



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master Domaine des Sciences et technologies

Filière : génie civil

Spécialité : matériaux en génie civil

Thème

L'effet de la température des constituants du béton sur son comportement à l'état frais et à l'état durci.

Présentée par :

- Saadoud Lkhmissi
- Merzougui Hocine

Encadreur : Dr, Deghfel Moussa

Co-encadreur : Dr, Chalane Mourad

Année universitaire : 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier Dieu, Le tout puissant pour nous avoir donné le courage et la patience pour la réalisation de ce modeste travail

Ainsi nous tenons à remercier vivement nos encadrateurs

«DR. DEGHFEL MOUSSA et DR. CHALANE MOURAD» Pour
L'intéressante documentation qu'ils ont mise à notre disposition, pour leur disponibilité et leurs nombreux encouragements.

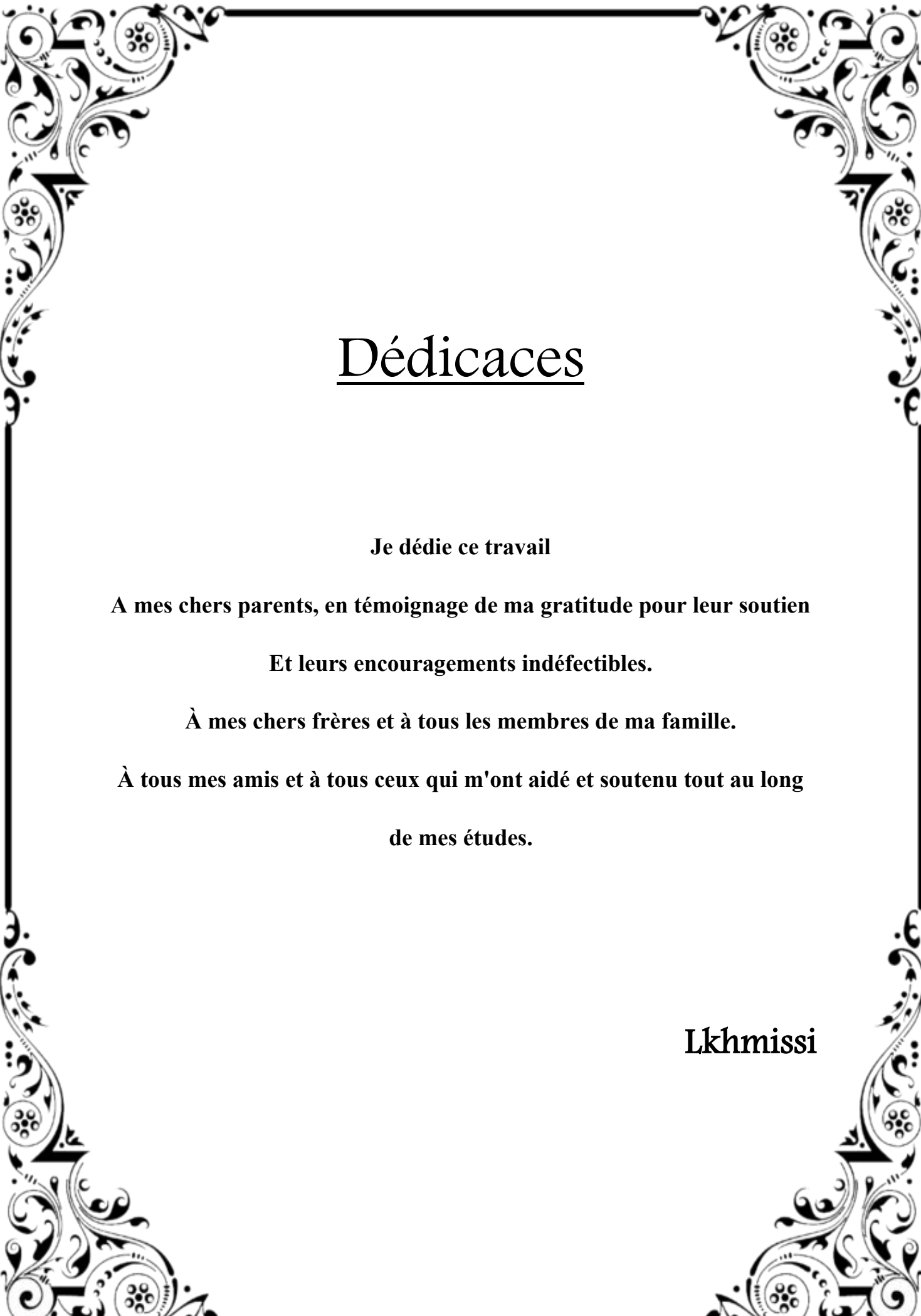
remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous ne pouvons pas terminer sans remercier tous les enseignants, tous les collègues qui nous ont aidés et qui nous ont entièrement soutenus au cours des dernières années.

Je ne peux oublier mes parents et les membres de ma famille. Qu'ils soient gracieusement et sincèrement remerciés pour leur soutien et leurs dévouements.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux ont participé directement ou indirectement au bon déroulement de ce travail de recherche et à sa finalité.

MERCI



Dédicaces

Je dédie ce travail

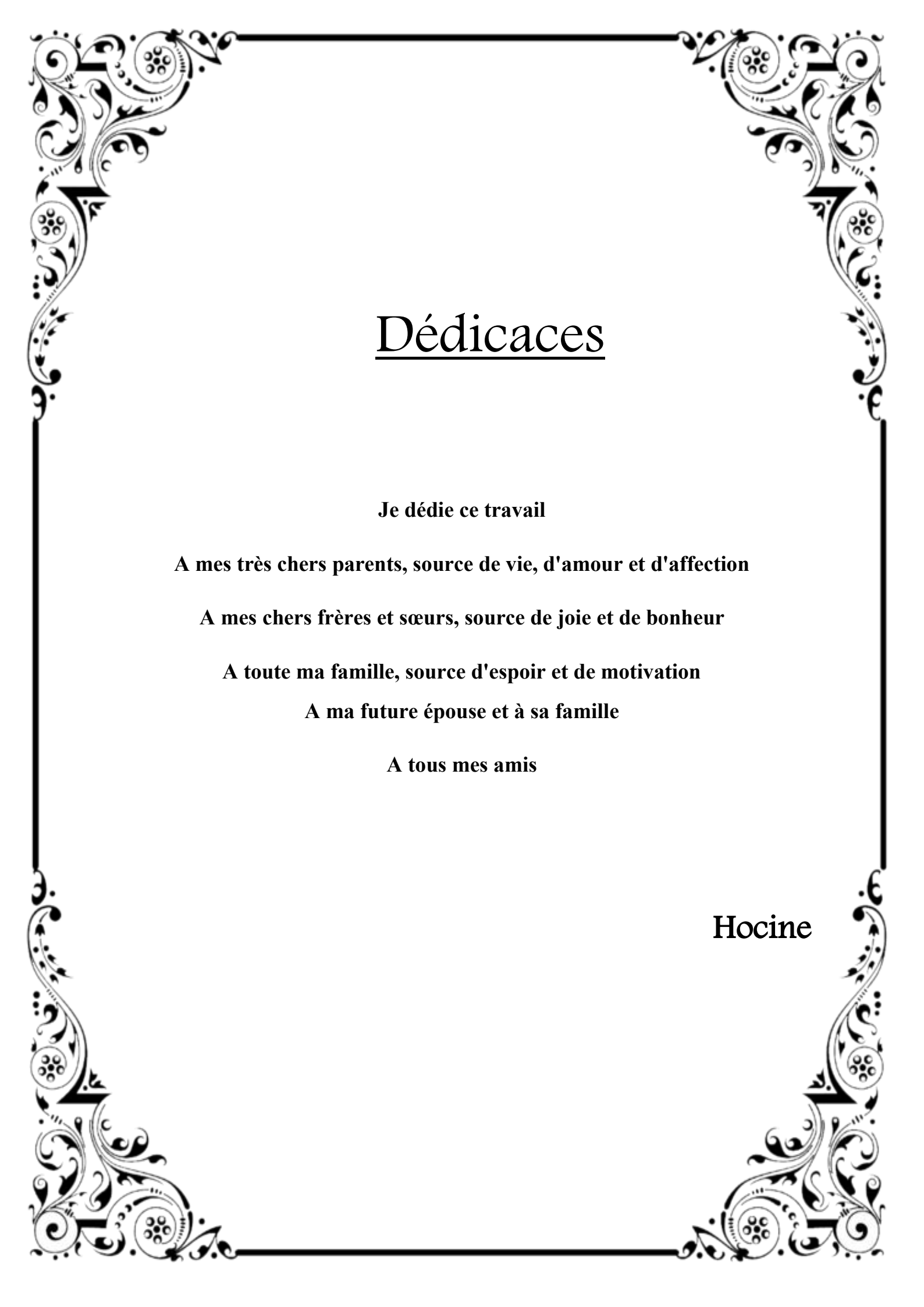
A mes chers parents, en témoignage de ma gratitude pour leur soutien

Et leurs encouragements indéfectibles.

À mes chers frères et à tous les membres de ma famille.

**À tous mes amis et à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu tout au long
de mes études.**

Lkhmissi



Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères et sœurs, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A ma future épouse et à sa famille

A tous mes amis

Hocine

RESUME

De nombreuses études ont été menées sur les effets des climats chauds sur le comportement du béton. La plupart de ces études se sont concentrées sur l'examen du béton en laboratoire, dans un environnement simulant des conditions climatiques chaudes, sans aborder l'impact de la température de ses constituants sur son comportement. L'effet du climat chaud se manifeste d'abord sur les composants du béton eux-mêmes, dont la température augmente avant même leur utilisation dans la préparation du béton. Il est certain que l'élévation de température des composants du béton affectera significativement leurs propriétés rhéologiques, mécaniques et physiques.

Ce travail est pour objet d'étudier dans un premier l'effet de la température des constituants du béton sur leur comportement à l'état frais (température, ouvrabilité) et à l'état durci (résistance à la compression, absorption d'eau par capillarité). Ensuite, nous cherchons de modéliser le comportement rhéologique et mécanique du béton en fonction de la température de ses composants, afin de déduire et de prédire le comportement du béton frais et durci avant sa mise en œuvre.

Pour atteindre cet objectif, trois niveaux de températures (20, 40 et 60 °C) de deux composants ont été adoptées, la température des granulats T_g et la température du ciment T_c .

Les résultats de cette recherche montrent que l'augmentation de la température des composants du béton a d'abord entraîné une augmentation de la température du mélange et par conséquent une diminution significative de l'affaissement. Elle a également entraîné une augmentation significative de l'absorption d'eau par capillarité et un affaiblissement des propriétés mécaniques du béton.

Cette étude vise également à élaborer des modèles mathématiques pouvant être utilisées pour prédire les propriétés du béton avec différentes températures de ses composants. 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 : Béton, température des granulats, température du ciment, modélisation.

الملخص

أُجريت دراسات عديدة حول تأثير المناخ الحار على سلوك الخرسانة. ركزت معظم هذه الدراسات على فحص الخرسانة في المختبر، في بيئة تحاكي الظروف المناخية الحارة، دون التطرق إلى تأثير درجة حرارة مكوناتها على سلوكها. يظهر تأثير المناخ الحار أولاً على مكونات الخرسانة نفسها، حيث ترتفع درجة حرارتها حتى قبل استخدامها في الخلطة الخرسانية. ومن المؤكد أن ارتفاع درجة حرارة مكونات الخرسانة سيؤثر بشكل كبير على خصائصها الريولوجية، الميكانيكية والفيزيائية.

يهدف هذا العمل أولاً إلى دراسة تأثير درجة حرارة مكونات الخرسانة على سلوكها في حالتها الطرية (درجة الحرارة، قابلية التشغيل) وفي حالتها المتصلبة (مقاومة الضغط، امتصاص الماء بالخاصية الشعرية). ثانياً، نسعى إلى نمذجة السلوك الريولوجي والميكانيكي للخرسانة كدالة لدرجة حرارة مكوناتها، وذلك لمحاولة استنتاج وتوقع سلوك الخرسانة الطرية والمتصلبة قبل صبتها.

لتحقيق هذا الهدف، استُخدمت درجتا حرارة لمكونين في دراستنا: درجة حرارة الركام (T_g) ودرجة حرارة الأسمنت (T_c)، عند ثلاث مستويات مختلفة (20، 40، و60 درجة مئوية لكل من الركام والأسمنت).

أظهرت نتائج هذا البحث أن زيادة درجة حرارة مكونات الخرسانة أدت في البداية إلى ارتفاع درجة حرارة الخليط، وبالتالي انخفاض ملحوظ في الهبوط. كما نتج عنها زيادة ملحوظة في امتصاص الماء بالخاصية الشعرية وضعف في الخواص الميكانيكية للخرسانة.

تهدف هذه الدراسة أيضاً إلى تطوير نماذج رياضية يُمكن استخدامها للتنبؤ بخواص الخرسانة عند درجات حرارة مختلفة للمكونات. وقد أظهرت النتائج وجود ترابط جيد بين النماذج المطورة والبيانات التجريبية المقابلة، حيث أظهرت جميعها علاقات تربيعية بدرجة عالية من الارتباط.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، درجة حرارة الركام، درجة حرارة الأسمنت، النمذجة.

ABSTRACT

Numerous studies have investigated the effects of hot climates on the behavior of concrete. Most of these studies have focused on evaluating concrete under laboratory conditions that simulate hot-weather environments, without considering the influence of the temperature of its constituent materials on its performance. In reality, the effects of hot climates first manifest themselves in the concrete constituents, whose temperatures rise before they are incorporated into the concrete mixture. Such an increase in the temperature of concrete constituents can significantly affect the rheological, mechanical, and physical properties of concrete.

The present study aims, firstly, to investigate the effect of the temperature of concrete constituents on the behavior of concrete in both the fresh state (temperature and workability) and the hardened state (compressive strength and capillary water absorption). Secondly, it seeks to develop predictive models describing the rheological and mechanical behavior of concrete as a function of the temperature of its constituents, thereby enabling the prediction of the performance of fresh and hardened concrete prior to placement.

To achieve this objective, the temperatures of two concrete constituents were considered: aggregate temperature (T_g) and cement temperature (T_c). Three temperature levels were investigated for both constituents: 20, 40, and 60 °C.

The results indicate that increasing the temperature of the concrete constituents led to an increase in the temperature of the concrete mixture and, consequently, to a significant reduction in slump. Furthermore, higher constituent temperatures resulted in a substantial increase in capillary water absorption and a deterioration of the mechanical properties of concrete.

This study also proposes mathematical models for predicting concrete properties at different constituent temperatures. The results demonstrated a strong agreement between the developed models and the corresponding experimental data. In all cases, quadratic relationships provided the best fit, yielding high correlation coefficients.

Keywords: Concrete, aggregate temperature, cement temperature, modelling.

Table des matières

Résumé

Table de matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

Introduction générale	01
Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le béton.....	03
I-1 Introduction	03
I-2 Constituants de béton	04
I-2-1 Ciments.....	04
I-2-2 Granulats.....	04
I-2-3 Eau de gâchage.....	05
I-2-4 Adjuvants.....	05
I-3 Propriétés du béton.....	06
I-3-1 Propriétés du béton frais	06
I-3-2 Propriétés du béton durci.....	07
I-3-2-1 Résistance mécanique	07
I-3-2-2 La durabilité	08
I-3-2-2-1 Comportement du béton suite aux attaques chimiques	08
a) Mécanismes des attaques chimiques du béton	08
b) Effets des attaques chimiques sur le béton	09
Chapitre II : Effet de la température sur les propriétés du béton.....	11
II-1 Introduction.....	11
II-2 A l'état frais	11
II-2-1 Ouvrabilité	11
II-2-2 Temps de prise	14
II-3 A l'état durci	15
II-3-1 Résistance à la compression	15
II-3-2 Retrait.....	19
II-4 Conclusion	21

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation	22
III-1 Introduction	22
III-2 Les matériaux et les composantes du béton	22
III-2-1 Les granulats	22
Définition	22
a) Analyse granulométrique	23
b) Module de finesse du sable.....	24
c) Masses volumiques et absorption	25
d) L'Équivalent de sable (ES) et (VBS).....	25
e) Essai de Dureté	26
III-2-2 Le ciment.....	27
III-2-3 Eau de gâchage	27
III-3 Formulation du béton	28
III-3-1 Méthodes de formulation du béton.....	28
a) Détermination du rapport C/E	28
b) Détermination de C	29
c) Détermination de E.....	29
d) Détermination du mélange optimal à minimum de vides.....	29
e) Préparation des mélanges	33
III-4 Techniques expérimentales	33
III-4-1 Malaxage	33
III-4-2 Compactage.....	34
III-4-3 Préparation des échantillons.....	35
III-5 Conclusion	35
Chapitre IV : Résultats et discussions.....	36
IV-1 Introduction	36
IV-2 Effet des adjuvants sur les propriétés du béton	36
IV-2-1 La température du béton frais	36
IV-2-2 Ouvrabilité	38
IV-2-3 Résistance à la compression	39
IV-2-4 Absorption capillaire.....	42
IV-3 Effet du couplage Tg et Tc sur le comportement du béton.....	44
IV-3-1 Méthode de surface de réponses (Plan d'expérience)	44
IV-3-2 Description du logiciel utilisé	45
IV-3-3 Modèles statistiques et analyse de la variance	47
IV-4 Conclusion	54
Conclusion générale.....	55
Références bibliographiques	

Liste des tableaux

Tableau III- 1: Résultats d'analyse granulométrique.....	24
Tableau III- 2: Masses volumiques et absorption	25
Tableau III- 3 : Equivalent de sable et VBS.....	26
Tableau III- 4: Coefficient LA (Los-Angeles)	26
Tableau III- 5: Propriétés des granulats utilisés).....	26
Tableau III- 6: Composition chimique du ciment CEM II 42,5 utilisé	27
Tableau III- 7: Composition minéralogique du ciment CEM II B 42,5	27
Tableau III- 8: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé.....	27
Tableau III- 10: Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax.....	29
Tableau III- 11: K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.	30
Tableau III- 12: Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage ..	32
Tableau III- 13: Composition d'un mètre cube du béton	33
Tableau III- 14: Composition des bétons avec les différents dosages d'adjuvants	33
Tableau III- 15: Procédures de malaxage.....	35
Tableau VI- 1: Conception expérimentale et résultats expérimentaux	48
Tableau VI- 2: Analyse de variance (ANOVA) pour les modèles de réponse.....	48
Tableau VI- 3: Termes des modèles de réponse	49
Tableau VI- 4: Résumé d'ajustement.....	51

Liste des figures

Figure I. 1 : Constituants du béton	03
Figure I. 2 : Durcissement et finition du béton	06
Figure I.3: Couplage environnement/contraintes mécaniques/actions physico-chimiques influentes la durabilité du béton	10
Figure II.1 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants.....	12
Figure II.2 : Effet de la température du béton sur l'affaissement et la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25mm.....	13
Figure II.3 : Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C.....	13
Figure II.4 : Effet de la température sur le temps de début et fin de prise.....	14
Figure II.5 : Effet de la température sur le temps de début de prise.....	15
Figure II.6 : Effet de la température sur le temps de début de prise.....	15
Figure II.7 : Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide	16
Figure II.8 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage.....	17
Figure II.9 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide.....	17
Figure II.10 : Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité.....	18
Figure II.11 : Gain de la résistance à la compression.....	19
Figure II.12 : Gain de la résistance à la traction.....	19
Figure III.1: Granulats utilisés.....	23
Figure III. 2: Appareillage de l'équivalent de sable.....	25
Figure III. 3: Appareille de fragmentation LA.	26
Figure III. 4: Ciment CEM II B 42,5.....	27
Figure III. 5: Abaque permettant la détermination du dosage en ciment C	29
Figure III. 6: Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.	31
Figure III. 7: Aspect du témoin lors de malaxage	34
Figure IV.1 : Évolution de la température du béton frais en fonction de la température de ses composants	37
Figure IV.2 : Effet de la température des composants de béton sur sa maniabilité	39
Figure IV.3 : Effet de la température du ciment sur la résistance à la compression.....	40
Figure IV.4 : Le perte de résistance finale (à 28 Jours) lorsque la température de ciment	

augmente de 20 à 60 °C sous les trois températures des granulats	40
Figure IV.5 : Effet de la température des granulats sur la résistance à la compression	41
Figure IV.6 : Le perte de résistance finale (à 28 Jours) lorsque la température des granulats augmente de 20 à 60 °C sous les trois températures du ciment	42
Figure IV.7 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps et de la température de ses composants	43
Figure IV.8 : Résultats prédits vs réels pour les modèles développés	52
Figure IV.9 : Surface de réponse pour les modèles développés.....	53
Figure IV.11 : Courbes d'interaction pour les modèles développés	54

Liste des symboles

NA : Norme Algérienne.

CEM : Ciments Portland.

C3S : Le silicate tricalcique 3 CaO , SiO_2 .

C2S : Le silicate bicalcique 2 CaO , SiO_2 . C3A : L'aluminate tricalcique 3 CaO , Al_2O_3 .

C4AF : L'aluminoferrite-tétracalcique 4 CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

f_{c28} : La résistance à la compression à 28 jours

NF EN : Norme Française et Européenne.

C-S-H : Hydroxyde de calcium, aluminates.

CaCO_3 : Carbonate de calcium.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: Hydroxyde de calcium (Chaux hydraté).

NF P : Normes Françaises

T_g : Température des granulats.

T_c : Température du ciment.

M_f : Module de Finesse de sable.

R_c : Réfus cumulé.

ES : Equivalent de Sable.

VBS : Valeur de Bleu de Méthylène.

LA : Coefficient Los-Angeles.

σ'_c : Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C : Ciment

E : Eau

G' : Coefficient granulaire.

G : Gravier.

S : Sable.

V_t : Volume total.

V_{ab} : Volume absolue.

V_{app} : Volume apparent.

V_s : Volume de sable.

V_G : Volume de gravier.

RSM : Méthode de surface de réponses.

DOE : Les plans d'expérience.

T_b : Température du béton frais

Aff : Ouvrabilité, Affaissement.

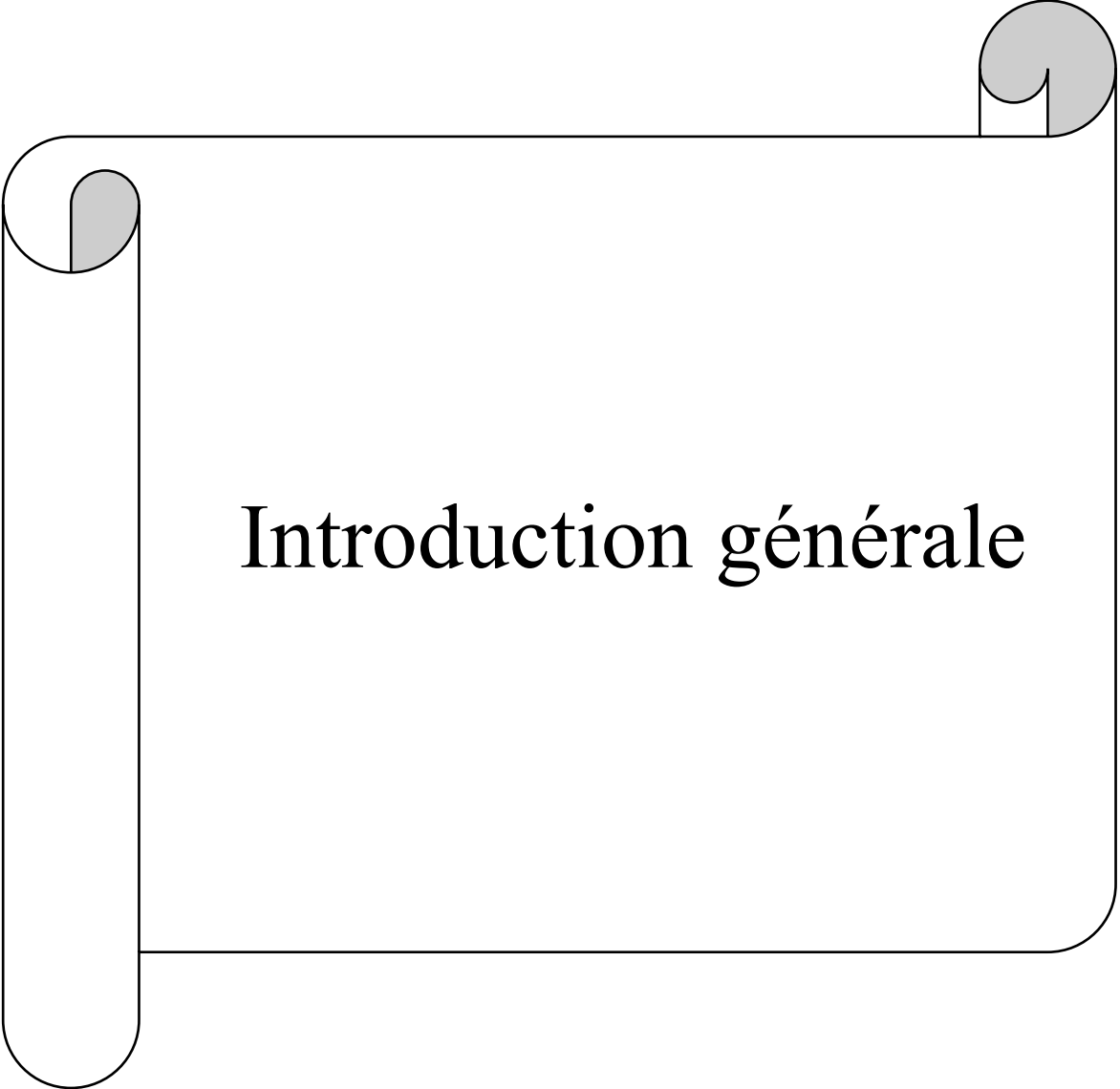
R_c : Résistance à la compression.

A_c : Absorption de l'eau par capillarité.

SD : L'écart types.

CoV : Coefficients de variations.

R : Coefficient de corrélation.



Introduction générale

Introduction générale

Le béton est sensible au jeune âge à la chaleur. La température ambiante élevée augmente la température du béton frais et, même avant cela, celle de ses composants, ce qui entraîne à son tour une hausse de la température du béton frais. L'élévation de la température accélère la prise et le durcissement, provoque l'évaporation de l'eau de gâchage et peut donc avoir une incidence défavorable sur les caractéristiques du béton durci.

Selon de nombreuses normes de construction (telles que le DTU 21 ou les normes américaines ACI), lors du coulage du béton, La température maximale recommandée pour le béton frais ne doit pas dépasser 32 °C, tandis que la température ambiante ne doit pas dépasser 35 °C.

Pour éviter les problèmes liés aux températures élevées, toutes les entreprises chargées de la réalisation des projets dans le sud algérien ont recours au coulage du béton la nuit, lorsque la température ambiante descend en dessous de 35 °C. Cependant, même lorsque la température ambiante passe sous ce seuil, la température des composants du béton demeure un obstacle au processus de coulage, car leur température élevée entraîne une élévation de la température du béton frais au-dessus de 32 °C, ce qui explique principalement le report du coulage jusqu'à une heure avancée de la nuit et, par conséquent, l'impossibilité de couler des quantités importantes de béton.

Objectif de l'étude

Le but de ce travail est d'évaluer l'influence de la température de composants de béton sur leur comportement à l'état frais et à l'état durci. Dans cette étude nous nous sommes concentrés uniquement sur l'effet de la température de deux composants, à savoir les granulats et le ciment, sur le comportement du béton. Ces deux derniers sont utilisés avec trois niveaux de température différentes (20, 40 et 60 °C pour les deux) pour examiner la température du mélange frais, l'ouvrabilité, la résistance à la compression et l'absorption d'eau par capillarité. La température a été mesurée à quatre reprises (0, 20, 40 et 60min), L'ouvrabilité a été évaluée également à quatre reprises (0, 20, 40 et 60min), la résistance à la compression a été évaluée à 3, 7 et 28 Jours, l'absorption d'eau par capillarité a été évaluée après 28 jours. Il est évident à noter que la température du troisième composant du béton (l'eau) a été maintenue constante à 20 °C tout au long de l'étude.

Présentation du mémoire

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale décrivant l'influence de la température de deux composants de béton sur leur comportement. Les facteurs pris en compte

dans cette étude sont la température des granulats et la température du ciment. Pour évaluer l'effet des variations de ces facteurs sur le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci, trois niveaux de température des granulats (20, 40 et 60 °C) ont été adoptées, chaque niveau de température des granulats a été examinée en trois niveaux de température du ciment (20, 40 et 60 °C) ; En conséquence, neuf mélanges ont été étudiés. Cependant, l'étude de la température de deux composants au même temps donne des comportements complexes, donc là il est nécessaire d'étude de l'effet de l'interaction de ces deux facteurs sur les propriétés du béton. Donc, la recherche vise également à élaborer des modèles mathématiques pouvant être utilisées pour prédire l'impact de la température de ces deux composants sur les propriétés du béton.

Pour arriver aux objectifs fixés, nous avons structuré le mémoire 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 béton et les mécanismes fondamentaux qui gèrent son comportement.
- Le deuxième chapitre, met en évidence les effets de la température sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

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

- Le troisième chapitre est une description détaillée de tous les matériaux utilisés et formulation du béton 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, dans sa première partie s'intéresse à l'étude de l'effet de la température de deux composants de béton (granulats et ciment) sur les propriétés du béton. La deuxième partie de ce chapitre concerne l'élaboration des modèles mathématiques qui décrivent l'effet de la température de ces deux composants sur le comportement du béton par les plans d'expériences.

Et enfin, le mémoire est finalisé par une conclusion générale qui regroupe l'extrait des résultats obtenus et les recommandations pour les futures recherches.

Chapitre I :
Synthèse bibliographique sur le béton

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le béton

I-1 Introduction :

Le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé. Il permet de réaliser des portées importantes et des formes complexes [1]. C'est pour l'essentiel un mélange de grains minéraux de dimensions variables et d'eau incorporant éventuellement des adjuvants et des additions [2]. Certains minéraux, appelés granulats, sont inertes. D'autres, les liants (ciment), réagissent avec l'eau en formant une pâte qui fait prise et qui durcit dans l'air ou sous l'eau en donnant naissance à un matériau composite performant [1].

Le béton se présente donc sous deux états physiques successifs : tout d'abord sous la forme d'un mélange plus ou moins liquide, le béton frais, puis progressivement sous la forme d'un matériau solide, le béton durci. Le premier état permet la mise en place du béton dans son contenant (coffrage, moule). Cette faculté d'ouvrabilité est caractérisée par la consistance. Le deuxième constitue le produit fini. Il est proposé sous la forme et l'aspect souhaités, il doit notamment fournir les résistances mécaniques exigées tout en assurant la durabilité [1]. On considère qu'un béton est durable s'il conserve aussi longtemps que nécessaire (durée d'utilisation du projet), à la fois son intégrité structurelle et les qualités requises [1].

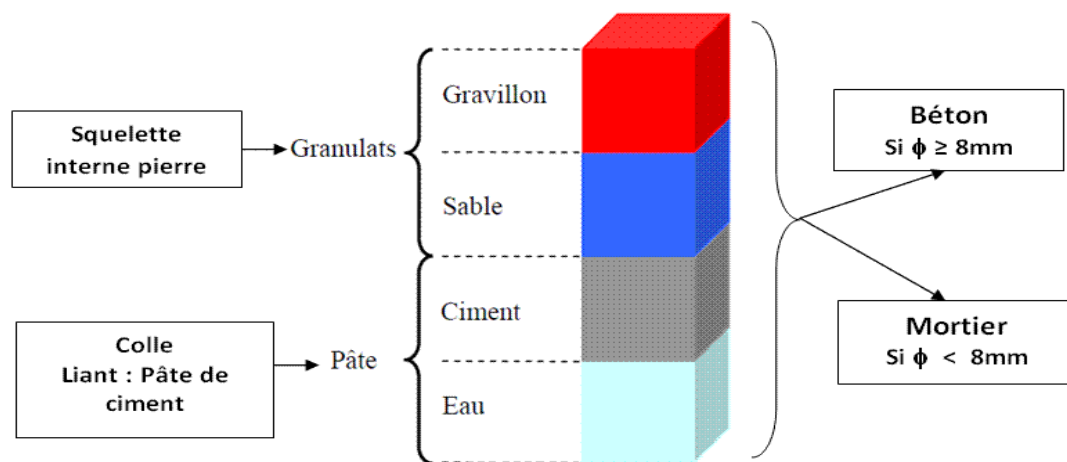


Figure I.1 : Constituants du béton [3].

I-2 Constituants de béton :

I-2-1 Ciments :

Selon la norme NA442 [4], le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment conforme à la norme NA442/2013[4], appelé ciment CEM.

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique 3 CaO , SiO_2 (ou, par abréviation, C3S) ; le silicate bicalcique 2 CaO , SiO_2 (ou C2S) ; l'aluminate tricalcique 3 CaO , Al_2O_3 (ou C3A) et l'aluminoferrite-tétracalcique 4 CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (ou C4AF).

Ces constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de « prise ». C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures. Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives [5].

I-2-2 Granulats :

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes : fillers ; sablons ; sables ; graves ; gravillons ; ballast et enrochements [5].

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production [5].

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats

roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés). La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis [5].

I-2-3 Eau de gâchage :

L'eau, considérée comme matériau, n'est guère utilisée en construction que pour la confection des mortiers et bétons : elle porte alors le nom d'eau de gâchage. Il joue des fonctions principales ; confère au béton sa maniabilité à l'état frais et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité et la résistance mécanique [6].

A ce sujet, il faut bien faire la distinction entre :

- **L'eau de gâchage** : qui est l'eau totale ajoutée au mélange sec.
- **L'eau de prise** : qui est l'eau absorbée par le ciment lors de sa prise, c'est-à-dire l'eau d'hydratation du ciment.

I-2-4 Adjuvants

Les adjuvants sont devenus les quatrièmes ingrédients du béton qui vient s'ajouter aux trois constituants fondamentaux : les granulats, le ciment et l'eau. Les adjuvants sont utilisés, en règle générale, pour leurs propriétés plastifiantes et fluidifiantes (diminuer le rapport E/C, améliorer l'ouvrabilité, réduire le dosage en ciment, augmenter la résistance mécanique, ...) sans oublier l'amélioration de certaines qualités de durabilité. En effet ces adjuvants sont conçus pour un rôle essentiel qui est l'amélioration de certaines propriétés sans nuire à la résistance.

En fait, il existe plusieurs types de l'adjuvant et ils s'utilisent selon les nécessités. Où les plastifiants sont utilisés pour diminuer le rapport E/C, améliorer l'ouvrabilité, et parfois augmenter la résistance mécanique. Les retardateurs et accélérateurs de prise ou de durcissement qui sont utilisés pour retarder ou accélérer la prise ou le durcissement selon les cas. Les hydrofuges qui sont utilisées dans les réservoirs des fluides (Eau ou dérivés de pétrole), leur rôle est de combler les vides et les microfissures dans le béton pour éliminer les fuites. Il existe d'autres adjuvants, dont chacun a un rôle dans le béton.

I-3 Propriétés du béton :

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

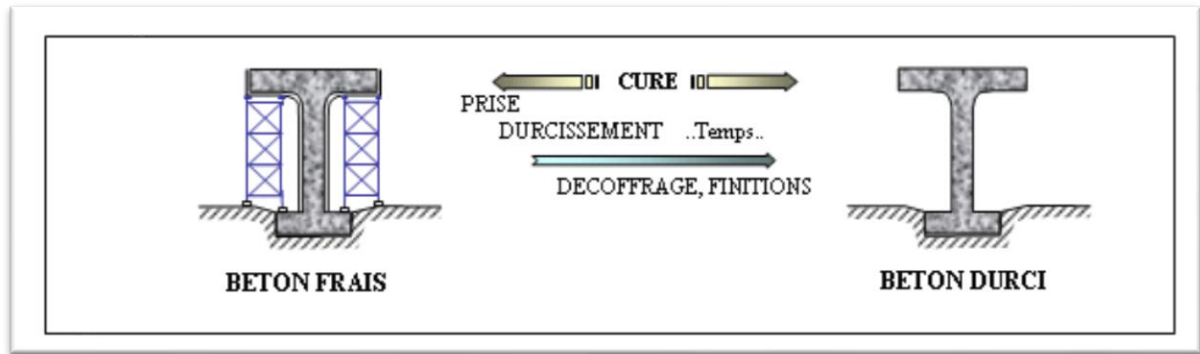


Figure I.2 : Durcissement et finition du béton [7].

- **Le béton frais** : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage.
- **Le béton durci** : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

I-3-1 Propriétés du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par [7] :

- ✓ La nature et le dosage du liant.
- ✓ La forme des granulats.
- ✓ La granularité et la granulométrie.
- ✓ Le dosage en eau

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité.

La deuxième propriété du béton frais est la masse volumique du béton, cette dernière est mesurée l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique.

I-3-2 Propriétés du béton durci :

Une fois le béton durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

I-3-2-1 Résistance mécanique :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}). La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

I-3-2-2 La durabilité :

Le béton offre une grande pérennité face aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (gel, pluie et pollution atmosphérique....). Il est particulièrement adapté pour la réalisation d'ouvrages devant résister à des conditions difficiles et extrêmes.

La porosité et la compacité, ces propriétés conditionnent les deux premières. Plus un béton est compact (moins poreux), plus ses performances seront élevées et sa durabilité importante. On améliore la compacité du béton en optimisant la dimension et l'empilement des granulats et en réduisant la quantité d'eau.

La définition et les spécifications des bétons doivent prendre en compte :

- ✓ Les agressions liées à la carbonatation et à la pénétration des chlorures (en présence de sels),
- ✓ La prévention des désordres dus aux gonflements internes du béton (alcali-réaction et réaction sulfatique interne),
- ✓ La durabilité des bétons durcis soumis au gel en présence ou non de sels de déverglaçage.

Parmi les environnements les plus agressifs pour le béton qui peuvent occasionner des attaques acides ou sulfatique importantes, des gonflements et éclatement du béton, on peut citer les environnements marins et les environnements chimiques en particulier des éclatements dans les milieux industriels et agricoles [8, 10].

Comportement du béton suite aux attaques chimiques :

a) Mécanismes des attaques chimiques du béton :

Lorsque l'attaque chimique du béton se présente, des réactions de dissolution ou de précipitation se produisent. Ainsi, de nouveaux composés se précipitent qui peuvent être nocifs pour le béton [8].

Les bétons fabriqués et mis en place conformément aux règles de l'art sont des matériaux normalement durables si ses qualités intrinsèques (compacité, perméabilité, diffusivité) sont adaptées aux milieux auquel ils sont exposés pendant la durée d'utilisation des structures. C'est-à-dire si les bétons sont bien adaptés à leur usage et à leur environnement, et s'ils sont fabriqués et mis en œuvre suivant les règles de l'art (norme NF EN 206-1), ces bétons sont

résistants chimiquement et durables et leur durée de vie présumée est d'au moins cinquante ans [8].

Le béton constitue un système très complexe formé d'un squelette granulaire solidarisé par des hydrates (C-S-H, hydroxyde de calcium, aluminates...). Ce béton qui a un PH de l'ordre de 13, lorsqu'il est plongé dans un milieu différent de son milieu naturel, les équilibres chimiques des hydrates vont être déplacés vers un nouvel équilibre qui se traduit généralement par une première étape de décomposition de la partie superficielle du matériau [9].

Par exemple, l'action de l'acide carbonique sur les composés calciques du béton $Ca(OH)_2$ et C-S-H conduit à la précipitation du carbonate de calcium $CaCO_3$ provoquant ainsi une réduction de porosité de la peau du béton qui peut constituer dans un premier temps une barrière plus ou moins protectrice vis-à-vis de la pénétration des substances agressives dans le matériau [11]. Cependant, la précipitation tardive d'ettringite dans certaines conditions spécifiques peut s'avérer nocive par le gonflement qu'elle entraîne. Alors que la précipitation de cette même ettringite formée aux premiers stades de l'hydratation par la réaction du sulfate de calcium, régulateur de prise, avec l'aluminate tricalcique du ciment, est parfaitement inoffensive [11].

b) Effets des attaques chimiques sur le béton :

Suite aux attaques du béton par des solutions agressives, une dissolution des hydrates accompagne ou non de la précipitation de nouveaux composés, se produit. Cette précipitation a deux effets majeurs sur le béton : [8, 10].

- Augmentation de la porosité du béton conduisant à un accroissement de la perméabilité et de la diffusivité. Cette augmentation se traduit par une dégradation des caractéristiques mécaniques (résistance et module d'élasticité) [12].

- La solubilité et la précipitation de nouveaux composés conduisant à un gonflement et une fissuration du matériau. C'est le cas par exemple de formation d'ettringite suite à une attaque par des sulfates d'origine extérieure.

Le phénomène de dissolution des hydrates et de la précipitation de nouveaux produits peuvent conduire à des dégradations. Ces dégradations peuvent être parfois surfacique et dans d'autres cas plus profonds de sorte qu'ils mettent en danger l'état de l'ouvrage. Les actions chimiques sont associées au même temps aux actions environnementales et mécaniques liées

au fonctionnement de l'ouvrage. La figure I.3 ci-dessous donne une vue sur le couplage des paramètres influents la durabilité du béton [13].

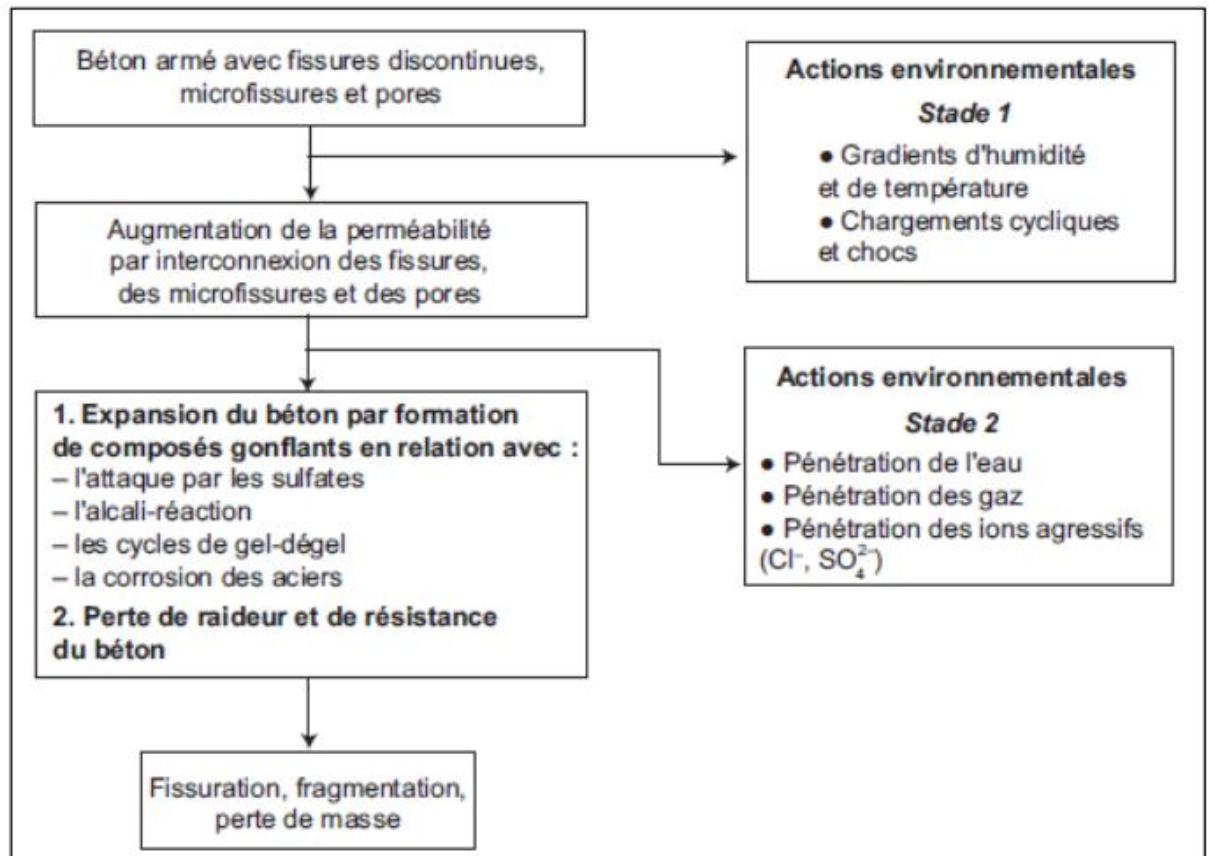
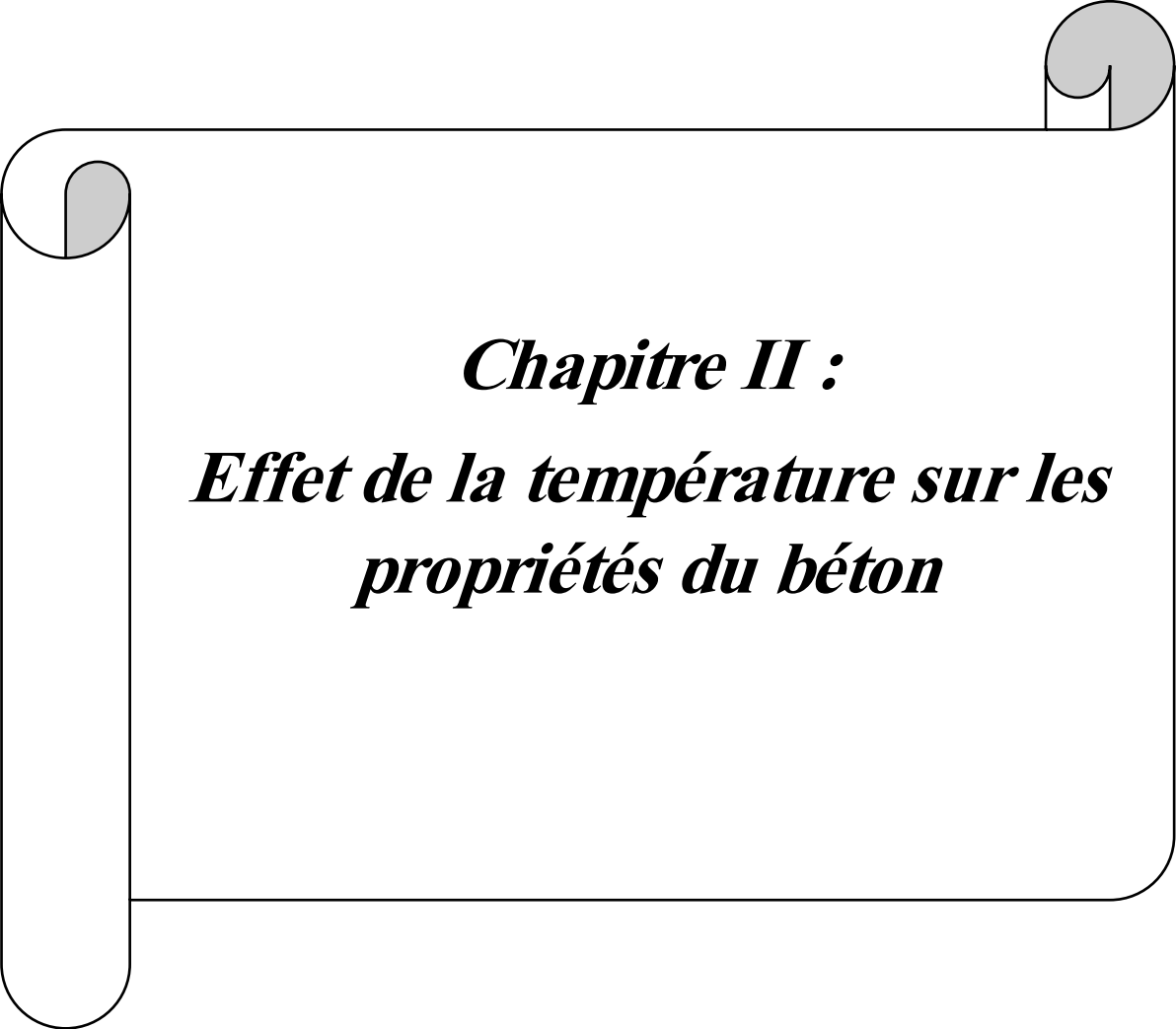


Figure I.3 : Couplage environnement/contraintes mécaniques/actions physico-chimiques influentes la durabilité du béton [13].

Première étape : dans le béton naturellement poreux et microfissuré, la perméabilité augmente sous l'action des contraintes environnementales et de service.

Deuxième étape : la pénétration des agents agressifs et à la réaction de ces agents avec les hydrates provoque des dégradations du matériau et de ses caractéristiques mécaniques.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a light gray shaded area.

Chapitre II :

Effet de la température sur les propriétés du béton

Chapitre II : Effet de la température sur les propriétés du béton

II-1 Introduction :

Le béton est sensible au jeune âge à la chaleur. L'élévation de la température accélère la prise et le durcissement, provoque l'évaporation de l'eau de gâchage et peut donc avoir une incidence défavorable sur les caractéristiques du béton durci.

Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées, et de respecter quelques règles simples relatives à la formulation et la préparation du béton, puis pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

Les ouvrages les plus concernés sont ceux présentant une grande surface libre non coffrée, tels que par exemple, les tabliers de ponts et les dallages.

L'élévation de température agit sur :

- La rhéologie du béton et son évolution ;
- La vitesse de prise ;
- La cinétique d'hydratation du ciment et de durcissement du béton ;
- L'évaporation de l'eau et la dessiccation du béton.

II.2 A l'état frais

II.2.1 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. 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. Lorsque la température ambiante ou celle des composants de béton 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 ferme 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 [14] :

- 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.

Mamillan et al, 1989 [14] 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.

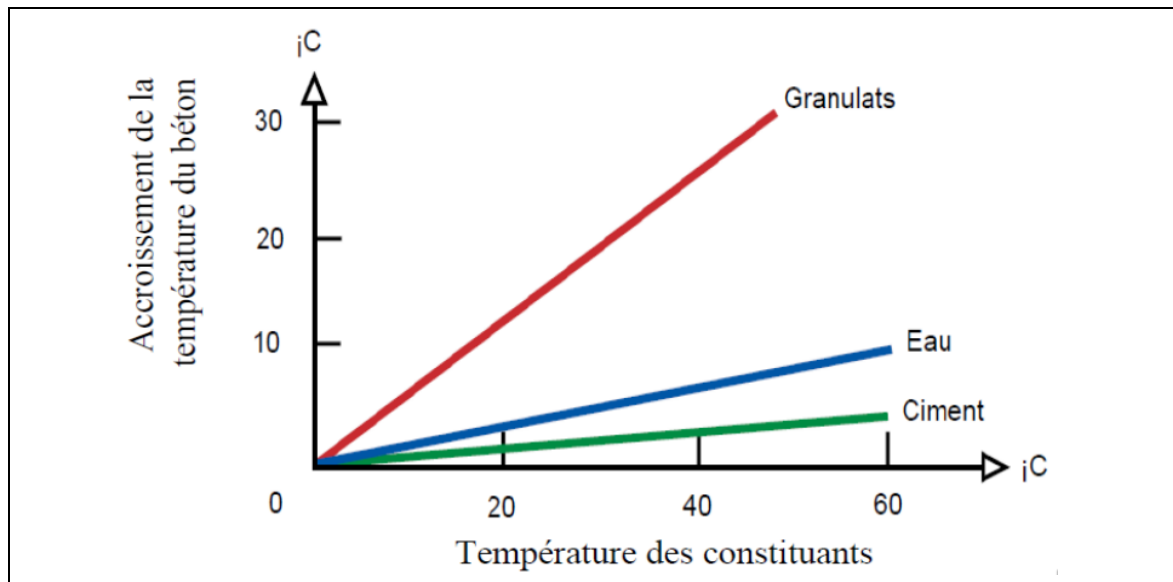


Figure II.1 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants [14].

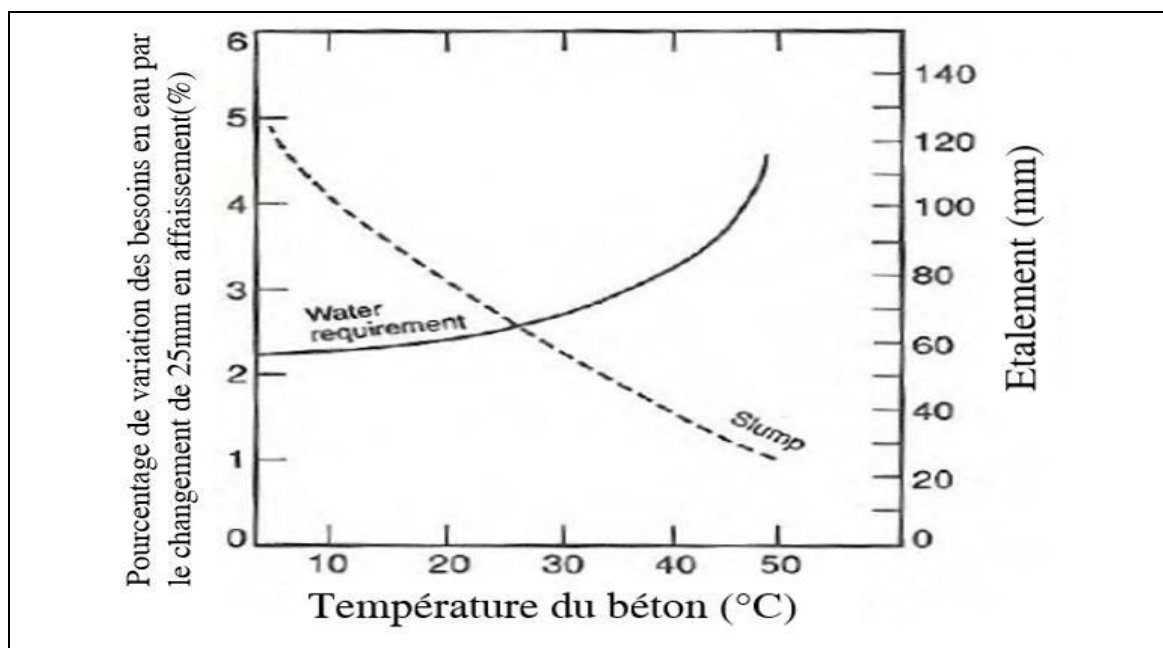


Figure II.2 : Effet de la température du béton sur l'affaissement et la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25mm [14].

Hampton, [15] 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).

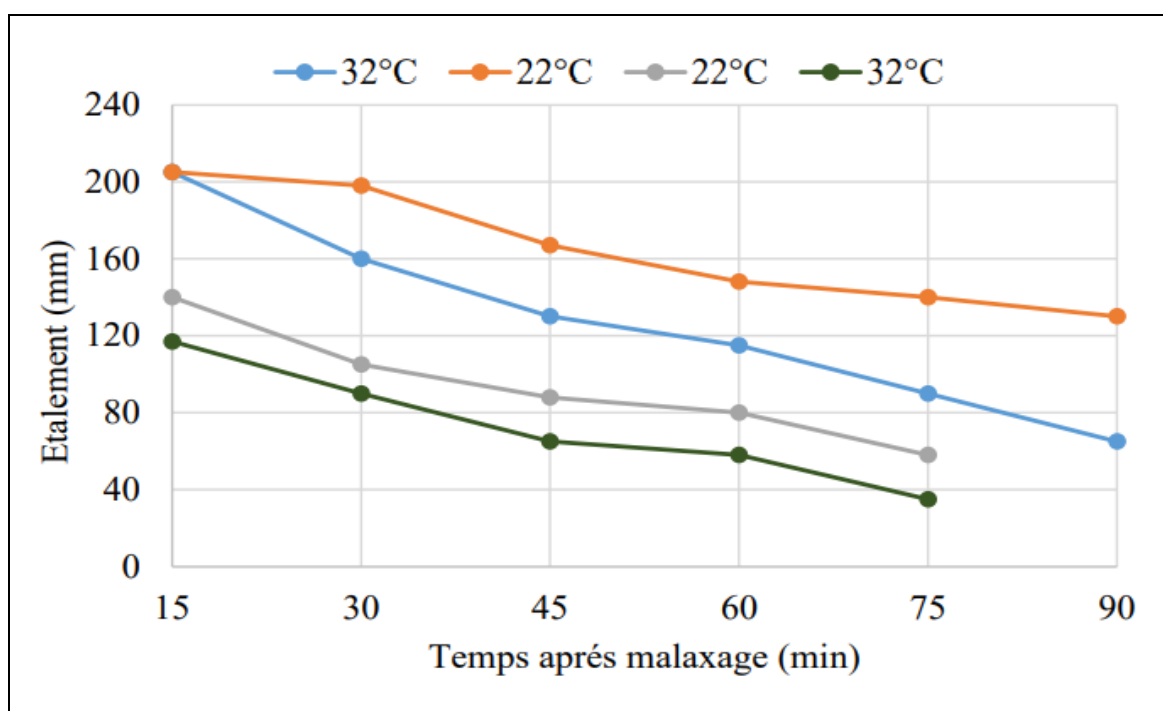


Figure II.3 : Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C [15].

II.2.2 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) [16].

Ahmadi, [17] 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).

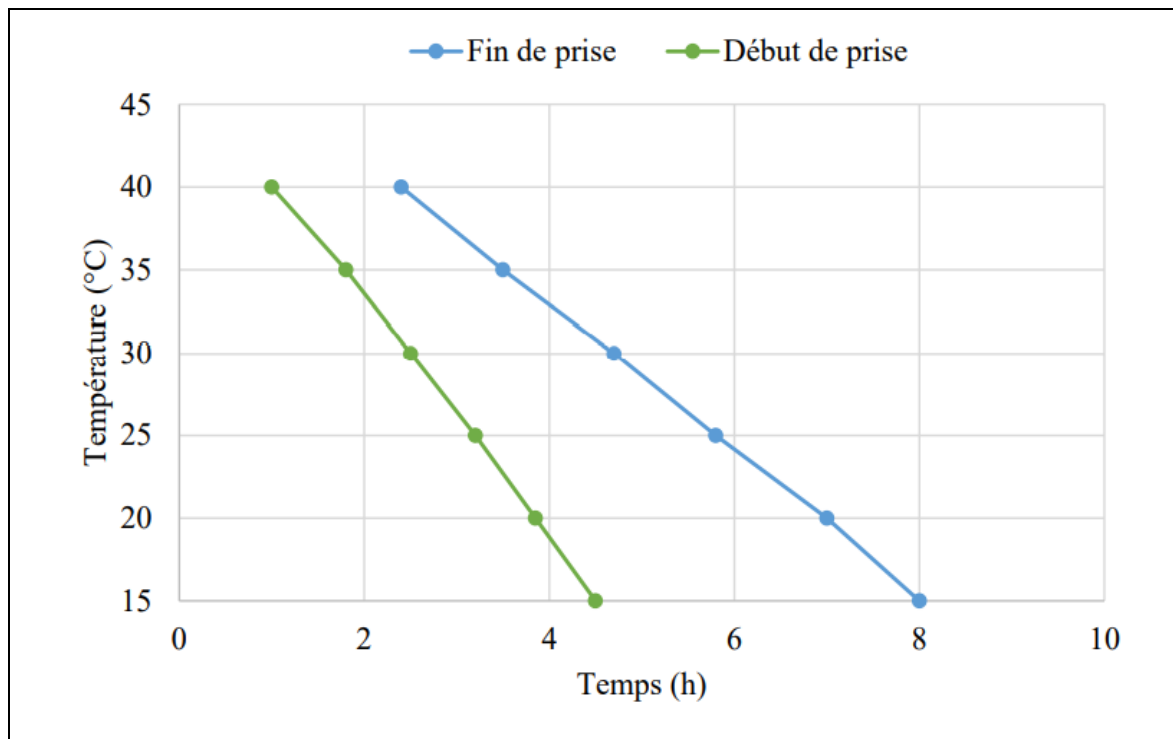


Figure II.4 : Effet de la température sur le temps de début et fin de prise [16].

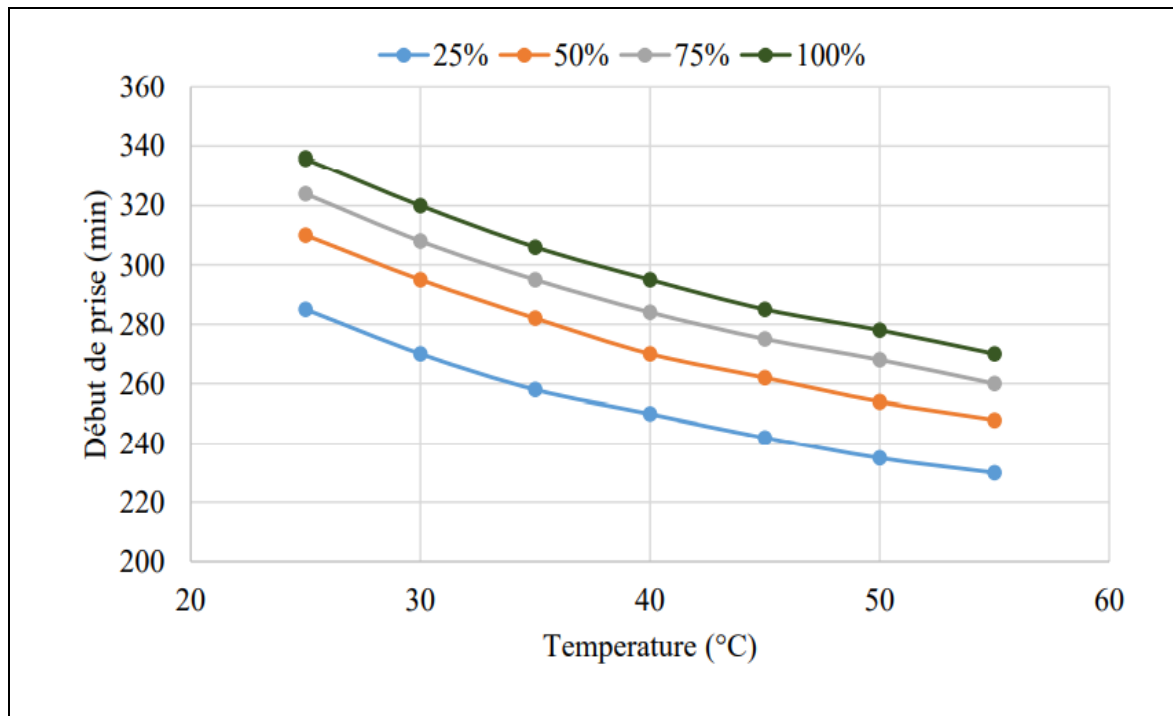


Figure II.5 : Effet de la température sur le temps de début de prise [17].

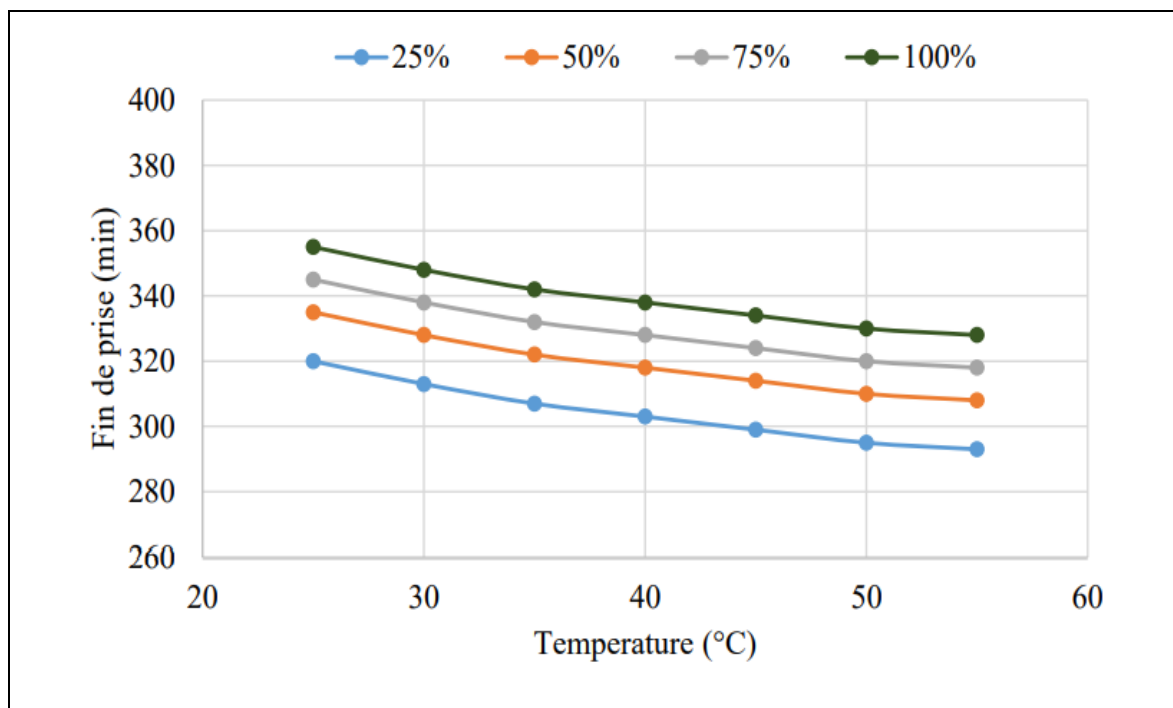


Figure II.6 : Effet de la température sur le temps de fin de prise [17].

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

[16] 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 [18], 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 [19] 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.

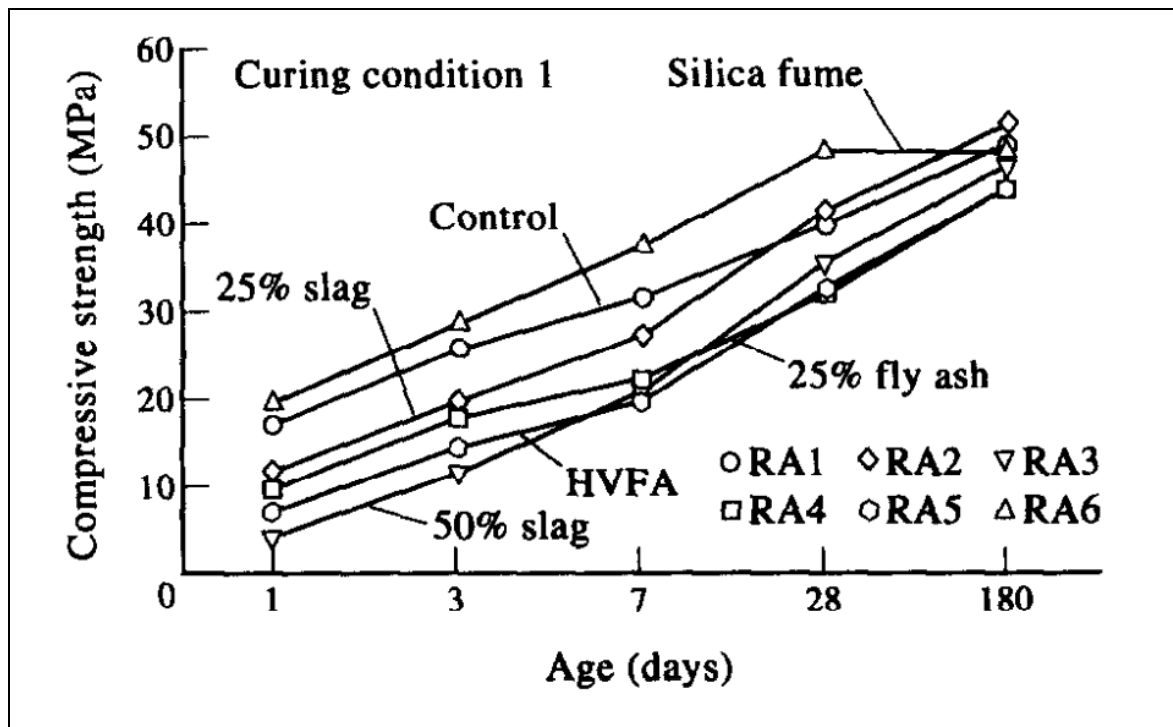


Figure II.7 : Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide [19].

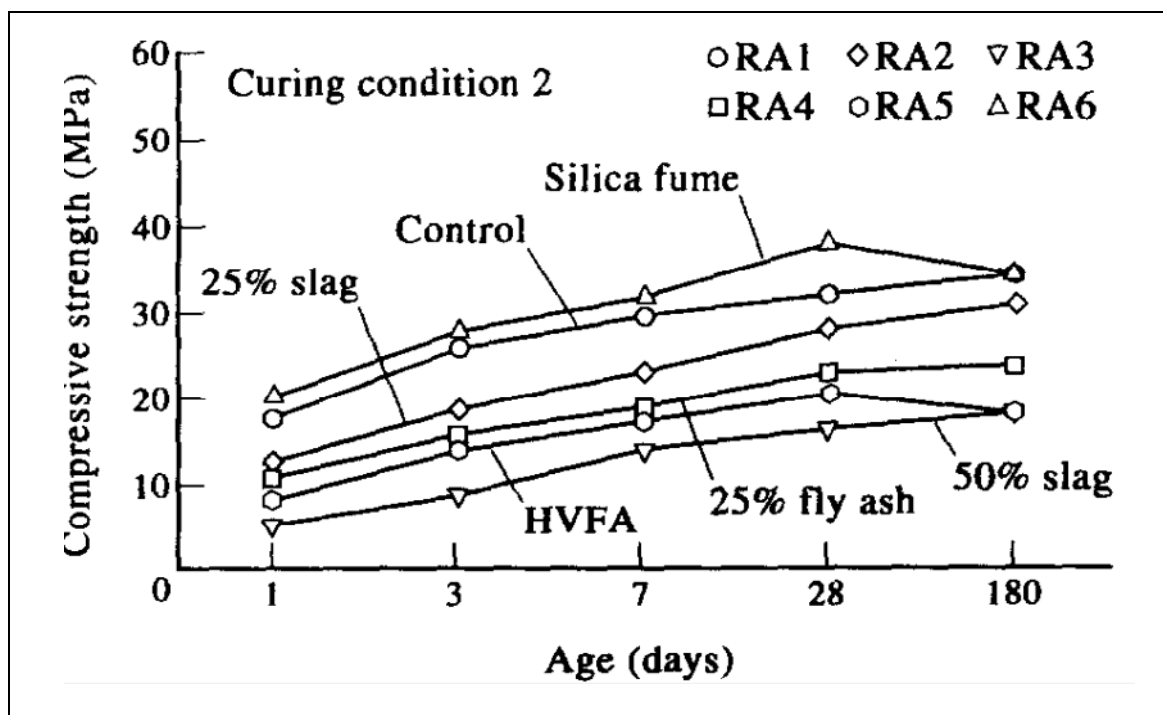


Figure II.8 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage [19].

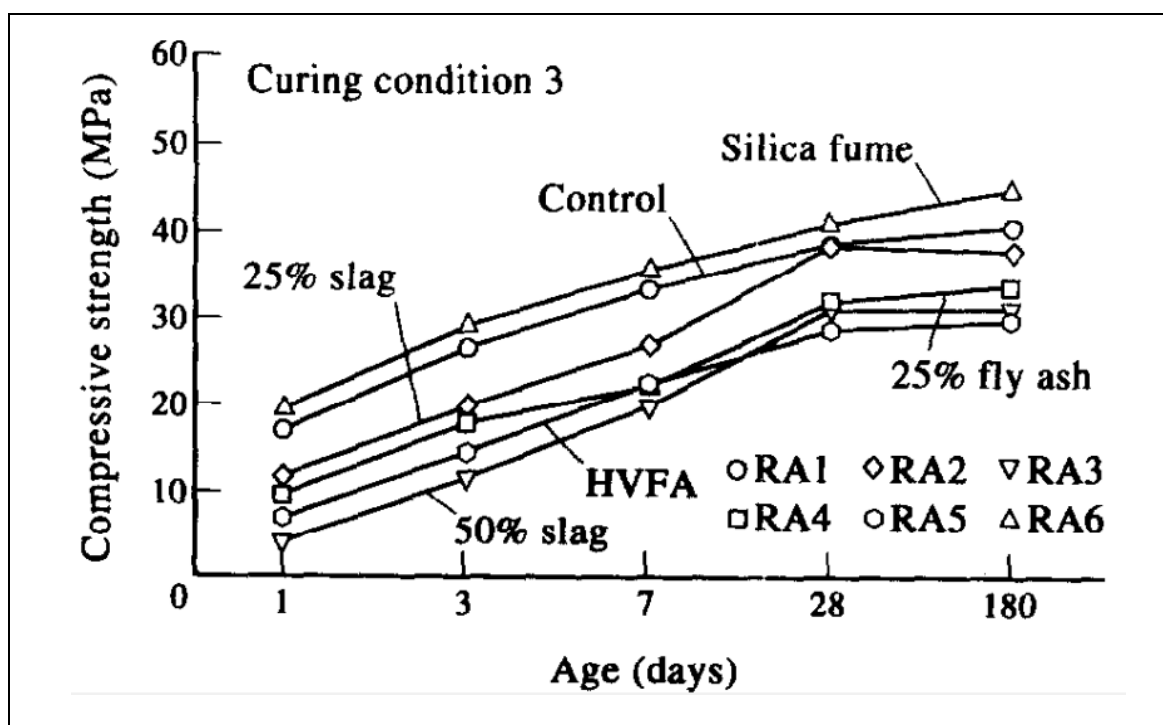


Figure II.9 : Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide [19].

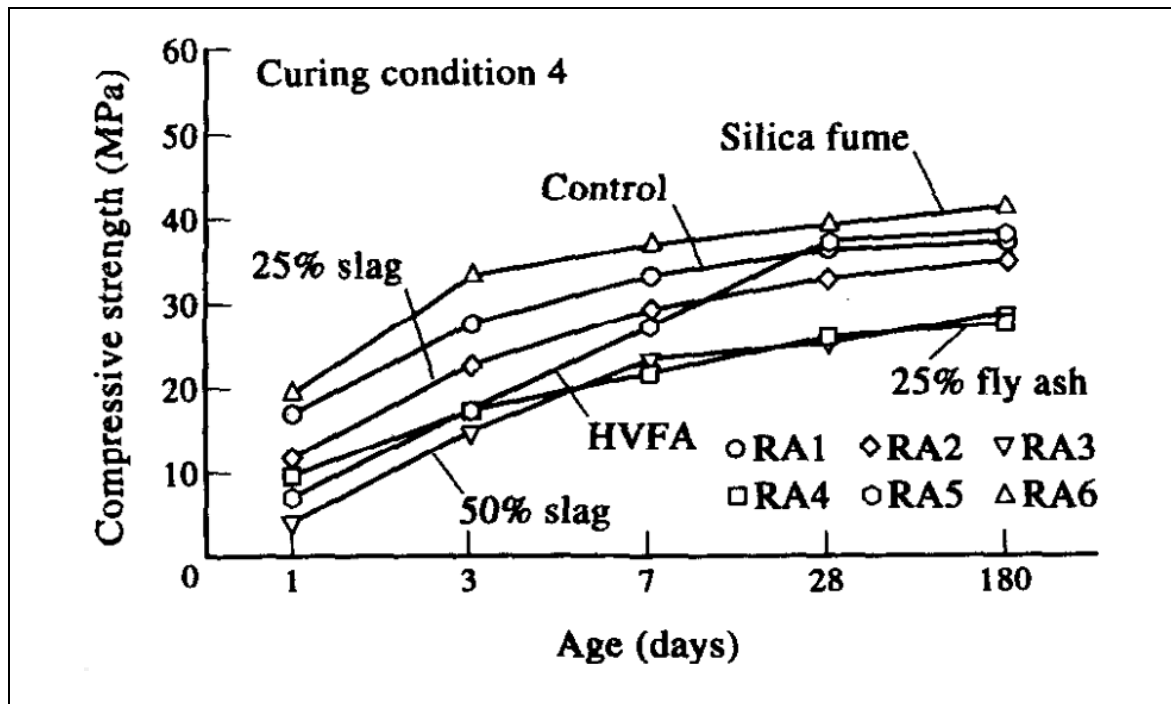
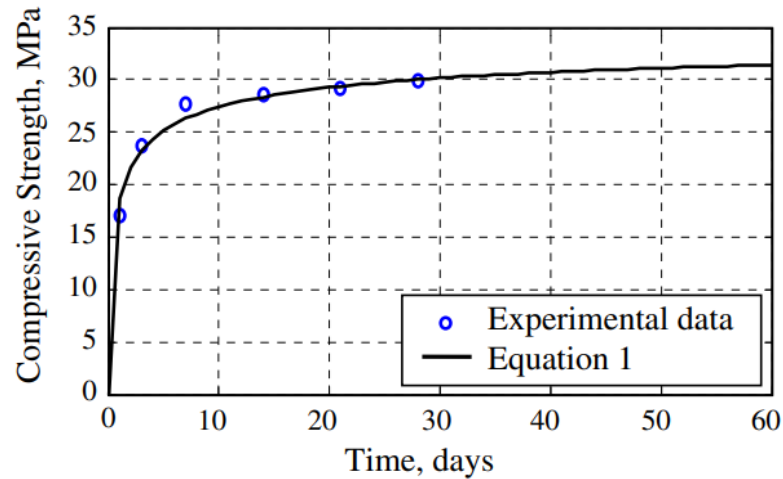


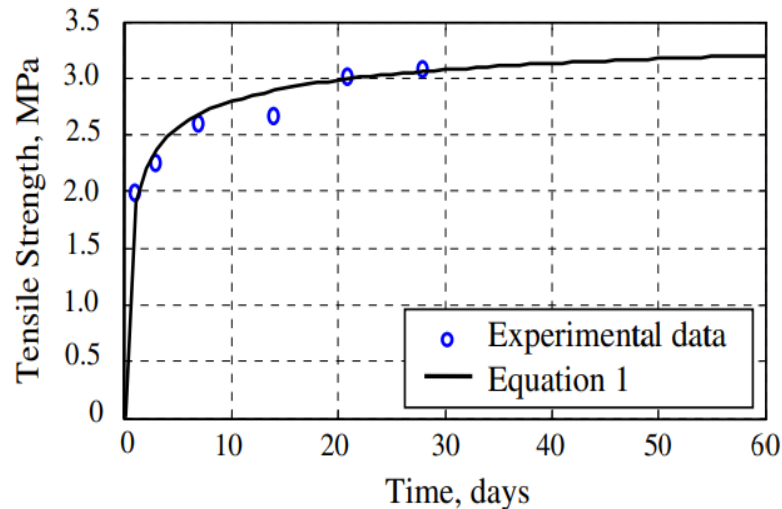
Figure II.10 : Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité [19]

Shoukry et al [20] 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.



(a) Compressive Strength

Figure II.11 : Gain de la résistance à la compression [20].



(b) Tensile Strength

Figure II.12 : Gain de la résistance à la traction [20].

D'après Al-Ani & Al-Zaiwary, [21] : 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 :

- 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 [22], 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 [23], 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 diminuer 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 [24].

II.4.2.3 Absorption capillaire

Kockal & Turker [25], 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 [26] ont 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.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a light gray shaded area.

Chapitre III :

***Caractérisation des matériaux
utilisés, formulation et technique
expérimentales***

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés, formulation et techniques expérimentales

III-1 Introduction

Le béton est constitué des composantes dont les caractéristiques physiques et mécaniques sont différentes, chacun joue un rôle dans le comportement et la qualité du béton.

Ce chapitre présente une étude expérimentale de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés, ainsi que les modes opératoires et l'appareillage utilisé pour leurs déterminations.

Nous avons utilisé pour la confection du béton des matériaux locaux dont les caractéristiques ont été déterminées expérimentalement au laboratoire de Génie Civil de l'université de B-B-A.

Les matériaux utilisés dans notre travail sont :

1. Granulats : un sable silico-calcaire concassé 0/4 provenant de Carrière Arris Khoudja et trois graviers silico-calcaires de dimensions 4/8 et 8/15 et 15/25 concassé provenant de carrière Altro-Grouz région de Chelghoum laid (Mila).
2. Un ciment portland au calcaire NA442 CEM II /B (42.5N) nom commercial Matine.
3. Eau de gâchage : l'eau potable.

III-2 Les matériaux et les composantes du béton :

III-2-1 Les granulats

Définition :

Les granulats sont des éléments inertes entrant dans la composition des bétons dont l'origine naturelle ou artificielle, quand le choix est possible, il porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la forme, la granulométrie, et l'absorption d'eau.



Figure III.1 : Granulats utilisés.

a) Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon en fonction de leurs dimensions. L'essai consiste à fractionner un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes au moyen d'une série de tamis. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale de l'échantillon.

Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique. Pour rappel, le tamisat est la partie du matériau passant au travers du tamis.

- ❖ Tamisat : matériau passant au travers du tamis
- ❖ Refus : matériau retenu sur le tamis

Les résultats de l'analyse granulométrique du granulat utilisé dans cette étude sont présentés dans le tableau III-1, et la courbe granulométrique dans la figure III-1.

Tableau III.1 : Résultats d'analyse granulométrique

Module	Tamis en (mm)	Sable 0/4	Gravier 4/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Tamisats en pourcentage (Passants %)					
Poids initial en (g)		1000	1600	3000	5000
46	32.5	/	/	/	100
45	25	/	/	/	98
44	20	/	/	/	62
43	16	/	/	100	10
42	12.5	/	/	90	0.4
41	10	/	100	46	
40	8	/	98.5	12	
39	6.3	/	86	0.6	
38	5	100	66		
35	2.5	88	3		
32	1.25	65	0.8		
29	0.63	43			
26	0.315	29			
23	0.16	17			
20	0.08	14			

b) Module de finesse du sable :

Le module de finesse permet de juger globalement de la granularité d'un sable : selon deux gories, un module de finesse élevé indique un sable grossier, un module de finesse faible caractérise un sable fin [27]. C'est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables [28].

Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : 0.16 – 0.315 – 0.63- 1.25 – 2.5 et 5 (mm) sur 100.

Il est calculé par la relation suivante : $M_f = \sum R_c / 100$ avec R_c : refus cumulé.

Pour notre cas, on a $M_f = 2.58$: Lorsque M_f est compris entre 2.2 et 2.8, donc est un

sable préférentiel.

c) Masses volumiques et absorption :

La masse volumique est une caractéristique de base des granulats pour bétons [29,30]. Cette caractéristique est définie selon les normes NF P 18-554 [31] pour la masse volumique apparente et NF P 18-555 [32] pour la masse volumique absolue (réelle).

Dans ce travail la masse volumique réelle est mesurée à l'aide d'un pycnomètre. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Masses volumiques et absorption

Echantillons	Masse vol. Réelle (t/m^3)	Masse Vol. Apparente (t/m^3)	Absorption (%)
Sable 0/4	2.66	1.72	/
Gravier 4/8	2.64	1.49	1.3
Gravier 8/15	2.64	1.47	1.0
Gravier 15/25	2.64	1.44	0.9

d) L'Équivalent de sable (ES) et (VBS) :

L'essai de propreté de sable consiste à déterminer le pourcentage d'éléments fins et des impuretés. Pour mesurer la propreté de sable on utilise l'essai d'équivalent de sable (Figure III.2). Conformément à la norme NA455 ou la norme NF EN-933-8.



Figure III.2 : Appareillage de l'équivalent de sable.

Tableau III.3 : Equivalent de sable et VBS

Échantillon	ES (%)	Spécification	VBS	Spécification
Sable concassé	84.0	≥ 60	0.16	≤ 1

e) Essai de Dureté :

Résistance à la fragmentation par chocs (LA) :

L'essai LA (**Los-Angeles**) consiste à mesurer la quantité des éléments inférieurs à 1.6 mm produites en soumettant le matériau aux chocs de boulets d'acier dans un cylindre (tambour) en rotation.



Figure III.3 : Appareille de fragmentation LA.

Tableau III.4 : Coefficient LA (Los-Angeles)

Echantillons	Coefficient Los-Angeles LA (%)	Spécification
Gravier 4/8	/	≤ 30
Gravier 8/15	23.0	
Gravier 15/25	21.8	

Le tableau III.5 rassemble les résultats des propriétés des granulats utilisés.

Tableau III.5 : (propriétés des granulats utilisés)

Caractéristiques des granulats	Classes granulaires			
	0/4	4/8	8/15	15/25
Masse volumique apparente (t/ m ³)	1.72	1.49	1.47	1.44
Masse volumique absolue (t/ m ³)	2.66	2.64	2.64	2.64
Equivalent de sable à vue (%)	84.0	/	/	/
Module de finesse	2.58	/	/	/

III-2-2 Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland composé CPJ-CEM II B 42,5 de la cimenterie de Lavarge de la région de M'sila. Il répond aux exigences de la norme NA 442.

La composition chimique et minéralogique et les caractéristiques physiques et mécaniques du CEM II B 42,5 utilisé pour la confection des bétons sont présentées dans les tableaux III.6.7. et 8, elles sont fournies par la fiche technique du laboratoire de la cimenterie (Fiche technique en annexe) [33].



Figure III-4: Ciment CEM II B 42,5.

Tableau III.6 : Composition chimique du ciment CEM II 42,5 utilisé

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CL ⁻	SO ₃	P.A.F
55-65	5-6	22-28	3-3.6	1-2	0.1-0.16	0.3-0.6	0-0.01	1.8-2.5	1-2

Tableau III.7 : Composition minéralogique du ciment CEM II B 42,5

C3S	C2S	C3A	C4A
55 à 65 %	10 à 25 %	8 à 12 %	9 à 13 %

Tableau III.8 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé

Caractéristiques	Valeur
Consistance normale (%)	26,5 ± 2
Début de prise (min) à 20°	150 ± 30
Fin de prise (min) à 20°	230 ± 50
Classe de résistance (MPa)	42,5
Expansion à chaud (mm)	≤ 3
Masse volumique apparente (t/m ³)	1.1
Masse volumique absolue(t/m ³)	3.1

III-2-3 Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage des bétons est l'eau du robinet (l'eau potable).

III-3 Formulation du béton :

III-3-1 Méthodes de formulation du béton :

La formulation du béton consiste à choisir les proportions de chacun des constituants et la mise en œuvre souhaitée, afin d'obtenir un béton avec les propriétés désirées [34].

La méthode utilisée pour formuler notre béton est celle de Dreux -Gorisse [35]. Cette méthode de formulation permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

a) Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G' \sigma'_c (C/E - 0.5)$$

Avec :

σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G' = Coefficient granulaire (tableau III.11), fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Tableau III.10 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats $D_{\max}$

Qualité des granulats	Dimension $D_{\max}$ des granulats		
	Fins $D_{\max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{\max} < 31,5$	Gros $D_{\max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

b) Détermination de C :

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure 1 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

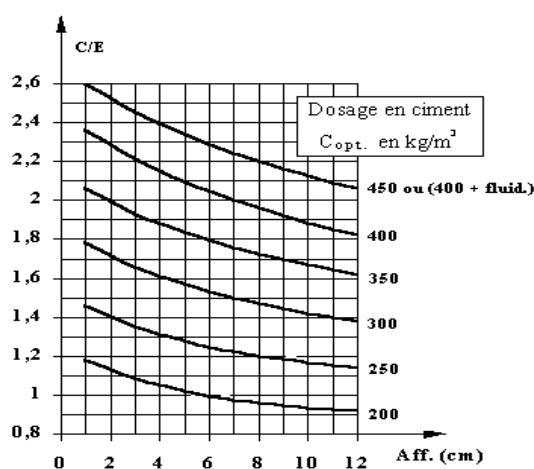


Figure III.5 : Abaque permettant la détermination du dosage en ciment C.

c) Détermination de E

La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

d) Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux Gorisse pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- ✓ Tracé de la droite brisée de référence
- ✓ Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

• Tracé de la droite de référence de Dreux :

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm} \quad X = D_{\max} / 2$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm} \quad \text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{\max}) + 38) / 2$$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{1,25 (D_{\max})} + K' \quad \text{où } K' = K + K_s + K_p$$

Y : est donné en pourcentage de passants cumulés

K : est un coefficient donné par le tableau III.12, K_s et K_p étant des coefficients correctifs définis par :

K_s (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable).

K_s = (6 M_{f_s} - 15) avec M_{f_s} le module de finesse du sable.

K_p (correction supplémentaire si le béton est pompable).

K_p = +5 à +10 selon le degré de plasticité désiré.

Tableau III.11 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment

<i>Vibration</i>		<i>Faible</i>		<i>Normale</i>		<i>Puissante</i>	
<i>Forme des granulats (du sable en particulier)</i>		<i>Roulé</i>	<i>Concassé</i>	<i>Roulé</i>	<i>Concassé</i>	<i>Roulé</i>	<i>Concassé</i>
<i>Dosage en ciment</i>	<i>400 + Fluid</i>	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	<i>400</i>	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	<i>350</i>	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	<i>300</i>	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	<i>250</i>	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	<i>200</i>	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

• Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer les courbes granulométriques des matériaux du mélange, des droites reliant deux à deux (Figure III.6).

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre

l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux.

Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m^3 de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable et de gravier). Sa valeur de base c_0 est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (tableau III.13).

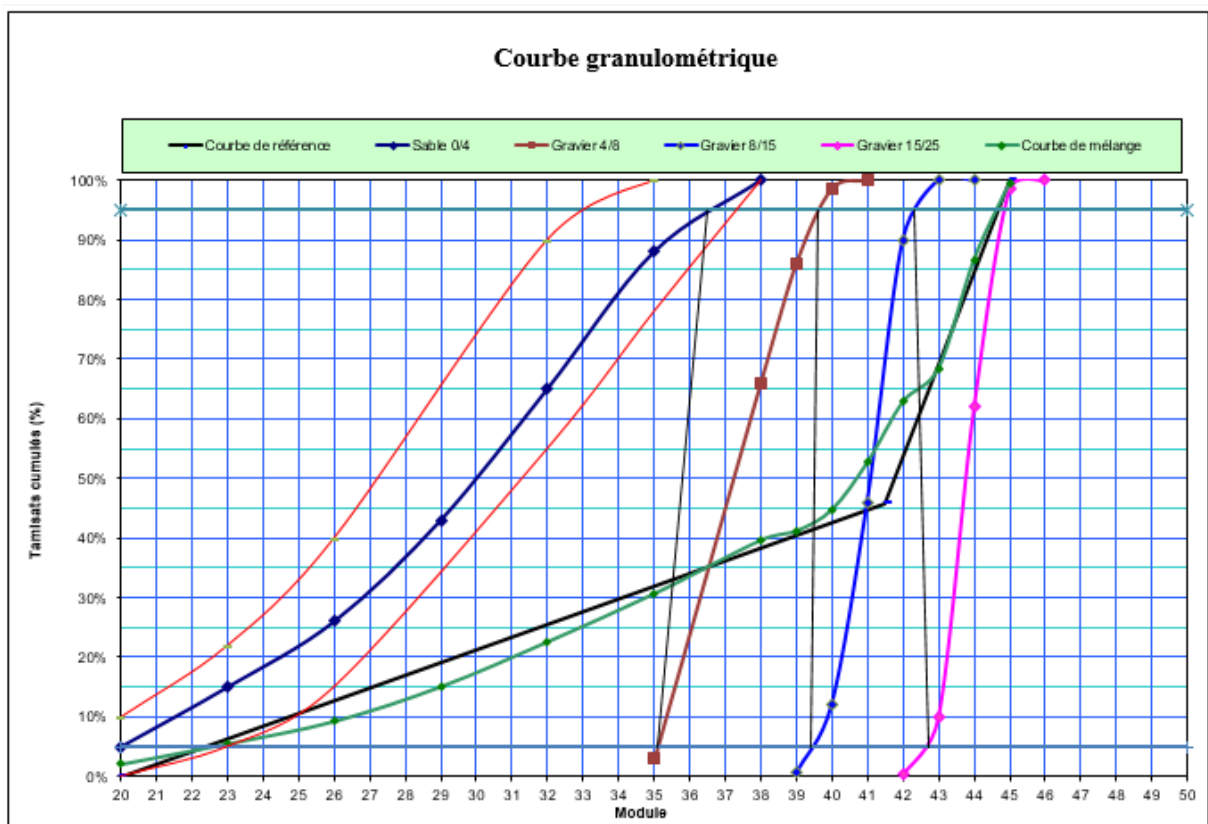


Figure III.6 : Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.

Tableau III.12 : Compacité du béton en fonction de D_{max}, de la consistance et du serrage

Consistance	Serrage	Compacité (c)						
		D _{max} = 5	D _{max} = 8	D _{max} = 12,5	D _{max} = 20	D _{max} = 31,5	D _{max} = 50	D _{max} = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

• Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s) de gravillon (V_g) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S, g et G) :

$$V_s = V \times S\% \quad S = V \times S\% \times \rho_s$$

$$V_G = V \times G\% \quad G = V \times G\% \times \rho_G$$

• Composition d'un mètre cube du béton :

Les proportions des différentes fractions de granulats sont présentées dans tableau III-14 ci- dessous.

Tableau III.13 : Composition d'un mètre cube du béton

Granulats	Mélange granulaire(%)	Volume Absolue	Poids Spécifique	Poids kg/m ³
Ciment	/	113	3.10	350
Sable (0/4)	43.0	303	2.66	806
Gravier (4/8)	11.0	81.0	2.64	214
Gravier (8/15)	24.0	173.0	2.64	457
Gravier (15/25)	22.0	160.0	2.64	422
Eau	/	170	/	170
	100.0	1000	/	2419

e) Préparation des mélanges

Neuf mélanges ont été préparés, de composition pondérale identique, ce qui a varié dans cette étude est la température des éléments constitutifs du béton, trois températures 20, 40 et 60 °C ont été adoptés pour les granulats (gravier et sable) et aussi pour le ciment, tandis que la température de l'eau restait toujours constante (20°C). Le tableau III.15 rassemble tous les mélanges qui ont été étudiés.

Tableau II.14. Composition de béton avec les différentes températures de granulats et de ciment.

Béton	Sable 0/4 (Kg/m ³)	Gravier 4/8 (Kg/m ³)	Gravier 8/15 (Kg/m ³)	Gravier 15/25 (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Eau (l/m ³)	T (°C) Granulats	T (°C) Ciment
B1	806	214	457	422	350	170	20	20
B2	806	214	457	422	350	170	20	40
B3	806	214	457	422	350	170	20	60
B4	806	214	457	422	350	170	40	20
B5	806	214	457	422	350	170	40	40
B6	806	214	457	422	350	170	40	60
B7	806	214	457	422	350	170	60	20
B8	806	214	457	422	350	170	60	40
B9	806	214	457	422	350	170	60	60

III-4 Techniques expérimentales :

III.4.1 Malaxage

Le processus de malaxage a été effectué comme décrit dans les travaux de [36], d'après cet étude le malaxage se déroule en plusieurs étapes. Ces dernières sont présentées dans le tableau (III.16). Une fois le mélange malaxé, les propriétés du béton 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 [37]. La photographie de la figure (III.6) illustre l'aspect du béton témoin lors de malaxage.



Figure III.7 : Aspect du témoin lors de malaxage.

Tableau III.15 : 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 vibreur, ce moyen de compactage est largement utilisé. 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 pendant 24 heures. Ensuite, ils ont été démoulés et placés dans un bassin d'eau.

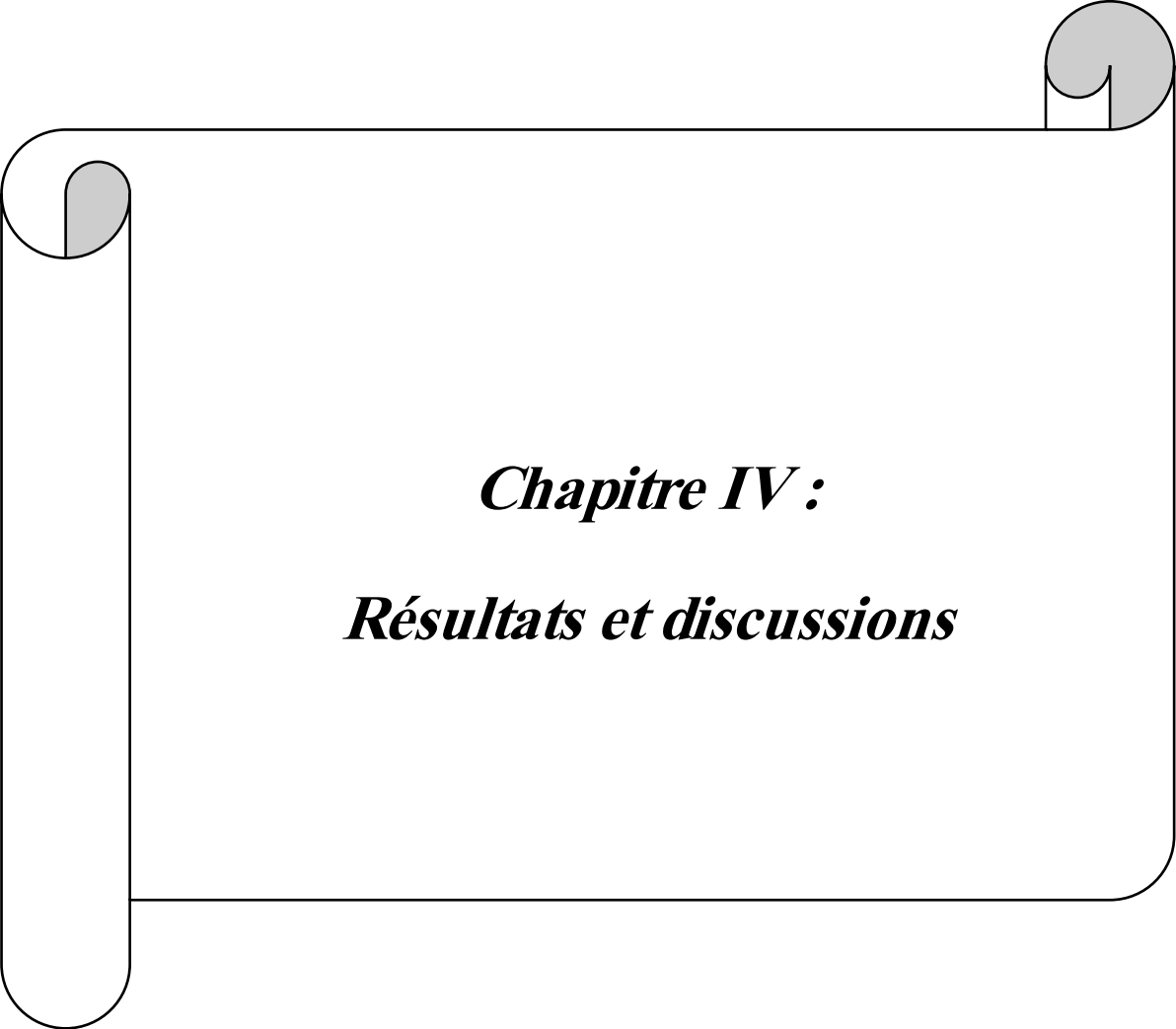
III.4.3 Préparation des échantillons

Des moules standards d'éprouvettes en béton ont été préparés conformément à la norme NF EN 12390-2 [38]. 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 éprouvettes, cylindriques (100 x 200 mm), ont été utilisées pour la mesure de densité de béton frais, la résistance à la compression, l'absorption d'eau.

L'ouvrabilité a été évaluée par l'essai au cône d'Abrams juste après le malaxage. L'essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme NF EN 206-1 [39]. La résistance à la compression a été évaluée à 3, 7 et de 28 jours selon la norme NF EN 1926 [40]. L'essai de l'absorption capillaire d'eau a été fait à 28 jours de cure, selon la norme NF EN 772-11 [41], 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.

III-5 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la confection de nos bétons. Les caractéristiques des granulats ont été déterminés expérimentalement. La composition pondérale a été calculé par méthode de Dreux Gorrisse. Les techniques expérimentales (malaxage et compactage) ont été effectuées conformément aux normes en vigueur.



Chapitre IV :
Résultats et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV-1 Introduction

Ce chapitre contient deux parties, la première consiste en une présentation des résultats des essais réalisés pour déterminer l'effet de la température de granulats (T_g) et du ciment (T_c) sur la température et l'ouvrabilité du béton frais, et aussi la résistance à la compression, l'absorption de l'eau par capillarité de béton durci.

La deuxième partie, nous allons essayer de modéliser l'effet de l'interaction de la température des granulats (T_g) et de la température du ciment (T_c) sur le comportement du béton par le plan d'expérience (la méthode de surface de réponses), pour cela un plan expérimental a été conçu de deux facteurs, chaque facteur contenant trois niveaux.

IV-2 Effet de la température de granulats et du ciment sur le béton :

IV-2-1 La température du béton frais

La température des éléments constitutifs du béton affecte directement la température du béton frais (Fig IV.1). Dans cette figure on observe d'abord une augmentation de la température du béton frais au fil du temps, ce qui est logique puisque cette chaleur est produite par les réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau.

La figure montre également que l'augmentation de la température des éléments constitutifs du béton entraîne une augmentation de la température du béton frais. Cet effet a des degrés variables, car on remarque que l'effet de la température des granulats est bien plus important que l'effet de la température du ciment.

Si on prend les mélanges B01, B02 et B03 où la température du ciment augmente de 20 à 60 °C et la température des granulats reste invariable (20 °C), on constate que la température du béton frais à 60 min après malaxage n'a augmenté que de 5.12%. Il en est de même pour les mélanges B04, B05 et B06 où la température du ciment également augmente de 20 à 60 °C et la température des granulats reste constante (40 °C), l'augmentation de la température du béton frais à 60 min après malaxage ne dépasse pas 13%. Il en va de même pour les mélanges B07, B08 et B08 où l'augmentation de la température du béton frais à 60 min après malaxage n'a pas non plus dépassé 9%.

Par contre, si l'on compare entre les mélanges B01, B04 et B07, les mélanges B02, B05 et B08 et ainsi les mélanges B03, B06 et B09 où la température des granulats augmente de 20 à

60 °C et la température du ciment reste constante (20, 40 et 60 °C pour les trois cas respectivement), Nous constatons que les températures du béton frais à 60 min après malaxage ont augmenté jusqu'aux 51.2, 56.8 et 56.2% pour les trois cas respectivement.

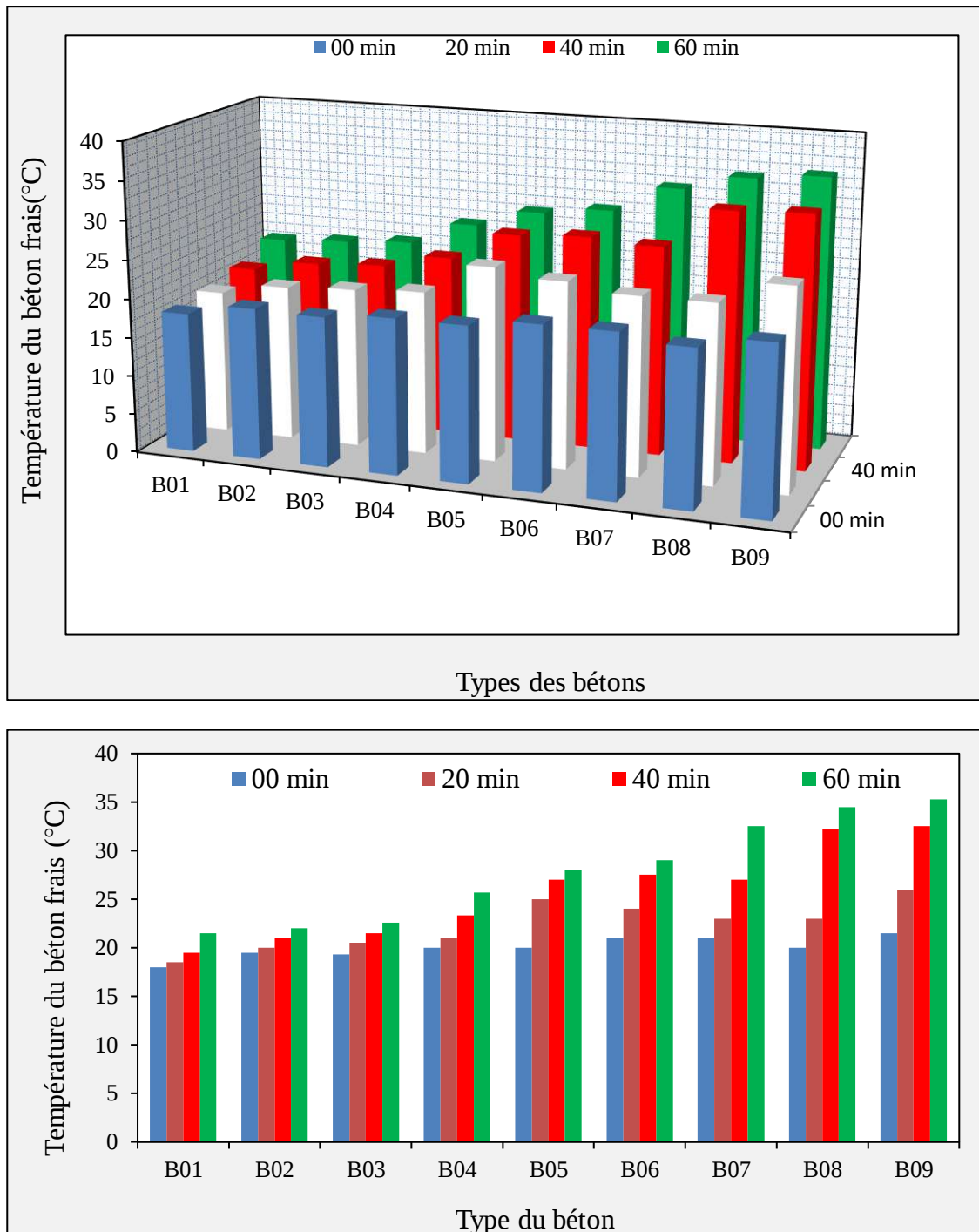


Figure IV.1 : Évolution de la température du béton frais en fonction de la température de ses composants.

Enfin, on peut dire que l'influence de la température des granulats est beaucoup plus importante que l'influence de la température du ciment sur la température du béton frais. Ces

résultats concordent avec les travaux de Mamillan et al, 1989 [14] qui ont démontrés qu'une augmentation de 10°C du ciment élève de 1°C la température du béton frais, tandis qu'une augmentation de 10°C des granulats élève de 7°C la température du béton frais.

IV-2-2 Ouvrabilité

La température des composants de béton a entraîné des modifications de son ouvrabilité, (Fig IV.2). D'après les résultats obtenus, on a observé que l'affaissement augmente inversement à la température de deux composants (ciment et granulats). Les valeurs maximales d'affaissement correspondent aux températures minimales.

La diminution de l'affaissement n'était pas évidente lorsque les expériences étaient menées immédiatement après le malaxage, mais elle devenue évidente au fil du temps, comme si nous comparions B1 où la température était de 20°C pour le ciment et les granules respectivement avec B09 où la température était de 60°C pour les deux, nous constatons que l'affaissement a diminué de 3,90, 25,07, 48,91 et 69,07 % lorsque les tests ont été effectués à (0, 20, 40, 60 minutes) respectivement.

Il est également clair que l'influence de la température des granulats sur l'affaissement final (après 60min) est beaucoup plus importante que celle de la température du ciment. Par exemple, si la température du ciment est fixée à 20 °C (B01, B04 et B07) où les températures des granulats sont respectivement (20, 40 et 60°C), l'affaissement diminue de 19.2% lorsque la température de granulats passe de 20 à 40 °C et de 45.1% lorsqu'elle passe de 20 à 60°C. Cependant, si nous faisons l'inverse et fixons la température des granulats à 20 °C, par exemple (B1, B2 et B3), où les températures du ciment sont respectivement 20, 40 et 60 °C, on constate que la diminution de l'affaissement n'est que de 4.3 % lorsque la température du ciment augmente de 20 à 40 °C et de 11.7 % lorsqu'elle augmente de 20 à 60 °C. Cela s'explique par le fait que chaque composant y participe différemment, en fonction de son dosage et sa chaleur massique [42].

La valeur d'affaissement maximale a été observée dans le béton B01 dont les températures de ses composants (ciment et granulats) étaient au minimum (20 °C), atteignant 16.2 cm. Elle a ensuite commencé à diminuer à mesure que la température augmentait, atteignant 4.9 cm dans le béton B09, où la température de ses composants était de 60°C pour les deux.

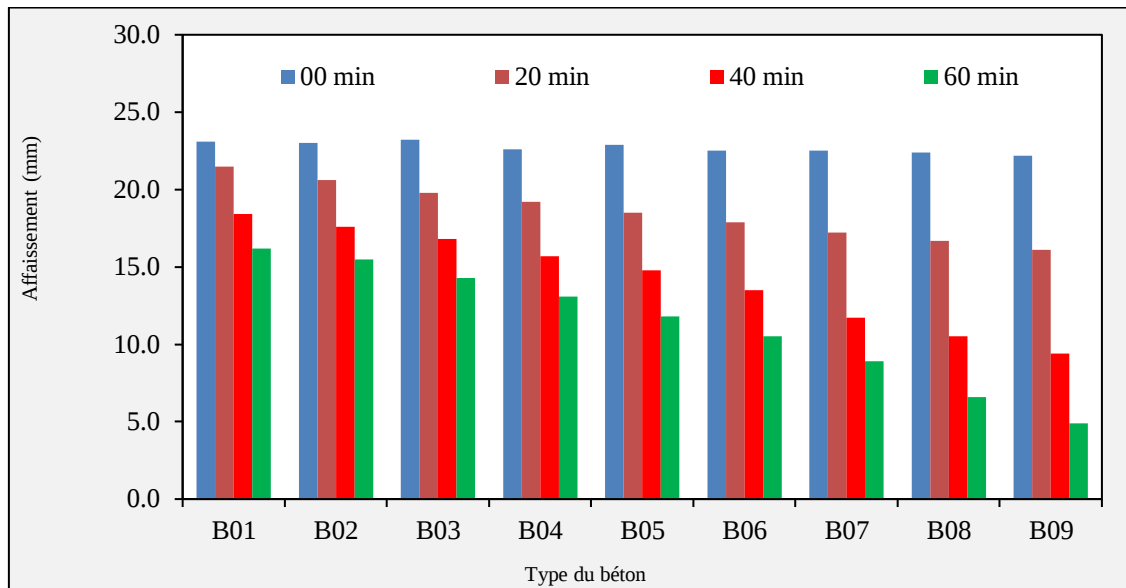


Figure IV.2 : Effet de la température des composants de béton sur sa maniabilité.

Ces constatations sont cohérentes avec les résultats obtenus par nombreuses chercheurs [42], qui ont observé que lorsque la température ambiante ou celle des composants de béton 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 ferme dès les premiers instants de sa confection. L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité.

IV-2-3 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression obtenus sur les 09 mélanges de béton avec différentes températures de ses constituants (ciment et granulats) sont illustrés dans les figures IV.3 et IV.5.

Comme la montre la figure IV.3, sous les trois températures des granulats étudiées, l'évolution de la résistance à la compression en fonction de temps a montré une tendance sensiblement similaire, où on remarque une augmentation de la résistance à la compression avec l'évolution de temps.

On peut également constater à travers de la figure IV.2 que l'élévation de la température du ciment affecte négativement les valeurs finales de la résistance à la compression. Une perte de la résistance finale (à 28 Jours) a été enregistré lorsque la température du ciment augmente de 20 à 60 °C estimée de 9.2, 8.3 et 13.7% pour les trois températures des granulats (20, 40 et 60 °C) respectivement (Figure IV.4).

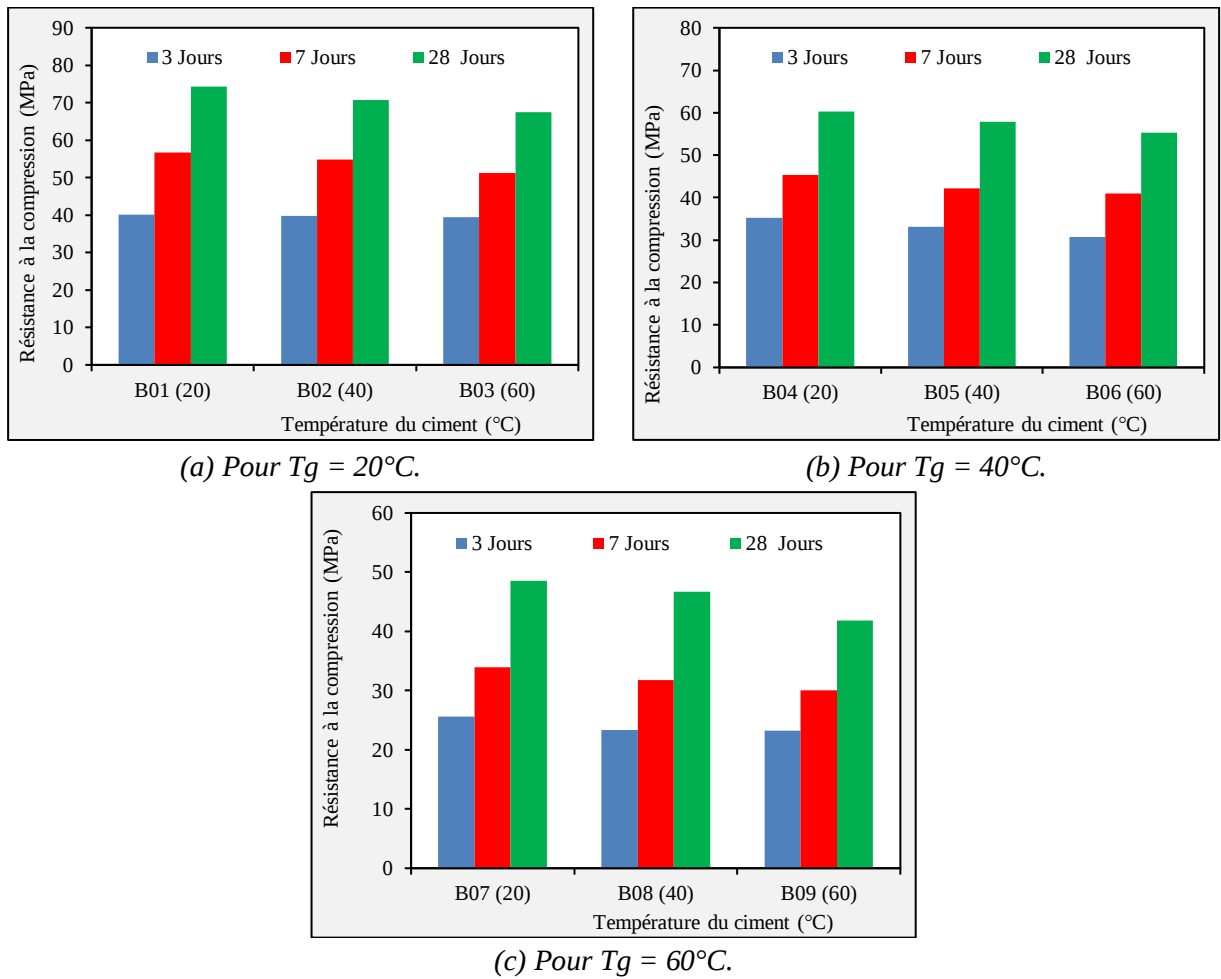


Figure IV.3 : Effet de la température du ciment sur la résistance à la compression.

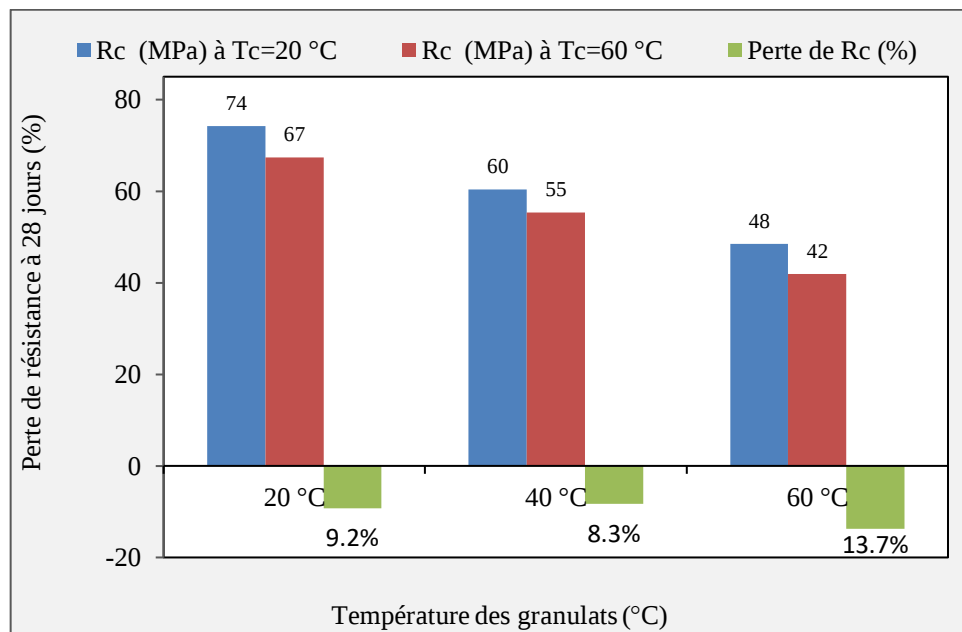


Figure IV.4 : Le perte de résistance finale (à 28 Jours) lorsque la température de ciment augmente de 20 à 60 °C sous les trois températures des granulats.

Simultanément, sous les trois températures du ciment étudiées. Il est évident de noter qu'à travers de la figure IV.5 que l'élévation de la température des granulats a également un effet négatif sur la résistance à la compression, mais cet effet est beaucoup plus important que celui de la température du ciment. Où la perte de résistance finale (à 28 jours) lorsque la température des granulats augmente de 20 à 60 °C atteint 34.7, 33.9 et 37.9% à des températures du ciment de 20, 40 et 60 °C respectivement (Figure IV.6). Cela peut s'expliquer par le dosage en granulats qui est plus de cinq fois supérieur à celui du ciment, ainsi que par la chaleur spécifique des granulats qui atteint 900 J/(kg.k), tandis que la chaleur spécifique du ciment ne dépasse pas 830 J/(kg.k) [43].

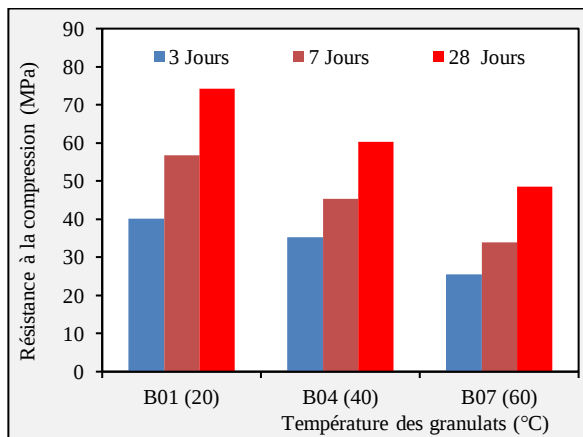
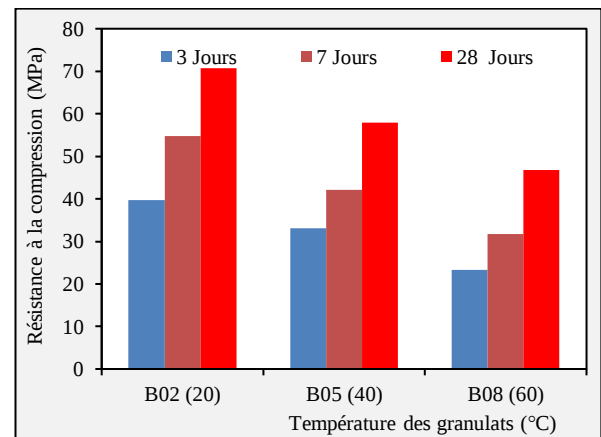
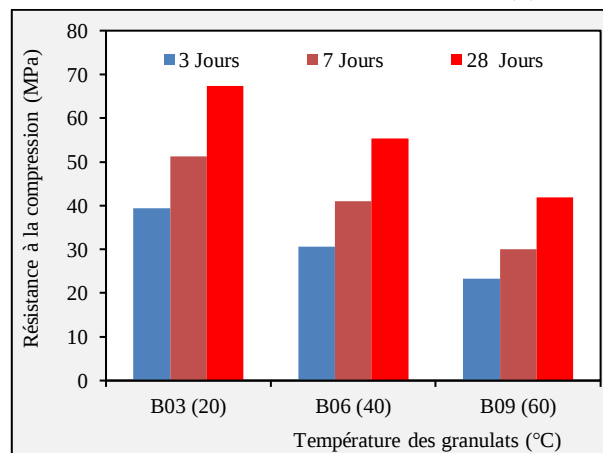
(a) Pour $T_c = 20^\circ\text{C}$.(b) Pour $T_c = 40^\circ\text{C}$.(c) Pour $T_c = 60^\circ\text{C}$.

Figure IV.5 : Effet de la température des granulats sur la résistance à la compression.

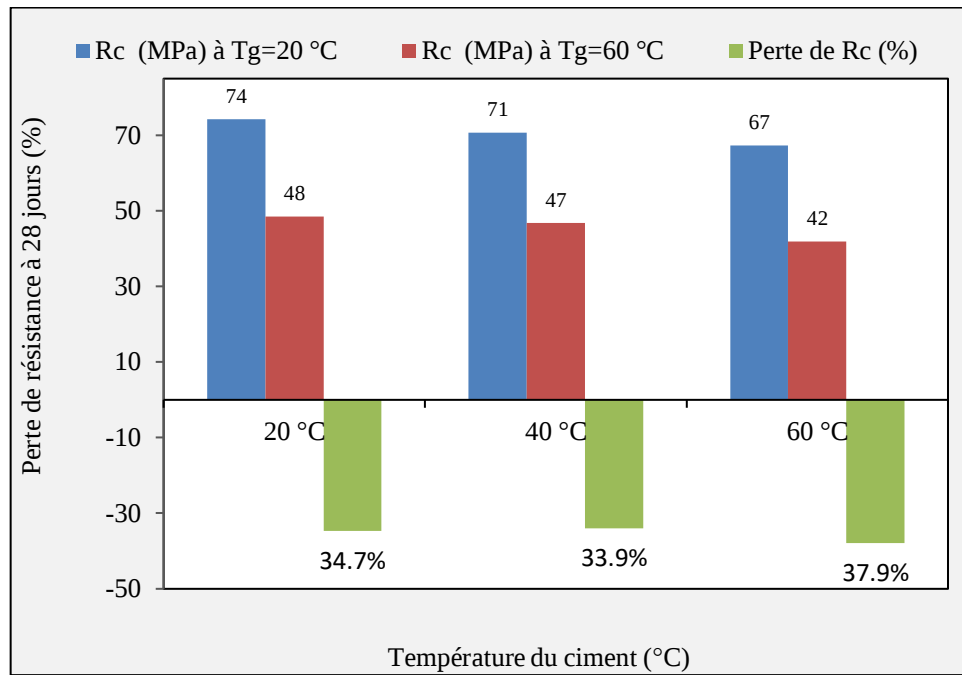


Figure IV.6 : Le perte de résistance finale (à 28 Jours) lorsque la température des granulats augmente de 20 à 60 °C sous les trois températures du ciment.

L'ensemble des résultats des résistances à la compression ont montré que le béton contenant les composants les plus froids (20 °C pour les deux composants) présente les valeurs les plus élevées où on a une augmentation maximale de 43.6% par rapport à la résistance du béton contenant les composants les plus chauds (60 °C pour les deux composants) (Fig IV.6). Cette augmentation est similaire à celle indiquée par plusieurs chercheurs [44, 45]. 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 [44].

IV-2-4 Absorption capillaire

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 cylindriques (100x200 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 des bétons avec le temps est représentée dans la figure (IV.7). Cette figure indique que l'absorption d'eau par capillarité s'est développée de manière similaire quelle que soit la température des constituants de béton.

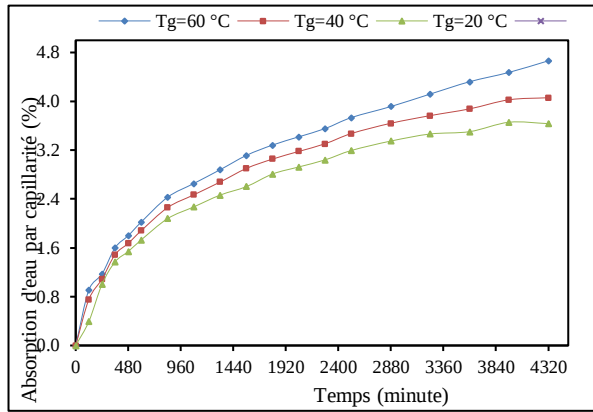
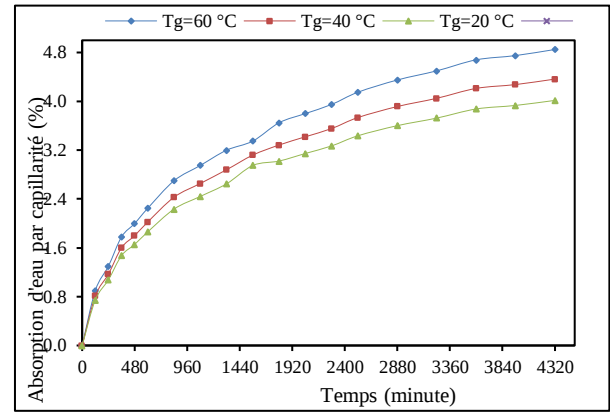
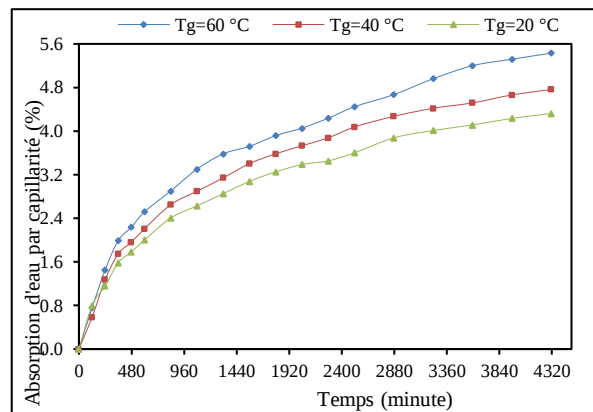
(a) Pour $T_c = 20^\circ\text{C}$.(b) Pour $T_c = 40^\circ\text{C}$.(c) Pour $T_c = 60^\circ\text{C}$.

Figure IV.7 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps et de la température de ses composants.

Comme les paramètres précédents, l'absorption est aussi affectée par la température des composants de béton, où on remarque clairement dans la figure l'effet néfaste de l'élévation de la température des deux composants de béton (ciment et granulats). Cela peut s'expliquer par le fait que la température entraîne l'évaporation de l'eau, ce qui augmente la porosité du béton et, par conséquent, l'absorption [45]. De plus, la température élevée du mélange frais accélère considérablement les réactions chimiques entre le ciment et l'eau, ce qui modifie la microstructure du béton et entraîne la formation de nombreuses fissures [45].

L'élévation de la température du ciment de 20 à 60 °C à entraîner une hausse maximale de l'absorption de 16%. En revanche, L'élévation de la température des granulats de 20 à 60 °C à entraîner une augmentation maximale de l'absorption de 22%. Ces résultats confirment toutes les conclusions précédentes, puisque nous avons constaté que la température des granulats augmente la température du béton beaucoup plus que la température du ciment, ce qui entraîne inévitablement une augmentation de l'absorption.

IV-3 Effet du couplage Tg et Tc sur le comportement du béton

Dans cette partie, nous allons essayer de modéliser l'effet de l'interaction des deux températures, la température des granulats (Tg) et la température du ciment (Tc) sur le comportement du béton par la méthode de surface de réponses, pour cela un plan d'expérience a été conçu de deux facteurs, chaque facteur contenant trois niveaux.

Les deux facteurs sont la température des granulats (Tg) et la température du ciment. Les niveaux des facteurs ont été définis comme suit :

- ✓ Tg est en trois niveaux : 20, 40 et 60 °C.
- ✓ Tc est aussi en trois niveaux : 20, 40, et 60 °C.

IV-3-1 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 [46]. 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 [46]. La RSM a été utilisée dans le béton pour le développement de modèles et l'optimisation de mélanges. Mohammed et al [47] 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 [48] ont aussi modélisé le comportement du BCR contenant du caoutchouc granulé et de la nanosilice. Mtarfi et al [49] ont optimisé et développé un modèle permettant de prédire la résistance à la compression d'un mortier avec la RSM. Güneyisi et al [50] 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 [51] 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 [52] 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 des granulats T_g et la température du ciment T_c sur les propriétés du béton et pour développer une relation entre les variables et les réponses mesurées.

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. [46].

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 (1) [46].

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots \beta_n X_n + \varepsilon \dots \dots \dots (1)$$

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 [46].

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 (2).

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

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 [46].

IV-3-2 Description du logiciel utilisé

Dans cette étude, l'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel JMP (version 19). 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.

IV-3-3 Modèles statistiques et analyse de la variance

Les données ont été traitées par l'analyse de variance (ANOVA). Une conception composite de 09 expériences (deux facteurs à trois niveaux 3×3) a été réalisée pour étudier l'influence de deux facteurs, y compris leurs interactions sur la température du béton frais, l'ouvrabilité, la résistance à la compression et l'absorption d'eau par capillarité (comme réponses). Les deux facteurs sont la température des granulats T_g (20, 40 et 60 °C) et la température du ciment T_c (20, 40 et 60 °C). Le tableau IV.1 présente la matrice d'expériences et les résultats expérimentaux.

Tableau IV.1 : Conception expérimentale et résultats expérimentaux

Facteurs					Réponses			
Valeurs codées			Valeurs réelles		Température du béton frais (°C)	Ouvrabilité, Affaissement en (Cm)	Résistance à la compression (MPa)	Absorption de l'eau (%)
Tg (°C)	Tc (°C)		Tg (°C)	Tc (°C)				
1	-1	-1	20	20	21.5	16.2	74.240	3.63
2	-1	0	20	40	22.0	15.5	70.740	4.02
3	-1	+1	20	60	22.6	14.3	67.380	4.32
4	0	-1	40	20	25.7	13.1	60.343	4.06
5	0	0	40	40	28.0	11.8	57.911	4.37
6	0	1	40	60	29.0	10.5	55.327	4.76
7	+1	-1	60	20	32.5	8.9	48.488	4.67
8	+1	0	60	40	34.5	6.6	46.736	4.85
9	+1	+1	60	60	35.3	4.9	41.848	5.43

Les relations entre les variables indépendantes et chaque réponse ont été obtenues par ANOVA comme montré dans les tableaux IV. (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 le tableau (IV.2), les valeurs P de toutes réponses de modèles sont inférieures à 0,05 (5%); 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% ($P < 0,05$).

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

Variable	Source	Degré de liberté	Somme carré	Moyenne carré	F -Values	P-Values
Température du béton frais (°C)	Modèle	5	228.58917	45.7178	169.1513	<.0007
	Résiduelle	3	0.81083	0.2703		
	Total	8	229.40000			
Ouvrabilité, Affaissement en (Cm)	Modèle	5	123.44694	24.6894	521.8110	<.0001
	Résiduelle	3	0.14194	0.0473		
	Total	8	123.58889			
Résistance à la compression (MPa)	Modèle	5	1002.7029	200.541	286.6913	<.0003
	Résiduelle	3	2.0985	0.700		
	Total	8	1004.8014			
Absorption d'eau Par capillarité (%)	Modèle	5	2.2763583	0.455272	65.5329	<.0029
	Résiduelle	3	0.0208417	0.006947		
	Total	8	2.2972000			

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

Les valeurs de test statistique F (F -Values) sont 169.15, 521.81, 286.69 et 65.53 pour les modèles de la température du béton frais (Tb), l'ouvrabilité au cône d'Abrams (Aff), la résistance à la compression (Rc) et L'absorption d'eau par capillarité (Ac) respectivement (tableau IV.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 IV.3 et les équations (3-6), montrent que tous les modèles de réponse sont des modèles quadratiques. Selon les valeurs de P, les termes du modèle Tg, Tc sont significatifs pour tous les modèles, l'interaction (Tg * Tc) est significative aussi pour tous les modèles à l'exception de modèles de l'absorption d'eau par capillarité. Le terme Tg^2 est significatif pour les modèles de la température du béton frais, de l'ouvrabilité au cône d'Abrams et de l'absorption d'eau par capillarité, alors que n'est pas significatif pour le modèle de la résistance à la compression, et enfin le terme Tc^2 est significatif pour seulement les modèles de l'ouvrabilité au cône d'Abrams et l'absorption d'eau par capillarité.

Tableau IV.3 : Termes des modèles de réponse

Réponses	Termes du modèle	Estimation	Somme carré	F -Values	P-Values	Signification
Température du béton frais (°C)	Constante	27.8333	-	-	-	-
	Tg	6.0333	218.40667	808.0822	<.0001	S
	Tc	1.2	8.64000	31.9671	<.0110	S
	Tg*Tc	0.425	0.72250	2.6732	0.0046	S
	Tg^2	0.5	0.50000	1.8499	0.0452	S
	Tc^2	-0.4	0.32000	1.1840	0.2670	NS
	Manque d'adjust				0.3562	NS
Ouvrabilité, Affaissement en (Cm)	Constante	11.788889	-	-	-	-
	Tg	-4.26667	109.22667	2308.509	<.0001*	S
	Tc	-1.41667	12.04167	254.5010	<.0001*	S
	Tg*Tc	-0.525	1.10250	23.3014	0.0005*	S
	Tg^2	-0.733333	1.07556	22.7319	0.0169*	S
	Tc^2	0.0166667	0.00056	0.0117	0.0175*	S
	Manque d'adjust	-	-	-	0.9206	NS
Résistance à la compression (MPa)	Constante	58.209556	-	-	-	-
	Tg	-12.548	944.71382	1350.556	<.0001*	S
	Tc	-3.086	57.14038	81.6874	<.0001*	S
	Tg*Tc	0.055	0.01210	0.0173	0.0029*	S
	Tg^2	0.3786667	0.28678	0.4100	0.9037	NS
	Tc^2	-0.524333	0.54985	0.7861	0.5675	NS
	Manque d'adjust	-	-	-	0.4406	NS
Absorption d'eau Par capillarité (%)	Constante	4.3533333	-	-	-	-
	Tg	0.4966667	1.4800667	213.0444	<.0001*	S
	Tc	0.3583333	0.7704167	110.8956	0.0007*	S
	Tg*Tc	0.0175	0.0012250	0.1763	0.0818*	NS
	Tg^2	0.09	0.0162000	2.3319	0.0028	S
	Tc^2	0.065	0.0084500	1.2163	0.0242	S
	Manque d'adjust	-	-	-	0.3506	NS

Le manque d'ajustement est également utilisé pour vérifier la qualité de l'ajustement des modèles. Comme le montre le tableau (IV.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_g et T_c en fonction de leurs valeurs réelles) et les réponses obtenues par ANOVA sont données dans les équations (3-6) :

$$T_b = 27.83 + 6.03 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) + 1.2 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) + 0.43 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) + 0.5 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) - 0.4 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \dots \dots \dots (3)$$

$$Aff = 11.79 - 4.27 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) - 1.42 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) - 0.53 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) - 0.73 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) + 0.02 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$R_c = 58.21 - 12.55 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) - 3.09 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) + 0.06 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) + 0.38 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) - 0.52 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$A_c = 4.35 + 0.50 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) + 0.36 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) + 0.02 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) + 0.09 \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) \left(\frac{T_g - 40}{20} \right) + 0.07 \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \left(\frac{T_c - 40}{20} \right) \dots \dots \dots (6)$$

Où T_b est la température du béton frais, Aff l'ouvrabilité mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams, R_c est la résistance à la compression, A_c est l'absorption d'eau par capillarité, T_g est la température des granulats et T_c la température du ciment.

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 (IV.4). La température du béton frais, l'ouvrabilité, la résistance à la compression, l'absorption d'eau par capillarité ont des valeurs R^2 de 99.64, 99.88, 99.79 et 99.09% 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. Tous cela, avec seulement 0.36, 0.12, 0.21 et 0.81% des données expérimentales pour la température du béton frais, l'ouvrabilité au cône d'Abrams, la résistance à la compression 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%, comme le montre le tableau IV.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).

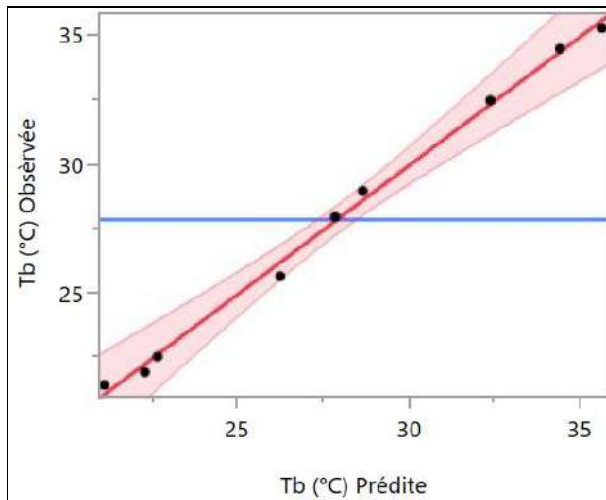
Les faibles valeurs de SD et CoV des modèles montrent que les données expérimentales correspondent aux modèles développés avec un degré de corrélation très élevé.

Tableau IV.4 : Résumé d'ajustement

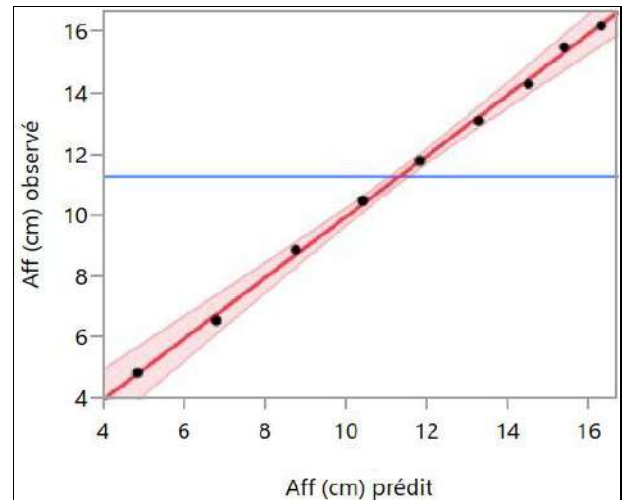
Réponses	Tb (°C)	Aff (cm)	Rc (MPa)	Ac (%)
Moyenne	27.9	11.31	58.11	4.46
SD	0.47	0.063	0.23	0.033
CoV (%)	1.12	0.58	0.54	1.64
R ²	0.9964	0.9988	0.9979	0.9909
R ² Adjusté	0.9905	0.9969	0.9944	0.9758

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 IV.8 (a-d)), où ils ont été avérés que la corrélation s'aligne et s'adapte 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 la température du béton frais, l'ouvrabilité au cône d'Abrams, la résistance à la compression et l'absorption d'eau par capillarité.

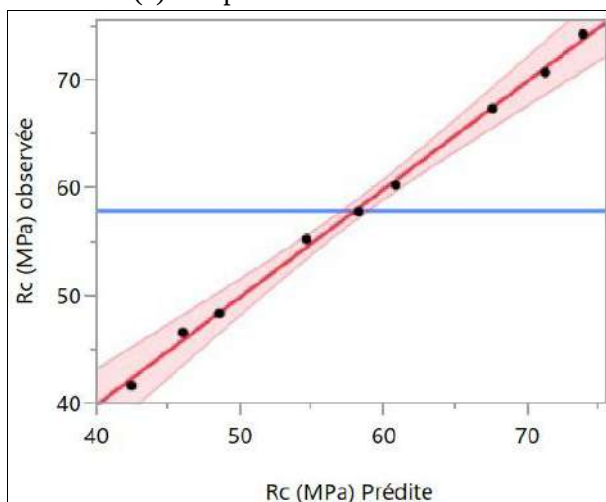
Les tracés de surface de réponse tridimensionnels pour les modèles développés sont illustrés à la figure IV.9 (a-d). On peut voir dans la figure IV.9.a que la température du béton frais est beaucoup plus affectée par la température des granulats que par la température du ciment, les figures IV.9. (b, d) montrent l'effet négatif de l'augmentation de la température des deux composants (granulats et ciment) sur l'ouvrabilité au cône d'Abrams, la résistance à la compression et l'absorption d'eau par capillarité. Les figures IV.9 (a-d) montrent également que l'élévation de la température des granulats présente des effets plus importants et plus négatifs sur les réponses par rapport à l'élévation de la température du ciment. La combinaison de 20 °C de la température des deux composants a donné les meilleurs résultats pour tous les modèles, tandis que la combinaison qui a donné les mauvais résultats était de 60 °C pour les deux composants.



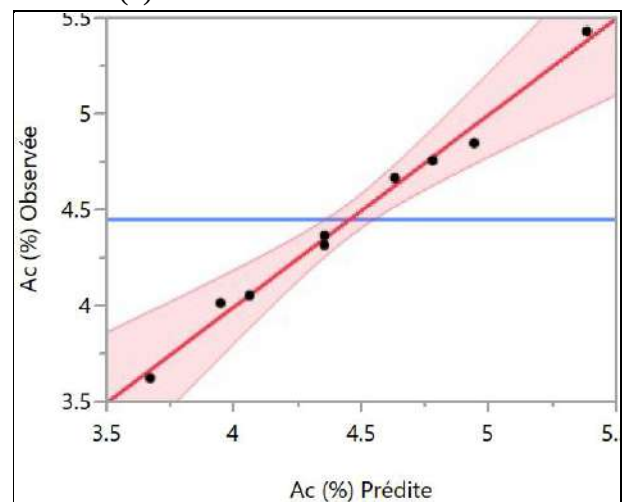
(a) Température du béton frais



(b) Ouvrabilité au cône d'Abrams

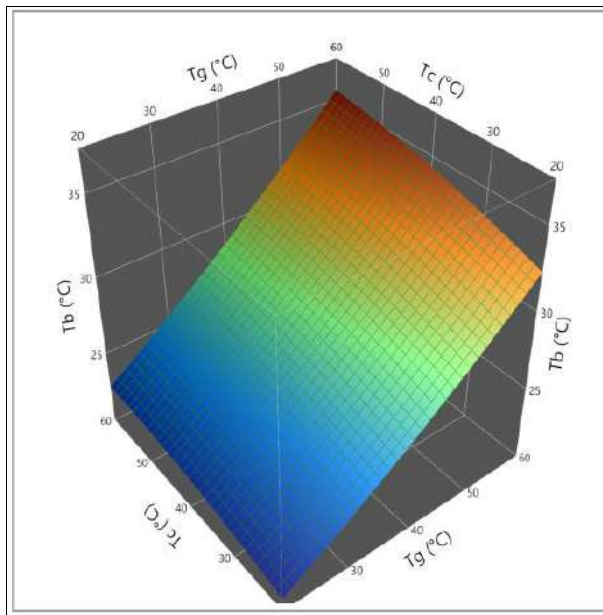


(c) Résistance à la compression

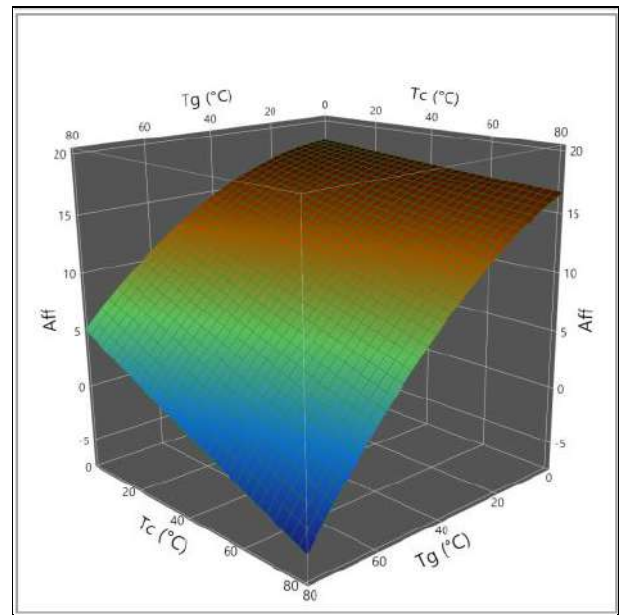


(d) Absorption d'eau par capillarité

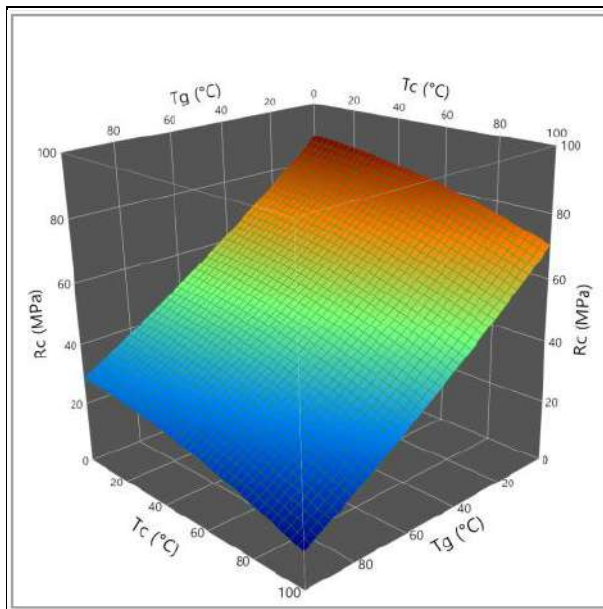
Figure IV.8 : Résultats prédits vs réels pour les modèles développés.



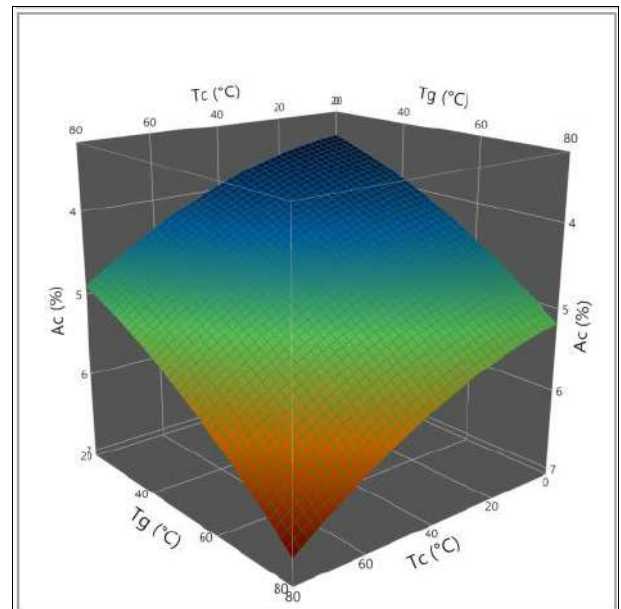
(a) Température du béton frais



(b) Ouvrabilité au cône d'Abrams



(c) Résistance à la compression



(d) Absorption d'eau par capillarité

Figure IV.9 : Surface de réponse pour les modèles développés.

Les courbes d'interaction des réponses avec une considération des facteurs sélectionnés (la température des granulats et la température du ciment) sont présentées sur la figure IV.11 (a – d). On peut observer que pour la réponse de l'absorption d'eau par capillarité, 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 ($T_g \cdot T_c$) sur la réponse A_c ne sont pas significatifs, ce qui fait confirmer les résultats de l'analyse ANOVA (Tableau IV.3). 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 [53].

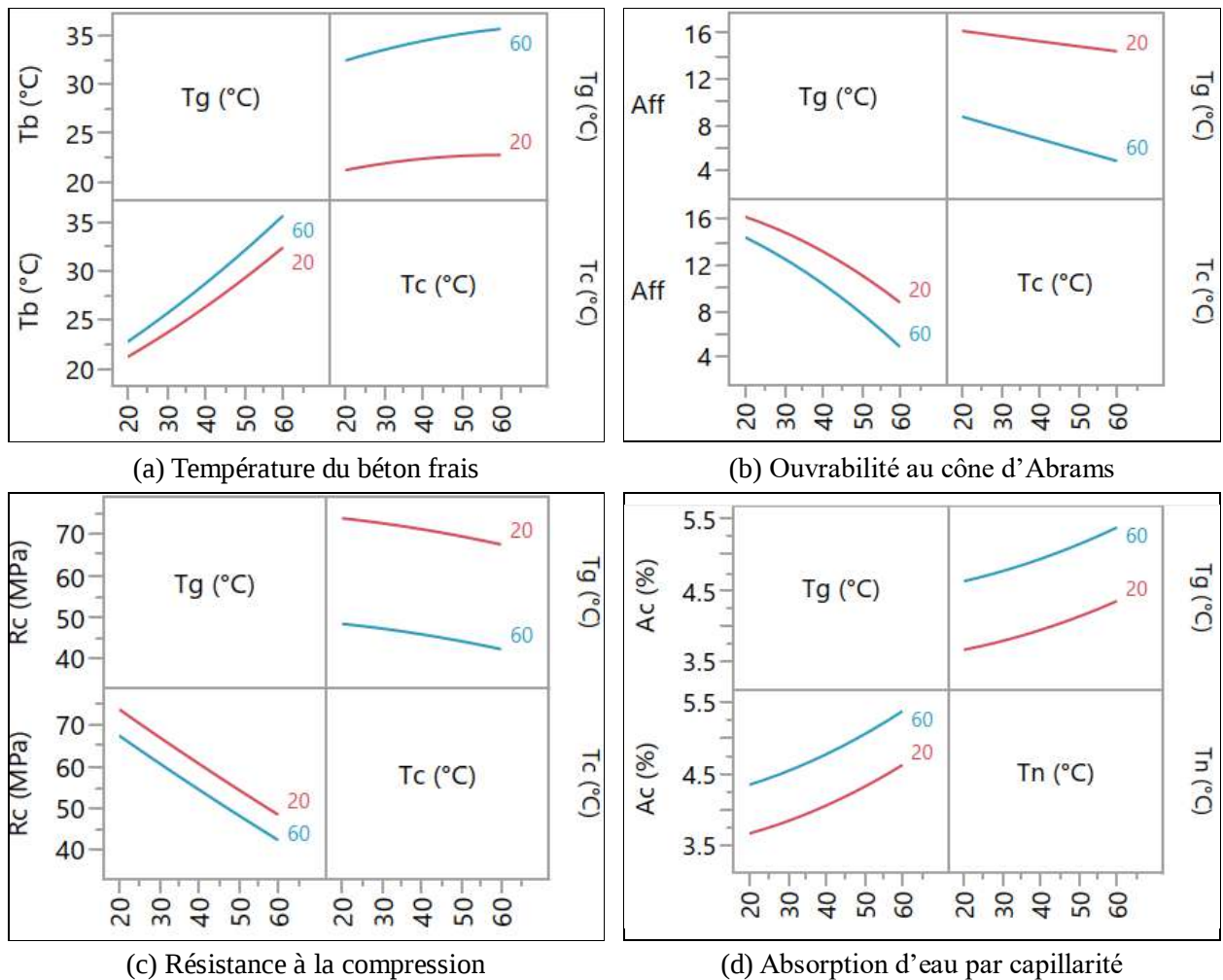
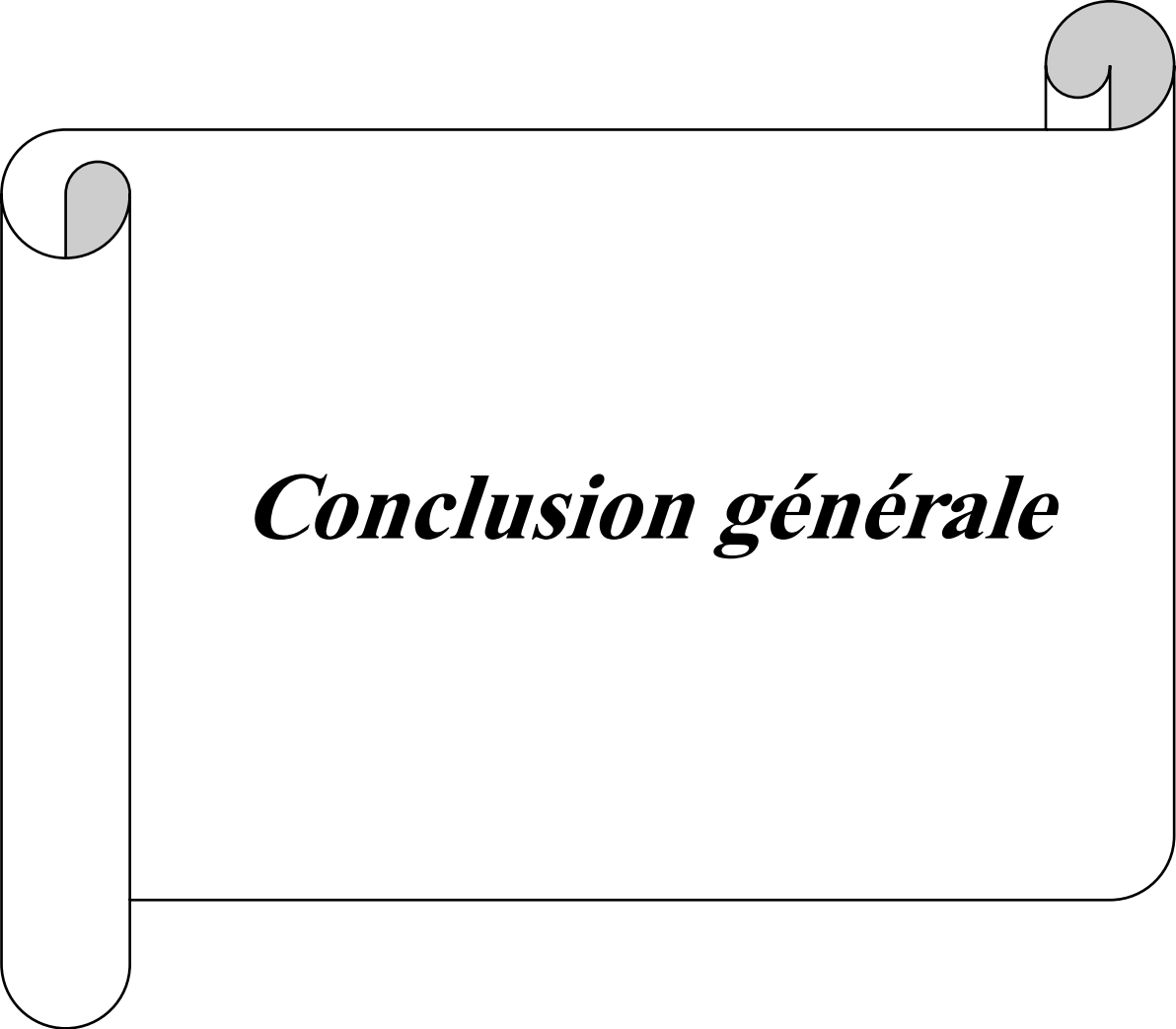


Figure IV.11 : Courbes d'interaction pour les modèles développés.

IV-4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de la variation de la température des deux composants du béton (granulats et ciment) sur ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. Les résultats obtenus montrent que les propriétés du béton sont affectées suite à l'élévation de la température de ces deux composants, des effets négatifs ont été notés pour l'ensemble des paramètres étudiés. Il convient également de noter que l'effet de la température des granulats est beaucoup plus important que celui de la température du ciment.

Dans ce chapitre aussi, des nouveaux modèles mathématiques ont été élaborés pour prédire la température du béton frais, l'ouvrabilité, la résistance à la compression, l'absorption d'eau par capillarité en fonction de la température des granulats et la température du ciment. 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%.

A decorative graphic of a scroll. It features a vertical strip on the left side and a horizontal strip at the top, both with rounded ends. The scroll is outlined in black, and the interior is white. There are three grey circular elements: one at the top right corner, one at the top left corner of the vertical strip, and one at the bottom left corner of the vertical strip.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude expérimentale, on a pu quantifier l'effet de la température de deux composants de béton sur leur comportement à l'état frais en examinant la température et la maniabilité du béton frais. Pour l'analyse du béton l'état durci s'est concentrée sur l'évolution de la résistance à la compression ainsi que l'absorption d'eau par capillarité.

A la suite de ces résultats expérimentaux, on peut en tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Les températures du béton frais les plus élevées ont été obtenues lorsque la température des deux composants était à son maximum (60 °C pour les deux composants). Tandis que, les affaissements maximaux ont été obtenues lorsque la température des deux composants était à son minimum (20 °C pour les deux composants). La température du ciment n'a pas eu d'effet comparable à celui de la température des granulats sur la température et l'ouvrabilité du béton frais.
- ✓ Les résistances en compressions ont été affecté par l'élévation de la température des granulats plus que la température du ciment, où on a remarqué que la perte de résistance atteint 37,9 % lorsque la température des granulats augmente de 20 à 60 °C, tandis que la perte de résistance ne dépasse pas 13.7 % lorsque la température du ciment augmente de 20 à 60 °C.
- ✓ L'absorption de l'eau par capillarité des bétons confirment les résultats de la résistance. Le béton avec un ciment plus chaud (60 °C) a une absorption maximale inférieure de 25% de celle de béton avec des granulats plus chauds.

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 température du béton frais, l'ouvrabilité, la résistance à la compression et l'absorption d'eau par capillarité.

- ✓ Les modèles élaborés présentaient une haute significativité avec des valeurs de P inférieurs 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 20 °C de la température des granulats et 20 °C de la température du ciment. Les courbes de contour ont indiqué qu'il existe une interaction parfaite entre la Tg et Tc. Les courbes d'interaction des réponses étaient concorde aux valeurs de P pour la signification du terme d'interaction Tg*Tc.

Perspectives

Cette étude était limitée à la température de deux composants (granulats et ciment), la suite de cette étude consiste en l'ajout du troisième composant à l'étude (l'eau), notamment en raison de son importance dans la composition du béton.

***Références
bibliographiques***

Références bibliographiques

- [1] : Centre Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales : Guide d'utilisation du béton en site maritime-Notice n° PM 08-01, France, (2008).
- [2] : Xing. Z., Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température. Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, (2011).
- [3] : NIGRI. G., Technologie du béton, Thèse de Master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2018.
- [4] : NA 442 : 2013. Désignation normalisée. CIMENT PORTLAND A COMPOSE. Identification. CEMII/A-M (P-L) 42.5N
- [5] : Fiches Techniques, Tome 1, Les constituants des bétons et des mortiers : Les Adjuvants, Paris, (2005).
- [6] : BOUCHOUK Kh & BOUAZIZ F; étude de l'effet des adjuvants sur les propriétés des bétons, Mémoire de mastère, Université de Guelma, (2013).
- [7] : A BOUCHIBA ; Propriétés du béton frais ; Mémoire de master, Université de tiaret ,2015
- [8] : Baron J, Ollivier JP. La durabilité des bétons, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, in French, Paris, 1992. ISBN : 2-85978-184-6.
- [9] : Neville AM. Properties of concrete, Edition Eyrolles, 4th ed. Longman Group Limited, England, 2000. ISBN : 2-212-01320-5.
- [10] : A.Vichot, J. P. Ollivier. La durabilité des bétons, Presses ENPC, 2008. ISBN : 978-2-85978-34-8.
- [11] : REGOURD M. – « Carbonatation accélérée et résistance des ciments aux eaux agressives ». Rilem Int. Symp., Cement and Concrete Association, Vexham Springs, 1976.
- [12] : KAMALI S. – Comportement et simulation des matériaux cimentaires en environnements agressifs : lixiviation et température. Thèse de l'ENS Cachan-LMT n° 2003/4, 7 février 2003.
- [13] : MEHTA P.K. – “Concrete technology at the crossroads. Problems and opportunity” P.K. Metha symposium on Durability of concrete, Nice, France, K.H. Khayat et P.C.

Aïtcin eds, 1994, p. A3-A37.

- [14] : 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.
- [15] : Hampton, J. S. (1981). Extended workability of concrete containing high-range water-reducing admixtures in hot weather. Special Publication, 68, 409–422.
- [16] : Mouret, M. (1997). Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud. Toulouse 3.
- [17] : Ahmadi, B. H. (2000). Initial and final setting time of concrete in hot weather. Materials and Structures, 33(8), 511–514.
- [18] : Soroka, I., & Ravina, D. (1998). Hot weather concreting with admixtures. Cement and Concrete Composites, 20(2–3), 129–136.
- [19] : Ramezaniapour, 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).
- [20] : 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>
- [21] : 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.
- [22] : 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.
- [23] : 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.
- [24] : 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.

- [25] : 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.
- [26] : 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.
- [27] : Norme NF P18-541 : Association Française de Normalisation (AFNOR) : Granulats pour bétons hydrauliques. Mai (1994).
- [28] : Saint Arroman J.C., Granulats, Sols, Ciment et Béton, Editions ASTEILLA, Paris, (1995)
- [29] : DERABLA R., Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et long terme des bétons autoplaçants traités thermiquement. Thèse de doctorat, université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, (2015).
- [30] : Centre Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales : Guide d'utilisation du béton en site maritime-Notice n° PM 08-01, France, (2008).
- [31] : NF P 18-555 : Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux. Décembre (1990).
- [32] : NF P 18-554 : Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables. Décembre (1990).
- [33] : Fiche technique du Ciment Portland Composé CPJ-CEM II/A 42,5. Laboratoire de l'usine "Hadjar Essoud"., Skikda, Algérie, (2011).
- [34] : Khial N., Utilisation des méthodes non destructives pour la caractérisation des bétons dans un environnement agressif » Thèse de doctorat, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, (2016).
- [35] : Dreux. G., Nouveau guide de béton, Editions Eyrolles, Paris, p.154, (1979).
- [36] : 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>
- [37] : Gauthier, P., & Marchand, J. (2004). Conception et réalisation de revêtements en béton

- compacté au rouleau au Québec. Association Béton, Québec (ABQ) Québec, 63–87.
- [38] : NF EN : 12390-2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, Juin 2019, AFNOR.
- [39] : NF-EN-206-1 : Béton - partie 1 : Spécification, performances, production et conformité. AFNOR, (2004).
- [40] : NF EN 1926 : Détermination de la résistance en compression uniaxiale, Avril 2007.
- [41] : NF EN 772-11 : détermination de l'absorption de l'eau par capillarité, Aout 2011
- [42] : 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.
- [43] : Bernard, F. Kamali-Bernard, S. Fu, J. (2017). Approche de modélisation multi-échelle pour la détermination de la chaleur spécifique des matériaux cimentaires. *Academic Journal of Civil engineering*.
- [44] : Soroka, I., & Ravina, D. (1998). Hot weather concreting with admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 20(2–3), 129–136.
- [45] : 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).
- [46] : Douglas, C. . (2008). *Montgomery Design and Analysis of Experiments*. John Wiley.
- [47] : 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.
- [48] : 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>
- [49] : 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.
- [50] : 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.

- [51] : 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.
- [52] : 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.
- [53] : 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>