thermomètre, où la température monte par une vitesse de 8°C/h jusqu'à 42°C à dix heures et elle reste stable pendant 8 heures. À 18 :00 heure, la phase de refroidissement commence durant 3 heures. La température de 42°C équivaut à la moyenne des températures de six mois (d'Avril à Septembre) est généralisé pour la période correspondant aux saisons (printemps et été) (cf. [Tableau III.12](#)). Pour 26°C la période froide (six mois d'Octobre à Mars) est généralisée pour la période correspondant aux saisons (automne et hiver) (cf. [Tableau III.13](#)).

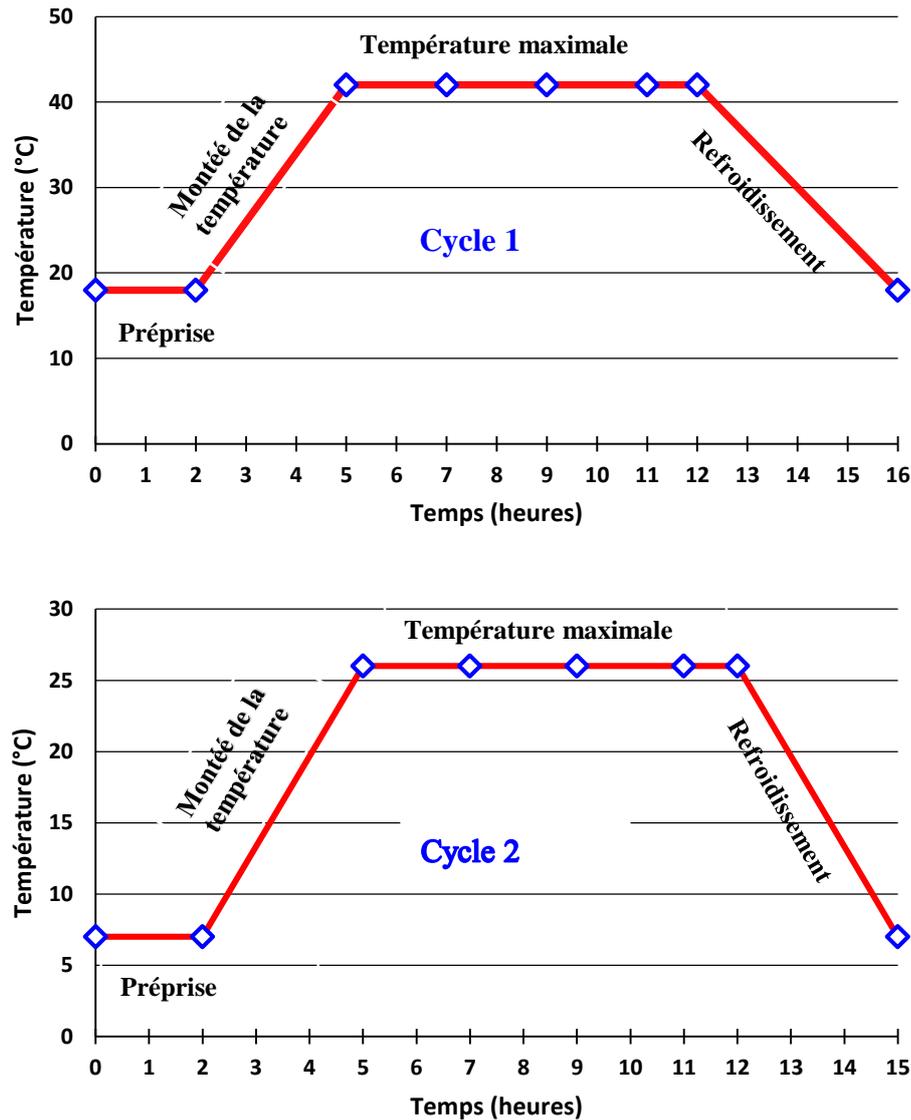


Figure III.11. Cycles du traitement thermique adoptés

B. Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est mesurée sur des éprouvettes cubiques $10 \times 10 \times 10$ cm. La valeur finale de la résistance représente la moyenne de six mesures. Les essais de la résistance à la compression sont effectués à 1, 2, 3, 7, 28 et 60 jours pour le mode de durcissement à l'eau et 1, 2, 3, 7, 28 jours pour le mode de durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire 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 (Figure III.12). L'exécution de l'essai est effectué conformément à la norme NF EN 12390-3 (2012) [127,128].



Figure III.12. Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression

C. Essai de la résistance à la flexion

La résistance à la flexion 3 points est mesurée sur des éprouvettes prismatiques $10 \times 10 \times 40$ cm. La Figure III.13 représente le schéma statique et le dispositif de l'essai. Ce test est réalisé en utilisant une machine d'essai avec une capacité de charge maximale de 30 kN. Six éprouvettes ont été testées pour déterminer les valeurs de résistance. La résistance à la flexion finale représente la moyenne de six mesures pour chaque mode de durcissement et à chaque échéance [127].



Figure III.13. Dispositif de l'essai de flexion

III.4.2.4. La durabilité de béton

Cette partie d'étude traite trois aspects de la durabilité des bétons notamment : 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) de béton testé 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 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.14](#) représente le schéma de l'essai.

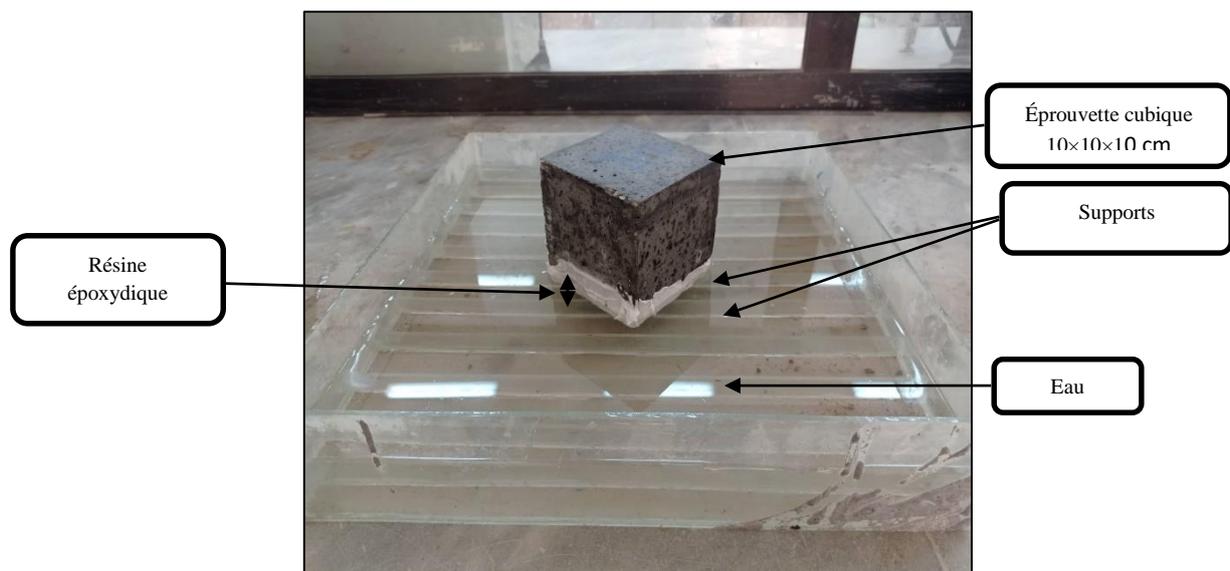


Figure III.14. Principe de mesure de l'absorption capillaire (sorptivité).

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 l'équation suivante :

$$S = \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)}{\sqrt{t}}$$

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, Six compositions de béton ont été soumis à l'examen de l'agressivité selon la teneur en SDB et selon les différents modes de durcissement :

- ✚ C0 durci 28 jours à l'eau.
- ✚ C10 durci 28 jours à l'eau,
- ✚ C0 durci 1 jour à la vapeur à 42°C + 3 jours de durcissement à l'eau,
- ✚ C10 durci 1 jour à la vapeur à 42°C + 3 jours de durcissement à l'eau,
- ✚ C0 durci 3 jours à la vapeur à 42°C + 3 jours de durcissement à l'eau,
- ✚ C10 durci 3 jours à la vapeur à 42°C + 3 jours de durcissement à l'eau,

Les éprouvettes cubiques 10×10×10 cm des six compositions de béton sont complètement immergées dans deux solutions : HCl et H₂SO₄ avec une concentration de 5%. Cette concentration est souvent choisie dans la littérature[91,130]. 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 ont été utilisées pour préparer la solution aggressive 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 de béton sont mis dans le même récipient pour chaque solution aggressive. La [Figure III.15](#) représente les photos de l'essai.



Figure III.15. Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5% H₂SO₄ et 5%HCl

L'évaluation de la dégradation par acides a été effectuée après 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 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) et physiquement (variation de masse).

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

$$\Delta M(\%) = \frac{M_0 - M_j}{M_0} \times 100 \quad \text{Équation III-2}$$

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 ($j = (1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 90 \text{ et } 180)$) en (g)

III.5. Conclusion :

Ce 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 bétons avec les différents pourcentages de SDB. Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée de toutes les expériences réalisées telles les expériences d'étude de l'ouvrabilité de béton, 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 le sable de dune broyé SDB et les différents modes de durcissement.

Chapitre IV .

Analyse des résultats et interprétation

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur l'effet combiné de SDB et le durcissement à la vapeur par énergie solaire sur les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et la durabilité de béton.

Le chapitre est structuré en cinq étapes. La première consiste à discuter l'effet de la teneur de SDB sur la consistance du béton. La deuxième étape a pour objectif d'analyser l'effet de la teneur de sable de dune broyé SDB sur la résistance à la compression et à la flexion du béton après 1, 2, 3, 7, 28 et 60 jours de durcissement dans l'eau. Dans la troisième étape nous analysons et discutons l'effet combiné de sable de dune broyé SDB et le durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C et 26°C sur la résistance à la compression et à la flexion des échantillons à 1, 2, 3, 7 et 28 jours. La quatrième étape nous discutons l'effet du durcissement ultérieur (durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C suivi d'un durcissement dans l'eau) sur les propriétés mécaniques du béton. La dernière étape consiste à analyser les résultats de l'effet des régimes de durcissement appropriés au SDB sur les paramètres de durabilité du béton contenant la quantité optimale de SDB (telle que l'absorption capillaire (sorptivité), l'attaque de l'acide chlorhydrique HCl et de l'attaque de l'acide sulfurique H₂SO₄ après 28, 90 et 180 jours d'immersion totale).

IV.2. Effet de la teneur de SDB sur la consistance du béton

La [Figure IV.1](#) montre les résultats d'affaissement des bétons étudiés en fonction du taux SDB. On remarque sur cette figure que l'affaissement obtenu est compris entre 54 et 75 mm, on peut donc dire que l'ouvrabilité de tous les bétons est de classe plastique et cela signifie la consistance recherchée. Les résultats révèlent également que le sable de dune broyé SDB joue un rôle bénéfique sur l'affaissement jusqu'à un taux d'environ 15% ; les bétons deviennent plus fluides, avec un effet optimum pour un taux d'environ 15%. En effet, à rapport E/L constant, l'ouvrabilité augmente avec l'augmentation du taux de SDB jusqu'à environ 15%, du fait de l'amélioration de la compacité du mélange. Les vides entre les grains ont été diminués par la finesse élevée du SDB, qui a dépassé celle du ciment Portland. Ce résultat a été confirmé par les résultats rencontrés dans la littérature [27,131]. En revanche, un taux de 20% diminue l'affaissement par rapport à la composition de référence (C0). Cela est dû à la quantité excessive de SDB ajoutée. Ainsi, l'ouvrabilité n'augmente que lorsque la quantité de SDB incorporée dans le mélange reste faible ($\leq 15\%$).

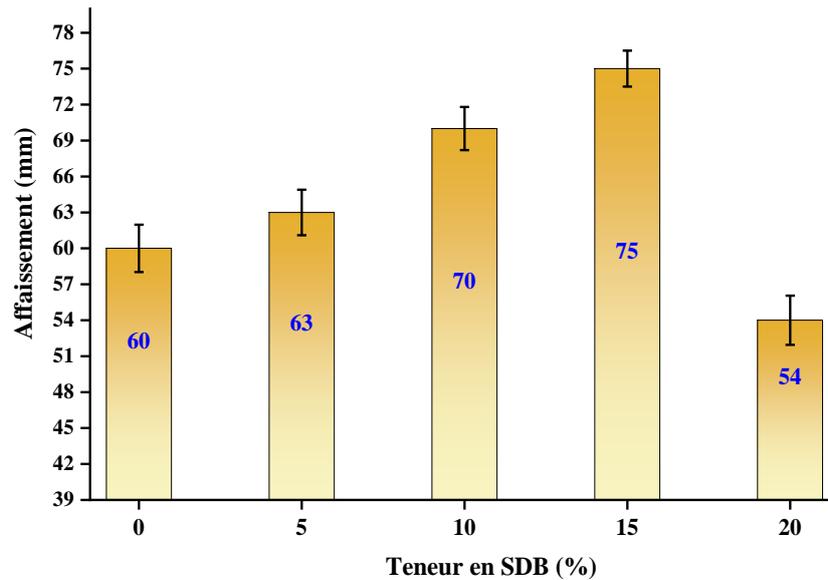


Figure IV.1. Affaissement des bétons en fonction de la teneur de SDB

IV.3. L'effet de la teneur en SDB sur les propriétés mécaniques

IV.3.1. Résistance à la compression

Le développement de la résistance à la compression (R_c) des éprouvettes durcis à l'eau pour différents âges de durcissement (1, 2, 3, 7, 28 et 60 jours) en fonction du taux de sable de dune broyé SDB est illustré dans le [Tableau IV.1](#) et dans la [Figure IV.2](#). En remarque clairement que pendant les sept premiers jours la résistance à la compression (R_c) est faible pour tous les bétons étudiés et diminue directement avec l'augmentation du taux de SDB par rapport à celle de la référence (C0) ; Alors qu'à 28 jours la résistance augmente significativement. Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction du sable de dune broyé SDB avec la Portlandite selon le schéma des réactions suivantes :

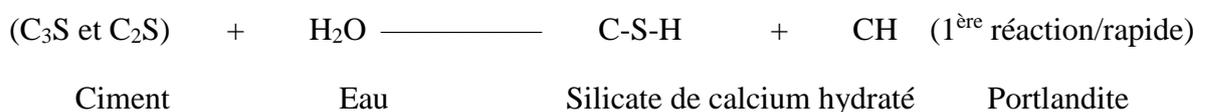


Tableau IV.1. Variation de la résistance à la compression en fonction de SDB et en fonction du Temps

SDB [%]	Résistance à la compression [MPa]					
	1 j	2 j	3 j	7 j	28 j	60 j
0	9.0	14.0	18.0	27.0	40.7	41.5
5	8.4	13.0	16.8	25.6	43.0	44.2
10	8.2	12.7	17.0	25.0	44.0	45.2
15	8.0	12.5	16.1	24.4	41.4	42.5
20	7.3	12.2	15.8	24.0	37.0	39.0

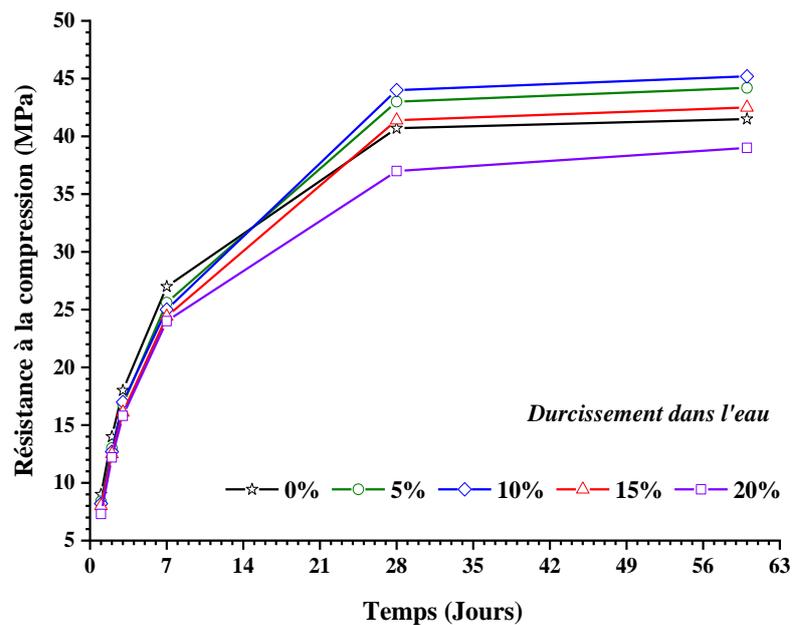


Figure IV.2. Effet de SDB sur la résistance mécanique à la compression en fonction du temps.

Les résultats présentés dans le [Tableau IV.1](#) et dans la [Figure IV.2](#) montrent aussi l'effet bénéfique du durcissement à l'eau, ceci favorise l'hydratation qui provoque le colmatage des pores et renforce les liens intergranulaires [132]. Par conséquent la prolongation de la période de durcissement est la plus efficace et la plus importante. Pour la composition de référence (C0), la résistance à la compression (R_c) est égale à 27 MPa, 40,7 MPa et 41,5 MPa à 7, 28 et 60 jours respectivement. Sur la base des résultats de la première semaine, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du taux de de sable de dune broyé SDB au ciment par rapport au béton témoin C0. Par exemple, pour la composition C10 la diminution est de l'ordre de 8,9 %, 9,3 %, 5,6 % et 7,4 % à 1, 2, 3 et 7 jours respectivement. La diminution peut être attribuée à la diminution de la quantité de ciment dans les bétons qui est remplacé par SDB, C'est ce qu'on appelle l'effet de dilution. Par conséquent, le SDB a agi comme un matériau de remplissage dans les premiers jours de durcissement (au jeune âge). Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature [14,52,60]. Au-delà du 28^{ème} jour, la substitution du ciment par 5%, 10% et 15% de

SDB conduit à une augmentation du R_c par rapport à la référence C0 de l'ordre de 5,7%, 8,1% et 1,7% à 28 jours et 6,5%, 8,9% et 2,4 % à 60 jours respectivement. Cette amélioration des résistances résulte essentiellement par trois effets qui agissent de manière intégrée (effet de remplissage, effet de nucléation hétérogène et effet pouzzolanique partiel) [26–28]. La résistance des bétons au jeune âge se développe grâce à deux effets de SDB engendré à la fois : effet de remplissage dû à sa finesse et effet de l'accélération d'hydratation du ciment due à l'effet de nucléation hétérogène ; Alors qu'au moyen et à long terme la résistance se développe grâce à l'effet pouzzolanique partiel. La résistance à la compression la plus élevée à 28 jours (44 MPa) a été atteinte à 10 % de SDB. En revanche, pour un taux de 20%, la résistance obtenue est toujours inférieure à celle du C0. Ceci pourrait s'expliquer par l'effet de dilution qui devient prédominant et conduit à une diminution des résistances à la compression. En conséquence, le SDB joue un rôle bénéfique à moyen et à long terme sur le développement de la résistance à la compression jusqu'à des taux de l'ordre de 15%, avec un effet optimal à 10%.

Le [Tableau IV.2](#) et La [Figure IV.3](#) représentent la variation du rapport ($R_c / (R_c \text{ de référence})$) durci à l'eau, qui montre la variation de la résistance à la compression des éprouvettes durcis à l'eau par rapport au C0 en fonction de l'âge exprimé en (%). Il ressort clairement du tableau et de la figure qu'au cours des sept premiers jours, il existe une relation directe entre le taux de SDB et la diminution de la résistance ; c'est-à-dire que la résistance à la compression est une fonction décroissante avec l'augmentation du taux de SDB. Par contre, à 28 jours de durcissement la résistance R_c des bétons C5, C10 et C15 est augmentée, ce qui montre que le SDB est réactif dans des conditions de cure à l'eau avec la Portlandite suite à une réaction pouzzolanique partielle et qu'il commence sa réaction à partir de 28 jours. Ce résultat est cohérent avec les résultats d'autres études [26,27]. Cette propriété n'est valable que lorsque la quantité de SDB incorporée dans le mélange reste modérée ($\leq 15 \%$).

Tableau IV.2. Résultats du rapport $R_c / (R_c \text{ de référence})$ durci dans l'eau

Temps (Jours)	Rc / (Rc de référence) durci dans l'eau (%)			
	5% SDB	10% SDB	15% SDB	20% SDB
1	-6.7	-8.9	-11.1	-18.9
2	-7.1	-9.3	-10.7	-12.9
3	-6.67	-5.6	-10.6	-12.2
7	-5.2	-7.4	-9.6	-11.1
28	5.7	8.1	1.7	-9.1

+ gain - perte

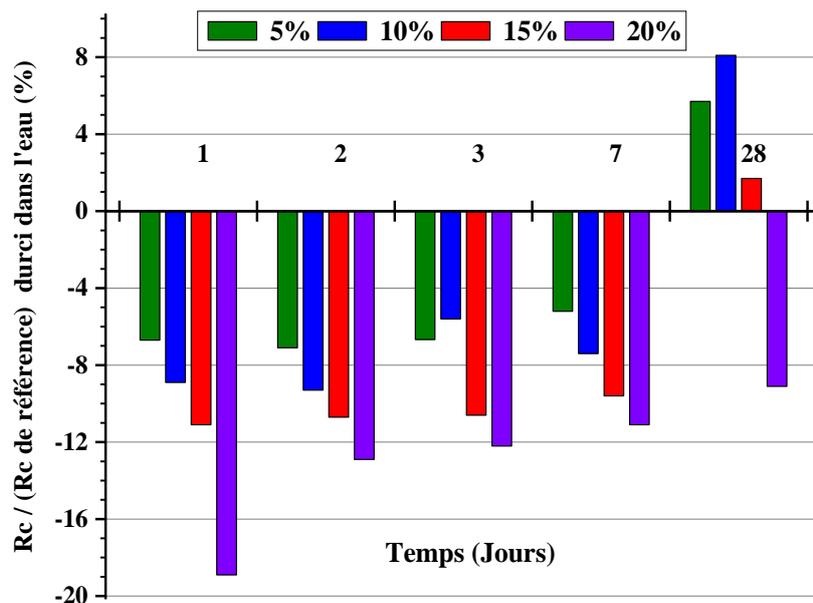


Figure IV.3. Effet de SDB sur la variation de la résistance à la compression du béton par rapport au béton témoin en fonction du temps

IV.3.2. Résistance à la flexion

Les résultats présentés dans le [Tableau IV.3](#) la [Figure IV.4](#) montrent que le développement de la résistance à la flexion était très similaire à celui de la compression quel que soit le taux de SDB et l'âge de durcissement. Cela signifie que la résistance à la compression augmente au cours de la progression des réactions d'hydratation s'accompagne d'une augmentation avec une proportion différente de la résistance à la flexion. La résistance à la flexion la plus élevée à 28 jours (8.41 MPa) a été obtenue avec 10 % de SDB par remplacement au ciment Portland.

Tableau IV.3. Résultats de la résistance à la flexion -durcissement dans l'eau

Temps (Jours)	Résistance à la flexion (Mpa)				
	0% SDB	5% SDB	10% SDB	15% SDB	20% SDB
1	1.76	1.68	1.66	1.53	1.39
2	2.58	2.47	2.36	2.32	2.28
3	3.47	3.31	3.23	3.13	2.95
7	5.02	4.91	4.85	4.67	4.44
28	7.68	8.11	8.41	8.04	7.03
60	7.82	8.4	8.84	8.18	7.33

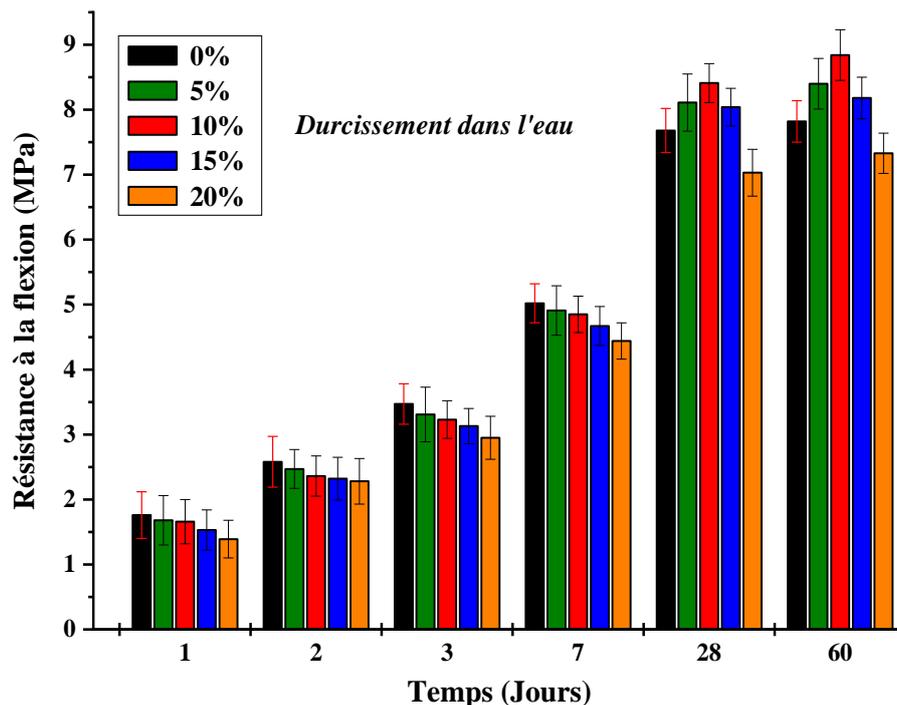


Figure IV.4. Effet du taux de SDB sur le développement de la résistance à la flexion des bétons en fonction du temps.

IV.4. L'effet combiné de SDB et le durcissement à la vapeur initiale

IV.4.1. Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes durcies à la vapeur par énergie solaire pour différents âges de durcissement (1, 2, 3, 7 et 28 jours) en fonction du taux de SDB est illustrée dans le [Tableau IV.4](#), la [Figure IV.5](#), le [Tableau IV.5](#) et la [Figure IV.6](#). Comme la montre les figures, par rapport au durcissement à l'eau, l'utilisation d'un durcissement à la vapeur par énergie solaire permet d'obtenir de meilleures résistances à la compression des éprouvettes au jeune âge par une hydratation initiale accélérée [34]. Cela est dû à la température de traitement ainsi qu'à la condensation de la vapeur d'eau saturée d'air à l'intérieur de l'enceinte d'étuvage qui favorise une bonne humidification et hydratation des échantillons.

Le [Tableau IV.4](#) et La [Figure IV.5](#) montrent les résultats de la résistance à la compression des bétons après durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C.

Tableau IV.4. Résultats de la résistance à la compression des béton soumis au durcissement à la vapeur à 42°C

Temps (Jours)	Résistance à la compression (Mpa)				
	0% SDB	5% SDB	10% SDB	15% SDB	20% SDB
1	29.8	28.7	28	27.5	26
2	32.5	31.3	30.6	30	29.4
3	34	38	39.4	37.1	35.2
7	35.6	44.9	46.3	43.6	38.2
28	39.8	50.3	52.54	49	43

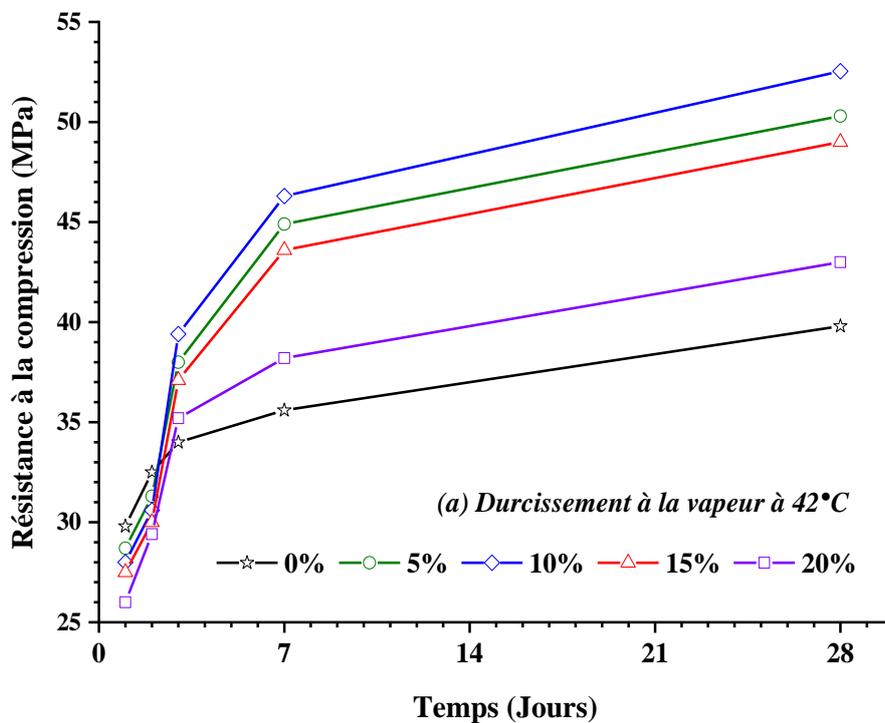


Figure IV.5. Effet de durcissement à la vapeur à 42°C et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la compression des bétons.

Pour le béton témoin C0, la résistance à la compression (R_c) est égale à 34 MPa, 35,6 MPa et 39,8 MPa à 3, 7 et 28 jours respectivement. Le durcissement à la vapeur par énergie solaire a diminué la résistance à la compression à 28 jours par rapport à la résistance du durcissement à l'eau. Cette diminution de la résistance à la compression du C0 avec le durcissement à la vapeur peut être due à l'hydratation initiale accélérée peut conduire à une structure moins compacte, entraînant une perte de résistance par rapport au béton lentement hydraté dans l'eau [2,34,103,104].

En revanche, après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C, toutes les compositions contenant du SDB présentaient une résistance à la compression supérieure à la composition de référence C0. Par exemple, l'amélioration est très nette pour la composition C10 qui atteint l'environ de 15,9% à 3 jours, 30,1% à 7 jours et 32% à 28 jours par rapport à C0 de référence (soit 39,40 MPa, 46,30 MPa et 52,54 MPa respectivement).

De plus à 20 % de remplacement du SDB, la résistance à la compression à 28 jours de durcissement à la vapeur à 42 °C était supérieure à celle du C0 lors du durcissement à l'eau. Ceci peut s'expliquer par le fait que le durcissement à la vapeur à 42°C peut conduire à une augmentation de l'activité pouzzolanique du SDB en activant la silice la moins réactive ; permettant ainsi au béton d'acquérir des résistances initiales élevées. La silice a réagi avec la Portlandite (CH) générée à partir de l'hydratation du ciment pour produire le silicate de calcium hydraté de deuxième génération de (C-S-H) semi-cristallisé et a réduit le rapport CaO/SiO₂. Ceci est en accord avec les résultats de la littérature [9,29,32,109]. C'est-à-dire que la réaction pouzzolanique partielle du SDB a été accélérée par le durcissement à la vapeur à 42 ° C en utilisant l'énergie solaire pendant trois jours. La résistance à la compression optimale a été atteinte à 10 % de SDB.

Tableau IV.5. Résultats de la résistance à la compression des béton soumis au durcissement à la vapeur à 26°C

Temps (Jours)	Résistance à la compression (Mpa)				
	0% SDB	5% SDB	10% SDB	15%SDB	20%SDB
1	22.5	21.5	21	20.7	19.6
2	25.6	24.5	24	23.5	23
3	29	28.9	28.9	26.9	26
7	32	39.7	40	38.7	34.2
28	35.3	44.5	45.18	43.4	38.1

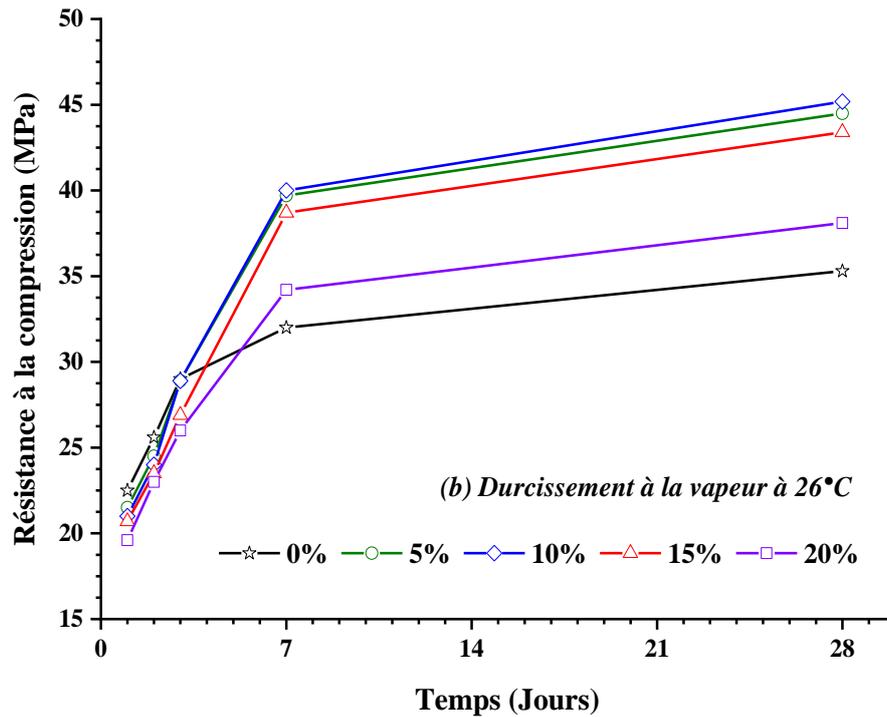


Figure IV.6. Effet de durcissement à la vapeur et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la compression des bétons

Le [Tableau IV.5](#) et La [Figure IV.6](#) montre les résultats de la résistance à la compression des bétons durci à la vapeur par énergie solaire à 26°C. Pour la composition C0, la résistance à la compression est égale à 29 MPa, 32 MPa et 35,3 MPa à 3, 7 et 28 jours respectivement. Après sept jours de durcissement à la vapeur à 26°C, toutes les compositions contenant du SDB présentaient une résistance à la compression supérieure à la composition référence C0. Par exemple, la meilleure amélioration a été enregistrée pour la composition C10 qui atteint environ 25% à 7 jours (40 MPa) et 28% à 28 jours (45,18 MPa) par rapport au C0 de référence. Après le durcissement à la vapeur à 26°C, l'activité pouzzolannique du SDB commence à être significative à partir de 7 jours. Le pourcentage optimal de SDB qui a conduit à une activité pouzzolannique maximale était de 10%.

D'après la discussion précédente, on peut conclure que le durcissement à la vapeur à 42°C est plus utile car l'activité pouzzolannique du SDB commence à être significative à partir du troisième jour et on peut dire que c'est la durée optimale de durcissement initial à 42°C. Autrement dit, il est préférable que la période initiale de durcissement à la vapeur soit plus courte [7,16,18,24].

Afin de bien estimer l'effet combiné du régime de durcissement à la vapeur et de teneur en SDB le rapport de la résistance à la compression (R_c) des éprouvettes durcis à la vapeur sur ceux

durcis dans l'eau a été établi, les valeurs sont présentées dans le [Tableau IV.6](#) et la [Figure IV.7](#) et dans le [Tableau IV.7](#) et la [Figure IV.8](#). Il ressort clairement du [Tableau IV.6](#) de la [Figure IV.7](#) que les bétons contenant du SDB exposés à la vapeur à 42°C ayant de bonne résistance à la compression par rapport à ceux durcis à l'eau. On remarque également que l'amélioration du (Rc) est très importante et elle est de 120 % à 257% dans les trois (03) premiers jours, et de 16 % à 86 % après 7 et 28 jours de durcissement à 42°C (à l'exception de C0 où (la résistance chutée par 2.2% à 28 jours). Cela signifie qu'ils ont acquis l'essentiel de ses résistances durant les trois premiers jours de traitement à 42°C. De plus, la résistance (Rc) du béton (C10) à trois jours durcit à la vapeur à 42°C représente 97 % de celle du C0 à 28 jours durcit dans l'eau. De ce fait, l'association de durcissement à la vapeur à 42°C et de l'ajout de 10% de (SDB) est très bénéfique pour le développement d'une bonne résistance à court terme. Ce résultat est confirmé par plusieurs recherches antérieurs [2,34,103].

En ce qui concerne le durcissement à la vapeur à 26°C, les mêmes variations peuvent être observées que dans le cas de durcissement à 42°C ([Figure IV.8](#)). Les bétons à base de SDB durcis à la vapeur à 26°C ayant des bonnes résistances par rapport à ceux durcis dans l'eau. L'amélioration de la résistance est très importante et elle est de 150 % à 169% dans le premier jour, de 60% à 90% dans le deuxième et troisième jour et de 3 % à 60 % après 7 et 28 jours de durcissement (à l'exception de C0 où la résistance chutée par 13.3% à 28 jours). La résistance à la compression du béton (C10) à sept (07) jours durcit à la vapeur à 26°C représente 98 % de celle du C0 à 28 jours durcit dans l'eau.

Tableau IV.6. Variation de rapport Rc de durcissement à la vapeur à 42°C/Rc de durcissement à l'eau

Temps (Jours)	Rc de durcissement à la vapeur à 42°C/Rc de durcissement à l'eau				
	0% SDB	5% SDB	10% SDB	15%SDB	20%SDB
1	3.3	3.4	3.4	3.4	3.6
2	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4
3	1.9	2.3	2.3	2.3	2.2
7	1.3	1.8	1.9	1.8	1.6
28	1	1.2	1.2	1.2	1.2

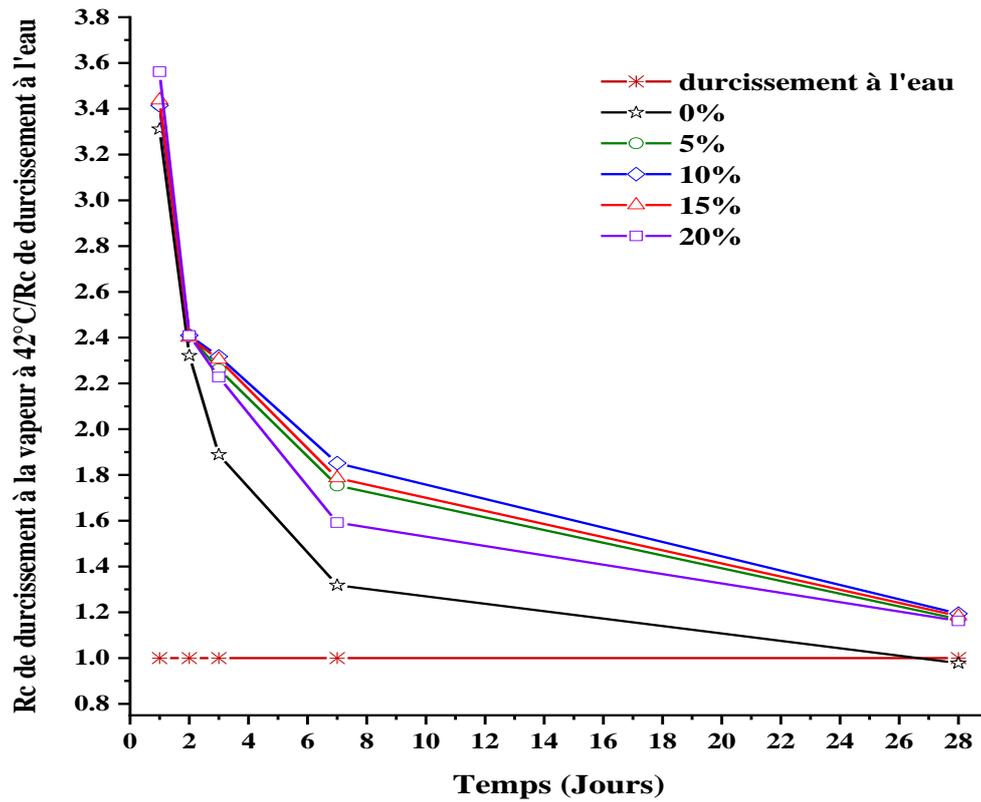


Figure IV.7. Effet combiné de teneur en SDB et de durcissement à la vapeur à 42°C sur rapport de la résistance à la compression (R_c durcis à la vapeur à 42°C / R_c durcit dans l'eau) en fonction du temps.

Tableau IV.7. Variation de rapport R_c de durcissement à la vapeur à 26°C / R_c de durcissement à l'eau

Temps (Jours)	Rc de durcissement à la vapeur à 26°C / Rc de durcissement à l'eau				
	0% SDB	5% SDB	10% SDB	15% SDB	20% SDB
1	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7
2	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9
3	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6
7	1.9	1.6	1.6	1.6	1.4
28	0.9	1	1	1	1

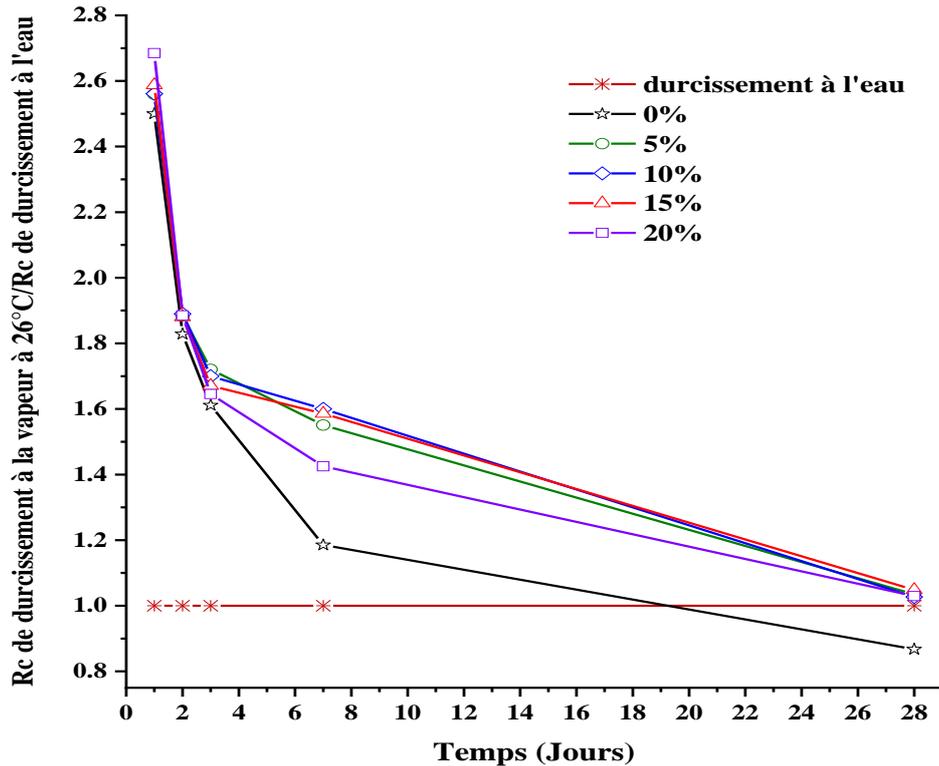


Figure IV.8. Effet combiné du taux de SDB et de durcissement à la vapeur à 26°C sur le rapport de la résistance à la compression (R_c durcis à la vapeur à 26°C / R_c durcit dans l'eau) en fonction du temps.

Le [Tableau IV.8](#), La [Figure IV.9](#), [Tableau IV.9](#) et la [Figure IV.10](#) montrent l'effet combiné du taux de SDB et du durcissement à la vapeur à 42°C et à 26°C, respectivement, sur le développement du gain de résistance à la compression en fonction de temps. Comme il est clair sur dans le [Tableau IV.8](#) et la [Figure IV.9](#), à partir de troisième jour de durcissement à la vapeur à 42°C, les résistances des éprouvettes contenant du SDB sont supérieures à celle de la référence C0, où le béton C10 offre des gains de résistance notables atteignant 16%, 30% et 32 % à 3, 7 et 28 jours respectivement. De même façon pour le durcissement à la vapeur à 26°C ([Figure IV.10](#)), à partir de septième jour de durcissement le bon gain en R_c à 28 jours était pour le C10 qui représente un taux de développement de 28% par rapport à la référence C0.

Par conséquent, on peut conclure que l'effet combiné du taux de SDB et du durcissement à la vapeur à l'aide de l'énergie solaire est prometteur dans la réalisation d'éléments préfabriqués en tenant compte des aspects environnementaux et technico-économiques.

Tableau IV.8. Résultats de l'effet combiné du taux de SDB et du durcissement à la vapeur à 42°C sur le gain de la résistance à la compression

Rc / (Rc de référence) dans le durcissement à la vapeur à 42°C (%)				
Temps (Jours)	5% SDB	10% SDB	15% SDB	20% SDB
1	-3.7	-6	-7.7	-12.8
2	-3.7	-5.8	-7.7	-9.5
3	11.8	15.9	9.1	3.5
7	26.1	30.1	22.5	7.3
28	26.4	32	23.1	8

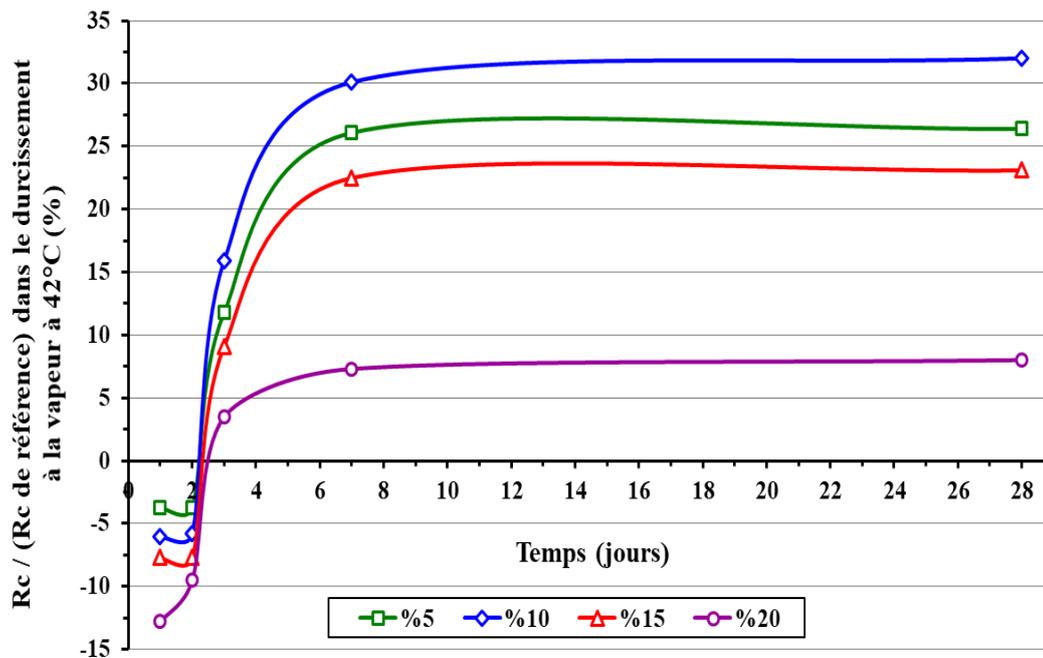


Figure IV.9. Effet combiné du taux de SDB et de durcissement à la vapeur à 42°C sur le développement du gain de résistance à la compression en fonction du temps.

Tableau IV.9. Résultats de l'effet combiné du taux de SDB et du durcissement à la vapeur à 26°C sur le gain de la résistance à la compression

Rc / (Rc de référence) dans le durcissement à la vapeur à 26°C (%)				
Temps (Jours)	5% SDB	10% SDB	15% SDB	20% SDB
1	-4.4	-6.7	-8	-12.9
2	-4.3	-6.3	-8.2	-10.2
3	-0.3	-0.3	-7.2	-10
7	24.1	25	20.9	6.9
28	26.1	28	22.9	7.9

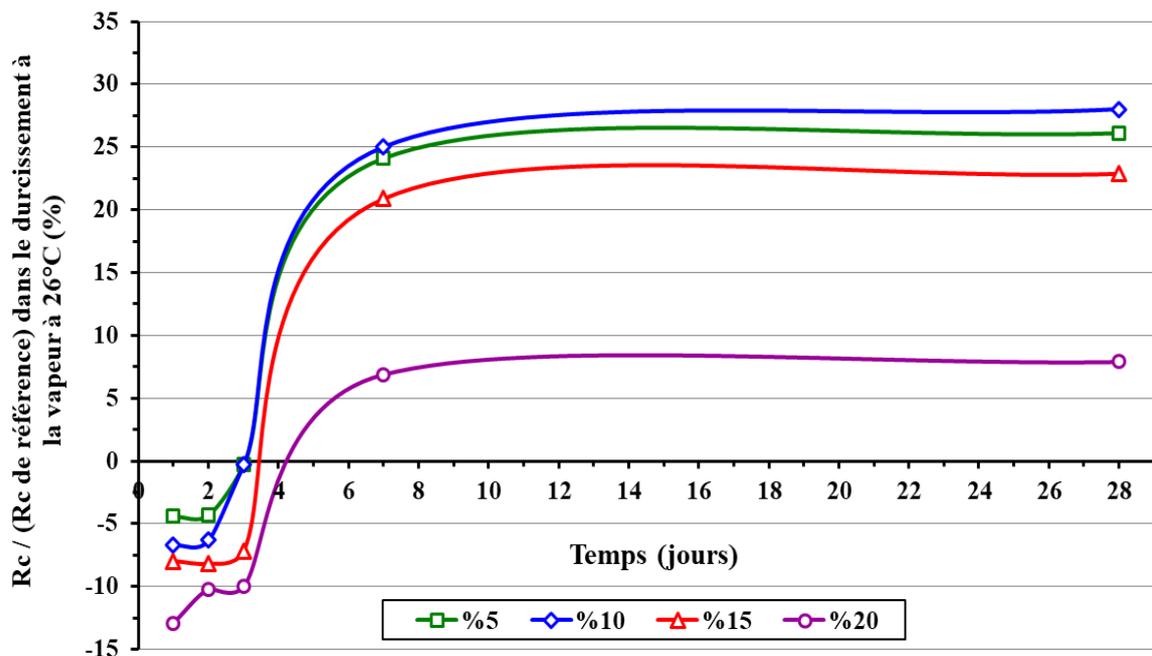


Figure IV.10. Effet combiné du taux de SDB et de durcissement à la vapeur à 26°C sur le développement du gain de résistance à la compression en fonction du temps

IV.4.2. Résistance à la flexion

Les résultats illustrés dans [Tableau IV.10](#), [Figure IV.11](#), [Tableau IV.11](#) et dans la [Figure IV.12](#) montrent que les résistances à la flexion des bétons est proportionnelle à la résistance à la compression quelle que soit le taux de SDB et le mode de durcissement à la vapeur. La résistance à la flexion la plus élevée à 28 jours a été obtenue avec 10 % du ciment remplacé par du SDB.

Tableau IV.10. Résultats de la résistance à flexion des béton soumis au durcissement à la vapeur à 42°C

Temps (Jours)	Résistance la flexion (Mpa)				
	0% SDB	5% SDB	10% SDB	15%SDB	20%SDB
1	5.77	5.62	5.39	5.2	4.81
2	6.27	6.12	6.2	5.85	5.63
3	6.66	7.49	7.72	7.2	6.3
7	6.93	8.72	8.98	8.33	7.11
28	7.64	9.7	10.3	9.36	8.04

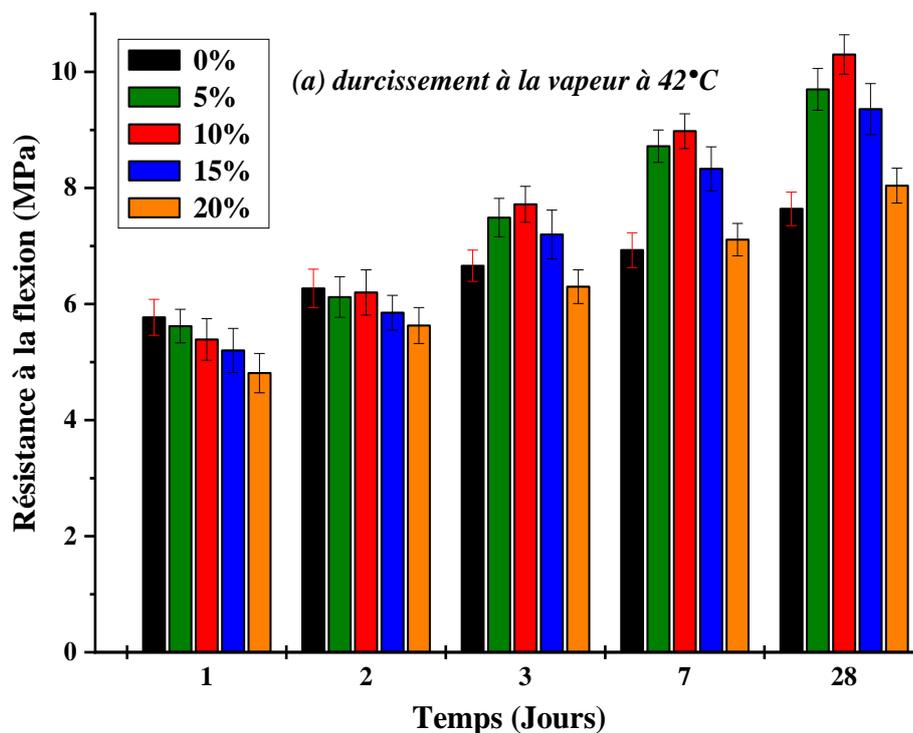


Figure IV.11. Effets de durcissement à la vapeur à 42°C et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la flexion des bétons

Tableau IV.11. Résultats de la résistance à flexion des béton soumis au durcissement à la vapeur à 26°C

Temps (Jours)	Résistance la flexion (Mpa)				
	0% SDB	5% SDB	10% SDB	15%SDB	20%SDB
1	4.1	4.05	4.04	3.9	3.65
2	4.9	4.71	4.58	4.41	4.39
3	5.7	5.58	5.48	5.33	4.99
7	6.31	7.42	7.74	7.32	6.7
28	7.02	8.38	8.93	8.21	7.24

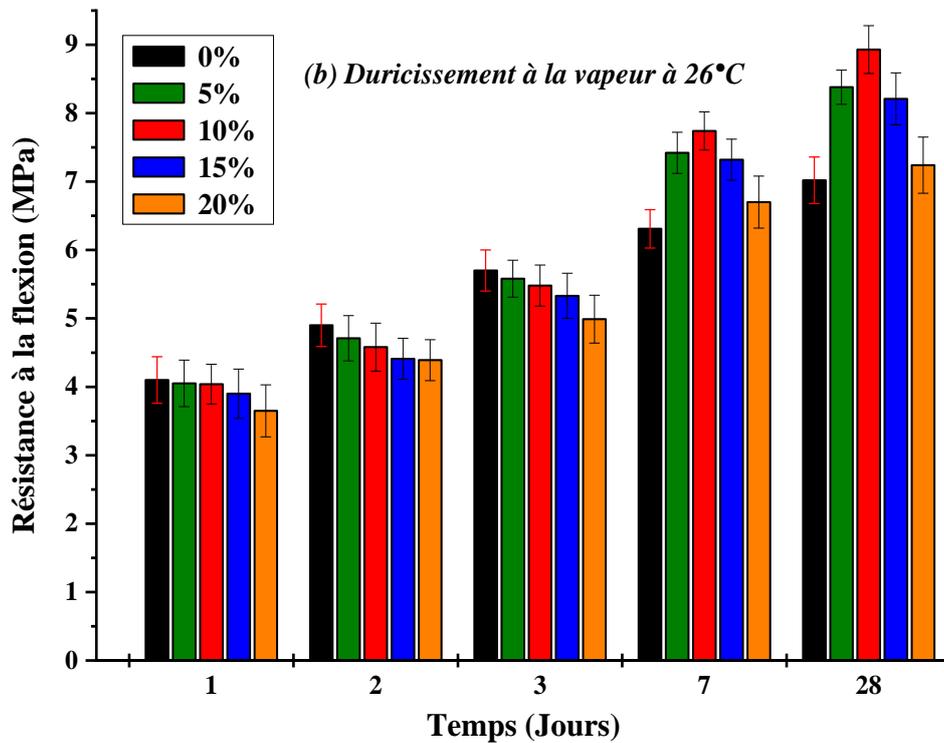


Figure IV.12. Effets de durcissement à la vapeur à 26°C et du taux de SDB sur l'évolution de la résistance à la flexion des bétons

IV.5. Effet du durcissement ultérieur dans l'eau après durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C

La technique de durcissement ultérieur dans l'eau est le moyen le plus simple de minimiser les effets négatifs du durcissement à la vapeur sur le comportement mécanique et la microstructure du béton à un âge plus avancé, causée par le durcissement accéléré du béton[20]. Il est préférable que le temps initial de durcissement à la vapeur soit plus court[7,11,18,19]. Par conséquent, deux régimes de durcissement ultérieur ont été proposées et appliquées aux éprouvettes de différents bétons avec SDB, le premier est le durcissement à la vapeur à 42°C par énergie solaire pendant 01 jour puis le durcissement dans l'eau pendant encore 3 jours ; le deuxième est le durcissement à la vapeur à 42°C par énergie solaire pendant 03 jours puis le durcissement dans l'eau pendant encore 3 jours. Les résultats obtenus de l'effet de ces deux modes du prolongement sur les résistances à la compression des bétons sont résumés dans le [Tableau IV.12](#).

Tableau IV.12. Effet de durcissement dans l'eau après durcissement à la vapeur à 42 °C sur les résistances à la compression des bétons.

Compositions	Résistances à la compression Rc (MPa) et pourcentage de durcissement (%)			
	1 jour de durcissement à la vapeur à 42°C + 3 jours de durcissement à l'eau	Durcissement en (%)	3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C + 3 jours de durcissement à l'eau	Durcissement en (%)
C0	39.70	97.54	40.60	99.75
C5	38.70	90.00	45.40	105.58
C10	38.10	86.59	47.70	108.41
C15	37.40	90.34	43.00	103.86
C20	35.00	94.59	37.60	101.62

D'après les résultats du [Tableau IV.12](#), les bétons C0, C5, C10, C15 et C20 exposés au premier régime de durcissement ultérieur (1+3) présentent des taux de développement d'ordre de 97,54%, 90%, 86,59%, 90,34% et 94,59% par rapport à ceux durcis dans l'eau pendant 28 jours, respectivement. Pour le deuxième régime (3+3), la résistance à la compression des éprouvettes contenant du SDB dans différentes proportions (5 %, 10 %, 15 % et 20 %) dépasse les résistances des éprouvettes durcissant dans l'eau à 28 jours par 5,58 %, 8,41 %, 3,86 % et 1,62 %, respectivement. Pour la composition de référence C0, la résistance à la compression est presque comparable à celle du béton durci dans l'eau à 28 jours. En conséquence, le deuxième régime de prolongement proposé (3 jours d'étuvage à 42°C puis encore 3 jours dans l'eau) permet d'obtenir des temps de production plus courts et de gagner du temps pour atteindre une meilleure résistance à la compression par rapport à la résistance à 28 jours dans l'eau. Il est indispensable d'utiliser la technique de durcissement ultérieur à l'eau (3 jours de durcissement dans l'eau) car elle a un effet

significatif sur les résistances à la compression des bétons contenant du SDB après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C.

IV.6. Étude de la durabilité

La durabilité des structures en béton est largement considérée comme une préoccupation majeure pour la communauté scientifique au cours des dernières décennies. Une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins, on peut alors observer des dégradations des bétons par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatique. De ce fait, une étude du suivi de la dégradation au cours du temps des bétons exposés à différents milieux agressifs est nécessaire.

Cette partie de l'étude s'intéresse à la mesure des indicateurs de la durabilité des bétons contenant SDB (0% et 10%) est soumis au trois méthodes durcissement : durcissement dans l'eau, durcissement ultérieur dans l'eau pendant trois (03) jours après un (01) jour de durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C et durcissement ultérieur dans l'eau pendant trois (03) jours après trois (03) jours de durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire à 42°C. Trois indicateurs ont été évalués sur des échantillons exposées au deux milieux agressifs HCl et H₂SO₄ à savoir la mesure de l'absorption capillaire, l'examen visuel des dégradations et la variation de la masse.

IV.6.1. Méthodes de durcissement et compositions des bétons testées

Les mesures des indicateurs de durabilité sont effectuées sur deux compositions de béton contenant 0% SDB et 10% SDB et exposées à trois méthodes de durcissement :

- ☒ Bétons avec 0%SDB et 10%SDB exposés au durcissement dans l'eau pendant 28 jours (comme milieu témoin) ;
- ☒ Bétons avec 0%SDB et 10%SDB exposés au durcissement ultérieur dans l'eau pendant trois jours après un (01) jour de durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C ;
- ☒ Bétons avec 0%SDB et 10%SDB exposés au durcissement ultérieur dans l'eau pendant trois jours après trois (03) jours de durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C.

IV.6.2. Mesure de coefficient d'absorption capillaire

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

$$S = \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)}{\sqrt{t}}$$

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 ;

Les résultats de la variation de l'absorption capillaire en fonction du SDB et en fonction de chaque méthode de durcissement utilisées sont montrés dans la [Figure IV.13.](#), On remarque d'un côté que, quel que soit la méthode de durcissement utilisée, l'introduction de 10% de SDB par substitution au ciment a diminuée la sorptivité. D'un autre côté, l'application d'un régime de durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C a entraîné des diminutions très significatives du coefficient de sorptivité, cela est très remarquable dans le cas des bétons avec 10%SDB associé avec le durcissement ultérieur à l'eau pendant trois jours après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C. La différence entre les trois régimes de durcissement des bétons contenant du SDB est traduite par la diminution de la porosité capillaire, c'est-à-dire la diminution du réseau des pores capillaire accessible à l'eau, cette diminution est à cause de l'effet physique et de l'effet pouzzolanique du SDB. Dans l'effet physique, les particules fines de SDB se loger entre les gros grains grâce à sa grande finesse ce qui implique une modification de la structure des pores et empêche la connectivité entre eux. Dans l'effet pouzzolanique, dans le cas de durcissement à l'eau, le SDB a réagi partiellement avec les hydrates de ciment issus de l'hydratation des silicates, Cette réaction est devenue rapide et efficace en présence de la chaleur et de l'humidité suffisante lorsque les bétons sont durcis trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C. En conséquence, le durcissement ultérieur dans l'eau après durcissement à la vapeur à 42°C (3+3) a un effet très bénéfique sur l'amélioration de la compacité des bétons contenant de 10%SDB.

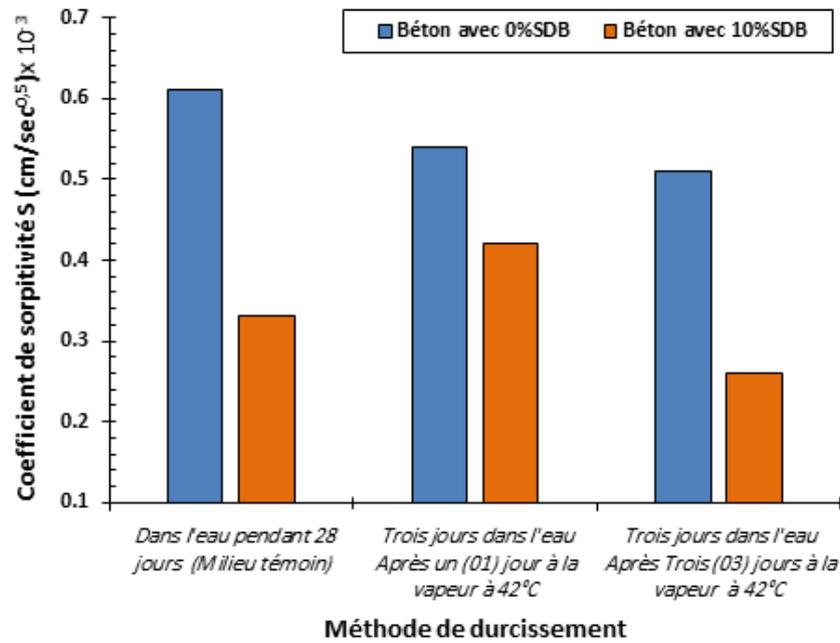


Figure IV.13. Variation de coefficient de sorptivité S en fonction de SDB et en fonction de la méthode de durcissement

IV.6.3. Résistance à l'attaque chimique d'HCl et H₂SO₄

IV.6.3.1. Conservation dans l'eau distillée (milieu témoin)

Les résultats présentés dans le [Tableau IV.13](#) et la [Figure IV.14](#) montrent la variation de la masse en (%) mesurée à la fin de chaque période d'immersion dans l'eau distillée en fonction de la méthode de durcissement de différents des éprouvettes du béton contenant SDB.

Tableau IV.13. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans l'eau, de la méthode de durcissement et du SDB.

Temps (Jours)	Gain de masse (%)					
	(1) Durcissement dans l'eau pendant 28 Jours (Milieu témoin)		(2) Durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 1 jour de durcissement à la vapeur à 42°C		(3) Durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 3 jour de durcissement à la vapeur à 42°C	
	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB
1	0.004	0.004	0.0061	0.0064	0.0055	0.001
3	0.0061	0.007	0.002	0.00745	0.0081	0.003
7	0.015	0.02	0.02	0.015	0.019	0.006
14	0.14	0.2	0.19	0.16	0.16	0.1
28	0.28	0.35	0.34	0.27	0.3	0.21
56	0.42	0.39	0.44	0.4	0.43	0.35
90	0.43	0.423	0.477	0.42	0.465	0.39
180	0.49	0.46	0.557	0.47	0.51	0.4

Il est clair dans la [Figure IV.14](#) que, quel que soit le mode durcissement et le taux de SDB, tous les bétons ont subi des gains de masse. C'est-à-dire la masse des échantillons augmente progressivement avec la période d'immersion dans l'eau distillée qui peut s'exprimer par une relation proportionnelle entre la période d'immersion dans l'eau distillée et l'augmentation en masse. Le gain en masse est varié entre 0.4% et 0.56% 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 [133][134]. Concernant le durcissement dans l'eau, on remarque que le gain en masse des éprouvettes contenant 10% SDB a diminué au-delà de 28èmes jours d'immersion, c'est-à-dire ces éprouvettes ont devenue plus compactes que celles formés sans SDB (0% SDB). Cela est à cause de la formation du CSH secondaire formé par la réaction pouzzolanique partielle retardée de la silice dans SDB ce qui améliore par la suite la compacité totale du béton.

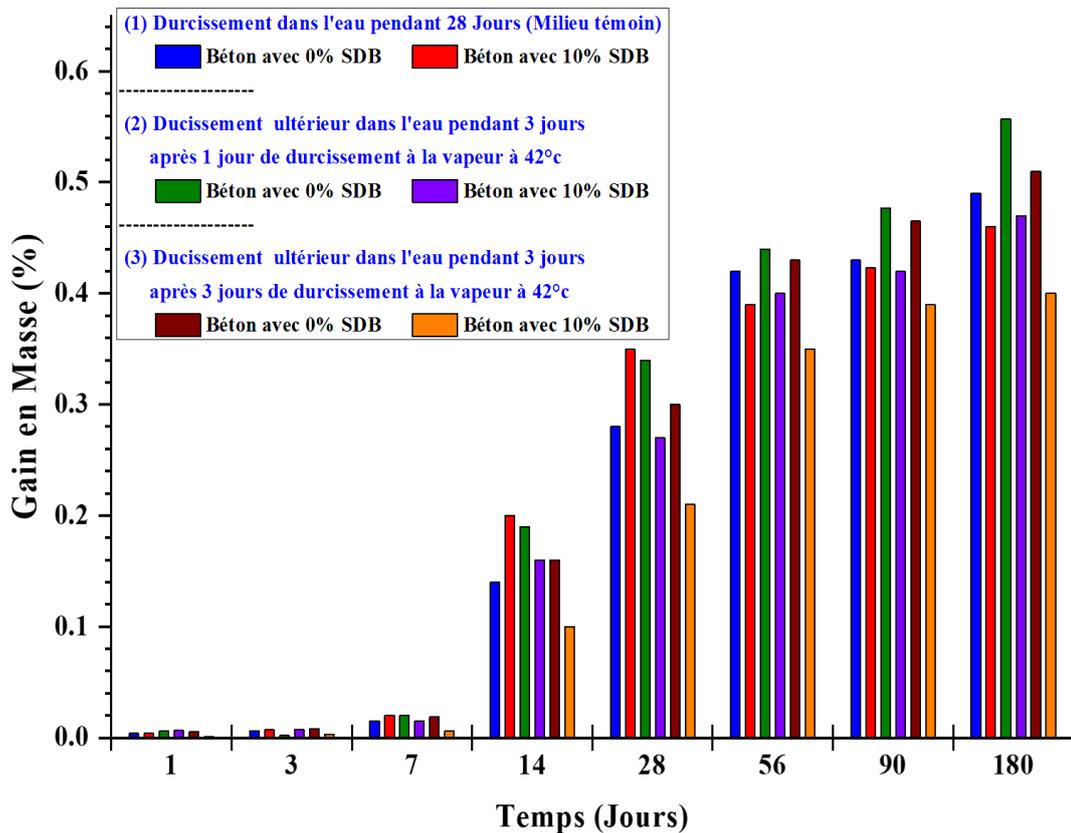


Figure IV.14. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans d'eau

Dans le cas durcissement ultérieur pendant trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C, on peut constater que le gain de masse est diminué

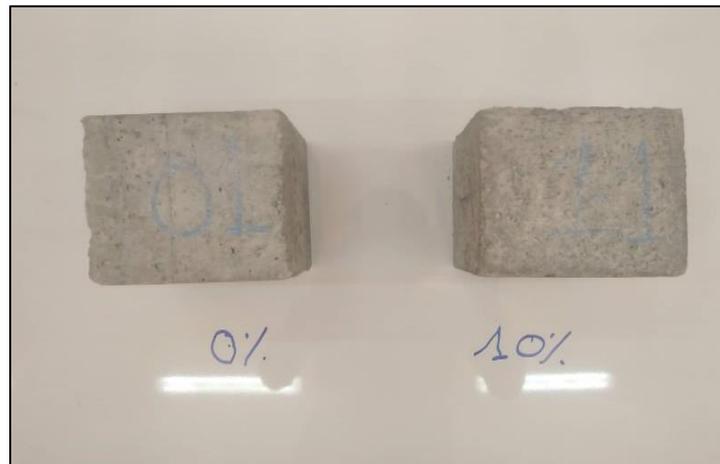
significativement pour le béton contenant 10% SDB en comparaison aux autres. Cette différence peut être expliquée par l'effet de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire qui a activé la silice moins réactive de sable de dune broyé SDB. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus en absorption où le coefficient d'absorption capillaire était le plus faible dans cette composition de béton (10% SDB) lorsqu'elle a été soumise à la troisième méthode de durcissement (3 + 3), c'est-à-dire qu'elle est la moins poreuse et cela empêche l'eau de s'y infiltrer par absorption capillaire.

IV.6.3.2. Comportement des bétons vis-à-vis HCl

A. L'examen visuel

L'inspection visuelle des éprouvettes immergées dans les acides HCl et dans l'eau (comme milieu témoin) sert à une évaluation préliminaire de l'aspect extérieur, et elle nous a permis d'examiner toute sorte d'endommagement ou de dégradation superficielle des éprouvettes.

À chaque échéance de mesure et après l'extraction des éprouvettes de l'acide HCl, nous avons remarqué des cristaux transparents sphériques attachés sur la surface de l'éprouvette qui représentent les cristaux de sel CaCl_2 issu de la réaction de HCl avec la Portlandite. L'examen général des photos présentées dans la [Figure IV.15](#) montrent clairement la dégradation des bétons après 180 jours d'immersion dans l'acide chlorhydrique HCl. On observe sur les photos que l'état de la surface de tous les échantillons est superficiellement détérioré et légèrement décapé par la formation de très petites cavités (alvéoles) mais à des degrés variables en fonction du SDB et selon la méthode de durcissement adoptée. Pour les échantillons de béton composé de 10 %SDB et soumis au durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C, l'attaque était moins sévère par rapport aux autres milieux où la lixiviation de la pâte cimentaire avait des profondeurs moins importantes. Comme nous l'avons discuté dans les sections précédentes, cela est probablement dû à l'amélioration de la structure poreuse de ce béton grâce à l'activation pouzzolanique de la silice du SDB par le durcissement initial à la vapeur à 42°C suivi d'un prolongement dans l'eau.



a) Dans l'eau distillée (milieu témoin)



b) Durcissement ultérieur pendant 1 jour après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C



c) Durcissement ultérieur pendant 3 jours après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C

Figure IV.15. État visuel des éprouvettes après 180 jours d'immersion dans 5% HCl

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

Les histogrammes présentés dans le [Tableau IV.14](#) et dans la [Figure IV.16](#) montre la perte en masse, exprimée en (%), mesurée à la fin de chaque période d'immersion de différents bétons après chaque méthode de durcissement et soumis à l'attaque de la solution HCl concentré à 5%.

Tableau IV.14. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5%HCl, de la méthode de durcissement et du SDB.

Temps (Jours)	Perte en masse (%)					
	(1) Durcissement dans l'eau pendant 28 Jours (Milieu témoin)		(2) Durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 1 jour de durcissement à la vapeur à 42°C		(3) Durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 3 jour de durcissement à la vapeur à 42°C	
	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB
1	-1.43	-1.2	-1.87	-1.96	-1.65	-0.98
3	-2.09	-1.81	-2.97	-3.41	-2.56	-1.46
7	-3.33	-2.98	-4.65	-5.56	-3.89	-2.63
14	-4.89	-4.61	-6.88	-7.09	-5.67	-4.49
28	-6.66	-5.94	-8.88	-8.2	-7.6	-5.89
56	-7.81	-7.65	-9.87	-9.53	-8.76	-6.55
90	-8.9	-8.4	-11.26	-9.98	-9.98	-6.88
180	-10.61	-8.79	-12.95	-10.25	-11.99	-7.41

D'après [Tableau IV.14](#) et la [Figure IV.16](#), on peut constater que les échantillons ont progressivement perdu du poids avec l'augmentation de la période d'immersion dans la solution chlorhydrique. La perte été entre 1% et 13% dans toutes les périodes quel que soit le mode de durcissement et la composition du béton. Il clair sur la figure que le durcissement d'un jour dans l'eau après durcissement de 3 jours à la vapeur à 42°C est un régime défavorable pour toutes les compositions de béton en tous âges car les valeurs de la perte en masse sont relativement élevées ; donc ce milieu donne des effets négatifs sur la résistance des bétons vis-à-vis l'attaque de l'HCl. Au surplus, contrairement aux éprouvettes du béton avec 0%SDB, les éprouvettes du béton composé avec 10% SDB et soumis au durcissement de trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C sont les moins affecté par l'acide en termes de perte de masse dans toutes les périodes d'immersion. D'autre part, après 180 jours d'immersion, les éprouvettes du béton contenant 0% de SDB ont perdu leurs masses par 13%, 12% et 10.6% lorsque sont soumis au durcissement d'un seul jour dans l'eau après 3 jours à la vapeur, trois jours dans l'eau après trois jours à la vapeur et dans l'eau pendant 28 jours respectivement.

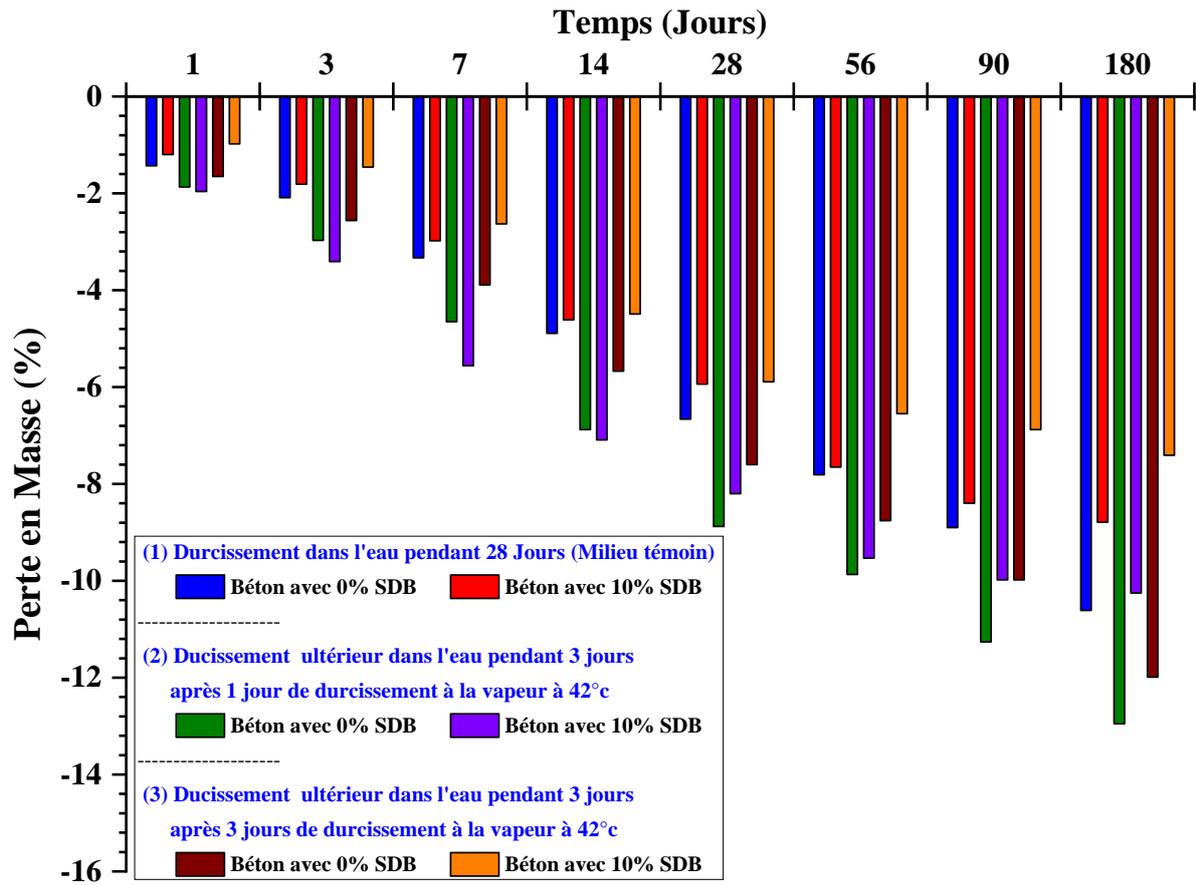


Figure IV.16. variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans l'acide 5% HCl

La perte en masse est due à la réaction de l'acide chlorhydrique HCl avec la Portlandite libérée au cours de l'hydratation des silicates de ciment pour former un sel de chlorure de calcium CaCl₂ selon la réaction suivante :

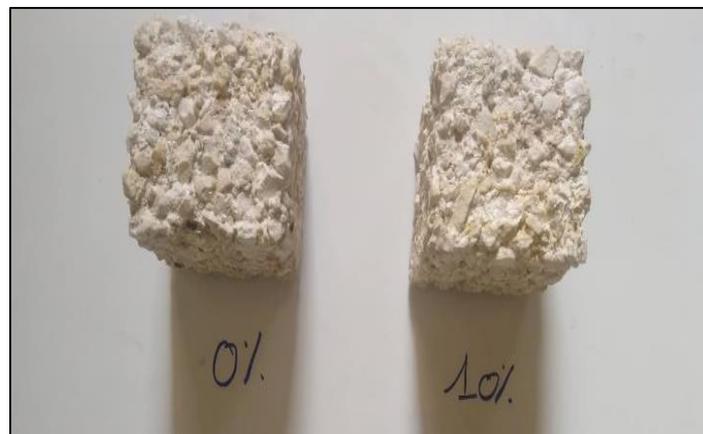


Les sels chlorures de calcium CaCl₂ sont facilement décollés de la pâte de ciment, ce qui fragilise sa structure totale et provoque une perte en masse. De ce fait, la pâte de ciment devient moins cohésive [48,165,166].

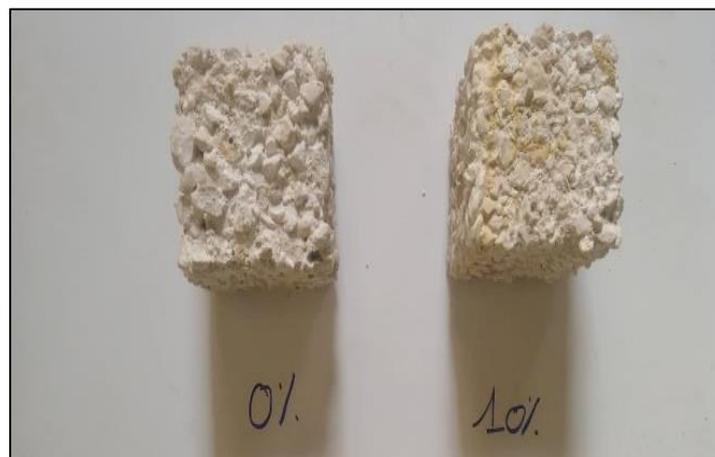
En conséquence, les échantillons de béton constitués de 10 % de SDB qui avaient été durcis trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C ayant une bonne résistance à l'attaque de HCl après toutes les périodes d'immersion et surtout dans les périodes plus longs grâce à l'activation de la silice du SDB par la chaleur et la vapeur fourni dans l'enceinte utilisant l'énergie solaire.



(a) Dans l'eau distillée (milieu témoin)



(b) Durcissement ultérieur pendant 1 jour après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C



(c) Durcissement ultérieur pendant 3 jours après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C

Figure IV.17. État visuel des éprouvettes après 180 jours d'immersion dans 5% H_2SO_4

IV.6.3.3. Comportement des bétons vis-à-vis du milieu H₂SO₄

A. L'examen visuel

À chaque échéance de mesure et après l'extraction des éprouvettes de l'acide, nous avons remarqué une couche de sous-produit de couleur blanche couvrant la surface extérieure de l'échantillon et facilement lavable par l'eau, ce phénomène a été remarqué aussi par d'autres chercheurs Douara et *al.* [91]. Les photos de la [Figure IV.17](#) ont été prises après lavage, elles montrent clairement l'état de dégradation après l'attaque de l'acide sulfurique. Il est clair sur les photos de la figure que l'immersion des éprouvettes de différents bétons dans l'acide H₂SO₄ a entraîné des dommages perceptibles du béton et le ciment s'est érodé, laissant l'agrégat grossiers visibles. Cet état de dégradation a été observé aussi par plusieurs chercheurs . D'après les photos, on peut constater également que l'acide H₂SO₄ est très agressif par rapport à l'HCl.

B. Effet de la dégradation du H₂SO₄ sur la perte en masse

Les résultats présentés dans le [Tableau IV.15](#) et dans la [Figure IV.18](#) montrent la variation de la masse en (%) mesurée à la fin de chaque période d'immersion de différents bétons conservé dans la solution H₂SO₄ concentré à 5%.

Tableau IV.15. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5%H₂SO₄, de la méthode de durcissement et du SDB.

Temps (Jours)	Perte en masse (%)					
	(1) Durcissement dans l'eau pendant 28 Jours (Milieu témoin)		(2) Durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 1 jour de durcissement à la vapeur à 42°C		(3) Durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 3 jour de durcissement à la vapeur à 42°C	
	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB	Béton avec 0% SDB	Béton avec 10% SDB
1	-3.79	-3.56	-4.07	-4.56	-3.95	-2.88
3	-4	-3.91	-5.77	-5.91	-4.56	-3.41
7	-6.33	-5.98	-8.65	-8.96	-7.89	-4.63
14	-7.89	-7.61	-9.98	-8.09	-8.97	-6.49
28	-13.66	-15.94	-16.88	-16.29	-15.6	-13.89
56	-19.81	-19.65	-22.87	-19.53	-20.86	-16.95
90	-21.9	-20.7	-24.46	-20.08	-22.98	-18.68
180	-23.61	-21.79	-26.95	-21.25	-24.99	-19.96

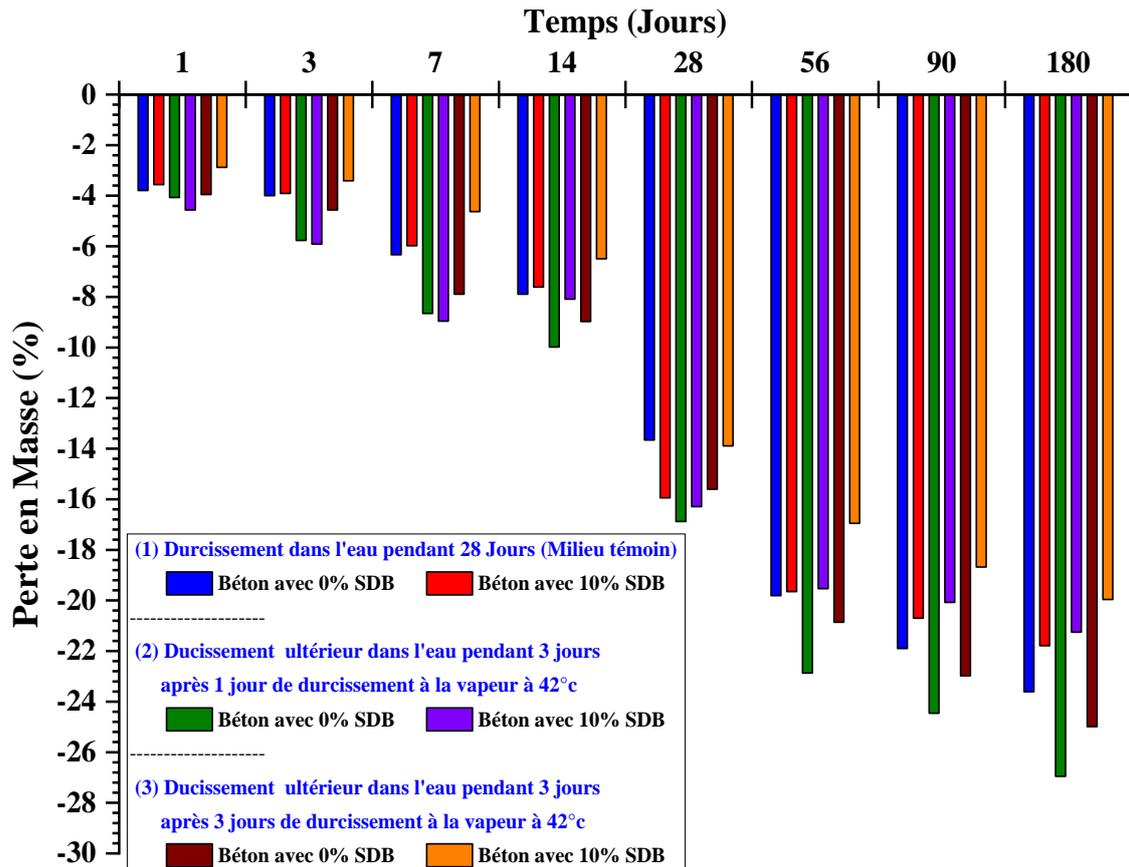
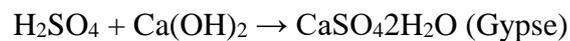


Figure IV.18. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans 5% H_2SO_4

Il est bien clair que, l'effet de l'acide sulfurique H_2SO_4 est très agressif contrairement à la solution HCl. 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 180 jours d'immersion était entre 19% et 27%. De même façon que dans le milieu HCl, le durcissement d'un jour dans l'eau après durcissement de 3 jours à la vapeur à 42°C est un régime défavorable contre l'attaque par H_2SO_4 pour toutes les compositions de béton en tous âges car les valeurs de la perte en masse sont relativement élevées ; donc ce milieu donne des effets négatifs sur la résistance des bétons vis-à-vis l'attaque de H_2SO_4 . On peut également noter qu'à partir de 28 jours et dans cette méthode durcissement, la cinétique de la perte en masse du béton contenant 10% SDB a commencé à diminuer. Ce qui peut s'expliquer par le début de la réaction pouzzolanique de la silice à cet âge sous l'effet de l'induction par la chaleur et l'humidité, mais elle n'a pas atteint un niveau significatif. Contrairement à la méthode de durcissement précédente, les éprouvettes du béton composé avec 10% SDB et soumis au durcissement de trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C sont les moins affecté par l'acide sulfurique en termes de perte de masse dans toutes les périodes d'immersion, la perte enregistrée est atteinte 20% après 180 jours d'immersion

pour cette composition de béton. L'amélioration de la résistance aux sulfates est probablement due à la diminution du volume poreux et ainsi à la faible absorption capillaire de ce béton grâce à l'augmentation de la compacité totale.

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 $[SO_4^{--}]$ pénètrent dans la matrice réagissent avec les constituants hydratés du ciment, principalement avec la Portlandite $Ca(OH)_2$ pour former le gypse secondaire suivant les réactions (Équation IV-3).



La formation de gypse secondaire en milieu sursaturé en ions $[SO_4^{--}]$ et $[Ca^{++}]$ 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 C_3A résiduel et l'acide sulfurique. Lorsque la concentration en ions $[SO_4^{--}]$ dans la solution interstitielle est augmentée, le monosulfoaluminate ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$), le C_4AH_{13} et le C_3A résiduel ont transformé en ettringite secondaire ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) mal cristallisé par un processus de dissolution-précipitation suivant les équations (Équation IV-4, Équation IV-5 et Équation IV-6). La croissance des aiguillés de l'ettringite secondaire dans un milieu durci et confiné peut générer une expansion très localisée provoquant fissurations du béton[134,135].



IV.7. Conclusion

Une procédure expérimentale a été menée pour évaluer l'effet combiné du sable de dune en poudre (SDB) et du durcissement à la vapeur à l'aide de l'énergie solaire sur les caractéristiques physico- mécaniques et de la durabilité vis-à-vis de l'attaque des acide HCl et H₂SO₄ du béton. Sur la base des résultats, les principales conclusions peuvent être énoncées comme suit :

- Le sable de dune broyé SDB joue un rôle bénéfique sur l'ouvrabilité jusqu'à un taux d'environ 15%.
- Dans le cas de durcissement à l'eau, il convient de noter qu'il existe un taux optimal d'environ 10% de SDB pour lesquels les résistances mécaniques le plus élevées sont obtenu à 28 jours et 60 jours suite à une réaction pouzzolanique partielle.
- Le durcissement par l'énergie solaire permet d'obtenir de meilleures résistances dès le plus jeune âge par une hydratation initiale accélérée. Pour le béton témoin (0% SDB) , le durcissement à la vapeur a diminué la résistance à la compression à 28 jours par rapport à celui du durcissement dans l'eau. En revanche, après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42 ° C, toutes les compositions contenant du SDB présentaient une résistance à la compression plus élevé grâce à une augmentation de l'activité pouzzolanique du SDB en activant la silice la moins réactive. La résistance à la compression optimale a été atteint à 10 % de SDB.
- Le durcissement à la vapeur à 42° C est plus utile qu'à 26° C parce que l'activité pouzzolanique du SDB commence à être significative à partir du troisième jour.
- Le durcissement à la vapeur à 42°C et jusqu'à 20% SDB, améliore non seulement les résistances mécaniques, mais réduit également les coûts de production en plus d'un impact environnemental significatif.
- Le durcissement ultérieur dans l'eau des bétons après durcissement à la vapeur permet d'obtenir des temps de production plus courts et de gagner du temps pour atteindre une meilleure résistance à la compression par rapport à la résistance à 28 jours dans l'eau. Ainsi, il est préférable d'utiliser la technique durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C car elle a un effet significatif sur la résistance à la compression des bétons contenant du SDB.
- Indépendamment de la méthode de durcissement, l'introduction de 10% de SDB par substitution au ciment a diminuée la sorptivité.

- L'application d'un régime de durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C a entraîné des diminutions très significatives du coefficient de sorptivité, cela est très remarquable dans le cas des bétons avec 10% SDB associé avec le durcissement ultérieur à l'eau pendant trois jours après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C
- Le gain de masse du béton contenant 10% SDB a diminué au-delà de 28èmes jours d'immersion dans l'eau due à la formation du CSH secondaire formé par la réaction pouzzolanique partielle de SDB avec les hydrates de ciment ce qui améliore la compacité du béton.
- Dû à l'activation pouzzolanique de la silice du SDB la structure poreuse du béton contenant 10% SDB est amélioré grâce au durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C.
- Les bétons composés avec 10% SDB et soumis au durcissement ultérieur de trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C sont les moins affecté par l'HCl et le H₂SO₄ en termes de perte de masse dans toutes les périodes d'immersion.

Conclusion générale & perspectives |

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de sable de dune broyé (SDB) comme addition au ciment présente un grand intérêt environnemental et économique. Son utilisation pourrait être liée à sa forte teneur en silice. Le durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire est très nécessaire pour obtenir une résistance initiale considérable de sorte que les moules peuvent être réutilisés pour une autre coulée.

Dans ce travail nous avons cherché à évaluer expérimentalement l'effet de la substitution partielle de ciment sur l'ouvrabilité et la résistance à la compression et à la flexion du béton et de chercher le taux optimal du SDB. Ensuite, l'étude de l'effet combiné de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire et le sable de dune broyé SDB sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons.

D'après cette étude, la substitution partielle du ciment par SDB joue un rôle bénéfique sur l'ouvrabilité jusqu'à 15%. Des bonnes propriétés mécaniques du béton à 10% (SDB) ont été obtenues après 28 et 60 jours de durcissement dans l'eau.

Le durcissement à la vapeur à 42°C est plus utile qu'au durcissement à 26°C, car l'activité pouzzolanique de la silice de SDB commence à être significative dès le troisième jour. Indépendamment de taux de SDB et le cycle de durcissement à la vapeur la résistance à la flexion était en grande concordance avec celui à la compression.

Le durcissement ultérieur dans l'eau des bétons après durcissement à la vapeur permet d'obtenir des temps de production plus courts et de gagner du temps pour atteindre une meilleure résistance à la compression par rapport à la résistance à 28 jours dans l'eau. Ainsi, il est préférable d'utiliser la technique de durcissement ultérieur dans l'eau pendant 3 jours après 3 jours de durcissement à la vapeur à 42°C car elle a un effet significatif sur la résistance à la compression et sur la résistance vis-à-vis l'attaque chimique des acides HCl et H₂SO₄ des bétons contenant de 10% SDB.

Une teneur en SDB appropriée et un durcissement à la vapeur appropriée utilisant l'énergie solaire peut permettre d'obtenir des bétons avec de meilleures propriétés physico- mécaniques, un faible coût et des avantages environnementaux significatifs. Cette idée est très importante pour le domaine de la préfabrication.

La technique de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire, non seulement accélère l'hydratation du ciment et l'activité pouzzolanique des additions minérales mais activé également la silice moins réactive (comme SDB) pour une bonne propriété mécanique, une bonne durabilité vis-à-vis l'attaque d'acides et une grande économie d'énergie électrique.

PERSPECTIVES

Cette recherche a ouvert les portes à des recherches nouvelles qui doivent s'intéresser à l'effet de durcissement par énergie solaire et à la valorisation de sable de dune broyé SDB. Ce travail ouvre différentes perspectives :

- 1) Une étude microstructurale par MEB est nécessaire pour approuver les résultats trouvés dans le cadre de cette thèse. (En cour de réalisation)
- 2) Étude de l'effet de différentes méthodes de durcissement sur d'autres propriétés telles que le module d'élasticité, l'adhérence, le retrait etc.
- 3) Il convient d'étudier d'autres propriétés de durabilité du béton, telles que la résistance à la corrosion et le gel dégel.

Références Bibliographiques |

LISTE DES REFERENCES

- [1] Y. Xie, X. Wang, G. Long, C. Ma, Quantitative analysis of the influence of subfreezing temperature on the mechanical properties of steam-cured concrete, *Constr. Build. Mater.* 206 (2019) 504–511. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.084>.
- [2] J. Kim, S.H. Han, Y.C. Song, Effect of Temperature and Aging on the Mechanical Properties of Concrete Part I. Experimental Results, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1087–1094.
- [3] T. Kanstad, T.A. Hammer, Bjontegaard, E.J. Sellevold, Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects, *Mater. Struct. Constr.* 36 (2003) 218–225. <https://doi.org/10.1617/13835>.
- [4] H.H. Alghazali, Z.R. Aljazaeri, J.J. Myers, Effect of accelerated curing regimes on high volume Fly ash mixtures in precast manufacturing plants, *Cem. Concr. Res.* 131 (2020) 105913. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105913>.
- [5] M. Liu, H. Tan, X. He, Effects of nano-SiO₂ on early strength and microstructure of steam-cured high volume fly ash cement system, *Constr. Build. Mater.* 194 (2019) 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.214>.
- [6] J. Shi, B. Liu, S. Shen, J. Tan, J. Dai, R. Ji, Effect of curing regime on long-term mechanical strength and transport properties of steam-cured concrete, *Constr. Build. Mater.* 255 (2020) 119407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119407>.
- [7] M.F. Ba, C.X. Qian, X.J. Guo, X.Y. Han, Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.049>.
- [8] J. Shi, B. Liu, Z. He, X. Wu, J. Tan, J. Chen, J. Jiang, Properties evolution of high-early-strength cement paste and interfacial transition zone during steam curing process, *Constr. Build. Mater.* 252 (2020) 119095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119095>.
- [9] H. Yazici, M.Y. Yardimci, S. Aydin, A.Ş. Karabulut, Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1223–1231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003>.
- [10] 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.106>.
- [11] A.M. Ramezani pour, K. Esmaeili, S.A. Ghahari, A.A. Ramezani pour, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.072>.
- [12] M.C.G. Juenger, R. Siddique, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cem. Concr. Res.* 78 (2015) 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.
- [13] E.-H.K. T. Boubekour, K. Ezziane, Quantification and analysis of heat hydration of blended cement at different temperature, *J. Adhes. Sci. Technol.* (2017).

- [14] P.W. J. Zhang, H. Tan, M. Bao, X. Liu, Z. Luo, Low carbon cementitious materials: sodium sulfate activated ultra-fine slag/fly ash blends at ambient temperature, *J. Clean. Prod.* (2021).
- [15] D.W.S. Ho, C.W. Chua, C.T. Tam, Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 595–601. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01028-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01028-1).
- [16] B. Liu, Y. Xie, J. Li, Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 994–998. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.044>.
- [17] F. Massazza, Pozzolana and pozzolanic cements, In: Hewlett, P.C., Ed., *Lea's Chem. Cem. Concr.*, (1998) 471-635.
- [18] A.A. Ramezaniapour, M.H. Khazali, P. Vosoughi, Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.040>.
- [19] S.D. Hwang, R. Khatib, H.K. Lee, S.H. Lee, K.H. Khayat, Optimization of steam-curing regime for high-strength, self-consolidating concrete for precast, prestressed concrete applications, *PCI J.* 57 (2012) 48–62. <https://doi.org/10.15554/pcij.06012012.48.62>.
- [20] B. Liu, J. Jiang, S. Shen, F. Zhou, J. Shi, Z. He, Effects of curing methods of concrete after steam curing on mechanical strength and permeability, *Constr. Build. Mater.* (2020).
- [21] M. Ozawa, S. Subedi Parajuli, Y. Uchida, B. Zhou, Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material, *Constr. Build. Mater.* 206 (2019) 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.056>.
- [22] H. Zhang, T. Ji, B. He, L. He, Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions, *Constr. Build. Mater.* 213 (2019) 469–482. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.058>.
- [23] H. Zhang, T. Ji, X. Lin, Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions, *Constr. Build. Mater.* 211 (2019) 688–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274>.
- [24] A.M. Zeyad, M. Azmi Megat Johari, A. Abutaleb, B.A. Tayeh, The effect of steam curing regimes on the chloride resistance and pore size of high-strength green concrete, *Constr. Build. Mater.* 280 (2021) 122409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122409>.
- [25] A.M. Zeyad, M.A.M. Johari, Y.R. Alharbi, A.A. Abadel, Y.H.M. Amran, B.A. Tayeh, A. Abutaleb, Influence of steam curing regimes on the properties of ultrafine POFA-based high-strength green concrete, *J. Build. Eng.* 38 (2021) 102204. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102204>.
- [26] S. Guettala, B. Mezghiche, Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 15 (2011) 1483–1507. <https://doi.org/10.3166/EJECE.15.1483-1507>.
- [27] S. Guettala, B. Mezghiche, Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1263–1269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.026>.
- [28] W. Mechti, T. Mnif, M. Chaabouni, J. Rouis, Formulation of blended cement by the combination of two pozzolans: Calcined clay and finely ground sand, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 609–616. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.021>.

- [29] A. Alhozaimy, M.S. Jaafar, A. Al-Negheimish, A. Abdullah, Y.H. Taufiq-Yap, J. Noorzai, O.A. Alawad, Properties of high strength concrete using white and dune sands under normal and autoclaved curing, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 218–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.057>.
- [30] A. Alhozaimy, A. Al-Negheimish, O.A. Alawad, M.S. Jaafar, J. Noorzai, Binary and ternary effects of ground dune sand and blast furnace slag on the compressive strength of mortar, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 734–738. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.002>.
- [31] A. Alhozaimy, G. Fares, A. Al-Negheimish, M.S. Jaafar, The autoclaved concrete industry: An easy-to-follow method for optimization and testing, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.024>.
- [32] A. Alhozaimy, O.A. Alawad, M.S. Jaafar, A. Al-Negheimish, J. Noorzai, Use of fine ground dune sand as a supplementary cementing material, *J. Civ. Eng. Manag.* 20 (2014) 32–37. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.768541>.
- [33] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005>.
- [34] 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.* 49 (2013) 511–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.085>.
- [35] Cimbéton, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques, tome 2, Collect. Tech. (2013) 1–135. <http://www.infociments.fr>.
- [36] Pliskin L., « La Fabrication du Ciment » Les ciments français, Edition Ey, 1993.
- [37] V. Baroghel-Bouny, T. Chaussadent, G. Croquette, L. Divet, J. Gawsewitch, J. Godin, D. Henry, G. Platret, G. Villain, Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons, Méthodes de mesure et d'essai de laboratoire, Tech. Méthodes Des Lab. Des Ponts Chaussées. 58 (2002) 90.
- [38] M.J.M.P. Mehta K. P., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill Companies, United States Am. (2006).
- [39] GABRYSIAK F, *Matériaux - Les bétons*, in: 1930: pp. 1–28.
- [40] A. Neville, The confused world of sulfate attack on concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1275–1296. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.004>.
- [41] P. Rossi, F. Toutlemonde, Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: description of the physical mechanisms, *Mater. Struct.* 29 (1996) 116–118.
- [42] I. Soroka, *Concrete in hot environment*, 2004.
- [43] T. Ali-boucetta, M. Behim, W. Laifa, Valorisation du laitier granulé et de la poudre de verre dans les bétons autoplaçants (BAP), 39 (2013) 30–39.
- [44] W. Zhu, J.C. Gibbs, Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1457–1462. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.001>.
- [45] Mhamed Adjoudj, Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton Mhamed Adjoudj To cite this version, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, 2016.

- [46] A.. Itim, K.. Ezziane, E. Kadri, Etude Des Deformations De Retrait D ' Un Mortier Contenant Differentes Additions Minerales, "SICZS" Symp. Int. Sur La Constr. En Zo. Sismique Univ. Hassiba Benbouali Chlef-Algerie. (2010).
- [47] D. Riad, INFLUENCE DES ADDITIONS MINERALES SUR LE COMPORTEMENT AU JEUNE AGE ET A LONG TERME DES BETONS AUTOPLAÇANTS TRAITES THERMIQUEMENT, (2016).
- [48] V. Waller, P. Naproux, F. De Larrard, Contribution des fumées de silice et des cendres volantes silico-alumineuses à la résistance en compression du béton quantification, Bull. Des Lab. Des Ponts Chaussees. 0 (1997) 53–65.
- [49] ACI Committee 234, Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, ACI Committee, Am. Concr. Inst. 96 (2006) 1–51.
- [50] X. Zhang, J. Han, The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, Cem. Concr. Res. 30 (2000) 827–830. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00236-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00236-2).
- [51] M.S. Bouglada, A. Nacéri, M. Baheddi, L. Pereira-de-Oliveira, Characterization and modelling of the rheological behaviour of blended cements based on mineral additions, Eur. J. Environ. Civ. Eng. 25 (2021) 655–672.
- [52] M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration, Cem. Concr. Res. 35 (2005) 719–730. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.030>.
- [53] 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.001>.
- [54] M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, A. Carles-Gibergues, Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales, Mater. Struct. 33 (2000) 466–472. <https://doi.org/10.1007/bf02480667>.
- [55] P. Lawrence, M. Cyr, E. Ringot, Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration, Cem. Concr. Res. 33 (2003) 1939–1947. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00183-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00183-2).
- [56] P. Lawrence, M. Cyr, E. Ringot, Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, Cem. Concr. Res. 35 (2005) 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.004>.
- [57] S. Chabi, B. Mezghiche, H. Guettala, Etude De L ' Influence Des Additions Minerales Actives Sur Le, (2004) 3–8.
- [58] K.E. Hassan, J.G. Cabrera, R.S. Maliehe, Effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete, Cem. Concr. Compos. 22 (2000) 267–271. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00031-7).
- [59] S.P. Pandey, R.L. Sharma, Influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar, Cem. Concr. Res. 30 (2000) 19–23. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00180-5).
- [60] A. Hadjsadok, S. Kenai, L. Courard, F. Michel, J. Khatib, Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity, Cem. Concr. Compos. 34 (2012) 671–677. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.011>.
- [61] R. Demirboğa, Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength

- of mortar, *Energy Build.* 35 (2003) 189–192. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00052-X).
- [62] Boldyrev. A.S.et Entine. Z.B., « Expériences et fondements physico-chimiques de l'utilisation des sous-produits dans l'industrie du ciment », in : , 7ème Congrès Int. Chim. Des Ciments, Vol II, Pp III83-88, Paris, n.d.
- [63] A. Tarek, INFLUENCE DES ADDITIONS LOCALES POUR L'AMELIORATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS A JEUNES AGES, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL-BOUAGHI, 2013.
- [64] L. Abdelaziz, EFFET DES AJOUTS MINERAUX ACTIFS ET INERTES SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES, MECANIQUES ET CHIMIQUES DU MORTIER, 2019.
- [65] S. HAMMAT, B. MENADI, S. KENAI, C. THOMAS, M.S. KIRGIZ, A.G. de SOUSA GALDINO, The effect of content and fineness of natural pozzolana on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar, *J. Build. Eng.* 44 (2021) 103276. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103276>.
- [66] K. Arroudj, S. Dorbani, M.N. Oudjit, A. Tagnit-Hamou, Use of algerian natural mineral deposit as supplementary cementitious materials, *Int. J. Eng. Res. Africa.* 34 (2018) 48–58. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.34.48>.
- [67] M. Mouli, H. Khelafi, Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan, *Build. Environ.* 43 (2008) 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.038>.
- [68] W. Deboucha, N. Leklou, A. Khelidj, M.N. Oudjit, Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration, *Constr. Build. Mater.* 146 (2017) 687–701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.132>.
- [69] H. Binici, I.H. Cagatay, M. Eken, Hydration Heat Evolution and Fineness of Blended Cement Containing Steel Slag and Pumice, *Eur. J. Adv. Eng. Technol.* 4 (2017) 907–913.
- [70] Nouari. L. et Touguy. M., « Le filler calcaire utilisé comme constituant secondaire dans la production du ciment composé », N°67 ; Février,, *Rev. Marocaine Du Génie Civ.* ; (n.d.) pp 35-39.
- [71] W. Long, J. Shi, W. Wang, X. Fang, Shrinkage of hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete with recycled aggregate, SCC-2016. 8th Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr. Flow. Towar. Sustain. (2016) 751–762. https://cies.mst.edu/media/research/cies/documents/SCC2016_NPR_Conference_Proceedings.pdf.
- [72] and V.R. F. Lange,* H. Miirtel, DENSE PACKING OF CEMENT PASTES AND RESULTING CONSEQUENCES ON MORTAR PROPERTIES, *Iceasp.* 21 (1997) 295–316.
- [73] B. Felekoğlu, K. Tosun, B. Baradan, A. Altun, B. Uyulgan, The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 1719–1726. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>.
- [74] M.S. Sullivan, M.G. Chorzepa, S.A. Durham, Characterizing the performance of ternary concrete mixtures involving slag and metakaolin, *Infrastructures.* 5 (2020). <https://doi.org/10.3390/infrastructures5020014>.
- [75] P. Jahren, “Use of Silica Fume in Concrete,” Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, Proc. First CANMET/ACI Int. Conf. Am. Concr. Institute, Farmingt. Hills, Mich.,. (n.d.) 625-642.
- [76] C.K. Park, M.H. Noh, T.H. Park, Rheological properties of cementitious materials containing

- mineral admixtures, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 842–849. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.002>.
- [77] B.M.P.A. De Larard F., Moreau A., “Improvement of mortars and concretes really attributabl eto condensed sili ca fume”., in: 2nd Int. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag Nat. Pozzolans, Madrid Vol 2, 1986: p. pp.959–71.
- [78] R.F. NoMalhotra, V. M.; Ramachandran, V. S.; Feldman, P.C. and Aïtcin, Condensed Silica Fume in Concrete, Press. Inc., Boca Raton, Fla.,. (n.d.) 221 pp.
- [79] V.M. Carette, G. G., and Malhotra, “Early-Age Strength Development of Concrete Incorporating Fly Ash and Condensed Silica Fume,” Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, Proc. First CANMET/ACI Int. Conf. SP-79,. (n.d.) 765-784.
- [80] 1998 Persson, B., “Pozzolanic Interaction Between Portland Cement and Silica Fume in Concrete,” Proceedings, CANMET/ACI Sixth Int. Conf. Use Fly Ash, Silica Fume, Slag, Nat. Pozzolans Concr. (1998) 631-660.
- [81] S. Wood, “Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete, ,” *ACI Mater. Journal*, V. 88, No. 6., (1991) Nov.-Dec., pp. 630-643.
- [82] Read, P.; Carette, G. G.; and Malhotra, V. M., “Strength Development Characteristics of High-Strength Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials,” in: High-Strength Concr. Proc. Second Inter- Natl. Symp. SP-121, W. T. Hester, Ed., Am. Concr. Institute, n.d.: pp. 527-547.
- [83] A.K.H. Kwan, Use of condensed silica fume for making high-strength, self-consolidating concrete, *Can. J. Civ. Eng.* 27 (2000) 620–627. <https://doi.org/10.1139/199-091>.
- [84] G.A. Rao, Development of strength with age of mortars containing silica fume, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1141–1146. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00540-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00540-3).
- [85] H. Cheng-yi, R.F. Feldman, Hydration reactions in portland cement-silica fume blends, *Cem. Concr. Res.* 15 (1985) 585–592. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90056-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90056-0).
- [86] D.M. Kumar, A., and Roy, “A Study of Silica-Fume Modified Cements of Varied Fineness,” *J. Am. Ceram. Soc.* V. 67, No. 1., (1984) 61-64.
- [87] I. Meland, “Influence of Condensed Silica Fume and Fly Ash on the Heat Evolution in Cement Pastes,” Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, in: Proc. First CANMET/ACI Int. Conf. SP-79, V. M. Malhotra, Ed., Am. Concr. Institute, Farmingt. Hills, Mich., n.d.: pp. 665-676.
- [88] K. Arroudj, M.O. Ahmed, M. Lanez, M.N. Oudjit, L. Bâtis, E. Lbe, F.D.G. Civil, Characterisation des mortiers a base des fines du quartz, (2011) 85–92.
- [89] A. Neville, *Properties of concretes*, 2000.
- [90] HERMANN K., «Les ajouts: Les fumées de silice», Bruxelles, (1995).
- [91] T. Douara, Effets des différents régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant à base de divers types de sable, 2019.
- [92] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.139>.
- [93] A. Benosman, Performances mécaniques et durabilité des matériaux cimentaires modifiés par ajout de polymère (PET), Thèse Doctorat, Université d’Oran, 2011.

- [94] N.J. Crammond, The thaumasite form of sulfate attack in the UK, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 809–818. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00106-9).
- [95] D. CHAHIRA, Concevoir et mettre en oeuvre des béton, *Réforme, Humanisme, Renaiss.* 15 (2013) 83.
- [96] S. Aggoun, M. Cheikh-Zouaoui, N. Chikh, R. Duval, Effect of some admixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.043>.
- [97] I. Berkovitch, *Admixtures for Concrete.*, Civ. Eng. London. (1984) 29–31. <https://doi.org/10.14359/8677>.
- [98] A. Zeitschrift, P. Link, E. Dienst, E. Eth, *Traitement thermique du béton*, (2021).
- [99] P.C. Taylor, Curing concrete, *Curing Concr.* (2013) 1–184. <https://doi.org/10.1201/b15519>.
- [100] 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.
- [101] J.I. Escalante-García, J.H. Sharp, The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 695–702. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00471-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00471-9).
- [102] B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland, P. Lunk, Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 483–491. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.016>.
- [103] K.L.S. E. Gallucci, X. Zhang, Influence of temperature on the microstructural development of concretes., in: *Septième Édition Des Journées Sci. Du Regroupement Francoph. Pour La Rech. La Form. Sur Le Bét. (RF)2B.*, Toulouse, France, 2006.
- [104] M. Gesoğlu, Influence of steam curing on the properties of concretes incorporating metakaolin and silica fume, *Mater. Struct. Constr.* 43 (2010) 1123–1134. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9571-2>.
- [105] H.S. Chore, M.P. Joshi, Strength evaluation of concrete with fly ash and GGBFS as cement replacing materials, *Adv. Concr. Constr.* 3 (2015) 223–236. <https://doi.org/10.12989/acc.2015.3.3.223>.
- [106] R.K. Patra, B.B. Mukharjee, Fresh and hardened properties of concrete incorporating ground granulated blast furnace slag-A review, *Adv. Concr. Constr.* 4 (2016) 283–303. <https://doi.org/10.12989/acc.2016.4.4.283>.
- [107] W. Yahiaoui, S. Kenai, B. Menadi, E.H. Kadri, Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate, *Adv. Concr. Constr.* 5 (2017) 271–288. <https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.3.271>.
- [108] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Sifeng, J. Chujie, L. Jianzhong, Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 831–838. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.008>.
- [109] A.R. S. Masse, H. Zanni, J. Lecourtier, J.C. Roussel, ²⁹Si solid state NMR study of tricalcium silicate and cement hydration at high temperature, *Cem. Concr. Res.* (1993).
- [110] C. Aldeaa, F. Youngb, K. Wanga, S.P. Shaha, Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 465–472.

- [111] J. Yang, H. Hu, X. He, Y. Su, Y. Wang, H. Tan, H. Pan, Effect of steam curing on compressive strength and microstructure of high volume ultrafine fly ash cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 266 (2021) 120894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120894>.
- [112] Q. Yang, S. Zhang, S. Huang, Y. He, Effect of ground quartz sand on properties of high-strength concrete in the steam-autoclaved curing, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 1993–1998. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00395-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00395-1).
- [113] 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.004>.
- [114] S. Aparicio, S. Martínez-Ramírez, J. Ranz, J. V. Fuente, M.G. Hernández, Microstructural and mechanical properties study of the curing process of self-compacting concrete, *Mater. Des.* 94 (2016) 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.067>.
- [115] J. Shi, B. Liu, F. Zhou, S. Shen, J. Dai, R. Ji, J. Tan, Heat damage of concrete surfaces under steam curing and improvement measures, *Constr. Build. Mater.* 252 (2020) 119104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119104>.
- [116] B. Mezghiche, L. Zeghichi, R. Chebili, M. Mellas, Curing Methods of Precast Concrete Elements, *Asian J. Civ. Eng. (Building Hous.* 7 (2006) 581–589.
- [117] Y.X. J. Shi, B. Liu, F. Zhou, S. Shen, A. Guo, Effect of steam curing regimes on temperature and humidity gradient, permeability and microstructure of concrete, *Constr. Build. Mater.* (2021).
- [118] A. Bougara, C. Lynsdale, K. Ezziane, Activation of Algerian slag in mortars, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 542–547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.012>.
- [119] D. Boukhelkhal, O. Boukendakdji, S. Kenai, E-H. Kadri, Combined effect of mineral admixture and curing temperature on mechanical behavior and porosity of SCC, *Adv. Concr. Constr.* (2018).
- [120] 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.
- [121] Institut Algérien de normalisation, NA 442: Ciments-Composition, Spécifications et Critères de Conformité des ciments courants, (2005) 21.
- [122] R.H. Bogue, *Chemistry of Portland cement*, in: 2nd Ed., Reinhold Publ. Corp, New York, 1955.
- [123] 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.
- [124] BARON J. et OLLIVIER J.P., «Les bétons, bases et données pour leur formulation», Editions E, 1997.
- [125] DENIS TREMBLAY., «Béton de ciment, modulo éditeur», Mont Réal, Québec, Canada, 1983.
- [126] M. B., , «Technologie des bétons aux laitiers basiques pour R.A.D.P.», in: Résumé Thèse PHD, Kiev, 1989.
- [127] B. Mezghiche, *Laboratory Testing of Construction Materials*, Publ. Univ. Biskra, Alger. (n.d.) 120.
- [128] N.E. 12390-3. AFNOR, Essais pour béton durci – Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes, 2012.
- [129] B. Khadda, B.E.N. Ammar, Doctorat en Sciences Effet de l' étuvage par énergie solaire sur les

- propriétés mécaniques , la déformabilité et la durabilité des bétons . Présentée par :, (n.d.).
- [130] A. Benosman, Performances mécaniques et durabilité des matériaux cimentaires modifiés par ajout de polymère (PET), Thèse Doctorat, Université d'Oran, 2011.
- [131] A. Kronlöf, Effect of very fine aggregate on concrete strength, *Mater. Struct.* 27 (1994) 15–25. <https://doi.org/10.1007/BF02472816>.
- [132] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.074>.
- [133] 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.* 47 (2013) 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037>.
- [134] Z. Makhloufi, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.050>.
- [135] 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, (2016) 143.

La fabrication du ciment Portland consomme une quantité considérable d'énergie et des ressources naturelles. L'introduction de l'addition du sable de dune broyé (SDB) dans la production cimentaire permet, en plus du gain économique et écologique, une amélioration des performances des bétons. Cette amélioration résulte essentiellement de trois effets qui agissent simultanément de manière complémentaire (effet granulaire, physico-chimique et chimique). D'autre part, au cours des dernières années, la sensibilité du public et la politique aux questions d'environnement et de sécurité énergétique ont conduit à la promotion des sources d'énergie renouvelables et utilisée cette dernière pour réaliser les projets dans une courte durée. Le taux de production d'éléments en béton joue un rôle important sur le plan économique. Par conséquent, le durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire est très nécessaire pour obtenir une résistance initiale considérable de sorte que les moules peuvent être réutilisés pour une autre coulée. C'est pour ça, l'objectif de ce travail de recherche est d'évaluer expérimentalement l'effet combiné de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire et le sable de dune broyé SDB sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En premier lieu, l'étude de l'effet de différents taux de SDB sur la maniabilité a été examinée. Par la suite, l'effet du taux de SDB sur les résistances mécaniques à différents âges du béton durci à l'eau a été étudié, ainsi que les effets des modes de durcissement sur les résistances mécaniques des éprouvettes incorporant du SDB ont été examinés. En fin une attention particulière a été faite sur l'effet combiné du taux de SDB et les régimes de durcissement sur les paramètres de durabilité tel que l'absorption capillaire et la résistance vis-à-vis de la l'attaque chimique des acides (HCl) et des sulfates (H₂SO₄). Cinq régimes de durcissement ont été examinés : le durcissement à l'eau, le durcissement à la vapeur par énergie solaire à 42°C, le durcissement à la vapeur par énergie solaire à 26°C et le durcissement ultérieur pendant un jour dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C et le durcissement ultérieur pendant trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C. Les résultats révèlent que la substitution partielle du ciment par SDB joue un rôle bénéfique sur l'ouvrabilité. Une bonne résistance mécanique du béton à 10% (SDB) a été obtenue après 28 et 60 jours de durcissement. Le durcissement à la vapeur à 42°C est plus utile qu'à 26°C, car l'activité pouzzolanique de la silice de SDB commence à être significative dès le troisième jour. Indépendamment de taux de SDB et le cycle de durcissement à la vapeur la résistance à la flexion était en grande concordance avec celle de la compression. Les résultats montrent également l'effet bénéfique de la technique de durcissement ultérieur pendant trois jours dans l'eau après trois jours de durcissement à la vapeur à 42°C sur les propriétés physiques et mécaniques et sur la résistance vis-à-vis de l'attaque chimique des acides HCl et H₂SO₄ des bétons contenant 10% SDB.

Mots clés : substitution, sable de dune broyé, maniabilité, résistances, activité pouzzolanique, durcissement à la vapeur initiale par énergie solaire, durcissement ultérieur dans l'eau,

صناعة الأسمنت البورتلاندي تستهلك كمية معتبرة من الطاقة والموارد الطبيعية. إضافة رمل الكتبان المسحوق (ر.ك.م) في إنتاج الأسمنت يسمح بالإضافة إلى المكاسب الاقتصادية والبيئية بتحسين أداء الخرسانة. هذه التحسينات تنتج بشكل أساسي عن ثلاثة تأثيرات متزامنة ومتكاملة (التأثير الحبيبي والفيزيو-كيميائي والكيميائي). من ناحية أخرى، و خلال السنوات الأخيرة أدى الوعي العام والسياسي بقضايا البيئة وأمن الطاقة إلى تعزيز مصادر الطاقة المتجددة و استعمال هاته الأخيرة لانجاز المشاريع في فترة زمنية قصيرة. يلعب معدل إنتاج العناصر الخرسانية دورًا مهمًا. لذلك، فإن الانضاج الأولي بالبخار بواسطة الطاقة الشمسية ضروري للغاية لتحقيق مقاومة مبكرة كبيرة بحيث يمكن إعادة استخدام القوالب في عملية صب أخرى. لهذا كان الهدف من هذا العمل البحثي هو إجراء تقييم تجريبي للتأثير التناهي للانضاج باستعمال البخار بواسطة الطاقة الشمسية و رمل الكتبان المسحوق (ر.ك.م) على الخواص الميكانيكية وديمومة الخرسانة. في البداية، تمت دراسة تأثير نسب (ر.ك.م) المختلفة على قابلية التشغيل. بعد ذلك، تمت دراسة تأثير محتوى (ر.ك.م) على المقاومة الميكانيكية في أعمار مختلفة للخرسانة المنضجة في الماء، وكذلك تم فحص تأثير مختلف أنماط الانضاج على المقاومة الميكانيكية للعينات التي تحتوي على (ر.ك.م). أخيرًا، تم دراسة التأثير المشترك لكمية (ر.ك.م) وأنظمة الانضاج على مؤشرات المتانة المتمثلة في الامتصاص الشعيري و مقاومة الهجوم الكيميائي لحمض (HCl) وحمض الكبريتات (H₂SO₄). تم فحص خمسة أنظمة انضاج : الانضاج في الماء، الانضاج بالبخار بواسطة الطاقة الشمسية عند 42 درجة مئوية، الانضاج بالبخار بواسطة الطاقة الشمسية عند 26 درجة مئوية، و الانضاج اللاحق لمدة يوم واحد في الماء بعد ثلاثة أيام من الانضاج بالبخار عند 42 درجة مئوية و الانضاج اللاحق لمدة ثلاثة أيام في الماء بعد ثلاثة أيام من الانضاج بالبخار عند 42 درجة مئوية. أظهرت النتائج أن الاستبدال الجزئي للأسمنت بواسطة (ر.ك.م) يلعب دورًا مفيدًا في قابلية التشغيل. تم الحصول على مقاومة ميكانيكية جيدة للخرسانة المحتوية على 10% من (ر.ك.م) بعد 28 يوم و 60 يوم من الانضاج. يعتبر الانضاج بالبخار عند 42 درجة مئوية ذو فائدة أكثر منه في 26 درجة مئوية، حيث يبدأ النشاط البوزولاني لعنصر السيلييس في (ر.ك.م) ابتداء من اليوم الثالث. بغض النظر عن معدل (ر.ك.م) ونمط الانضاج بالبخار كانت مقاومة الانحناء جد متوافقة مع مقاومة الضغط الميكانيكية. أظهرت النتائج أيضًا أن تقنية الانضاج اللاحق لمدة ثلاثة أيام في الماء بعد ثلاثة أيام من الانضاج بالبخار عند 42 درجة مئوية لها تأثير جد مفيد على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المحتوية على 10% (ر.ك.م) وكذا على مقاومتها ضد الهجوم الكيميائي لأحماض HCl و H₂SO₄.

الكلمات المفتاحية : الاستبدال، رمل الكتبان المسحوق، قابلية التشغيل، المقاومة، التفاعل البوزولاني، الانضاج بالبخار بواسطة الطاقة الشمسية، الانضاج اللاحق في الماء .