

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Numéro de série :

Numéro d'inscription :

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux

THEME

**Effet du climat chaud sur le comportement d'un béton
compacté au rouleau (BCR).**

Présenté par :

DEGHFEL Moussa

Soutenue le : 13/01/2022

Devant le jury composé de :

<u>Nom & Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Qualité</u>
KHEMISSA Mohammed	Professeur	Université de M'Sila	Président
BEDDAR Miloud	Professeur	Université de M'Sila	Rapporteur
MERDAS Abdelghani	Professeur	Université de Sétif 1	Examinateur
OMRANE Mohammed	Maitre de conférences A	Université de Djelfa	Examinateur
MEDDAH Abdelaziz	Maitre de conférences A	Université de M'Sila	Invité

Année universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu Tout-Puissant, qui m'a donné la force d'accomplir ce travail.

*A l'issue de ce travail de recherche, je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur **BEDDAR Miloud**, Professeur à l'Université de M'sila, pour avoir accepté de m'encadrer et de diriger avec beaucoup d'attention et de soin cette thèse. Je lui suis très reconnaissant pour sa disponibilité, sa bienveillance et son soutien permanent, et avoir prêté un intérêt constant au sujet de la thèse.*

*Je remercie vivement Monsieur **KHEMISSA Mohammed**, Professeur à l'université de M'sila; qui me fait l'honneur d'accepter de présider le jury.*

*Je tien à remercier tout particulièrement Monsieur ; **MERDAS Abdelghani**, Professeur à l'université de Sétif; **OMRANE Mohammed**, maître de conférences (A) à l'université de Djelfa ; **MEDDAH Abdelaziz**, maître de conférences (A) à l'université de M'sila ; qui ont acceptés de faire partie du Jury de ce travail.*

*Ces remerciements sont l'occasion pour moi d'exprimer ma reconnaissance à Monsieur ; **Abdelaziz MEDDAH**, Maître de conférences (A) à l'université de M'sila, et **Mohammed Aziz CHICOUCHE**, Maître de conférences (B) à l'université de M'sila, de m'avoir aidé profondément lors de toute la période de préparation de la thèse.*

Je tiens à remercier, tous les enseignants du département de génie civil, université de M'sila, ainsi que tout le personnel du département.

Toute ma gratitude et mes sincères remerciements au personnel du laboratoire LNHC, ainsi que le personnel du laboratoire BERM pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

*Je tiens à remercier, Monsieur **Issam BOUDIA** ; docteur à l'université de M'sila (ingénieur de laboratoire LMMS) pour les efforts consentis.*

Enfin, je voudrais dédier ce travail à la mémoire de mes parents, que Dieu ait pitié d'eux. Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à ma femme, mes fils (Youssef, Mohamed et Imad), mes frères, ma sœur et mon ami Houssef eddine DJAIDJA, pour leur soutien pendant la préparation de cette thèse.

Sommaire

Remerciement.....	I
Sommaire.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	VI
Liste d'abréviation.....	VII
Résumé.....	01
Introduction Générale.....	04
Chapitre I : synthèse bibliographique sur le BCR.....	08
Chapitre II : caractérisation du climat chaud et son effet sur les propriétés du béton.....	37
Chapitre III : identification des matériaux utilisés, formulation et techniques expérimentales.....	54
Chapitre IV : effet des données climatiques (température et humidité relative) sur les propriétés du BCR.....	65
Chapitre V : l'effet du couplage température et humidité relative sur le comportement du BCR.....	94
Conclusion Générale et perspectives.....	110
Références bibliographiques.....	114
Table des matières.....	127

Liste des figures

Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau.....	10
Figure I.2 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction (Bouyge & Forbes, 2007)	18
Figure I.3 : Mise en place d'un BCR routier (la route reliant entre la RN 45 et la cimenterie de M'sila - Algérie).....	19
Figure I.4 : Mise en place d'un BCR routier (ACI Comimittee, 2001)	20
Figure I.5 : Appareil VEBE (Zdiri, 2008).....	22
Figure I.6 : Module d'élasticité de différents mélanges de BCR (Ouellet, 1998)	27
Figure I.7 : Texture fermée (S.E.M).....	30
Figure I.8 : Texture ouverte : ségrégation (S.E.M).....	30
Figure I.9 : Détermination du volume de pâte minimal (Marchand et al., 1997)	33
Figure I.10 : Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al., 1997)	34
Figure I.11 : Courbes de Proctor (Gauthier and Marchand, 2001)	34
Figure II.1 : Précipitations annuelles dans le monde (Source : Encarta, 2005).	38
Figure II.2 : Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de M'sila pour la période (1988 – 2008) « Source : O.N.M».	39
Figure II.3 : Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) pour la période (1988 – 2008) « Source : O.N.M».	40
Figure II.4 : Vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton) (ACI-305R-10, 2010).....	43
Figure II.5 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants (Mamillan et al, 1989).	45
Figure II.6 : Effet de la température du béton sur l'affaissement et la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25mm (Mamillan et al, 1989).	45
Figure II.7: Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C (Hampton, 1981).	46
Figure II.8 : Effet de la température sur le temps de début et fin de prise (Mouret, 1997).....	47
Figure II.9: Effet de la température sur le temps de début de prise (Ahmadi, 2000).....	47
Figure II.10: Effet de la température sur le temps de début de prise (Ahmadi, 2000).	48

LISTE DES FIGURES

Figure II.11 : Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide (Ramezaniapour & Malhotra, 1995).	49
Figure II.12: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage (Ramezaniapour & Malhotra, 1995).....	49
Figure II.13: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide (Ramezaniapour & Malhotra, 1995).	50
Figure II.14: Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité (Ramezaniapour & Malhotra, 1995).....	50
Figure II.15 : Gain de la résistance à la compression (Shoukry et al., 2011).	51
Figure II.16: Gain de la résistance à la traction (Shoukry et al., 2011).	51
Figure III.1 : Courbe granulométrique du sable utilisé.	55
Figure III.2 : Courbe granulométrique du gravier.	56
Figure III.3 : Courbe combinée des granulats selon (Marchand et al., 1997).	59
Figure III.4 : Relation entre la densité et la teneur en eau.....	60
Figure III.5 : Résistance à la compression à 7 jours en fonction de la teneur en ciment...	61
Figure III.6 : Aspect du BCR lors de malaxage.....	62
Figure III.7 : Marteau vibrant utilisé dans cette étude.....	63
Figure III.8 : L'enceinte climatique utilisée dans cette étude.....	63
Figure IV.1 : Effet de la température sur la résistance à la compression.....	67
Figure IV.2 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la température à 30% d'humidité relative.....	68
Figure IV.3 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la température à 90% d'humidité relative.....	68
Figure IV.4 : Développement de la résistance à 3 et 28 jours lorsque la température augmente de 15 à 60 °C sous les quatre niveaux d'humidité relative.....	69
Figure IV.5 : La perte dans la résistance finale (à 60 Jours) lorsque la température augmente de 15 à 60°C sous les quatre niveaux d'humidité relative.....	70
Figure IV.6 : Effet de l'humidité relative sur la résistance à compression.....	71
Figure IV.7 : Le gain de la résistance à la compression (à 60 Jours) lorsque l'humidité augmente de 30 à 90% sous les quatre températures.....	72
Figure IV.8 : Effet de la température sur la résistance à la traction par fendage.....	73
Figure IV.9 : Variation de la résistance à la traction par fendage en fonction de la température et de l'humidité relative.....	74

LISTE DES FIGURES

Figure IV.10 : Le gain de résistance à la traction par fendage (à 60 Jours) lorsque l'humidité augmente de 30 à 90% sous les quatre températures.....	75
Figure IV.11 : Module élastique en compression en fonction de la température et l'humidité relative.....	76
Figure IV.12 : Gain de module élastique en compression lorsque l'humidité augmente de 30 à 90% sous les quatre températures.....	77
Figure IV.13 : Courbes de contrainte-déformation du RCR durci dans les différentes conditions climatiques.....	78
Figure IV.14 : Effet de la température et l'humidité relative sur la résistance à l'abrasion Cantabro.....	79
Figure IV.15 : Effet des différentes conditions de durcissement sur la perte du poids en fonction des cycles de tours.....	80
Figure IV.16 : Evolution du retrait du BCR en fonction du temps sous tous les milieux environnementaux.....	81
Figure IV.17 : Effet de la température et de l'humidité relative sur le retrait du BCR.....	83
Figure IV.18 : Variations du retrait aux intervalles de la température 15-30, 30-45 et 45-60°C.....	84
Figure IV.19 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité du BCR en fonction du temps.....	85
Figure IV.20 : Effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression du BCR.....	87
Figure IV.21 : Evolution du retrait en fonction de temps pour les différents modes de cure.....	89
Figure IV.22 : Variations du retrait en fonction des modes de cure.....	89
Figure IV.23 : Effet de la teneur en fumée de silice sur la résistance à la compression.....	91
Figure IV.24 : Effet de la teneur en fumée de silice sur le retrait.....	92
Figure V.1 : Résultats prédits vs réels pour les modèles développés.....	103
Figure V.2 : Surface de réponse pour les modèles développés.....	104
Figure V.3 : Tracés de contour pour les modèles développés.....	105
Figure V.4 : Courbes d'interaction pour les modèles développés.....	106
Figure V.5 : Relation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage.....	108

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques et avantages du béton compacté au rouleau (BCR).....	13
Tableau I.2 : Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après (USACE, 2000).....	16
Tableau II.1: Indice d'aridité bioclimatique des écosystèmes secs (Source : UNESCO).....	38
Tableau III.1: Caractéristiques physiques du sable.....	55
Tableau III.2 : Compositions chimiques du sable.	55
Tableau III.3: Caractéristiques physico-mécaniques du gravier.	56
Tableau III.4 : Compositions chimiques du gravier.	56
Tableau III.5 : Compositions chimiques du ciment et de la fumée de silice.	57
Tableau III.6 : Les différentes proportions de mélange.	61
Tableau III.7: Procédure de malaxage.	62
Tableau IV.1 : Les différentes proportions de mélange après l'ajout de la fumée de silice.....	87
Tableau V.1 : Conception expérimentale et résultats expérimentaux.....	98
Tableau V.2: Analyse de variance (ANOVA) pour les modèles de réponse.....	99
Tableau V.3: Termes des modèles de réponse.....	100
Tableau V.4 : Validation des modèles développés.....	102
Tableau V.5 : Vérification des modèles.....	107
Tableau V.6 : ANOVA pour le modèle du module d'élasticité.....	108

Liste d'abréviation

BCR : Béton compacté au rouleau.

BB : Béton bitumineux.

BC : Béton conventionnel.

T : Température.

HR : Humidités relatives.

R_c : Résistance à la compression.

R_t : Résistance à la traction par fendage.

M_e : Module d'élasticité.

R_a : Résistance à l'abrasion.

R_{et} : Retrait.

A_e : Absorption d'eau par capillarité.

CSH : Silicate de calcium hydraté.

PW : Immersion totale dans l'eau.

PB : Recouvrement des éprouvettes avec une toile de jute humide.

PM : Application du produit de cure « MEDACURE ».

PSF3, PSF6 et PSF9 : Béton compacté au rouleau avec 3, 6 et 9% de fumée de silice respectivement.

P45 : Béton compacté au rouleau durci à 45°C et 50% HR.

ETP : évapotranspiration potentielle.

RSM : Méthode de surface de réponses.

F-values : Valeur du test statistique de Fisher.

P-values : Valeur de probabilité.

R² : Coefficient de régression.

SD : Ecart type.

CoV : Coefficient de variation.

RÉSUMÉ

Ce travail vise à étudier l'effet du climat chaud sur les propriétés mécaniques et physiques du béton compacté aux rouleaux (BCR) en vue d'une application en technique routière et en utilisant des matériaux locaux. Deux facteurs climatiques ont été étudiés dans ce travail (la température et l'humidité relative). La démarche expérimentale consiste à étudier l'effet de ces deux facteurs sur les propriétés mécaniques et physiques du BCR à l'état durci.

Pour évaluer l'effet des variations de ces facteurs sur le comportement du BCR, quatre températures différentes (15, 30, 45 et 60 °C) ont été choisies, chaque température a été étudié en quatre niveaux d'humidité relative (30, 50, 70 et 90%) ; En conséquence, seize milieux environnementaux ont été étudiés.

Les résultats ont indiqué que, l'élévation de la température affecte négativement les propriétés du BCR notamment dans les conditions sèches. Pour remédier à ce problème, nous avons procédé au traitement du BCR, premièrement par l'application de trois modes de cure et deuxièmement par l'incorporation de la fumée de silice. En effet, les trois modes de cure ont eu un effet positif sur les propriétés du béton. Par contre, le principal inconvénient lié à l'incorporation de la fumée de silice dans le BCR est son effet négatif vis-à-vis le retrait.

Cependant, les changements de la température et de l'humidité sont liés l'un à l'autre, donc là il était nécessaire d'étudier de l'effet de l'interaction de ces deux facteurs sur les propriétés mécaniques et physiques du BCR. Donc, la recherche vise également à élaborer des modèles mathématiques pouvant être utilisées pour prédire les propriétés du BCR à différentes températures et humidités relative normalement rencontrées dans les conditions extérieures dans la plupart des climats. Et enfin, pour vérifier la validité et la fiabilité de ces modèles, le BCR a été examiné en trois milieux environnementaux supplémentaires, ces milieux ont été choisis au hasard, les résultats obtenus par les expériences ont été comparés aux résultats fournis par les modèles mathématiques.

Les résultats ont montré qu'il existe une bonne corrélation entre les modèles développés et les données expérimentales correspondantes, toutes présentant des relations quadratiques avec un degré de corrélation plus élevé.

Mots clés : BCR, climat chaud, température, humidité relative, modélisation, résistance mécanique, modes de cure, fumée de silice.

ABSTRACT

This work aims to study the effect of the hot climate on the mechanical and physical properties of a roller compacted concrete (RCC) for application in road engineering and using local materials. Two climatic factors were studied in this work (temperature and relative humidity). The experimental approach consists of studying the effect of these two factors on the mechanical and physical properties of the RCC in the cured state.

To assess the effect of these factors on the behavior of the RCC, four different temperatures (15, 30, 45 and 60 ° C) were chosen, each temperature was studied in four levels of relative humidity (30, 50, 70 and 90%); as a result, sixteen environmental media were studied.

The results indicated the rise in temperature adversely affects the properties of the RCC especially in dry conditions. To remedy this problem, we proceeded to treat the RCC, first by applying three modes of curing and second by incorporating silica fume. Indeed, the three curing methods had a positive effect on the properties of concrete. On the other hand, the main drawback associated with the incorporation of silica fume in the RCC is its negative effect on shrinkage.

However, changes in temperature and humidity are related to each other, so it was necessary to evaluate the interaction effect of these two factors on the mechanical and physical properties of the RCC. Therefore, the research also aims to develop mathematical models that can be used to predict the properties of RCC at different temperatures and relative humidity normally encountered in outdoor conditions in most climates. Finally, to check the validity and reliability of these models, the RCC was examined in three additional environmental media randomly chosen. The obtained results by the experiments were compared with the results provided by the mathematical models.

The results indicated showed a significant correlation between the developed models and the corresponding experimental data. They exhibited some quadratic relationships with a very high degree of correlation.

Keywords: RCC, hot climate, temperature, relative humidity, modeling, mechanical strength, curing modes, silica fume.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير المناخ الحار على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة المرصوفة المستعملة في الطرقات باستخدام المواد المحلية. تمت دراسة عاملين مناخيين في هذا العمل (درجة الحرارة والرطوبة النسبية). يعتمد المنهج التجريبي على دراسة تأثير هذين العاملين على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة المرصوفة في الحالة الصلبة.

لتقييم تأثير تغير هذين العاملين على سلوك الخرسانة المرصوفة ، تم اختيار أربعة درجات حرارة مختلفة (15 ، 30 ، 45 ، 60 درجة مئوية) ، ودرست كل درجة حرارة في أربعة مستويات من الرطوبة النسبية (30 ، 50 ، 70 و 90%) ؛ نتيجة لذلك ، تمت دراسة ستة عشر وسط بيئي.

أشارت النتائج إلى أن ارتفاع درجة الحرارة يؤثر سلبيًا على خصائص الخرسانة المرصوفة خاصة في الظروف الجافة. لعلاج هذه المشكلة ، قمنا بعلاج الخرسانة المرصوفة ، أولاً من خلال تطبيق ثلاثة أنماط من المعالجة وثانياً عن طريق إضافة غبار السيليكا. في الواقع ، كان لطرق المعالجة الثلاثة تأثيراً إيجابياً على خصائص الخرسانة. لكن من ناحية أخرى ، فإن العيب الرئيسي المرتبط بإضافة غبار السيليكا للخرسانة المرصوفة هو تأثيره السلبي على الانكماش.

في الواقع، ترتبط تغيرات درجة الحرارة والرطوبة ببعضها البعض ، لذلك كان من الضروري دراسة تأثير تفاعل هذين العاملين على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة المرصوفة. لذلك ، يهدف البحث أيضاً إلى تطوير نماذج رياضية يمكن استخدامها للتنبؤ بخصائص الخرسانة المرصوفة في درجات حرارة مختلفة ورطوبة نسبية تصادف عادةً في الظروف الخارجية في معظم المناخات. وأخيراً ، للتحقق من صحة وموثوقية هذه النماذج ، تم فحص الخرسانة المرصوفة في ثلاث وسائط بيئية إضافية ، وتم اختيار هذه الوسائط بشكل عشوائي ، وتمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من التجارب مع النتائج التي قدمتها النماذج الرياضية.

أظهرت النتائج وجود علاقة ارتباطية جيدة بين النماذج المطورة والبيانات التجريبية المقابلة، حيث أظهرت جميعها علاقات تربيعية بدرجة ارتباط أعلى.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المرصوفة ، المناخ الحار، درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، النمذجة، المقاومة الميكانيكية، طرق العلاج، غبار السيليكا.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement économique d'une région demeure un objectif majeur de l'aménagement du territoire, car il est également censé améliorer la qualité de vie des populations. Les recherches ont montré qu'il existe une association étroite entre l'investissement dans l'infrastructure et le développement économique d'une région. Parmi les différents types d'infrastructures, l'infrastructure de transport est considérée comme l'une des plus importantes par les décideurs, car le transport est l'une des composantes de la société qui affecte non seulement le processus de croissance économique, mais aussi le développement socioéconomique. Un réseau de transport efficace et approprié réduit des coûts de transport de marchandises et de services ainsi que l'expansion du commerce au niveau régional, national et international et donc le développement de l'industrie.

Un pays sur deux dans le monde possède une partie ou la totalité de son territoire dans des zones arides ou semi-arides. Ces terres qui se représentent le tiers des terres émergées et sont peuplées de 15% environ de la population mondiale. Beaucoup de ces régions souffrent d'une sévère pénurie d'infrastructures de transport, cette dernière est considérée comme très importante afin de rompre l'isolement et réaliser le développement dans ces zones.

L'élément principal de l'infrastructure de transport de surface est le pavé solide, qui peut être construit pour être souple ou rigide. Les chaussées souples sont faites de béton bitumineux (BB) tandis que les chaussées rigides sont faites de béton de ciment portland. Les deux méthodes de construction présentent plusieurs avantages et inconvénients en termes de charges de trafic transférées à la plate-forme. La littérature nous indique que la route rigide construite principalement avec du béton compacté a une durée de vie plus longue que les chaussées en béton bitumineux. Bien que les chaussées souples soient aujourd'hui préférées aux chaussées rigides, les chercheurs ont continué à évaluer les avantages et les inconvénients de ces chaussées.

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) se présente comme étant une technologie évolutive pour une grande diversité d'application : Barrages, routes de transport, rues, aires de stationnement... Il peut être considéré comme un matériau économique, rentable et non polluant. Il est aussi un matériau à mise en place rapide qui convient parfaitement aux chaussées, offrant ainsi une bonne durabilité et minimisant par conséquent les frais d'entretien. Sa résistance, sa durabilité et sa facilité d'exécution en font la bonne solution pour les travaux routiers.

La facilité et la rapidité de mise en place du BCR ainsi que le faible prix par rapport au béton bitumineux, En plus de la propagation généralisée des cimenteries, et l'abondance des matériaux de construction et leur distribution à travers le monde, fait l'idée d'utiliser ce matériau dans les zones arides et semi-arides, logique et facile à incarner. Mais étant donné la spécificité du climat dans ces zones où il est classé comme un climat chaud qui est caractérisé par une température élevée et une faible humidité nous devons étudier l'effet de ces facteurs sur ce genre de béton.

Position du problème

En Algérie, le Sahara représente plus de 80% de sa superficie totale. Cette zone a un réseau routier estimé à plusieurs milliers de kilomètres de routes revêtues et non revêtues (des pistes), qui relient les principales agglomérations et centres de vie. Il compte près de 6000 km de routes non revêtues, classées comme pistes principales. Le climat caractérisant cette région est de type semi-continental avec un été très chaud, dont les températures dépassent 45°C.

La différence la plus importante entre les chaussées souples en béton bitumineux (BB) et les chaussées rigides est qu'avec l'élévation de la température, les chaussées souples présentent l'inconvénient de leur souplesse sous l'effet d'un fort trafic. Le trafic lent et les véhicules de fort tonnage provoquent la formation des ornières ainsi que des remontées en forme de bourrelets sous l'action des forces centrifuges surtout aux droites des virages, aux intersections et dans les tournants. D'autre part la poussée exercée sur le revêtement par les véhicules, tels que les camions et les autobus, en position d'arrêt ou en phase de démarrage, engendrent des déformations plissant donnant la forme des tôles ondulées nuisant conséquemment au confort dynamique des usagers d'une part, et raccourcit la durée de vie de la route d'autre part.

Une chaussée comportant un revêtement en béton compacté au rouleau est considérée comme une chaussée rigide. La rigidité du BCR, utilisée comme solution, contribue à la prévention des déformations en évitant la formation des ornières, des ondulations et des bourrelets. En effet, dans les zones chaudes, l'utilisation du BCR en couche de roulement est une alternative pour la résolution des problèmes de fortes déformations et dégradations enregistrées sur les chaussées souples sous l'action de la température.

Objectif de l'étude

Le présent travail, entre dans le cadre de la recherche d'une alternative au béton bitumineux qui est être plus résistant et plus durable dans les zones chaudes-sèches. Il s'inscrit aussi comme une contribution à la recherche de nouvelles applications permettant de développer les régions désertiques et découpler leur isolement, ainsi que fournir l'infrastructure pour l'exploitation des richesses souterraines situées dans le sud de l'Algérie. En plus, cette étude s'inscrit aussi dans le cadre général des efforts déployés par l'Algérie qui est en train de mettre en application une stratégie valorisante de maîtrise de l'énergie. Cette stratégie est poursuivie dans le but de préserver la richesse pétrolière.

Présentation de la thèse

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale décrivant le comportement du BCR lorsqu'il est durci dans différentes conditions environnementales. Les facteurs pris en compte dans cette étude sont la température de l'air et l'humidité relative. Pour évaluer l'effet des variations de ces facteurs sur le comportement du BCR complètement durci, quatre températures différentes (15, 30, 45 et 60 °C) ont été adoptées, chaque température a été examinée en quatre niveaux d'humidité relative (30, 50, 70 et 90%) ; En conséquence, seize milieux environnementaux ont été étudiés. Cependant, les changements de température et d'humidité sont liés l'un à l'autre, donc là il est nécessaire d'étude de l'effet de l'interaction de ces deux facteurs sur les propriétés mécaniques et physiques du BCR. Donc, la recherche vise également à élaborer des modèles mathématiques pouvant être utilisées pour prédire les propriétés du BCR à différentes températures et humidités relative normalement rencontrées dans les conditions extérieures dans la plupart des climats. Et enfin, pour vérifier la validité et la fiabilité de ces modèles, le BCR a été examiné en trois milieux environnementaux supplémentaires, ces milieux ont été choisis au hasard, les résultats obtenus par les expériences ont été comparés aux résultats fournis par les modèles mathématiques.

Pour arriver aux objectifs fixés, nous avons structuré la thèse en deux grandes parties.

La première partie est consacrée à une étude bibliographique, et se divise en deux chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le BCR et les mécanismes fondamentaux qui gèrent son comportement.

- Le deuxième chapitre, met en évidence les caractéristiques climatiques des zones arides, et il présente également les recherches antérieures les plus importantes qui ont porté sur le comportement du béton dans un climat chaud.

La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle se compose de trois chapitres :

- Le troisième chapitre est une description détaillée de tous les matériaux utilisés et formulation du BCR à base des matériaux locaux. Les différentes techniques expérimentales de malaxage et de compactage des éprouvettes à tester y seront également présentées.
- Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude de l'effet du climat chaud sur les propriétés physicomécaniques du BCR.
- Le dernier chapitre de ce travail concerne l'élaboration des modèles mathématiques qui décrivent l'effet du climat chaud sur le comportement du BCR par les plans d'expériences.

Et enfin, la thèse est finalisée par une conclusion générale qui regroupe l'extrait des résultats obtenus et les recommandations pour les futures recherches.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BCR

I.1 Présentation générale du BCR

I.1.1 Introduction

Depuis des décennies, une technique nouvelle est apparue dans le domaine des barrages : le béton compacté au rouleau ou B.C.R. Elle est innovante tant pour le matériau que pour sa mise en œuvre. Ce matériau est composé de granulats, d'eau et de liants hydrauliques mis en place comme un remblai, essentiellement à l'aide des matériels classiques de terrassement, que ce soit pour son transport (camions), sa mise en place en couches minces (finisseur) ou son compactage (rouleau vibrant lourd).

Cette technologie s'est développée dans le domaine des barrages dans un premier temps, où elle a connu de nombreuses réalisations dans le domaine de la construction de barrages à travers le monde, puis elle a commencé à apparaître dans la réalisation de routes, où elle a également connu beaucoup de réalisations en Amérique du Nord et dans certains pays européens.

En ce qui concerne le BCR en corps barrage, le continent africain n'est pas en reste puisque des réalisations notables ont été menées à bien en Tunisie, en Algérie, au Maroc et en Afrique du Sud en particulier. Cependant, dans le domaine des routes, cette technique reste nouvelle, l'Afrique n'ayant connu que quelques tentatives qui ne peuvent être qualifiées de réussites.

I.1.2 Définition

Le béton compacté au rouleau (BCR) est un béton sec (mélange d'eau, de ciment, de granulats, d'adjuvants et d'ajouts cimentaires si requis) qui nécessite l'apport d'une énergie de compactage externe pour être bien consolidé (A. Meddah et al., 2014; A Meddah et al., 2017). Un mélange de BCR contient plus de granulats et moins de pâte que le béton plastique (Gauthier et al., 2000). Ce béton n'est pas armé et sa mise en place se fait sans coffrage. Le BCR possède une consistance nettement moins plastique que le béton conventionnel. Du point de vue structural, un revêtement en BCR est un ouvrage rigide au même titre que toute autre dalle de béton et est soumis aux mêmes critères de conception (Marchand et al., 1997; Meddah, 2015). L'amélioration de certaines caractéristiques des mélanges de BCR, à l'état frais ou durci, peut être faite par des ajouts minéraux, naturels ou artificiels, pré-mélangés ou non au ciment, tels que les fumées de silice, les laitiers et les cendres volantes. Les adjuvants

du béton conventionnel (BC) sont aussi employés pour l'optimisation des caractéristiques du BCR.

Le BCR est distingué par sa consistance qui est identique à celle d'un sol humide alors que l'énergie de compactage est supérieure à celle de la vibration usuelle chez les BC (Gauthier & Marchand, 2004). Le BCR s'est développé selon deux axes différents :

- BCR pour les barrages et ouvrages massifs,
- BCR pour routes et pavages.

La formulation, les méthodes de confection et les méthodes de mise en place diffèrent en fonction du type de BCR. Pour sa confection, le BCR est produit, suivant la taille du projet, dans des centrales fixes ou mobiles. Le malaxage peut se faire, soit dans un malaxeur conventionnel à axe vertical, un malaxeur à tambour basculant, ou dans le cas des petits projets, dans une bétonnière. Le transport jusqu'au chantier est assuré à l'aide de camions à benne basculante. Pour des épaisseurs inférieures à 25 cm, le BCR pour les pavages est mis en place avec une paveuse dite à asphalte. On emploie couramment, pour sa mise en œuvre, des finisseurs à haut pouvoir de compactage (Gauthier & Marchand, 2004). Immédiatement après sa mise en place par les finisseurs, le BCR est compacté successivement avec des rouleaux vibrateurs à roues métalliques puis avec des compacteurs pneumatiques. La circulation du faible trafic est ouverte juste après sa mise en place et on ne permet la circulation du fort trafic qu'après 5 à 7 jours de mûrissement.

Du point de vue composition, Anderson (Anderson, 1986) a indiqué dans ses études, que le BCR est un matériau caractérisé par un volume de pâte inférieur à celui du BC comme c'est présenté sur la figure (I.1) et que son squelette granulaire est plus compact. La teneur en eau est aussi plus faible chez le BCR comparée aux teneurs utilisées dans le BC. La formulation d'un mélange de BCR doit minimiser au maximum le volume de vide et les granulats seront généralement enrobés d'une mince couche de pâte vu la faible teneur en liant.

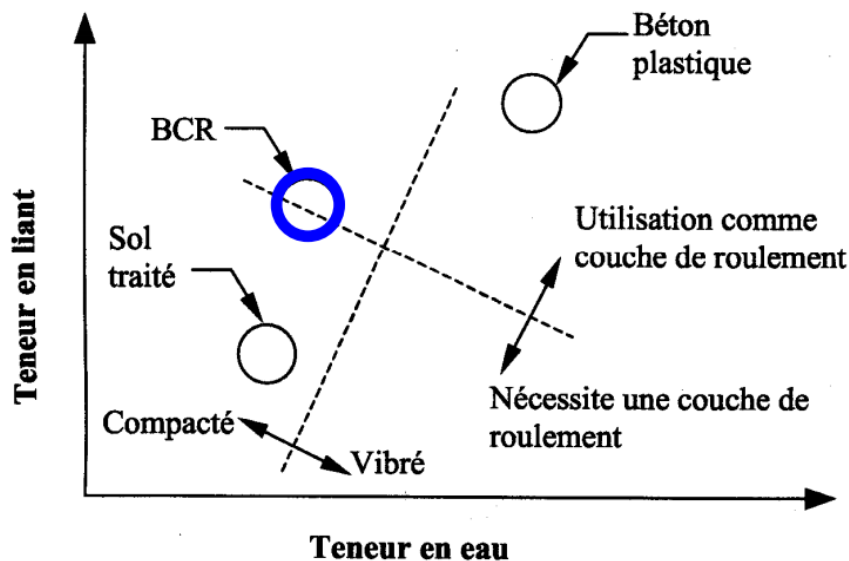


Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau.

I.1.3 Historique

Le concept du BCR a été utilisé pour la première fois aux Etats Unis en 1942 avec la construction d'une route à Yakima (Washington) par U.S Army Corps of Engineers (ACI-325, 2001; Gauthier & Marchand, 2001).

La technologie du gravier-traité est apparu en Suède en 1930, comme le BCR, il a les mêmes ingrédients que le béton ordinaire, il est mis en place et compacté également de façon similaire au BCR. Le gravier-traité a été employé pour la construction des routes, l'amélioration des sols de fondation, la protection des pentes, et la construction des couches étanches. Il existe cependant une différence essentielle entre le BCR et le gravier-traité, dans la teneur en matériaux cimentaires et la graduation des granulats. Dans la littérature certains ouvrages considèrent le matériau gravier-traité comme une forme de BCR (ACI-325, 2001; Choi & Hansen, 2005; Harrington et al., 2010).

Parmi les plus grands projets routiers réalisés jusqu'à aujourd'hui est la construction de 543464 m² de BCR (avec une épaisseur qui varie entre 203 et 254 mm) à l'Usine de General Motors Saturn au Tennessee. En réalité pour ce projet, une décision a été prise pour transformer l'asphalte par le gravier traité au ciment mais avec une teneur en liant relativement élevée (13%) dans le but d'améliorer la résistance au gel/dégel et à l'usure. Au Canada, la première utilisation de la technologie BCR dans les projets routiers revient en 1976 avec la réalisation d'une aire de triage de billes de bois de surface de 52000 m² en Colombie-Britannique sur l'île de Vancouver. Suite au succès du projet de Caycuse, d'autres surfaces de

stockage de billes de bois ont été réalisées entre 1976 et 1978 à l'île de la Reine-Charlotte en face de la côte de Colombie-Britannique. Ces surfaces sont encore en service avec un peu de travaux d'entretien ([Abdelaziz Meddah, 2015](#)).

En 1980, les ingénieurs de l'U.S Army Corps of Engineers ont étudié la possibilité d'utiliser le BCR pour des applications militaires. Deux projets routiers expérimentaux ont été construits en 1983, destinés pour les véhicules à chenilles et les chars, à Fort Gordon (Géorgie) et à Fort Lewis (Washington) ([Abdelaziz Meddah, 2015](#)).

Le premier projet à grande échelle réalisé par U.S Army Corps of Engineers en 1984 sur une superficie de 15175 m². Il présente une surface rigide pour les équipements tactiques. Une résistance à la flexion de l'ordre de 5,5 MPa est atteinte pour une épaisseur de 254 mm de BCR ([Abdelaziz Meddah, 2015](#)).

Le BCR a été utilisé également durant les années quatre-vingt avec succès pour les installations intermodales où les charges sont très élevées. Des aires ont des surfaces de l'ordre de 44313 m² et 107021 m² ont été réalisées à Houston (Texas) et Denver (Colorado), respectivement. Une grande surface de BCR a été construite, entre 1986 et 1988, au port de Conley et de la Marine de Moran à Boston ([ACI-325, 2001](#)).

La première utilisation du BCR en corps de barrages a été effectuée dans les années soixante avec la réalisation du barrage Gere à Italie et au Manicougan au Canada avec un béton très ferme placé et compacté à l'aide des bulldozers. Ce béton a été considéré comme un BCR ([ACI-207, 1999](#)).

En 1970, Raphael ([Raphael, 1970](#)) a présenté un papier intitulé "The optimum gravity dam" dans lequel le BCR est proposé comme une technique permettant de réduire le volume des barrages-poids. Il a introduit le concept de placer et de compacter une digue en tout-venant enrichie de ciment utilisant des équipements et des engins de grandes puissances. Raphael, a rapporté que l'augmentation de la résistance au cisaillement du matériau cimenté entraînerait une réduction importante dans la section transversale, comparant avec une digue de barrage-poids classique.

Deux années plus tard, Cannon ([Cannon, 1972](#)) a utilisé les idées de Raphael pour présenter un papier intitulé «Concrete Dam Construction Using Earth Compaction Methods». Cannon a présenté des résultats sur un béton ferme contenant des granulats avec graduation contrôlée. Ce béton est transporté par des camions, mis en place et diffusé avec des chargeurs frontaux puis compacté avec des rouleaux vibrateurs. Il a rapporté comment cette procédure

peut être meilleure pour construire un barrage, de même configuration, que la méthode conventionnelle de construction de barrage-poids en béton (Hansen & Reinhardt, 1991).

Au début des années soixante-dix, la philosophie de conception et construction suivant la technique du BCR, est apparue au Japon sous le nom RCD (Roller-Compacted Dam) pour la construction du barrage de Shimajigawa avec utilisation partielle de la technique du BCR. Ce barrage a été achevé en 1981 avec un volume total de BCR de 317000 m³. Le barrage de Willow Creek achevé en 1982 et devenue opérationnel à partir de 1983 a été le premier barrage construit totalement avec la technique du BCR, il présente un volume total de BCR de 330 000 m³ (ACI-207, 1999; BaCaRa, 1996).

En Afrique, le BCR reste, jusqu'à maintenant, une nouvelle technique et il ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que les Barrages de Rmil en Tunisie, Koudiat Asserdoune en Algérie et Ain Al Koreima au Maroc, alors que l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées reste une tentative ne peut pas être classé comme une réussite. Dernièrement, la construction d'une route en BCR a été faite en Algérie à la fin de l'année 2017. Ce projet a été réalisé par une société française et consiste à relier la cimenterie de Lafarge Holcim M'sila à la route nationale RN60.

I.1.4 Avantages du BCR

Il a été démontré que le BCR a une résistance et des performances similaires à celles du béton conventionnel. Il est couramment utilisé dans les aires de stationnement, les parcs d'équipement, les ports à conteneurs, les gares de fret ferroviaire et, de plus en plus, dans les routes. Les avantages économiques du BCR sont liés aux méthodes de construction à haut volume et à grande vitesse et il est préférable à l'asphalte à de nombreux égards, tels que les coûts des matériaux, le temps de placement, le coût de la main-d'œuvre et le temps et l'heure d'ouverture du trafic (Donegan, 2011).

De plus, le BCR a une réflectivité plus élevée que l'asphalte, lorsqu'il est utilisé comme matériau de revêtement. Cet avantage atténue certains des problèmes de l'effet des émissions de chaleur qui est généralement lié aux surfaces sombres absorbant la chaleur (Harrington et al., 2010). Le BCR peut être ouvert à la circulation dans les deux jours par temps chaud et de trois à quatre jours par temps plus froid et dans certaines applications immédiatement. Le temps d'ouverture du BCR dépend de certains facteurs tels que les propriétés mécaniques, la charge de la chaussée, le mélange de BCR et la température ambiante diurne et nocturne. Par conséquent, le BCR devrait être autorisé à acquérir une

résistance à la flexion et à la compression adéquate avant d'être ouvert à la circulation (Donegan, 2011; Harrington et al., 2010).

Les avantages les plus importants du BCR dans les chaussées sont résumés dans le tableau I.1 selon Donegan et Harrington et al (Donegan, 2011; Harrington et al., 2010).

Tableau I.1 : Caractéristiques et avantages du béton compacté au rouleau (BCR)

Caractéristique	Avantage
Faible teneur en pâte	Moins de retrait du BCR.
Faible perméabilité	Améliore la durabilité et la résistance aux attaques chimiques.
Haute résistance à la flexion	Supporte des charges lourdes et répétitives sans défaillance, ce qui réduit les coûts d'entretien et les temps d'arrêt.
Haute résistance à la compression	Résiste aux charges concentrées élevées et aux applications industrielles lourdes.
Haute résistance au cisaillement	Réduit l'orniérage et les réparations ultérieures.
Pas de renfort en acier ni de chevilles, pas de coffrage ni de finition	Accélère et simplifie la construction, réduit les coûts et minimise la main-d'œuvre.
Pas de joints formés ou sciés	Accélère la construction et réduit les coûts.
Surface de couleur claire	Les exigences d'éclairage sont réduites pour les zones de stationnement et de stockage.

Lorsque les conditions permettent d'envisager une alternative au ouvrage en BCR, les points suivants peuvent être un plus.

- **Coût**

Le principal avantage du BCR est la réduction des coûts. L'historique des coûts de construction en BCR et en BC (béton conventionnel) montre que le coût unitaire par mètre cube du BCR est considérablement inférieur à celui du BC (15% à 30%) (Ramezani pour et al., 2017). Le pourcentage d'économie avec le BCR dépend de la disponibilité et du coût du ciment et des granulats et de la quantité totale de béton. De plus, la teneur réduite en ciment et la facilité de mise en place et de compactage conduisent les ouvrages en BCR à être construits de manière plus économique. Cependant, la disponibilité de granulats et de ciment à proximité du site du projet est l'inconvénient majeur des routes en BCR par rapport aux routes en asphaltes (Adaska, 2006). Pour maximiser les économies par rapport aux routes en BC et en BB, les routes en BCR doivent être construits en tenant compte les points suivants ;

- ✓ Le BCR doit être placé le plus tôt possible (réduire le temps de transport).
- ✓ Les mélanges avec plusieurs conceptions doivent être évités si possible car ils peuvent ralentir la production.
- ✓ La conception ne doit pas contenir de procédures de construction inhabituelles qui rompent la continuité de la construction.

- **Vitesse de construction**

Le prochain avantage des routes en BCR est la rapidité de construction. Il en résulte deux avantages principaux, à savoir l'exploitation précoce de la route et un risque réduit des catastrophes naturelles et, le bénéfice supplémentaire d'un achèvement plus précoce peut être un gros revenu sur l'économie de la zone où cette route est située.

- **Équipement et matériel**

L'équipement requis pour un projet BCR est généralement le même que celui d'un projet BB et comprend des mélangeurs, des convoyeurs, des camions, des compacteurs et des rouleaux vibrants. Les matériaux utilisés dans le mélange de conception BCR sont faciles à obtenir en fonction des conditions du site : la proximité de gravier de bonne qualité est très importante pour une construction à faible coût.

I.2 Les principaux constituants du BCR

I.2.1 Liant

L'utilisation du ciment dans le béton répond à pas mal d'exigences parmi lesquelles la résistance mécanique, les critères de durabilité exigés ainsi que les contraintes économiques telles que : la disponibilité et le coût des ajouts, le coût du transport, etc...

Le choix du type et du dosage de ciment pour la confection du BCR est fonction des exigences requises et de la destination du projet. Pour un BCR routier, la quantité de ciment est plus grande par rapport à un BCR d'ouvrage massif comme le barrage, puisque les sollicitations mécaniques sont plus grandes. En revanche, il est important de minimiser la quantité de ciment pour un BCR destiné aux barrages afin de réduire la chaleur dégagée pendant l'hydratation.

Pour un mélange de BCR, la quantité de ciment représente 12 à 16% de la masse totale de ses constituants secs. Il est désavantageux d'employer une teneur en ciment trop élevée car elle augmente le phénomène de retrait. Un mélange de BCR peut être confectionné avec n'importe quel type de ciment hydraulique, mais l'expérience montre que l'utilisation d'ajouts

cimentaires (laitier, pouzzolane, fumée de silice, cendres volantes,...) permet d'améliorer la maniabilité, les propriétés mécaniques et de faciliter les opérations de mise en place et de compactage.

I.2.2 Granulats

Les granulats sont considérés comme le maillon qui procure au béton sa résistance mécanique. Ils sont définis par les termes : fines, sables, graviers et cailloux. Leurs dimensions varient entre 0 et 125 mm. Le béton compacté au rouleau contient une quantité de granulats très importante comprise entre 75 % et 85 % qui peuvent représenter les 4/5 du mélange. Le squelette granulaire doit donc être bien défini pour obtenir une bonne compacité afin d'atteindre un compactage optimal. La mauvaise compacité du squelette granulaire entraîne des désagréments qui peuvent nuire à la qualité du béton comme l'apparition de ségrégation, augmentation de la porosité et la propagation des microfissures provoquée par le retrait.

A l'état frais, la maniabilité, le potentiel à ségréguer et la souplesse du mélange sous les rouleaux compacteur sont largement influencés par la nature et le type des granulats utilisés. A l'état durci, la résistance mécanique, le module d'élasticité et les propriétés thermiques sont grandement affectés par les propriétés intrinsèques des granulats. La compactibilité, la densité in situ et conséquemment l'état final de la surface de chaussée (surface de l'usure) sont également influencés par la gradation des granulats ([Harrington et al., 2010](#)).

Pour un mélange de BCR, il est important de limiter le diamètre maximal nominal de granulats grossiers afin de minimiser le risque de ségrégation et de faciliter les conditions de mise en œuvre. Selon la destination du projet, le diamètre maximal de granulats est limité généralement, à 20 mm pour les projets routiers et à 50 mm pour les barrages.

L'emploi de granulats fins dans le BCR permet de remplir les vides inter-granulaires et facilite donc le compactage, pour avoir un squelette aussi dense que possible. En effet, et pour arriver à une gradation optimale, il est préférable que la gradation de granulats grossiers et fins se situe entre les limites présentées dans le tableau 1.2 ([USACE, 2000](#)).

Tableau I.2 : Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après (USACE, 2000)

Diamètre (mm)	Tamisât cumulé (%)		
	4.75 à 75 mm	4.75 à 50 mm	4.75 à 19 mm
75	100		
63	88		
50	76	100	
37.5	61	81	
25	44	58	
19	33	44	100
12.5	21	28	63
9.5	14	18	41
4.75	-	-	-

I.2.3 Adjuvant

Les adjuvants sont utilisés dans le but de faciliter la mise en œuvre des BCR, d'adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, de réduire les coûts de mise en œuvre, d'améliorer les propriétés du BCR durci voire même de lui conférer des propriétés nouvelles.

Toutefois, dans le cas du BCR, la durée courte de malaxage et la faible quantité d'eau font qu'il y a une atténuation de l'effet des adjuvants, d'où une augmentation du dosage en adjuvant par rapport au béton plastique afin d'accroître leur efficacité.

Pas mal de précautions doivent être prises pour leur utilisation. Il est même recommandé de réaliser des essais au laboratoire afin de déterminer le dosage optimal et de mesurer l'effet sur les propriétés du BCR frais et durci.

Les principaux adjuvants généralement utilisés dans le BCR sont :

- *Les adjuvants retardateurs de prise*

Ces adjuvants augmentent la durée de transport et de mise en place du béton, permettent de maintenir longtemps la consistance recherchée du béton ou de ménager la contrainte des reprises de bétonnage.

- *Les adjuvants réducteurs d'eau*

Ils ont pour rôle, à consistance égale de réduire le dosage en eau et à dosage en eau constant d'augmenter l'affaissement au cône d'Abram. Ces adjuvants sont couramment employés dans la réalisation des BCR puisque permettant une amélioration de l'homogénéité

de la pâte. Cependant, ces adjuvants employés à fort dosage peuvent avoir un effet retardateur de prise.

L'utilisation de certains adjuvants dans un chantier de BCR n'est pas courante. Ces adjuvants sont les suivants :

- Les adjuvants accélérateurs de prise ;
- Les fluidifiants.

Ces derniers ne sont pas employés puisqu'entraînant une très grande maniabilité alors que l'effet d'une maniabilité trop élevée est néfaste pour un mélange de BCR (ressuage, déformation excessive à la suite du compactage...).

I.2.4 L'eau

Le BCR étant un béton sec à affaissement nul, sa teneur en eau doit donc être faible. Elle est de l'ordre de 4 à 6%, fixé par le laboratoire lors de l'essai Proctor modifié. Quant à la teneur en eau au chantier, on doit tenir compte des conditions atmosphériques et de transport.

L'eau est de qualité potable avec une teneur en sels dissous inférieurs à 1 g/l et une teneur en matière de suspension inférieure à 0.5 %.

Il faut noter qu'un excès d'eau entraîne une instabilité rendant l'uni défectueux tandis qu'un manque d'eau entraîne des défauts de mise en œuvre.

I.3 Domaine d'utilisation du BCR

Le béton compacté au rouleau est utilisé dans deux grands axes de construction, la construction des barrages et le revêtement des chaussées. Les nombreux avantages de ce béton l'ont rendu très populaire dans la construction des barrages et des routes. Cependant, une différence non négligeable entre ces deux applications existe. En effet, la nature des matériaux, leurs proportions et la mise en place du BCR sont très différentes entre ces deux applications.

I.3.1 Application du BCR pour les barrages

Le béton compacté au rouleau est un béton très rapide à mettre en place et à mettre en service, pour cela, son utilisation pour les barrages parés bien utiles, de plus il permet de réaliser des pentes plus fortes par rapport à l'utilisation de terre et de digues de retenue. Le BCR en corps de barrages à une quantité de liant relativement faible par rapport au béton conventionnel. La dimension maximale des granulats des BCR destinés pour les barrages

varie entre 60 à 150 mm. Les Résistances requises pour les projets en BCR en corps de barrages varient entre 7 à 20 MPa.

Parmi les barrages en BCR réalisés en Algérie on peut citer : Barrage Beni Haroun à Mila, Barrage Koudiat-Acerdoune à Bouira, Barrage Tabellout à Jijel, Barrage Djorf Torba à Béchar En France, on peut citer le Barrage de Rio, le Barrage Olivettes et le Barrage Petit-Saut qui sont réalisés en BCR. En Asie, le plus grand barrage en BCR est le barrage Wadi Dayqah au Sultanat Omen.

Au Canada, la construction de barrages en BCR est relativement plus développée dont on peut citer le barrage de Manouane. En outre, en Amérique du Nord, le plus grand barrage en BCR se trouve à Olivenhain, Californie (USA). Le plus haut barrage en BCR est le barrage Miel en Colombie de 617 m de hauteur, suivi par le barrage de Biobio au Chili de 503 mètres de hauteur. Tha Dan Canal Dam est le plus grand barrage en BCR au monde d'une longueur de 2720 mètres et un volume de BCR de 5.470.000 m³ (Zdiri, 2008).



Figure I.2 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction (Bouyge & Forbes, 2007).

I.3.2 Le BCR en technique routière

Le BCR peut également être utilisé comme matériaux routiers. Ce type d'application nécessite une plus grande quantité de ciment et un rapport E/C plus faible que pour un barrage, car les sollicitations tant mécaniques (passage des véhicules) que thermiques (cycles

de gel/dégel, présences de sels fondants) y sont plus importantes (Marchand et al., 1997). De plus, la teneur en particules fines de diamètre inférieur à 80 µm doit être assez élevée afin de faciliter la finition de la surface du béton.

Du point de vue de durabilité, le revêtement en BCR a montré de bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voies d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telles que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes (Smith et al., 1998).



Figure I.3 : Mise en place d'un BCR routier (la route reliant entre la RN 45 et la cimenterie de M'sila - Algérie).



Figure I.4 : Mise en place d'un BCR routier (ACI Committee, 2001).

I.4 Propriétés du BCR

I.4.1 Propriétés du BCR à l'état frais

Les principales propriétés du BCR à l'état frais sont la maniabilité, la masse volumique, la ségrégation et la sensibilité élevée aux variations de la teneur en eau du mélange. Nécessairement, les méthodes d'essais couramment employées pour la mesure des propriétés à l'état frais du béton plastique ne sont pas applicables au BCR.

I.4.1.1 Maniabilité

La maniabilité est une propriété importante du BCR à l'état frais. Elle détermine la facilité de mise en place et donne une indication sur l'uniformité de la production du BCR. La maniabilité se définit comme un indice de l'effort qui doit être fourni pour bien consolider le matériau frais. La maniabilité représente l'énergie de compactage nécessaire pour consolider adéquatement le matériau frais. Expérimentalement, la maniabilité d'un mélange de BCR est déterminée en mesurant le temps requis pour consolider avec une énergie donnée d'une certaine quantité de béton. Compte tenu de la consistance sèche du BCR à l'état frais, la mesure de la consistance des bétons plastiques mesurée à l'aide de l'essai d'affaissement au cône n'est pas applicable. Comme décrit plus loin, la maniabilité du BCR est mesurée à l'aide de l'appareil VEBE.

Le volume et la fluidité de la pâte de ciment ont une influence directe sur la maniabilité d'un mélange de BCR. La pâte doit pouvoir se répartir et combler les vides entre les granulats lors du compactage du BCR. Une maniabilité inadéquate (trop élevée ou trop faible) affecte le développement des propriétés mécaniques, le déroulement des opérations de mise en œuvre du BCR, la qualité et la durabilité de l'ouvrage.

Un mélange de BCR avec une maniabilité trop élevée (mélange plus humide) indique que le volume de pâte (ou la quantité d'eau) est trop important. Cette maniabilité élevée a de nombreuses incidences sur les propriétés finales du matériau comme sur sa mise en place. Cette augmentation du rapport eau/liant se traduit par une diminution des propriétés mécaniques et de la durabilité. En ce qui concerne la mise en place du BCR au chantier, cette plus grande fluidité du mélange favorisera la création de pressions interstitielles dans le matériau compacté et une déformabilité excessive lors du passage des équipements de compactage, menant à la formation d'ondulation à la surface du revêtement. La qualité de la surface peut être réduite en raison de l'adhérence accrue de la pâte avec les rouleaux d'acier des équipements de compactage. En contrepartie, une maniabilité trop faible (mélange plus sec) survient lorsque la teneur en eau du mélange est insuffisante ou inadéquate (le volume de pâte ne suffit pas à combler les vides entre les granulats). Comme pour le cas précédent, cette consistance trop sèche aura comme conséquence d'augmenter le volume de vides de compactage ce qui entraînera une diminution des propriétés mécaniques et de la durabilité. De plus, une faible maniabilité provoque généralement une augmentation de la ségrégation lors de la fabrication, du chargement, du transport et de la mise en place du BCR de même qu'un fini de surface généralement plus ouvert (grossier). Finalement, ce manque de maniabilité réduit l'adhérence entre les couches et les joints. Concrètement, une variation du dosage en eau d'un à deux litres/m³ peut avoir un effet sensible sur la maniabilité du mélange et sur les opérations de mise en place.

La maniabilité du BCR est mesurée, généralement, selon les exigences de la norme [\(ASTM-C 1170, 1998\)](#). La mesure de la maniabilité est réalisée à l'aide de l'appareil VEBE, comme montré à la figure (I.5). Le principe de cet essai est de mesurer le temps nécessaire au béton pour se consolider sous l'effet d'une charge et d'une vibration spécifique. Le temps VEBE est calculé du début de la vibration jusqu'à l'apparition d'une couche de mortier sur le bord de la plaque contenant la surcharge.

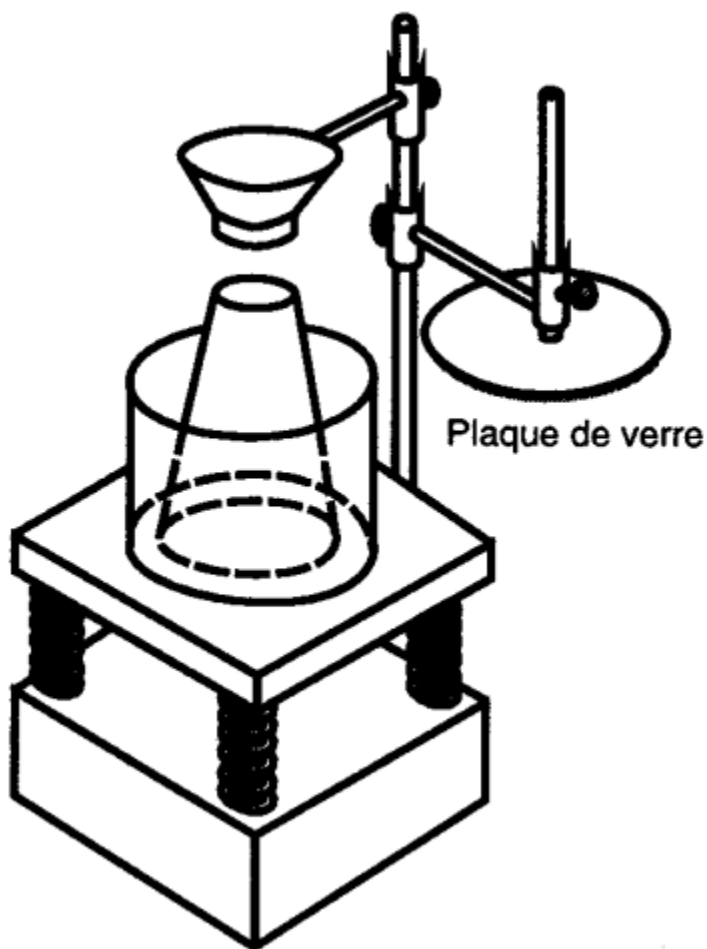


Figure I.5 : Appareil VEBE (Zdiri, 2008).

L'expérience en chantier a montré que la maniabilité du BCR doit être généralement comprise entre 40 et 90 secondes (temps VEBE) au moment de la mise en place. Le délai maximal pour la mise en place du BCR, depuis le contact initial eau/liant, est de 60 minutes. Cette plage de valeurs semble assurer une mise en œuvre adéquate et peut ainsi permettre d'éviter les problèmes liés à une maniabilité trop élevée ou trop faible, tels qu'ils sont décrits dans les paragraphes précédents. La mesure de la maniabilité à l'aide de l'appareil VEBE est un essai simple et rapide à réaliser. Par contre, le résultat de cette mesure est grandement influencé par l'opérateur, le type de l'appareil et le mode opératoire. Une attention particulière doit être portée lors de la réalisation des essais.

I.4.1.2 Masse volumique

La seconde caractéristique qu'on doit tenir en compte à l'état frais est la masse volumique. En effet, cette valeur est très significative sur la compacité et les performances

mécaniques du béton. Plusieurs recherches ont conclu que la densité a un rapport direct sur la résistance à la compression (Abdelaziz Meddah et al., 2014). La mesure de la masse volumique humide s'effectue suivant trois procédés : Proctor (ASTM-D1557, 1991), vibro-compactage (ASTM-C, 1998) et marteau vibrant (ASTM-C1435, 1999).

Selon Pittman (Pittman, 1989), la masse volumique humide est affectée par plusieurs facteurs tels que le type de la paveuse employée, le nombre de passages effectué par le rouleau compacteur, le temps mis jusqu'au premier compactage et l'épaisseur de la couche.

La masse volumique humide peut aussi servir pour valider la compacité sur chantier. En effet, la mesure de cette valeur par le nucléodensimètre sur chantier peut nous permettre de la comparer avec la valeur obtenue en laboratoire.

Karimpour (Karimpour, 2010) a étudié l'effet de l'intervalle de temps entre le malaxage et le compactage de deux types de béton, un béton conventionnel et un BCR contenant du laitier à haut fourneau granulé et broyé. Les résultats montrent que plus le laps de temps augmente, plus une chute des performances mécaniques et de perméabilité est remarquée pour les deux bétons. Par contre, en présence du laitier à haut fourneau, l'effet du temps est moins remarqué sur les performances mécaniques et de perméabilité.

I.4.1.3 Teneur en air

La méthode d'essai qui permet de déterminer la teneur en air du béton plastique à l'aide d'un aréomètre pressiométrique n'est généralement pas employée pour le BCR à l'état frais. En effet, le BCR ne possède pas la déformabilité nécessaire à la réalisation de cet essai. Le contact étroit entre les granulats rend la matrice non plastique. Par ailleurs, sur le matériau frais, une indication sur le volume d'air total dans le mélange de BCR est fournie par la mesure de la masse volumique humide à l'aide de l'essai Proctor en la comparant à la masse volumique humide de référence.

Seule la mesure des caractéristiques des vides d'air sur le matériau durci selon la norme (ASTM C457, 2008) permet d'obtenir, entre autres, le pourcentage de vides d'air incluant les bulles sphériques et les vides de compactage.

I.4.1.4 Ségrégation

Le BCR est particulièrement sensible à la ségrégation en raison du faible volume de pâte et conséquemment, du faible volume d'eau de gâchage. La ségrégation est fonction de la granulométrie, de la grosseur nominale du granulats grossier et des caractéristiques de la pâte.

La ségrégation du BCR peut se produire à toutes les étapes de sa manipulation. Lors du chargement des camions à bennes basculantes, la hauteur de chute doit être réduite au minimum et le BCR frais doit être déversé uniformément sur toute la longueur de la benne du camion (un tiers du chargement à l'avant, un tiers au centre et un tiers à l'arrière). Si le chargement du BCR dans la benne du camion est déversé de manière inadéquate, le transport du BCR augmentera sûrement la ségrégation du matériau. Des précautions doivent donc être prises pour éviter toute ségrégation du matériau lors des premières étapes de sa manipulation (Gauthier & Marchand, 2004).

Le déchargement du BCR dans la trémie du finisseur doit également être réalisé de façon à réduire au minimum la ségrégation. La trémie ne doit jamais demeurer vide avant le déversement d'un autre chargement de béton. Le niveau du mélange dans la trémie du finisseur doit être maintenu en tout temps au-dessus de l'arbre de la vis de distribution de l'épandeuse. De plus, les deux panneaux rétractables de part et d'autre de la trémie du finisseur doivent demeurer en tout temps en position ouverte. Les panneaux ne doivent pas, sous aucune considération, être actionnés lors des opérations de mise en place du BCR. Même si toutes les précautions sont prises pour éviter de produire de la ségrégation lors du déchargement du BCR dans la trémie du finisseur, les plus gros granulats ont tendance à s'accumuler sur les côtés de la trémie, le long des panneaux rétractables. La fermeture de ces panneaux entraînerait ces particules vers la vis de distribution causant alors de la ségrégation dans la bande de BCR mise en place.

Malgré toutes les précautions prises, des zones de ségrégation peuvent également se produire à la sortie du finisseur. Des mesures correctives doivent être immédiatement prises afin de corriger la ségrégation soit à la source ou in situ. L'expérience en chantier a démontré que l'ajout de matériaux de dimension inférieure à 5 mm tamisés à partir de BCR frais sur les zones de ségrégation avant le passage des équipements de compactage permettait d'améliorer la situation. De plus, certaines zones sensibles à la ségrégation comme les joints frais (transversaux et horizontaux) et les joints de reprise doivent être réalisées avec précaution.

I.4.2 Propriétés du BCR à l'état durci

Les principales propriétés du BCR à l'état durci sont la résistance à la compression, le retrait et la durabilité. Généralement, les méthodes d'essais couramment employées pour la mesure des propriétés du béton à l'état durci sont applicables au BCR.

I.4.1.1 Résistance à la compression

L'optimisation des proportions des matériaux secs des mélanges de BCR permet d'obtenir d'excellentes résistances à la compression malgré les faibles teneurs en ciment de ces bétons. La diminution de la porosité du squelette granulaire mène à la réduction de la teneur en particules fines, c'est-à-dire, ciment, fumée de silice, cendres volantes, laitiers et autres matériaux fins. Une plus petite quantité de pâte est donc requise pour lier tous les granulats. À titre indicatif, un mélange de BCR, correctement formulé, possédant seulement 300 kg/m³ de ciment de type 10E-SF avec un rapport eau/liant de 0,35 développe généralement, à 28 jours, une résistance à la compression de plus de 60 MPa. De même, avec un ciment de type 10 à 245 kg/m³ possédant un rapport eau/liant de 0,45, la résistance à la compression est environ de 43 MPa à 28 jours de mûrissement (Ouellet, 1998). Ces résultats soulignent l'importance d'une formulation adéquate des constituants secs, c'est-à-dire, une optimisation du squelette granulaire. Cette optimisation réduit d'ailleurs de façon appréciable les coûts de fabrication.

Cette bonne résistance à la compression des mélanges de BCR formulés par une méthode d'optimisation du squelette granulaire s'explique par l'accroissement du phénomène d'enchevêtrement des granulats. En effet, le contact intime granulat-granulat gêne la propagation des fissures en raison de leur meilleure disposition. Les propriétés de la matrice cimentaire expliquent aussi les résistances à la compression élevées de ces mélanges. La résistance de la matrice cimentaire est grandement influencée par la porosité du système. Le faible rapport eau/liant de ces mélanges produit une matrice cimentaire peu poreuse favorisant ainsi des résistances élevées à la compression.

Pour une résistance à la compression donnée, la forte compacité du squelette granulaire des mélanges de BCR nécessite donc une quantité moindre de liant comparativement à celle usuellement utilisée pour la fabrication des mélanges de béton plastique. Pour des résistances à la compression de l'ordre de 45 et de 60 MPa, les dosages en liant des mélanges de BCR sont généralement inférieurs environ 28 à 20% respectivement par rapport aux mélanges de béton plastique (Gauthier et al., 2000).

I.4.1.2 Résistance à la flexion

L'un des premiers paramètres à prendre en considération lors de la conception d'un revêtement en BCR, comme pour tout autre revêtement rigide en béton, est la résistance à la flexion (module de rupture) du béton. Le critère de fatigue, c'est-à-dire, le contrôle de

fissuration dans une dalle soumise à des charges répétitives dues aux passages de véhicules lourds, est déterminé par la résistance à la flexion du béton.

La résistance à la flexion des mélanges de BCR formulés adéquatement (squelette granulaire optimisé) est généralement plus élevée que celle des bétons usuels. Cette bonne performance est directement attribuable à la compacité du mélange où les granulats sont pratiquement en contact les uns contre les autres. Cette compacité granulaire constitue un obstacle à la propagation des fissures. L'énergie requise pour propager la fissure doit être plus importante (Gauthier & Marchand, 2004).

Typiquement, un mélange de BCR, correctement formulé, fabriqué avec 250 kg/m³ de ciment de type 10E-FS et d'un rapport eau/liant de 0,40 développe généralement une résistance moyenne à la flexion d'environ 4,0 à 4,5 MPa après 3 jours de mûrissement, d'environ 5,0 MPa à 7 jours et entre 5,5 et 6,0 MPa à 28 jours. De même, un mélange de BCR fabriqué avec une teneur en ciment d'environ 300 kg/m³ (type 10E-FS) et possédant un rapport eau/liant d'environ 0,35 développe généralement une résistance moyenne à la flexion d'environ 4,0 à 4,5 MPa après 3 jours de mûrissement, d'environ 5,5 à 6,5 MPa à 7 jours et d'environ 7,0 MPa à 28 jours (Ouellet, 1998).

I.4.1.3 Module d'élasticité

La constante de proportionnalité, E , exprime le rapport entre une contrainte appliquée et la déformation qui correspond au module élastique ou au module d'Young comme montré à la relation (1).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots \dots \dots (1)$$

E : module d'Young (MPa); σ : contrainte (MPa); ε : déformation (%).

Cette constante de proportionnalité est une mesure de la rigidité du matériau, c'est-à-dire de la propriété qu'a le matériau de se déformer de façon élastique réversible sous l'action d'une contrainte.

Les propriétés des deux phases présentes dans un mélange de béton, soient la pâte de ciment hydraté et le granulat, influencent le module élastique. Dans un mélange de BCR, les granulats occupent un volume important comparativement au volume de la pâte. Cette présence accrue des granulats a une influence dominante sur les autres paramètres tels que le type de liant et le rapport eau/liant. Ainsi, même si un mélange de BCR fabriqué avec un ciment de type 10E-FS développe des résistances à la compression supérieures à celles d'un

mélange avec un ciment portland de type 10, les modules élastiques de ces deux mélanges seront sensiblement identiques. La figure (I.6) donne quelques valeurs pour le module d'élasticité selon différentes échéances pour des mélanges de BCR avec un ciment portland de type 10 et un ciment de type 10E-FS pour des rapports eau/liant de 0,35, 0,40 et 0,45 (Ouellet, 1998). Comme montré sur cette figure, le module d'élasticité moyen de ces différents types de mélanges de BCR est environ 30 GPa après 28 jours de mûrissement.

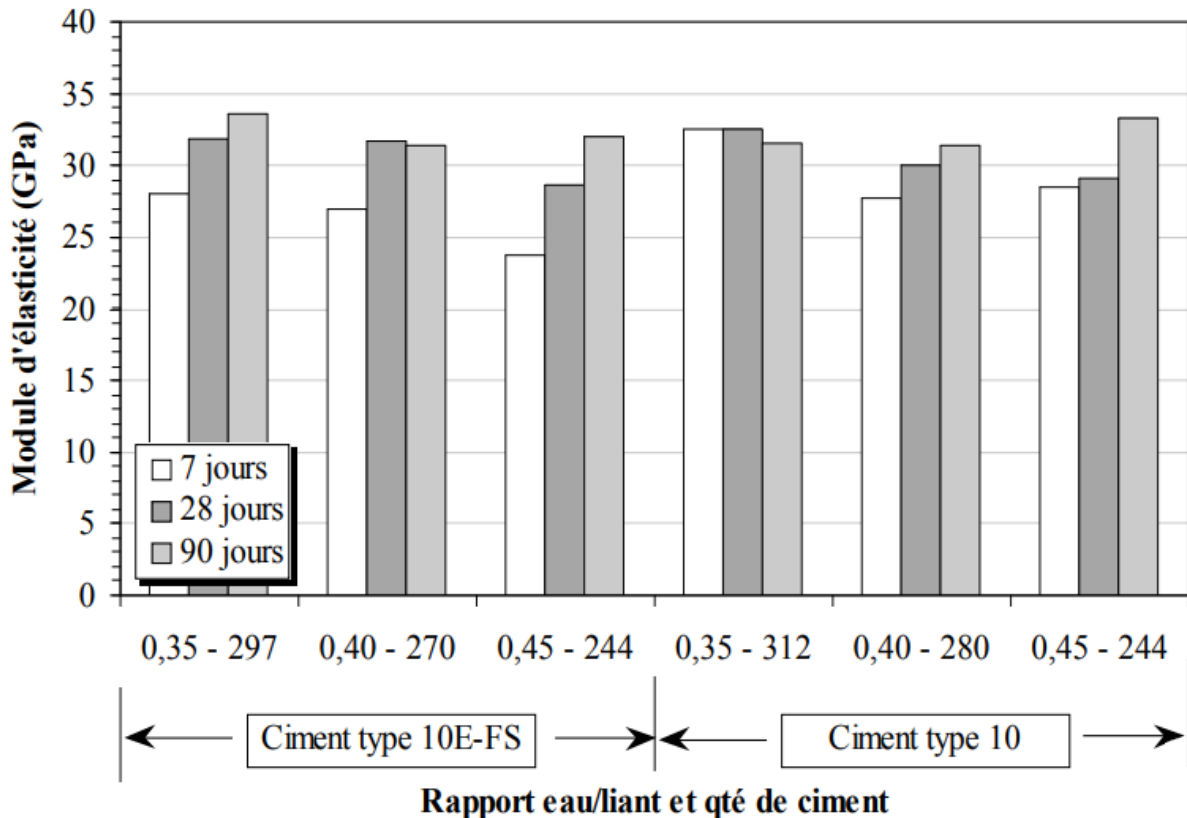


Figure I.6 : Module d'élasticité de différents mélanges de BCR (Ouellet, 1998).

I.4.1.4 Retrait

Le retrait du béton se définit par des variations dimensionnelles du matériau en l'absence de chargement. Le retrait du béton origine des phénomènes de dessiccation et d'hydratation (Pigeon et al., 2003). On distingue quatre types de retrait. Le retrait sans échange d'humidité qui s'explique par les phénomènes d'auto dessiccation (le squelette minéral s'oppose à la diminution du volume qui résulte de la poursuite de l'hydratation (Acker, 1992)), thermique (chaleur d'hydratation) et de gonflement chimique (ettringite). Le deuxième type, le retrait avec échange d'humidité, correspond au retrait plastique et au retrait de séchage (départ de l'eau vers l'extérieur depuis les capillaires et les pores plus fins). Le troisième type est le gonflement dans l'eau tandis que le dernier type est le retrait de

carbonatation résultant de la dissolution de la chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) par le gaz carbonique.

Le retrait de séchage des bétons en général est principalement influencé par le rapport eau/liant et le volume des granulats (Neville, 1995). Le retrait de séchage s'accroît avec l'augmentation du rapport eau/liant puisqu'il détermine la quantité d'eau évaporable dans la pâte de ciment de même que le taux auquel l'eau remonte vers la surface du béton. Les granulats quant à eux s'opposent au retrait ou à toute déformation de la pâte. Ce degré de résistance à la déformation est déterminé par les propriétés élastiques des granulats. Par ailleurs, dans le cas des BCR, le volume important des granulats (squelette granulaire compact) réduit de façon plus significative le retrait de séchage qu'une diminution du rapport eau/liant du mélange. En fait, plus le pourcentage de volume occupé par les granulats est important, moins le rapport eau/liant a une influence sur le retrait de séchage.

Le retrait de séchage des BCR est habituellement inférieur au béton plastique. Le retrait de séchage ultime d'un mélange de BCR typique (estimé avec l'équation de Bazant) est généralement compris entre 400 et 500 $\mu\text{m}/\text{m}$, tandis que pour un mélange de béton plastique, le retrait de séchage ultime peut être de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ et plus. La faible teneur en ciment des mélanges de BCR réduit aussi le retrait de séchage (Gauthier & Marchand, 2004).

I.4.1.5 Durabilité

Le mélange BCR offre le degré de durabilité requis en fonction des propriétés des matériaux, des conditions d'exposition et du niveau de performance attendu. Le BCR doit être exempt d'effets délétères de la réactivité des agrégats alcalins par une évaluation et une sélection appropriées des matériaux. La résistance au gel-dégel, à l'abrasion et à l'érosion ne devrait pas être une préoccupation majeure lorsque les matériaux utilisés sont de bonne qualité et lorsque le dosage du mélange est bien étudié.

a- Résistance au gel et au dégel

La résistance au gel-dégel du mélange BCR dépend directement de sa résistance, de son imperméabilité et de sa capacité d'entraînement d'air. Selon Zhengbin et al (Zhengbin et al., 2007), afin d'augmenter la durabilité au gel-dégel des mélanges de BCR, la teneur en adjuvants entraîneur de l'air doit être augmentée, la teneur en air doit être contrôlée entre 4,5 et 6,0 %, la teneur en cendres volantes ne doit pas dépasser plus de 40 % au béton à haute teneur en air et le rapport eau-colloïde du BCR doit être inférieur à 0,55 dans les régions froides. De plus, le transport capillaire de l'eau dans le BCR augmente la vulnérabilité du

mélange aux dommages causés par les cycles de gel-dégel. Cette action se produit plus fréquemment dans les mélanges plus perméables qui infiltrent plus facilement l'eau à l'intérieur (Hazaree et al., 2011).

Étant donné que le BCR a une consistance sèche, il n'est pas pratique d'entraîner de l'air dans le mélange. Des échantillons en laboratoire du BCR sans air occlus sont testés conformément à la norme (ASTM-C666, 1997). Les résultats des tests montrent que les mélanges de BCR sans air entraîné se comportent mal contre les cycles de gel-dégel. D'autre part, les échantillons avec des adjuvants entraîneurs d'air démontrent une bonne durabilité au gel-dégel. L'entraînement d'air a été incorporé dans les mélanges de BCR pour les barrages de Zintel Canyon, Nickajack, Santa Cruz et Lake Robertson et d'autres (Adaska, 2006).

b- Résistance à l'abrasion et à l'érosion

La résistance à l'abrasion et à l'érosion du BCR dépend fortement de la résistance à la compression du BCR, de la qualité et de la taille maximale de granulats. Les tests d'érosion montrent un bon comportement de résistance à l'érosion pour le BCR. Il est déterminé que la résistance à l'abrasion du BCR augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression et de la taille maximale des granulats (Andriolo, 2018).

La méthode d'essai (ASTM-C944, 1999) pour la résistance à l'abrasion du béton est utilisable pour évaluer les performances d'abrasion du BCR.

I.4.1.6 Caractéristiques de la surface

La qualité de surface des revêtements en BCR peut être adaptée selon les différents types d'applications visées. Les exigences concernant la qualité de surface d'une chaussée ou d'un stationnement pour véhicule automobile ne seront pas les mêmes que celles pour un revêtement en BCR en milieu industriel.

- ***Texture de la surface finie***

L'essai de tache de sable permet de mesurer la texture de la surface d'un revêtement. Cet essai détermine la profondeur moyenne de la macrotecture de la surface (ASTM-E 965, 2006). Il consiste à appliquer un volume de sable connu (ou tout autre matériau fin normalisé) sur la surface et à mesurer la surface totale recouverte. La hauteur de sable correspond au rapport entre le volume de sable et la surface. Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, le texturomètre et la stéréoscopie. La

figure (I.7) illustre une texture de surface de BCR fermée, tandis que la figure (I.8) illustre un exemple de zone de ségrégation.



Figure I.7 : Texture fermée (Tiré du rapport du Service d'expertise en matériaux (S.E.M)).



Figure I.8 : Texture ouverte : ségrégation (Tiré du rapport du Service d'expertise en matériaux (S.E.M)).

L'état de la surface finie est fonction de plusieurs facteurs. La surface du revêtement peut être plus ou moins fermée selon les caractéristiques du mélange (granulométrie, volume de pâte, etc.). La ségrégation et les opérations de mise en œuvre influencent aussi la texture de la surface.

- *Uni de surface*

L'uni (confort au roulement) d'un revêtement en BCR a longtemps été un facteur limitatif pour des applications du BCR où la vitesse des véhicules était une caractéristique importante telle que pour les installations portuaires, les zones de triages et les cours de triage intermodales. L'uni d'une chaussée est estimé par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. L'uni d'une chaussée est affecté par les ondulations de profil, tant longitudinales que transversales, et par la longueur des dénivellations.

L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage. L'utilisation des finisseurs à haut pouvoir de compactage a permis d'améliorer significativement l'uniformité des revêtements en BCR (Gauthier & Marchand, 2004).

I.5 Méthodes de formulation du BCR

L'étude de la formulation du BCR consiste à définir les proportions massiques ou volumiques optimales des mélanges des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, pour pouvoir réaliser un béton dont les propriétés soient celles recherchées pour la construction routière.

Quelle que soit la méthode de formulation utilisée, les mélanges de BCR doivent généralement se conformer à certaines exigences, notamment :

- La teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre les propriétés mécaniques spécifiées à un coût minimum ;
- Le rapport E/C du mélange doit aussi être ajusté de manière à permettre une maniabilité optimale menant à l'obtention d'une densité in situ optimale avec le rouleau compacteur ;
- La teneur en eau du mélange doit être maintenue juste en dessous d'une certaine valeur à laquelle le passage du rouleau provoque des ondulations du béton à l'état frais, et

juste au-dessus d'un seuil où une consistance plus sèche du mélange produirait un accroissement de la ségrégation ;

- Les proportions entre les différentes classes granulaires doivent être fixées de sorte à atteindre la densité requise et à produire une surface fermée.

Les méthodes de formulation des BCR peuvent être classées en trois catégories distinctes : méthode empirique, méthode semi-empirique et méthode théorique. Selon le rapport (ACI-325, 2001) la méthode empirique est convient pour la formulation des mélanges de BCR destiné au corps routier, ce rapport présente cette méthode en deux procédures de formulation. La première est basée sur la recherche d'une limite de maniabilité alors que la seconde est reposée sur le principe de définir l'état le plus dense du mélange utilisant les concepts de la géotechnique. Les deux méthodes, peuvent être utilisées séparément pour les routes et pour les barrages.

I.5.1 Méthode basée sur les limites de maniabilité

Cette méthode de formulation de l'ACI s'applique à produire des mélanges de BCR visant à atteindre une limite de maniabilité. Les proportions du mélange de BCR sont déterminées en suivant une procédure en trois étapes (Marchand et al., 1997).

L'étape 1 consiste à réaliser une première série de gâchées d'essais de mélanges de mortier à différents rapports eau/ciment et à différents rapports sable/ciment afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chacun des mélanges, la masse volumique est mesurée. Comme montré à la figure (I.9), un rapport eau/ciment donné correspond à un rapport sable/ciment qui mène à une masse volumique optimale. La deuxième étape consiste à choisir le rapport E/C selon les propriétés mécaniques requises. La troisième étape est l'ajustement des proportions de granulats fins et grossiers afin d'obtenir la maniabilité voulue une fois les rapports E/C et sable/ciment déterminés (Marchand et al., 1997).

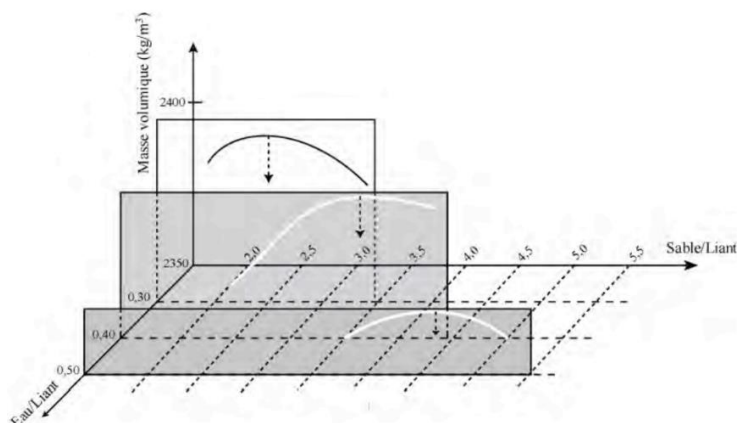


Figure I. 9 : Détermination du volume de pâte minimal (Marchand et al., 1997).

I.5.2 Méthode de formulation selon les principes de la géotechnique

Cette méthode du Comité 325.10R-95 de l'American Concrete Institute (ACI) repose sur une procédure de compactage des sols. Elle est basée sur la relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau du BCR. Cette méthode semble plus appropriée lorsque des granulats de petites dimensions sont employés et lorsqu'une forte teneur en matériaux cimentaires est utilisée (Marchand et al., 1997).

Premièrement, la proportion de granulats fins par rapport aux granulats grossiers est déterminée par les fuseaux granulométriques donnés à la figure (I.10). Ensuite, une série de mélanges de béton à différentes teneurs en liant sont réalisés. La quantité de liant peut varier entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. Pour chaque série (c'est-à-dire, pour une teneur en liant donnée), les mélanges sont réalisés à différentes teneurs en eau. La teneur en eau optimale doit être déterminée en suivant la méthode décrite à la norme (ASTM-D1557, 1991). Cette méthode permet de sélectionner la teneur en eau qui correspond à la masse volumique sèche maximale. Chaque échantillon de béton est compacté dans un moule cylindrique avec une énergie de compactage spécifique. La masse du volume de béton ainsi compacté est mesurée et la masse volumique sèche est calculée. La relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau est mise en graphique. Comme montré à la figure (I.11), la valeur maximale sur la courbe représente la teneur en eau permettant d'obtenir le mélange à masse volumique sèche optimale. Habituellement, la masse volumique humide varie très peu dans cette portion de la courbe. Par contre, la masse volumique sèche calculée est affectée sensiblement. Finalement, les essais de résistance à la compression sont réalisés sur les mélanges à teneur en eau optimale. Le mélange ayant la teneur minimale en liant et possédant les propriétés mécaniques requises est choisi (Marchand et al., 1997).

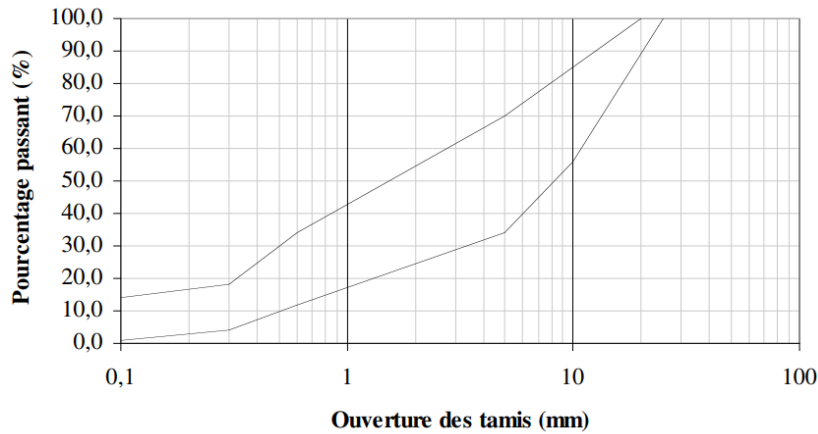


Figure I.10 : Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al., 1997).

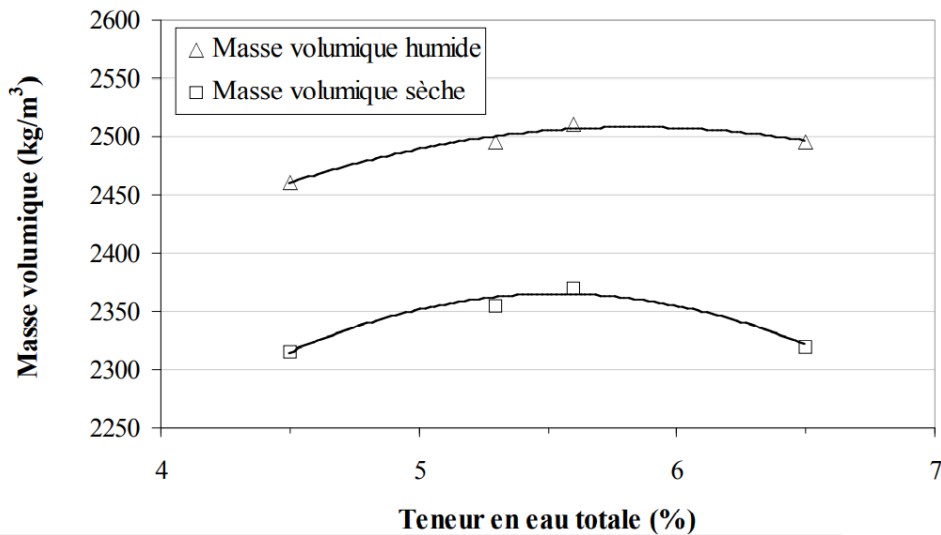


Figure I.11 : Courbes de Proctor (Gauthier & Marchand, 2001).

I.5.3 Autres méthodes de formulation du BCR

I.5.3.1 Méthode semi-empirique

Par définition, une méthode semi-empirique est basée à la fois sur des données expérimentales et sur quelques formules empiriques. Un exemple de méthodes semi-empiriques est celui du volume de pâte optimal. Les mélanges de BCR sont formulés en se basant sur un calcul de volume de pâte par rapport à un volume de vides. Cette approche requiert la réalisation de quelques gâchées d'essais en laboratoire (Marchand et al., 1997).

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que le mélange de BCR optimal devrait avoir juste assez de pâte pour remplir complètement les espaces intergranulaires restants lorsque le

squelette granulaire a atteint la densité maximale après compactage. Cette méthode de formulation est également basée selon une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après le compactage vont réduire les propriétés mécaniques et augmenter la perméabilité du béton. Par contre, une teneur en pâte excessive augmentera la chaleur d'hydratation de même que les coûts de fabrication sans une augmentation significative des propriétés physiques ou une diminution de la perméabilité (Gagné, 2000).

D'après Gagné (Gagné, 2000), cette méthode de formulation de BCR comporte trois étapes :

1. Déterminer les proportions des différentes classes granulaires afin de produire un mélange après compactage possédant un volume de vides minimal et de mesurer le volume des vides des granulats compactés par mètre cube;
2. Ajuster le dosage volumique de la pâte de manière à obtenir une maniabilité donnée;
3. Choisir le rapport entre l'eau et les matériaux cimentaires et les proportions de ciment et de pouzzolanes pour produire une pâte permettant de satisfaire aux exigences mécaniques.

I.5.3.2 Méthode théorique

Cette méthode consiste à minimiser la porosité ou maximiser la compacité du squelette granulaire de mélange de BCR en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (ciment, sable, graviers, graves,...). Elle est basée sur l'optimisation de la compacité à travers la porosité d'un empilement de grains de différentes tailles. Cette méthode théorique a l'avantage de prendre en considération l'influence de plusieurs paramètres sur le BCR à l'état frais et durci (Pouliot et al., 2001; Serdan et al., 1994).

Un logiciel de calcul "René LCPC", a été développé à cet effet. Sa configuration permet l'introduction et la correction rapide des proportions des constituants (ciment, granulats) de chaque mélange (Pouliot et al., 2001). Les données d'entrée requises pour chacun des constituants (le liant, les ajouts minéraux, les granulats fins et grossiers) sont la granulométrie, la densité et l'indice des vides. N'importe quel type de granulat peut être employé dans cette méthode de formulation à condition de connaître ces informations. Avec le modèle, on détermine alors le rapport optimum entre les granulats fins et grossiers pour une teneur en liant donnée ou pour un rapport eau/liant donné (Marchand et al., 1997).

I.6 Conclusion

A l'instar du béton plastique, le BCR est constitué de ciment, d'eau et de granulats grossiers et fins. Il possède cependant une structure interne particulière de par sa forte proportion de granulats et sa consistance très sèche.

Sa morphologie lui confère une durabilité et une dureté plus importantes que celles du béton plastique. La rapidité de mise en place, les faibles teneurs en ciment et l'utilisation d'ajouts minéraux (cendres volantes, fillers, calcaires, résidus miniers, etc.) en font un matériau économiquement très intéressant pour l'industrie de la construction.

Le choix et la nature des constituants d'un mélange de BCR doivent répondre à des exigences diverses (résistance mécanique, durabilité, etc....). Une attention particulière doit être apportée à la formulation.

II.1 Introduction

L'aridité se caractérise par un déficit pluviométrique presque permanent lié à une forte insolation, des températures diurnes élevées, une faible humidité de l'air et une évaporation qui conduit à des déficits hydriques pendant la majeure partie de l'année. Les zones arides et semi-arides se caractérisent par des extrêmes climatiques saisonniers et des tendances pluviométriques imprévisibles. C'est un phénomène climatique structurel qui se différencie de la sécheresse qui survient aussi bien dans les milieux arides que dans les milieux plus humides.

Le développement d'activités socioéconomiques dans ces zones nécessite une bonne connaissance des dynamiques de ces milieux, notamment les facteurs environnementaux qui sont en interaction avec les stratégies de mise en valeur. Parmi ces facteurs, la grande variabilité des conditions climatiques constitue sans doute la caractéristique la plus spécifique aux régions arides et semi-arides. En effet, la sécheresse y revient de façon systématique, mettant au second plan les autres contraintes au développement d'activités productives.

La littérature définit les zones arides et semi-arides en se fondant sur la caractérisation du climat (Fabricius et al., 2008; Mongi et al., 2010). Par exemple, Mongi et al (Mongi et al., 2010) considèrent les zones semi-arides comme des zones où le régime des précipitations annuelles se situe entre 500 et 800 mm. Fabricius et al (Fabricius et al., 2008) conceptualisent l'état d'aridité pour englober aussi bien les conditions d'aridité et de semi-aridité. Ils sont considérés également une grande partie de la zone sub-saharienne qui comporte 40 pays du continent comme ayant des conditions arides. Les zones arides et semi-arides présentent une forte évaporation puisque l'ensemble des facteurs favorables se trouvent réunis : une température de l'air souvent élevée pendant les saisons sèches et une forte insolation.

D'après l'UNESCO, les zones arides sont des zones sèches $P < 250\text{mm}$ (figure II.1) subdivisés en trois catégories : les zones hyper-arides, les zones arides et les zones semi-arides", pour l'établissement de la carte des sols du monde, la FAO (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) et l'UNESCO ont proposé l'indice d'aridité bioclimatique (tableau II.1) qui est donné par :

$$I = P/ETP \text{ (en mm par unité de temps),}$$

CHAPITRE II : CARACTERISATION DU CLIMAT CHAUD ET SON EFFET SUR LES PROPRIETES DU BETON

Où : P : précipitations annuelles ; ETP : évapotranspiration potentielle c'est à dire quantité d'eau prélevée sur une nappe d'eau libre par l'évaporation + transpiration du couvert végétal non limitée par la disponibilité en eau du sol.

Tableau II.1: Indice d'aridité bioclimatique des écosystèmes secs (Source : Encarta, 2005)

Ecosystème	Indice d'aridité bioclimatique
hyperaride	$P/ETP < 0,03$
Aride ou désertique	$0,03 < P/ETP < 0,2$
Semi-aride ou sahélien	$0,2 < P/ETP < 0,5$
Sub humide sec ou sahélo-soudanien	$0,5 < P/ETP < 0,7$

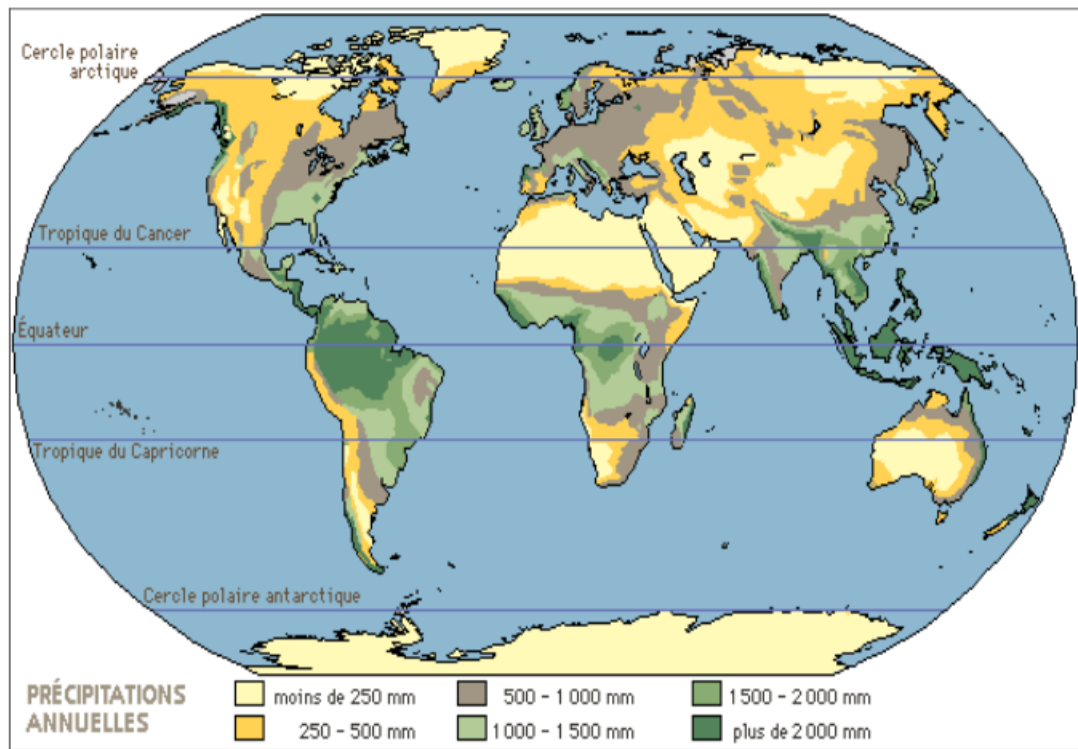


Figure II.1 : Précipitations annuelles dans le monde (Source : Encarta, 2005).

II .2 Définition du climat chaud

Par définition le temps chaud est défini comme la combinaison des facteurs climatiques qui sont : la température élevée de l'air, la faible humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire, qui tend à détériorer la qualité du béton frais ou durci en accélérant l'évaporation et la vitesse de l'hydratation du ciment et conduit à des propriétés de durabilité amoindries (ACI-305R-10, 2010).

Le temps chaud peut être défini comme toute période à température élevée, dans laquelle des précautions doivent être prises en compte pour assurer un bon malaxage, transport et durcissement du béton. Les problèmes de temps chaud sont plus fréquemment rencontrés courant de l'été, mais il existe d'autres facteurs climatiques associés comme les grands vents, faible humidité relative et le rayonnement solaire qui peuvent se produire à tout moment, en particulier dans les climats arides ou tropicaux. Les conditions de temps chaud peuvent produire un taux rapide d'évaporation de l'humidité de la surface du béton (Mouret, 1997).

Berhane (Berhane, 1992) décompose les climats chauds en trois groupes, en se basant sur les humidités relatives (HR) moyennes des régions concernées :

- Climat chaud et humide ($HR \geq 85\%$),
- Climat chaud à humidité modérée ($50\% < HR < 65\%$),
- Climat chaud et sec ($HR < 40\%$).

II.3 Facteurs du climat chaud

L'environnement de l'Algérie connaît de grandes fluctuations quotidiennes de température et d'humidité ainsi que des vents persistants. Les figures II (2 et 3) représentent les variations de la température et les précipitations moyennes mensuelles et annuelles durant la période de 1988 à 2008 dans la région du M'sila (Source : Office National de la Météorologie ; O.N.M).

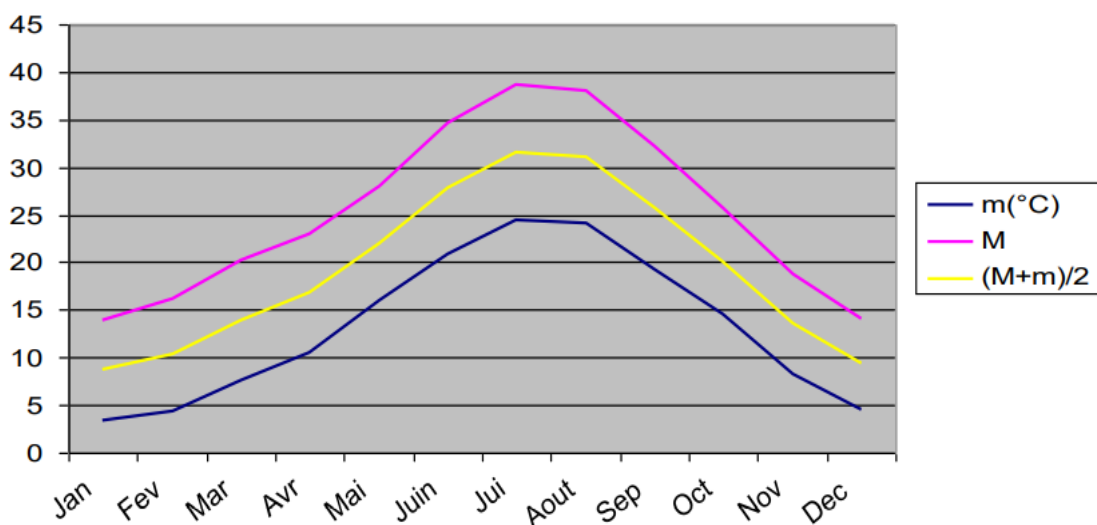


Figure. II.2 : Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de M'sila pour la période (1988 – 2008) « Source : O.N.M. ».

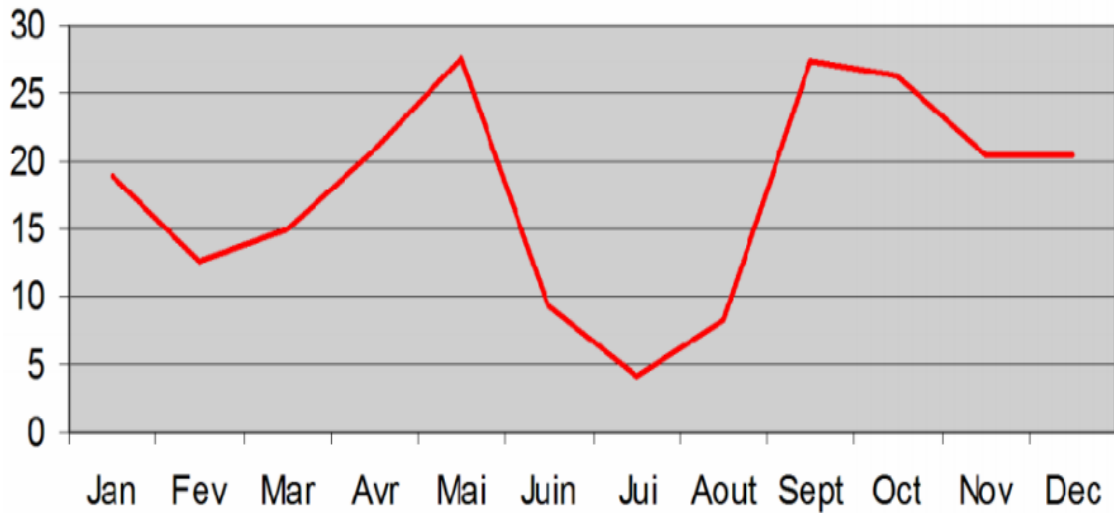


Figure II.3 : Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) pour la période (1988 – 2008) «Source : O.N.M».

Les conditions climatiques ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la préparation du béton, puis pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

II.3.1 La température

Les températures élevées sont le milieu favorable à l'évaporation de l'eau du béton et à sa dessiccation. Elles ont également pour effet d'accélérer la prise et le durcissement. Cet affaiblissement mécanique avec l'évaporation de la température à de plus importantes variations journalières peut induire des contraintes thermiques non négligeables, particulièrement nuisibles durant l'amorce de durcissement (Mouret, 1997). La température en l'Algérie est souvent à 35 °C dans les zones côtières et plus dans le sud qui peut atteindre 50°C durant les mois de mai, juin, juillet et août (les mois les plus chauds de l'année). La température maximale moyenne en été peut s'élever à 45 °C, tandis que le moyen varie de minimum de 25 à 35 °C. Lorsque cette température ambiante élevée est associée à environ 11 heures de soleil direct, il est compréhensible que la température de surface du béton et le coffrage puisse être beaucoup plus élevée (Al-Amiri, 1988).

II.3-2 Humidité relative

La notion d'humidité relative (HR), que l'on définit comme la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à une

température et une pression données. L'humidité relative varie de 0 à 100%.

Des changements radicaux de la température de l'air sont accompagnés par des modifications majeures de l'humidité relative. L'évaporation est d'autant plus forte que cette humidité est faible ; c'est la quantité d'eau que peut théoriquement absorber un béton pour atteindre sa saturation, ou sa capacité restante d'absorption d'eau de l'air. Si la faible humidité relative par temps chaud et sec est susceptible d'entraîner une perte excessive d'eau du béton frais, il faut également se préoccuper dans quelle plage elle peut varier. En effet, d'importantes variations journalières de l'humidité relative sont à l'origine de cycles condensation-séchage pour les surfaces exposées du béton. Cela a des conséquences sur sa durabilité (Mouret, 1997).

II.3.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques. La température de l'air dépend directement du rayonnement solaire en absence de nébulosité et de pluie. Dans ce cas, le rayonnement direct va provoquer l'élévation de la température des matériaux de base stockés (ciment, granulat et eau). L'ensoleillement induit également à l'élévation de la température des coffrages et des cages d'armatures et le site lui-même, dans lequel se déroule le chantier s'est fortement réchauffé. Il en résulte une augmentation de température du béton frais. Après la mise en place et le serrage du béton, le rayonnement solaire direct conduit à une évaporation rapide de l'eau des surfaces exposées et fait surgir un risque de fissuration par retrait plastique, ce qui nécessite un mode de cure rigoureux. Par temps chaud, la nébulosité et la pluie diminuent l'effet du rayonnement solaire puisqu'elles en absorbent une partie. En termes de conditions ambiantes, il s'ensuit la diminution de la température et l'augmentation de l'humidité relative. Cela a pour effet de limiter l'évaporation (Mouret, 1997).

II.3.4 Evaporation

Chaque facteur décrit auparavant et pris isolément, contribue à l'évaporation. L'action conjuguée de ces facteurs ne fait donc qu'amplifier ce phénomène et c'est la raison pour laquelle il faut les considérer dans leur ensemble. C'est cet ensemble qui définit le temps, mais surtout son évolution : les changements, tels que la brusque arrivée du vent avec une forte chute de température, sont particulièrement importants. Ce sont des situations météorologiques critiques qui peuvent survenir en été, de juin à septembre dans nos régions.

CHAPITRE II : CARACTERISATION DU CLIMAT CHAUD ET SON EFFET SUR LES PROPRIETES DU BETON

L'évaporation est le paramètre préoccupant lors du bétonnage par temps chaud. L'évaporation est la conversion de l'eau, de l'état liquide à l'état gazeux, à une température inférieure au point d'ébullition, et sa diffusion dans l'atmosphère. Elle se produit lorsque la surface de l'eau est exposée à un air non saturé. Dans le cas du béton frais, la surface d'eau est créée par le phénomène de ressuage (Mouret, 1997). L'effet combiné de la température, de l'humidité relative et du vent, est généralement estimé par l'abaque présenté sur la figure (II.4). Cette dernière permet de déterminer et d'évaluer un débit d'évaporation de l'humidité superficielle d'un béton (en $\text{kg/m}^2/\text{h}$), connaissant la température ambiante et celle du béton, l'humidité relative de l'air ainsi que sa vitesse de renouvellement. De cet abaque et de l'expérience, il est reconnu qu'à partir d'un débit d'évaporation de $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$, des précautions sont à prendre pour éviter les risques de fissuration plastique.

Le climat de l'Algérie est varié, car le pays a une très grande superficie: la partie nord possède un climat méditerranéen, alors que le reste du pays possède en majorité un climat désertique. Cependant entre ces deux grands types de climats, existent des climats de transition, notamment le climat semi-aride qui est correspond à un climat méditerranéen avec une sécheresse ne se limitant plus uniquement à la saison estivale mais à une bonne partie de l'année mais aussi un climat méditerranéen aux influences montagnardes, un petit plus continental. Néanmoins, l'Algérie est un pays où le climat dominant est chaud et sec.

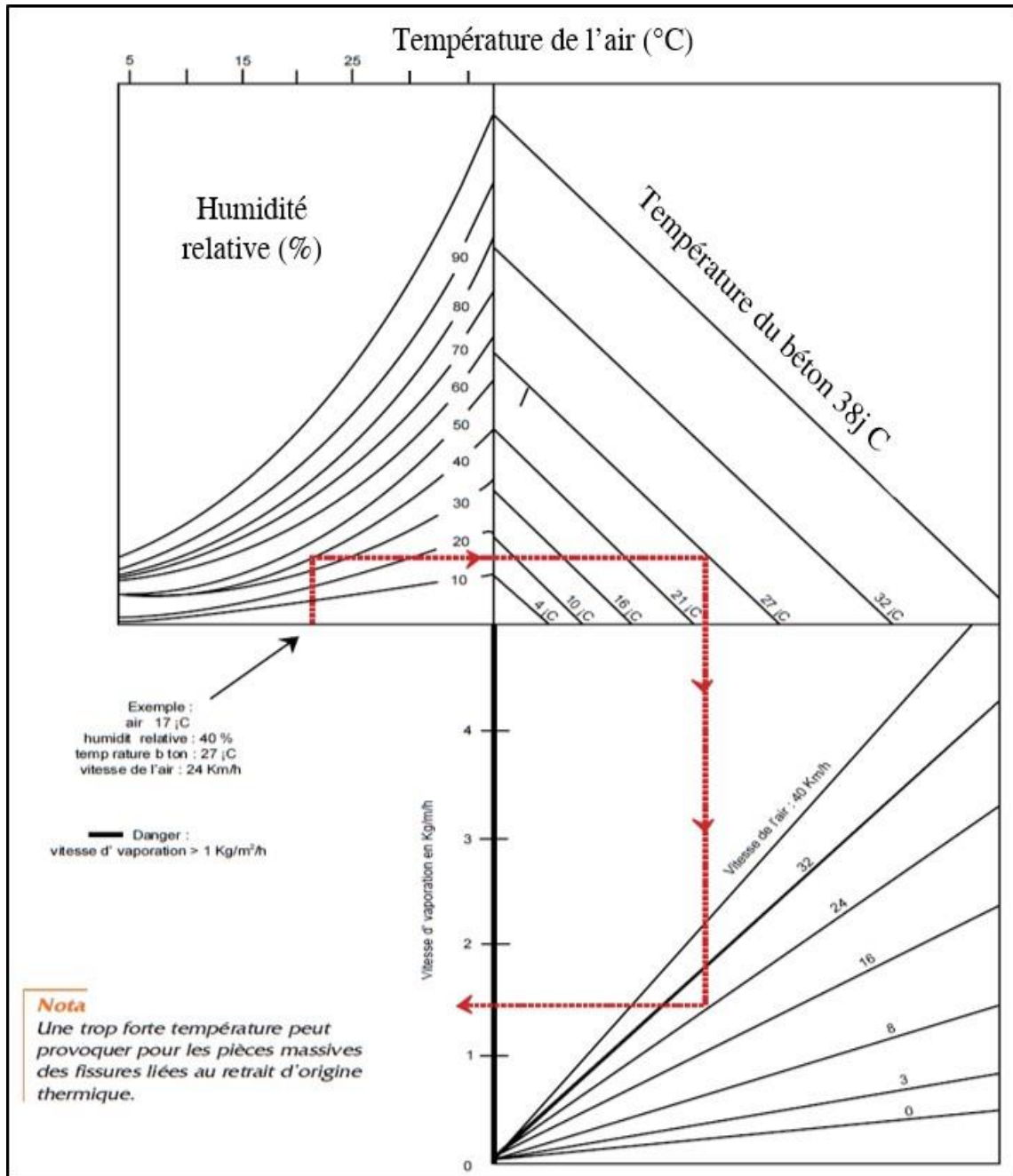


Figure II.4 : Vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton) (ACI-305R-10, 2010).

II.4 Effet du climat chaud sur les propriétés du béton

II.4.1 A l'état frais

II.4.1.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité de béton est la propriété essentielle qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage, mais également ses performances à l'état durci. L'ouvrabilité est un facteur très important qui regroupe plusieurs caractéristiques du béton frais telles que la consistance, l'étalement, la capacité d'écoulement, le pompage, la mobilité qui facilite la mise en place dans le coffrage et qui conditionne aussi les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Dans le domaine des liants hydrauliques, l'ouvrabilité désigne l'aptitude plus ou moins grande d'un béton ou d'un mortier en état liquide, à remplir de façon homogène et sans défauts les vides des coffrages. Elle est en fonction d'une multitude facteurs et donne lieu à des recettes spécifiques de formulations en fonction de l'ouvrage à construire avec l'emploi de granulats et d'adjuvants sévèrement dimensionnés et sélectionnés. Une des grandeurs définissant l'ouvrabilité est la consistance. L'ouvrabilité dépend de plusieurs paramètres : la quantité d'eau, la qualité des granulats et la grosseur des grains. L'ouvrabilité du béton peut être évaluée par le cône d'Abrams, la table à choc, le Vebe et la maniabilité LCPC. La maniabilité est caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams. L'optimisation d'une composition du béton permet d'ajuster le dosage des constituants et surtout le rapport E/C pour une consistance visée. Ce sont des essais d'étude effectués au laboratoire à 20°C. Lorsque la température augmente, elle conduit à une augmentation de la température du béton frais. Cette élévation de température conduit à une accélération du processus d'hydratation qui rend le béton plus fermes dès les premiers instants de sa confection. L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment, en fonction de son dosage et sa chaleur massique (Mamillan et al, 1989) :

- Une augmentation de 10°C du ciment élève de 1°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C de l'eau élève de 2°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C des granulats élève de 7°C la température du béton (Figure II.5).

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées.

CHAPITRE II : CARACTERISATION DU CLIMAT CHAUD ET SON EFFET SUR LES PROPRIETES DU BETON

(Mamillan et al, 1989) ont montré qu'une augmentation de 11°C de la température du béton entraîne une réduction de l'affaissement de 25 mm et la quantité d'eau afin de compenser cette réduction augmente d'autant plus que la température du béton est plus élevée (Figure II.6). Aussi elle entraîne une augmentation de la demande en eau 6.5l/m³. Lorsque la température ambiante augmente, conduisant à une augmentation de la température du béton frais. De ce fait, la quantité d'eau doit nécessairement être augmentée pour maintenir un affaissement donné.

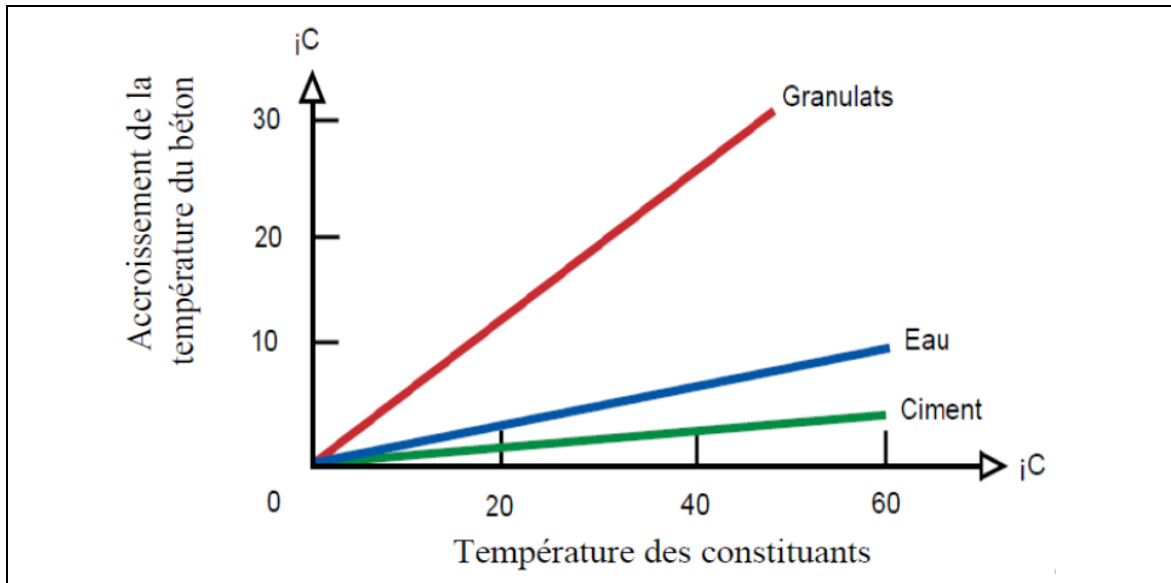


Figure II.5 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants (Mamillan et al, 1989).

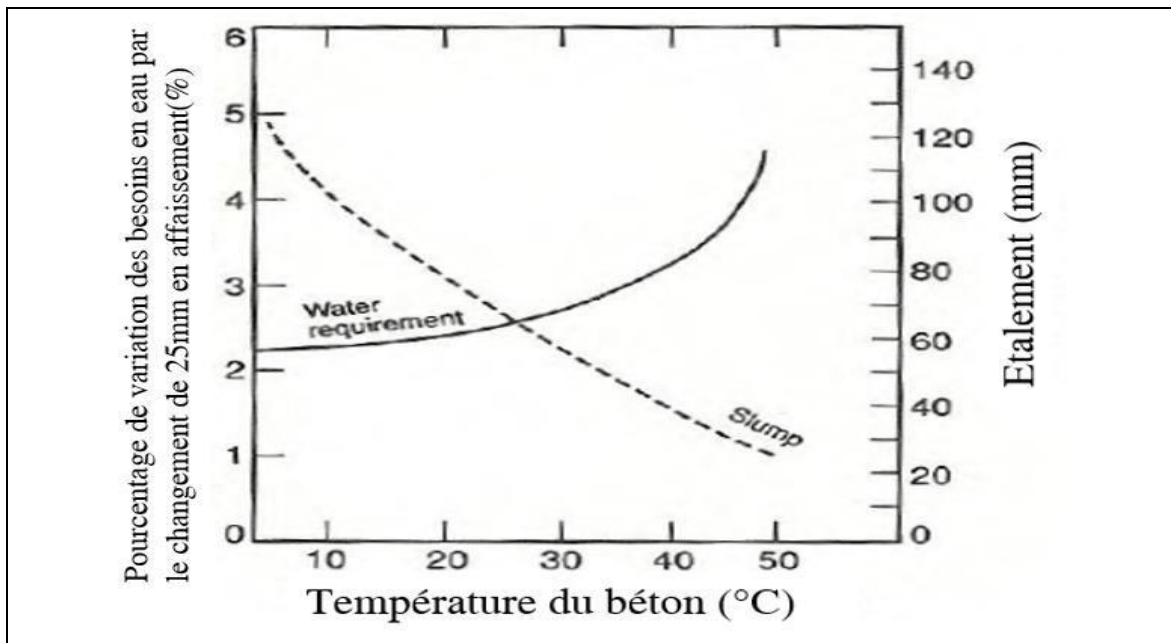


Figure II.6 : Effet de la température du béton sur l'affaissement et la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25mm (Mamillan et al, 1989).

Hampton, (Hampton, 1981) montre que l'élévation de la température ambiante de 22°C à 32°C entraîne une perte de l'affaissement et contribue à l'élévation de la température du béton, quelle que soit la gamme de consistance étudiée (Figure II.7).

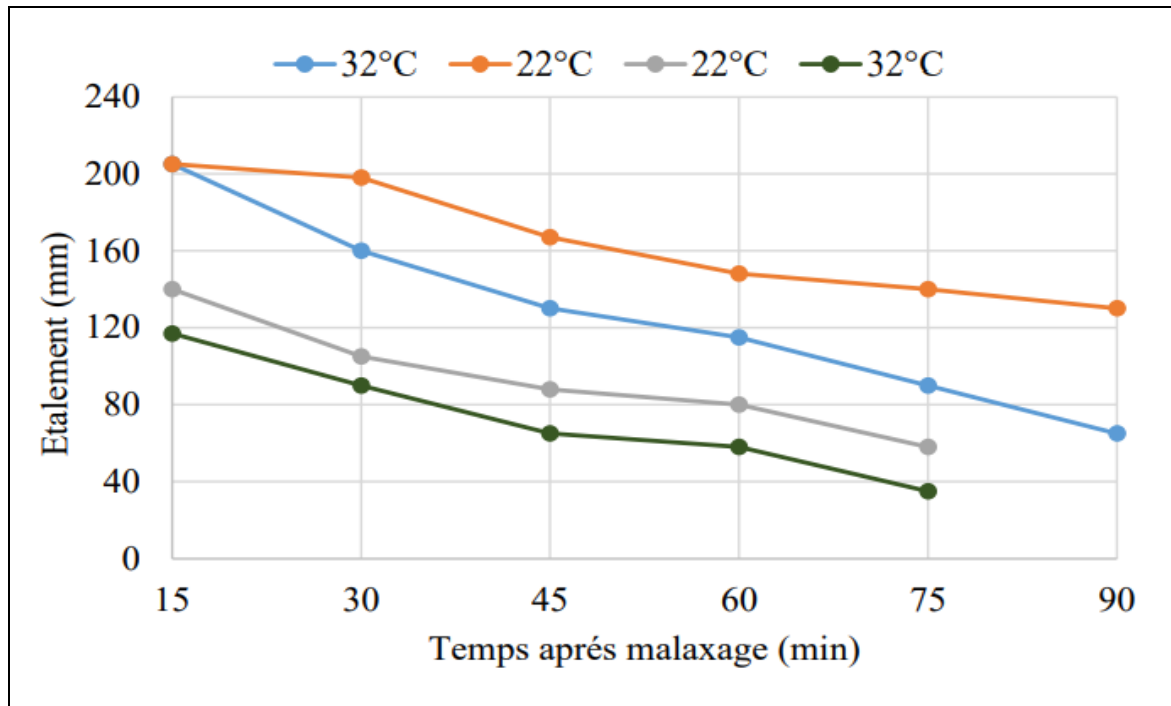


Figure II.7: Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C (Hampton, 1981).

II.4.1.2 Temps de prise

C'est le temps de cohésion de la pâte de ciment et le passage de l'état frais à l'état solide. Lors de ce passage on distingue deux repères : le temps de début de prise et le temps de fin de prise. Ces repères sont déterminés à l'aide de l'essai de Vicat.

Par temps chaud, l'élévation de la température du béton a pour effet de diminuer le temps de début et de fin de prise, et donc réduire la période pendant laquelle le béton peut être mis en œuvre. Donc les réactions chimiques entre le ciment et l'eau sont thermo-activées. Sa vitesse est plus rapide lorsque la température s'élève (Figure II.8) (Mouret, 1997).

Ahmadi (Ahmadi, 2000) a observé que lorsque la température augmente, il y aura une diminution dans le temps initial de prise du béton. Avec l'augmentation de l'humidité sur le terrain, le temps de prise initial de béton augmente. L'augmentation de la vitesse d'air sur le terrain, implique une diminution du temps de prise initiale du béton (Figure II.9). L'auteur rapporte des effets similaires de temps de fin de prise à ceux de temps de prise initiale du béton (Figure II.10).

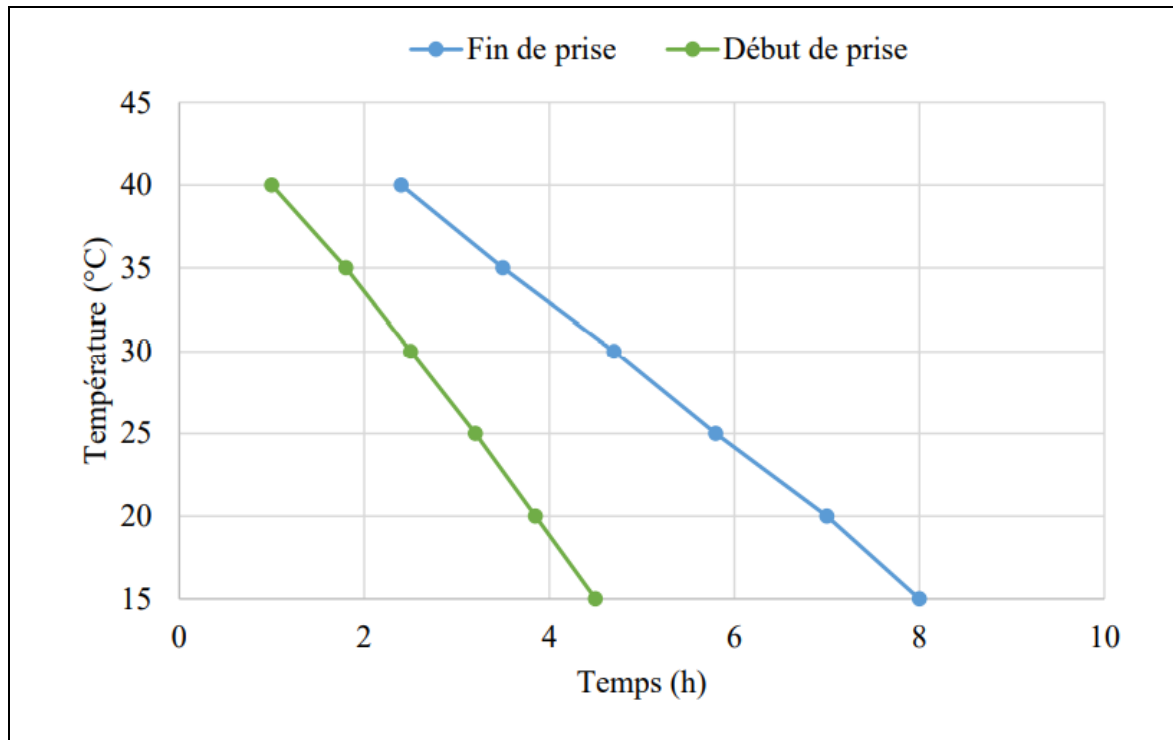


Figure II.8 : Effet de la température sur le temps de début et fin de prise (Mouret, 1997).

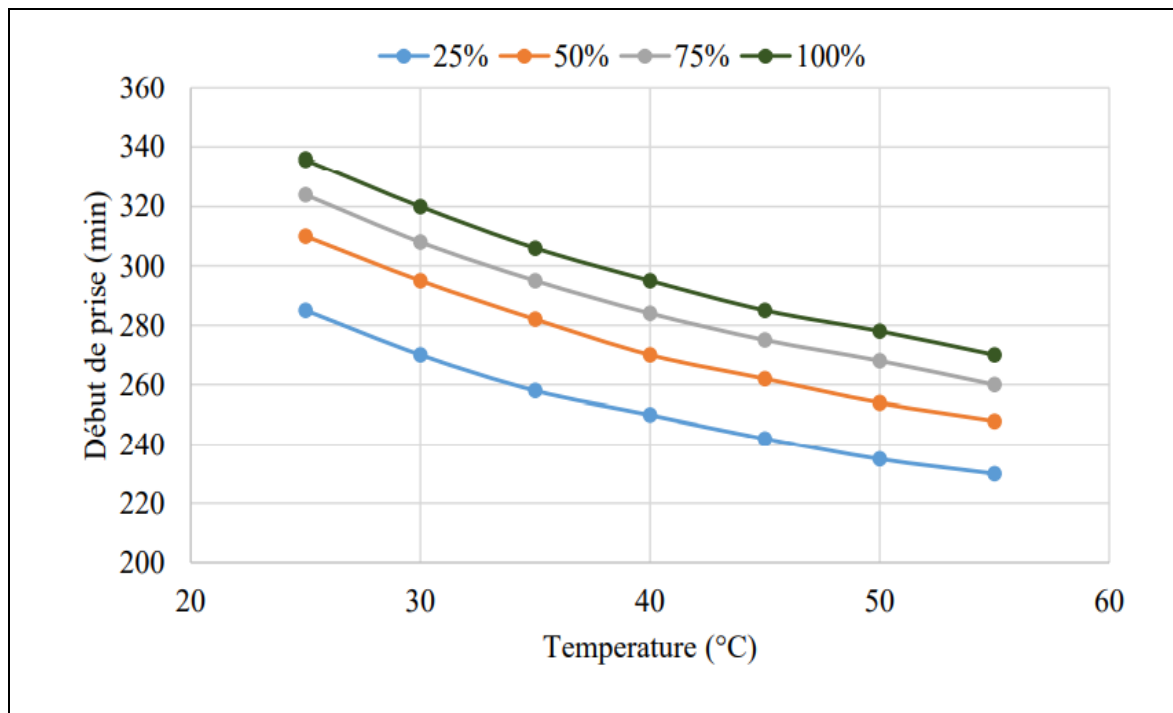


Figure II.9: Effet de la température sur le temps de début de prise (Ahmadi, 2000).

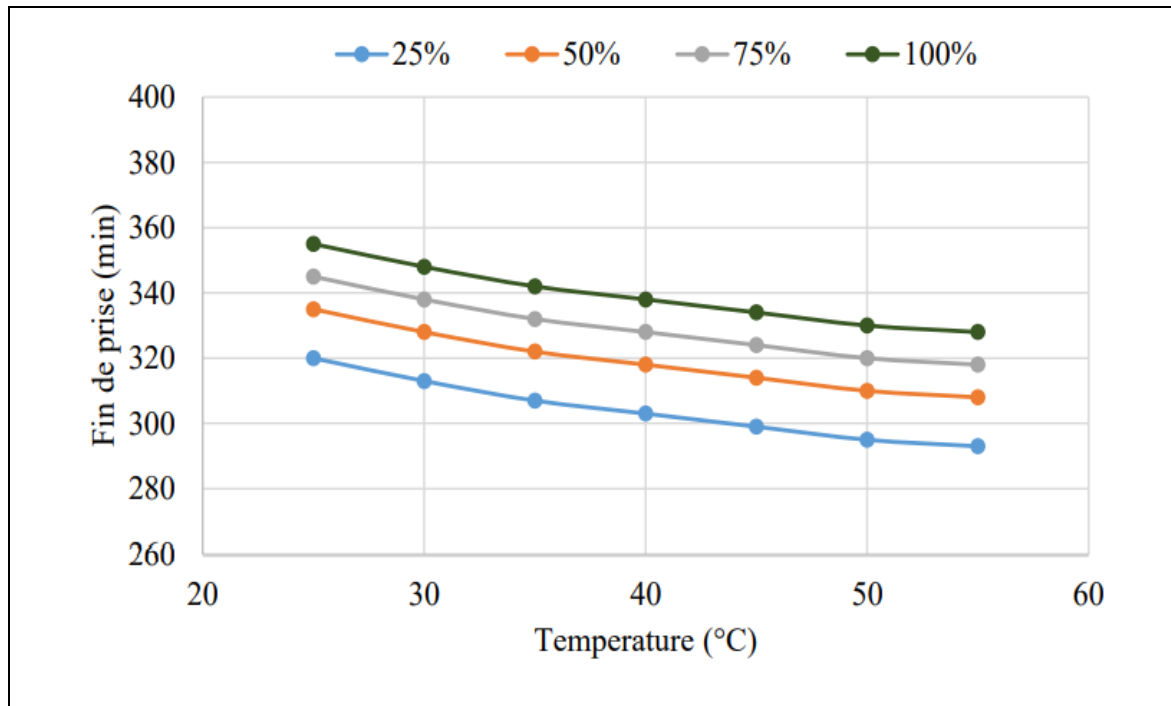


Figure II.10: Effet de la température sur le temps de début de prise (Ahmadi, 2000).

II.4.2 A l'état durci

II.4.2.1 Résistance à la compression

La résistance du béton dépend de plusieurs paramètres tel que la pâte de ciment, les granulats, la liaison pâte granulat et la concentration granulaire dans le béton. (Mouret, 1997) a montré que dans un béton ordinaire, les propriétés mécaniques des granulats sont supérieures à celle de la pâte de ciment. La résistance du béton dépendra de la résistance de la pâte et sa liaison au granulat. La pâte de ciment est liée à sa structure poreuse, ses propriétés dépendent du rapport E/C et du degré d'avancement des réactions d'hydratation.

Selon (Soroka & Ravina, 1998), la température élevée et le possible départ d'eau par évaporation selon la valeur de l'humidité relative exercent des actions opposées sur les propriétés mécaniques du béton, dès le jeune âge. (Ramezani pour & Malhotra, 1995) ont observé que le gain de résistance initiale obtenu par les bétons durcis à 38 °C et 65% d'humidité relative en comparaison avec celle des bétons durcis sous cure humide ne sont pas maintenus à long terme. Les résistances à la compression à 180 jours sont significativement plus faibles que la résistance des bétons durcis dans une cure humide (Figures II. (11-14)). L'absence de durcissement du béton dans une cure humide affecte négativement sa résistance à la pénétration des ions de chlore et cela affecte sa résistance à la compression.

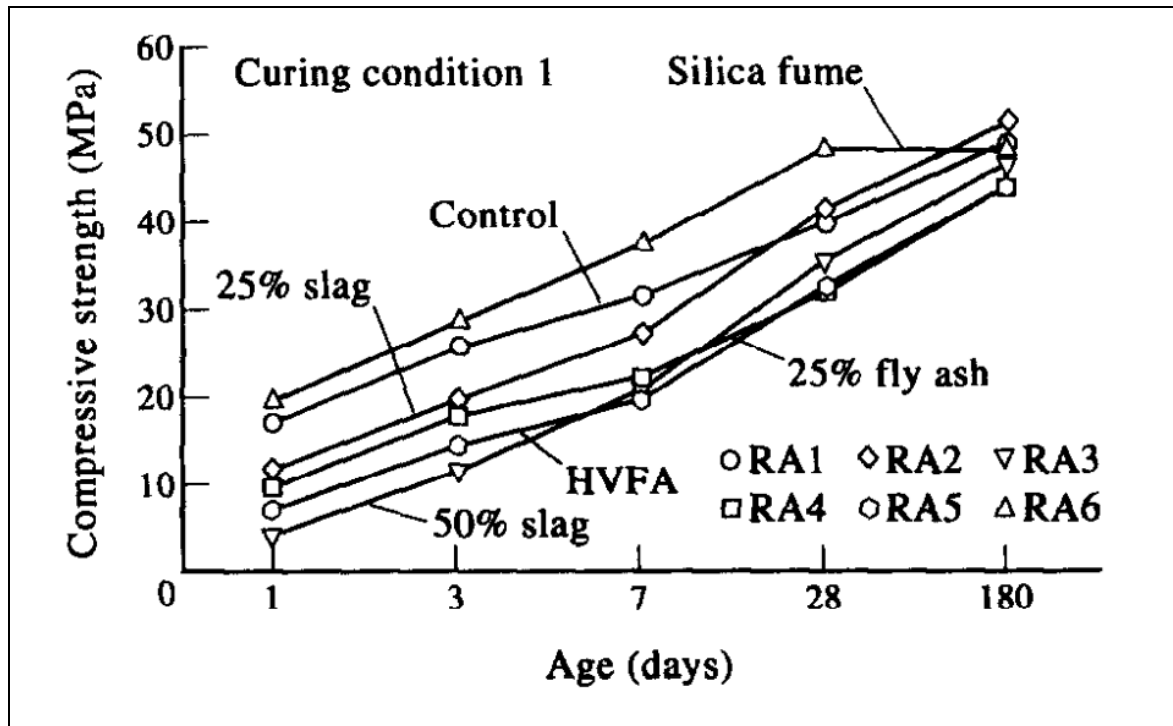


Figure II.11 : Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide (Ramezaniapour & Malhotra, 1995).

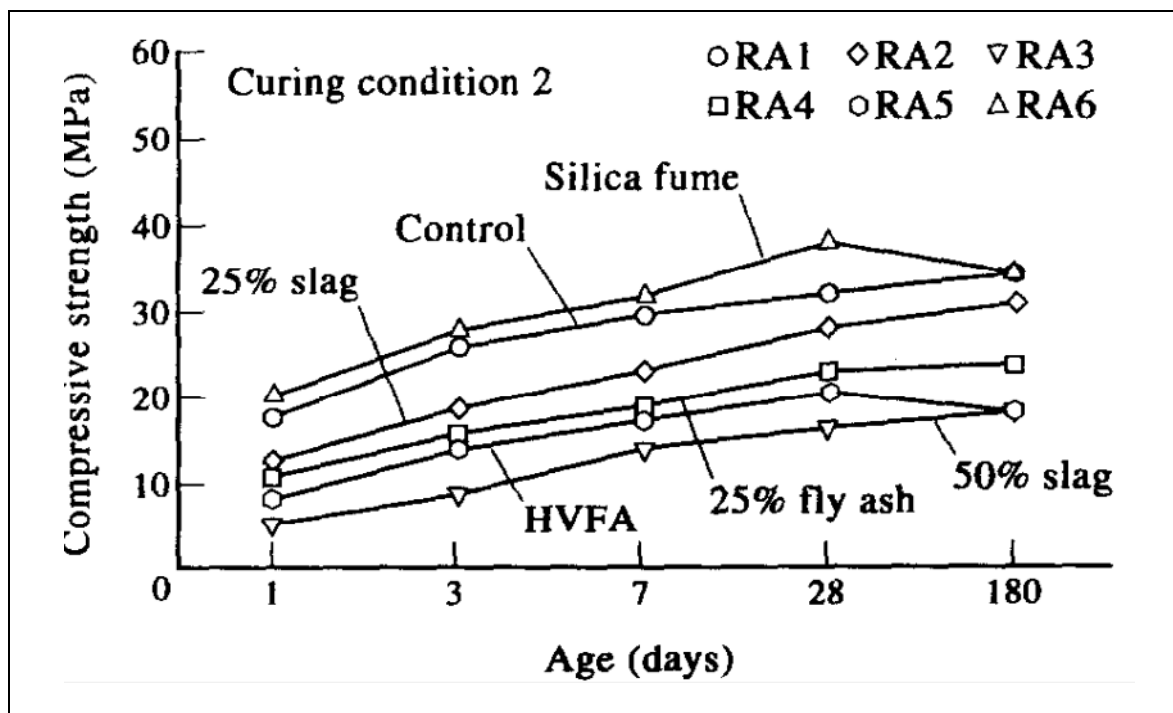


Figure II.12: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage (Ramezaniapour & Malhotra, 1995).

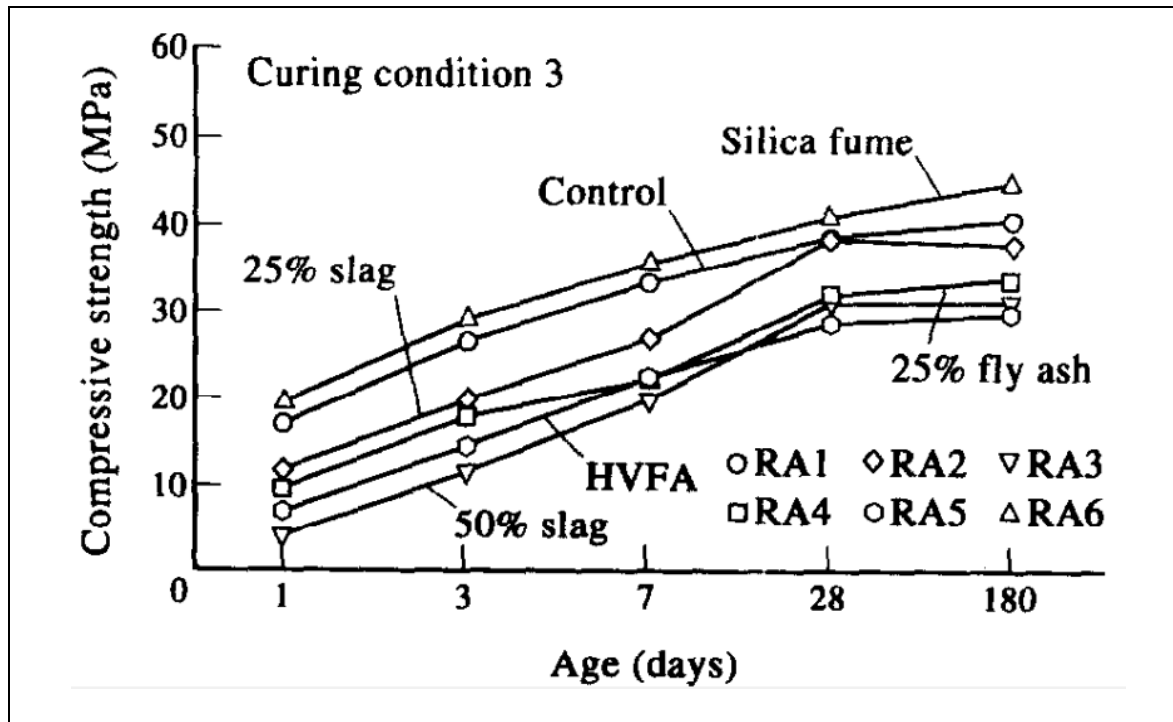


Figure II.13: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide (Ramezani pour & Malhotra, 1995).

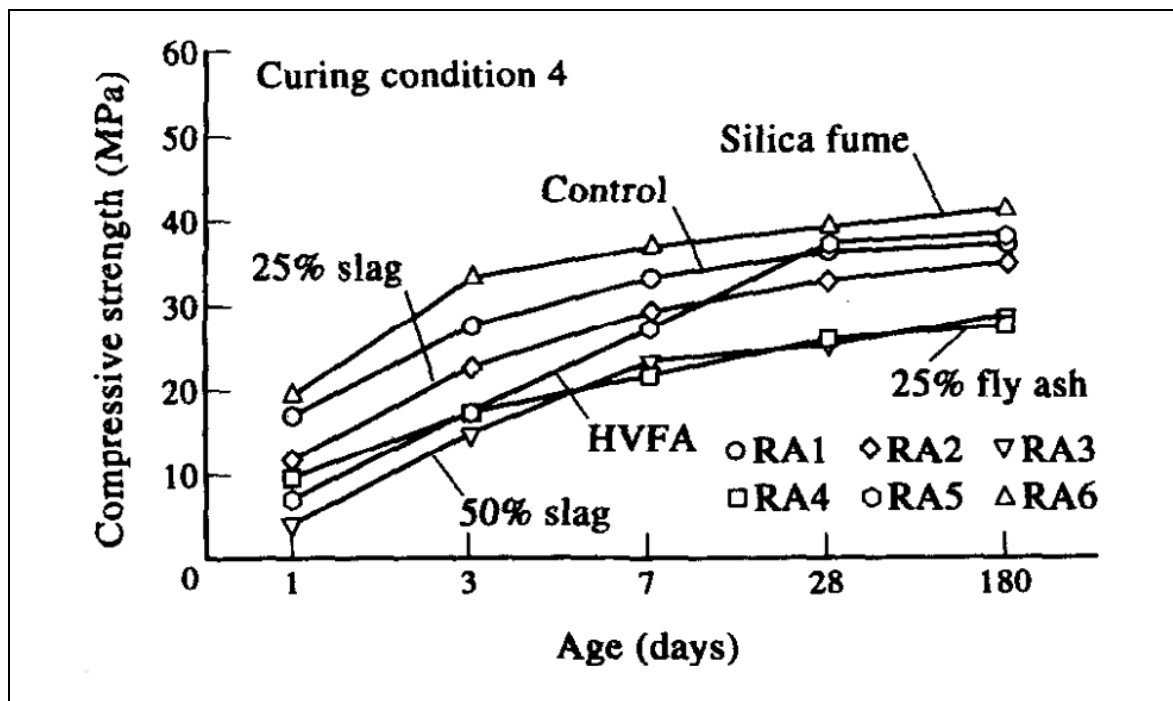


Figure II.14: Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité (Ramezani pour & Malhotra, 1995).

Shoukry et al (Shoukry et al., 2011) ont montré un effet similaire de l'effet de l'augmentation de température qui donne une réduction de la résistance du béton à la compression, à la traction ainsi que le module d'élasticité correspondant (Figure II.15). La cure du béton provoque une augmentation de résistance à la compression du béton, à la traction et le module d'élasticité correspondant (Figure II.16). Il est recommandé lors de la conception des structures en béton de prendre en compte la variabilité des propriétés du béton avec les variations de température et d'humidité qui pourraient influencer sur le comportement structurel, la résistance et la rigidité.

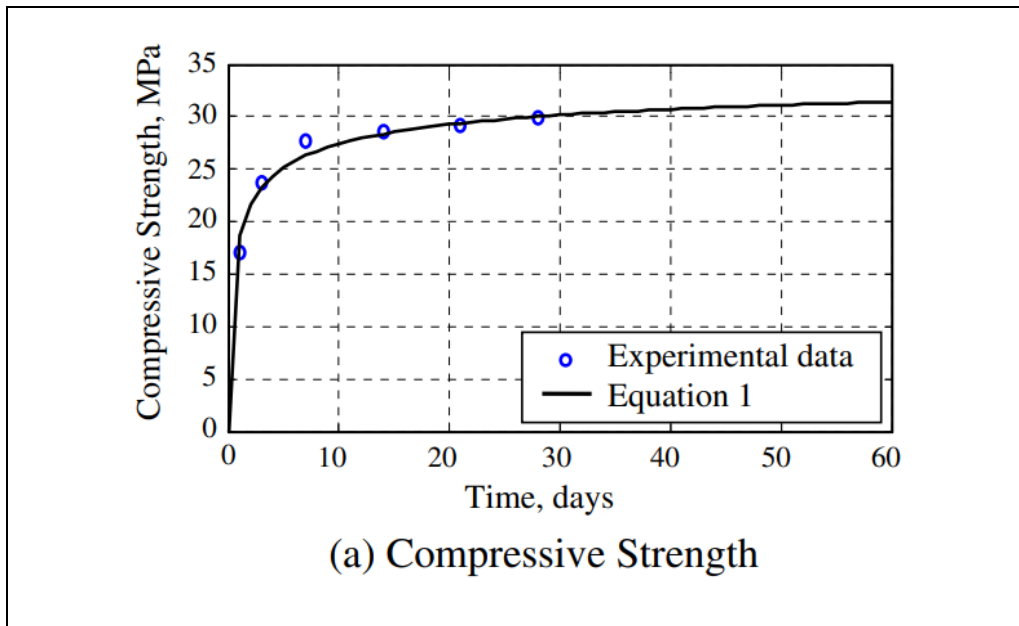


Figure II.15 : Gain de la résistance à la compression (Shoukry et al., 2011).

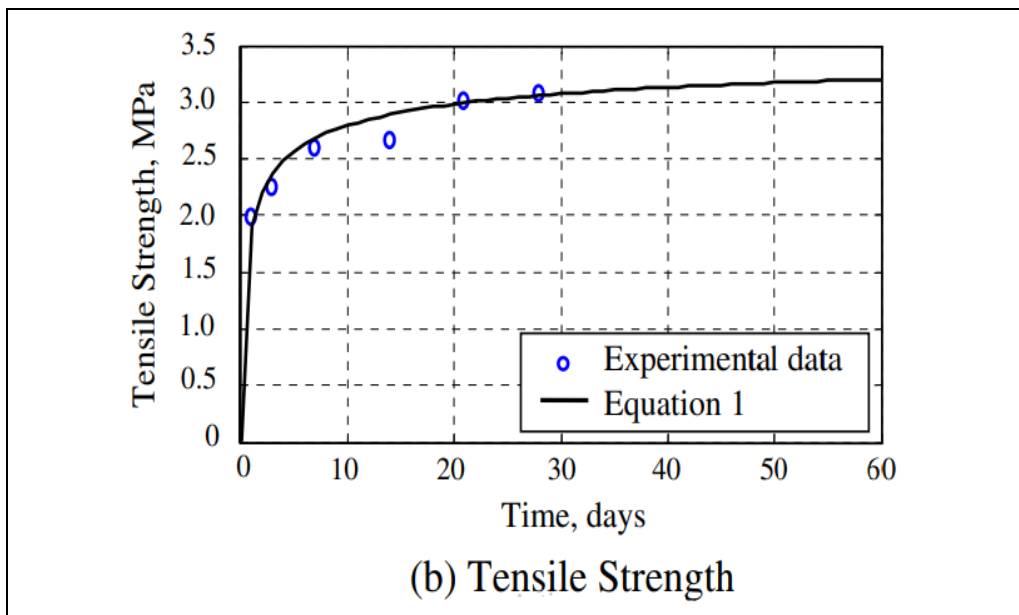


Figure II.16: Gain de la résistance à la traction (Shoukry et al., 2011).

D'après (Al-Ani & Al-Zaiwary, 1988), le retard de cure du béton par temps chaud a un effet négatif sur la résistance à la compression, et le premier jour de retard de cure a le plus grand effet. La cure initiale est plus efficace pour les bétons avec un dosage de ciment élevé. Une période minimale de cure de 3 jours est suffisante par temps chaud, tandis qu'une période de cure minimale de 7 jours est nécessaire pour le béton avec faible teneur en ciment.

II.4.2.2 Retrait plastique

Le retrait du béton est défini comme une déformation volumique du matériau, au cours de son durcissement, induite par des phénomènes physicochimiques liés à l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage. A l'état frais, le retrait plastique se manifeste suite à une évaporation trop rapide de l'eau du béton entraînant ainsi, quelques heures après le décoffrage, des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à $1\text{kg/m}^2/\text{h}$. elle est d'autant plus importante que (ACI 305, 2010) :

- La température ambiante est élevée,
- La température du béton augmente,
- L'air est sec.

Le retrait plastique, appelé aussi retrait avant prise ou retrait capillaire, est une déformation qui se manifeste tant que le béton est plastique, à un moment où la pâte est encore déformable. Donc avant et/ou pendant la prise et sous l'effet d'une dessiccation ou d'une auto-dessiccation; une fissuration à la surface externe de l'ouvrage peut se former après le placement ou durant la finition. L'importance du retrait plastique est influencée par la vitesse de dessèchement qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Les fissures apparaissent dans le béton lorsque le retrait empêché dépasse sa capacité de déformation. Une grande partie des bétons est destinée aux applications horizontales comme les dalles, d'où un faible rapport volume sur surface et donc un retrait plastique élevé.

Selon Al-Amoudi et al (Al-Amoudi et al., 2004), le retrait plastique augmente avec l'augmentation du dosage de la fumée de silice de (5%, 7,5% et 10% en poids de ciment).

Asamoto et al (Asamoto et al., 2011) montrent que la fissuration qui est due au retrait peut être accélérée par le rayonnement solaire qui favorise le séchage de la surface du béton et diminue le degré d'hydratation. L'application de la cure humide diminue le retrait

plastique des bétons. La différence entre la température du béton frais et la température ambiante provoque l'augmentation de ce dernier (Nasir et al., 2017).

II.4.2.3 Absorption capillaire

(Kockal & Turker, 2007) ont montré que les coefficients de capillarité sont très élevés pour les bétons conservés dans un environnement naturel pour tous les taux de substitution en laitier et cendres volantes. (Tasdemir et al., 1996) a étudié les effets combinés des additions et des conditions de cure sur la sorptivité et la résistance à la compression du béton de CEMII 42.5. Il a évalué le coefficient de sorptivité pour des bétons contenant des ciments avec les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et la fumée de silice (SF). Il a aussi étudié le coefficient de sorptivité et la résistance à la compression des bétons avec CEMII 32.5. Il a prouvé que les additions minérales sont bénéfiques pour l'augmentation de la résistance et la réduction de l'absorption capillaire.

II.5 Conclusion

Ce chapitre contient deux parties, la première partie met en évidence la notion d'aridité, de climat chaud, en plus des caractéristiques du climat dans les zones arides.

La deuxième partie mis en évidence que le temps chaud est apparu comme étant un phénomène complexe par le nombre important de facteurs climatiques à considérer. La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts d'agents agressifs et les mouvements d'eau à l'intérieur d'un réseau poreux. Les recherches ont rapporté qu'un béton contenant des additions minérales de type laitiers, cendres volantes ou fumée de silice conduit à une porosité plus fine et cause du développement de réaction pouzzolanique des additions.

III.1 Introduction

Le choix et la nature des constituants d'un mélange de BCR doivent répondre à des exigences diverses (résistances mécaniques, durabilité, résistances aux chocs thermiques) selon les caractéristiques mécaniques du produit fini exigés.

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux. Le choix de ces matériaux pour mener cette recherche, a été basé sur de nombreuses recherches menées sur eux, qui ont montré qu'ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques et physiques.

Le présent chapitre présente dans sa première partie, les résultats d'identification des matériaux utilisés pour la préparation des différents mélanges. La méthodologie suivie pour déterminer les différentes composantes des mélanges fait l'objet de la deuxième partie.

En fin, les techniques expérimentales suivies pour le malaxage et la fabrication des éprouvettes de BCR sont également présentées et discutées.

III.2 Identification des matériaux

III.2.1 Sable

Le sable utilisé est un sable de dune d'une taille maximale de 3 mm avec une densité de 2,64 g/cm³ de la région de Boussaâda en Algérie. Il est largement utilisé dans les hauts plateaux et le sud de l'Algérie dans les secteurs de la construction et des transports. Le sable de Boussaâda ne contient pratiquement pas de traces d'argile, ce qui permet de dire que ce sable est propre et que les propriétés d'adhérence et de plasticité de l'argile ne font pas craindre. Il a également une limite de liquidité WL d'ordre 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de bleu est de l'ordre de 0.1. Les caractéristiques physiques du sable sont groupées dans le tableau (III.1).

La composition chimique de ce sable montre qu'il est composé principalement de silice (tableau III.2). L'analyse granululaire a révélé plus de 50 % des grains de sable ont un diamètre compris entre 0.125 et 0.315 mm, avec un module de finesse de 2.23, la distribution granulométrique de ce sable est montrée à la figure (III.1).

**CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISÉS, FORMULATION
ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES**

Tableau III.1: Caractéristiques physiques du sable

Propriétés	Symbole	Valeur
Module de finesse	Mf	2.23
Equivalente de sable	E.S (%)	71
Masse volumique apparente	ρ (g/cm ³)	1.57
Masse volumique absolue	ρ_{abs} (g/cm ³)	2.64
Absorption d'eau	A %	1.78
Compacité	C (%)	58

Tableau III.2 : Compositions chimiques du sable

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P A F
Sable	90.46	1.38	1.92	1.63	0.39	0.2	2.56

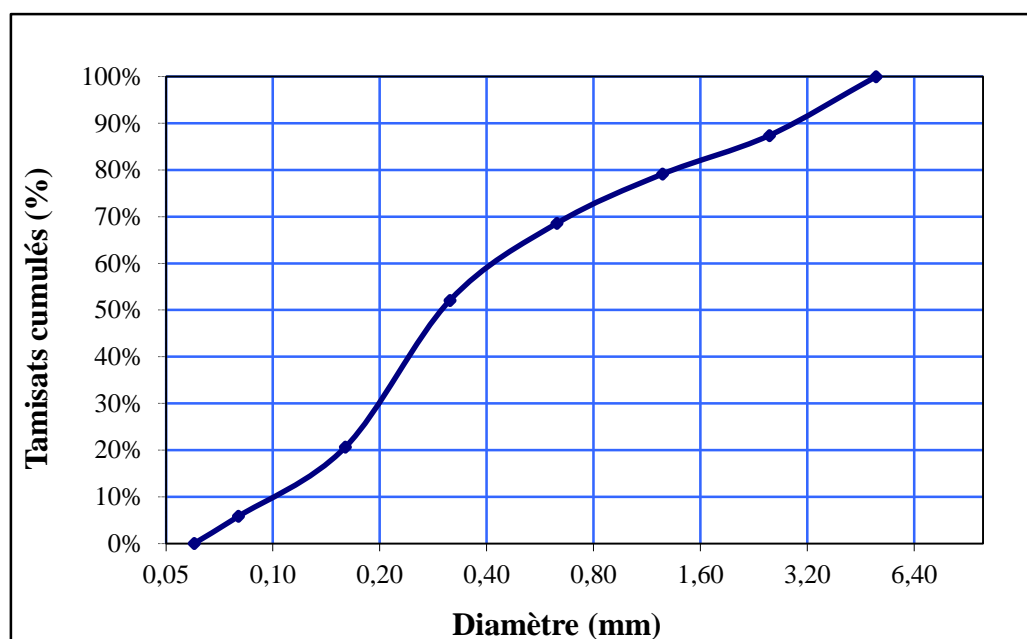


Figure III.1 : Courbe granulométrique du sable utilisé.

III.2.2 Gravier

Un gravier calcaire concassé provenant de la région d'EL-EUCH (wilaya de Bordj Bou Arréridj), a été utilisé. Pour tous les mélanges, trois classes de graviers 3/8, 8/15 et 15/20 ont été prises en considération.

Les caractéristiques physico-mécaniques des graviers employés sont données dans le tableau (III.3). Les distributions granulométriques des trois classes granulaires sont illustrées

**CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISÉS, FORMULATION
ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES**

dans la figure (III.2). La composition chimique de ce gravier est présentée dans le tableau (III.4). Le gravier utilisé présente une absorption assez faible, ne contient pas de poudre de concassage et de traces d'argile et il a un coefficient de Los Angeles inférieur à 30, qui est acceptable.

Tableau III.3: Caractéristiques physico-mécaniques du gravier

Propriétés	Symbole	Fraction		
		3/8	8/15	15/20
Los Angeles	LA	19.33	18.86	18.47
Propreté	P(%)	0.63	0.59	0.56
Masse volumique apparente	ρ (g/cm ³)	1.27	1.31	1.32
Masse volumique absolue	ρ_{abs} (g/cm ³)		2.54	
Absorption d'eau	A %	1.08	1.06	1.03
Compacité	C (%)	51.60	51.42	49.89
Aplatissement	Ap (%)	15.03	14.89	11.10

Tableau III.4 : Compositions chimiques du gravier

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P A F
Gravier	0.72	0.46	1.04	53.76	1.81	0.04	42.1

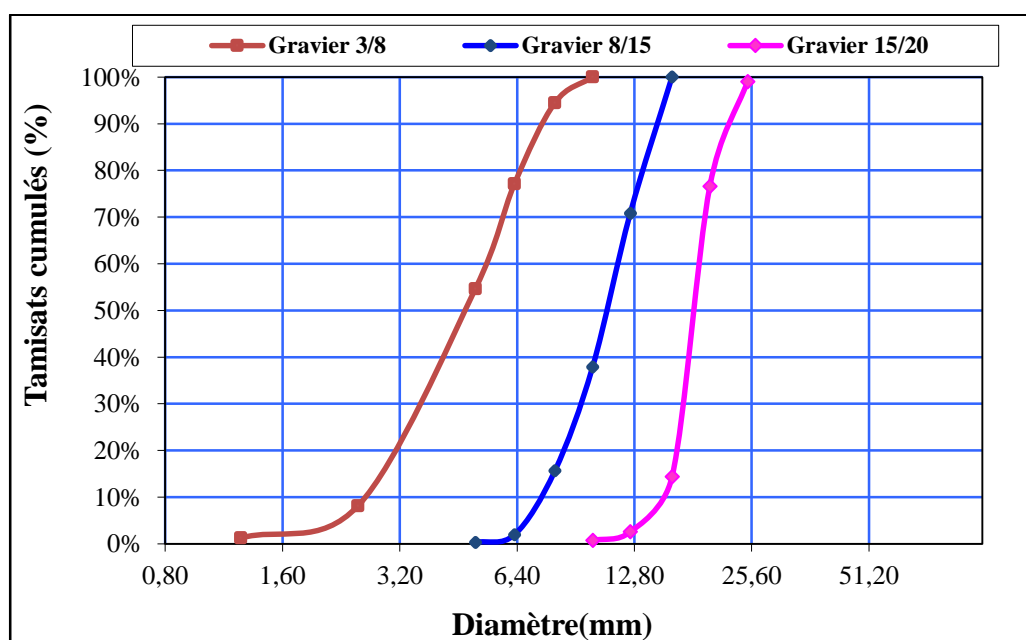


Figure III.2 : Courbe granulométrique du gravier.

III.2.3 Liant

Le type de ciment utilisé pour la préparation du BCR a un effet significatif sur la vitesse d'hydratation et le taux de développement de la résistance et, par conséquent, affecte de manière significative la résistance aux jeunes âges. Un mélange de BCR peut être confectionné par n'importe quel type de ciment. Toutefois, le choix du type de ciment dépend essentiellement des performances requises liées aux critères de résistance et de durabilité, autrement dit, il est fonction de la destination et de l'importance de projet.

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment ordinaire, de classe CEM II/A 42.5 de densité 3,15, répondant à la norme (NA-442, 2005) et provenant de la cimenterie d'Ain Touta (Algérie). La composition chimique du ciment utilisé est présentée dans le tableau (III.5).

Nous avons utilisé également dans cette étude de la fumée de silice, obtenue chez la société Granitex (Oued Smar, Algérie). Cette matière a été fournie comme produit manufacturé sous le nom MEDAPLAST HP. Elle se présente sous forme de particules sphériques extrêmement fines ayant un diamètre variant de 0,1 à 2 μm . Sa composition chimique est présentée dans le tableau (III.5).

Tableau III.5 : Compositions chimiques du ciment et de la fumée de silice.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
Ciment	20.63	4.17	2.52	58.21	1.67	2.99	0.18
Fumée de silice	>85	-	-	-	-	<2.5	-

III.2.4 Eau

L'eau utilisée est l'eau de robinet, qui alimente les laboratoires : de génie civil de l'université de M'sila et tous les quartiers de la ville de M'sila.

III.3 Formulation du BCR

Les méthodes de composition sont nombreuses et la plus convenable est celle qui permet au mélange de BCR d'acquérir les propriétés recherchées à l'état frais et durci pour supporter les charges auxquelles il sera soumis après mis en œuvre. Le BCR est caractérisé principalement par sa consistance très ferme (béton à zéro affaissement). Il nécessite généralement une action mécanique plus importante pour assurer un bon serrage du squelette granulaire que le béton ordinaire. Suite à la spécificité du BCR, les méthodes classiques de formulation des bétons ordinaires ne sont pas utilisées directement pour le BCR.

CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISÉS, FORMULATION ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

La formulation du béton consiste en général à déterminer les différentes proportions qui conduisent d'une part, à un matériau aussi économique que possible et d'autre part, permettent de répondre aux exigences techniques liées aux critères de résistance, de durabilité et parfois de maniabilité.

Il existe une différence essentielle, du point de vue composition, entre un BCR destiné au barrage et un autre destiné au corps routier. Les concepteurs de barrages utilisent une quantité plus faible de ciment contre une quantité plus grande de cendres volantes, afin de réduire la chaleur d'hydratation libérée. De plus, la grosseur maximale des granulats est limitée à 20 mm pour les routes. Puisqu'elles sont conçues pour supporter des sollicitations mécaniques plus grandes. De ce fait, il existe des méthodes de formulation qui sont plus appropriées à un BCR routier et, d'autres, à un BCR de barrage.

La méthode de formulation adoptée dans la présente étude est la méthode géotechnique proposée par ACI 325 (ACI-325, 2001). Cette méthode est basée sur la relation entre la densité sèche et la teneur en eau. Le choix de cette méthode est lié à la destination du BCR, puisqu'elle s'adapte bien avec les mélanges du BCR destiné aux projets routiers.

Pour choisir les pourcentages des différentes fractions d'agrégat, il faut passer par plusieurs étapes qui peuvent se résumer comme suit :

La première étape consiste à combiner les différentes fractions de granulats pour obtenir un squelette granulaire avec le minimum de vides et en même temps évitant la ségrégation. Pour cela, il est nécessaire que la courbe granulométrique combinée soit située entre les limites d'un fuseau granulaire. La figure (III.3) illustre la position de la courbe combinée entre les limites proposées par (Marchand *et al.*, 1997).

Les proportions qui permettent d'obtenir une courbe granulométrique combinée située à l'intérieur du fuseau proposé par (Marchand *et al.*, 1997) est : 12% de gravier classe 15/20, 17% de gravier classe 8/15, 33% de gravier classe 3/8 et 38% de sable.

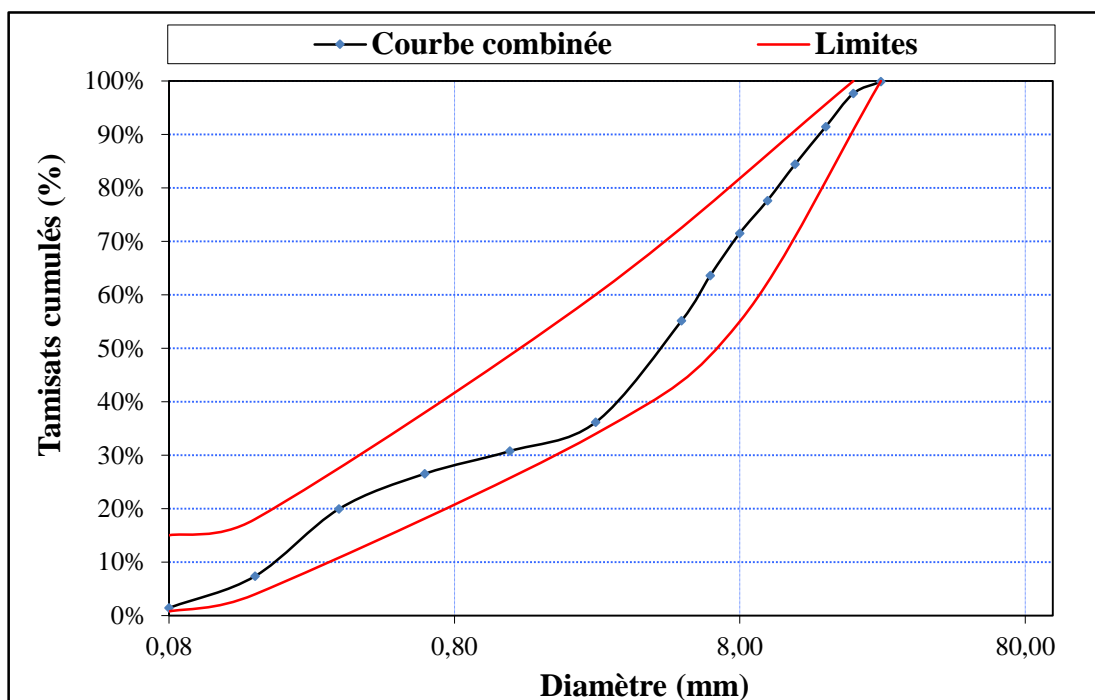


Figure III.3 : Courbe combinée des granulats selon (Marchand *et al.*, 1997).

L'étape suivante est la détermination de la teneur en eau optimale dans le mélange. Elle est basée sur la relation entre la densité sèche et la teneur en eau suivant le mode opératoire de l'essai Proctor modifié, tel qu'il est décrit dans la norme (ASTM D1557, 1991). L'objectif de cette étape est de rechercher la densité maximale avec une quantité d'eau minimale et une maniabilité convenable pour un BCR routier.

Donc, pour déterminer la teneur en eau optimale, des mélanges du BCR ont été préparés avec des différents dosages en ciment (11, 12, 13 et 14%), chaque dosage de ciment a été examiné à quatre teneurs en eau (3, 4, 5 et 6%). En effet seize mélange de BCR ont été préparés, pour chaque mélange trois éprouvettes ont été confectionnées selon le mode opératoire de l'essai Proctor modifié (ASTM D1557, 1991). A la fin, la densité humide est mesurés, et à partir de celle-ci la densité sèche à calculé en utilisant la formule suivante :

$$\gamma d = \left(\frac{\gamma h}{100 + w} \right) 100 \dots \dots \dots (02)$$

Avec :

γd : la densité sèche, γh : la densité humide et w : la teneur en eau

Et enfin, la courbe de variation des densités en fonction de la teneur en eau est tracée (figure III.4).

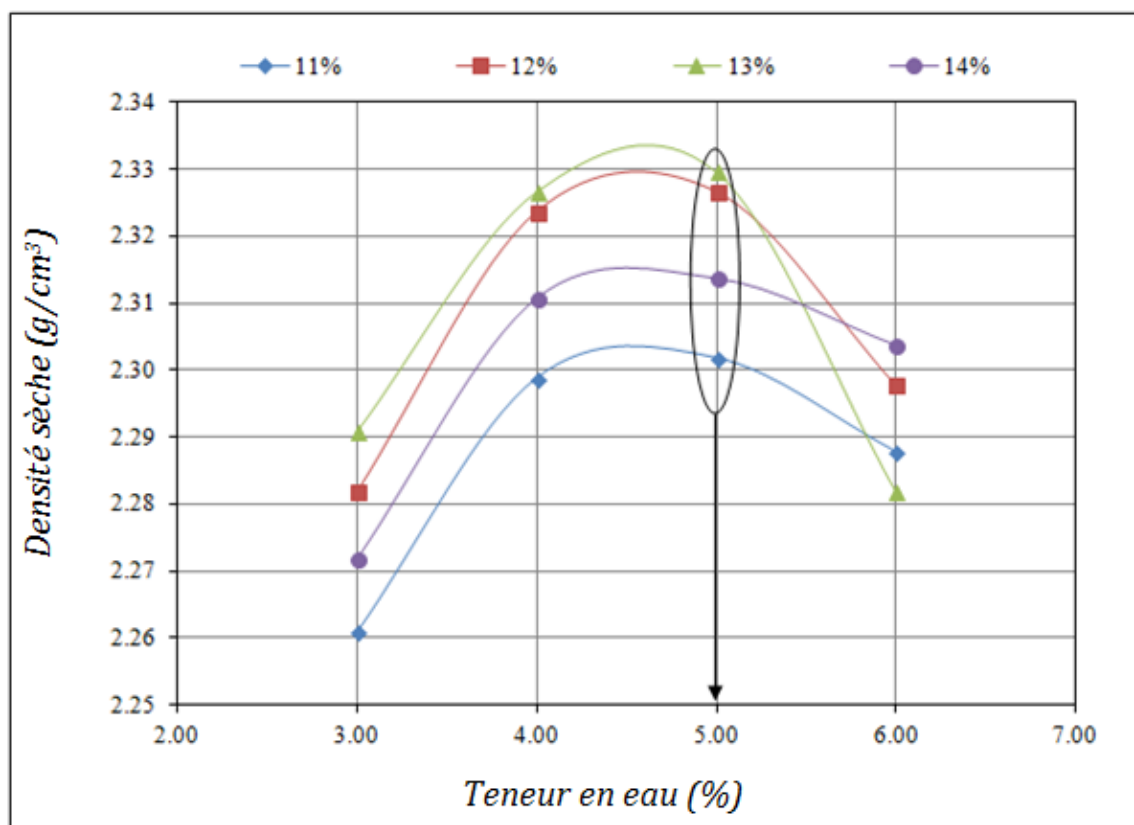


Figure III.4 : Relation entre la densité et la teneur en eau.

Pour les quatre dosages de ciment la densité maximale était dans le mélange préparé avec une teneur en eau de 5%. Parmi les seize mélanges, il ne nous en restait que quatre, qui ont été préparés avec une teneur en eau de 5% et des dosages en ciment 11, 12, 13 et 14%.

La dernière phase consiste à choisir le pourcentage convenable en ciment sur la base des propriétés mécaniques développées. Cette étape consiste en la confection des éprouvettes de BCR correspondant aux valeurs optimales de teneurs en eau, obtenues à partir des courbes Proctor.

Selon le rapport d'ACI-325 (ACI-325, 2001), une résistance finale à la compression de 27 MPa est nécessaire pour une route en BCR. Cependant, cette valeur n'est qu'à titre indicatif car la détermination de l'épaisseur d'une route en BCR est basée sur les caractéristiques de chargement (intensité du trafic), les caractéristiques du sol (portance) et les propriétés mécaniques du BCR (Gauthier and Marchand, 2001). Pour cette étude, une résistance à la compression à 7 jours de 25 MPa, est retenue. Cette résistance est atteinte lorsqu'on utilise une teneur en ciment de 13% et une teneur en eau de 5% (figure III.5).

Le tableau (III.6) présente les différentes proportions utilisées pour le programme expérimental.

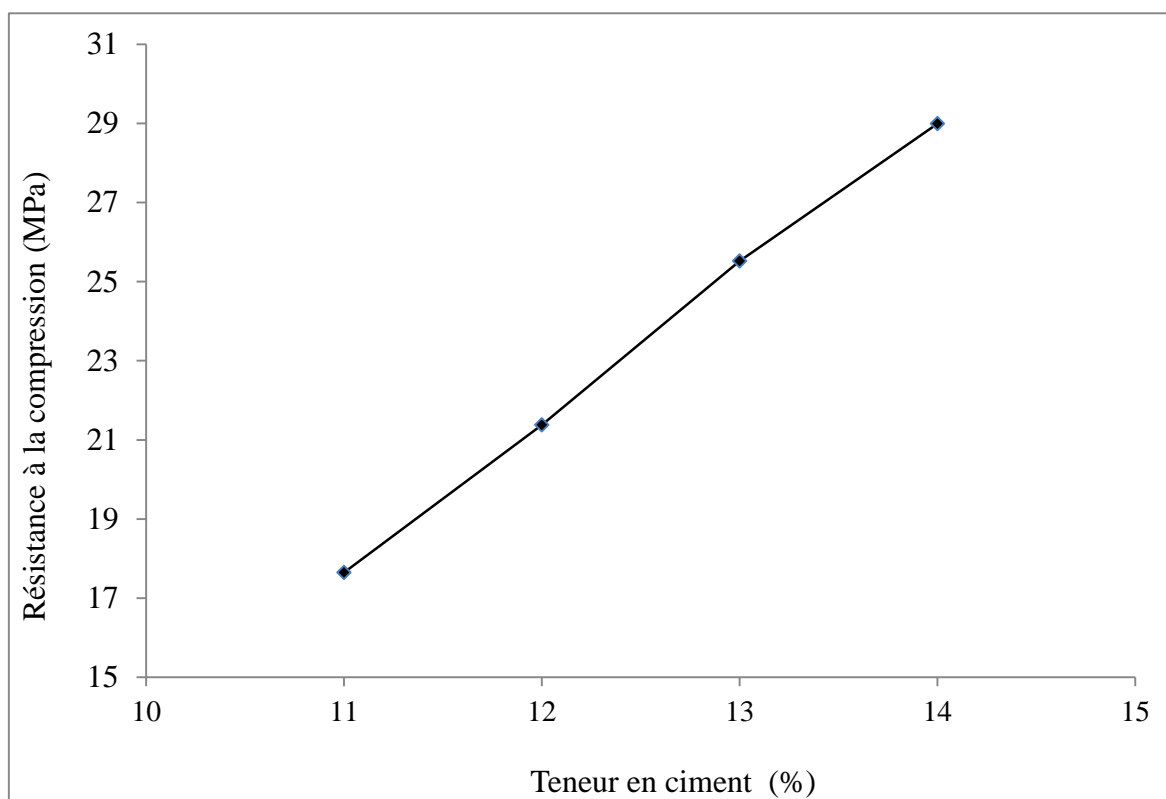


Figure III.5 : Résistance à la compression à 7 jours en fonction de la teneur en ciment.

Tableau III.6 : Les différentes proportions de mélange

Constituant (kg/m ³)					
Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/20	Ciment	Rapport E/C
821	588	392	196	300	0.37

III.4 Techniques expérimentales

III.4.1 Malaxage

Le processus de malaxage a été effectué comme décrit dans les travaux de (Debieb *et al.*, 2009), d'après cet étude le malaxage se déroule en plusieurs étapes. Ces dernières sont présentées dans le tableau (III.7). Une fois le mélange malaxé, les propriétés du BCR à l'état frais sont déterminées et les éprouvettes des essais sont préparées dans un temps ne dépasse pas 60 minutes qui suivent leur malaxage pour éviter l'assèchement du béton (Gauthier and

Marchand, 2004). La photographie de la figure (III.6) illustre l'aspect du BCR lors de malaxage.



Figure III.6 : Aspect du BCR lors de malaxage.

Tableau III.7: Procédure de malaxage

Temps	t _{0-4'}	t _{0-2'}	t _{0-1'}	t _{0+1'}	t _{0+2'}
Addition	Granulats	-	Ciment	Eau	-
Tâche	Malaxage	Repos	Malaxage	Malaxage	Fin

III.4.2 Compactage

Le compactage a été effectué en utilisant d'un marteau de compactage vibrant (figure III.7) pour simuler le compactage des échantillons en laboratoire conformément aux exigences de la norme (ASTM C1435, 1999), ce moyen de compactage est utilisable pour des mélanges et des carottes en béton bitumineux, et peut également être utilisé, avec l'embase appropriée, au compactage de cubes, cylindres et prismes en béton. Le taux de compactage a été déterminé par des essais de convenance, et fixé tout au long de l'étude. Toutes les

éprouvettes préparées ont été laissés durcir dans les conditions de laboratoire ($T=20 \pm 1^\circ\text{C}$ et $\text{RH}=55 \pm 5\%$) pendant 24 heures. Ensuite, ils ont été démoulés et placés dans son milieu de durcissement.



Figure III.7 : Marteau vibrant utilisé dans cette étude.

III.4.3 Conditions de durcissement

Deux enceintes climatiques avec une plage de température (-20 à $+150^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et une plage d'humidité relative (HR) (10 à $98 \pm 5\%$) ont été utilisées dans cette étude (figure III.8). Les échantillons de BCR ont été préparés pour être étudiés conformément aux programmes d'essais préétablis. Quatre températures différentes (15 , 30 , 45 et 60°C) ont été adoptés, chaque température a été examiné en quatre niveaux d'humidité relative (30 , 50 , 70 et 90%). Par conséquent, seize conditions de durcissement différentes ont été utilisées. En plus, trois conditions de durcissement ont été ajoutées, ($T=20^\circ\text{C}$, $\text{HR}=40\%$, $T=35^\circ\text{C}$, $\text{HR}=60\%$ et $T=50^\circ\text{C}$, $\text{HR}=80\%$). Après la période de cure, les éprouvettes ont été retirés de l'enceinte climatique 5 heures avant l'essai et exposés à l'environnement naturel jusqu'à l'essai afin d'assurer son refroidissement et séchage.

Figure III.8 : L'enceinte climatique utilisée dans cette étude.



III.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré premièrement à une caractérisation physique, mécanique et chimique des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges de BCR. En second lieu, nous avons décrit les différentes étapes de formulation du BCR. Les proportions des mélanges ont été déterminées suivant la méthode qui est basée sur les paramètres géotechniques. Finalement, nous avons présenté la procédure expérimentale suivie pour le malaxage, le compactage et la conservation des éprouvettes.

IV.1 Introduction

Il est bien connu que les conditions environnementales, telles que la température, l'humidité relative, le vent...etc, peuvent avoir une grande influence sur les propriétés à la fois mécaniques et surtout liées à la durabilité du béton, qui contrôlent la qualité finale. L'un des facteurs clés de la qualité du béton est sa perte d'eau par évaporation sous l'effet de la température qui peut provoquer des fissures, réduisant ainsi la durabilité du béton en termes de durée de vie. Ainsi, afin d'optimiser les réactions chimiques, il semble nécessaire de prévoir une température et une humidité relative appropriées dans le processus de durcissement afin d'éviter une perte excessive d'eau à la surface du béton au cours du processus d'hydratation.

Dans ce chapitre nous allons présenter des résultats expérimentaux qui décrivent l'effet de la température et de l'humidité relative sur la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité du BCR. Pour remédier au problème de l'impact négatif de la température élevée et de la faible humidité relative, nous allons procéder à l'application de trois modes de cure et également à l'addition de la fumée de silice.

IV.2 Méthodes expérimentales

Des moules standards d'éprouvettes en béton ont été préparés conformément à la norme ([ASTM-C470, 2002](#)). Chaque moule a été nettoyé à fond, séché, puis recouvert d'un film d'huile avant que le béton soit coulé. Le film d'huile a simplifié l'enlèvement des éprouvettes de leurs moules une fois le processus de durcissement terminé. Des moules, cubiques (100x100x100 mm), ont été utilisés pour la mesure de la résistance à la compression, le module d'élasticité et l'absorption d'eau ; cylindriques (100x200mm) pour la résistance à la traction par fendage, tandis que des moules prismatiques (70x70x280 mm) ont été utilisés pour le retrait.

Les résistances à la compression et à la traction par fendage ont été évaluées à 3, 7, 14, 28 et de 60 jours selon les normes ([ASTM-C39/C39M, 2003](#); [ASTM C496, 2006](#)) respectivement. Le module d'élasticité en compression a été déterminé à 28 jours, conformément à la norme ([ASTM C 469-02, 2002](#)). Les lectures de retrait de séchage ont été prises d'une manière irrégulière jusqu'à 60 jours, le retrait a été évalué selon la norme ([ASTM](#)

C 157, 2005). L'essai de l'absorption capillaire d'eau a été fait à 28 jours de cure, selon la norme (ASTM C1585/C1585M, 2007), les éprouvettes ont été séchées jusqu'à une masse constante dans une étuve à 105°C, et elles sont ensuite immergées dans une nappe d'eau de hauteur 2mm durant 72 h.

Pour la résistance à l'abrasion, la méthode utilisée est l'essai de Cantabro, qui est effectué dans la machine d'abrasion de Los Angeles (LA) sans charge de bille d'acier. Cette méthode est conforme aux exigences de la norme (ASTM C1747 / C1747M-13, 2013), elle est destinée au béton perméable, mais elle a été utilisée pour le BCR par plusieurs chercheurs (Mohammed & Adamu, 2018; Rao et al., 2016). Pour ce travail, trois éprouvettes cylindriques de hauteurs de 100 mm et de diamètres de 150 mm ont été testés pour chaque milieu de conservation et la valeur moyenne a été enregistrée, le test a été déterminé à 28 jours. La résistance à l'abrasion a été mesurée à trois cycles 100, 200 et 300 tours, à chaque cycle, les éprouvettes abrasées ont été nettoyées de tout débris libre et pesés avec précision. La perte de Cantabro est calculée par l'équation (3):

$$\text{Indice d'abrasivité} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

Où, L'Indice d'abrasivité est la perte du poids (%); W_1 est le poids initial de l'échantillon (g); W_2 est le poids final de l'échantillon (g).

IV.3 Effet de la température de cure et l'humidité relative

IV.3.1 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression obtenus sur les mélanges de BCR durcis dans différentes conditions environnementales sont illustrés dans la figure IV.1.

Comme le montre la figure, sous les quatre niveaux d'humidité relative étudiés, l'évolution de la résistance à la compression en fonction de temps a montré une tendance sensiblement similaire. Et on peut clairement remarquer que plus la température est élevée, le taux de durcissement est beaucoup plus rapide au début, puis ralentit après le 7^{ème} jour quel que soit l'humidité de cure. Où on observe, par exemple, à 30% d'humidité relative, la résistance à la compression du BCR à 3 jours a augmenté jusqu'à 70 et 85% de sa résistance finale (à 60 jours) lorsque la température atteint 45 et 60 °C respectivement, tandis que à 15 et 30 °C, la résistance à la compression à 3 jours représente seulement 28 et 42% respectivement, de sa résistance finale (figure IV.2). Pareil pour 90% d'humidité relative de cure, la résistance à la compression à 3 jours a augmenté jusqu'à 70 et 82% de sa résistance

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

finale lorsque la température atteint 45 et 60 °C respectivement, tandis que la résistance à la compression à 3 jours ne représente que 29 et 37% de sa résistance finale dans les températures de cure 15 et 30 °C respectivement (figure IV.3). Pour plus d'explication, sous les quatre niveaux d'humidité relative (30, 50, 70 et 90%), la résistance du BCR à 3 jours s'est améliorée de 74, 94, 123 et 139% respectivement, lorsque la température a augmenté de 15 à 60 °C, tandis qu'à 28 jours le BCR a perdu 33, 24, 15 et 4% respectivement, de sa résistance lorsque la température a augmenté de 15 à 60 °C (figure IV.4).

Ces résultats sont en accord avec plusieurs études qui ont été menées sur l'effet de la température de durcissement sur la résistance du béton (Barluenga et al., 2018; Ramezianpour & Malhotra, 1995). Cela peut s'expliquer par le fait qu'une augmentation de la température accélérera les réactions du processus d'hydratation dès le plus jeune âge et conduira à la formation de plus de gel CSH et, par conséquent, à des valeurs plus élevées de la résistance du béton (Joshaghani et al., 2018).

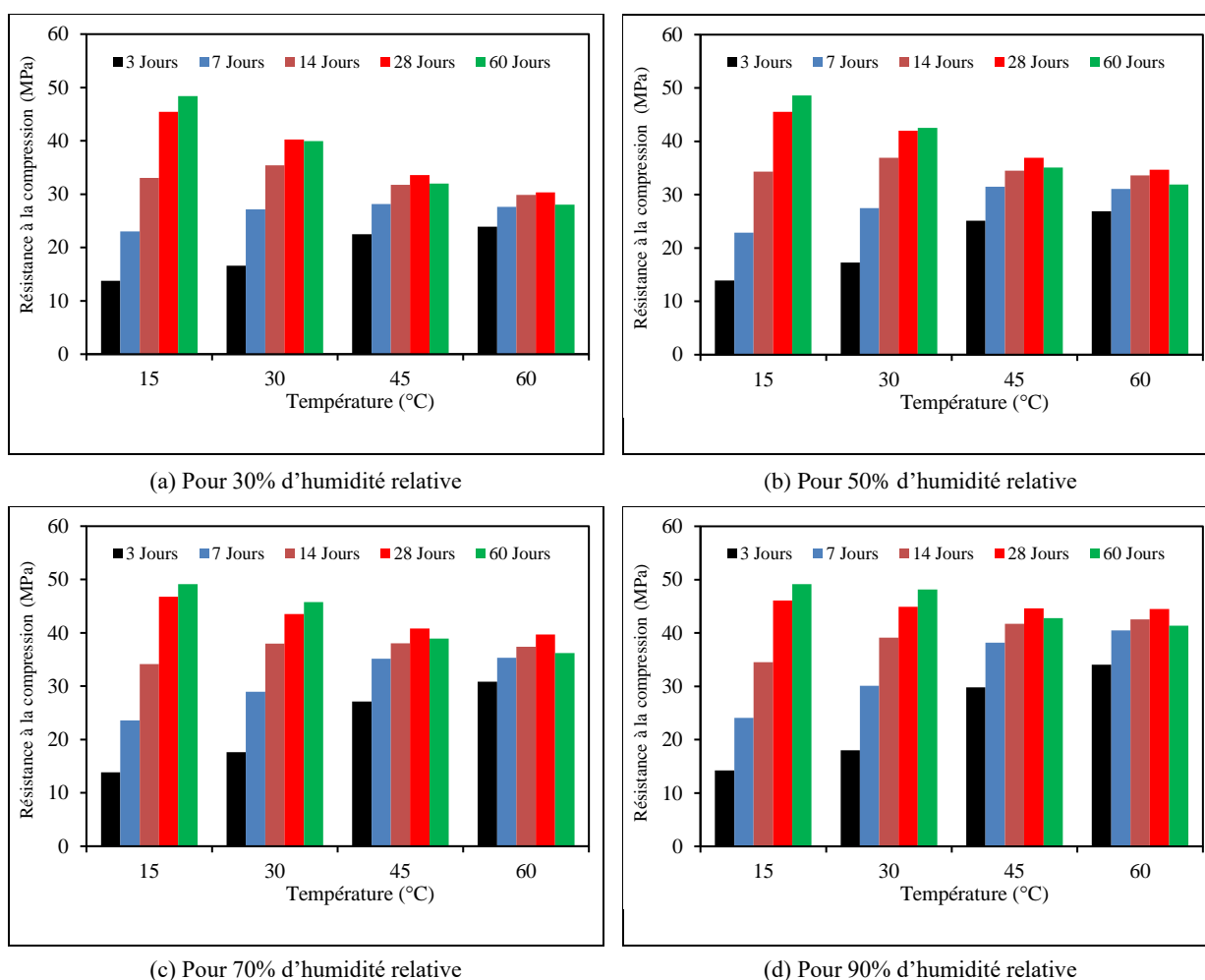


Figure IV.1 : Effet de la température sur la résistance à la compression.

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

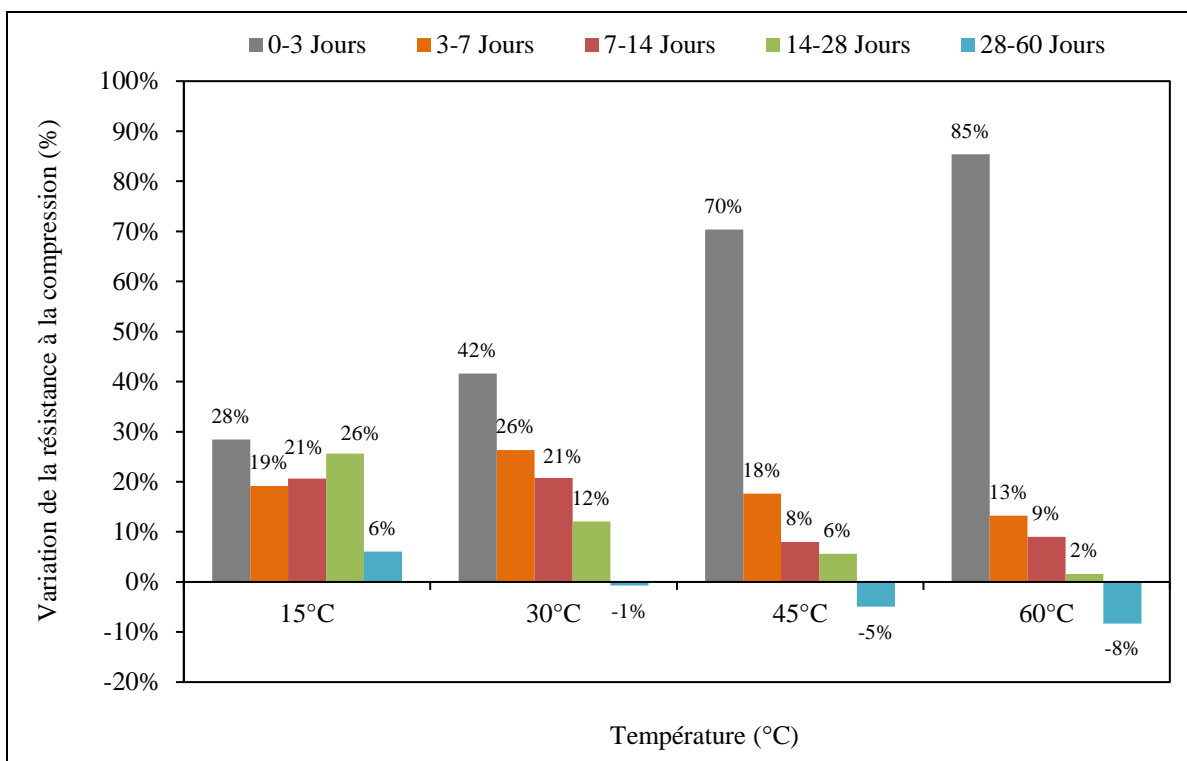


Figure IV.2 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la température à 30% d'humidité relative.

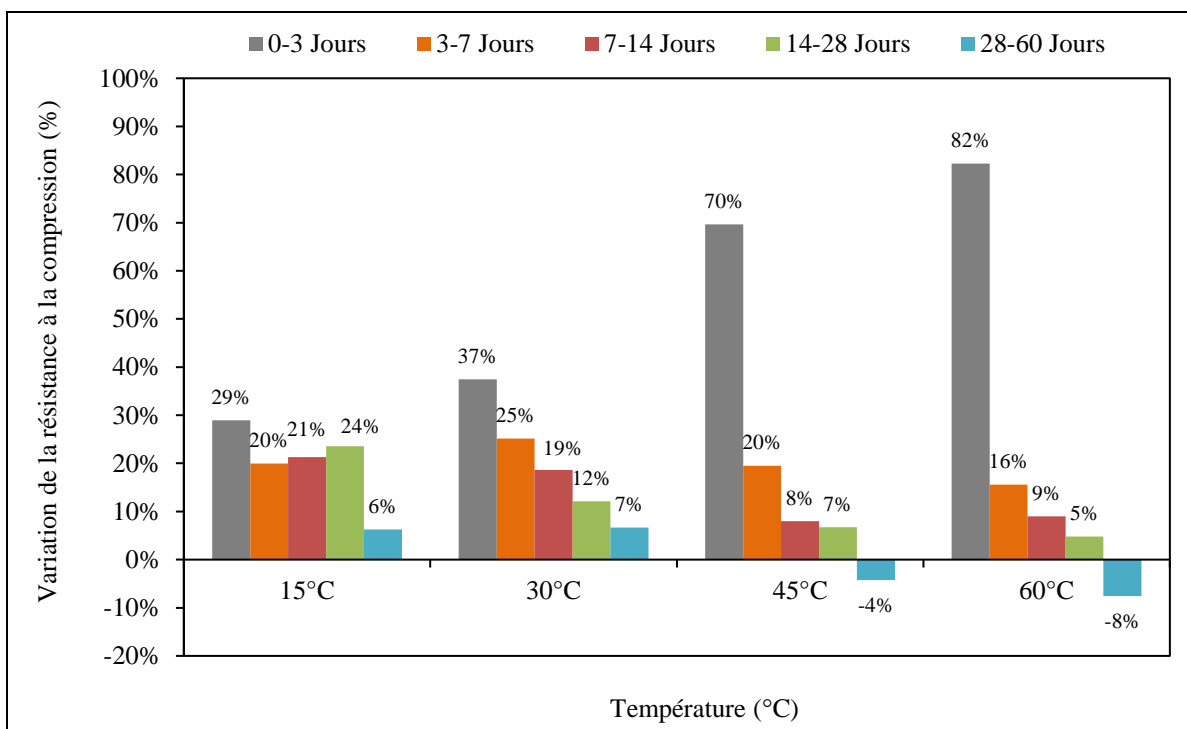


Figure IV.3 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la température à 90% d'humidité relative.

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

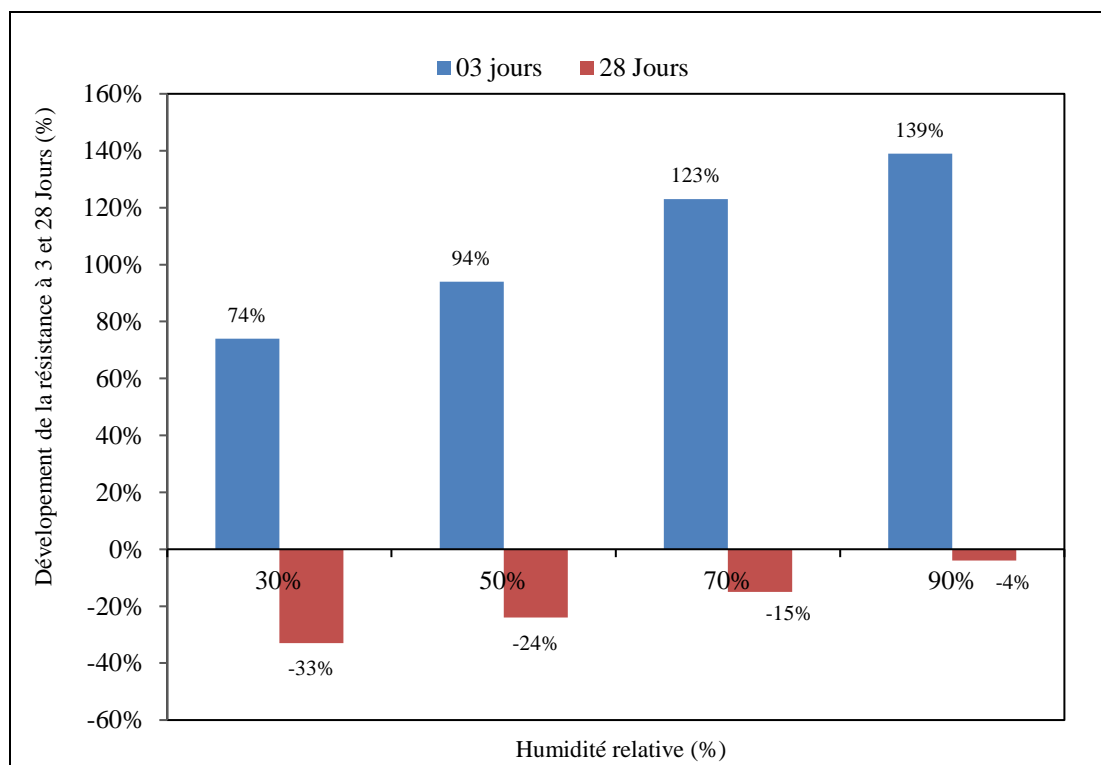


Figure IV.4 : Développement de la résistance à 3 et 28 jours lorsque la température augmente de 15 à 60 °C sous les quatre niveaux d'humidité relative.

Pour les quatre niveaux de l'humidité, la résistance à la compression du BCR traité à 45 et 60 °C a augmenté avec le temps jusqu'à 28 jours, puis une perte de résistance à 60 jours a été marquée (Figure IV.1), pour une humidité relative 30% par exemple, cette perte est estimée à 5% pour le BCR durci à 45 °C et 8% pour le BCR durci à 60 °C (figure IV.2), et pour une humidité relative 90% la perte de résistance est 4% pour le BCR durci à 45 °C et 8% pour le BCR durci à 60 °C (figure IV.3).

On peut également constater à travers de la figure IV.1 que l'augmentation de la température affecte négativement les valeurs finales de la résistance à la compression. Une perte dans la résistance finale (à 60 Jours) a été enregistrée lorsque la température augmente de 15 à 60°C estimée de 42, 34, 26 et 16% pour les quatre niveaux d'humidité relative (30, 50, 70 et 90%) respectivement (Figure IV.5). Ces remarques sont en accord avec les études menées sur le béton ordinaire par les chercheurs (Lawson et al., 2000; Phan & Carino, 2003; Shoukry et al., 2011). Lawson et al (Lawson et al., 2000) rapportent que le béton perd jusqu'à 50% de sa résistance à la compression lorsque la température augmente de 100°C jusqu'à environ 200°C. Ceci est également confirmé par les résultats rapportés par Shoukry et al (Shoukry et al., 2011) qui ont trouvé que le béton conventionnel perd 38% de sa résistance de

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

compression à la mesure que la température atteint 80°C. Ils ont également indiqué qu'à des températures plus élevées, le béton a enregistré une dégradation dans sa résistance de compression, de traction et du module d'élasticité correspondant. Phan & Carino (Phan & Carino, 2003) ont montré que si le béton est exposé à des températures extrêmes répétées, il perde de sa résistance de manière permanente.

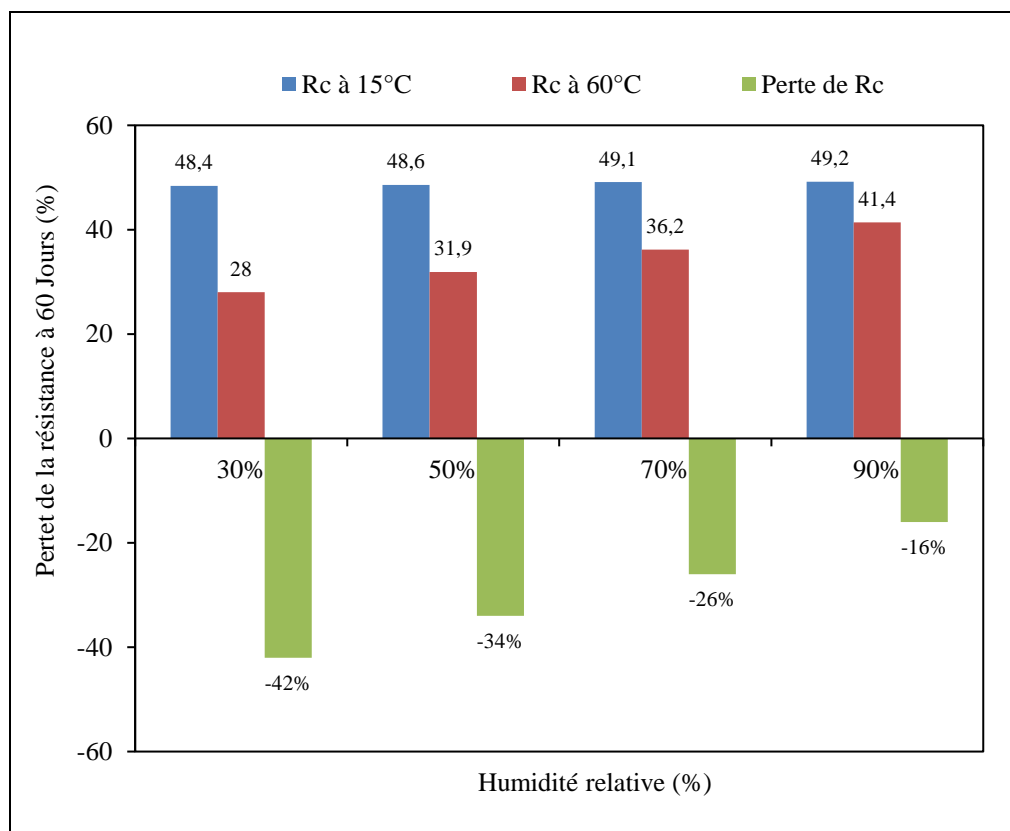


Figure IV.5 : La perte de la résistance finale (à 60 Jours) lorsque la température augmente de 15 à 60°C sous les quatre niveaux d'humidité relative.

La diminution de la résistance à température élevée peut s'expliquer par la réduction de la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment dans le mélange (Deghfel et al., 2019). Bentur & Goldman (Bentur & Goldman, 1989) et ACI 305 (ACI Committee 305, 2007) ont mentionné que le taux élevé d'évaporation dans les zones chaudes réduit la quantité d'eau contenue dans le mélange et affecte par conséquent les processus d'hydratation. En plus de cela, l'évaporation de l'eau peut créer des produits d'hydratation dispersés et médiocres dans le mélange.

Simultanément, sous les quatre températures étudiées, deux phénomènes ont été produits ; à basse température, et quel que soit l'humidité relative, une augmentation de la

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

résistance à la compression avec l'âge a été notée dans tous les éprouvettes de BCR. Si on prend par exemple la température 15 °C, pour une humidité relative 90%, les valeurs de résistance à la compression sont de 14.25, 24.06, 34.54, 46.11 et 49.18 MPa à 3, 7, 14, 28 et 60 jours respectivement, et la même chose pour les autres niveaux d'humidité relative (Figure IV.6 (a et b)). Ces observations ont été révélées par Mi et al. (Mi et al., 2018), lorsqu'ils ont étudié l'effet de l'humidité sur les propriétés de fracture du béton. A température élevée, une augmentation de résistance avec l'âge jusqu'à 28 jours a été enregistrée, puis une perte de résistance a été notée à 60 jours, dans tous les niveaux d'humidité relative (Figure IV.6 (c et d)). Cela montre que la température joue un rôle important même dans des conditions d'humidité élevées.

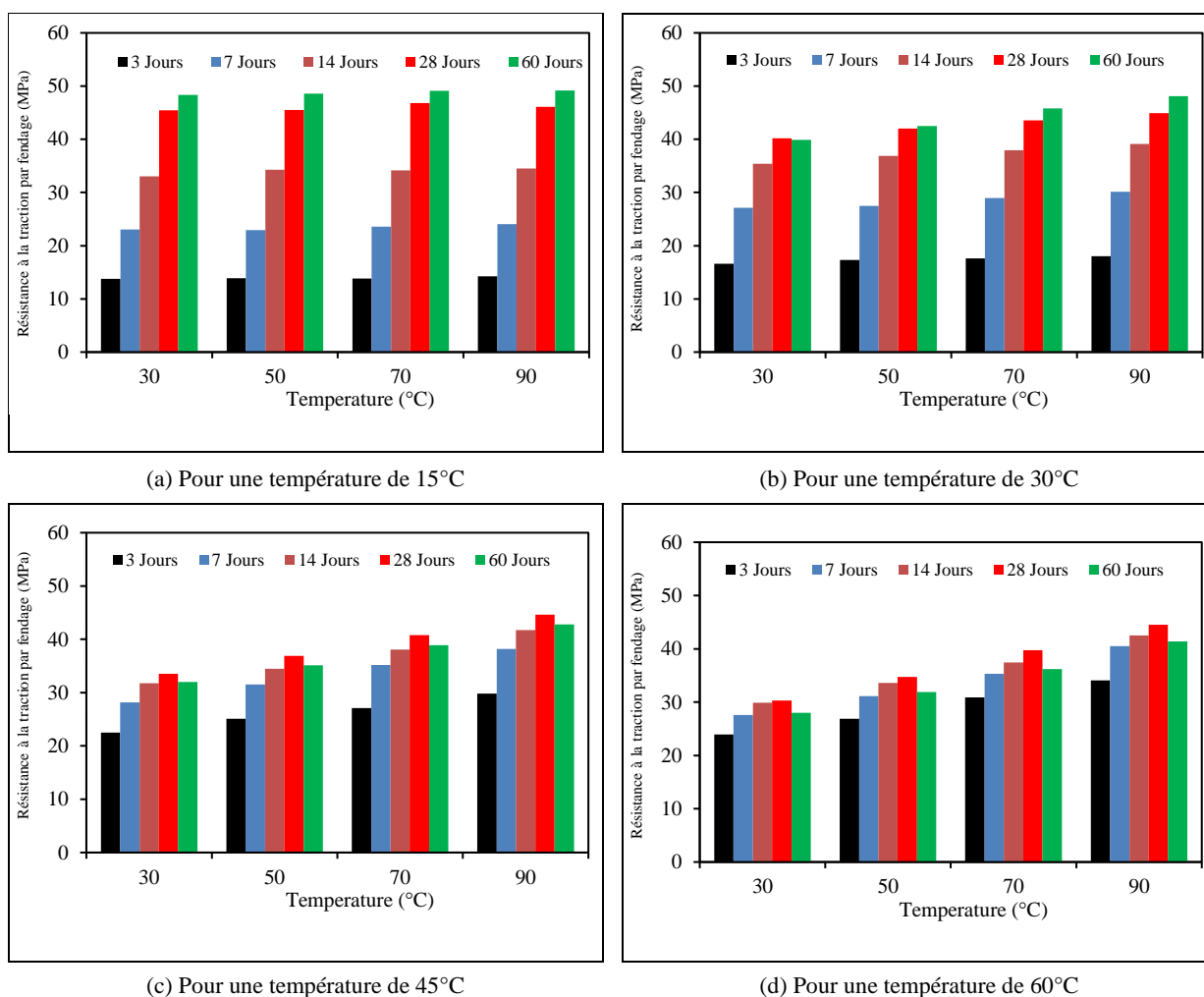


Figure IV.6 : Effet de l'humidité relative sur la résistance à compression.

Il est évident de noter également qu'à travers de la figure IV.6 que l'augmentation de l'humidité a un effet positif sur la résistance à la compression, mais cet effet n'est pas significatif sauf sous des températures élevées, où le gain de la résistance finale lorsque

l'humidité a augmenté de 30 à 90% n'est que de 1,67% à une température de 15 °C, mais il a augmenté à 20,57, 33,83 et 47,79% à des températures de 30, 45 et 60 °C respectivement. Cela peut expliquer qu'à des températures basses, le taux d'évaporation diminue considérablement et c'est ce qui fait que l'effet de l'humidité devient insignifiant. C'est constations sont concorde avec une étude menée par Cebeci (Cebeci, 1987) qui a montré que la résistance à la compression du béton est réduite de 30% et 45% avec une humidité relative de 75% et 33% respectivement par rapport au béton durci dans de l'eau.

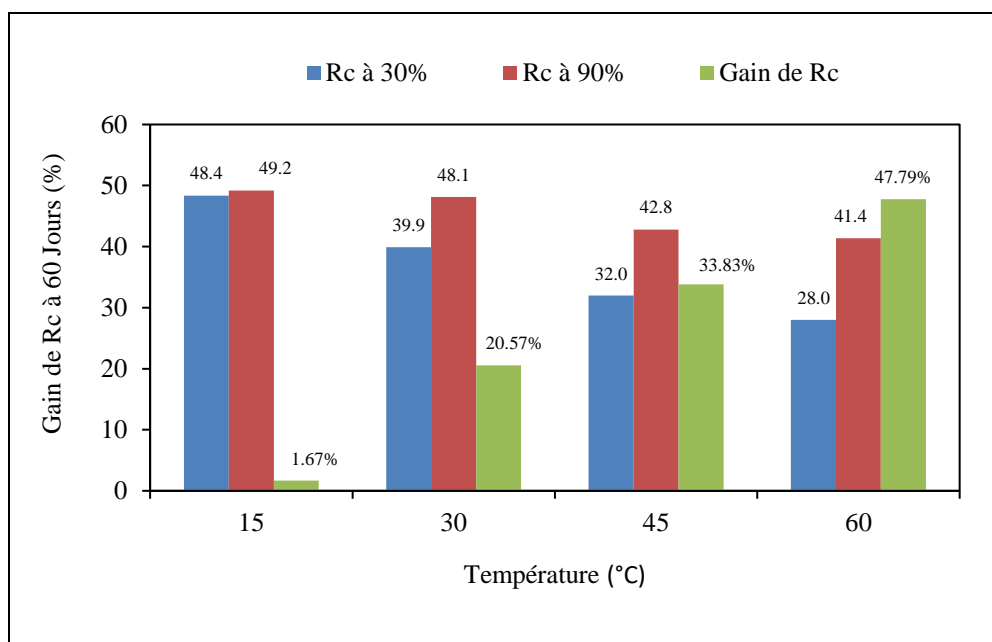


Figure IV.7 : Le gain de la résistance à la compression (à 60 Jours) lorsque l'humidité augmente de 30 à 90% sous les quatre températures.

IV.3.2 Résistance à la traction par fendage

La figure IV.8 représente l'effet de la température de durcissement sur la résistance à la traction par fendage. Similaire à la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage avec le temps a évoluée de même façon sous les quatre niveaux d'humidité relative. Et on peut clairement observer qu'à des températures élevées, la résistance à la traction par fendage augmente de manière monotone avec le temps mais ralentit après le 7^{ème} jour. Pour plus d'explication, sous les quatre niveaux d'humidité relative (30, 50, 70 et 90%), la résistance à la traction par fendage du BCR à 3 jours représente 75, 73, 67 et 64% respectivement, de sa résistance finale pour le BCR durci à 45°C, et 93, 92, 87 et 85% pour le BCR durci à 60 °C (Figure IV.9). Cependant, la résistance à la traction par fendage à 3 jours du BCR exposé à 15°C sous les quatre niveaux d'humidité relative ne représente que 28, 32,

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

32 et 29% de sa résistance finale, et 46, 44, 41 et 36% à 30 °C de sa résistance finale pour le BCR traité à 60 °C (Figure IV.9).

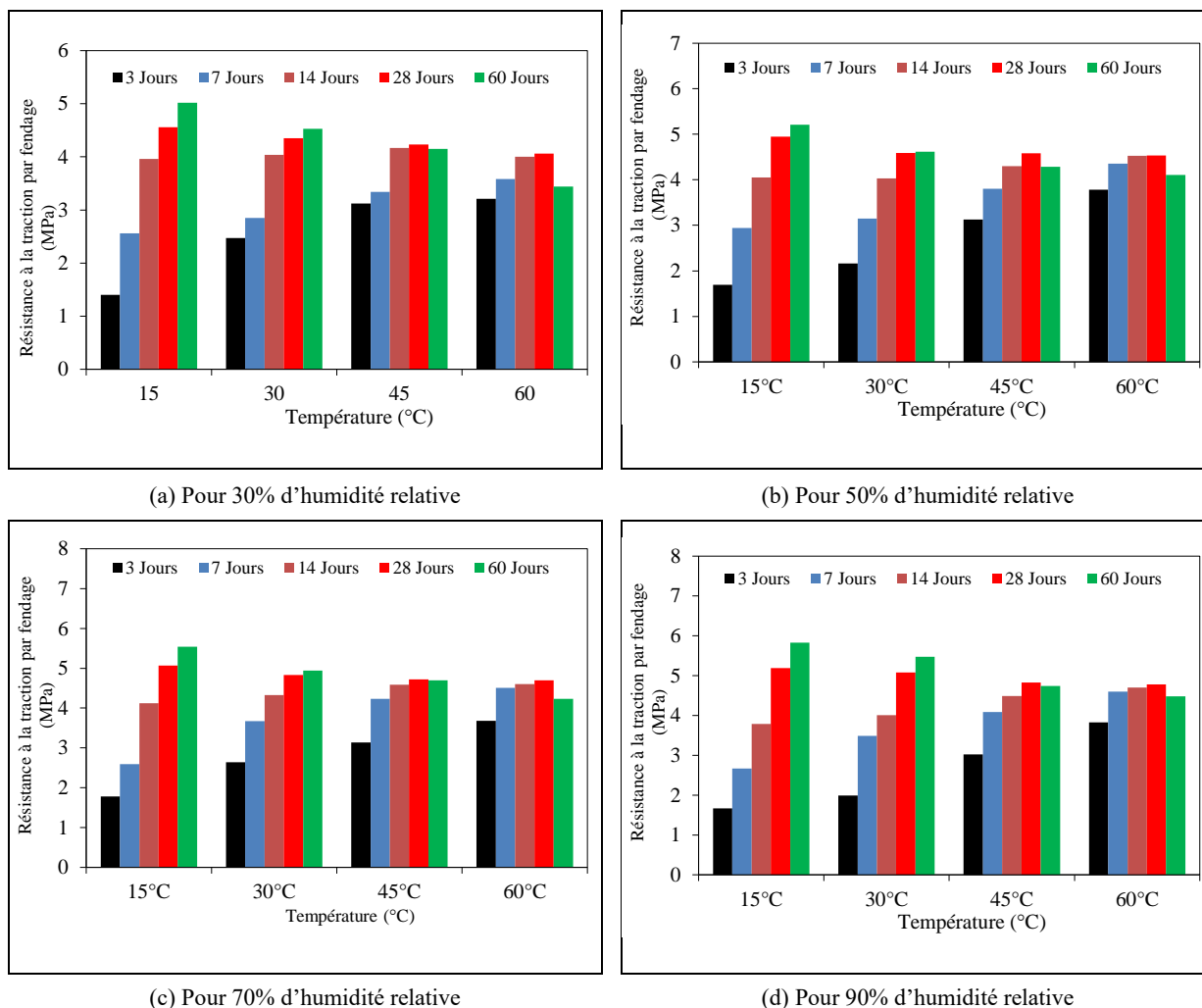


Figure IV.8 : Effet de la température sur la résistance à la traction par fendage.

On peut également remarquer que pour les quatre niveaux de l'humidité, la résistance à la traction par fendage du BCR durci à 45 et 60 °C a augmentée avec le temps jusqu'à 28 jours, puis une perte de résistance à 60 jours a été marquée, cette perte est estimée à 8, 7, 5 et 2% pour le BCR durci à 45°C et 18, 12, 9 et 7% environ pour le BCR durci à 60 °C (Figure IV.9). En effet, la température élevée provoquera une distribution non uniforme du gel de CSH à long terme en raison du temps insuffisant pour la diffusion dans le béton, ce qui contribue à des pores plus larges dans la microstructure du béton et à des propriétés mécaniques et de durabilité plus faibles. (Almusallam, 2001; Zhang et al., 2016).

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

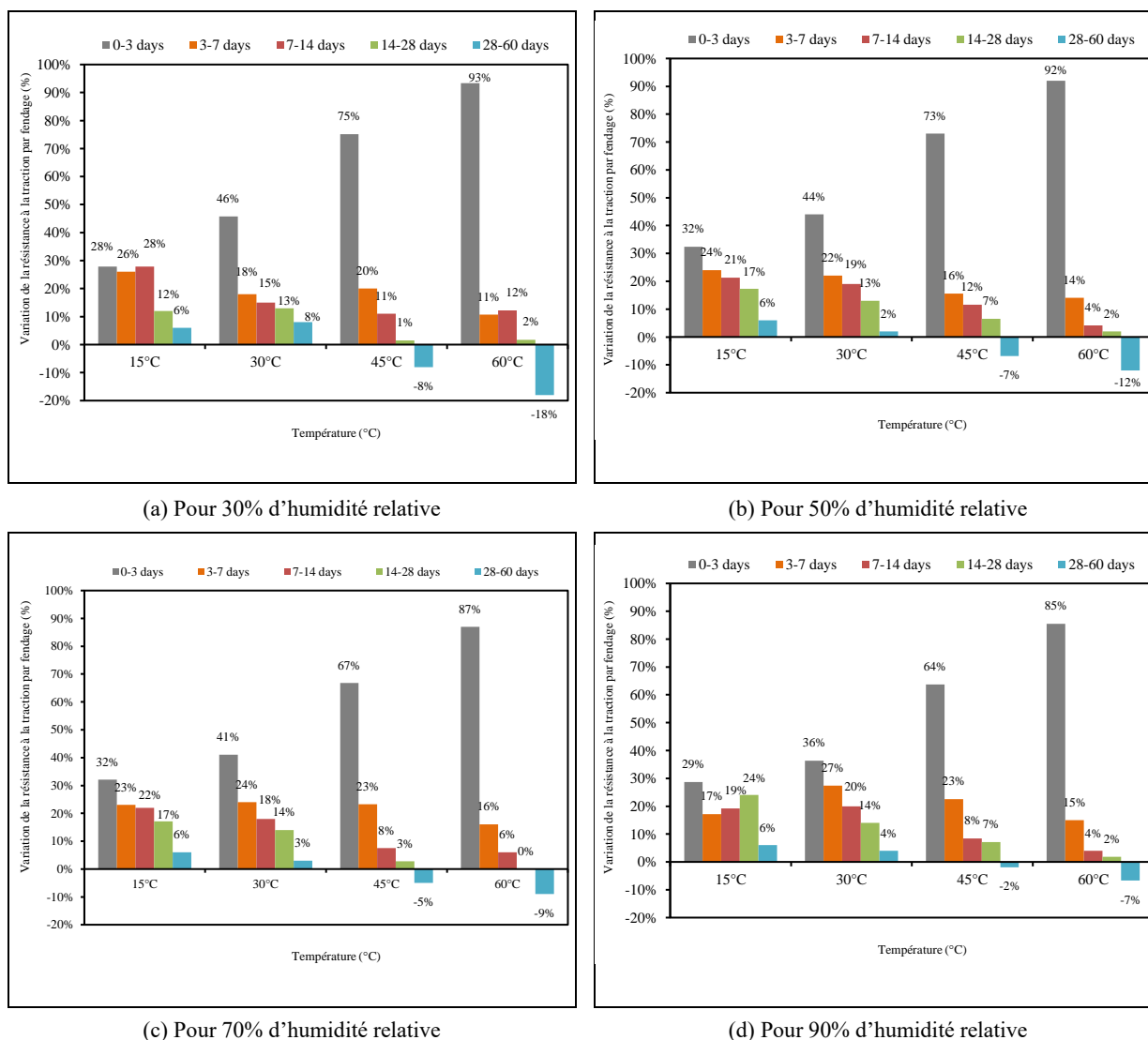


Figure IV.9 : Variation de la résistance à la traction par fendage en fonction de la température et de l'humidité relative.

Ces observations sont en accord avec les études réalisées par Gallucci et al (Gallucci et al., 2006) et Wang et al (Wang et al., 2011), les auteurs ont observés le même phénomène et ont déclaré que la perte de résistance à des températures élevées est due à une distribution plus dense et hétérogène et plus grossière des hydrates plus précisément les CSH responsable du développement de la résistance. Cet effet peut engendrer des phases hydratées autour des grains de ciment anhydres empêchant la formation de CSH. Zacak et al (Zacak et al., 2007) qui travaillaient sur l'effet de la température (5, 25, 45°C) sur l'hydratation d'une C_3S synthétique, en s'appuient sur la réaction d'hydratation du C_3S et la procédure de nucléation des CSH sur la surface des C_3S , déclarés que lorsque la température est élevée la couche de CSH est plus dense, c'est pour cela que la vitesse d'hydratation du C_3S est plutôt faible à haute température. Escalante-Garcia (Escalante-Garcia, 2003), dans son travail conduit sur 5

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

types de ciments avec une maturation à différentes températures allant de 10°C jusqu'à 60°C a conclu que le degré d'hydratation et la quantité de l'eau non évaporable s'accroissent ou augmentent avec l'augmentation de la température, mais à des âges plus avancés ils s'inversent, ce qui veut dire que les deux grandeurs deviennent plus bas à des températures de maturation plus élevées.

Pour l'humidité relative, il est évident de noter qu'elle joue un rôle important pour améliorer la résistance à la traction par fendage du BCR, en particulier à des températures élevées ; une humidité de cure plus élevée a entraîné une valeur plus forte de résistance. Les résultats de cette étude montrent que l'augmentation de l'humidité relative de 30 à 90% a entraîné un gain dans la résistance à la traction par fendage de 16.14, 20.75, 14.22 et 30.23% pour les températures de cure 15, 30, 45 et 60 °C respectivement.

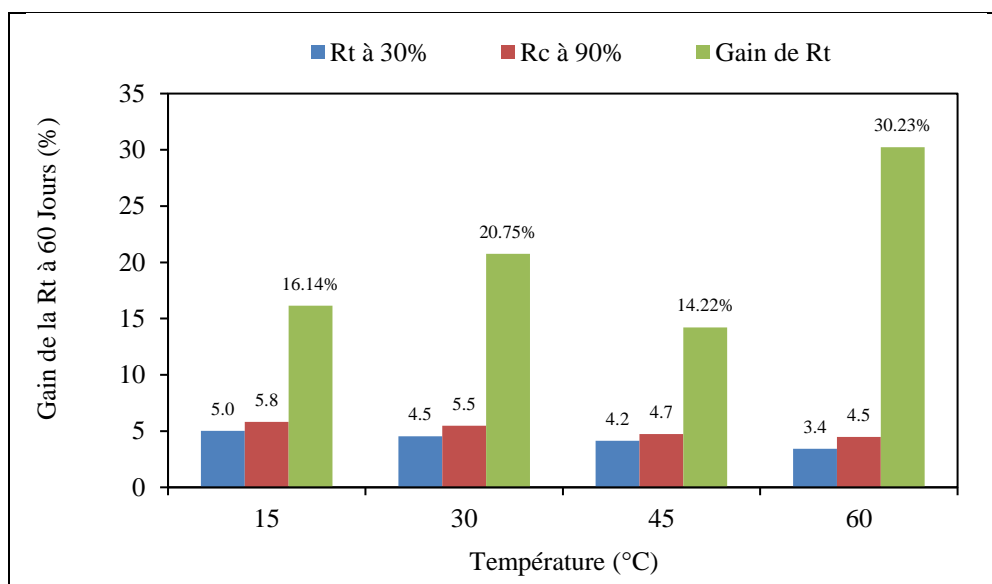


Figure IV.10 : Le gain de résistance à la traction par fendage (à 60 Jours) lorsque l'humidité augmente de 30 à 90% sous les quatre températures.

Ces résultats sont en accord avec de nombreuses études (Gerstig & Wadsö, 2010; Shoukry et al., 2011; Zhou et al., 2008) qui ont montré que la réduction de l'humidité de mûrissement peut non seulement affecter négativement la réaction d'hydratation, mais peut aussi sérieusement détériorer les propriétés mécaniques du béton. Patel et al (Patel et al., 1988) ont constaté que le durcissement dans une humidité relative inférieure à 80% d'humidité relative produisait une structure poreuse grossière avec une porosité de grand diamètre trois fois supérieure à celle obtenue avec un durcissement saturé, ce qui pourrait nuire aux propriétés mécaniques et à la durabilité du béton.

IV.3.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité en compression du BCR est déterminé à partir de la courbe contrainte-déformation. Il est calculé généralement, comme pour les bétons ordinaires, à 40% de la contrainte à la compression (contrainte ultime dans un essai de compression uniaxiale). L'essai a été réalisé suivant le mode opératoire de la norme (ASTM C 469-02, 2002). Le module d'élasticité en fonction de la température et l'humidité relative est illustré dans la Figure (IV.11).

Les résultats obtenus, montrent que l'augmentation de la température a un effet négatif sur le module d'élasticité en compression quelle que soit l'humidité de cure. Il varie de 34.2 à 22.6 GPa pour une humidité de 30%, 35.0 à 24.9 GPa pour une humidité de 50%, 38.3 à 28.0 GPa pour une humidité de 70%, 40.1 à 30.6 GPa pour une humidité de 90%, lorsque la température augmente de 15 à 60°C. Cela signifie qu'il a perdu 34, 29, 27 et 24% de sa valeur pour tous les niveaux d'humidité de cure (30, 50, 70 et 90%) respectivement. En effet la réduction du module élastique en compression, est due à la capacité de la température à augmenter la fragilité du BCR. Ces résultats sont similaires à ceux d'autres chercheurs (Li et al., 2012; Xiao & König, 2004; Yüksel et al., 2011).

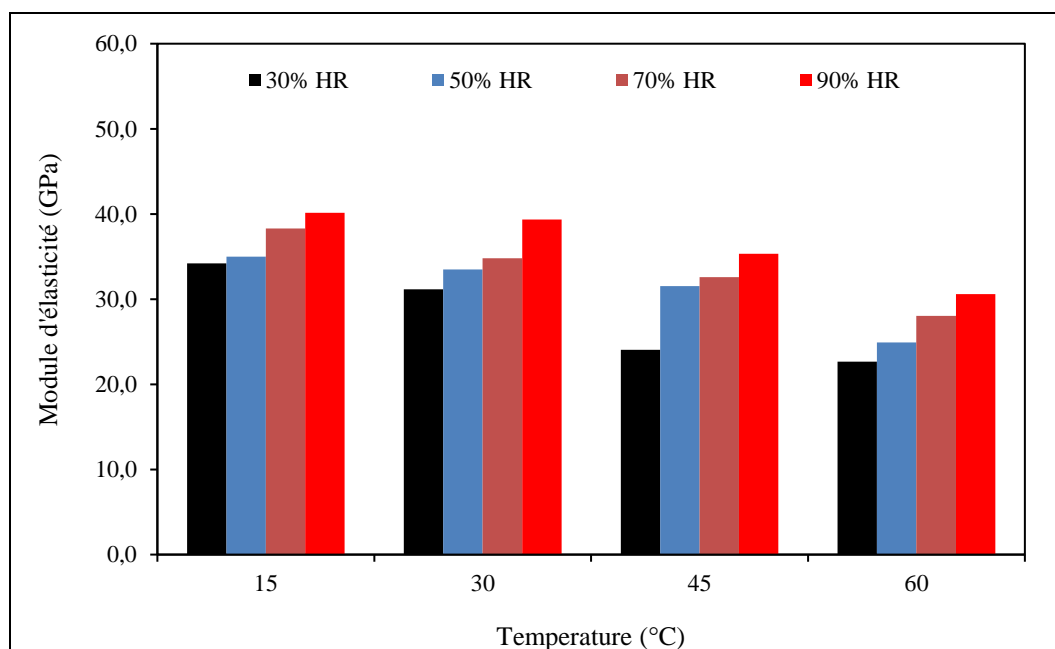


Figure IV.11 : Module élastique en compression en fonction de la température et l'humidité relative.

En ce qui concerne l'humidité relative, les données développées dans cette étude montrent l'effet positif de cette dernière sur le module d'élasticité, car l'augmentation de

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

l'humidité de 30% à 90% a conduit à une amélioration du module d'élasticité de 17.3, 26.4, 47.0 et 35.1% pour les quatre températures de cure (15, 30, 45 et 60) respectivement (figure IV.12).

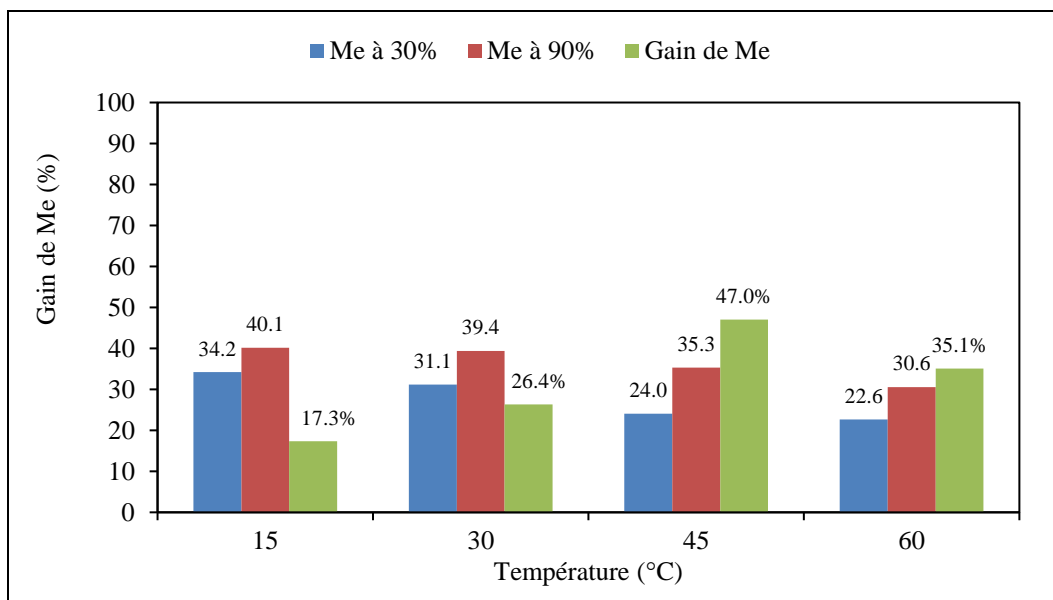


Figure IV.12 : Gain de module élastique en compression lorsque l'humidité augmente de 30 à 90% sous les quatre températures.

Beaudoin et al ([Beaudoin et al., 2010](#)) ont observé que le module d'élasticité statique en compression diminue de manière significative avec la réduction de l'humidité relative, en particulier en dessous de 20% HR. En outre, ils ont également signalé que le module d'élasticité montre une réponse non linéaire en ce qui concerne l'humidité relative et qu'elle dépend de l'historique du séchage. Ceci est également confirmé par Alizadeh et al ([Alizadeh et al., 2011](#)), qui ont également signalé que le béton perd son module d'élasticité s'il était exposé à une humidité réduite et ont émis l'hypothèse qu'une telle réduction pourrait être attribuée à la micro-fissuration et à d'autres phénomènes à l'échelle microscopique, tels qu'une porosité élevée.

Les courbes de contrainte-déformation du RCR durci dans différents milieux environnementaux sont illustrées à la figure (IV.13), initialement avant d'atteindre la contrainte maximale, tous les mélanges ont un comportement similaire. Après avoir atteint la contrainte maximale, les mélanges durcis dans une température élevée ont soudainement atteint leur point de rupture sans beaucoup de déformation et avec une contrainte plus faible. Alors que pour les mélanges durcis dans les milieux d'humidité élevée, ils subissent une

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

déformation prolongée avant rupture avec un effort de contrainte maximal plus élevé. Ceci démontre également comment l'humidité augmente le comportement de ductilité du RCR.

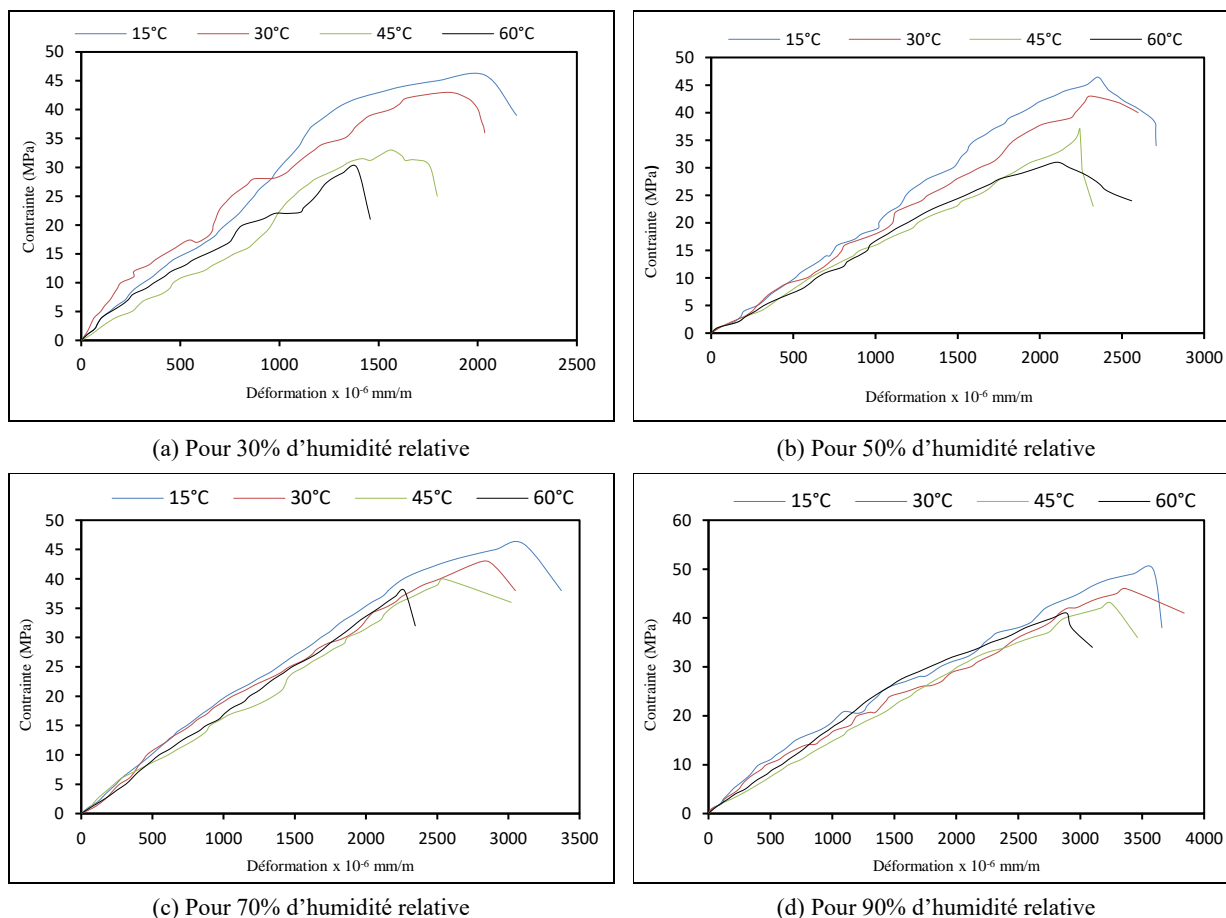


Figure IV.13 : Courbes de contrainte-déformation du RCR durci dans les différentes conditions climatiques.

IV.3.4 Résistance à l'abrasion Cantabro

La résistance à l'abrasion est un paramètre très important pour la caractérisation du BCR, en raison de sa surface qui est toujours sujette à l'usure des pneus des véhicules, en particulier dans les sections où le freinage est abondant. La résistance à l'abrasion est déterminée à l'aide de la perte de Cantabro, plus le pourcentage de perte de poids est faible, plus la résistance à l'abrasion est élevée.

Les résultats de la résistance à l'abrasion sont présentés à la figure (IV.14). L'élévation de la température a un grand effet sur la résistance à l'abrasion, où le taux de perte de poids augmente avec l'augmentation de la température pour tous les cycles de l'essai, si nous voulons classer le taux de la perte du poids du plus petit au plus grand, nous constatons que les valeurs les plus basses ont été obtenues avec le BCR durci à 15 °C, tandis

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

que les valeurs les plus grandes ont été obtenues dans le BCR durci à 60 °C quel que soit le niveau d'humidité de cure.

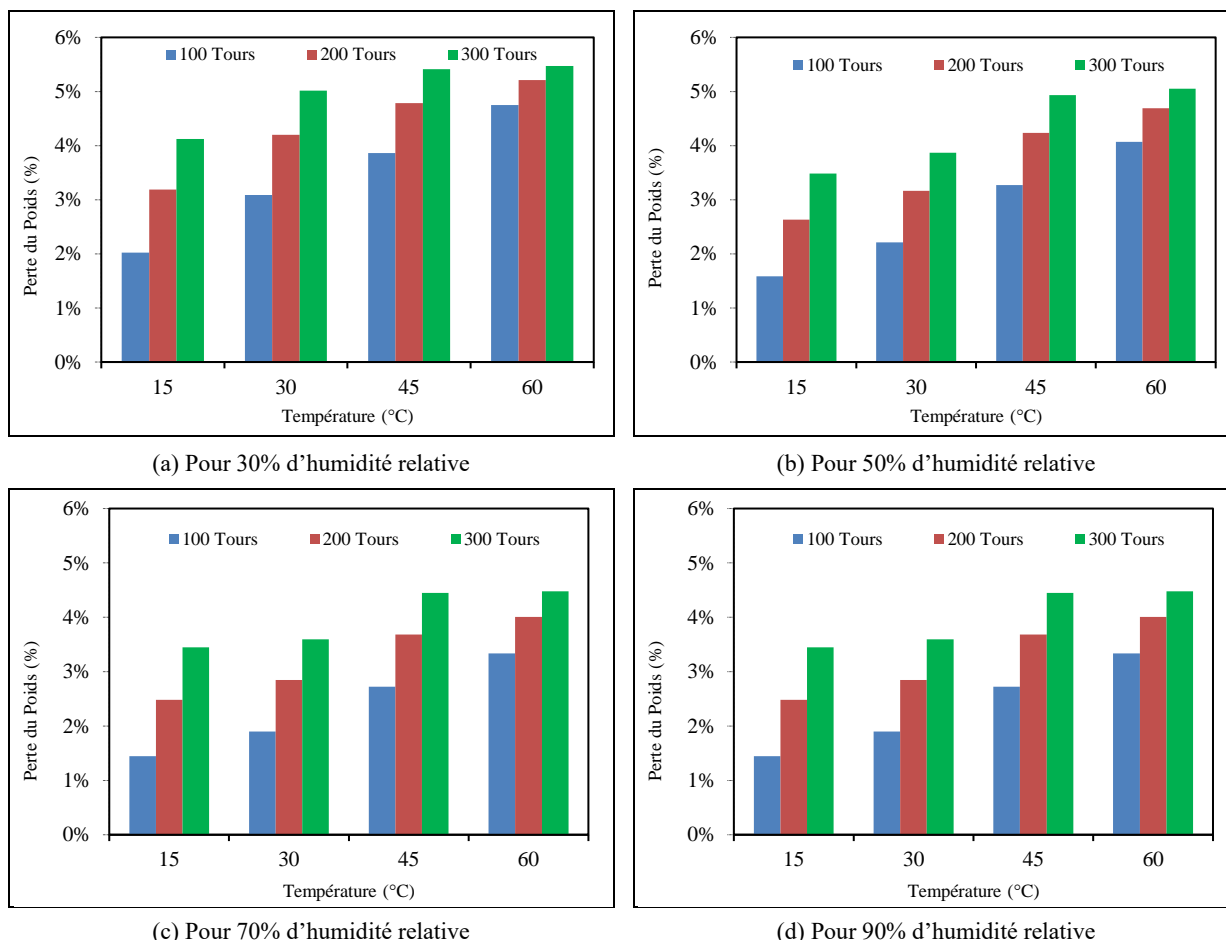


Figure IV.14 : Effet de la température et l'humidité relative sur la résistance à l'abrasion Cantabro.

Simultanément, pour tous les cycles de l'essai, les valeurs maximales du taux de perte du poids ont été trouvées dans le BCR durci à 30% d'humidité relative, alors que les valeurs minimales ont été trouvées dans le BCR durci à 90% d'humidité relative quel que soit la température de cure. Cela justifie l'effet positif de l'augmentation de l'humidité relative sur la résistance à l'abrasion du BCR.

Généralement, les mauvais résultats ont été remarqués dans le BCR durci dans les conditions chaudes-sèches, ceci peut expliquer par l'élévation de la température et la diminution de l'humidité relative entraînant une forte évaporation de l'eau qui provoque une mauvaise hydratation de ciment. Ce qui à son tour conduit à une mauvaise adhérence entre le ciment et les granulats.

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

Jensen et al (Jensen et al., 1999) ont révélé que le degré d'hydratation est plus faible avec une humidité relative inférieure et presque aucune hydratation ne se produit en dessous de 43% HR. L'hydratation incomplète affecte négativement l'adhérence entre la pâte de ciment et les agrégats, ce qui affecte négativement la résistance à l'abrasion.

Les résultats de cette étude montrent aussi que l'effet de ces deux facteurs n'était pas seulement à la surface, car dans tous les cycles de tours, la valeur maximale du taux de perte du poids a été trouvée dans le BCR durci à la température la plus élevée et l'humidité relative la plus basse. Ceci est dû à l'hydratation de la partie interne du BCR qui a été gêné, car l'eau des pores a été perdue progressivement à travers la surface de séchage (Mi et al., 2018).

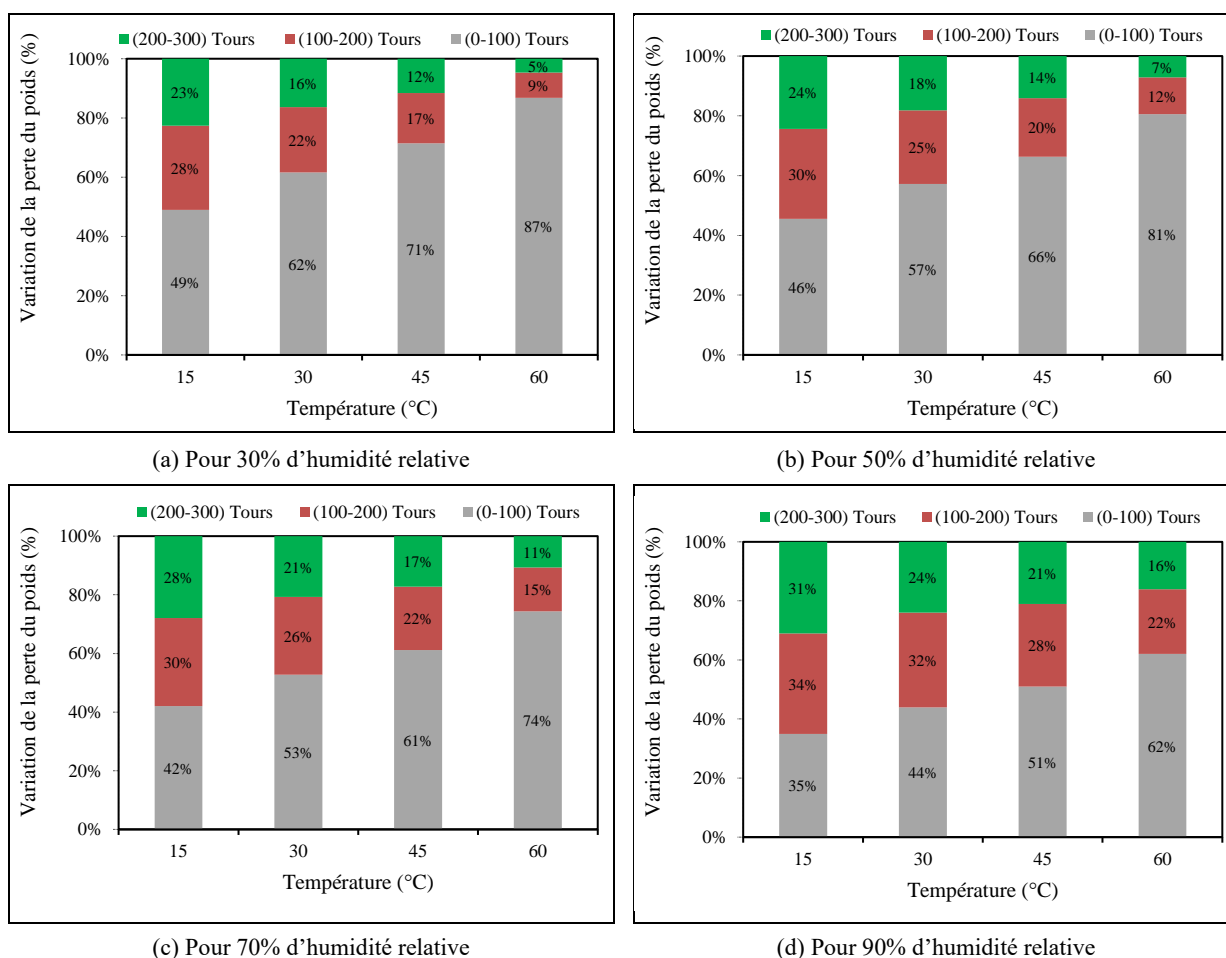


Figure IV.15 : Effet des différentes conditions de durcissement sur la perte du poids en fonction des cycles de tours.

Cependant, de la surface à l'intérieur, l'effet de ces deux facteurs sur la résistance à l'abrasion du BCR n'a pas été le même. La figure (IV.15) représente la variation de la perte du poids du BCR dans les intervalles des tours 0-100, 100-200 et 200-300 tours. Dans cette figure, on remarque que le taux le plus grand de la perte du poids a été enregistré dans le premier cycle notamment pour le BCR exposé aux conditions chaudes-sèches, cependant, à mesure que la

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

température diminue et que l'humidité augmente, la variation de perte de poids devient plus équilibrée (35, 34 et 31% pour les trois cycles de tours 0-100, 100-200 et 200-300 respectivement pour une température de cure 15°C et une humidité relative 90%). Cela est dû au fait que la surface est plus sujette au dessèchement et cela conduit à des réactions d'hydratation incomplètes.

IV.3.5 Retrait

Les changements de volume, sont fortement liés à la teneur en humidité. Le retrait de séchage commence très tôt, immédiatement après la mise en place du béton et est causé par l'évaporation de l'eau de sa surface. L'effet de ce phénomène de retrait est très important dans le cas de surfaces de béton plates, telles que les fondations, les dalles et les pavés, avec un rapport surface / épaisseur élevé, où la perte d'eau peut être importante, en particulier par vent fort ou à température élevée.

Les évolutions du retrait en fonction du temps pendant 60 jours, sous différentes conditions de durcissement, sont données sur la figure (IV.16).

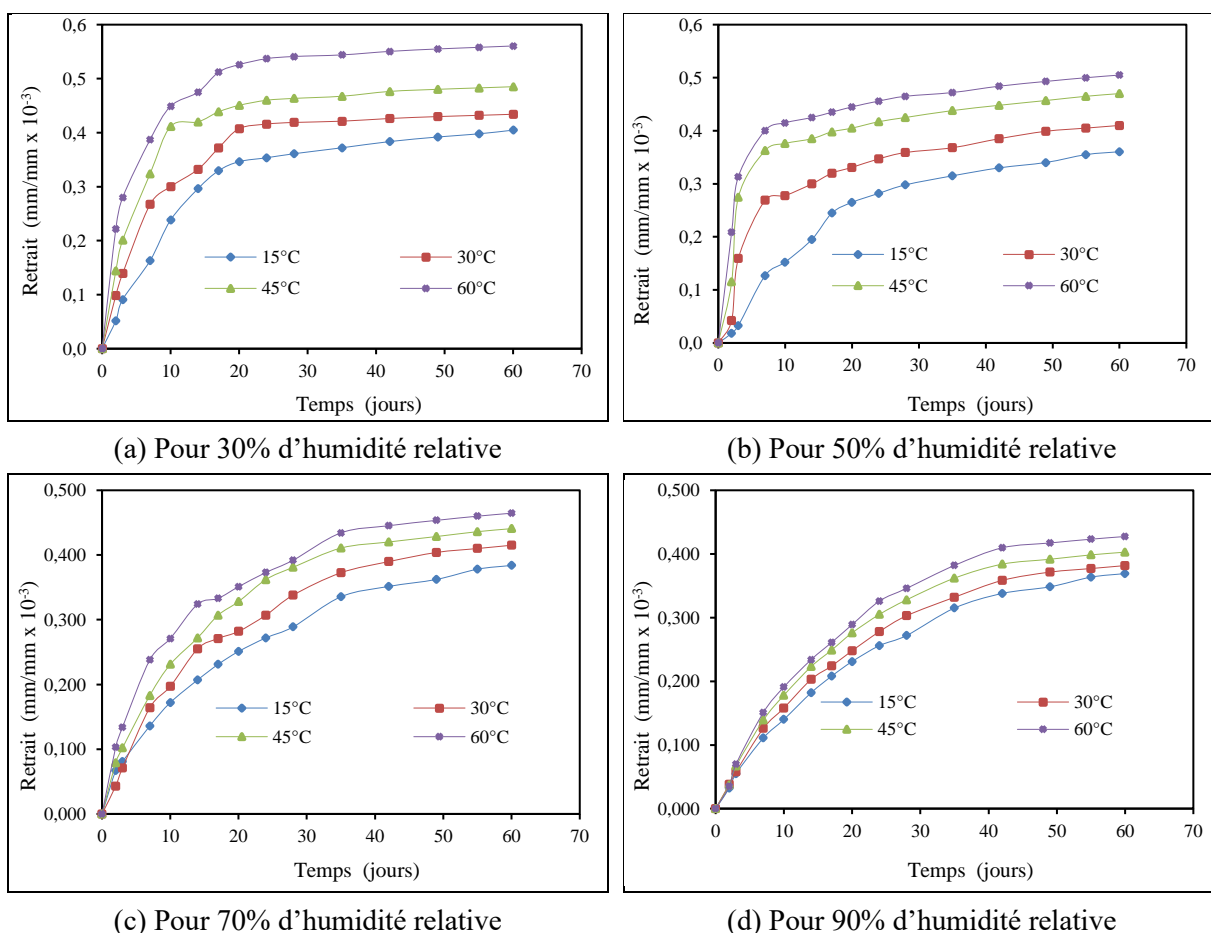


Figure IV.16 : Evolution du retrait du BCR en fonction du temps sous tous les milieux environnementaux.

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

La déformation du retrait de séchage présente un comportement similaire dans tous les milieux de conservation, où il augmente avec l'âge dans toutes les éprouvettes indépendamment des conditions de durcissement. Cependant, la vitesse et la grandeur du retrait varient de façon significative avec la température de durcissement. En général, une température de durcissement plus élevée entraîne un retrait plus important. Les influences de la température de durcissement sont beaucoup plus importantes aux âges plus tôt qu'aux âges plus tardifs. De même, les influences de la température élevée sur le retrait sont plus évidentes dans les mélanges du BCR durci dans des milieux à plus faible humidité relative que ceux durcis dans des milieux avec une humidité plus élevée.

On peut aussi voir qu'à faible humidité relative (figure IV.16 (a)), à jeune âge le taux de retrait total est accélère à température ascendante, où à température 60°C le retrait à 7 jours atteint 69% du retrait total (60 jours), tandis qu'à 15°C le retrait à 7 jours ne dépasse pas 40% du retrait total. En fait, l'augmentation de la température augmente le risque de microfissures et de macro-fissures à jeune âge, ce qui augmente le taux et l'ampleur du retrait total (Chu et al., 2012; Maruyama & Teramoto, 2013).

La figure (IV.17) montre clairement l'effet négatif de l'augmentation de la température sur le retrait, car plus la température est élevée, plus le retrait est important. On peut également voir que sous une température plus élevée, l'effet de l'humidité devient plus efficace, où à une température de 15°C, on constate que l'effet de l'humidité relative n'est pas complètement net, alors qu'à une température de 60°C, l'augmentation de l'humidité relative a entraîné une diminution significative du retrait. Ces effets sont dus au fait que l'élévation de la température provoque l'accélération de l'hydratation et une distribution non uniforme de CSH, ce qui conduit à une augmentation de la porosité à un âge précoce. Cette augmentation de densité de CSH provoque un changement dans la taille des pores capillaires, où le nombre de pores de plus petit rayon sera plus important pour une température plus élevée. (Bouziadi et al., 2016; Juarez et al., 2015).

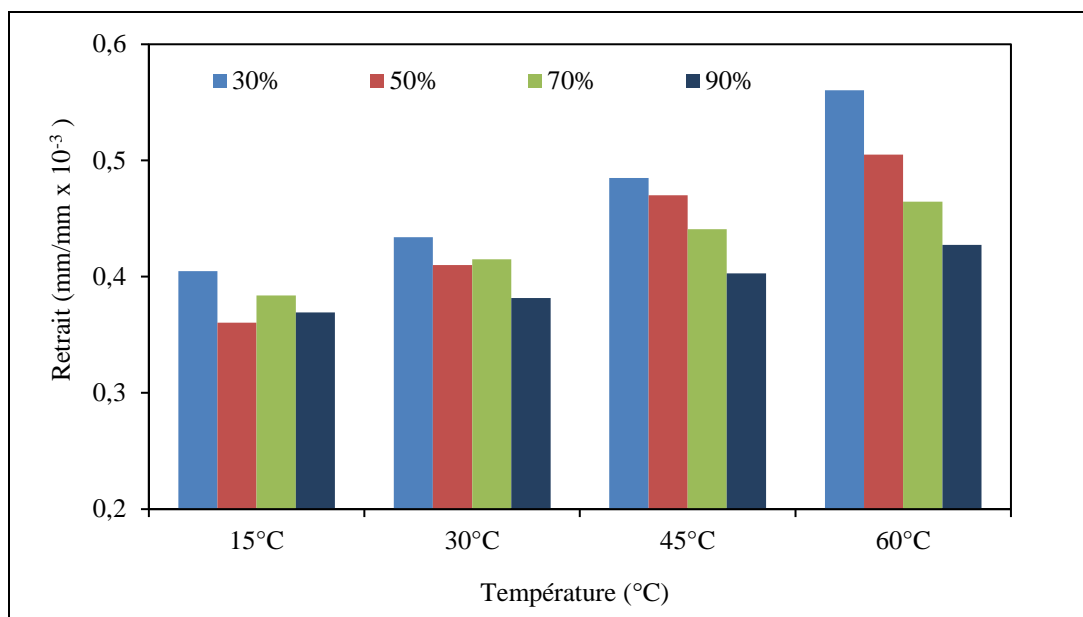


Figure IV.17 : Effet de la température et de l'humidité relative sur le retrait total du BCR.

En revenant à la figure (IV.16), l'effet de l'humidité sur le retrait du béton est clairement illustré par la forme des courbes, car à faible humidité relative, on constate deux intervalles dans la courbe du retrait, une pente raide avant 7 jours, ce premier intervalle dure plus longtemps en BCR durci à 15°C. Dans la deuxième période, la courbe enregistre une variation légère dans les BCR traité à température plus élevée indiquant presque une stabilisation. Alors qu'avec une humidité relative plus élevée les courbes deviennent plus modérées, où l'on observe, par exemple, à 90% d'humidité relative des courbes avec un seul stade. On peut également remarquer que la différence entre les courbes de retrait commence à diminuer à mesure que l'humidité relative augmente, par exemple la différence du retrait total entre le BCR durci à 15°C et le BCR durci à 60°C est 0.155×10^{-3} (mm/mm) pour 30% d'humidité relative et 0.058×10^{-3} (mm/mm) pour 90% d'humidité relative.

Le retrait de séchage total (à 60 jours) a augmenté de 7.3, 11.8 et 15.6% pour 30% d'humidité relative, 13.7, 14.6 et 7.4% pour 50% d'humidité relative, 8.1, 6.2 et 5.4% pour 70% d'humidité relative et 3.4, 5.5 et 6.1% pour 90% d'humidité relative aux intervalles de température (15-30, 30-45 et 45-60°C) respectivement (figures IV.18), Donc, ces variations de retrait ne sont pas proportionnelles aux différences de température. Cette différence peut s'expliquer par le mécanisme d'hydratation et le potentiel des différentes réactions du ciment et leurs relations avec la température (Bjøntegaard et al., 2004; Jiang et al., 2014).

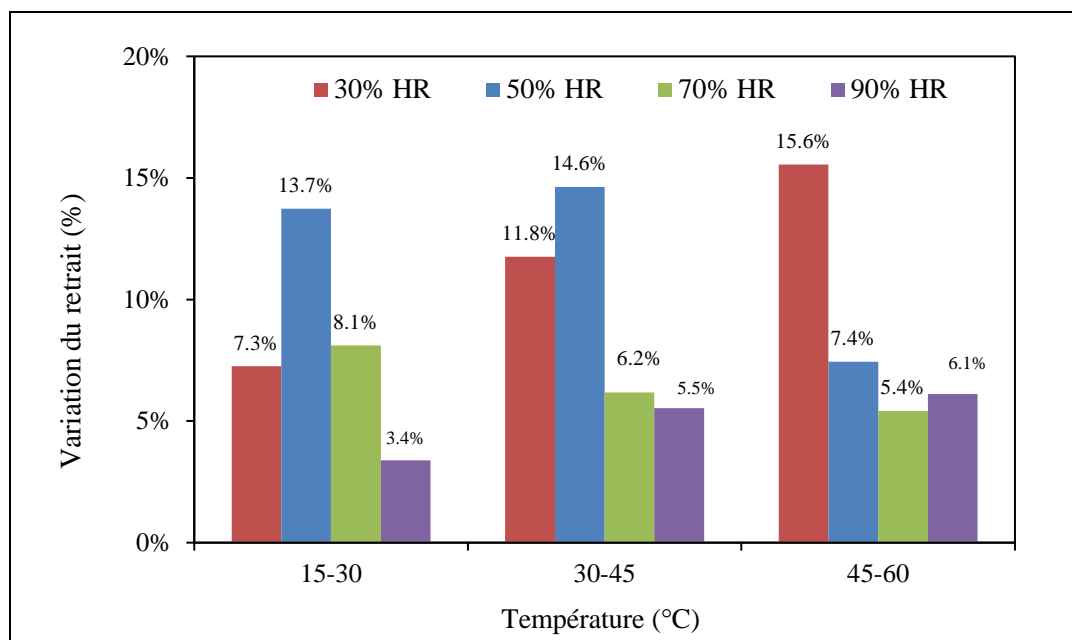


Figure IV.18 : Variations du retrait aux intervalles de la température 15-30, 30-45 et 45-60°C.

Ces constatations sont affirmées par Lura et al (Lura et al., 2001) lorsqu'ils ont travaillé avec différents types de ciments avec l'introduction de la fumée de silice et avec un rapport E/C=0.35. Ils ont constaté que les températures élevées provoquent un développement plus rapide du retrait sans que ces températures engendrent des déformations plus importantes. Yang et al (Yang et al., 2014) dans leur travaux menés sur des bétons à différents rapports E/C traités à différentes températures (20, 35, 50, 60°C), ont conclu que les températures élevées accélèrent la vitesse d'hydratation du ciment, cette hydratation génère une évaporation supplémentaire ce qui diminue l'humidité relative interne conduisant à l'augmentation de la déformation du béton. Chu et al (Chu et al., 2012) ont conduit des travaux avec des températures de cure de (20, 30, 40°C) sur des bétons avec un rapport E/C de (0.3, 0.4, 0.5). Ils ont constaté le même phénomène et déclaré que l'augmentation de la température engendre une accélération de la réaction d'hydratation conduisant à son achèvement rapide.

IV.3.6 Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est une propriété hydrique qui témoigne de la capacité du béton à absorber une quantité d'eau par unité de temps et de surface, lorsqu'une seule face est en contact direct avec de l'eau. Les échantillons utilisés dans ce travail, sont des éprouvettes

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

cubiques (100x100x100 mm) séchées jusqu'à une masse constante dans une étuve à 105°C, et elles sont ensuite immergées dans une nappe d'eau de hauteur 2mm durant 72 h.

L'évolution de l'absorption capillaire de l'eau du BCR avec le temps à différentes conditions de durcissement est représentée dans la figure (IV.19). Cette figure indique que l'absorption capillaire d'eau a évolué d'une façon similaire pour toutes les conditions de conservation.

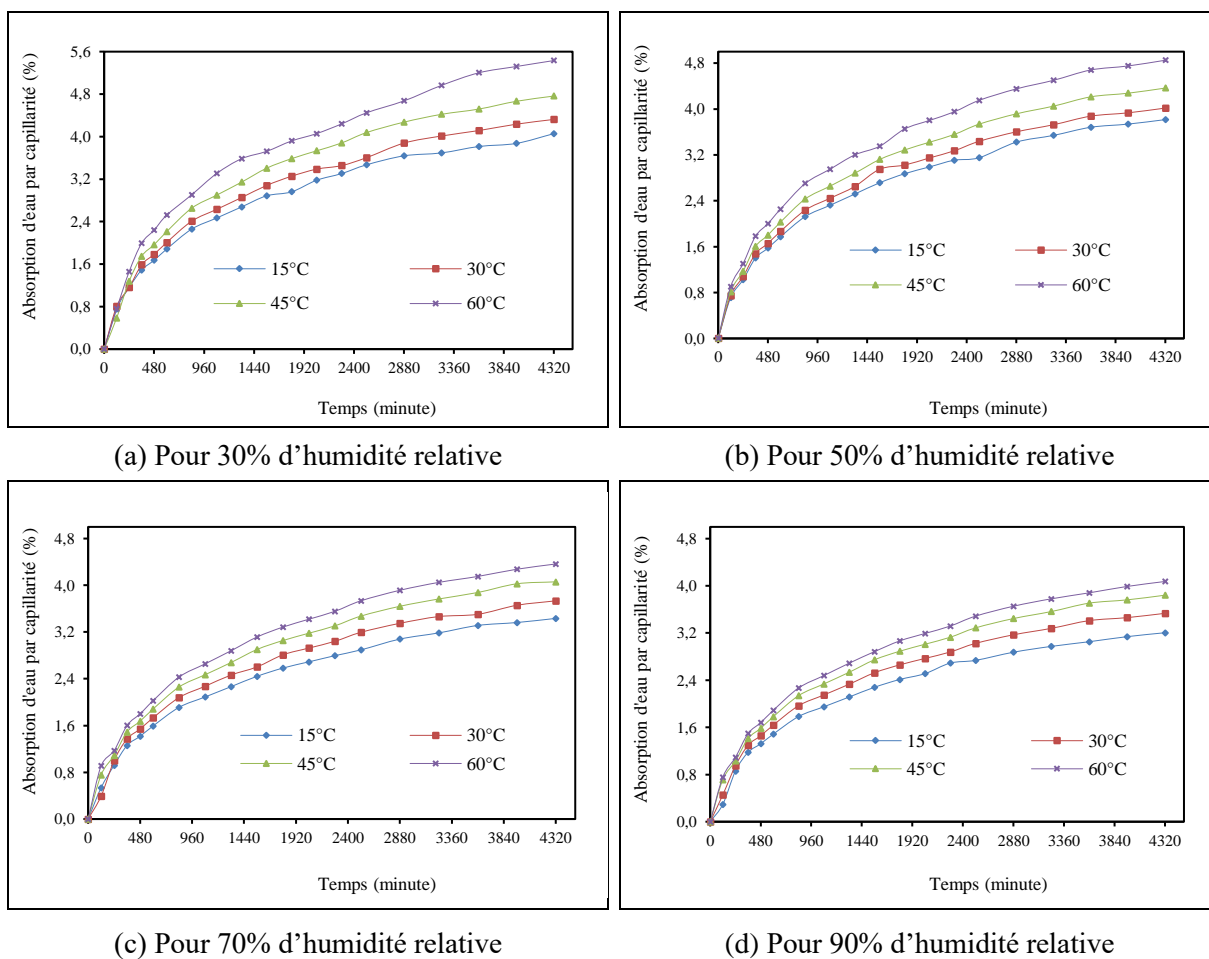


Figure IV.19 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité du BCR en fonction du temps.

Comme les paramètres précédents, l'absorption est très sensible aux conditions de maturation où l'élévation de la température augmente l'absorption capillaire de l'eau. Joshaghani et al (Joshaghani et al., 2018) ont indiqué que l'augmentation de la température provoque des fissures dans la microstructure du matériau cimentaire, conduisant à l'accroissement de l'absorption ceci est due à la distribution hétérogène du gel CSH au cours de l'hydratation du ciment. Pinto et al (Pinto et al., 2018) s'accordent à dire qu'à une température élevée, l'évaporation de l'eau est plus rapide provoquant des microfissures dans le béton contribuant ainsi à l'augmentation de l'absorption d'eau, contrairement à une

température plus basse où la perte d'eau est plus lente réduisant le développement de microfissures. Goto et Roy, (Goto & Roy, 1981) dans leur étude lorsqu'ils travaillaient sur des pâtes durcies à 27 et 60°C déclarent que la perméabilité des échantillons durcis à 60°C, est supérieure à celles durcis à 27°C, car le volume des pores supérieur à 750Å est plus grand à 60°C.

Les résultats permettent également de mettre en évidence l'effet bénéfique de l'humidité relative sur la réduction de l'absorption d'eau. En effet, l'humidité relative a un effet sur la progression des réactions d'hydratation qui conduisent au colmatage des capillaires existants (Balayssac et al., 1998).

IV.4 Amélioration des propriétés du BCR

Après avoir connu l'effet négatif de la température élevée et de la faible humidité relative sur le BCR et pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques et physiques, un traitement a été fait sur le BCR, ce traitement se fait en deux méthodes :

La première consiste à appliquer trois méthodes de cure traditionnelle et technique. Ces méthodes consistent à placer les éprouvettes directement sous l'eau (PW), sous toile de jute humide (PB) et l'application d'un produit de cure, qui est le MEDACURE (PM), à un milieu de (45 °C et 50 HR) pour simuler l'environnement saharien pendant la journée. Ces régimes de cure ont été appliqués après 24h (après démoulage) pendant 13 jours puis retirés. A partir de 14^{ème} jour, les éprouvettes poursuivent leur maturation en chambre climatique à (45 °C et 50% HR). Ceux-ci sont illustrés ci-dessous :

- PW : Immersion totale dans l'eau à une température de 45 °C pendant 13 jours, puis les éprouvettes ont été placées dans des conditions de (45 °C et 50% HR) jusqu'à la date de l'essai.
- PB: Recouvrement des éprouvettes avec une toile de jute humide pendant 13 jours dans des conditions de (45 °C et 50% HR), puis la toile de jute a été retirée et les éprouvettes ont été conservées dans les mêmes conditions.
- PM : Application du MEDACURE pendant 13 jours à milieu de (45 °C et HR 50 %), puis le produit de cure a été retiré et les éprouvettes ont été placées dans les mêmes conditions.

La deuxième vise à étudier l'effet de l'incorporation de la fumée de silice dans le BCR en remplacement partiel du ciment avec différents pourcentages ; 3, 6 et 9%. Les éprouvettes préparées à cet effet ont été placées à (45 °C et 50 HR), et nommés respectivement PSF3,

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

PSF6 et PSF9. En résumé, la procédure expérimentale suivie est présentée dans le tableau (IV.1).

Tableau IV.1 : Les différentes proportions de mélange après l'ajout de la fumée de silice

Mélange	Constituant (kg/m ³)							
	FS (%)	T (°C)	HR (%)	Ciment	Sable	G 3/8	G 8/15	G 15/20
PW				300				
PB				300				
PW		45	50	300	821	588	392	196
PSF3	3			291				
PSF6	6			282				
PSF9	9			273				

Enfin, tous les résultats obtenus à partir de ce traitement sont comparés aux résultats obtenus à partir de BCR traité à 45°C et 50 % d'humidité relative (P45).

IV.4.1 Par l'application des modes de cure

IV.4.1.1 Résistance à la compression

La figure (IV.20), illustre la résistance à la compression de 60 jours des éprouvettes du BCR traité par différents régimes de cures à une température de 45°C et 50% d'humidité relative.

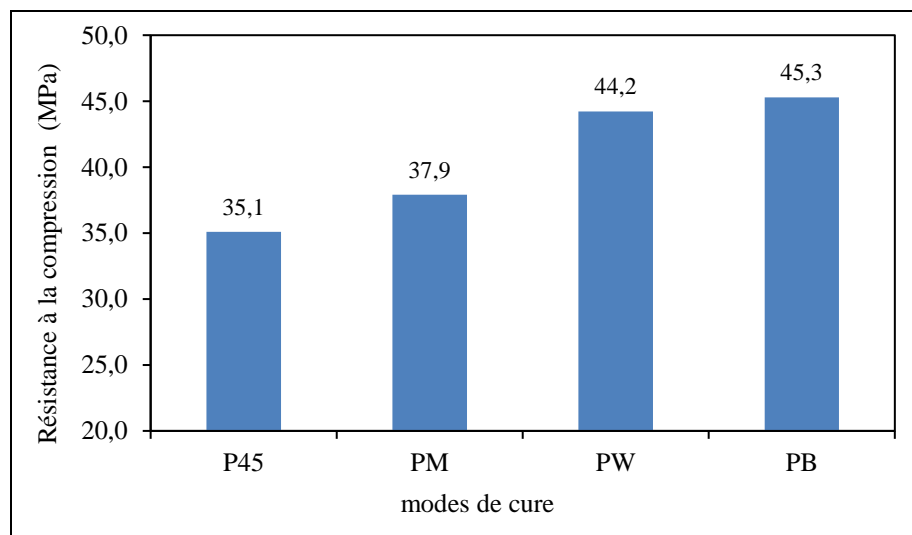


Figure IV.20 : Effet des modes de cure sur la résistance à la compression du BCR.

D'après cette figure on remarque que les trois modes de cure améliorent considérablement la résistance à la compression du BCR. Cette amélioration est de 8% pour le

PM, 26% pour le PW et 29% pour le PB par rapport le P45. La différence de la résistance entre PB et PW n'est pas significative, tandis que la différence de la résistance entre les éprouvettes durcis par ces deux modes de cure et les éprouvettes durcis par l'application du produit de cure (PM) est significative, ceci peut s'expliquer par le fait que les méthodes de cure humide réduisent la dessiccation du béton et fournissent au béton de l'eau pour le processus de l'hydratation (Deghfel et al., 2019). Ces constatations sont en accord avec des recherches menées par (Al-Gahtani, 2010; Bushlaibi & Alshamsi, 2002).

Bushlaibi et Alshamsi (Bushlaibi & Alshamsi, 2002) ont exposés un béton à haute résistance à différentes méthodes de cure où ils ont constaté une influence significative des méthodes de cure sur la résistance à la compression avec une préférence à l'intérieur d'une chambre climatique qu'à l'extérieur. Al-Gahtani (Al-Gahtani, 2010) a exposé ces bétons d'étude à des cures sous une toile de jute, immersion dans l'eau et l'application d'un film d'acrylic où il a trouvé que la résistance à la compression sous une toile de jute enregistre la meilleure. Néanmoins, tous ces auteurs ont constaté que l'immersion sous l'eau des éprouvettes de bétons n'enregistre pas la meilleure résistance, ceci est dû à la pression hydrostatique interne dans les pores. Cependant, Wasserman et Bentur (Wasserman & Bentur, 2013) dans leur étude ont indiqué que l'effet de la cure déficiente sur les caractéristiques de pénétration est beaucoup plus grand que celui sur la résistance, et par conséquent la résistance ne peut pas être utilisée efficacement comme moyen d'évaluation des performances de durcissement vis-à-vis aux caractéristiques de durabilité. Ils ont également signalé que la cure avec un tissu humide était efficace que le cure à l'eau standard en ce qui concerne la résistance.

IV.4.1.2 Retrait

La figure (IV.21) montre l'effet des méthodes de cure sur le retrait du BCR durci sous une température de 45°C. Dans cette figure on remarque que la déformation de retrait augmente avec l'âge dans toutes les éprouvettes de BCR quel que soit le mode de cure.

Il est clair que l'effet des différentes méthodes de cure est positif, car ils améliorent le retrait, en particulier dans les deux premières semaines d'application, où on note une diminution de 17% pour le PM, 31% pour le PW et 29% pour le PB par rapport au BCR durci à une température de 45°C (P45) à 14 jours. Mais à 60 jours le gain de retrait a diminué de, 17 à 6%, 31 à 13% et 29 à 16% pour les trois modes de cure (PM, PW et PB) respectivement par rapport au retrait du P45 (figure IV.22). Il est intéressant également de noter qu'après les deux

CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR

premières semaines, le PW présente un retrait moins que le PM et le PB, tandis que à 60 jours la valeur minimale de retrait est attribuée au PB.

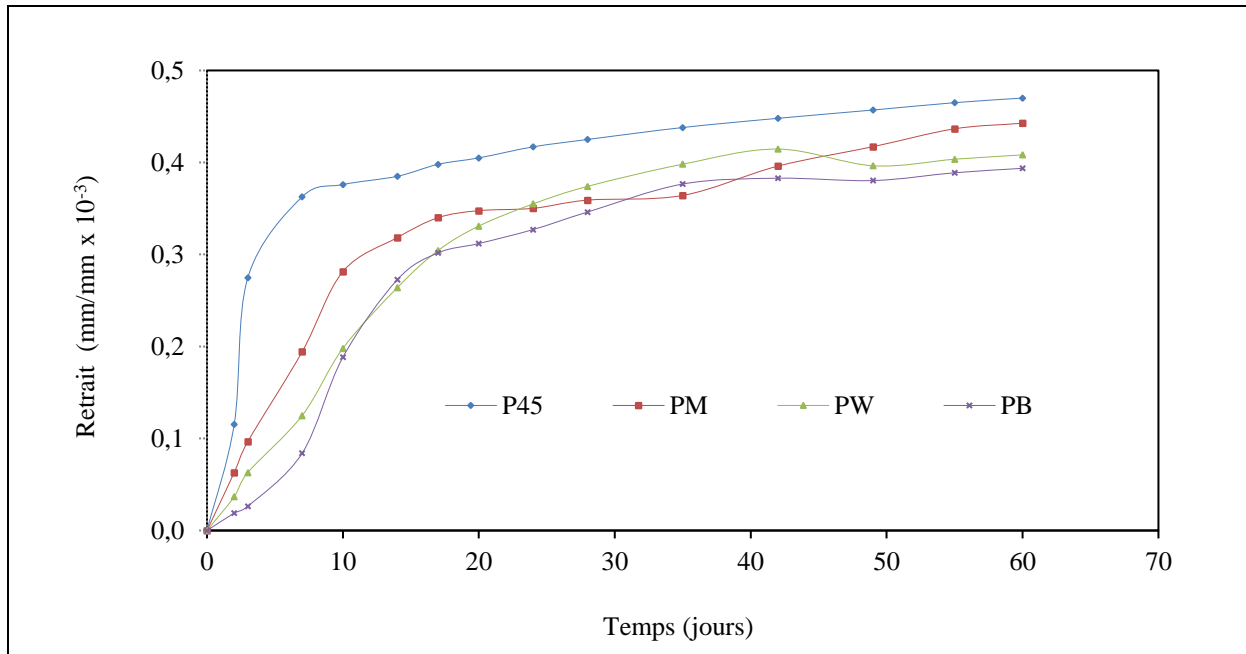


Figure IV.21 : Evolution du retrait en fonction de temps pour les différents modes de cure.

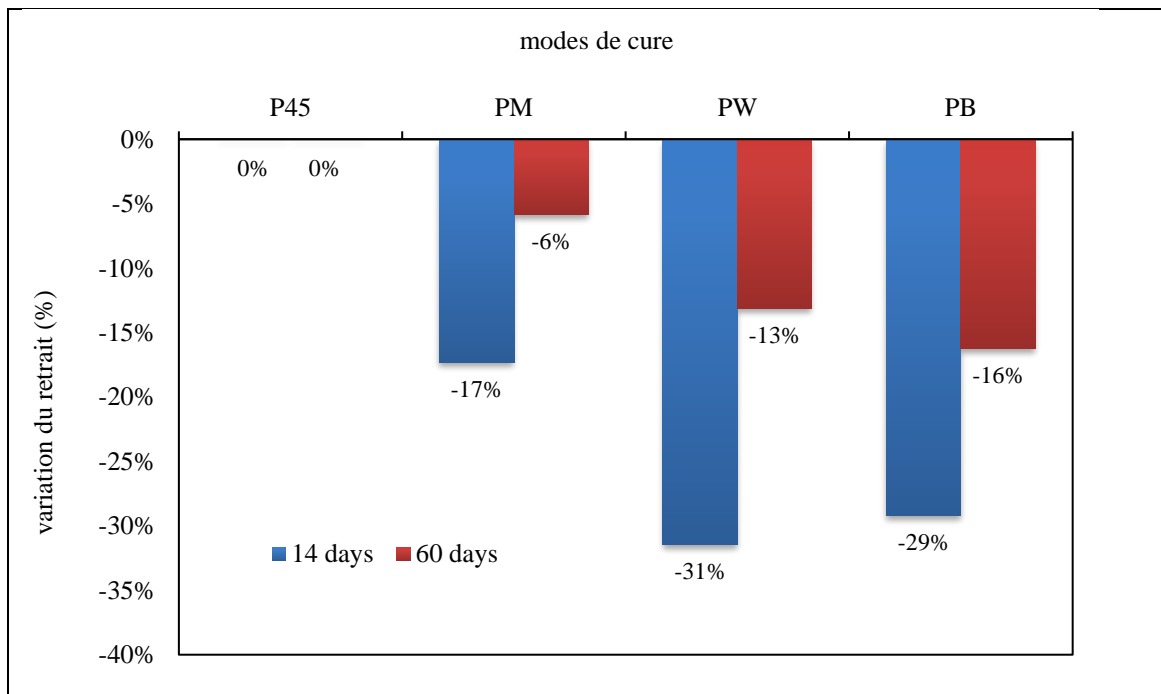


Figure IV.22 : Variations du retrait en fonction des modes de cure.

Cependant, il n'y a pas de différence significative dans le retrait du BCR durci dans l'eau et le BCR durci en le recouvrant avec de la toile de jute humide. Ici, nous pouvons

souligner que les résultats du retrait ne sont pas en conflit avec les résultats de la résistance à la compression de cette étude, car les méthodes de cure humide conservent plus d'humidité et donnent ainsi un meilleur développement à long terme de la résistance à la compression et aussi un retrait plus faible que n'importe quel mode de cure (Deghfel et al., 2019).

Généralement, on peut dire que toutes les méthodes de traitement sont utiles pour le comportement du BCR vis-à-vis du retrait en réduisant l'évaporation de l'eau et par conséquent les contraintes de traction entre les parois des pores capillaires. Ces résultats sont en accord avec d'autres résultats rapportés sur différents types de béton, notamment l'étude de Maslehuddin et al (Maslehuddin et al., 2013), où ils ont constaté la supériorité de la toile de jute humide à améliorer le retrait par rapport à d'autres méthodes. D'autre part Bella et al. (Bella et al., 2011), ont déclaré que la cure avec immersion sous l'eau peut éliminer les particules fines du ciment. McCarter et Ben-Saleh (McCarter & Ben-Saleh, 2001), ont révélé que les bâches en plastique réduisent la perte totale d'eau d'un ordre de 4 fois au cours des 6 premières heures par rapport aux éprouvettes non couvertes et grâce à la nature fibreuse de la toile de jute elle est imperméable au flux d'air ainsi elle réduit le retrait comme un bâche en plastique.

IV.4.2 Par L'ajout de la fumée de silice

IV.4.2.1 Résistance à la compression

La figure (IV.23) présente l'effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression du BCR durci sous 45°C et 50% HR. Cette figure montre que l'incorporation de la fumée de silice améliore la résistance à la compression du BCR. Le remplacement de 3% du ciment par de la fumée de silice n'est pas d'effet significatif sur la résistance à la compression (une augmentation de 2,1%), tandis que l'addition de 6 et 9% de fumée de silice a considérablement augmenté la résistance à la compression du BCR (11,9% et 24% respectivement). Ces observations indiquent que effet de la température négatif peut être réduit en ajoutant de la fumée de silice (Deghfel et al., 2019). Des résultats similaires ont été rapportés par de nombreuses études menées sur différents types de béton, tels que l'étude de Bhanja and Sengupta (Bhanja & Sengupta, 2005), lorsqu'ils ont travaillé sur des bétons à fumée de silice avec un rapport E/C entre 0.26 et 0.42, et l'étude de A. Mohamed (Mohamed, 2011) lorsqu'elle a varié différent pourcentage de fumée de silice et cendre volante (25 types de bétons).

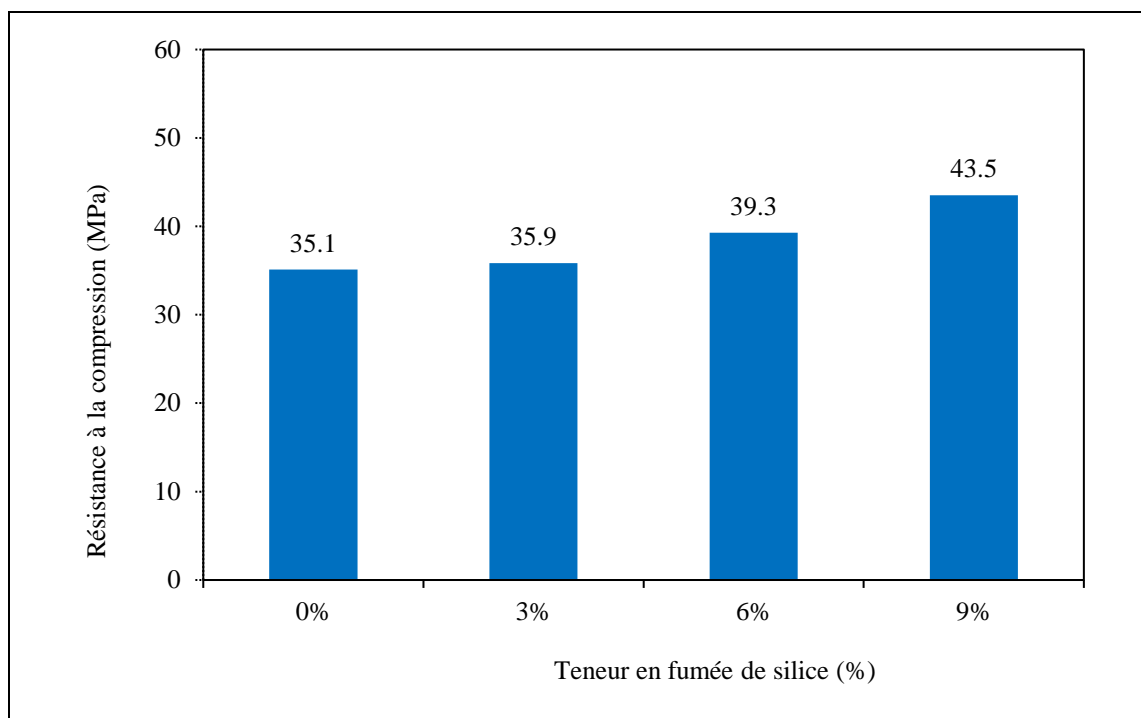


Figure IV.23 : Effet de la teneur en fumée de silice sur la résistance à la compression.

La fumée de silice est un matériau cimentaire supplémentaires pouzzolanique PSCM (Pozzolanic Supplementary Cementitious Materials), elle accélère la réaction d'hydratation des minéraux cimentaires et remplit l'espace entre les vides des grains de ciment ce qui rend la pâte cimentaire plus dense. La fumée de silice rend la phase de transition entre la pâte de ciment et les granulats plus compact ce qui implique une augmentation de la résistance mécanique (Taylor, 1997). Dans cette zone entourant les agrégats, le rapport E/C est plus élevé, ce qui favorise la dissolution des composants cimentaires, ainsi l'hydroxyde de calcium et le gel de silicate de calcium hydraté forment un film d'environ 1 μ m d'épaisseur (Kurdowski, 2014).

Xuan et al (Xuan et al., 2009) ont constatés que la résistance est élevé avec l'augmentation du taux de fumée de silice, mais au-delà de 9% l'amélioration devient stable.

IV.4.2.2 Retrait

La figure (IV.24) présente l'effet de la fumée de silice sur le retrait du BCR durci sous 45°C et 50% HR avec le temps. Dans cette figure, on remarque que la déformation de retrait augmente avec l'âge dans tous les types de PSF indépendamment de la teneur en fumée de silice. On peut également noter que l'augmentation de la teneur en fumée de silice dans le BCR affecte négativement les valeurs finales du retrait, où l'augmentation de la teneur en fumée de silice provoque l'augmentation du retrait (Deghfel et al., 2019).

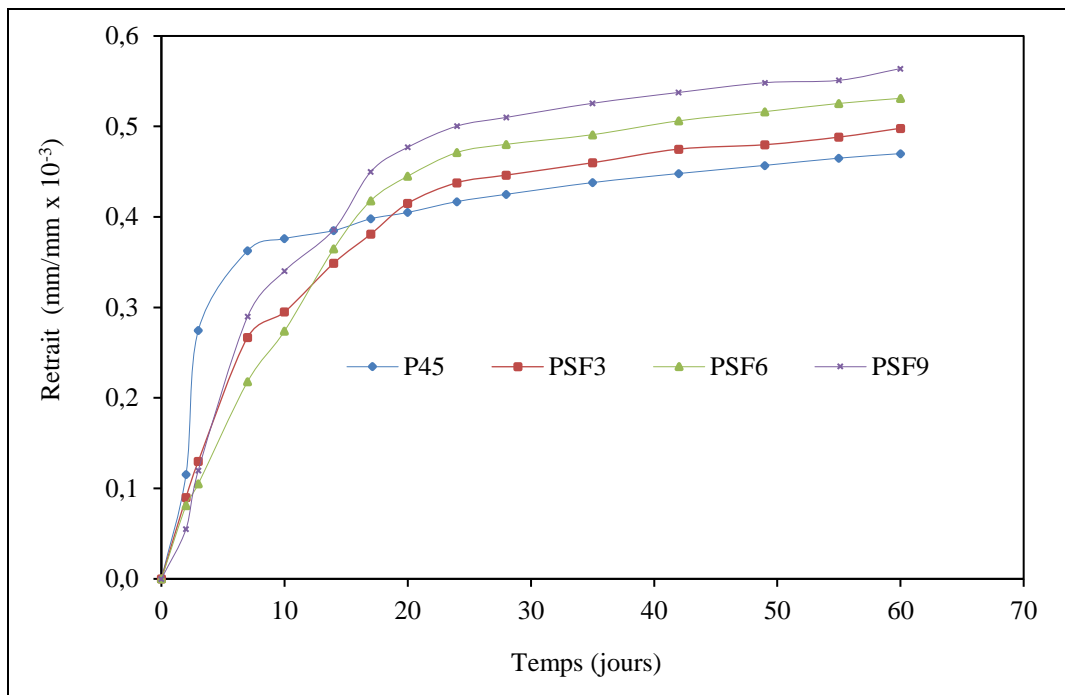


Figure IV.24 : Effet de la teneur en fumée de silice sur le retrait.

Cette même remarque a été constatée par Alamoudi et al ([Al-Amoudi et al., 2007](#)) lorsqu'ils ont travaillé sur des dalles de $3 \times 3 \text{m}^2$ et $5 \times 5 \text{m}^2$, avec un béton à 8% de fumée de silice où ils ont constatés le retrait dans les dalle en béton de ciment de fumée de silice est supérieures à celles des dalle en béton de ciment ordinaire. Hooton ([Hooton, 1993](#)) a indiqué que le retrait du béton à faible pourcentage de fumée de silice n'augmente pas beaucoup, tandis que le béton avec un pourcentage plus élevé de fumée de silice présente une augmentation considérable du retrait.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet du changement de la température de cure et l'humidité relative sur les propriétés mécaniques et physiques du BCR routier. Les résultats obtenus montrent que les propriétés du BCR ont été affectées suite à l'élévation de la température et la diminution de l'humidité relative.

Les résultats ont indiqué que, les températures plus élevées et les niveaux d'humidités plus basses ont causé une détérioration significative de la résistance à la compression, à la traction par fendage et du module d'élasticité correspondant. L'effet de la température et de l'humidité sur la résistance à l'abrasion était considérable. L'élévation de la température et la diminution de l'humidité relative ont également un effet négatif sur les propriétés physiques du BCR (Retrait et l'absorption d'eau par capillarité).

Dans l'objectif de remédier au problème de l'effet négatif de l'élévation de la température et la diminution de l'humidité nous avons procédé à un traitement du BCR par l'application de trois modes de cure et l'ajout de la fumée de silice. En effet, les trois modes de cure ont eu un effet positif sur les propriétés du béton. Par contre, la fumée de silice a eu un effet positif sur la résistance à la compression alors que son effet sur le retrait n'était pas positif.

V.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié l'effet de la température et de l'humidité relative sur le comportement du BCR, ce qui a été remarqué à travers cette étude et quel que soit l'effet de la température négatif, il change avec le changement d'humidité relative, dans le sens où une humidité élevée agit pour atténuer l'effet de la température élevée.

Il est facile d'étudier l'effet de la température sur le béton en fixant la valeur de l'humidité relative et vice versa, mais lorsque les deux facteurs changent ensemble, dans ce cas on décrit le comportement du BCR en fonction de ces deux variables qu'ils doivent être liés par des relations mathématiques.

Beaucoup de recherches ont été menées sur l'effet de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques de béton, mais il n'existe pas, à notre connaissance, dans la littérature des recherches qui mènent sur l'effet de l'interaction de ces deux facteurs sur les propriétés du béton.

Dans ce chapitre, nous allons essayer de modéliser l'effet de l'interaction de la température et l'humidité relative sur le comportement du BCR par la méthode de surface de réponses, pour cela un plan d'expérience a été conçu de deux facteurs, chaque facteur contenant quatre niveau.

V.2 Méthode de surface de réponses (Plan d'expérience)

La méthodologie de surface de réponse (RSM, Response surface methodology) est une technique statistique et mathématique couramment utilisée pour analyser et développer des modèles entre une ou plusieurs variables indépendantes et réponses (Douglas, 2008). De plus, RSM peut être utilisé pour l'optimisation multi-objectifs du modèle en définissant des objectifs souhaitables définis sur la base des réponses ou des variables (Douglas, 2008). La RSM a été utilisé dans le béton pour le développement de modèles et l'optimisation de mélanges. Mohammed et al (Mohammed et al., 2012) ont utilisé la RSM pour modéliser la résistance à la compression du béton contenant de la boue de papeterie comme additifs, et dans autre études et avec l'utilisation de la même méthode, Mohammed et Adamu (Mohammed & Adamu, 2018) ont aussi modélisé le comportement du BCR contenant du caoutchouc granulé et de la nanosilice. Mtarfi et al (Mtarfi et al., 2017) ont optimisé et développé un modèle permettant de prédire la résistance à la compression d'un mortier avec la

RSM. Güneyisi et al (Güneyisi et al., 2014) ont développé des modèles et optimisé le béton à haute performance en minimisant les facteurs de durabilité et en maximisant la résistance à la compression en utilisant la métakoaline et les cendres volantes comme variables. Rezaifar et al (Rezaifar et al., 2016) ont développé des modèles permettant de prédire la résistance à la compression, le poids unitaire et l'absorption d'eau du béton de caoutchouc à l'aide de RSM. Ils ont également optimisé le mélange caoutchouc-béton en maximisant la résistance à la compression et en minimisant l'absorption d'eau. Mohammed et al (Mohammed et al., 2017) ont mis au point un modèle de conception de mélange pour béton autoplaçant (SCC) en utilisant la RSM. Ils ont également optimisé les mélanges SCC en maximisant le module d'élasticité et l'absorption d'énergie.

Dans cette étude, la RSM a été utilisée pour évaluer l'effet combiné de la température et de l'humidité relative sur les propriétés du RCR et pour développer une relation entre les variables et les réponses mesurées. Une validation a également été réalisée pour vérifier la fiabilité des modèles en examinant le BCR dans trois milieux environnementaux choisis d'une manière aléatoire.

Différents modèles peuvent être utilisés pour établir des relations mathématiques entre les réponses et les variables indépendantes dans l'analyse RSM. Le modèle de conception composite central est le modèle le plus couramment utilisé et le plus fiable. (Douglas, 2008).

Étant donné que les relations mathématiques entre les réponses et les variables indépendantes ne sont pas connues, le modèle peut être formé comme un modèle linéaire donné par la fonction de premier ordre dans l'équation (4) (Douglas, 2008).

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \dots \dots \dots (4)$$

Où y est la réponse modélisée, β_0 est l'ordonnée à l'origine pour laquelle $X_1 = X_2 = 0$, β_1 et β_2 sont respectivement les coefficients des première et deuxième variables indépendantes, X_1 est la première variable, X_2 la deuxième variable et ε est l'erreur (Douglas, 2008).

Cependant, si les données contiennent une courbure, le modèle linéaire ne conviendra pas pour la réponse, alors un modèle polynomial de degrés supérieurs doit donc être utilisé, comme indiqué par la fonction de second ordre donnée dans l'équation (5).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \dots \dots \dots (5)$$

Où y est la réponse modélisée, X_i et X_j sont les valeurs codées de la variable indépendante, i est le coefficient linéaire, j est le coefficient quadratique, β est la constante de régression, β_0 est l'ordonnée à l'origine pour laquelle $X_i = X_j = 0$, k est le nombre de variables utilisées pour l'analyse, et ε est l'erreur (Douglas, 2008).

V.3 Description du logiciel utilisé

Dans cette étude, l'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel JMP (version 16). Ce logiciel est un programme informatique de statistiques mis au point par la division JMP de l'institut SAS. Créé dans les années 1980 en exploitant les avancées graphiques du Macintosh, il a ensuite été amélioré et est maintenant disponible sur d'autres systèmes d'exploitation.

Le JMP est utilisé dans des applications telles que le contrôle de qualité, l'ingénierie, la conception d'expériences et la recherche scientifique. Depuis quelques années, il inclut aussi des outils pour le data mining, le text mining et la recherche en marketing. Elle permet aux utilisateurs de mener des recherches et d'explorer les données, plutôt que de se contenter de confirmer des hypothèses.

a- Acquisition de données

Dans tous les cas, l'importation de données dans JMP est une tâche interactive, et le logiciel réagit aux modifications apportées tout au long du processus. Tout fichier importé dans une table JMP est donc préformaté et quasiment prêt pour l'analyse. Les données importées dans JMP étant placées en mémoire, leur origine a peu d'importance. Si les tables JMP sont systématiquement optimisées pour l'analyse et l'exploration, la structure et les métadonnées de la source n'en sont pas moins préservées au maximum.

b- Visualisation des données

Les feuilles de calcul ne se prêtent pas aisément à l'identification de tendances ou de configurations au sein de vos données. Et pourtant, ce sont ces tendances qui permettent de faire des découvertes. Grâce aux puissants outils de visualisation dynamique de JMP, la découverte statistique est plus simple et plus efficace, et favorise l'innovation.

Le Constructeur de graphiques est le meilleur point de départ pour examiner les données et les représenter dynamiquement dans des graphiques. Il permet de créer de manière interactive des représentations graphiques élémentaires ou complexes par simple glisser-déposer. Il suffit de faire glisser les variables à l'endroit souhaité, de choisir l'élément

graphique dans une palette d'icônes et de personnaliser la présentation pour obtenir un résultat de qualité éditoriale. Le Constructeur de graphiques propose systématiquement les options adaptées à la situation analysée.

c- Plan d'expériences

Les plans d'expérience (DOE) de JMP sont un moyen éprouvé et pratique d'explorer et d'exploiter les innombrables opportunités multidimensionnelles qui se présentent dans la plupart des situations réelles. Grâce aux plans multifactoriels, vous pouvez non seulement déduire l'impact d'un facteur individuel, mais également les effets combinés de plusieurs paramètres, et en tirer plus rapidement des enseignements à moindre coût. JMP offre des fonctionnalités de pointe pour la création de plans d'expérience. Vous pouvez ainsi élaborer les meilleures expériences pour répondre à des questions précises. JMP inclut également des fonctions d'analyse faciles à utiliser et adaptées à votre méthode de conception.

Outre le concepteur de plans optimaux, JMP prend en charge les plans classiques tels que les plans factoriels complets (théoriques), factoriels fractionnaires (criblage), à blocs, pour surfaces de réponse, non linéaires et de mélanges, mais également des plans avancés tels que les plans uniformes basés sur les clusters qui autorisent les contraintes d'inégalité sur les facteurs.

Le JMP est de surcroît le premier logiciel à intégrer des plans de criblage définitifs. Ce type de plans permet de repérer de manière fiable et efficace les rares facteurs fondamentaux ayant un effet substantiel parmi d'innombrables paramètres insignifiants à l'impact négligeable. Pour le même coût que les plans de criblage classiques à deux niveaux, les plans de criblage définitifs permettent d'obtenir des informations sur les effets principaux, les effets de courbure et les interactions à deux facteurs.

d- Modélisation statistique

La création de modèles efficaces est un processus à la fois scientifique et artistique. JMP intègre plusieurs plates-formes statistiques pour construire des modèles utiles à partir de données expérimentales. Avec des méthodes destinées à révéler les relations entre les variables d'un processus, JMP permet d'établir des prévisions, mais aussi d'identifier les paramètres des facteurs produisant les meilleurs résultats. Il comprend plusieurs outils d'ajustement de modèles linéaires et non linéaires qui facilitent la prise de décision, quelles que soient les relations entre les données.

CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE SUR LE COMPORTEMENT DU BCR

V.4 Modèles statistiques et analyse de la variance

Les données ont été traitées par l'analyse de variance (ANOVA). Une conception composite de 16 expériences (deux facteurs à quatre niveaux 4*4) a été réalisée pour étudier l'influence de deux facteurs, y compris leurs interactions sur la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité (comme réponses). Les deux facteurs sont la température (15, 30, 45 et 60°C) et l'humidité relative (30, 50, 70 et 90%). Le tableau V.1 présente la matrice d'expériences et les résultats expérimentaux.

Tableau V.1 : Conception expérimentale et résultats expérimentaux

Facteurs				Réponses						
Valeurs codées		Valeurs réelles		Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction par fendage (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à l'abrasion (%)	Retrait (mm/mm * 10 ⁻³)	d'absorption de l'eau (%)	
T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)							
1	-1	-1	15	30	45.43	4.56	34.20	4.12	0.4047	4.056
2	-1	-0.5	15	50	40.21	4.35	31.15	5.02	0.4341	4.323
3	-1	0.5	15	70	33.55	4.23	24.05	5.41	0.4851	4.763
4	-1	1	15	90	30.32	4.06	22.64	5.47	0.5606	5.432
5	-0.5	-1	30	30	45.50	4.95	34.98	3.49	0.3605	3.815
6	-0.5	-0.5	30	50	42.00	4.59	33.49	3.87	0.4100	4.016
7	-0.5	0.5	30	70	36.90	4.58	31.53	4.93	0.4700	4.365
8	-0.5	1	30	90	34.70	4.54	24.90	5.05	0.5050	4.850
9	0.5	-1	45	30	46.18	5.07	38.31	3.45	0.3839	3.434
10	0.5	-0.5	45	50	43.54	4.83	34.81	3.60	0.4151	3.735
11	0.5	0.5	45	70	40.81	4.72	32.60	4.45	0.4407	4.059
12	0.5	1	45	90	39.72	4.70	28.05	4.48	0.4646	4.367
13	1	-1	60	30	46.81	5.19	40.13	3.24	0.3692	3.205
14	1	-0.5	60	50	44.93	5.08	39.36	3.52	0.3817	3.534
15	1	0.5	60	70	44.62	4.83	35.35	3.96	0.4028	3.841
16	1	1	60	90	44.52	4.78	30.58	4.09	0.4274	4.074

Les relations entre les variables indépendantes et chaque réponse ont été obtenues par ANOVA comme montré dans les tableaux V. (2 et 3). Le niveau de signification de 5% ($P < 0,05$) est utilisé pour vérifier si un modèle est significatif ou non. D'après les tableaux (V.2), les valeurs P de toutes réponses de modèles sont inférieures à 0,05 ; il s'agit donc de modèles significatifs à un niveau de confiance plus de 95%. De même, la signification statistique de chacune des variables indépendantes du modèle a été vérifiée à un niveau de signification de 5% ($P < 0,05$).

**CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE
SUR LE COMPORTEMENT DU BCR**

Tableau V.2: Analyse de variance (ANOVA) pour les modèles de réponse

Variable	Source	Degré de liberté	Somme carré	Moyenne carré	F -Values	P-Values
Résistance à la compression (MPa)	Modèle	5	372.81640	74.5633	303.8934	<.0001
	Résiduelle	10	2.45360	0.2454		
	Total	15	375.27000			
Résistance à la traction par fendage (MPa)	Modèle	5	1.4136000	0.282720	60.9310	<.0001
	Résiduelle	10	0.0464000	0.004640		
	Total	15	1.4600000			
Module d'élasticité (GPa)	Modèle	5	400.43853	80.0877	51.2042	<.0001
	Résiduelle	10	15.64085	1.5641		
	Total	15	416.07938			
Résistance à l'abrasion (%)	Modèle	5	7.6220213	1.52440	32.9336	<.0001
	Résiduelle	10	0.4628725	0.04629		
	Total	15	8.0848938			
Retrait (%)	Modèle	5	0.04219925	0.008440	61.9688	<.0001
	Résiduelle	10	0.00136195	0.000136		
	Total	15	0.04356120			
Absorption d'eau (%)	Modèle	5	4.7780710	0.955614	170.3291	<.0001
	Résiduelle	10	0.0561040	0.005610		
	Total	15	4.8341750			

F-values: valeur du test statistique de Fisher, P- values: valeur de probabilité.

Les valeurs de test statistique F (F -Values) sont 303.89, 60.93, 51.20, 32.93, 61.97 et 170.32 pour les modèles de résistance à la compression, de résistance à la traction par fendage, du module d'élasticité, de résistance à l'abrasion, de retrait et de l'absorption d'eau respectivement (tableau V.2). Les valeurs de F sont calculées en utilisant le rapport entre la moyenne carrée du modèle (moyenne carrée des résultats prédits) et la moyenne carrée d'erreur (moyenne carrée des différences entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits), les valeurs élevées F signifient que l'erreur est très faible.

Les résultats du tableau V.3 et les équations (6-11), montrent que tous les modèles de réponse sont des modèles quadratiques. Selon les valeurs de P, les termes du modèle T, H sont significatifs pour tous les modèles, l'interaction (T * H) est significative pour les modèles de résistance à la compression, le retrait et l'absorption d'eau, alors que n'est pas significative pour les modèles de résistance à la traction par fendage, de module d'élasticité et de résistance à l'abrasion. Le terme H² n'est pas significatif pour tous les modèles à l'exception de modèles de résistance à la traction par fendage, et enfin le terme T² est significatif pour seulement les modèles de résistance à la compression et à la traction par fendage.

**CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE
SUR LE COMPORTEMENT DU BCR**

Tableau V.3: Termes des modèles de réponse

Réponses	Termes du modèle	Estimation	Somme carré	F -Values	P-Values	Signification
Résistance à la compression (MPa)	Constante	54.510025	-	-	-	-
	T-Température	-0.63385556	176.41800	719.0170	<.0001	S
	H-Humidité	-0.07425	137.81250	561.6747	<.0001	S
	TH	0.00498	55.80090	227.4246	<.0001	S
	T ²	0.00183333	2.72250	11.0959	0.0076	S
	H ²	0.00015625	0.06250	0.2547	0.6247	NS
	Manque d'adjust				0.1121	NS
Résistance à la traction par fendage (MPa)	Constante	4.367478	-	-	-	-
	T-Température	-0.02826667	0.4500	96.9828	<.0001	S
	H-Humidité	0.0245	0.882	190.0862	<.0001	S
	TH	2.66667E-05	0.0016	0.3448	0.5701	NS
	T ²	0.00022222	0.040	8.6207	0.0149	S
	H ²	-0.000125	0.040	8.6207	0.0149	S
	Manque d'adjust				0.2724	NS
Module d'élasticité (GPa)	Constante	31.536799	-	-	-	-
	T-Température	-0.11028333	244.65013	156.4174	<.0001	S
	H-Humidité	0.127125	149.33113	95.4751	<.0001	S
	TH	0.00090333	1.83602	1.1739	0.3040	NS
	T ²	-0.00236111	4.51562	2.8871	0.1201	NS
	H ²	-0.00020313	0.10562	0.0675	0.8002	NS
	Manque d'adjust				0.2892	NS
Résistance à l'abrasion (%)	Constante	4.306323	-	-	-	-
	T-Température	0.069358222	3.6594013	79.0585	<.0001	S
	H-Humidité	-0.0418625	3.6082513	77.9535	<.0001	S
	TH	-0.000205	0.0945562	2.0428	0.1834	NS
	T ²	-0.00038056	0.1173063	2.5343	0.1425	NS
	H ²	0.00023594	0.1425062	3.0787	0.1099	NS
	Manque d'adjust				0.1516	NS
Retrait (%)	Constante	0.340760	-	-	-	-
	T-Température	0.0040906	0.02721744	199.8416	<.0001	S
	H-Humidité	8.00E-06	0.01131452	83.0759	<.0001	S
	TH	-3.98267E-05	0.00356887	26.2041	0.0005	S
	T ²	1.01111E-05	0.00008281	0.6080	0.4536	NS
	H ²	2.46875E-06	0.00001560	0.1146	0.7420	NS
	Manque d'adjust				0.2130	NS
Absorption d'eau (%)	Constante	4.302233	-	-	-	-
	T-Température	0.021293333	2.4710450	440.4401	<.0001	S
	H-Humidité	-0.0206	2.1978450	391.7448	<.0001	S
	TH	-0.00017267	0.0670810	11.9565	0.0061	S
	T ²	0.00016667	0.0225000	4.0104	0.0731	NS
	H ²	0.0000875	0.0196000	3.4935	0.0911	NS
	Manque d'adjust				0.1802	NS

F-values: valeurs du test statistique de Fisher; P- values: valeurs de probabilité;

Le manque d'ajustement est également utilisé pour vérifier la qualité de l'ajustement des modèles. Comme le montre le tableau (V.3), la significativité P pour le manque d'ajustement de tous les modèles est supérieure à 0,05, ce qui signifie que ce n'est pas significatif et que cela signifie que tous les modèles de réponse ont une bonne condition physique. Les relations et les interactions entre les variables (T et H en fonction de leurs valeurs réelles) et les réponses obtenues par ANOVA sont données dans les équations (6-11) :

**CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE
SUR LE COMPORTEMENT DU BCR**

$$R_c = 54.510 - (633.86 * T + 74.25 * H - 4.98 * TH - 1.833 * T^2 - 0.1563 * H^2) * 10^{-3} \dots \dots \dots (6)$$

$$R_t = 4.367 - (28.267 * T - 24.5 * H - 0.0267 * TH - 0.222 * T^2 + 0.125 * H^2) * 10^{-3} \dots \dots \dots (7)$$

$$M_e = 31.537 - (110.283 * T - 127.125 * H - 0.904 * TH + 2.361 * T^2 + 0.203 * H^2) * 10^{-3} \dots \dots \dots (8)$$

$$R_a = 4.306 + (69.358 * T - 41.863 * H - 0.205 * TH - 0.381 * T^2 + 0.236 * H^2) * 10^{-3} \dots \dots \dots (9)$$

$$R_{et} = 0.341 + (409.06 * T + 0.800 * H - 3.983 * TH + 1.011 * T^2 - 0.247 * H^2) * 10^{-5} \dots \dots \dots (10)$$

$$A_e = 4.302 + (212.933 * T - 206.00 * H - 1.727 * TH + 1.667 * T^2 + 0.875 * H^2) * 10^{-4} \dots \dots \dots (11)$$

Où R_c est la résistance à la compression, R_t est la résistance à la traction par fendage, M_e est le module d'élasticité, R_a est la résistance à l'abrasion, R_{et} est le retrait, A_e est l'absorption d'eau par capillarité, T est la température et H est l'humidité relative.

L'adéquation et le degré de corrélation de chaque modèle de réponse peuvent également s'expliquer par le coefficient de régression élevé (R^2), qui explique également la pertinence et la qualité des modèles, comme le montre le tableau (V.4). La résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité ont des valeurs R^2 de 99.34%, 96.82%, 96.24%, 94.27, 96.87 et 98.84% respectivement. Cela montre que les modèles ont un degré de corrélation très élevé entre les modèles prédits et les données expérimentales, et qu'il existe une adéquation étroite entre les données expérimentales et leurs droites de régression, avec seulement 0.66%, 3.18%, 3.76%, 5.73% , 3.13% et 1.16% des données expérimentales pour la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité respectivement ne peuvent pas être corrélées par les modèles. De plus, pour tous les modèles de réponse, les R^2 prédits sont en accord avec leur R^2 ajusté correspondant car la différence entre les deux est inférieure à 2%, à l'exception du modèle de résistance à l'abrasion dont la différence est supérieure à 2%, comme le montre le tableau V.4. La variabilité des modèles par rapport aux données expérimentales a également été vérifiée à l'aide de leurs écarts types (SD) et coefficients de variations (CoV). Les faibles de SD et CoV des modèles montrent que les données expérimentales correspondent aux modèles développés avec un degré de corrélation très élevé.

CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE SUR LE COMPORTEMENT DU BCR

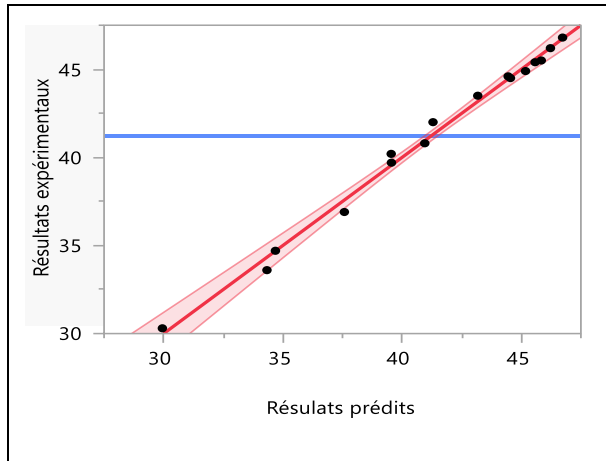
Tableau V.4 : Validation des modèles développés

Réponses	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Me (GPa)	Ra (MPa)	Ret (mm/mm*10 ⁻³)	Ae (%)
Moyenne	41.23	4.69	32.26	4.257	0.4322	4.116
SD	1.61	0.12	0.91	0.09	0.01	0.17
CoV (%)	3.90	2.56	2.82	2.11	2.31	4.13
R ²	0.9935	0.9682	0.9624	0.9427	0.9687	0.9884
R ² Adjusté	0.9902	0.9523	0.9436	0.9141	0.9531	0.9826

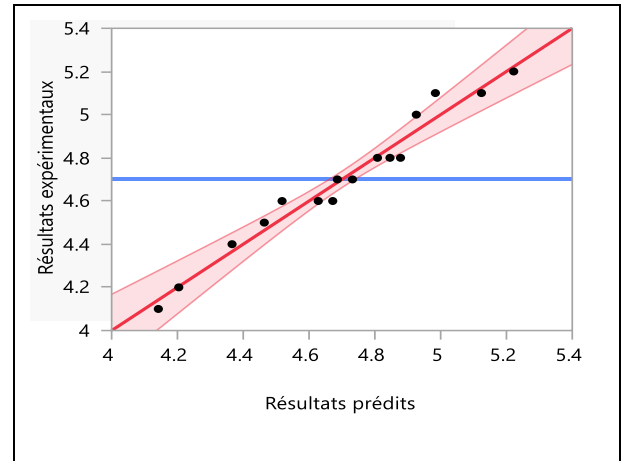
Les tracés des résultats prédits par rapport aux résultats réels sont également des facteurs importants pour vérifier l'adéquation et la pertinence des modèles graphiquement, (Figure V.1 (a-f)), où ils ont été avérés que la corrélation s'aligner et s'adapter étroitement à la ligne droite, ce qui signifie que les données expérimentales sont en accord et bien adaptées aux résultats prédits des modèles. Par conséquent, les modèles de réponse développés sont applicables et appropriés pour prédire les résistances à la compression et à la traction par fendage, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau.

Les tracés de surface de réponse tridimensionnels pour les modèles développés sont illustrés à la Figure V.2 (a-f). On peut voir que la température présente des effets plus importants et négatifs sur les réponses par rapport à l'humidité relative qui est présente un effet positif. La combinaison de 15°C de température et de 90% d'humidité relative a donné les meilleurs résultats pour tous les modèles.

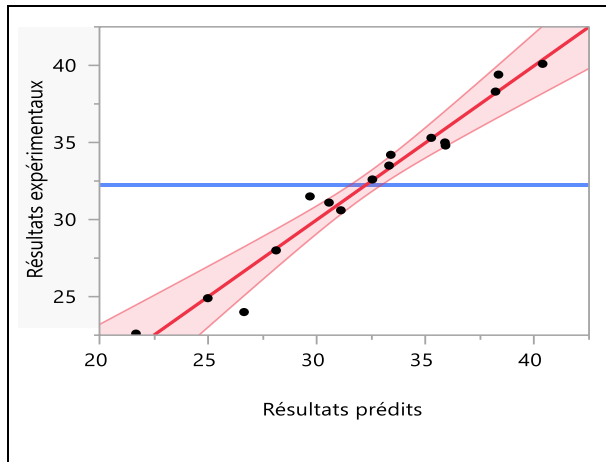
**CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE
SUR LE COMPORTEMENT DU BCR**



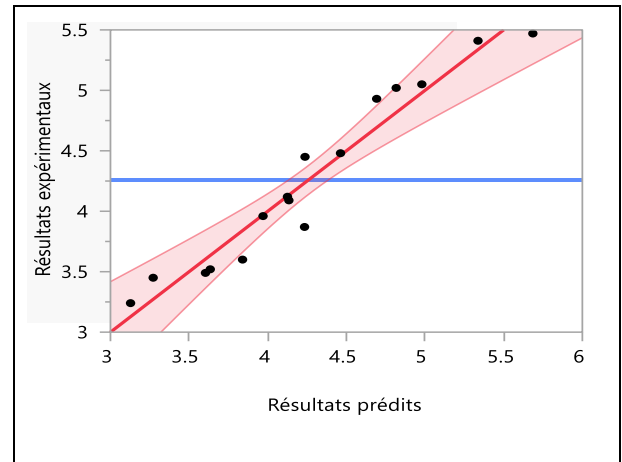
(a) Résistance à la compression



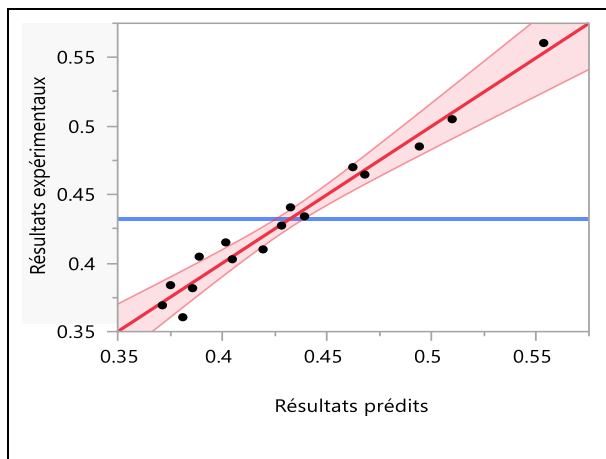
(b) Résistance à la traction par fendage



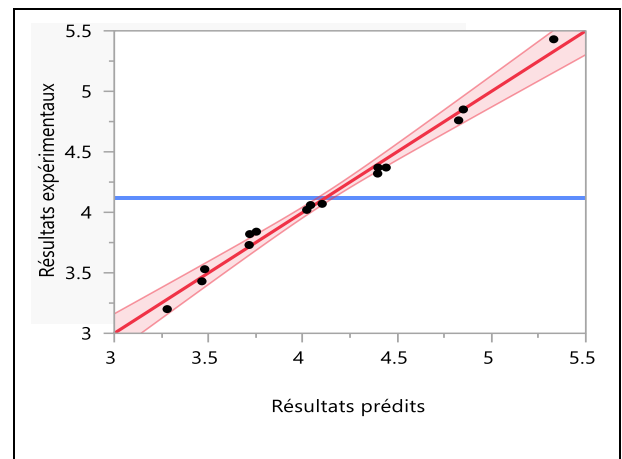
(c) Module d'élasticité



(d) Résistance à l'abrasion



(e) Retrait



(f) L'absorption d'eau

Figure V.1 : Résultats prédits vs réels pour les modèles développés.

**CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE
SUR LE COMPORTEMENT DU BCR**

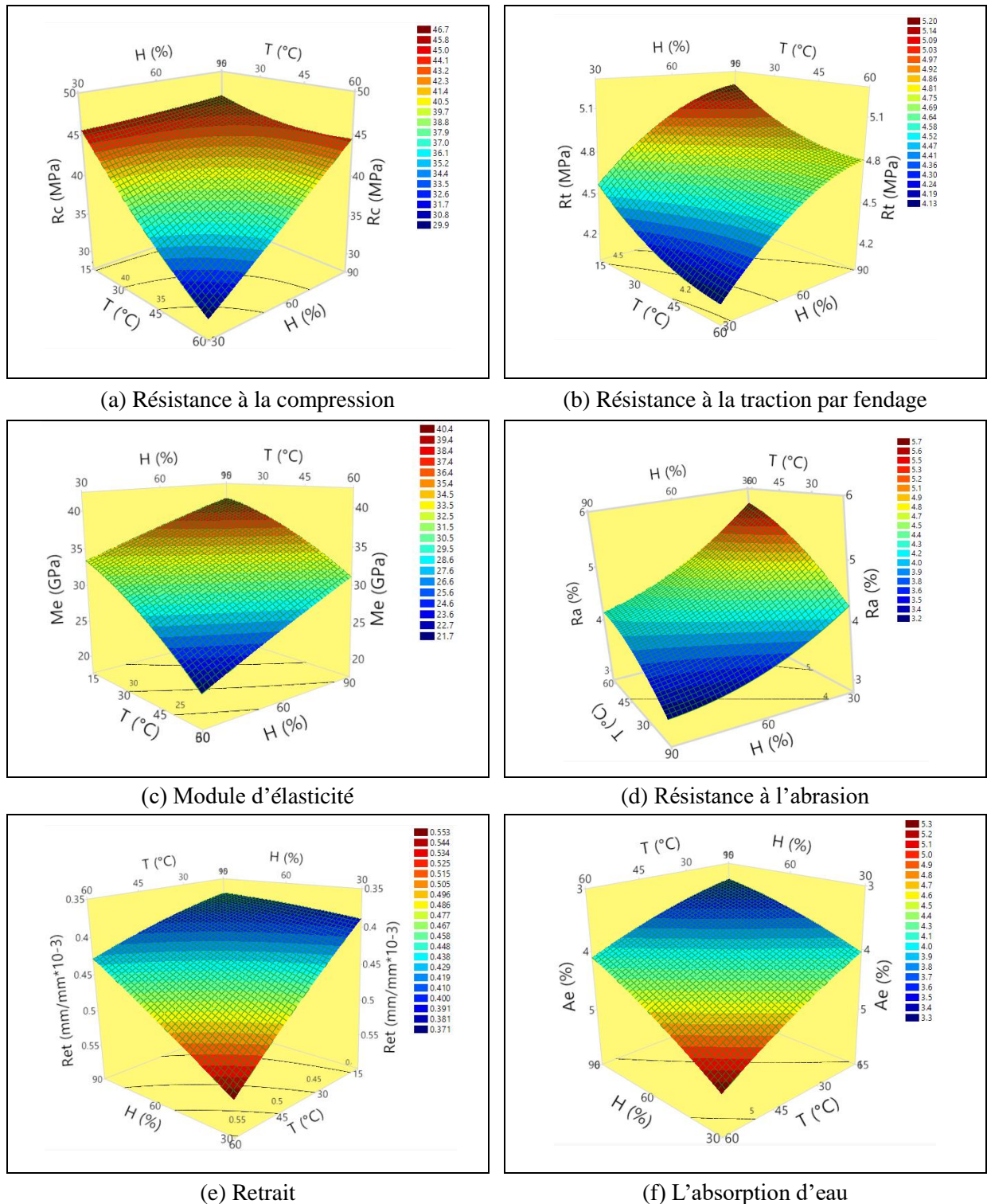
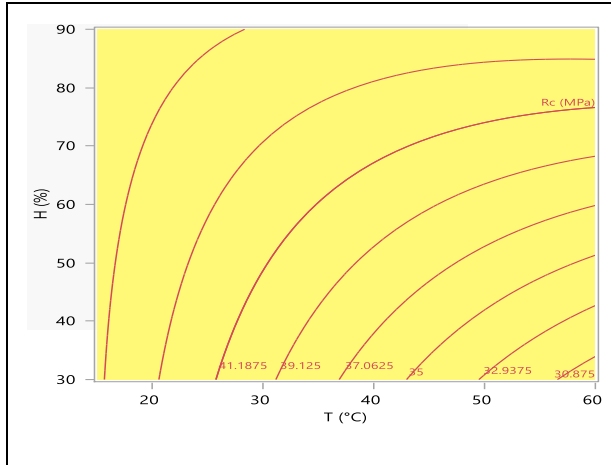


Figure V.2 : Surface de réponse pour les modèles développés.

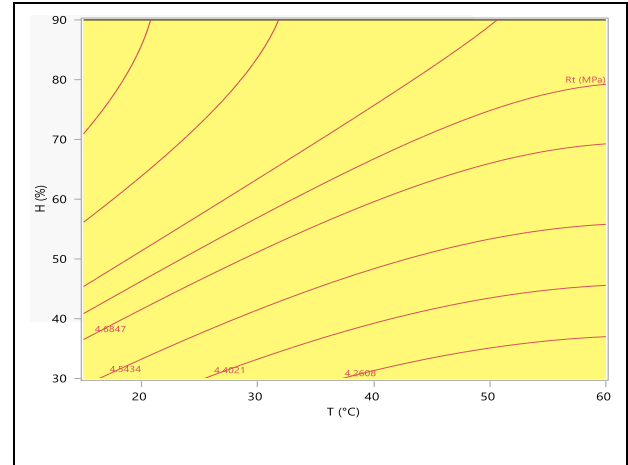
Les courbes de contour bidimensionnelles (iso-réponses) des modèles développés sont illustrées à la figure V.3 (a – f). Il est remarquable que toutes les lignes de contour ont une forme elliptique, ce qui signifie qu'il existe une interaction parfaite entre la température et l'humidité relative pour toutes les réponses, car lorsque les lignes sont horizontales, cela

CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE SUR LE COMPORTEMENT DU BCR

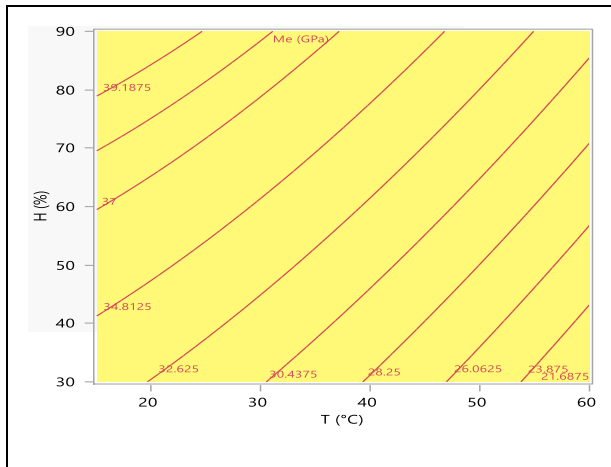
signifie qu'il n'y a pas d'effet de la température, et la même chose lorsqu'elles sont droites verticales, cela signifie qu'il n'y a pas d'effet d'humidité relative, tandis que lorsque les lignes sont droites obliques, cela signifie que l'effet de la température et de l'humidité est proportionnel à la réponse.



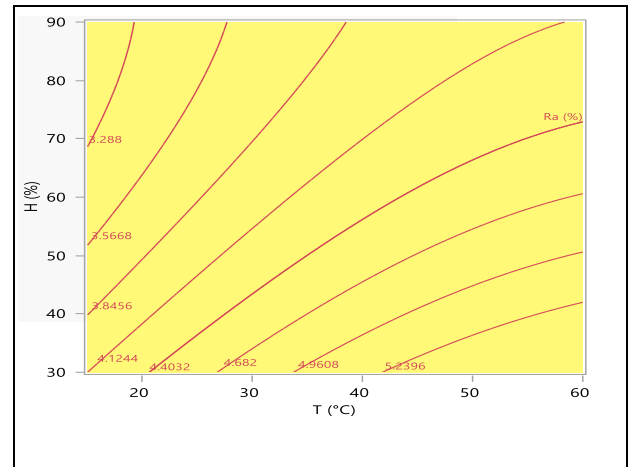
(a) Résistance à la compression



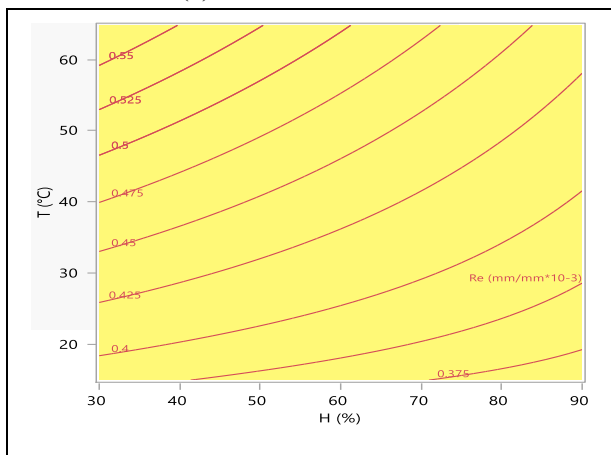
(b) Résistance à la traction par fendage



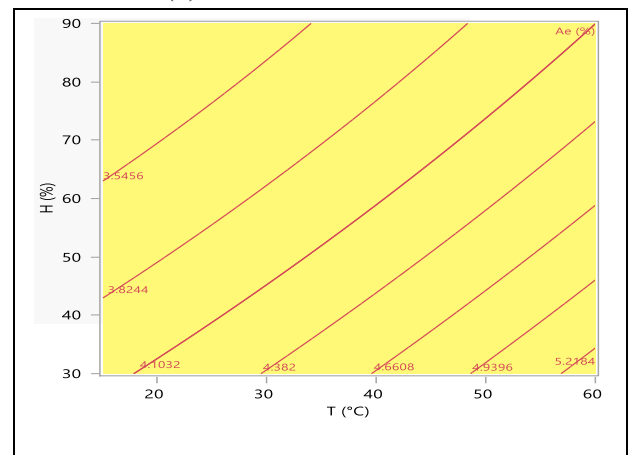
(c) Module d'élasticité



(d) Résistance à l'abrasion



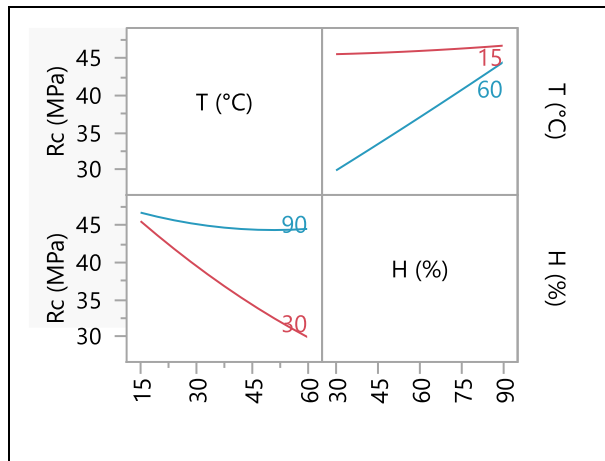
(e) Retrait



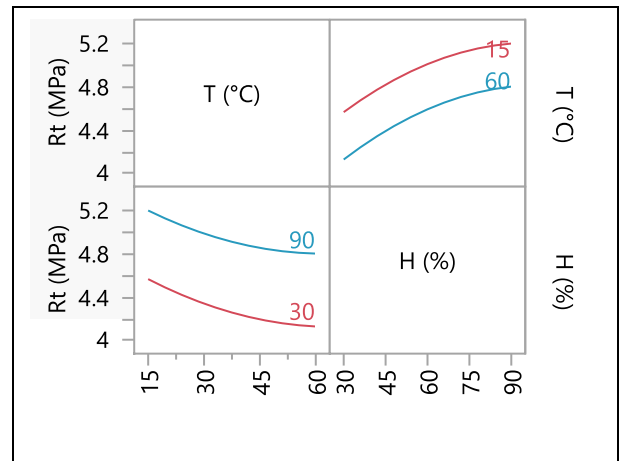
(f) L'absorption d'eau

Figure V.3 : Tracés de contour pour les modèles développés.

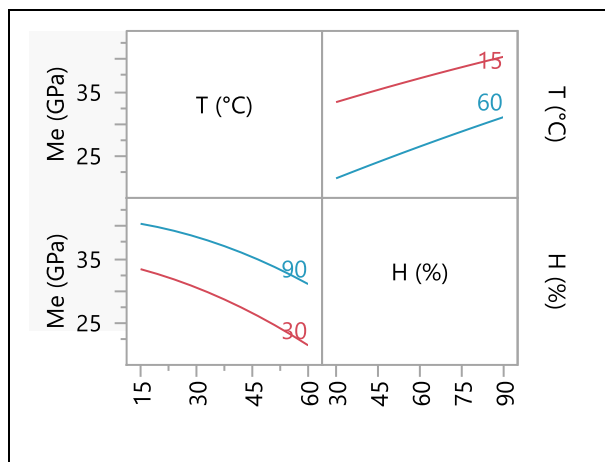
**CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE
SUR LE COMPORTEMENT DU BCR**



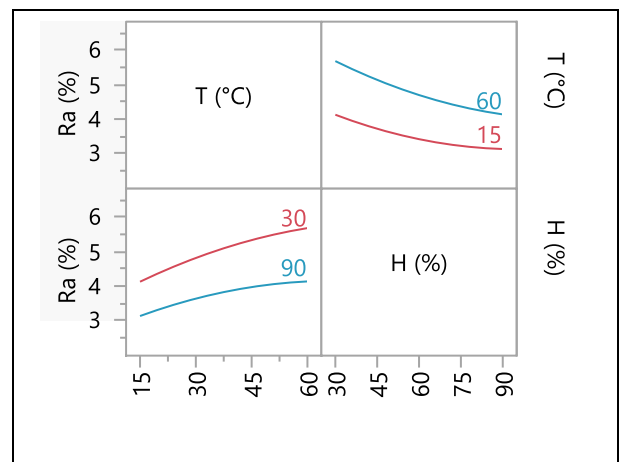
(a) Résistance à la compression



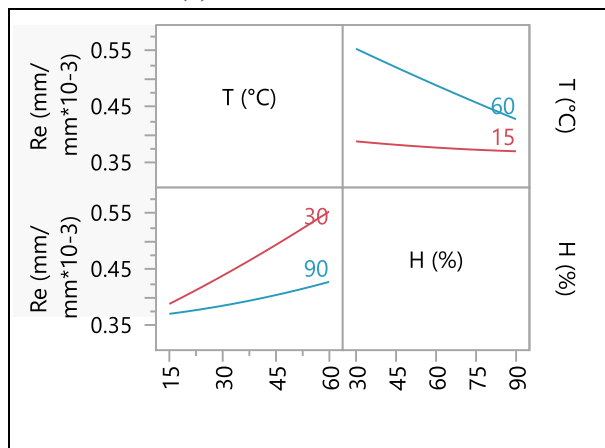
(b) Résistance à la traction par fendage



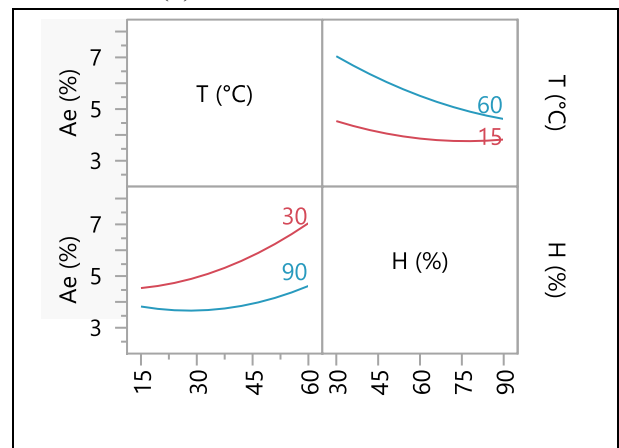
(c) Module d'élasticité



(d) Résistance à l'abrasion



(e) Retrait



(f) L'absorption d'eau

Figure V.4 : Courbes d'interaction pour les modèles développés.

Les courbes d'interaction des réponses avec une considération des facteurs sélectionnés (la température et l'humidité relative) sont présentées sur la figure V.4 (a – f). On peut observer que pour les réponses de traction par fendage, de module d'élasticité et de la résistance à l'abrasion, les courbes d'interaction des deux facteurs sont presque parallèles les uns aux autres, ce qui indique que les effets d'interaction des deux facteurs sur les réponses ne

**CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE
SUR LE COMPORTEMENT DU BCR**

sont pas significatifs. Il est bien connu que l'interaction des effets est considérée comme significative lorsque les deux lignes se croisent et que d'une autre manière, l'effet d'un facteur sur la réponse est varié avec la variation de niveau de l'autre facteur (Mukharjee & Barai, 2014).

V.5 Validation des modèles

Afin de valider la fiabilité des modèles de réponses développés, une série d'expériences supplémentaires a été réalisée en laboratoire par sélection aléatoire de trois milieux environnementaux ((T=20°C et H=40%), (T=35°C et H=60%) et (T=50°C et H=80%)). La résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau ont été testés expérimentalement et comparées aux valeurs théoriques prédites. Le pourcentage d'erreur ou les variations entre les réponses prédites et les résultats expérimentaux ont été calculés en utilisant l'équation (12). Le résumé des résultats prédits et expérimentaux est présenté dans le tableau V.5.

$$erreur(\%) = \left| \frac{experimental - model}{experimental} \right| \dots \dots \dots (12)$$

Tableau V.5 : Vérification des modèles

Réponse	Testes	T (°C)	HR (%)	Résultats expérimentaux	Résultats prédits	Erreur (%)
Résistance à la compression (MPa)	1	20	40	45.06	43.83	2.73
	2	35	60	40.71	41.14	1.06
	3	50	80	43.55	42.38	2.69
Résistance à la traction par fendage (MPa)	1	20	40	4.58	4.69	2.40
	2	35	60	4.78	4.73	1.05
	3	50	80	4.72	4.77	1.06
Module d'élasticité (GPa)	1	20	40	34.31	33.87	1.28
	2	35	60	33.15	33.58	1.30
	3	50	80	33.6	32.6	2.98
Résistance à l'abrasion (%)	1	20	40	4.19	4.08	2.63
	2	35	60	4.08	4.18	2.45
	3	50	80	4.31	4.16	3.48
Résistance à l'abrasion (%)	1	20	40	0.4045	0.3991	1.33
	2	35	60	0.4291	0.4222	1.61
	3	50	80	0.4328	0.4277	1.18
Résistance à l'abrasion (%)	1	20	40	4.06	3.97	2.19
	2	35	60	4.05	3.97	2.02
	3	50	80	3.90	4.01	2.69

On peut observer que les résultats expérimentaux sont proches aux valeurs théoriques avec des erreurs moyennes de 2.16%, 1.50%, 1.85%, 2.85%, 1.37% et 2.30% pour la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, la

résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau respectivement. Ce qui confirme la fiabilité des modèles mathématiques développés.

V.6 Relation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage du RCR à l'aide de RSM

Le modèle développé qui peut être utilisé pour prédire le module d'élasticité (M_e) d'un RCR en utilisant la résistance à la compression (R_c) et la résistance à la traction par fendage (R_t) correspondantes comme variables sont donnés dans l'équation. (13).

$$M_e = 328.044 + 8.841 * R_c + -215.204 * R_t - 1.460 R_c * R_t - 0.0186 * R_c^2 + 30.122 * R_t^2 \dots \dots \dots (13)$$

Tableau V.6 : ANOVA pour le modèle du module d'élasticité

Réponse	Facteurs	F-Values	P-Values	R ²	R ² Adjusté	SD	CoV (%)
Module d'élasticité (GPa)	Modèle	68.58	<.0001	0.9415	0.9342	1.38	4.28
	R _c	4.21	.011				
	R _t	26.45	.015				
	R _c * R _t	10.72	0.026				
	R _c ²	26.45	0.049				
	R _t ²	10.72	0.042				

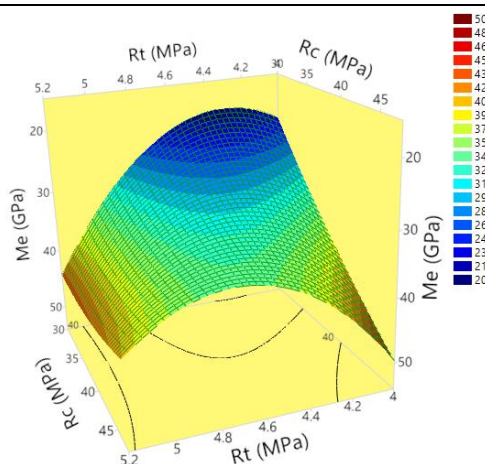


Figure V.5 : Relation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage

Comme le montre le tableau V.6, le modèle est significatif avec une valeur P inférieure à 0,05, et une valeur de F élevée de 68,58. De plus, l'adéquation du modèle peut être vérifiée par le degré élevé de détermination ($R^2 = 94.1$), et le R^2 prédit est en accord avec le R^2 ajusté car leurs différences sont inférieures à 0,2. Le faible écart type (SD) et le faible coefficient de variation (CoV) montrent que le modèle développé correspond aux données expérimentales avec une différence très petite. La relation entre le modèle développé et les variables est présentée sur la figure V.6, et on peut observer que le module d'élasticité du

CHAPITRE V : EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE SUR LE COMPORTEMENT DU BCR

BCR est directement proportionnel à ses résistances à la compression et à la traction par fendage.

V.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nouveaux modèles mathématiques ont été élaborés pour prédire les résistances, à la compression, à la traction par fendage, à l'abrasion, le module d'élasticité, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité du BCR durci à des températures et à des niveaux d'humidité relative variables. Les modèles ont été élaborés par la méthode de surface de réponses RSM. Les valeurs de P, F et R^2 montrent que les modèles développés sont significatifs et avec un taux de confiance plus de 95%.

Pour vérifier la validité et la fiabilité des modèles, une série d'essais complémentaires ont été réalisée en laboratoire et les résultats obtenus ont été comparés avec les résultats calculés par les modèles. Les comparaisons entre les résultats montrent que ces derniers ont un haut degré de précision et de fiabilité.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le béton compacté au rouleau (BCR) est composé des mêmes constituants qu'un béton ordinaire (ciment, granulats, eau et éventuellement des adjuvants). Il se distingue des bétons conventionnels par son affaissement qui est nul, une quantité importante de granulats et une quantité plus faible de ciment. Cependant, pour atteindre sa forme finale, il est nécessaire de le compacter avec un lourd tambour en acier vibrant et des rouleaux à pneus ; En conséquence, le BCR peut fournir un accès rapide au trafic. Le coût de la construction d'une chaussée en utilisant de BCR peut être inférieur de 15% à 30% à celui d'une chaussée rigide en béton conventionnel ou asphaltique. En termes de durabilité environnementale, le BCR nécessite une teneur en ciment plus faible, ce qui réduit considérablement sa consommation de ciment, ses émissions de CO₂ pendant la production de ciment et sa chaleur d'hydratation lors du mélange.

Nombreux facteurs peuvent influencer sur les propriétés du BCR dans une mesure plus ou moins grande, la qualité des ingrédients, la composition optimale, les procédures de fabrication, la teneur en air et la porosité, ainsi que les facteurs climatiques tel que la température et l'humidité relative, tous affectent les propriétés de ce genre de béton. Mais autant qu'où le BCR est un béton surfacique où il est utilisé pour la réalisation de la couche de roulement dans les routes, cette caractéristique le rend plus vulnérable aux facteurs climatiques plus que tous autres types de béton. De plus, étant donné que le BCR est généralement sec, l'effet de la température et de l'humidité relative sur ce type de béton est fortement considérable.

Plusieurs recherches ont été menées sur l'effet de la température et de l'humidité sur le comportement des matériaux cimentaire, mais là plus part de ces études ont été réalisées sur des bétons ordinaires et les résultats obtenus n'ont pas été projetés sur les mélanges de BCR.

Dans la présente étude, la potentialité d'utiliser le BCR dans les zones chaudes a été expérimentalement examinée en laboratoire. Deux facteurs climatiques, la température et l'humidité relative ont été adoptés, chaque facteur a été testé en quatre niveaux (15, 30, 45 et 60°C) pour la température et (30, 50, 70 et 90%) pour l'humidité. En effet, les essais ont été menés selon un programme préparé à l'avance, puisque le but était de modéliser les phénomènes observés.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, nous avons d'abord mené une étude de l'influence de la température et l'humidité sur le comportement du BCR. Ensuite, nous avons essayé de

rattraper la perte de résistance due à la température élevée en appliquant trois type de cure d'un côté et par l'ajout de la fumée de silice d'autre coté. Et enfin, nous avons modélisés les phénomènes observés par les plans d'expériences.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la résistance mécanique finale (en compression et en traction par fendage) et le module d'élasticité en compression sont affectés négativement par la température. Des réductions significatives de ces propriétés avec l'accroissement de la température de durcissement ont été enregistrées. Et aussi l'élévation de la température a un effet négatif sur la résistance à l'abrasion, une augmentation importante de perte du poids a été remarquée lorsque la température augmente de 15 à 60°C.

Tandis que des effets positifs de l'humidité relative ont été observés, un gain dans les résistances mécaniques et le module d'élasticité a été enregistré lorsque l'humidité augmente de 30 à 90%. En ce concerne la résistance à l'abrasion, il était clair que l'augmentation de l'humidité relative a évidemment atténué l'effet négatif de la température.

En effet, l'élévation de la température a contribué à accélérer l'hydratation de ciment et à produire plus de CSH, ce qui a entraîné une augmentation très rapide des résistances mécaniques à jeune âge. Cependant, à des âges plus avancés, la température élevée à un effet négatif sur les valeurs finales, où on a remarqué qu'il y a une perte dans les résistances mécaniques après le vingt-huitième jour. Alors que, L'augmentation de l'humidité relative a contribué au processus d'hydratation, ce qui a conduit à une microstructure plus dense et à une augmentation des valeurs de résistance.

Dans un autre contexte, l'élévation de la température a provoqué l'évaporation de l'eau libre, ce qui a entraîné une augmentation du retrait, en particulier aux premiers jours, ce qui peut augmenter le risque de microfissures et de macro-fissures. Alors que l'effet positif d'une humidité relative élevée sur la réduction du retrait était en aidant à empêcher l'évaporation de l'eau.

En ce concerne, l'absorption d'eau par capillarité, elle augmente avec l'accroissement de la température car le durcissement des matériaux cimentaire à des températures plus élevées a accéléré l'hydratation et provoqué la distribution hétérogène de produits d'hydratation. Cette condition rend la structure plus poreuse et induit des microfissures dans la structure, ce qui était responsable de l'augmentation de taux d'absorption. En revanche, une

humidité relative élevée a favorisé la progression du degré d'hydratation et a densifié la structure, ce qui a entraîné une diminution de taux d'absorption de l'eau.

Tous les modes de cure étudiés étaient efficaces pour améliorer la résistance à la compression et réduire la déformation due au retrait au séchage dans le BCR. Cependant, il convient de noter que les méthodes cure humide présentaient une meilleure efficacité que les autres méthodes, ceci peut s'expliquer par le fait que ces méthodes réduisent la dessiccation du béton et fournissent au BCR de l'eau pour le processus de l'hydratation.

L'ajout de la fumée de silice jusqu'à 9% en remplacement partiel de ciment a permis d'améliorer la résistance à la compression suite à la réaction pouzzolanique de cette addition, par contre il a eu un effet inverse sur le retrait à cause de la matrice cimentaire plus dense.

En ce concerne la modélisation, la première chose à mentionner est que le plan d'expérience est un outil efficace pour modéliser les différents comportements ; la résistance mécanique (en compression et en traction par fendage), le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité.

Les modèles élaborés présentaient une haute significativité avec des valeurs de P inférieures à 5% et des valeurs très élevées de F. La pertinence et la qualité des modèles peuvent également s'expliquer par les valeurs de R^2 , ces valeurs qui étaient proches à un montrent que ces modèles ont un degré de corrélation très élevé entre les modèles prédits et les données expérimentales, et qu'il existe une adéquation étroite entre les données et leurs droites de régression. L'écart types (SD) et les coefficients de variations (CoV) peuvent utiliser pour vérifier la variabilité des modèles par rapport aux données expérimentales, les faibles valeurs de SD et CoV des modèles montrent que les données expérimentales correspondent aux modèles développés.

Les graphiques sont aussi des outils pour vérifier l'adéquation et la pertinence des modèles. Les tracés des résultats prédits par rapport aux résultats réels ont montré que les données expérimentales sont bien adaptées aux résultats prédits. Les tracés de surface de réponse ont confirmé que les meilleures réponses étaient pour la combinaison de 15°C de température et de 90% d'humidité relative. Les courbes de contour ont indiqué qu'il existe une interaction parfaite entre la température et l'humidité relative. Les courbes d'interaction des réponses étaient concorde aux valeurs de P pour la signification du terme d'interaction T*H.

Une validation des modèles a été faite en testant le BCR en trois milieux environnementaux. Les résultats prédits étaient très proches aux résultats expérimentaux avec des erreurs très petites. Alors enfin, on peut dire que les nouveaux modèles de prédiction fournissent une estimation large et satisfaisante pour la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, la résistance à l'abrasion, le retrait et l'absorption du BCR durci à des températures et à des niveaux d'humidité relative variant de manière arbitraire.

PERSPECTIVES

Cette étude était limitée à une plage de 15 à 60°C pour la température et de 30 à 90 % pour l'humidité relative, mais afin d'étudier le BCR sous tous les climats (chauds-secs chauds-humides, froids-secs et froids-humides), la plage peut être étendue en dessous de zéro et au-dessus de 60°C pour la température et entre 0 et 100% pour l'humidité relative.

Cette étude s'est également limitée à deux facteurs climatiques seulement, il est possible d'étudier l'effet des autres facteurs climatiques sur le BCR, en particulier la vitesse du vent et l'ensoleillement. Ainsi qu'en raison de la particularité du climat des zones arides pendant la saison hivernale, qui se caractérise par une journée chaude et une nuit froide, il est nécessaire de l'étude de l'effet de réchauffement-refroidissement sur les propriétés du BCR.

Le comportement à la fatigue et la durabilité sont des paramètres très importants pour caractériser le BCR, il est donc important d'étudier l'effet des données climatiques sur ces paramètres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACI-207. (1999). Roller-compacted Mass Concrete.
- ACI-305R-10. (2010). Guide to Hot Weather Concreting Guide to Hot Weather Concreting.
- ACI-325. (2001). Report on roller-compacted concrete pavements. *Am Concr Inst*, 95, 1–32.
- ACI Comimittee. (2001). Report on roller-compacted concrete pavements. *Am Concr Inst*, 95, 1–32.
- ACI Committee 305. (2007). ACI 305.1-06 Specification for Hot Weather Concreting. *ACI Manual of Concrete Practices, Part 2: Construction Practices and Inspection Pavements*, 305.1-1-305.1-8.
- Acker, P. (1992). *Retraits et fissurations du béton*.
- Adaska, W. S. (2006). Roller-compacted concrete (RCC). In *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*. ASTM International.
- Ahmadi, B. H. (2000). Initial and final setting time of concrete in hot weather. *Materials and Structures*, 33(8), 511–514.
- Al-Amiri, A. M. (1988). *Durability of concrete in hot climate*. PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds
- Al-Amoudi, O. S.B., Maslehuddin, M., Shameem, M., & Ibrahim, M. (2007). Shrinkage of plain and silica fume cement concrete under hot weather. *Cement and Concrete Composites*, 29(9), 690–699. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.006>
- Al-Amoudi, Omar S Baghabra, Maslehuddin, M., & Abiola, T. O. (2004). Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather. *Construction and Building Materials*, 18(10), 737–743.
- Al-Ani, S. H., & Al-Zaiwary, M. A. K. (1988). The effect of curing period and curing delay on concrete in hot weather. *Materials and Structures*, 21(3), 205–212.
- Al-Gahtani, A. S. (2010). Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes. *Construction and Building Materials*, 24(3), 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.036>
- Alizadeh, R., Beaudoin, J. J., & Raki, L. (2011). Mechanical properties of calcium silicate hydrates. *Materials and Structures*, 44(1), 13–28.
- Almusallam, A. A. (2001). Effect of environmental conditions on the properties of fresh and

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- hardened concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(4–5), 353–361.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00007-5)
- Alyamac, K. E., Ghafari, E., & Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, 144, 192–202.
- Anderson, R. (1986). *Roller Compacted pavements-Physical Properties*, CBI report No. Ra, 3, 86.
- Andriolo, F. R. (2018). Materials and RCC quality requirements. In *Roller Compacted Concrete Dams* (pp. 61–78). Routledge.
- Asamoto, S., Ohtsuka, A., Kuwahara, Y., & Miura, C. (2011). Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(6), 590–601.
- ASTM-C 1170. (1998). Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table. *Annual Book of ASTM Standards*, 91(8), 1–5.
- ASTM-C, 1176. (1998). Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table. *Notes and Queries*, 194(5), 1–4.
<https://doi.org/10.1093/nq/194.5.108-a>
- ASTM-C1435. (1999). Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer. *ASTM International*, 5–7.
- ASTM-C39/C39M. (2003). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1. *ASTM Standard Book*, 04(March), 1–5.
- ASTM-C470. (2002). Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically. *Methods*, 04, 3–7.
- ASTM-C666. (1997). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. *ASTM International*.
- ASTM-C944. (1999). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. 4–7.
- ASTM-D1557. (1991). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). *ASTM International*,

- 91(Reapproved), 1–8. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D1557>
- ASTM-E 965. (2006). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a. Reapproved 2006, 1–4. <https://doi.org/10.1520/E0965-96R06.2>
- ASTM C 157. (2005). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4.02. 14.
- ASTM C 469-02. (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete. American Society of Testing and Materials, 04(02), 1–5.
- ASTM C1585/C1585M. (2007). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes ASTM C 1585:2007. American Society for Testing and Materials., 1–6.
- ASTM C1747 / C1747M-13. (2013). Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion.
- ASTM C457. (2008). Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete - C457-08d. 05, 1–15.
- ASTM C496. (2006). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. <https://doi.org/10.1520/C0496>
- BaCaRa. (1996). Le béton compacté au rouleau. Presses de l'Ecole-, Nationale Des Ponts et Chaussées, France.
- Baker N-N. (1987), 'passive and low energy building design for tropical island climat'. Commonwealth secretariat London.
- Balayssac, J. P., Détriché, C. H., & Diafat, N. (1998). Influence de la durée de cure humide sur les caractéristiques du béton de peau. *Materials and Structures*, 31(5), 325–328.
- Barluenga, G., Guardia, C., & Puentes, J. (2018). Effect of curing temperature and relative humidity on early age and hardened properties of SCC. *Construction and Building Materials*, 167, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.029>
- Beaudoin, J. J., Raki, L., Alizadeh, R., & Mitchell, L. (2010). Dimensional change and elastic behavior of layered silicates and Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.004>
- Bella, N., Aissa, A., & Aguida, B. I. (2011). Use of a new approach (design of experiments method) to study different procedures to avoid plastic shrinkage cracking of concrete in

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- hot climates. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(2), 149–157.
<https://doi.org/10.3151/jact.9.149>
- Bentur, A., & Goldman, A. (1989). Curing effects, strength and physical properties of high strength silica fume concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(1), 46–58.
- Berhane, Z. (1992). The behaviour of concrete in hot climates. 157–162.
- Bhanja, S., & Sengupta, B. (2005). Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 743–747.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.024>
- Bjøntegaard, Hammer, T. A., & Sellevold, E. J. (2004). On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 427–435. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00065-9)
- Bouyge, B., & Forbes, B. A. (2007). A High RCC Dam with Low Grade Aggregates. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams*, Guiyang, China, 33–41.
- Bouziadi, F., Boulekbache, B., & Hamrat, M. (2016). The effects of fibres on the shrinkage of high-strength concrete under various curing temperatures. *Construction and Building Materials*, 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.164>
- Bushlaibi, A. H., & Alshamsi, A. M. (2002). Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate. *Cement and Concrete Research*, 32(6), 949–953.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00735-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00735-4)
- Cannon, R. W. (1972). *Concrete Dam Construction using Earth Compaction Method, Economical Construction of Concrete Dams*. ASCE.
- Capderou, M. (1985). « Atlas solaire de l'Algérie .Tome 2 » Office des publications universitaires.
- Cebeci, O. Z. (1987). Strength of concrete in warm and dry environment. *Materials and Structures*, 20(4), 270–272.
- Choi, Y.-K., & Hansen, K. D. (2005). RCC/Soil-cement: What's the difference? *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), 371–378.
- Chu, I., Kwon, S. H., Amin, M. N., & Kim, J. K. (2012). Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model. *Construction and Building*

- Materials, 35, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.005>
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3382–3387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.031>
- Deghfel, M., Meddah, A., Beddar, M., & Aziz, M. (2019). Experimental study on the effect of hot climate on the performance of roller - compacted concrete pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0246-8>
- Donegan, J. P. (2011). Chapter 48 Roller compacted concrete. In *ICE manual of highway design and management* (pp. 481–485). Thomas Telford Ltd.
- Douglas, C. . (2008). *Montgomery Design and Analysis of Experiments*. John Wiley.
- Duplay C et al , (1982), *Méthode illustrée de création architecturale*, édition le Moniteur Paris.
- ERES Consultant, (1998), *Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures*, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada
- Escalante-Garcia, J. I. (2003). Nonevaporable water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1883–1888. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00208-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00208-4)
- Estienne P et al (1970), *Climatologie* Librairie Armand Colin, édition collection U [Fanger 1970] FANGER, P. O. (1970). *Thermal Comfort*. New York : Mc Graw Hill.
- Fardeheb, F et Schoen, R. (1984), ‘Recent standalone houses. Housing developments and communities’. In *proc of PLEA 84, Mexico, 6-11/08/84, (25pages)*.
- Fabricius, C., Ainslie, A., Cloete, J., Shackleton, C., Shackleton, S., Urquhart, P., Gambiza, J., Nel, E., Rowntree, K., & Mortimore, M. (2008). *Situation Analysis of Ecosystem Services and Poverty Alleviation in arid and semi-arid Africa*. *Ecosystem Services for Poverty Alleviation (ESPA) Report*. Online at <Http://Www. Nerc. Ac. Uk/Research/Funded/Programmes/Espa/Final-Report-Africa/Accessed> December, 22, 2015.
- Fitsh J-M. et Branch D-P. (1960), ‘Primitive architecture and climate’. In *scientific American*, Dec/60, pp. 134-144.

- Gagné R., (2000), High-performance roller-compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability, International symposium on engineering materials for sustainable development, Okayama, Japon, 2000, 20-21 novembre, pp. 74-88.
- Gagné R., (2004), Le Béton Compacté au Rouleau BCR, présentation PowerPoint, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- Gallucci, E., Zhang, X., & Scrivener, K. (2006). Influence de la températures sur le développement microstructural des bétons, Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton. Laboratoire de Matériaux de Construction, EPFL, Lausanne, Suisse, Toulouse, France, 19–20.
- Gauthier, P., & Marchand, J. (2001). Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTO). Association Canadiennes Du Ciment.(ACC). Association Béton Québec (ABQ). 129p.
- Gauthier, P., & Marchand, J. (2004). Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Association Béton, Québec (ABQ) Québec, 63–87.
- Gauthier, P., Marchand, J., Boisvert, L., Ouellet, E., & Pigeon, M. (2000). Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtement en béton compacté au rouleau. Continuing Training GCI-A2455, Centre de Recherché Interuniversitaire Sur Le Béton, Département de Génie Civil, Université Laval.
- Gerstig, M., & Wadsö, L. (2010). A method based on isothermal calorimetry to quantify the influence of moisture on the hydration rate of young cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 40(6), 867–874. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.005>
- Givoni B (1980). 'l'homme, l'architecture et le climat'. Edition moniteur, Paris.
- Goto, S., & Roy, D. M. (1981). The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, 11(4), 575–579.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Algin, Z., & Mermerdaş, K. (2014). Optimization of concrete mixture with hybrid blends of metakaolin and fly ash using response surface method. *Composites Part B: Engineering*, 60, 707–715.
- Hampton, J. S. (1981). Extended workability of concrete containing high-range water-

- reducing admixtures in hot weather. Special Publication, 68, 409–422.
- Hansen, K. D., & Reinhardt, P. E. W. G. (1991). *Roller-Compacted Concrete Dams* McGraw-Hill. Inc. Cap, 1, 2.
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C. V, Ceylan, H., & Bektas, F. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements.
- Hazaree, C., Wang, K., Ceylan, H., & Gopalakrishnan, K. (2011). Capillary transport in RCC: water-to-cement ratio, strength, and freeze-thaw resistance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1181–1191.
- Hooton, R. D. (1993). Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *Materials Journal*, 90(2), 143–151.
- Jensen, O. M., Hansen, P. F., Lachowski, E. E., & Glasser, F. P. (1999). Clinker mineral hydration at reduced relative humidities. *Cement and Concrete Research*, 29(9), 1505–1512. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00132-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00132-5)
- Jiang, C., Yang, Y., Wang, Y., Zhou, Y., & Ma, C. (2014). Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures. *Construction and Building Materials*, 61, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.023>
- Joshaghani, A., Balapour, M., & Ramezani pour, A. A. (2018). Effect of controlled environmental conditions on mechanical, microstructural and durability properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 164, 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.206>
- Juarez, C. A., Fajardo, G., Monroy, S., Duran-Herrera, A., Valdez, P., & Magniont, C. (2015). Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. *Construction and Building Materials*, 91, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.028>
- Karimpour, A. (2010). Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS). *Construction and Building Materials*, 24(11), 2079–2083.
- Kockal, N. U., & Turker, F. (2007). Effect of environmental conditions on the properties of concretes with different cement types. *Construction and Building Materials*, 21(3), 634–

645.

Konya Allan, (1980). Design Primer for Hot Climates, the Architectural Press Ltd, London.

Kurdowski, W. (2014). Cement and concrete chemistry. Springer Science & Business.

Lawson, J., Phan, L., & Davis, F. (2000). Mechanical properties of high performance concrete after exposure to elevated temperatures. NISTIR 6475, National Technical Information Service, Technology Administration, US. Department of Commerce: Springfield, Virginia, USA.

Li, Q., Zhuguo, L., & Yuan, G. (2012). Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material. *Construction and Building Materials*, 35, 687–692. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.103>

Lura, P., Van Breugel, K., & Maruyama, I. (2001). Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1867–1872. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00601-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00601-9)

Mamillan, Minard et Zanghellini. (1989). Bétonnage par temps chaud- par temps froid. *Connaissance actuelles et recommandations, Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics*, n°476, pp 78-83.

Marchand, J., Gagne, R., Ouellet, E., & Lepage, S. (1997). Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete-A Review. *Special Publication*, 171, 457–486. <https://doi.org/10.14359/6111>

Maruyama, I., & Teramoto, A. (2013). Temperature dependence of autogenous shrinkage of silica fume cement pastes with a very low water-binder ratio. *Cement and Concrete Research*, 50, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.017>

Maslehuddin, M., Ibrahim, M., Shameem, M., Ali, M. R., & Al-Mehthel, M. H. (2013). Effect of curing methods on shrinkage and corrosion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 634–641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.064>

McCarter, W. J., & Ben-Saleh, A. M. (2001). Influence of practical curing methods on evaporation of water from freshly placed concrete in hot climates. *Building and Environment*, 36(8), 919–924. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00048-2)

Meddah, A., Beddar, M., & Bali, A. (2014). Experimental study of compaction quality for roller compacted concrete pavement containing rubber tire wastes. *Sustainability, Eco-*

- Efficiency and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management - Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Infrastructure, ICTI 2014, 273–278. <https://doi.org/10.1201/b16730-41>
- Meddah, A, Bensaci, H., Beddar, M., & Bali, A. (2017). Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0068-5>
- Meddah, Abdelaziz. (2015). Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques. 134.
- Meddah, Abdelaziz, Beddar, M., & Bali, A. (2014). Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 72, 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.052>
- Mi, Z., Hu, Y., Li, Q., & An, Z. (2018). Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 169, 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.025>
- Mohamed, H. A. (2011). Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(2), 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2011.06.001>
- Mohammed, B. S., Achara, B. E., Nuruddin, M. F., Yaw, M., & Zulkefli, M. Z. (2017). Properties of nano-silica-modified self-compacting engineered cementitious composites. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1225–1238.
- Mohammed, B. S., & Adamu, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 159, 234–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098>
- Mohammed, B. S., Fang, O. C., Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2012). Mix proportioning of concrete containing paper mill residuals using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 35, 63–68.
- Mongi, H., Majule, A. E., & Lyimo, J. G. (2010). Vulnerability and adaptation of rain fed agriculture to climate change and variability in semi-arid Tanzania. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(6).
- Mouret, M. (1997). Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des

- bétons confectionnés par temps chaud. Toulouse 3.
- Mtarfi, N. H., Rais, Z., Taleb, M., & Kada, K. M. (2017). Effect of fly ash and grading agent on the properties of mortar using response surface methodology. *Journal of Building Engineering*, 9, 109–116.
- Mukharjee, B. B., & Barai, S. V. (2014). Assessment of the influence of Nano-Silica on the behavior of mortar using factorial design of experiments. *Construction and Building Materials*, 68, 416–425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.074>
- NA-442. (2005). Composition , spécifications et critères de conformite des ciments courants.
- Nasir, M., Al-Amoudi, O. S. B., & Maslehuddin, M. (2017). Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather. *Construction and Building Materials*, 152, 943–953.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). Longman London.
- O.N.M, “ Données météorologiques ”, Office National de la Météorologique, (Station météorologique de M’sila) 2008.
- Oueld H ,1993 : “Recommandations architecturales “ Ministères de l’habitat édition ENAG, Alger.
- Ouellet, E. (1998). *Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau*, mastère en génie civil, université de Laval. Canada.
- Patel, R. G., Killoh, D. C., Parrott, L. J., & Gutteridge, W. A. (1988). Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste. *Materials and Structures*, 21(3), 192–197. <https://doi.org/10.1007/BF02473055>
- Phan, L. T., & Carino, N. J. (2003). Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 36(256), 91–98. <https://doi.org/10.1617/13811>
- Pigeon, M., Toma, G., Marchand, J., & Bissonnette, B. (2003). Étude expérimentale du retrait endogène restreint au jeune âge. *Materials and Structures*, 36(10), 666–672.
- Pinto, S. R., Macedo, A. L. A., & Medeiros-Junior, R. A. (2018). Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0032-6>
- Pittman, D. W. (1989). The effects of the construction process on selected fresh and hardened

properties of roller-compacted concrete (RCC) pavements. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS GEOTECHNICAL LAB.

Pouliot, N., Sedran, T., de LARRARD, F., & Marchand, J. (2001). Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire. BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES, 23–36.

Ramezani pour, A. A., & Malhotra, V. M. (1995). Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 17(2), 125–133. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00005-W](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00005-W)

Ramezani pour, Ali Akbar, Mohammadi, A., Dehkordi, E. R., & Chenar, Q. B. (2017). Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavements in cold regions. *Construction and Building Materials*, 146, 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.099>

Rao, S. K., Sravana, P., & Rao, T. C. (2016). Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, 114, 925–933. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.004>

Raphael, J. M. (1970). The optimum gravity dam. *Roller Compacted Concrete III*, 5–19.

Rezaifar, O., Hasanzadeh, M., & Gholhaki, M. (2016). Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method. *Construction and Building Materials*, 123, 59–68.

Saucier F., Cormier B. et Duchesne C., (1995), Introduction au dimensionnement et à la construction des chaussées en béton de ciment, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.

Sealey A (1979) : Introduction to building climatology, published by the CAA 1979.

Serdan, T., François, & Angot, D. (1994). Prédiction de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide-II-Validation, cas des mélanges confinés. *Bulletin de Liaison Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, 194.

Service d'expertise en matériaux (S.E.M.) inc., Rapport interne, pagination multiple.

- Shoukry, S. N., William, G. W., Downie, B., & Riad, M. Y. (2011). Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.020>
- Site Web CLIMATE-DATA, <https://www.CLIMATE-DATA.org>.
- Site Web meteoblue, <https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate.html>.
- Smith, K., Von Quintus, H., Killingsworth, B., Barton, R., & Kobia, K. (1998). Review of life-cycle costing analysis procedures. Final Report Prepared by: Brent Rauhut Engineering, ADI Group, and Submitted by ERES Consultants for Ontario Ministry of Transportation.
- Soroka, I., & Ravina, D. (1998). Hot weather concreting with admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 20(2–3), 129–136.
- Tasdemir, C., Tasdemir, M. A., Lydon, F. D., & Barr, B. I. G. (1996). Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(1), 63–68.
- Taylor, H. F. W. (1997). Cement chemistry. *Cement Chemistry*. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>
- USACE. (2000). Engineering and Design Roller Compacted Concrete. Engineer Manual No 1110-2-2006.
- Wang, Q., Feng, J. J., & Yan, P. Y. (2011). An explanation for the negative effect of elevated temperature at early ages on the late-age strength of concrete. *Journal of Materials Science*, 46(22), 7279–7288. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5689-z>
- Wasserman, R., & Bentur, A. (2013). Efficiency of curing technologies: Strength and durability. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(11), 1833–1842. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0021-9>
- Xiao, J., & König, G. (2004). Study on concrete at high temperature in China—an overview. *Fire Safety Journal*, 39(1), 89–103.
- Xuan, D. X., Shui, Z. H., & Wu, S. P. (2009). Influence of silica fume on the interfacial bond between aggregate and matrix in near-surface layer of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2631–2635. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01>

.006

- Yang, Y. Z., Li, M. G., Deng, H. W., & Liu, Q. (2014). Effects of temperature on drying shrinkage of concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 584–586, 1176–1181. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.1176>
- Yüksel, İ., Siddique, R., & Özkan, Ö. (2011). Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 25(2), 967–972.
- Zacak, M., Garrault, S., Korb, J. P., & Nonat, A. (2007). Effect of temperature on the development of CSH during early hydration of C3S. 12 Th International Congress on the Chemistry of Cement, W1-06.
- Zdiri, M. (2008). Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux.
- Zhang, Z., Zhang, B., & Yan, P. (2016). Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures. *Construction and Building Materials*, 121, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.014>
- Zhengbin, Z., Jinrong, H., & Xiaoyan, T. (2007). Studies on applying high-frost-resistant and durability RCC in severe cold areas.
- Zhou, W., Li, H., & Nasser, H. (2008). Study on variability of modal parameters of concrete structure: humidity and moisture effect. *Proceedings of the SPIE 6934*, San Diego: California, USA. <https://doi.org/10.1117/12.776014>.

Table des matières

Remerciement.....	I
Sommaire.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	VI
Liste d'abréviation.....	VII
Résumé.....	01
Introduction Générale.....	04
<i>CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BCR</i>	
I.1 Présentation générale du BCR.....	08
I.1.1 Introduction	08
I.1.2 Définition	08
I.1.3 Historique	10
I.1.4 Avantage du BCR.....	12
I.2 Les principaux constituants du BCR.....	14
I.2.1 Liant.....	14
I.2.2 Granulats.....	15
I.2.3 Adjuvant.....	16
I.2.4 L'eau.....	17
I.3 Domaine d'utilisation du BCR.....	17
I.3.1 Application du BCR pour les barrages.....	17
I.3.2 Le BCR en technique routière.....	18
I.4 Propriétés du BCR.....	20
I.4.1 Propriétés du BCR à l'état frais.....	20

TABLE DES MATIERES

I.4.1.1	Maniabilité	20
I.4.1.2	Masse volumique.....	22
I.4.1.3	Teneur en air.....	23
I.4.1.4	Ségrégation.....	23
I.4.2	Propriétés du BCR à l'état durci.....	24
I.4.2.1	Résistance à la compression.....	25
I.4.2.2	Résistance à la flexion.....	25
I.4.2.3	Module d'élasticité.....	26
I.4.2.4	Retrait.....	27
I.4.2.5	Durabilité.....	28
I.4.2.6	Caractéristiques de la surface.....	29
I.5	Méthodes de formulation du BCR.....	31
I.5.1	Méthode basée sur les limites de maniabilité.....	32
I.5.2	Méthode de formulation selon les principes de la géotechnique.....	33
I.5.3	Autres méthodes de formulation du BCR.....	34
I.5.3.1	Méthode semi-empirique.....	34
I.5.3.2	Méthode théorique.....	35
I.6	Conclusion.....	36
CHAPITRE II : CARACTERISATION DU CLIMAT CHAUD ET SON EFFET SUR LES PROPRIETES DU BETON		
II.1.	Introduction.....	37
II.2	Définition du climat chaud	38
II.3	Facteurs du climat chaud	39
II.3.1	La température	40

TABLE DES MATIERES

II.3-2 Humidité relative.....	40
II.3.3 Rayonnement solaire.....	41
II.3.4 Evaporation.....	41
II.4 Effet du climat chaud sur les propriétés du béton.....	44
II.4.1 Effet du climat chaud sur les propriétés du béton à l'état frais.....	44
II.4.1.1 Ouvrabilité.....	44
II.4.1.2 Temps de prise.....	46
II.4.2 Effet du climat chaud sur les propriétés du béton à l'état durci.....	48
II.4.2.1 Résistance à la compression.....	48
II.4.2.2 Retrait plastique.....	52
II.4.2.3 Absorption capillaire.....	53
II.5 Conclusion.....	53
CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISÉS, FORMULATION ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES	
III.1 Introduction.....	54
III.2 Identification des matériaux.....	54
III.2.1 Sable.....	54
III.2.2 Gravier.....	55
III.2.3 Liant.....	57
III.2.4 Eau	57
III.3 Formulation du BCR.....	57
III.4 Techniques expérimentale.....	61
III.4.1 Malaxage.....	61
III.4.2 Compactage.....	62

TABLE DES MATIERES

III.4.3 Conditions de durcissement.....	63
III.5 Conclusion	64
CHAPITRE IV : EFFET DES DONNÉES CLIMATIQUES (TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE) SUR LES PROPRIÉTÉS DU BCR	
IV.1 Introduction.....	65
IV.2 Méthodes expérimentales.....	65
IV.3 Effet de la température de cure et l’humidité relative.....	66
IV.3.1 Résistance à la compression.....	66
IV.3.2 Résistance à la traction par fendage.....	72
IV.3.3 Module d’élasticité.....	76
IV.3.4 Résistance à l’abrasion Cantabro.....	78
IV.3.5 Retrait.....	81
IV.3.6 Absorption d’eau par capillarité.....	84
IV.4 Amélioration des propriétés du BCR.....	86
IV.4.1 Amélioration des propriétés du BCR par l’application des modes de cure... 87	
IV.4.1.1 Résistance à la compression.....	87
IV.4.1.2 Retrait.....	88
IV.4.2 Amélioration des propriétés du BCR par L’ajout de la fumée de silice..... 90	
IV.4.2.1 Résistance à la compression.....	90
IV.4.2.2 Retrait.....	91
IV.5 Conclusion.....	93
CHAPITRE V : L’EFFET DU COUPLAGE TEMPERATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE SUR LE COMPORTEMENT DU BCR	
V.1 Introduction.....	94
V.2 Méthode de surface de réponses (Plan d’expérience)	94

TABLE DES MATIERES

V.3 Description du logiciel utilisé.....	96
V.4 Modèles statistiques et analyse de la variance.....	98
V.5 Validation des modèles.....	107
V.6 Relation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage du RCR à l'aide de RSM.....	108
V.7 Conclusion.....	107
Conclusion Générale et perspectives.....	110
Références bibliographiques.....	114
Table des matières.....	127