

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil.

Par :

- MEZAACHE Abd El Bari.
- CHAGHAL Zakarya.

Sujet

Nouvelle méthode d'optimisation et d'évaluation directe des propriétés physico – thermiques des bétons ordinaires à pouvoir isolant.

Soutenu publiquement, le 30 /06/2024 , devant le jury composé de :

M.ZIANI Houcine	Grade	Univ-BBA	Président
M.MESSAOUDENE Ibrahim	Grade	Univ-Msila	Examineur
M.DBOUCHA Sadek	MCA	Univ-BBA	Examineur
M. LOGZIT Nacer	MCA	Univ-BBA	Encadrant
M. RAOUACHE El Hadj	MCA	Univ-BBA	Co-Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

Dédicaces

À nos chères mères. À nos chers pères; Nulles dédicaces ne peuvent exprimer ce que on leur dois, par leur prière, leurs patiences en nous, ils ont tous fait pour notre bonheur et réussite. Qu'ils veuillent trouver dans ce travail le fruit de leurs sacrifices illimités et la preuve de notre amour et de gratitude éternelle. À nos chers frères et chères sœurs ; Qui m'ont tant donné de courage pour accomplir cette mission. À tous nos familles, tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation et tous nos amis. On dédie ce mémoire de fin d'études.

REMERCIEMENTS

Chers membres du jury,

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de notre mémoire. Le chemin jusqu'à ce stade a été rempli de défis et d'apprentissages, et nous sommes profondément reconnaissant envers toutes les personnes qui nous ont soutenu tout au long de ce parcours.

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers nos encadreurs MM **LOGZIT Nacer** et **RAOUACHE El Hadj** pour leur guidance experte et leurs conseils précieux. Leur vision, expertise et leur disponibilité nous a permis de progresser dans nos recherches et de développer notre travail de manière approfondie.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, [Noms des membres du jury], d'avoir accepté de consacrer leur temps et leur expertise à l'évaluation de notre mémoire. Vos commentaires et suggestions seront inestimables pour notre développement académique et professionnel.

Nos remerciements vont également à nos familles et à nos amis pour leur soutien constant tout au long de cette aventure. Vos encouragements, votre compréhension et votre présence ont été d'une grande importance pour nous.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers l'Université, les enseignants et le personnel qui ont contribué à notre formation et développement. Leur dévouement à l'excellence académique a été une source d'inspiration et a façonné notre pensée critique et bonne passion pour la recherche .

Résumé

Le sujet traite la proposition d'une nouvelle technique pour l'optimisation globale des propriétés physico-thermiques des bétons à caractère isolant. Le travail a commencé par la conception paramétrée de plusieurs mélanges des bétons isolants à différents rapports E/C et selon trois classes de résistance d'un béton ordinaire. Ces bétons issus des modèles théoriques, ont été caractérisés afin de déterminer ses propriétés physiques, thermiques et mécaniques (masse volumique, porosité, conductivité thermique, et la résistance mécanique). En deuxième phase, les résultats validés par analyse statistiques ont été corrélés pour développer des modèles expérimentaux répondant à une démarche globale de prédiction de la conception de formulation d'un béton à pouvoir isolant. La démarche proposée est capable de donner une solution efficace pour concevoir un béton ordinaire avec ajustement rapide et direct des paramètres globaux de la matrice des propriétés. Le modèle de corrélation proposé est également prédictif pour une analyse des besoins en énergie d'une habitation.

Mots clés : Béton ordinaire, Pouvoir isolant, Optimisation, Porosité, conductivité thermique.

Abstract

The subject deals with the proposal of a new technique for the overall optimisation of the physico-thermal properties of insulating concretes. The work began with the parameterised design of several insulating concrete mixes with different W/C ratios and according to three strength classes of ordinary concrete. These concretes, derived from theoretical models, were characterised in order to determine their physical, thermal and mechanical properties (density, porosity, thermal conductivity and mechanical strength). In the second phase, the results, validated by statistical analysis, were correlated to develop experimental models for an overall approach to predicting the design of an insulating concrete mix. The proposed approach is capable of providing an effective solution for designing an ordinary concrete with rapid and direct adjustment of the global parameters of the properties matrix. The proposed correlation model is also predictive for a housing energy needs analysis.

Key words: Ordinary concrete, Insulating capacity, Optimisation, Porosity, Thermal conductivity.

ملخص

يتناول الموضوع اقتراح تقنية جديدة للتحسين الشامل للخصائص الفيزيائية الحرارية للخرسانة العازلة. بدأ العمل بتصميم متنوع للعديد من الخلطات الخرسانية العازلة بنسب E/C مختلفة ووفقاً لثلاث فئات من الخرسانة العادية. تم توصيف هذه الخرسانات، المستمدة من النماذج النظرية، من أجل تحديد خواصها الفيزيائية والحرارية والميكانيكية (الكثافة والمسامية والتوصيل الحراري والقوة الميكانيكية). في المرحلة الثانية، تم ربط النتائج، التي تم التحقق من صحتها من خلال التحليل الإحصائي، لتطوير نماذج تجريبية لنهج شامل للتنبؤ بتصميم خلطة الخرسانة العازلة. إن النهج المقترح قادر على توفير حل فعال لتصميم خرسانة عادية مع تعديل سريع ومباشر لمحددات مصفوفة الخواص. كما أن نموذج الارتباط المقترح يمكن التنبؤ به أيضاً لتحليل احتياجات الطاقة في المساكن.

الكلمات المفتاحية: خرسانة عادية، قدرة العزل، التحسين الأمثل، المسامية، التوصيل الحراري.

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE 1 :Optimisation d'un béton ordinaire allégé	2
1 Introduction	3
2 Définition de l'optimisation :	3
2.1 Rappels sur la définition d'un problème d'optimisation :	3
2.2 Application du principe d'optimisation sur le béton ordinaire allégé :	5
3 Problématique :	5
3.1 Objectifs :	5
4 Paramètres :	6
4.1 Réduction en eau en fonction du dosage en ciment :	6
4.2 Porosité d'un béton :	6
4.3 Durabilité potentielle d'un béton :	7
4.4 Résistance du béton en fonction du dosage en ciment et de la teneur en air :	7
4.5 Résistance du béton en fonction du dosage en ciment, Temps, et de la teneur en air :	8
4.6 Résistance du béton et teneur en air en fonction de la durée de malaxage :	9
4.7 Résistance du béton, différentes formules :	10
4.8 Résistance du béton en fonction du C/E (Formule de Bolomey) :	11
4.9 Résistance du béton en fonction de E/C (Formule d' Abrams).	12
4.10 Résistance du béton, différentes formules en fonction de G/S :	13
4.11 Résistance du béton en fonction de la masse volumique :	14
4.12 Résistance du béton en fonction de la masse volumique :	15
5 Conclusion :	16
CHAPITRE 02 : Formulation du béton	18
1 Introduction :	19
2 Définition :	19
3 Formulation du béton par la méthode Dreux – Gorisse :	19
3.1 Critère de résistance :	20
3.2 Choix de ciment :	20
3.3 Détermination du rapport C/E :	20
3.4 Détermination de la valeur de C en Fonction C/E :	21
3.5 Détermination du dosage en eau :	21
3.6 Détermination de la courbe granulométrique de référence :	22
4 CONCLUSION :	23
5 Formulation de béton ordinaire :	23

5.1 Résistance estimée du béton à 28 Jours :	24
6 Calcul de la formule du béton ordinaire (25 MPa) :	25
6.1 Les dosages en matériaux secs seront donc en kg :	25
7 Calcul de la formule du béton ordinaire (30 MPa):	26
7.1 Les dosages en matériaux secs seront donc en KG :	26
8 Calcul de la formule du béton ordinaire (35 MPa) :	26
8.1 Les dosages en matériaux secs seront donc en kg :	27
9 Quantité pour un béton 25 MPa :	27
10 Quantité pour un béton 30 MPa :	28
11 Quantité pour un béton 35 MPa :	28
12 Préparation des mélanges et caractérisation à l'état frais :	28
12.1 Préparation des matériaux (3 mélanges : 25, 30 et 35 MPa) :	28
13 Conclusion :	32
CHAPITRE 03 : Analyse statistique	33
1 Introduction :	34
2 Calcul des propriétés physico-thermiques :	34
2.1 Masse volumique apparente : ρ_d en (g/cm^3) et la porosité (%) :	34
2.2 Application :	36
2.2.1 Masse volumique :	36
2.2.2 Porosité :	36
3 Essai de compression :	39
3.1 Résultats pour le béton de classe 25 MPa :	41
3.2 Résultats pour le béton de classe 30 MPa :	41
3.3 Résultats pour le béton de classe 35 MPa :	42
4 Essai conductivité thermique :	42
4.1 Préparation de l'échantillon :	42
4.2 Résultats de mesure de la conductivité thermiques des différents échantillons du béton de la classe 25 MPa :	44
Les résultats des essais de la conductivité du béton de la classe 25 MPa sont regroupés dans le tableau 3.7.....	44
4.3 Calcul statistique pour la classe du béton de 30 MPa :	46
4.4 Calcul statistique pour la classe du béton de 30 MPa :	47
5 Conclusion :	47
CHAPITRE 04 : Résultat et discussion	Error! Bookmark not defined.
1 Introduction :	50
2 Composition de béton :	50

2.1 Définition :	50
2.2 Granulats Grossiers :	50
2.3 Sable Fin :	50
2.4 Ciment :	50
2.5 Eau :	51
3 Propriétés physiques et thermiques du béton :	51
3.1 Résistance Mécanique :	51
3.2 Conductivité thermique ‘ λ ’:	51
3.2.1 Définition :	51
3.2.2 Caractéristiques thermo-physiques des matériaux :	51
3.3 La masse volumique :	52
3.3.1 La masse volumique apparente :	52
3.3.2 La masse volumique absolue :	52
3.4 La porosité :	52
4 Approche globale d’optimisation des différents paramètres d’optimisation :	52
5 Différents paramètres d’optimisation de la formulation globale :	54
5.1 Résistance à la compression d’un béton en fonction de sa masse volumique	54
5.2 Interprétation entre la figure « 3 » et « 4 » .(Modèle Théorique et expérimental) :	
Error! Bookmark not defined.	
5.3 Conductivité thermique en fonction de la masse volumique du béton :	55
5.4 Interprétation entre la figure « 5 » et « 6 » .(Modèle Théorique et expérimental) :	
Error! Bookmark not defined.	
5.5 Porosité du béton en fonction de la masse volumique	57
5.6 Interprétation entre figure « 7 » et « 8 » .(Modèle Théorique et expérimental) : ..	Error!
Bookmark not defined.	
5.7 Conductivité thermique en fonction de la porosité d’un béton.....	58
5.8 Interprétation entre la figure « 9 » et « 10 » .(Modèle Théorique et expérimental) :	
Error! Bookmark not defined.	
5.9 Porosité d’un béton en fonction de sa résistance à la compression.	59
5.10 Interprétation entre la figure « 11 » et « 12 » (Modèle Théorique et expérimental) :	
Error! Bookmark not defined.	
5.11 Résistance à la compression (Rc) en fonction Conductivité thermique (λ).....	60
5.12 Interprétation entre figure « 13 » et « 14 » .(Modèle Théorique et expérimental) :	
Error! Bookmark not defined.	
6 Conclusion :	61
Conclusion générale	63
Références bibliographiques :	64

NOMENCLATURE

ρ_d : masse volumique

ε : porosité accessible à l'eau

σ'_{28} : résistance moyenne en compression après 28 jours

σ'_c : la vraie classe de ciment, elle est définie comme étant la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé.

C : le dosage en ciment en Kg/m³.

E : le dosage en eau total en l/m³.

G : le coefficient granulaire donné en fonction de la qualité des granulats et la dimension maximale des grains D .

f_{mj} : résistance du ciment au jour

K_b : facture granulaire

E et v : volume d'eau et d'air respectivement

$CT(\text{moy})$: Valeur moyenne de la conductivité thermique

σ : Ecart type des résultats.

V : $\sigma / CT(\text{moy})$: Coefficient de variation

e : épaisseur de matériau en mètre

λ : Conductivité thermique en W/m.k

R : Résistance thermique en m².k/W

Φ : Flux de chaleur, (W)

e : Épaisseur du matériau (m)

T_1 : Température côté chaud (°C ou K)

T_2 : Température côté froid (°C ou K)

A : Surface à travers laquelle circule le flux de chaleur (m²)

a : Diffusivité thermique (m²/s)

C_p : Capacité thermique massique (J/kg·K)

E : Énergie thermique (J)

C_p : Capacité thermique massique (J/kg·K)

Q : Quantité de chaleur (J)

d : est la masse volumique du béton frais (kg/m³)

M₁: est la masse de l'éprouvette (kg).

M₂: est la masse de l'éprouvette plus la masse du béton contenu dans l'éprouvette (kg).

V : est le volume de l'éprouvette en mètre cube (m³)

Liste des Figures

Chapitre 1 : Optimisation d'un béton ordinaire allégé

Figure 1.1 : Schéma de la citerne - Les variables X ₁ , X ₂ et X ₃ sont les variables d'optimisation qui pilotent la forme de la citerne	04
Figure 1.2 : Relation entre le dosage en eau, le dosage en ciment et la teneur en air.....	06
Figure 1.3 : La résistance en compression du béton en fonction de la teneur en air.....	08
Figure 1.4 : Résistance du béton en fonction du dosage en ciment, temps, et teneur en air...09	
Figure 1.5 : Influence de la durée de malaxage sur la résistance et la teneur en air du béton.....	10
Figure 1.6 : Résistance du béton en fonction des volumes C, E et Air (Formule de Féret).....	11
Figure 1.7 : Résistance du béton en fonction du C/E (Formule de Bolomey).....	11
Figure 1.8 : Résistance du béton en fonction de E/C (Formule d' Abrams).....	12
Figure 1.9 : Effet du rapport G/S.....	13
Figure 1.10 : Résistance du béton en fonction de la masse volumique.....	14
Figure 1.11 : Conductivité thermique en fonction de l'Age, E/C, Volume des agrégats, et type du ciment.....	15

Chapitre 2 : Formulation du béton

Figure 2.1 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'affaissement au cône.....	20
Figure 2.2 : Courbe granulométrique de référence.....	21
Figure 2.3 : Le processus de lavage et de nettoyage du gravier et de filtrage du sable des impuretés	28
Figure 2.4 : Pesage des quantités (ciment-eau-sable-gravier).....	29
Figure 2.5 : Malaxage.....	29
Figure 2.6 : Essai d'affaissement.....	30
Figure 2.7 : Coulage et remplissage du mélange de béton dans les moules.....	30
Figure 2.8 : Démoulage des moules.....	31

Chapitre 3 : Analyse statistique

Figure 3.1 : Saturation des échantillons dans un bac d'eau.....	33
Figure 3.2 : Balance hydrostatique pour la mesure de (Me).....	34
Figure 3.3 : Pesée de l'échantillon humide dans l'air (balance).....	34
Figure 3.4 : Séchage des éprouvettes	35
Figure 3.5 : Echantillon de béton dans laboratoire.....	39
Figure 3.6 : L'échantillon placé entre les plaques de compression de la machine d'essai.....	39
Figure 3.7 : Machine d'essai de mesure la force appliquée et la déformation résultante de l'échantillon.....	40
Figure 3.8 : Préparation de l'échantillon	43
Figure 3.9 : Machine d'essai de conductivité thermique.....	43
Figure 3.10 : Résultat de la machine de l'essai.....	44
Chapitre 4 : Approche globale de corrélation des paramètres Physico-Thermiques du Béton	
Figure 4.1 : Coupe du dispositif des boites	52
Figure 4.2 : Extrait de la formulation automatique sous Excel.....	54
Figure 4.3 : Résistance à la compression d'un béton en fonction de sa masse volumique. (Modèle Théorique).....	55
Figure 4.4 : Résistance à la compression d'un béton en fonction de sa masse volumique. (Modèle expérimental).....	55
Figure 4.5 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique du béton. (Modèle Théorique).....	56
Figure 4.6 : Conductivité thermique (λ) en fonction de la masse volumique du béton.(Modèle expérimental).....	57
Figure 4.7 : Porosité du béton en fonction de la masse volumique. (modèle Théorique).....	57
Figure 4.8 : Porosité du béton en fonction de la masse volumique. (modèle expérimental).....	58
Figure 4.9 : Conductivité thermique (λ) en fonction de la porosité des bétons.(modèle Théorique).....	59
Figure 4.10 : Conductivité thermique (λ) en fonction de la porosité des bétons . (modèle expérimental).....	59
Figure 4.11 : Porosité en fonction de la résistance à la compression (Rc) des bétons.(modèle Théorique).....	60
Figure 4.12 : Porosité en fonction de la résistance à la compression (Rc) des bétons.(modèle Expérimental).....	61

Figure 4.13 : Résistance à la compression (R_c) en fonction Conductivité thermique (λ) des bétons.(modèle théorique).....	61
Figure 4.14 : : Résistance à la compression (R_c) en fonction Conductivité thermique (λ) des bétons.(modèle Expérimental).....	62

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Optimisation d'un béton ordinaire allégé

Tableau 1.1 Classe de durabilité en fonction de la porosité.....	07
--	----

Chapitre 2 : Formulation du béton

Tableau 2.1 : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.....	19
Tableau 2.1.1 : Valeur estimée de f_m 28 jours	23
Tableau 2.2 : Valeurs du coefficient granulaire G.....	19
Tableau 2.3 : Valeurs du coefficient correcteur M en fonction de la dimension, maximale des granulats.....	20
Tableau 2.4 : Valeurs du terme correcteur K.....	21
Tableau 2.5 : Relation entre consistance cible, demande en eau en teneur en air cas d'un béton non adjuvanté avec granulats roulés ($D = 20$ mm).....	22
Tableau 2.6 : Valeur estimée de K_b	23
Tableau 2.7 : Quantité de mélange d'un béton 25 MPa (pour 1 m^3 et pour éprouvettes).....	26
Tableau 2.8 : Quantité de mélange d'un béton 30 MPa (pour 1 m^3 et pour éprouvettes).....	27
Tableau 2.9 : Quantité de mélange d'un béton 35 MPa (pour 1 m^3 et pour éprouvettes).....	27

Chapitre 3 : Analyse statistique

Tableau 3.1 : Résultats de la masse volumique et la porosité du béton 25 MPa	36
Tableau 3. 2 : Résultats de la masse volumique et porosité du béton 30 MPa.....	37
Tableau 3. 3 : Résultats de la masse volumique et porosité du béton 35 MPa.....	38
Tableau 3. 4 : Résultats de la résistance à la compression 25 MPa.....	40
Tableau 3. 5 : Résultats de la résistance à la compression 30 MPa.....	41
Tableau 3. 6 : Résultats de la résistance à la compression 35 MPa.....	42
Tableau 3. 7 : Résultats de la Conductivité thermique du béton de classe 25 MPa.....	45
Tableau 3. 8 : Résultats de la Conductivité thermique du béton de la classe 30 MPa.....	46
Tableau 3. 9 : Résultats de la Conductivité thermique du béton de la classe 35 MPa.....	47

Introduction générale

Le béton est un matériau couramment utilisé dans l'industrie de la construction en raison de sa polyvalence, de sa durabilité et de sa résistance. Cependant, pour des applications nécessitant des propriétés isolantes thermiques, il est crucial de pouvoir évaluer précisément ses propriétés physico-thermiques. Dans ce cadre, une nouvelle approche d'évaluation directe des propriétés physico-thermiques des bétons isolants a été mise au point. Cette approche innovante permet d'obtenir des données fiables et précises sur la conductivité thermique, la capacité thermique et la diffusivité thermique des bétons, aidant ainsi les concepteurs et ingénieurs à choisir les matériaux les plus appropriés pour leurs projets de construction. Cette avancée dans la caractérisation des propriétés thermiques des bétons isolants ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments et réduire leur empreinte environnementale.

Les bétons isolants suscitent un intérêt croissant dans le secteur de la construction, notamment pour répondre aux exigences de performance énergétique des bâtiments. Toutefois, l'évaluation des propriétés physico-thermiques de ces matériaux reste complexe en raison de leur structure hétérogène et poreuse. Les méthodes de mesure conventionnelles présentent des limites, notamment en termes de représentativité de l'échantillon et de fiabilité des résultats. Il est donc impératif de développer de nouvelles approches pour une évaluation plus précise et représentative des propriétés thermiques des bétons isolants.

Ce mémoire présente une nouvelle approche visant à aider les Concepteurs et Ingénieur pour le choix des paramètres de formulation globale d'un béton ordinaire à pouvoir isolant. Cette méthode repose sur des techniques de caractérisation innovantes permettant de mieux comprendre la structure complexe de ces matériaux et d'obtenir des données fiables et représentatives à l'échelle macroscopique.

Les objectifs de ce travail sont les suivants :

- Développer une méthodologie innovante de caractérisation physico-thermique adaptée aux bétons isolants.
- Évaluer l'influence des paramètres de formulation et de mise en œuvre sur les propriétés thermiques des bétons isolants.
- Établir des modèles prédictifs permettant d'optimiser la performance thermique des bétons isolants.
- Mesures par évaluation directe de la conductivité thermique, de la diffusivité et de la capacité thermique.

Les chapitres suivants détailleront la méthodologie développée, les résultats théoriques et expérimentaux obtenus et les perspectives offertes par cette nouvelle approche de caractérisation des bétons à pouvoir isolant.

CHAPITRE 1

Optimisation d'un béton ordinaire allégé

1 Introduction

L'industrie du bâtiment doit faire face à des défis majeurs tels que la construction durable et l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Dans cette situation, il est crucial de développer des bétons qui présentent à la fois des performances mécaniques appropriées et des capacités d'isolation thermique optimales.

Le but de ce chapitre est la recherche des aspects pour améliorer le pouvoir isolant d'un béton ordinaire allégé tout en maintenant des caractéristiques mécaniques satisfaisantes. L'objectif de cette approche est d'ouvrir de nouvelles opportunités pour concevoir des enveloppes de bâtiments plus économes, tout en préservant la solidité et la durabilité des constructions.

Afin d'atteindre cet équilibre, nous examinerons diverses options d'optimisation, comme, l'emploi d'agrégats à faible conductivité thermique ou encore l'adaptation de la formulation du mélange. Il sera donc possible d'évaluer de manière approfondie l'effet de plusieurs solutions sur les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques du béton.

2 Définition de l'optimisation :

L'optimisation est effectivement une discipline cruciale dans de nombreux domaines, de la recherche opérationnelle à l'ingénierie en passant par la statistique et la théorie du contrôle. En effet, la capacité à trouver les meilleures solutions possibles à des problèmes, qu'il s'agisse de minimiser les coûts, maximiser les bénéfices, optimiser les performances ou atteindre d'autres objectifs, est fondamentale dans de nombreuses applications pratiques. La variété des techniques d'optimisation, qu'elles soient analytiques ou numériques, permet de s'attaquer à une grande diversité de problèmes, ce qui rend cette discipline particulièrement puissante et polyvalente. [1]

2.1 Rappels sur la définition d'un problème d'optimisation :

L'optimisation est un vaste domaine de recherche dont les applications concernent de nombreuses disciplines telles que le Génie Civil, la mécanique, l'économie, la gestion ou encore les sciences biologiques.

Par définition, un problème d'optimisation consiste à trouver la configuration donnant la meilleure valeur à une certaine quantité en tenant compte, si besoin, de contraintes.

Prenons l'exemple d'un problème de dimensionnement de la citerne d'un camion-citerne. L'objectif est de consommer le moins de matière possible pour fabriquer la citerne sachant que cette dernière doit contenir un volume fixé. La quantité à minimiser, appelée fonction objectif ou fonction coût, est donc la surface de la citerne. Comme le montre la figure 1.1, la citerne est composée d'un cylindre de rayon x_1 et de longueur x_2 auquel deux calottes sphériques de hauteur x_3 s'ajoutent aux extrémités. Dans cette configuration, les variables X_1 , X_2 et X_3 sont les variables d'optimisation. En plus du volume fixé, disons à 35 m³, d'autres contraintes

Peuvent être prises en compte. En effet, nous pouvons considérer que le diamètre de la citerne ne peut excéder la taille de la cabine du camion soit 2,4 m et la longueur ne doit pas dépasser une certaine limite 13,2 m ici. Puisque les variables d'optimisation représentent des dimensions, il paraît naturel de choisir l'ensemble des réels positifs comme espace des variables admissibles. En d'autres termes, les variables (X_1 , X_2 et X_3) prennent leurs valeurs dans R^+ . [1]

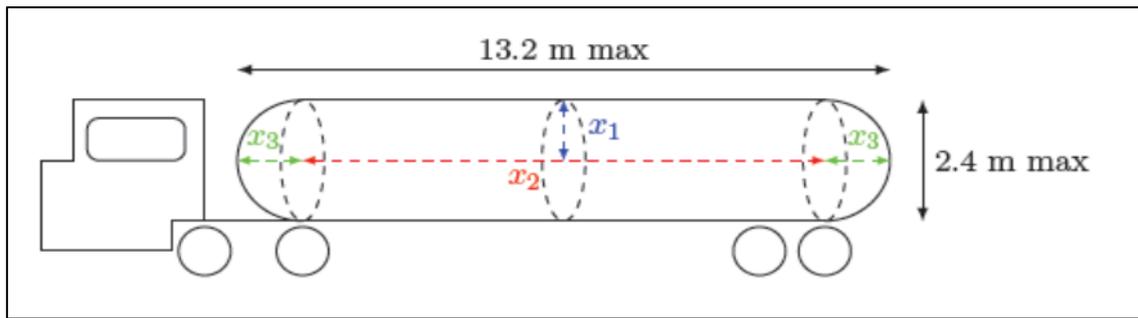


Figure 1.1 : Schéma de la citerne - Les variables X_1 , X_2 et X_3 sont les variables d'optimisation qui pilotent la forme de la citerne. [1]

Ce problème d'optimisation classique peut être formalisé mathématiquement par l'équation suivante :

$$\left. \begin{array}{l}
 \min : \quad 2\pi (x_1^2 + x_3^2 + x_1 x_2) \\
 (x_1, x_2, x_3) \in (\mathbb{R}^+)^3 \\
 x_2 + 2x_3 \leq 13.2 \\
 \text{Tel que :} \quad 2x_1 \leq 2.40 \\
 \frac{2\pi x_3^2}{3} \left(3 \frac{x_1^2 + x_3^2}{2x_3} - x_3 \right) + \pi x_3 x_1^2 = 35
 \end{array} \right\} \quad (1.1)$$

La résolution du problème (1) et de façon générale, de tout problème d'optimisation peut être effectuée au moyen de différents algorithmes d'optimisation basés sur des méthodes déterministes (avec ou sans gradient) ou sur des méthodes stochastiques. Certaines de ces méthodes seront présentées dans la suite de ce chapitre.

L'écriture de ce problème simple permet de mettre en évidence les différents éléments constituant un problème d'optimisation : un espace de variables admissibles, une fonction objective et selon les problèmes étudiés, des contraintes. Nous retrouverons ces éléments lors de la définition des problèmes d'optimisation de formes, sujet au cœur de ce manuscrit. Des ouvrages comme [1] expliquent de façon approfondie les règles de l'optimisation.

2.2 Application du principe d'optimisation sur le béton ordinaire allégé :

L'application du principe d'optimisation sur le béton ordinaire allégé consiste à trouver le meilleur compromis entre les différentes propriétés du matériau telles que la résistance, la durabilité, la légèreté et le coût. Cela peut se faire en ajustant les proportions des différents composants du béton (eau, ciment, teneur en air) pour obtenir les caractéristiques recherchées.

Ce problème d'optimisation classique peut être formalisé mathématiquement par l'équation suivante :

Fonction Objectif :

Min :

$$\lambda \leq 1.8 \quad \text{Avec : } 25 \leq f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$$

Variables d'optimisation :

(1.2)

$$G/S \geq 1.8$$

$$C/E = 1.78$$

$$E/C = 0.56$$

$$\text{Teneur en air} = 6\%$$

A travers l'optimisation visée dans ce travail, on cherche à trouver une solution permettant de formuler un béton avec des performances mécaniques et rhéologiques du béton ordinaire tout en visant un pouvoir isolant. Ce qui nous ramène à proposer une méthode pratique de formulation basée sur la corrélation numérique, pour obtenir un modèle satisfaisant, vis-à-vis des objectifs visés.

3 Problématique :

Le concept général de formulation d'un béton est généralement basé sur une approche visant soit une résistance mécanique sans en tenir compte de la résistance thermique, soit amélioration du pouvoir isolant au détriment de la résistance mécanique.

Dans la démarche à proposer, on vise un béton de structure, avec une amélioration de l'isolation thermique. Pour ce faire, une optimisation des paramètres rentrant dans le contexte de formulation s'impose.

Il est important de signaler les paramètres clés et les paramètres du second ordre, la porosité du béton est toujours définie comme étant un paramètre du premier ordre [2].

3.1 Objectifs :

- ✓ Viser une classe de résistance d'un béton de structure :

(F_{c28} entre 25 et 40 MPa).

- ✓ Amélioration de l'isolation thermique du béton :

$$(\lambda < 1,8 \text{ W/m.k}).$$

4 Paramètres :

Afin de proposer une formulation pratique d'un béton de structure avec amélioration du pouvoir isolation thermique, nous proposons dans cette section les différents paramètres intervenant dans le processus d'optimisation.

4.1 Réduction en eau en fonction du dosage en ciment :

La figure 2 montre Relation entre le dosage en eau, le dosage en ciment et la teneur en air. Cette corrélation est du type linéaire à non linéaire. Plus la quantité de l'eau à réduire est importante, la teneur en air augmente proportionnellement en fonction du dosage en ciment. Le béton à pouvoir isolant consiste en l'augmentation du pourcentage en air dans le squelette du béton, mais à quel niveau du dosage en ciment on peut se fixer ? et quelle sera la quantité de l'eau à réduire ?

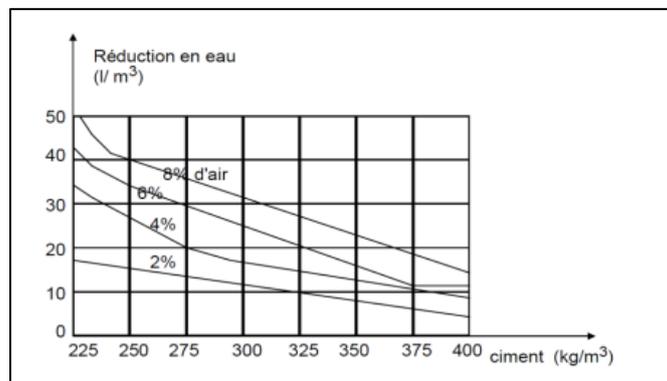


Figure 1.2 : Relation entre le dosage en eau, le dosage en ciment et la teneur en air. [1].

On propose un dosage en ciment de 375 Kg/m³, La quantité de l'air est de

- ✓ 2% pour une réduction de l'eau de 6 litres.
- ✓ 4% pour une réduction de l'eau de 10 litres.
- ✓ 6% pour une réduction de l'eau de 12 litres.
- ✓ 8% pour une réduction de l'eau de 18 litres.

A ce stade on doit connaître la quantité de l'air optimale pour pouvoir décider sur le dosage en ciment et de la réduction en eau.

4.2 Porosité d'un béton :

La porosité d'un matériau caractérise l'importance des vides qu'il contient. Elle est définie par le rapport entre le volume des pores V_p , et le volume total V_t . La porosité comprend tous les pores du matériau, elle est généralement supérieure à 10 % pour un béton courant. « La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton, ce n'est évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton, et en premier lieu, sa résistance mécanique » [3].

La porosité accessible à l'eau a été mesurée selon le mode opératoire décrit dans la norme NF P 18-459 (2010) [4] « Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique ».

L'essai consiste à saturer le matériau sous vide pendant 48 heures. On place ensuite le corps d'épreuve en suspension sur la balance hydrostatique et on le pèse totalement immergé. Puis, à l'aide d'un chiffon humide, on élimine l'eau superficielle sans retirer l'eau des pores et on mesure la masse de l'échantillon humide dans l'air. La dernière étape consiste à sécher le matériau à 105 °C jusqu'à masse constante (la différence entre deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle doit être inférieure à 0,1 %). Toutes les mesures sont effectuées à 0,01 % près. Expression des résultats de la masse volumique et la porosité du béton : La masse volumique apparente ρ_d exprimée en g/cm³ est donnée par l'équation suivante :

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (1.3)$$

La porosité accessible à l'eau ε , exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (1.4)$$

4.3 Durabilité potentielle d'un béton :

Tableau 1.1 : Classe de durabilité en fonction de la porosité. [4]

Durabilité potentielle →	Classe et valeurs limites				
	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Porosité accessible à l'eau (%)	>16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9

En général, la classe de durabilité du béton est inversement liée à sa porosité. Cela signifie que plus le béton est poreux, moins il est durable. La porosité du béton peut être influencée par plusieurs facteurs, notamment le rapport eau/ciment, la qualité des matériaux utilisés, les techniques de fabrication et de placement. En prenant la durabilité potentielle la moyenne celle qui est (12 à 14%) de là nous en retirons la porosité accessible à l'eau 14%. Avec prise en considération de la conductivité thermique. A travers l'analyse du tableau 1, on peut conclure qu'il est faisable de concevoir un béton à durabilité acceptable, tout en gagnant par une porosité légèrement augmentée le pouvoir isolant.

4.4 Résistance du béton en fonction du dosage en ciment et de la teneur en air :

La figure 1.3 montre : La résistance en compression du béton en fonction de la teneur en air. La résistance du béton est influencée par plusieurs facteurs, notamment le dosage en ciment, le temps de séchage et la teneur en air. Traditionnellement, une augmentation du dosage en ciment conduit à une augmentation de la résistance, bien que trop de ciment puisse rendre le béton

Le temps de séchage est également critique car le béton continue à durcir et à devenir plus solide avec le temps. Un bon processus de séchage, appelé cure, est donc indispensable pour garantir une résistance optimale.

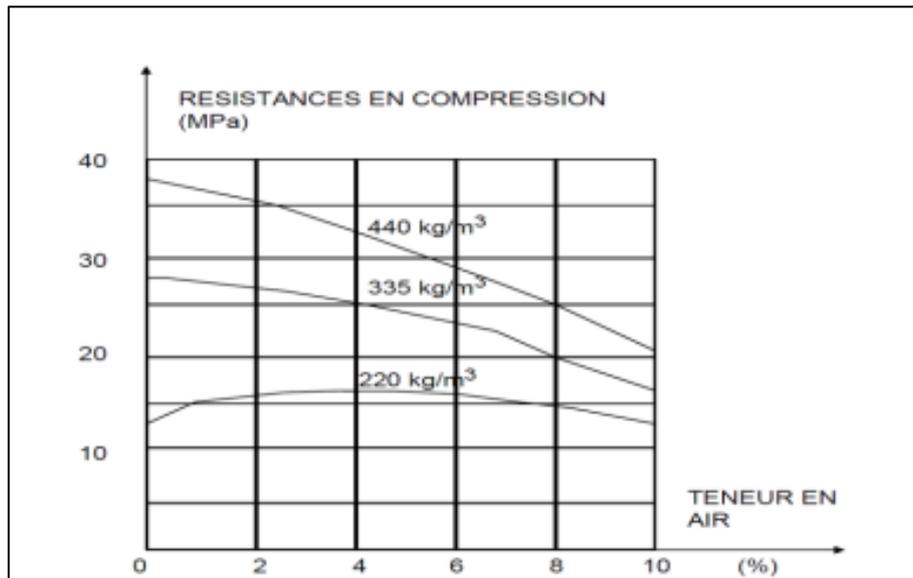


Figure 1.3 : La résistance en compression du béton en fonction de la teneur en air. [1].

Après avoir utilisé une teneur en air de 6% et une densité de ciment de 375 kg/m³, nous avons observé une résistance satisfaisante supérieure à 30 MPA.

4.5 Résistance du béton en fonction du dosage en ciment, Temps, et de la teneur en air :

La figure 4 montre : la figure "Résistance du béton en fonction du dosage en ciment, du temps et de la teneur en air" pourrait explorer la relation complexe entre ces trois variables cruciales dans la formulation et le développement des propriétés du béton.

Il serait intéressant de discuter de la façon dont le dosage en ciment influence la résistance du béton, avec une augmentation générale de la résistance à mesure que le dosage en ciment augmente, mais aussi en soulignant les effets négatifs d'un dosage excessif, qui peut entraîner des problèmes tels que la fissuration.

Ensuite, l'impact du temps sur la résistance du béton peut être abordé, en mettant en évidence comment le béton continue à gagner en résistance au fil du temps en raison du processus de durcissement, mais aussi en soulignant les considérations de durabilité à long terme.

Enfin, la teneur en air dans le béton peut être discutée, avec une explication sur son rôle dans la résistance aux cycles de gel/dégel et dans la réduction du risque de fissuration due à la pression exercée par l'expansion de l'eau gelée.

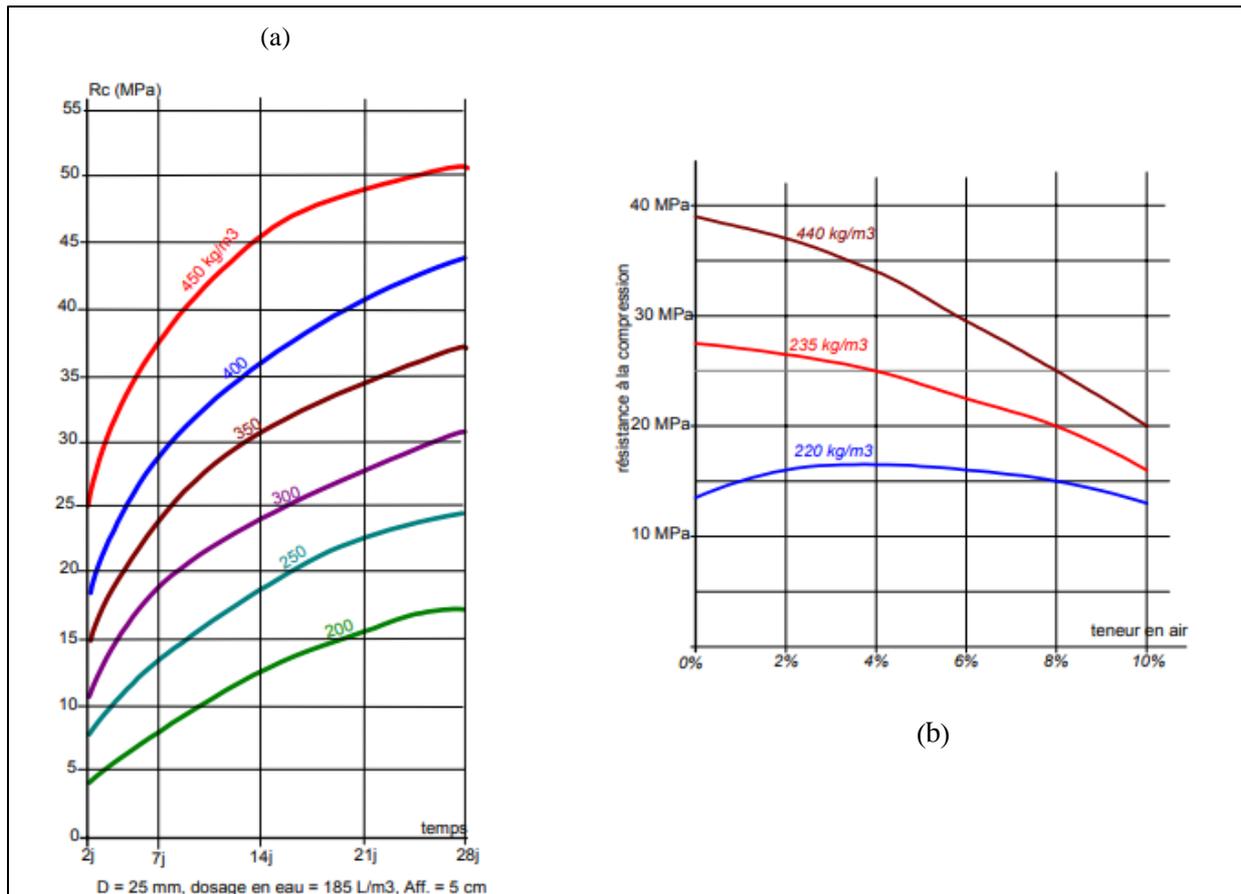


Figure 1.4 : Résistance du béton en fonction du dosage en ciment, temps, et teneur en air. [2].

(a) : Résistance à la compression R_c jusqu'à 28j de bétons dosés de 200 à 450 kg/m³

(b) : Influence du % d'air occlus sur les résistances $D = 20$ mm ; aff = 8 à 10 cm

- Quand on prend un dosage de ciment de 375 kg/m³, on remarque qu'en 28 jours la résistance du béton est d'environ 40 MPa.

- Par contre, lorsqu'on prenait teneur en air 6% au même dosage que précédemment, on constate maintenant que la résistance à la compression du béton est de 28 MPa.

4.6 Résistance du béton et teneur en air en fonction de la durée de malaxage :

La figure 5 montre : Influence de la durée de malaxage sur la résistance et la teneur en air du béton.

L'impact de la durée de malaxage sur la résistance et la teneur en air du béton est un sujet clé en Génie Civil. En règle générale, un malaxage prolongé peut renforcer la résistance du béton en garantissant une meilleure homogénéité de la pâte de ciment et en réduisant les vides. Cependant, un malaxage excessif peut également entraîner une augmentation de la teneur en air, ce qui pourrait nuire à la résistance et à la durabilité du matériau. Par conséquent nous considérons un temps de malaxage de 180 s après l'optimisation comme la bonne durée.

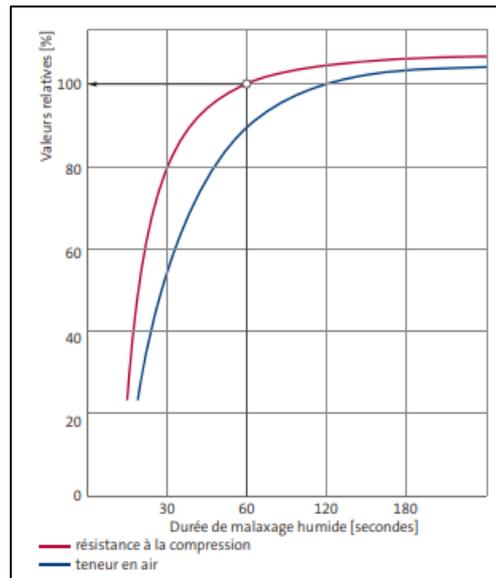


Figure 1.5 : Influence de la durée de malaxage sur la résistance et la teneur en air du béton. [3]

4.7 Résistance du béton, différentes formules :

La figure 6 montre la relation entre la résistance du béton et les volumes de ciment (C), d'eau (E) et d'air offre un éclairage intéressant sur les interactions clés dans la fabrication du matériau. La formule de Féret, utilisée pour modéliser ces interactions, semble bien correspondre aux tendances observées dans les expériences.

En général, une augmentation du volume de ciment entraîne une hausse de la résistance du béton, conformément aux attentes. Cependant, il est crucial de noter que cette relation n'est pas linéaire et qu'un excès de ciment peut nuire à la résistance du matériau.

De même, la quantité d'eau ajoutée a un impact sur la résistance du béton, avec des niveaux optimaux qui maximisent la résistance tout en garantissant une bonne maniabilité. Un excès d'eau peut compromettre la résistance en créant des vides et en affaiblissant la structure.

Enfin, la présence d'air dans le mélange de béton est un facteur déterminant. Bien qu'un certain niveau d'air soit nécessaire pour améliorer la résistance aux variations thermiques, un excès peut réduire la résistance globale du béton.

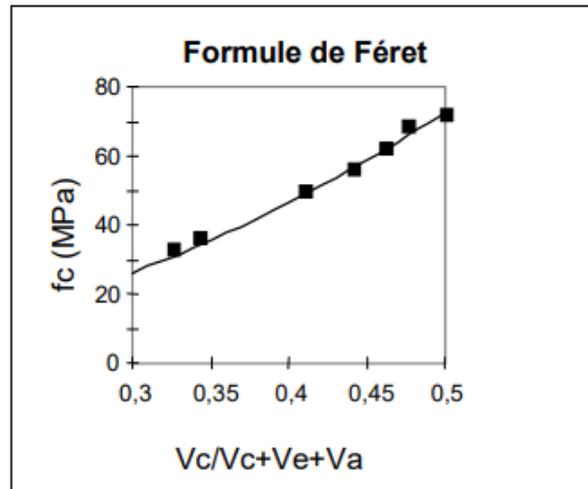


Figure 1.6 : Résistance du béton en fonction des volumes C, E et Air (Formule de Féret). [6].

Après avoir calculé $V_c/V_c+V_e+V_a$, nous avons trouvé une valeur de 0,35, ce rapport donne une résistance du béton de $f_c = 32$ MPa, cette valeur est incluse entre 25 et 40 MPa.

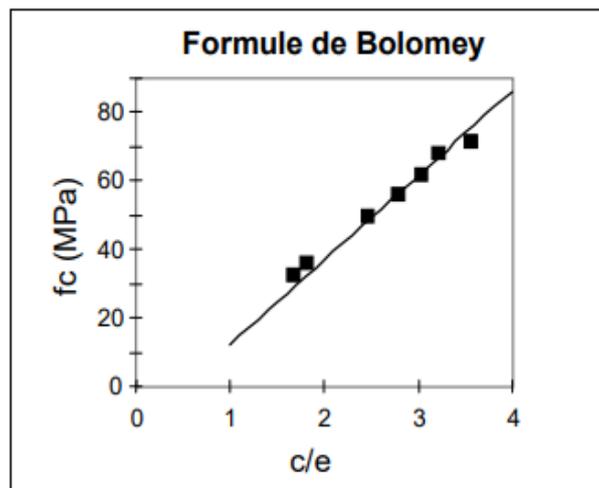


Figure 1.7 : Résistance du béton en fonction du C/E (Formule de Bolomey). [6].

4.8 Résistance du béton en fonction du C/E (Formule de Bolomey) :

La figure 7 présentant la résistance du béton en fonction du rapport entre le volume d'eau et celui de ciment (C/E). Selon la formule d'Abrams, cette relation offre une analyse pertinente de de corrélation clé dans le domaine du béton. La formule d'Abrams semble bien refléter les tendances observées dans les données expérimentales, ce qui confirme son utilité pour prédire la résistance du béton en fonction de ces paramètres.

Il est notable que le rapport entre le volume d'eau et celui de ciment joue un rôle crucial dans la détermination de la résistance du béton. Généralement, on observe une augmentation de la résistance avec une diminution du rapport C/E, jusqu'à un certain point où la résistance est maximale. Toutefois, au-delà de ce point, une diminution excessive du rapport C/E peut

entraîner une réduction de la résistance, soulignant ainsi l'importance de trouver le bon équilibre dans le dosage des matériaux.

En somme, cette figure met en évidence l'importance du rapport E/C dans la détermination de la résistance du béton, et elle démontre comment la formule d'Abrams peut être utilisée pour analyser et optimiser ce rapport afin d'atteindre les performances souhaitées du matériau dans les applications de génie civil en général. Pour viser un béton à inertie thermique, il est donc important de maîtriser le rapport E/C qui gouverne en même temps la résistance mécanique et le caractère du pouvoir isolant.

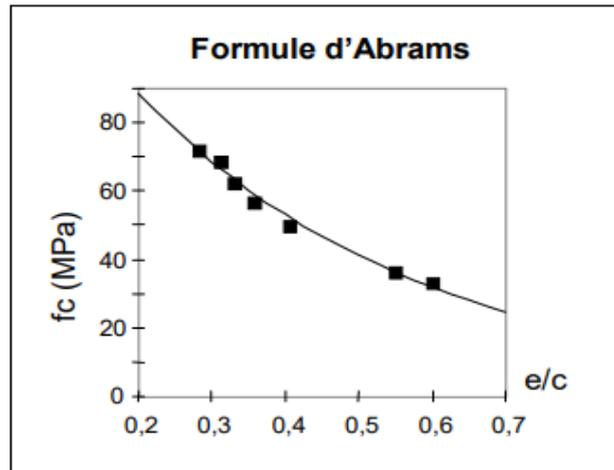


Figure 1.8 : Résistance du béton en fonction de l'E/C (Formule d' Abrams). [6].

4.9 Résistance du béton en fonction de E/C (Formule d' Abrams).

La figure 1.8 montre la représentation graphique de la résistance du béton en fonction du rapport entre le volume d'eau et celui de ciment (E/C) selon la formule d'Abrams offre une analyse précieuse de cette relation fondamentale dans le domaine du béton. La formule d'Abrams semble bien correspondre aux tendances observées dans les données expérimentales, ce qui confirme son utilité pour prédire la résistance du béton en fonction de ces paramètres.

Il est essentiel de noter que le rapport entre le volume d'eau et celui de ciment joue un rôle déterminant dans la détermination de la résistance du béton. En général, une diminution du rapport E/C est associée à une augmentation de la résistance, jusqu'à atteindre un point où la résistance est maximale. Cependant, au-delà de ce point, une réduction excessive du rapport E/C peut entraîner une diminution de la résistance, soulignant ainsi l'importance de trouver un juste équilibre dans le dosage des matériaux.

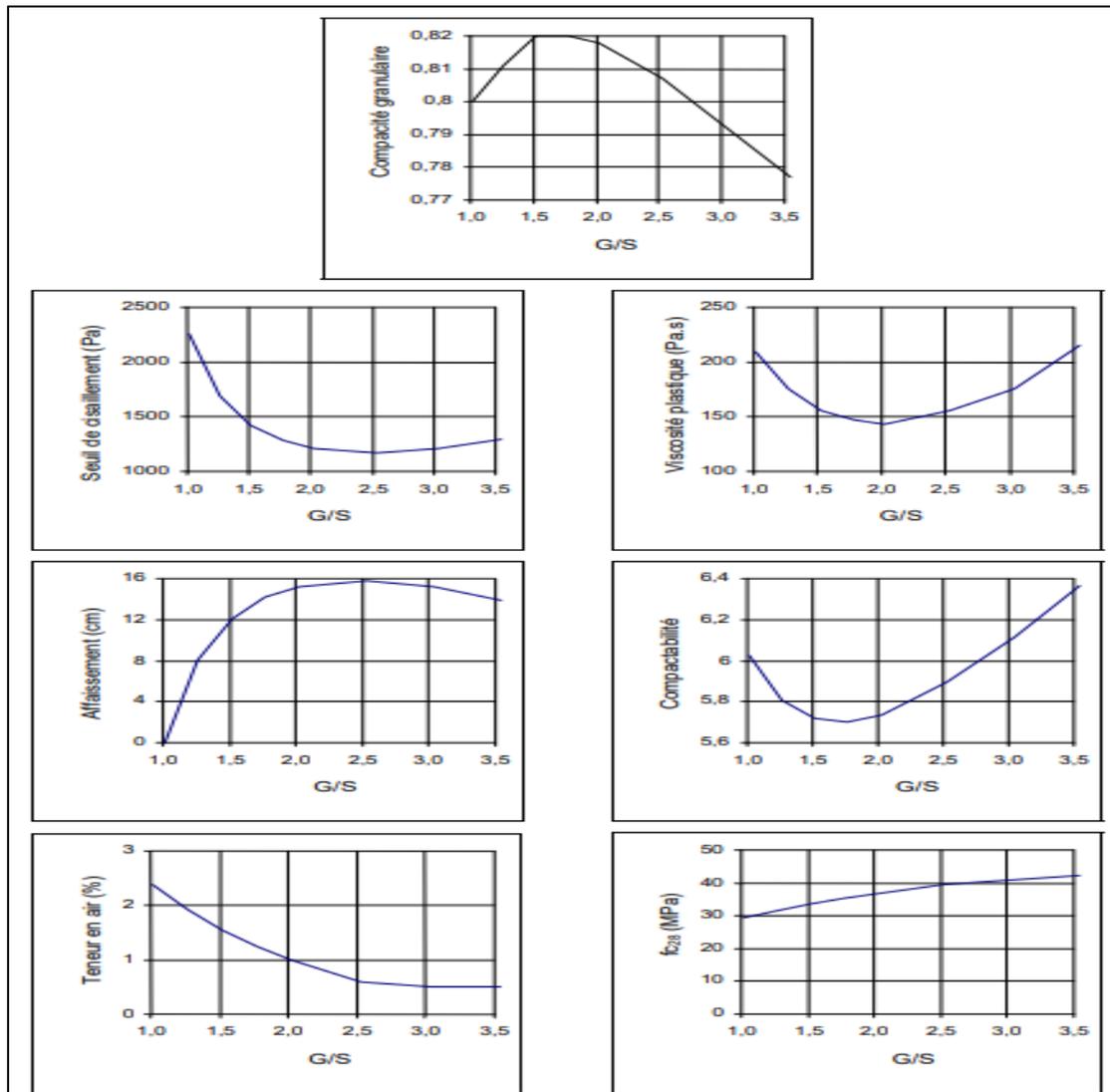


Figure 1.9 : Effet du rapport G/S. [6].

4.10 Résistance du béton, différentes formules en fonction de G/S :

La figure 1.9 montre les "Effet du rapport G/S" pourrait explorer la relation entre les proportions de gravier (G) et de sable (S) dans le béton et leurs impacts sur ses propriétés. Il serait intéressant d'examiner comment différentes combinaisons de gravier et de sable influent sur des aspects tels que la résistance, la durabilité et la maniabilité du béton. En outre, on pourrait analyser comment ces ratios peuvent être ajustés pour répondre aux besoins spécifiques d'un projet de construction, en prenant en compte les exigences de conception et les conditions environnementales. Enfin, il serait pertinent de souligner comment cette figure met en évidence l'importance de trouver un équilibre optimal entre le gravier et le sable pour assurer les meilleures performances du béton dans diverses la formulation de béton.

À mesure que le rapport G/S (rapport eau/ciment) augmente, on observe une diminution de la teneur en air. Par ailleurs, il est également notable que le rapport G/S n'affecte pas la résistance à la compression à 28 jours (f_{c28}) jusqu'à ce qu'elle atteigne 30 MPa.

4.11 Résistance du béton en fonction de la masse volumique :

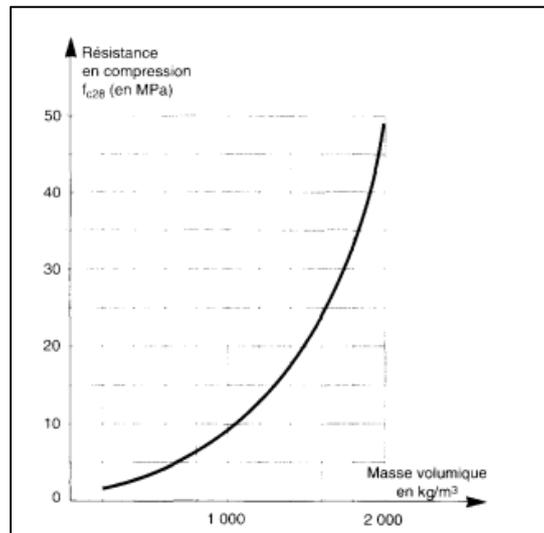


Figure 1.10 : Résistance du béton en fonction de la masse volumique. [7].

La figure 10 montre "Résistance du béton en fonction de la masse volumique". Elle pourrait étudier la corrélation entre la densité du béton, représentée par sa masse volumique, et sa résistance. Il serait intéressant d'explorer comment la densité du béton influence sa capacité à supporter des charges et sa durabilité dans divers contextes de construction. De plus, cette figure pourrait mettre en évidence l'importance de trouver un équilibre entre la densité et la résistance du béton pour assurer des performances optimales dans différentes situations de génie civil. Enfin, il serait pertinent d'examiner les implications pratiques de ces relations pour la conception et la réalisation de structures en béton dans des environnements variés.

Lorsque nous utilisons une masse volumique de 1500 kg/m^3 et que nous projetons cette valeur sur la courbe, nous constatons une résistance à la compression d'environ 26 MPa. Il est donc possible de diminuer la densité du béton tout en gardant une résistance d'un béton de structure.

Tout comme nous l'avons utilisé dans notre travail théorique et expérimental (figure 4.3 et figure 4.4).

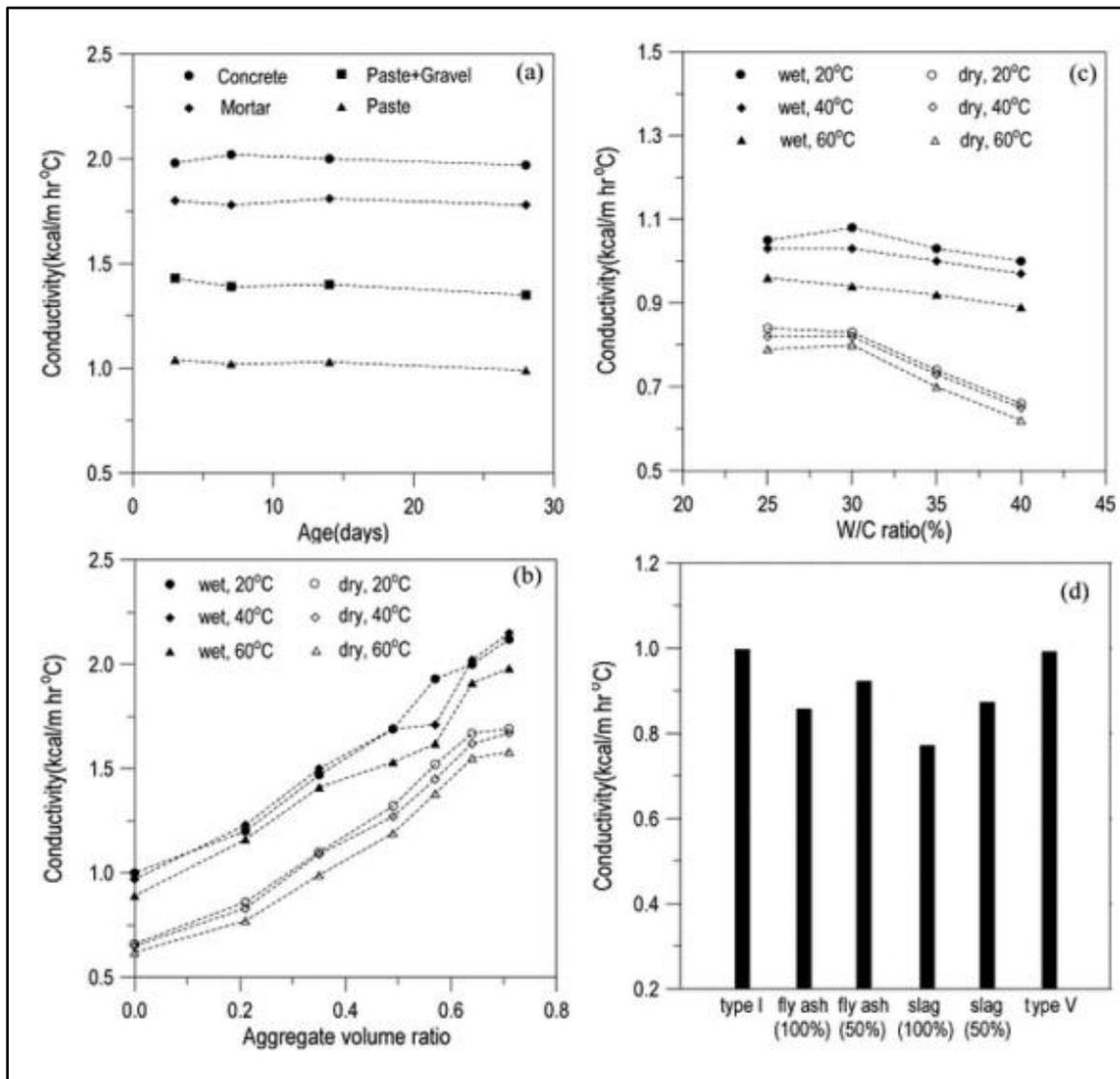


Figure 1.11 : Conductivité thermique en fonction de l'Age, E/C, Volume des agrégats, et type du ciment. [8].

4.12 Résistance du béton en fonction de la masse volumique :

La figure 11 montre la figure "Conductivité thermique en fonction de l'âge, du rapport E/C, du volume des agrégats et du type de ciment" pourrait explorer comment ces différents facteurs influent sur la conductivité thermique du béton. On pourrait discuter de l'impact de l'âge du béton, du rapport entre l'eau et le ciment (E/C), du volume des agrégats et du type de ciment sur sa capacité à conduire la chaleur. En outre, cette analyse pourrait mettre en lumière comment ces variables affectent la capacité du béton à conserver ou à dissiper la chaleur dans divers environnements et applications. Enfin, il serait pertinent d'examiner les implications pratiques de ces relations pour la conception et la construction de structures en béton, en particulier dans des contextes où la régulation thermique est un enjeu majeur, comme dans les bâtiments, les ponts ou les infrastructures souterraines.

-A travers la courbe de conductivité thermique en fonction de 'E/C, on constate la diminution de λ en fonction de l'augmentation de E/C.

-En passant de $E/C = 0.25$ vers 0.4 la variation de λ passe de 0.83 à 0.68 W/mk

-Chaque variation de 0.05 en E/C implique une variation de 0.05 en λ .

Exemple :

Si on fixe $E/C = 0.5$ et on veut diminuer la conductivité thermique λ de 0.10 W/mk, on doit corriger $(E/C)' = 0.5 + 0.10 = 0.60$.

Conclusion : Pour une amélioration du pouvoir isolant d'un béton on peut proposer une légère augmentation du rapport E/C .

5 Conclusion :

A travers l'étude des différents paramètres intervenant dans le contexte de conception de la formulation d'un béton ordinaire allégé on peut fixer les paramètres d'optimisation comme suit :

- ✓ Pour un dosage de ciment fixe, et une teneur en air bien déterminée, et durant le malaxage du béton, on peut arrêter une quantité d'eau à diminuer. (voir figure 1).
- ✓ Pour une durabilité potentielle moyenne ($\varepsilon = 12\%$ à 14%), et en allant vers un béton allégé, on peut aller jusqu'à la valeur optimale $\varepsilon = 14\%$.
- ✓ Pour un béton ordinaire d'une résistance moyenne entre 25 et 40 MPa, et avec un dosage en ciment fixe, et en supposant une teneur en air égale à 6% , la résistance du béton est l'ordre de 25 à 30 MPa.
- ✓ Pour un dosage en ciment de 375 kg /m³, la résistance du béton est l'ordre de 38 MPa.
- ✓ En fixant la teneur en air de 6% et avec un dosage en ciment de 375 kg/m³, la résistance du béton est de 28 MPa.
- ✓ Si on fixe un temps de malaxage de 180 s, la résistance à la compression augmente de 10% , et la teneur en air de 5% .
- ✓ Si on fixe le rapport : $V_c/V_c+V_e+V_a = 0.35$, la résistance de béton est : $f_c = 32$ MPa.
- ✓ En fixant le rapport $C/E = 2$, la résistance est l'ordre de 30 MPa.
- ✓ Pour un rapport $E/C = 0.5$, la résistance du béton est égale 40 MPa.
- ✓ Si on fixe le rapport G/S à 1.5 , la teneur en air est égale 1.6% , aussi le rapport G/S n'affecte pas la résistance f_{c28} qui commence à partir d'une valeur de 30 MPa.
- ✓ En fixant la masse volumique du béton de 1500 kg/m³, on trouve que la résistance en compression est de 26 MPa. Ce qui montre que la densité diminuée peut obtenir un béton de structure.

- ✓ Si on fixe $E/C = 0.5$ et on veut diminuer la conductivité thermique λ de 0.10 W/mk, on doit corriger $(E/C)' = 0.5 + 0.10 = 0.60$.

CHAPITRE 02

Formulation du béton

1 Introduction :

La conception et le développement du béton reposent principalement sur la formulation du béton, qui joue un rôle essentiel dans sa conception. L'objectif est de trouver la composition idéale du mélange en établissant les proportions des divers éléments, dans le but d'atteindre les performances techniques, économiques et environnementales désirées.

Différents paramètres interdépendants sont pris en compte lors de la formulation du béton, tels que le type et la granulométrie des granulats, la nature et la quantité de liant, ainsi que le rapport E/C. L'équilibre entre ces divers éléments est crucial afin d'atteindre les caractéristiques souhaitées, que ce soit en ce qui concerne la résistance mécanique, la durabilité, la mise en œuvre, le pouvoir isolant ou encore le coût.

La formulation dans cette étape représente donc un véritable défi, demandant une approche globale. Avoir une bonne compréhension des interactions entre les divers éléments du béton. Elle repose sur une combinaison de connaissances théoriques, de compétences pratiques et d'outils d'aide à la prise de décisions.

Dans ce chapitre on présentera une base théorique de la formulation du béton, suivie par une recherche des proportions du béton à pouvoir isolant, et enfin la préparation des mélanges et les essais de caractérisation des bétons à l'état frais. Ces essais ont été faits au niveau du Laboratoire pédagogique du Département de Génie Civil à notre Université.

2 Définition :

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé, car il présente de nombreuses qualités non seulement économiques, mais aussi mécaniques. De plus, le ciment durci est poreux et contient une solution très basique qui protège les aciers. Par ailleurs, les constituants du béton peuvent réagir entre eux pour améliorer ses qualités. Ainsi, par exemple, le ciment réagit avec les granulats pour former une " auréole de transition " qui diminue l'effet de la transition mécanique entre ces deux constituants.

3 Formulation du béton par la méthode Dreux – Gorisse :

La méthode de Dreux-Gorisse est une approche utilisée pour calculer les proportions idéales des différents matériaux (eau, ciment, sable, gravillon et gravier) nécessaires pour fabriquer un mètre cube de béton selon les spécifications requises. Elle implique plusieurs étapes de calcul qui aboutissent à la formulation théorique du 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.

3.1 Critère de résistance :

Le béton doit être conçu de manière à ce que sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28} après 28 jours. Cette valeur caractéristique doit être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} requise pour assurer la stabilité de l'ouvrage, afin de garantir une marge de sécurité adéquate [10] .

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28} \quad (2.1).$$

3.2 Choix de ciment :

La classe de résistance réelle du ciment est un facteur important dans le choix du type de ciment à utiliser. Elle est déterminée en mesurant la résistance moyenne en compression obtenue après 28 jours sur des échantillons de mortier normalisés. Le fabricant de ciment garantit que 95 % des échantillons atteignent une valeur minimale spécifiée, qui est indiquée sur le sac de ciment selon la dénomination normalisée.

Le tableau 2.1 : fournit une correspondance entre la classe de résistance réelle du ciment et la valeur minimale garantie par le fabricant. Cette correspondance permet de choisir le ciment approprié en fonction des exigences du projet, en s'assurant que la résistance du ciment répondra aux besoins spécifiques de durabilité et de performance.

Tableau 2.1 : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments. [10]

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ'_c	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

3.3 Détermination du rapport C/E :

C/E est le rapport entre la quantité du ciment et la quantité d'eau , ce rapport est déduit à partir de la formule de BOLOMEY.

$$\sigma'_{28} = G\sigma'_c \left(\frac{E}{C} - 0.5 \right) ; \sigma'_{28} = 1.15 \sigma'_n \quad (2.2)$$

Où : σ'_{28} : la résistance moyenne en barre à 28 jours.

σ'_c : la vraie classe de ciment, elle est définie comme étant la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé.

C : le dosage en ciment en Kg/m³.

E : le dosage en eau total en l/m³.

G : le coefficient granulaire donné en fonction de la qualité des granulats et la dimension maximale des grains D.

Tableau 2.2 : Valeurs du coefficient granulaire G [10].

Qualité des granulats	Fins D < 16 mm	Moyens 25 < D < 40	Gros D > 63mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

3.4 -Détermination de la valeur de C en Fonction C/E :

Après avoir déterminé le rapport C/E de la formule de BOLOMEY, nous pouvons utiliser l'abaque suivant pour évaluer la valeur de C en fonction de C/E et de l'affaissement au cône d'ABRAMS. Cette méthode nous permettra d'obtenir une estimation précise de la valeur de C nécessaire pour nos calculs.

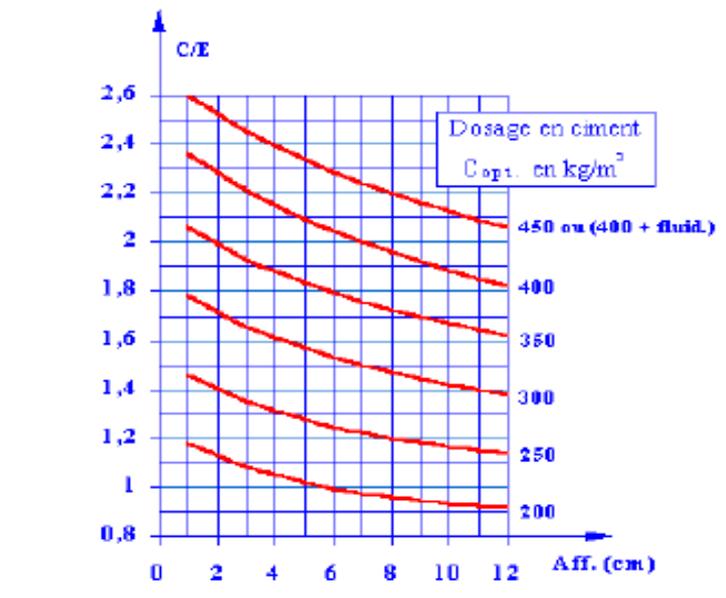


Figure2.1 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'affaissement au cône. [10]

3.5 -Détermination du dosage en eau :

Une fois que nous avons évalué les valeurs de C/E et de C, nous pouvons déduire la valeur de E. Cependant, cette valeur de E doit être corrigée en utilisant la formule suivante :

$$E_1 = E_0 + M(\%) E_0$$

(3)

Tableau 2.3 : valeurs du coefficient correcteur M en fonction de la dimension, maximale des granulats. [10]

Dimension maximale des granulats D (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le Dosage en eau (M%)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

3.6 -Détermination de la courbe granulométrique de référence :

La courbe granulométrique de référence est composée de deux demi-droites qui se rencontrent au point A (Figure 2.2).

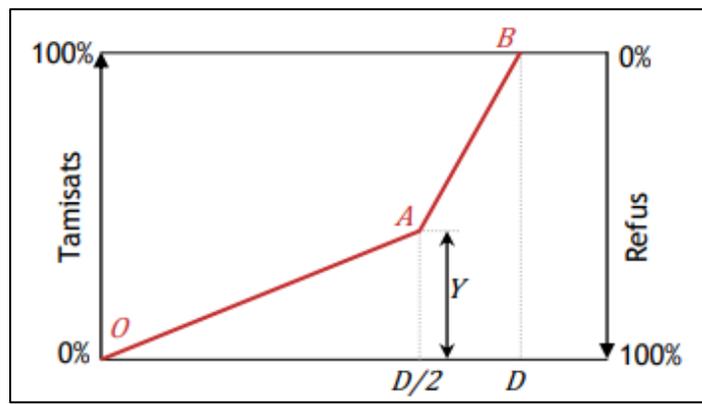


Figure 2.2 : Courbe granulométrique de référence [10]

Le point B : pour abscisse D (dimension max des granulats) et pour ordonnée 100%(la valeur du tamisât en % sur le plus gros tamis).

Le point A (point de brisure) a pour abscisse : $\gg X_A = D/2$ si $D \leq 20\text{mm}$

$$\gg X_A = \frac{x_1+x_2}{2} \quad \text{si } D \geq 20\text{mm}$$

Avec : X_A : abscisse située au milieu du segment limité par le module 38 (tamis $D = 5\text{mm}$) et le module correspondant à D_{max} .

L'ordonnée point A : $Y_A = 50 - \sqrt{D} + k$ (D exprimer en mm).

K : terme correcteur qui dépende du dosage en ciment, de l'efficacité de la vibration et du frome granulats (Tableau2.4).

Tableau 2.4 : Valeurs du terme correcteur K [10]

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Corrections supplémentaires sur K :

-correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 M_f - 15$ (M_f le module de finesse du sable).

-correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est préconisée «pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par apport à un béton de qualité «courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = +5$ à $+10$ environ, selon le degré de la plasticité désiré . [10]

4 CONCLUSION :

Dans cette partie nous constatant que la méthode de DREUX- GORISSE convienne très bien pour une étude de recherche sur les caractéristiques d'un béton ordinaire à court terme et à long terme en tenant compte de la qualité de ses constituants.

Il reste d'étudier l'influence des différents paramètres sur le résultat final d'un béton à pouvoir isolant. Pour ce faire et avant d'entamer l'expérimentation, les mélanges trouvés seront optimisés par les modèles théoriques de corrélations pour trouver la solution de conception optimale de la formulation, cette démarche a été validée par un calcul automatique sous Excel. La démonstration des calcul a permis de mieux cibler l'influence des paramètres de notre formulation.

5 FORMULATION DU BETON ORDINAIRE :

Données de base :

$$BO = C + E + G + S,$$

$$D = 20 \text{ mm.}$$

Rhéologie du béton visé : Consistance plastique.

Rapport préliminaire : E/C = 0,45

G/S = 1,78 G = 64% et S = 36% Ciment de classe 42,5.

Additions (fines) = 0

Coefficient de compacité du béton : $\gamma = 0,825$

Les densités absolues sont supposées les suivantes :

Sable : 2,54, Gravier 2,62. Ciment : 3,10

Tableau 5 : Relation entre consistance cible, demande en eau en teneur en air cas d'un béton no adjuvant avec granulats roulés (D = 20 mm) supposé en fines elle possédant optimisée a une température ambiante proche de 20 °C [10]

Consistance	Affaissement Au cône (cm)	Eau (E) (l/m ³)	Air (l/m ³)
Ferme (F)	0-4	160	25
Plastique (P)	5-9	190	20
Très plastique (TP)	10-15	210	15

5.1 Résistance estimée du béton à 28 Jours :

$$F_{cj} = f_{mj} \cdot K_b \cdot \left(\frac{C+kA}{E+v} - 0.5 \right) \quad (2.3)$$

Avec : f_{mj} : résistance du ciment au jour

K_b : facture granulaire

E et v : volume d'eau et d'air respectivement

Tableau 2.1.2 : Valeur estimées de f_m 28 jours [10]

Classe de ciment	F_m (MPa)
32.5	45
42.5	55
52.5	65

Tableau 2.6 : Valeur estimées de K_b [10]

Nature pétrographique des granulats	D (mm)		
	10 à 16	20 à 25	30 à 40
Siliceux légèrement, altères	0.45	0.50	0.55
Siliceux, roulés	0.50	0.55	0.60
Siliceux, durs	0.55	0.60	0.65

6 Calcul de la formule du béton ordinaire (25 MPa) :

$$K = 0,60$$

$$F_{mk} = 48 \text{ MPa (ciment algérien).}$$

$$E = 209 \text{ Litres.}$$

D'où :

$$1,2 \times 25 = 48 \times 0,6 [C / (209 + 20) - 0,5]$$

$$30 = 28,80 [C / (229) - 0,5]$$

$$C = 351,5 \text{ KG.}$$

$$\text{Volume total absolu : } 1000 \gamma = 825 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu du ciment : } C/3,1 = 113,4 \text{ litres.}$$

$$\text{Volume absolu des granulats : } 825 - 113,4 = 711,59 \text{ litres.}$$

$$\text{Volume absolu du sable : } 711,59 \times 0,36 = 256,17 \text{ litres.}$$

$$\text{Volume absolu du gravier : } 711,59 \times 0,64 = 455,86 \text{ litres.}$$

$$\text{Total (vérification) : } 825 \text{ litres.}$$

Les densités absolues sont supposées les suivantes : Sable : 2,54,

Gravier : 2,62

6.1 Les dosages en matériaux secs seront donc en kg :

- Sable : $256,17 \times 2,54 = 650,68 \text{ KG}$
- Gravier : $455,86 \times 2,62 = 1193,21 \text{ KG}$
- Ciment : $= 351,5 \text{ KG}$
- Eau totale (approximativement) : $= 209 \text{ KG}$

Densité théorique du béton frais en œuvre :

$$\Delta_0 = 0,650 + 1,193 + 0,351 + 0,209 \quad \text{Donc : } \Delta_0 = 2,403.$$

7 Calcul de la formule du béton ordinaire (30 MPa):

$$K = 0,60$$

$$F_{mk} = 48 \text{ MPa (ciment algérien)}$$

$$E = 209 \text{ Litres.}$$

D'où :

$$1,2 \times 30 = 48 \times 0,6 [C / (209 + 20) - 0,5]$$

$$36 = 28,80 [C / (229) - 0,5]$$

$$C = 399,25 \text{ Kg.}$$

- ✓ Volume total absolu : $1000 \gamma = 825$ litres
- ✓ Volume absolu du ciment : $C/3,1 = 128,8$ litres.
- ✓ Volume absolu des granulats : $825 - 128,8 = 696,2$ Litres.
- ✓ Volume absolu du sable : $696,2 \times 0,36 = 250,6$ litres.
- ✓ Volume absolu du gravier : $696,2 \times 0,64 = 445,6$ Litres.
- ✓ Total (vérification) : 825 litres.

Les densités absolues sont supposées les suivantes : Sable : 2,54,

Gravier 2,62.

7.1 Les dosages en matériaux secs seront donc en KG :

- ✓ Sable : $250,6 \times 2,54 = 636,6$ KG
- ✓ Gravier : $445,6 \times 2,62 = 1167,4$ KG
- ✓ Ciment : = 399,25 KG
- ✓ Eau totale (approximativement) : = 209 KG

Densité théorique du béton frais en œuvre :

$$\Delta_0 = 0,636 + 1,167 + 0,399 + 0,209 \quad \text{Donc : } \Delta_0 = 2,411.$$

8 Calcul de la formule du béton ordinaire (35 MPa) :

$$K = 0,60$$

$$F_{mk} = 48 \text{ MPa (ciment algérien)}$$

$$E = 209 \text{ Litres.}$$

D'où :

$$1,2 \times 35 = 48 \times 0,6 [C / (209 + 20) - 0,5]$$

$$42 = 28,80 [C / (229) - 0,5]$$

$$C = 446,95 \text{ Kg.}$$

- ✓ Volume total absolu : $1000 \gamma = 825$ litres
- ✓ Volume absolu du ciment : $C/3,1 = 144,18$ litres.
- ✓ Volume absolu des granulats : $825 - 144,18 = 680,8$ litres.
- ✓ Volume absolu du sable : $680,8 \times 0,36 = 245,1$ litres.
- ✓ Volume absolu du gravier : $680,8 \times 0,64 = 435,7$ litres.
- ✓ Total (vérification) : 825 litres.

Les densités absolues sont supposées les suivantes : Sable : 2,54, Gravier 2,62.

8.1 Les dosages en matériaux secs seront donc en kg :

- ✓ Sable : $245,1 \times 2,54 = 622,55$ KG
- ✓ Gravier : $435,7 \times 2,62 = 1141,6$ KG
- ✓ Ciment : $= 446,95$ KG
- ✓ Eau totale (approximativement) : $= 209$ KG

Densité théorique du béton frais en œuvre :

$$\Delta_0 = 0,622 + 1,141 + 0,446 + 0,209 \quad \text{Donc : } \Delta_0 = 2,418.$$

✓ Outils et appareillage :

- Quantité suffisante de sables de graviers de ciment et l'eau.
- Matériel et accessoires pour mesure de poids des granulats et des produits.
- Matériel de malaxage de bétons de prélèvement de confection et de conservation des éprouvettes cylindriques et cubiques.

9 Quantité pour un béton 25 MPa :

Tableau 2.7 : Quantité de mélange d'un béton 25 MPa (pour 1 m³ et pour éprouvettes)

Quantité pour 1 m ³	Quantité pour éprouvettes*
C = 351.5 KG	C = 5.23 KG
E = 209 KG	E = 3.10 KG
S = 650.68 KG	S = 11.15 KG
G = 1193.21 KG	G = 20.45 KG

* 3 éprouvettes cubiques 10 x 10 et 6 éprouvettes cylindriques 10 x 20

10 Quantité pour un béton 30 MPa :**Tableau 2.8 :** Quantité de mélange d'un béton 30 MPa (pour 1 m³ et pour éprouvettes)

Quantité pour 1 m ³	Quantité pour éprouvettes*
C = 399.23 KG	C = 5.94 KG
E = 209 KG	E = 3.10 KG
S = 636.6 KG	S = 11.14 KG
G = 1167.4 KG	G = 20.43 KG

*3 éprouvettes cubiques 10 x 10 et 6 éprouvettes cylindriques 10 x 20

11 Quantité pour un béton 35 MPa :**Tableau 9 :** Quantité de mélange d'un béton 35 MPa (pour 1 m³ et pour éprouvettes)

Quantité pour 1 m ³	Quantité pour éprouvettes*
C = 446.95 KG	C = 6.65 KG
E = 209 KG	E = 3.10 KG
S = 622.55 KG	S = 11.13 KG
G = 1142.6 KG	G = 20.40 KG

*3 éprouvettes cubiques 10 x 10 et 6 éprouvettes cylindriques 10 x 20

12 Préparation des mélanges et caractérisation à l'état frais :**12.1 Préparation des matériaux (3 mélanges : 25, 30 et 35 MPa) :**

Le processus commence par le tamisage d'une quantité spécifique de trois mélanges de sable et de gravier. Ensuite, le gravier est soigneusement lavé à l'eau afin de se débarrasser des impuretés. Enfin, les deux matériaux sont placés dans un four et chauffés pendant une période de 24 heures.



a) Préparation du gravier



b) Préparation du sable

Figure 2.3 : Le processus de lavage et de nettoyage du gravier et de filtrage du sable des impuretés.

Après avoir séché les deux matériaux de l'eau, nous commençons à peser les quantités requises de chaque mélange ainsi que les quantités d'eau et de ciment.



a) Gravier



b) Sable

**c) L'eau****d) Ciment****Figure 2.4 :** Pesage des quantités (ciment – eau – sable – gravier).

Après cela, nous ajoutons les ingrédients dans le mixeur et les mélangeons selon les normes de mélange spécifiées dans l'optimisation.

**Figure 2.5 :** Malaxage .

Après avoir atteint la consistance désirée, on tente l'essai d'affaissement pour les trois mélanges.



Figure 2.6 : Essai d'affaissement .

Nous remarquons que L'affaissement de les 3 mélange confiné entre : 5 et 6 cm (béton plastique). Dans la prochaine étape, le mélange est versé dans 3 éprouvettes cubiques de : 10 x 10 et les 6 éprouvettes cylindriques 10 x 20.



Figure 2.7 : Coulage et remplissage du mélange de béton dans les moules.

Enfin, après 24 heures, nous retirons les échantillons des moules et les mettons dans l'eau pendant 28 jours pour mener des expériences sur eux.



Figure 2.8 : Démoulage des éprouvettes.

13 Conclusion :

En conclusion, la formulation du béton est un processus essentiel pour obtenir un mélange de béton de haute qualité, adapté aux besoins spécifiques d'un projet. Le processus comprend plusieurs étapes clés, telles que le séchage des matériaux, la pesée précise des ingrédients, le mélange conformément aux normes spécifiées et le coulage dans des moules appropriés. Après une période de durcissement, les échantillons de béton sont testés pour évaluer leur résistance et leur performance.

En résumé, une formulation de béton précise et bien exécutée, en tenant compte des caractéristiques des matériaux, des proportions et des exigences spécifiques du projet, est essentielle pour garantir le succès et la fiabilité des structures en béton.

CHAPITRE 03

Analyse statistique

1. Introduction :

Dans cette section, nous présenterons les résultats obtenus lors de notre étude de caractérisation des bétons à état durci, elle concerne la détermination expérimentale des grandeurs suivantes : porosité du béton, masse volumique, résistance à la compression et conductivité thermique. Et ensuite nous procéderons à leur interprétation. Nous aborderons les principales conclusions tirées de notre analyse et discuterons de leur signification dans le contexte de notre recherche.

Ces résultats nous permettront de répondre à nos questions de recherche et de tirer des enseignements importants pour le domaine d'étude en Génie Civil.

Tous les essais de caractérisation des béton à l'état durci ont été effectués au niveau du laboratoire de Génie Civil à l'Université de Bordj Bou Arreridj, sauf les essais de mesure de la conductivité thermiques, et faute d'appareil de mesure, qui sont réalisés au niveau du laboratoire du Centre National d'études et de Recherches intégrées en bâtiment CNERIB à Alger.

Les valeurs trouvées expérimentalement sont des grandeurs qui représentent un état final précédé par un processus d'étapes dont l'erreur est inévitable, pour minimiser le risque d'erreurs, et obtenir un résultat fiable des mesures, une analyse statistique est donc nécessaire.

14 Calcul des propriétés physico-thermiques :

14.1 Masse volumique apparente : ρ_d en (g/cm^3) et la porosité (%) :

Lors de nos essais, nous avons suivi une série d'étapes pour déterminer la masse volumique et la porosité du béton avec une précision de 0,01 %, conformément à la norme NF P18-459.

Tout d'abord, nous avons saturé le matériau (Figure 3.1) en le plaçant sous vide pendant 48 heures. Cela assure que le béton soit complètement saturé en eau.



Figure 3.1 : Saturation des échantillons dans un bac d'eau.

Ensuite, nous avons suspendu le corps d'épreuve sur une balance hydrostatique et l'avons pesé totalement immergé dans l'eau (Figure 3.2). Cette mesure nous a permis de déterminer la masse du béton saturé en eau.



Figure 3.2 : Balance hydrostatique pour la mesure de M_e (Masse à l'eau)

Après cela, nous avons éliminé l'eau superficielle de l'échantillon à l'aide d'un chiffon humide, en veillant à ne pas retirer l'eau des pores du béton. Nous avons ensuite mesuré la masse de l'échantillon humide dans l'air (Figure 3.3).

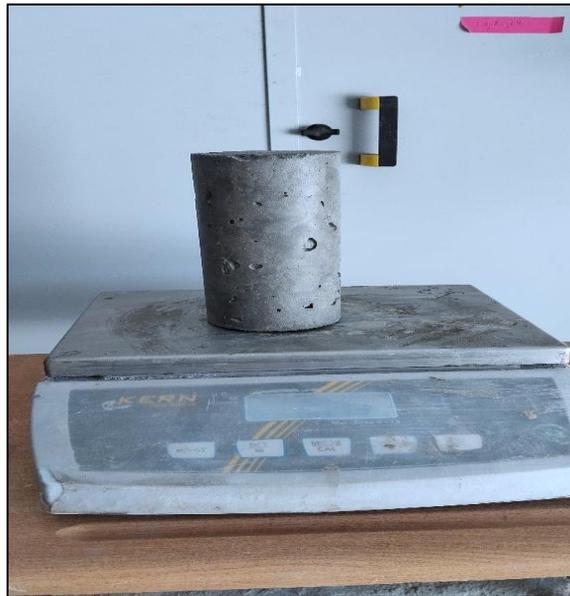


Figure 3.3 : Pesée de l'échantillon humide dans l'air (balance).

Enfin, nous avons procédé au séchage du matériau à une température de 105 °C jusqu'à ce que la masse devienne constante. Pour assurer l'exactitude de cette mesure, nous avons effectué des pesées à intervalles de 24 heures, et la différence entre deux pesées consécutives ne devait pas dépasser 0,1 % (Figure 3.4).



Figure 3.4 : Séchage des éprouvettes .

En utilisant les données recueillies lors de ces étapes, nous avons pu calculer la masse volumique du béton en utilisant la formule appropriée :

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (3.1)$$

De plus, nous avons déterminé la porosité du béton en utilisant les mesures de masse et les propriétés physiques du matériau :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (3.2)$$

14.2 Application :

Exemple : Béton de classe 25 MPa

14.2.1 Masse volumique :

$$\rho_d = \frac{3695}{3857 - 2222} = 2260 \text{ g/cm}^3$$

14.2.2 Porosité :

$$\varepsilon = \frac{3857 - 3695}{3857 - 2222} \times 100 = 9,91 \%$$

Récapitulation des résultats : les résultats de la masse volumique et de la porosité des différents échantillons du béton de la classe 25 MPa sont regroupés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Résultats de la masse volumique et la porosité du béton 25 MPa .

Eprouvettes	Masse volumique (g/cm ³)	Porosité (%)
A ₁	2307	10
A ₂	2318	9,96
A ₃	2322	9,91
Moyenne	2315,6	9,95

Légende : A₁, A₂, A₃ : Sont les numéros des éprouvettes du béton 25 MPa.

Interprétations Tableau 3.1 :

Les masses volumiques mesurées varient de 2260 g/cm³ pour l'éprouvette (A₁) à 2350 g/cm³ pour l'éprouvette (A₂), avec une moyenne de 2318 g/cm³.

Ces valeurs élevées de masse volumique indiquent un béton très dense, avec peu de vides et d'air occlus.

Une masse volumique plus importante se traduit généralement par de meilleures performances mécaniques, une plus grande durabilité et une meilleure résistance aux agressions extérieures.

La densité mesurée varie de l'échantillon (A₁) 2260g/cm³ à l'échantillon (A₂) 2350g / cm³, soit une moyenne de 2318g/cm³.

La porosité mesurée est comprise entre l'échantillon (A₂) de 9,90% et l'échantillon (A₃) de 10,07%, avec une moyenne de 9,95%.

Ces faibles valeurs de porosité confirment la grande compacité du béton, avec moins de pores et de vides.

La porosité réduite améliore la durabilité du béton en limitant la pénétration d'eau, de gaz et d'agents agressifs susceptible les de provoquer une dégradation.

Récapitulation des résultats : les résultats de la masse volumique et de la porosité des différents échantillons du béton de la classe 30 MPa sont regroupés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Résultats de la masse volumique et porosité du béton 30 MPa

Éprouvettes	Masse volumique (g/cm ³)	Porosité (%)
B ₁	2325	9,9
B ₂	2333	9,82
B ₃	2333	9,79
La moyenne	2330,3	9.83

Légende : B₁, B₂, B₃ : Sont les numéros des éprouvettes du béton 30 MPa.

Interprétations Tableau 3.2 :

Les masses volumiques varient de 2276 g/cm³ pour l'éprouvette (B₁) à 2378 g/cm³ pour l'éprouvette (B₃), avec une moyenne de 2324 g/cm³. Ces valeurs élevées, dépassant 2300 g/cm³, suggèrent un béton dense et compact, avec peu de vides et d'air occlus. Habituellement, une densité plus élevée est associée à de meilleures performances mécaniques, une plus grande durabilité et une meilleure résistance aux agressions extérieures. Ainsi, l'éprouvette (B₃) avec sa densité de 2378 g/cm³, est probablement le spécimen présentant les meilleures performances mécaniques.

Les mesures de porosité varient de 9,20 % pour l'éprouvette (B₃) à 10,61 % pour l'éprouvette (B₂) avec une moyenne de 10 %. Ces niveaux de porosité relativement bas confirment la compacité du béton et la réduction des pores et des vides. Une porosité réduite contribue à améliorer la durabilité du béton en limitant l'infiltration d'eau, de gaz et d'agents agressifs, qui pourraient causer des dommages. Ainsi, l'éprouvette (B₃), avec sa porosité de 9,20 %, se distingue comme le spécimen le plus dense et le plus durable.

Récapitulation des résultats : les résultats de la masse volumique et de la porosité des différents échantillons du béton de la classe 35 MPa sont regroupés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Résultats de la masse volumique et porosité du béton 35 MPa.

Eprouvettes	Masse volumique (g/cm ³)	Porosité (%)
C ₁	2335	9,75
C ₂	2337	10,18
C ₃	2338	9,54
La moyenne	2336,6	9.82

Légende : C₁, C₂, C₃ : Sont les numéros des éprouvettes du béton 35 MPa

Interprétations Tableau 3.3 :

Les masses volumiques varient de 2326 g/cm^3 pour l'éprouvette (C_2) à 2349 g/cm^3 pour l'éprouvette (C_3), avec une moyenne de 2335 g/cm^3 .

Ces valeurs élevées, supérieures à 2300 g/cm^3 , indiquent un béton très dense et compact, avec peu de vides et d'air occlus.

Une masse volumique plus importante se traduit généralement par de meilleures performances mécaniques, une plus grande durabilité et une meilleure résistance aux agressions extérieures.

Les porosités mesurées varient de $9,54 \%$ pour l'éprouvette (C_3) à $10,18 \%$ pour l'éprouvette (C_2), avec une moyenne de $9,99 \%$.

Ces valeurs de porosité relativement faibles confirment la compacité du béton et la faible quantité de pores et de vides.

Une porosité réduite améliore la durabilité du béton en limitant la pénétration d'eau, de gaz et d'agents agressifs susceptibles d'entraîner des dégradations.

15 Essai de compression :

L'essai de compression du béton est une méthode standardisée largement utilisée pour évaluer la résistance à la compression de ce matériau. Voici les étapes générales impliquées dans l'essai de compression du béton :

- Préparation de l'échantillon : Un échantillon de béton représentatif est prélevé dans le laboratoire. Les spécifications pour la taille et la forme de l'échantillon peuvent varier en fonction des normes et des exigences spécifiques (Figure 3.5).



Figure 3.5 : Echantillon de béton dans le laboratoire.

- - Préparation de l'équipement : L'équipement d'essai, tel qu'une presse de compression, est préparé et vérifié pour s'assurer qu'il est en bon état de fonctionnement. Les plaques de compression sont nettoyées et alignées correctement (Figure 3.6).

- Positionnement de l'échantillon : L'échantillon de béton est placé entre les plaques de compression de la machine d'essai. Il est important de s'assurer que les surfaces de contact sont planes et bien nivelées afin d'obtenir des résultats précis (Figure 3.7).



Figure 3.6 : L'échantillon placé entre les plaques de compression de la machine d'essai.

- Application de la charge : La machine d'essai applique une force axiale progressive et continue sur l'échantillon de béton. La charge est appliquée lentement et uniformément jusqu'à ce que l'échantillon atteigne sa limite de résistance ou qu'il se fracture.
- Mesure de la force et de la déformation : Pendant l'application de la charge, la machine d'essai mesure la force appliquée et la déformation résultante de l'échantillon. Ces mesures sont enregistrées et utilisées pour calculer les paramètres de l'essai, tels que la contrainte et la déformation.



Figure 3.7 : Machine d'essai mesure la force appliquée et la déformation résultante de l'échantillon.

- Enregistrement des résultats : Une fois que l'échantillon a atteint sa limite de résistance ou s'est fracturé, les résultats de l'essai, y compris la charge maximale supportée par l'échantillon et la déformation correspondante, sont enregistrés.

15.1 Résultats pour le béton de classe 25 MPa :

Le tableau 4 regroupe les résultats de la résistance à la compression des différents échantillons testés du béton de la classe 25 MPa.

Tableau 3.4 : Résultats de la résistance à la compression Classe 25 MPa

L'échantillon de béton	Résultat de compression (MPa)
Eprouvette 1	22,52
Eprouvette 2	23,38
Eprouvette 3	23,49

Interprétations Tableau 3.4 :

Les résistances à la compression des trois éprouvettes varient de 24,64 MPa à 25,90 MPa.

La moyenne des résistances est de 25,22 MPa, ce qui est très proche de la résistance de conception de 25 MPa.

Ces valeurs de résistance sont tout à fait conformes aux spécifications attendues pour un béton de 25 MPa.

15.2 Résultats pour le béton de classe 30 MPa :

Le tableau 5 regroupe les résultats de la résistance à la compression des différents échantillons testés du béton de la classe 30 MPa.

Tableau 3.5 : Résultats de la résistance à la compression Classe 30 MPa

L'échantillon de béton	Résultat de compression (MPa)
Eprouvette 4	24,64
Eprouvette 5	25,13
Eprouvette 6	25,32

Interprétations Tableau 3.5 :

Les résistances à la compression des trois éprouvettes se situent entre 22,52 MPa et 23,49 MPa, avec une moyenne de 23,13 MPa. Cette valeur est environ 23 % inférieure à la résistance de

conception de 30 MPa. Cela indique une performance légèrement inférieure à celle attendue selon les spécifications de conception, mais reste dans une plage acceptable vis-à-vis les hypothèses de la formulation adoptée, et les conditions de préparation et conservation du béton.

15.3 Résultats pour le béton de classe 35 MPa :

Le tableau 3.6 regroupe les résultats de la résistance à la compression des différents échantillons testés du béton de la classe 35 MPa.

Tableau 3.6 : Résultats de la résistance a la compression Classe 35 MPa

L'échantillon de béton	Résultat de compression (MPa)
Eprouvette 7	25,9
Eprouvette 8	29,49
Eprouvette 9	30,92

Interprétations tableau 3.6 :

Les résistances à la compression des trois éprouvettes se situent entre 25,32 MPa et 30,92 MPa, avec une moyenne de 28,58 MPa. Cette moyenne est environ 18 % inférieure à la résistance de conception de 35 MPa. Cela suggère que les résultats sont en-dessous des attentes initiales en termes de résistance. Mais reste dans une plage acceptable vis-à-vis les hypothèses de la formulation adoptée, et les conditions de préparation et conservation du béton.

16 Essai conductivité thermique :

Pour la mesure de la conductivité thermique des différents échantillons des bétons, nous avons utilisé l'appareil CT-mètre, avec la méthode du fil chaud déterminée selon la norme ISO 8894-1:1987.

Le principe de fonctionnement, consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans le même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée.

16.1 Préparation de l'échantillon :

L'échantillon doit être homogène, représentatif du matériau et avoir des dimensions bien définies (épaisseur, surface).

La surface de l'échantillon doit être lisse et plane pour assurer un bon contact avec les plaques de l'équipement de mesure. Comme le montre (Figure 3.8).

La taille de l'échantillon doit être adaptée à la méthode de mesure utilisée, Comme le montre le (Figure 3.8)



Figure 3.8 : Réparation de l'échantillon pour mesure de la CT.

➤ **Installation de l'échantillon :**

La plaque est placée entre deux échantillons de l'équipement de mesure, qui sont généralement maintenues à des températures différentes, Comme le montre le figure « 3.9 »

Un bon contact thermique entre la plaque et les deux échantillons est essentiel pour obtenir des mesures précises.



Plaque chauffante



Appareil de mesure CT

Figure 3.9 : Appareil de mesure de la conductivité thermique.

➤ **Établissement du flux de chaleur :**

Un gradient de température est créé à travers l'échantillon en maintenant le à des températures différentes.

Le flux de chaleur qui traverse l'échantillon est mesuré à l'aide de capteurs de température et de flux de chaleur.

➤ **Mesure des paramètres :**

La température de chaque face de l'échantillon et le flux de chaleur traversant l'échantillon sont mesurés.

Ces mesures permettent de calculer la conductivité thermique de l'échantillon.

➤ **Analyse des résultats :**

La conductivité thermique mesurée est comparée aux valeurs de référence pour le matériau. L'incertitude de mesure et la reproductibilité des résultats sont également évaluées.

Comme le montre (Figure 3.10).



Figure 3.10 : Résultat de machine de l'essai.

16.2 Résultats de mesure de la conductivité thermiques des différents échantillons du béton de la classe 25 MPa :

Les résultats des essais de la conductivité du béton de la classe 25 MPa sont regroupés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Résultats de la Conductivité thermique du béton de classe 25 MPa

Facettes des éprouves	Conductivité thermique en W/m.k
F3/D1	2,16
D3/G1	2.25
D3/F3	2.108

D1/ E1	2.301
E2/D3	1.87
E2/F2	1.967

Légende du tableau :

E, F, et G : Numéros des éprouvettes de la classe 25 MPa.

F3/D1 : Facette 3 de l'éprouvette F face à la facette 1 de l'éprouvette D.

Interprétations Tableau 3.7 :

Les valeurs de conductivité thermique mesurées varient de 1,87 W/m.K à 2,449 W/m.K.

La conductivité thermique moyenne de 2,16 W/m.K se situe dans la plage typique des bétons couramment utilisés. Néanmoins, la variation significative des résultats suggère une non-homogénéité dans les propriétés thermiques du béton. Cette disparité peut être attribuée à des différences dans la composition, la mise en œuvre ou le processus de durcissement du béton.

Pour une meilleure précision et valorisation des résultats, une analyse statistique est nécessaire afin de minimiser les erreurs et écarts au niveau des résultats. Dans ce contexte on prévoit le calcul des paramètres statistiques suivants :

- ✓ Valeur moyenne de la conductivité thermique : $CT_{(moy)}$.
- ✓ Ecart type des résultats : σ .
- ✓ Coefficient de variation : $V = \sigma / CT_{(moy)}$.

Selon la valeur du coefficient de variation V (généralement inférieur à 12% pour les essais sur le béton), on peut valider la valeur moyenne des résultats testés. Si ce coefficient de devient supérieur à cette limite, les valeurs qui tranchent d'une manière évidente peuvent être éliminées et remplacée par la valeur moyenne.

Pour la classe du béton de 25 MPa on aura :

$$CT_{(moy)} = 2.16 \text{ W/m.k . .}$$

$$\sigma = 0.61 \text{ W/m.k .}$$

$$V = 0.249 = 24.94 \%$$

Le coefficient de variation est supérieur à 12 % il y'a lieu délimiter les valeurs qui tranchent d'une manière évidente peuvent être éliminées et remplacée par la valeur moyenne.

$$CT_{(moy)} = 2.1575 \text{ W/m.k .}$$

$$\sigma = 0.1981 \text{ W/m.k .}$$

$$V = 0.091 = 9.183 \%$$

Les résultats de mesure de la conductivité thermiques des différents échantillons du béton de la classe 30 MPa sont regroupés dans le tableau 3.8 .

Tableau 3.8 : Résultats de la Conductivité thermique du béton de la classe 30 MPa

Face des éprouvettes	Conductivité thermique en W/m.k
A1/C1	2,352
A2/C2	2.74
A3/C3	2.334
A1/B1	2,134
A1/B3	2.908
A2/B3	2.87

Interprétations Tableau 3.8 :

Les valeurs de conductivité thermique mesurées varient de 2,134 W/m.K à 2,908 W/m.K. La conductivité thermique moyenne de 2,556 W/m.K se situe dans la gamme typique des bétons courants. Bien que la variabilité des résultats soit moindre que pour le béton 25 MPa, elle demeure significative, suggérant une certaine disparité dans les propriétés thermiques du béton. Cette disparité peut être attribuée à des différences dans la composition, la mise en œuvre ou le processus de cure du béton, malgré son niveau de résistance mécanique plus élevé. Pour des applications nécessitant des performances thermiques plus uniformes, ces résultats peuvent être considérés comme acceptables, mais des améliorations sont envisageables.

16.3 Calcul statistique pour la classe du béton de 30 MPa :

$$CT_{(moy)} = 2.556 \text{ W/m.k.}$$

$$\sigma = 0.295. \text{ W/m.k.}$$

$$V = 0.115 = 11.57 \%$$

Les résultats de mesure de la conductivité thermiques des différents échantillons du béton de la classe 35 MPa sont regroupés dans le tableau 3.9 .

Tableau 3.9 : Résultats de la Conductivité thermique du béton de la classe 35 MPa

Face des éprouvettes	Conductivité thermique en W/m.K
G2/H1	2.73
G3/I1	3.047
I2/H1	3.10

H3/I2	2.907
G1/I1	3.076
H2/G3	2.970

Interprétations Tableau 3.9 :

Les valeurs de conductivité thermique mesurées varient de 2,73 W/m.K à 3,10 W/m.K. La conductivité thermique moyenne de 2,938 W/m.K dépasse légèrement la plage typique des bétons courants. La variabilité des résultats est relativement faible, ce qui suggère une bonne homogénéité des propriétés thermiques du béton 35 MPa. Cette uniformité peut être attribuée à un meilleur contrôle de la formulation et du processus de fabrication du béton, en comparaison avec le béton 25 MPa. Pour la plupart des applications, ces résultats de conductivité thermique peuvent être considérés comme satisfaisants.

16.4 Calcul statistique pour la classe du béton de 30 MPa :

$$CT_{(moy)} = 2.971 \text{ W/m.k.}$$

$$\sigma = 0.126 \text{ W/m.k.}$$

$$V = 0.042 = 4.24 \%$$

17 Conclusion :

L'étude de caractérisation à l'état durci a permis d'évaluer en détail les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de ces trois classes de béton. Les principaux résultats sont :

- ✓ La masse volumique moyenne augmente de 2350 kg/m³ pour le béton 25 MPa à 2400 kg/m³ pour le béton 35 MPa, indiquant une microstructure plus dense pour les bétons de plus haute résistance.
- ✓ Les bétons de résistance 30 MPa et 35 MPa présentent des caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques plus performantes et homogènes que le béton 25 MPa.
- ✓ Cette amélioration s'explique par un meilleur contrôle de la formulation et du processus de fabrication pour les bétons de résistance supérieure.
- ✓ Des pistes d'optimisation sont identifiées pour continuer à améliorer la régularité et la maîtrise des propriétés des bétons.
- ✓ Poursuite de l'optimisation de la formulation.
- ✓ Maintien d'un contrôle rigoureux du processus de fabrication.

- ✓ Mise en place d'un suivi régulier de la qualité du béton.
- ✓ Utilisation de techniques spécifiques pour stabiliser davantage les propriétés.

En fin, cette étude a permis de mieux caractériser les propriétés des différentes classes de béton et de dégager des pistes d'amélioration continue.

Dans l'étape prochaine de cette étude, une démarche globale persiste, cette démarche va résoudre le problème d'optimisation en comparant les modèles théoriques utilisés dans la conception de la formulation, à ceux issus de l'expérimentation, l'objectif est donc de proposer une nouvelle piste de recherche d'un outils d'aide à la décision pour l'obtention d'un béton de structure à pouvoir isolant.

CHAPITRE 04

Résultat et discussion

1 Introduction :

Le béton présente des caractéristiques complexes en tant que matériau de construction, qui découlent de l'interaction entre divers paramètres physiques, mécaniques et thermiques. Il est essentiel de comprendre et de maîtriser ces diverses caractéristiques afin de créer des bétons optimisés, qui répondent aux exigences croissantes en termes de performance, de durabilité et d'efficacité énergétique des constructions.

L'objectif de l'approche globale de corrélation des paramètres physico-thermiques du béton est d'analyser les liens entre des caractéristiques essentielles telles que la porosité, la résistance mécanique, la conductivité thermique et la masse volumique. L'étude de ces liens essentiels permet de mettre en évidence des tendances et des compromis cruciaux pour développer des formulations de béton adaptées à diverses utilisations.

Effectivement, les caractéristiques du béton ne peuvent pas être prises en compte séparément les unes des autres. Ces résultats découlent d'un équilibre complexe entre la structure microstructurale du matériau, sa composition et les méthodes de fabrication utilisées. Il est donc essentiel de saisir ces interactions afin d'améliorer les performances du béton, que ce soit en termes de performance mécanique, thermique ou de durabilité.

2 Composition de béton :

2.1 Définition :

La composition du béton ordinaire comprend plusieurs matériaux tels que les granulats grossiers, les granulats fins, le ciment et d'autres matériaux. Ces matériaux doivent cependant être conformes aux spécifications générales des matériaux utilisés dans le mélange de béton ordinaire.

2.2 Granulats Grossiers :

Les granulats grossiers doivent être constitués de pierre concassée solide, sans poussière ni saleté, et avoir une taille maximale de 20 mm. Ils doivent être soigneusement calibrés pour garantir un remplissage adéquat sans excéder 42 % de vides.

2.3 Sable Fin :

Le sable fin doit être composé de grains solides, pointus et anguleux qui passent à travers un tamis de maille carrée de 4 mm. Il doit répondre aux normes de qualité, être propre et exempt de poussière, de saleté et de matières organiques. L'utilisation de sable de mer est strictement interdite.

2.4 Ciment :

Ce type de ciment est utilisé pour la préparation de béton ordinaire. Il doit être conforme aux spécifications requises et posséder les résistances adéquates pour assurer la solidité du béton.

2.5 Eau :

L'eau utilisée doit être propre et raisonnablement exempte de substances nocives telles que les huiles, les acides, les alcalis, les sels et les organismes végétaux. En règle générale, l'eau potable doit avoir un pH d'au moins 6 degrés pour garantir la qualité du mélange de béton.

En respectant ces critères stricts pour chaque composant, il est possible de préparer un mélange de béton de haute qualité, garantissant ainsi la durabilité et la résistance requises pour diverses applications de construction.

3 Propriétés physiques et thermiques du béton :

3.1 Résistance Mécanique :

La résistance varie en grande partie en fonction :

- ✓ Du dosage et du type de ciment employé.
- ✓ Du volume d'air subsistant dans le béton ou la porosité.
- ✓ du dosage en eau.

La résistance en compression du béton ordinaire à 28 jours d'âge est compris entre 30 à 45 MPa.

La résistance en traction du béton est comprise entre 8 et 12% de la résistance en compression. Par contre, la résistance en cisaillement du béton est d'environ 5% de la résistance en compression. [11]

3.2 . Conductivité thermique " λ " :

3.2.1 Définition :

La résistance thermique est le critère d'évaluation de la performance d'un isolant. Elle dépend de la conductivité ou lambda du matériau isolant et de son épaisseur.

$$R = e / \lambda \quad (4.1)$$

e = épaisseur de matériau en mètre .

λ = Conductivité thermique en W/m.k .

R = Résistance thermique en m².k/W .

3.2.2 -Caracteristiques thermo-physiques des materiaux :

La faculté qu'a la chaleur de se propager dans un corps ou d'y être stockée est due aux propriétés thermo physiques des matériaux utilisés. [12], [13].

-La conductivité thermique :

$$\Phi = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_1 - T_2) \cdot A \quad (4.2)$$

-La diffusivité thermique :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4.3)$$

-L'effusivité thermique :

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot Cp} \quad (4.4)$$

-La chaleur massique :

$$Q = m \cdot Cp \cdot (T_2 - T_1) \quad (4.5)$$

3.3 La masse volumique :

La masse volumique du béton frais est définie comme la masse d'un mètre cube de béton frais compact (volume des pores inclus) est décrit dans la norme européenne NF EN 12350-6.

3.3.1 La masse volumique apparente :

Est la masse du granulat occupant l'unité de volume, tous vides compris « volume apparent ».

3.3.2 La masse volumique absolue :

Est le rapport de sa masse sèche par le volume de matière solide sans aucun vide contenu dans les grains « volume absolu » .

$$d = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (4.6)$$

d : est la masse volumique du béton frais (kg/m^3).

M_1 : est la masse de l'éprouvette (kg).

M_2 : est la masse de l'éprouvette plus la masse du béton contenu dans l'éprouvette (kg).

V : est le volume de l'éprouvette en mètre cube (m^3).

3.4 La porosité :

La porosité du béton fait référence à la quantité d'espaces vides ou de pores présents dans la structure du matériau. Ces pores peuvent être de différentes tailles et formes, allant des microfissures et des vides capillaires aux pores plus larges entre les granulats. La porosité du béton est généralement exprimée en pourcentage, représentant le rapport entre le volume des pores et le volume total du matériau. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées . [14].

4 Approche globale d'optimisation des différents paramètres d'optimisation :

Cette approche est le résultat d'un travail automatique réalisé à l'aide d'un modèle théorique et d'un outil de calcul basé sur Excel. Les modèles théoriques ont été utilisés pour optimiser la formulation du béton en visant un matériau à la fois résistant et isolant. Grâce à l'automatisation comme montrer dans la figure 4.2 de ce processus, il a été possible d'explorer de nombreuses combinaisons de matériaux et de proportions afin de trouver la formulation optimale. L'outil Excel a permis de générer des données et des résultats précis, offrant ainsi une base solide pour la prise de décision.

Cette approche automatisée a considérablement accéléré le processus de conception du béton, permettant ainsi d'obtenir des résultats plus efficaces et économiques.

BO	1,2 x BO	G/S	G	S	Densité Abs S	Densité Abs G	Gamma	E (litres)	Fm	Kb	v (litres)	48 x 0,60
25	30	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
26	31,2	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
27	32,4	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
28	33,6	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
29	34,8	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
30	36	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
31	37,2	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
32	38,4	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
33	39,6	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
34	40,8	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
35	42	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
36	43,2	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
37	44,4	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
38	45,6	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
39	46,8	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
40	48	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
29,4	35,28	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
29,5	35,4	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8
29,6	35,52	1,78	0,64	0,36	2,54	2,62	0,825	209	48	0,6	20	28,8

229 x 1,2 x BOCN15/28,8	C (kg)	C/3,1	S25 - [C/3,1]	S (litres)	G (litres)	S (kg)	G(kg)	Total KG	Densité BO	E/C	1-E/C	E/C x 3,1	
6870	238,541667	351,541667	113,400538	711,5994624	256,175806	455,423650	650,686548	1193,20998	2404,43819	2,40443819	0,59452412	0,40547588	1,84302477
7144,8	248,083333	361,083333	116,478495	708,5215054	255,067742	453,453763	647,872065	1188,04886	2406,00426	2,40600426	0,57881375	0,42118625	1,79432264
7419,6	257,625	370,625	119,556452	705,4435484	253,959677	451,483871	645,057581	1182,88774	2407,57032	2,40757032	0,56391231	0,43608769	1,74812816
7694,4	267,166667	380,166667	122,634409	702,3655914	252,851613	449,513978	642,243097	1177,72662	2409,13639	2,40913639	0,54975888	0,45024112	1,70425252
7969,2	276,708333	389,708333	125,712366	699,2876344	251,743548	447,544086	639,428613	1172,56551	2410,70245	2,41070245	0,53629851	0,46370149	1,66252539
8244	286,25	399,25	128,790323	696,2096774	250,635484	445,574194	636,614129	1167,40439	2412,26852	2,41226852	0,52348153	0,47651847	1,62279274
8518,8	295,791667	408,791667	131,86828	693,1317204	249,527419	443,604301	633,799645	1162,24327	2413,83458	2,41383458	0,51126287	0,48873713	1,58491489
8793,6	305,333333	418,333333	134,946237	690,0537634	248,419355	441,634409	630,985161	1157,08215	2415,40065	2,41540065	0,49960159	0,50039841	1,54876494
9068,4	314,875	427,875	138,024194	686,9758065	247,31129	439,664516	628,170677	1151,92103	2416,96671	2,41696671	0,48846041	0,51153959	1,51422729
9343,2	324,416667	437,416667	141,102151	683,8978495	246,203226	437,694624	625,356194	1146,75991	2418,53277	2,41853277	0,4778053	0,5221947	1,48119642
9618	333,958333	446,958333	144,180108	680,8198925	245,095161	435,724731	622,54171	1141,5988	2420,09884	2,42009884	0,46760511	0,53239489	1,44957584
9892,8	343,5	456,5	147,258065	677,7419355	243,987097	433,754839	619,727226	1136,43768	2421,6649	2,4216649	0,45783133	0,54216867	1,41927711
10167,6	353,041667	466,041667	150,336022	674,6639785	242,879032	431,784946	616,912742	1131,27656	2423,23097	2,42323097	0,44845776	0,55154224	1,39021904
10442,4	362,583333	475,583333	153,413978	671,5860215	241,770968	429,815054	614,098258	1126,11544	2424,79703	2,42479703	0,43946031	0,56053969	1,36232697
10717,2	372,125	485,125	156,491935	668,5080645	240,662903	427,845161	611,283774	1120,95432	2426,3631	2,4263631	0,4308168	0,5691832	1,33553208
10992	381,666667	494,666667	159,569892	665,4301075	239,554839	425,875269	608,46929	1115,7932	2427,92916	2,42792916	0,42250674	0,57749326	1,30977089
8079,12	280,525	393,525	126,943548	698,0564516	251,300323	446,756129	638,302819	1170,50106	2411,32888	2,41132888	0,53109713	0,46890287	1,64640112
8106,6	281,479167	394,479167	127,251344	697,7486559	251,189516	446,55914	638,021371	1169,98495	2411,48548	2,41148548	0,52981252	0,47018748	1,6424188
8134,08	282,433333	395,433333	127,55914	697,4408602	251,07871	446,362151	637,739923	1169,46883	2411,64209	2,41164209	0,5285341	0,4714659	1,6384557

Masse Vol BO	X2	Porosité	porosité 2	Lamda
2,248500652	0,35345893	12,5453578	157,386002	1,36249712
2,215508885	0,33502536	12,6203326	159,272795	1,33967459
2,184215852	0,31799709	12,6717669	160,573676	1,32392359
2,154493643	0,30223482	12,7028778	161,363104	1,3143591
2,126226879	0,2876161	12,7164293	161,707575	1,31018414
2,099311209	0,27403291	12,7148027	161,666209	1,31068554
2,073652023	0,26138972	12,7000545	161,291385	1,31522821
2,049163347	0,24960175	12,6739651	160,62939	1,32324872
2,025766871	0,23859358	12,6380789	159,721038	1,33424873
2,003391122	0,2282979	12,5937387	158,602254	1,34778851
1,981970728	0,21865454	12,5421139	157,304621	1,36348088
1,961445783	0,20960952	12,4842248	155,855869	1,3809855
1,941761287	0,20111436	12,4209629	154,280319	1,40000363
1,922866655	0,19312537	12,3531082	152,599282	1,42027346
1,90471528	0,18560311	12,2813443	150,831417	1,44156578
1,887264151	0,17851194	12,2062707	148,993043	1,46368025
2,115303983	0,28206417	12,7174782	161,734252	1,30986078
2,112606285	0,2807013	12,7173778	161,731697	1,30989174
2,109921605	0,27934829	12,7171365	161,72556	1,30996614

Figure 4.2 : Extrait de la formulation automatique sous Excel.

Ce processus de formulation paramétré (Figure 4.2) est basé sur la variation globale de l'ensemble de paramètres rentrant dans la conception de la formulation des bétons de structure à pouvoir isolant, les mélanges obtenus à travers le calcul automatique permettra de cibler les mélanges répondant aux exigences d'optimisation.

Effectivement, après avoir élaboré cette approche théorique basée sur l'optimisation de la formulation du béton, il est crucial de la mettre à l'épreuve dans des travaux expérimentales élargies. Ces expérimentations permettront de valider les résultats obtenus par le modèle théorique et de confirmer l'efficacité de l'approche d'optimisation proposée.

Lors de la phase expérimentale, différentes formulations de béton ont été préparées en utilisant les proportions et les matériaux identifiés par le modèle théorique. Les échantillons de béton ainsi obtenus ont été soumis à des tests de résistance mécanique et de capacité isolante. Les résultats expérimentaux seront ensuite comparés aux prédictions du modèle théorique.

Si les résultats des expérimentations confirment la validité de l'approche théorique, cela permettra de consolider un modèle expérimental d'optimisation du béton, qui pourra être utilisé dans des projets concrets. Les données expérimentales serviront également à affiner et améliorer le modèle théorique, en ajustant les paramètres et les variables pour une optimisation encore plus précise du béton résistant à pouvoir isolant.

5 Différents paramètres d'optimisation de la formulation globale :

5.1 Résistance à la compression d'un béton en fonction de sa masse volumique

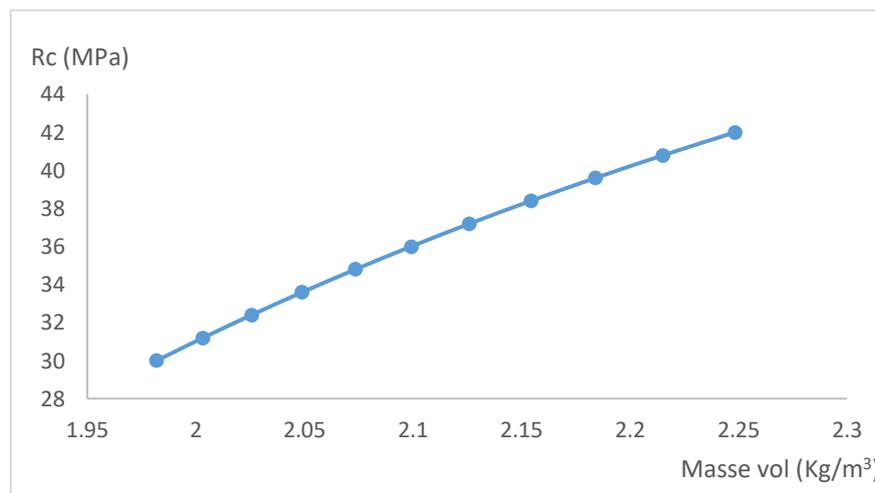


Figure 4.3 : Résistance à la compression d'un béton en fonction de sa masse volumique.

(Modèle Théorique)

D'après l'analyse de cette courbe du modèle théorique (figure 4.3), on peut observer la relation entre la masse volumique et la résistance du béton. En examinant le graphique, on constate que la résistance tend à augmenter à mesure que la masse volumique augmente. La relation est non linéaire. Toutefois, il est important de souligner que cette augmentation de résistance se produit à un rythme décroissant, ce qui suggère que l'effet de la masse volumique sur la résistance diminue à mesure que la masse volumique augmente. Ainsi, bien qu'il existe une corrélation positive entre la masse volumique et la résistance, il est probable que d'autres facteurs influencent également cette relation.

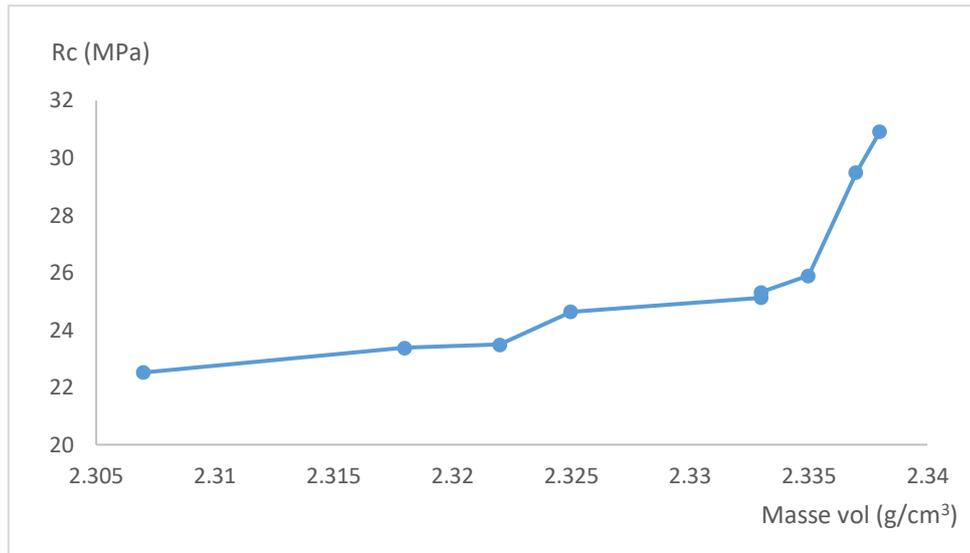


Figure 4.4 : Résistance à la compression d'un béton en fonction de sa masse volumique.

(Modèle expérimental)

Les figures 3 et 4 présentent la relation entre la masse volumique (masse volumique apparente, en g/cm³) et la résistance à la compression (Rc en MPa) d'un matériau.

Cette corrélation positive entre la masse volumique et la résistance mécanique est une caractéristique typique de nombreux matériaux. En effet, une masse volumique plus élevée est généralement indicative d'une structure plus dense et compacte, ce qui confère au matériau une meilleure tenue mécanique sous contrainte.

L'analyse de cette relation entre les deux figures permet d'optimiser la composition et les procédés de fabrication du matériau afin d'obtenir le meilleur compromis entre ses propriétés mécaniques et sa masse volumique, en fonction des exigences spécifiques de l'application.

La relation linéaire observée indique que l'augmentation de la masse volumique s'accompagne d'une hausse proportionnelle de la résistance à la compression. Les valeurs des propriétés mécaniques du matériau dépendent fortement de sa masse volumique.

L'analyse de cette relation permet d'optimiser la composition et les procédés de fabrication du matériau afin d'obtenir le meilleur compromis entre ses propriétés mécaniques et sa masse volumique, en fonction des exigences spécifiques de l'application.

5.2 Conductivité thermique en fonction de la masse volumique du béton :

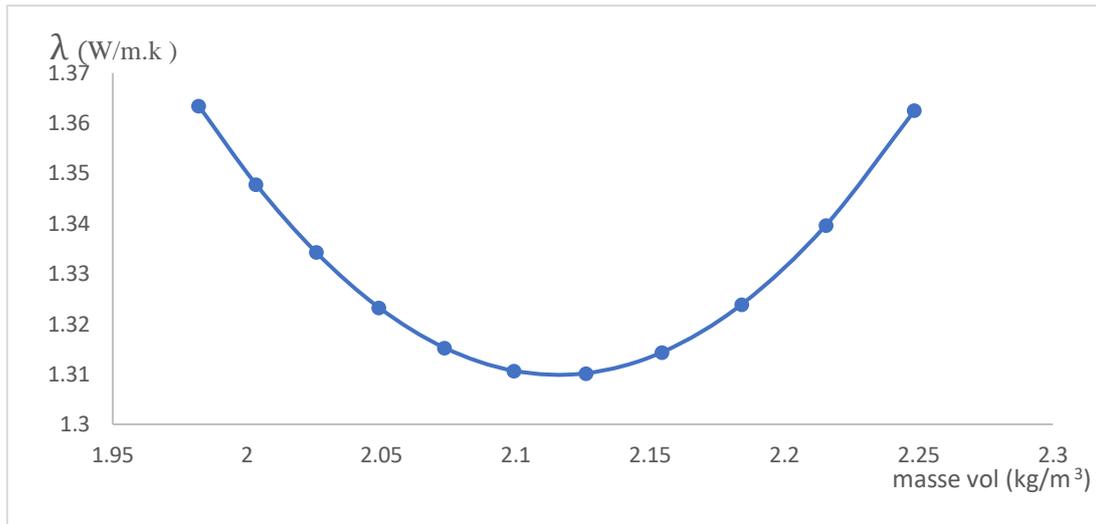


Figure 4.5 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique du béton.

(Modèle Théorique)

Dans cette courbe (figure 4.5), on peut observer la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique d'un matériau. La courbe met en évidence une corrélation positive entre ces deux variables, ce qui indique que plus la masse volumique d'un matériau est élevée, plus sa conductivité thermique est élevée. Cette observation est cohérente avec le concept général selon lequel une plus grande densité de particules dans un matériau facilite une meilleure transmission de la chaleur.

L'augmentation de la conductivité thermique avec la masse volumique peut s'expliquer par la présence d'une plus grande quantité de matériau conducteur de chaleur dans un volume donné. Une masse volumique plus élevée signifie généralement une plus grande densité de particules, ce qui permet une meilleure conduction de la chaleur à travers le matériau.

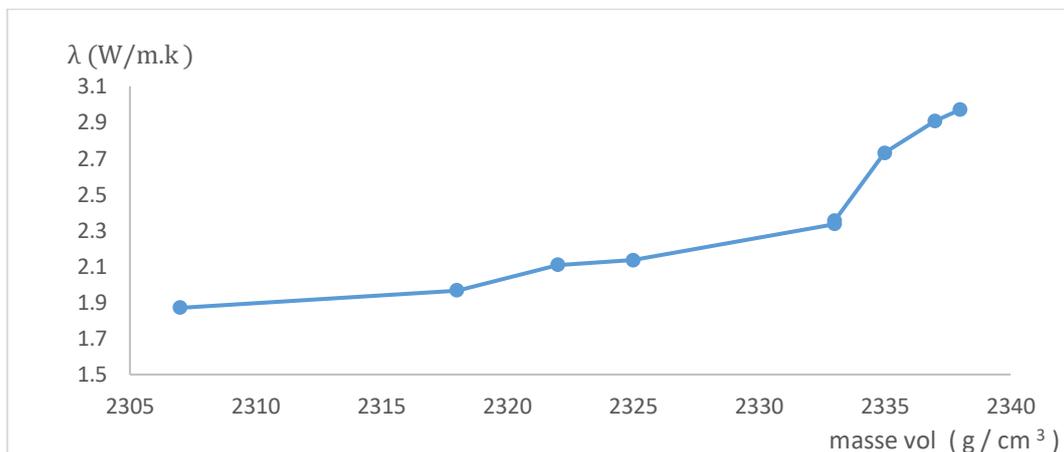


Figure 4.6 : Conductivité thermique (λ) en fonction de la masse volumique du béton.

(Modèle expérimental)

Les deux graphes présentent une tendance non linéaire croissante à mesure que le volume massique augmente, suggérant une relation inverse entre les deux variables, Ce qui signifie que plus la masse volumétrique est grande, plus la conductivité thermique est grande.

5.3 Porosité du béton en fonction de la masse volumique

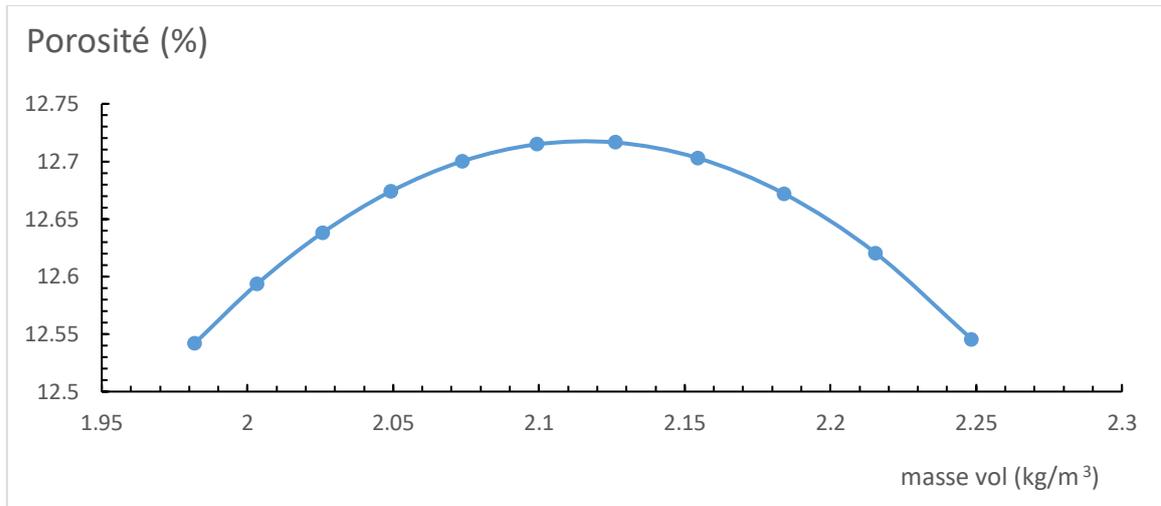


Figure 4.7 : Porosité du béton en fonction de la masse volumique.

(Modèle Théorique)

La courbe (Figure 4.7) illustre la corrélation entre la masse volumique et la porosité d'un béton. D'après cette courbe, on observe la porosité augmente lorsque la masse volumique diminue. Cela suggère qu'il existe une relation inverse entre la porosité et la masse volumique d'un béton : lorsque la masse volumique diminue, la quantité de pores dans le matériau augmente.

Cette observation est cohérente avec le principe général selon lequel une masse volumique plus faible est souvent associée à une plus grande proportion d'espaces vides ou de pores dans le matériau. Les pores peuvent être le résultat de divers facteurs, tels que la porosité naturelle du matériau, la présence de bulles d'air ou de cavités, ou encore la présence de vides résultant d'un processus de fabrication ou de traitement spécifique

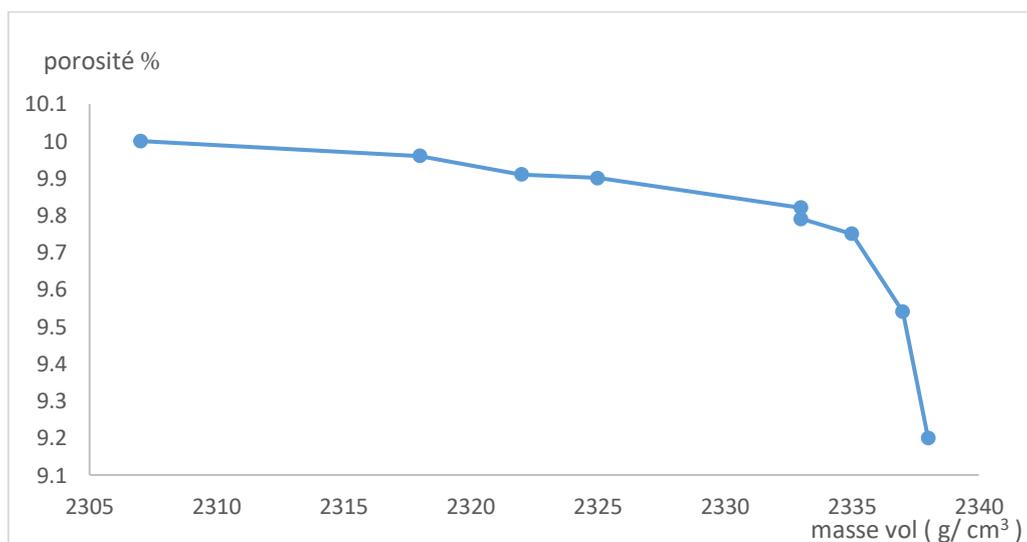


Figure 4.8 : Porosité du béton en fonction de la masse volumique.

(Modèle expérimental).

Les deux graphes présentent l'évolution de la porosité (en pourcentage) en fonction du volume massique (masse volumique) d'un béton. On peut observer que la porosité diminue de manière non linéaire à mesure que le volume massique augmente.

5.4 Conductivité thermique en fonction de la porosité d'un béton

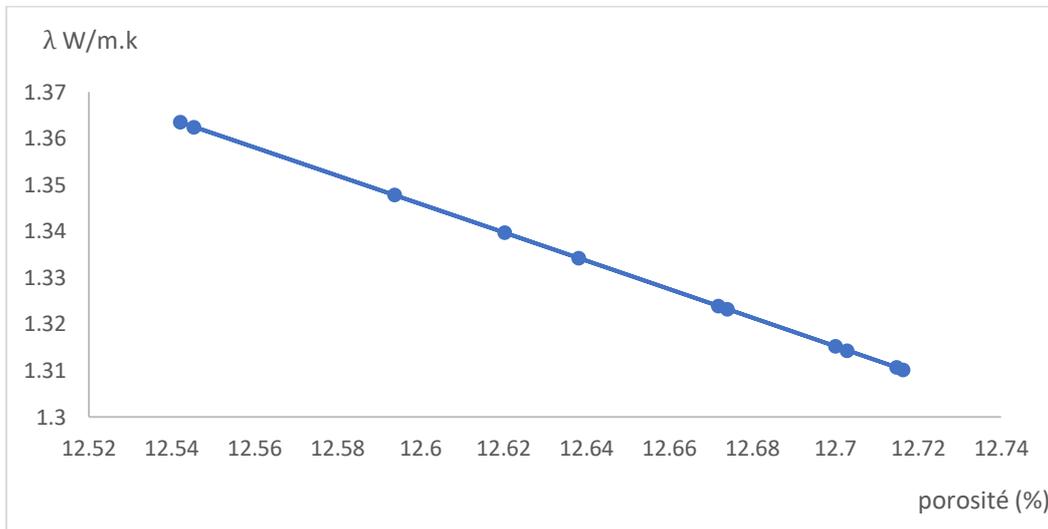


Figure 4.9 : Conductivité thermique (λ) en fonction de la porosité des bétons.

(Modèle Théorique)

La courbe (Figure 4.9) présente différentes valeurs de conductivité thermique en fonction de la porosité d'un matériau. L'analyse de cette courbe suggère une tendance où la conductivité thermique diminue à mesure que la porosité augmente. Cela signifie que les matériaux présentant une plus grande porosité ont tendance à avoir une conductivité thermique plus faible. Cette relation peut s'expliquer par le fait que les pores dans le béton agissent comme des isolants, ce qui réduit la capacité du béton à conduire la chaleur.

Lorsqu'un matériau est plus poreux, il contient davantage d'espaces vides ou de pores remplis d'air ou d'autres gaz. Ces pores agissent comme des barrières à la transmission de la chaleur, car l'air est un mauvais conducteur thermique. Par conséquent, la présence de pores dans le matériau réduit la conductivité thermique globale en limitant le transfert de chaleur à travers le béton.

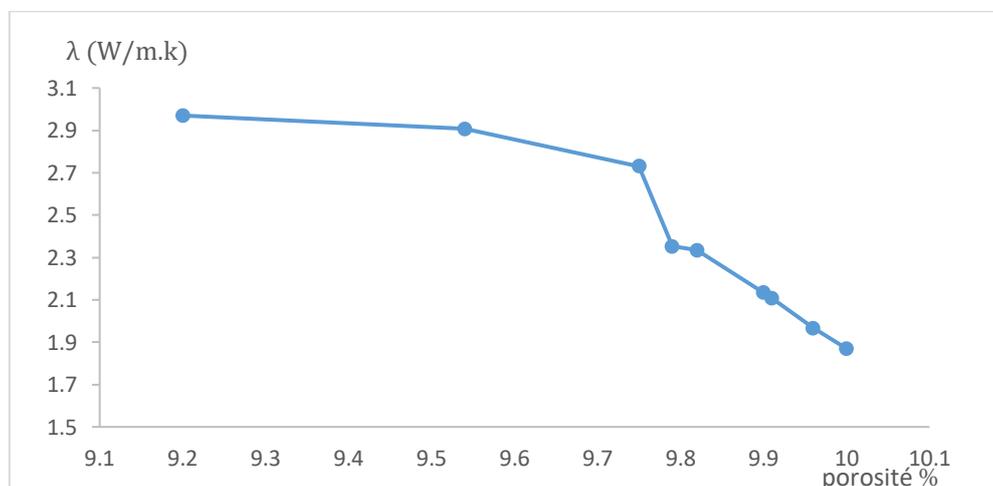


Figure 4.10 : Conductivité thermique (λ) en fonction de la porosité des bétons.

Les deux graphes représentent la variation de la porosité (en pourcentage) en fonction de la résistance à la compression (R_c) exprimée en mégapascals (MPa) d'un béton.

On observe que la porosité diminue de manière non linéaire lorsque la résistance à la compression augmente. La courbe a une forme en cloche, avec un maximum de porosité autour de 28-30 MPa de résistance à la compression.

Cette relation inverse entre la porosité et la résistance mécanique est typique de nombreux matériaux. Plus le matériau est poreux, moins il est résistant mécaniquement. Inversement, plus le matériau est dense, plus sa résistance à la compression sera élevée.

5.5 Porosité d'un béton en fonction de sa résistance à la compression.

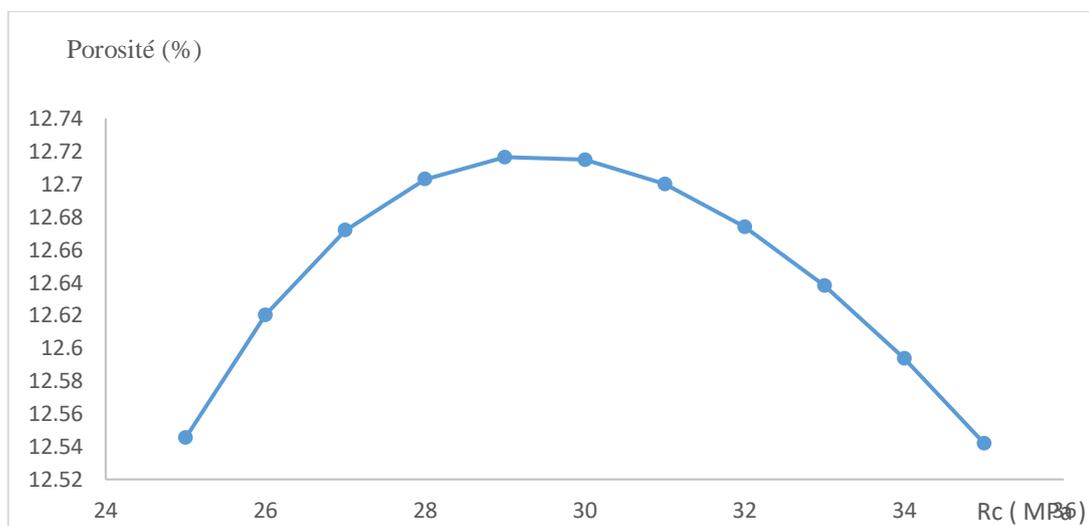


Figure 4.11 : Porosité en fonction de la résistance à la compression (R_c) des bétons.

(Modèle Théorique)

La courbe (Figure 4.11) représente la relation entre la porosité et la résistance d'un matériau. L'observation générale de cette courbe suggère une tendance où la porosité diminue à mesure que la résistance augmente. Cela indique une relation inverse entre la porosité et la résistance : plus la porosité est élevée, plus la résistance est faible.

Cette relation peut s'expliquer par le fait que les pores dans un matériau peuvent agir comme des zones de faiblesse qui compromettent sa résistance. Lorsqu'un matériau présente une porosité élevée, il contient davantage de vides ou de pores, ce qui peut réduire la densité du matériau et affaiblir sa structure globale. Par conséquent, les bétons moins poreux ont tendance à avoir une résistance plus élevée en raison de leur structure plus solide et plus dense.

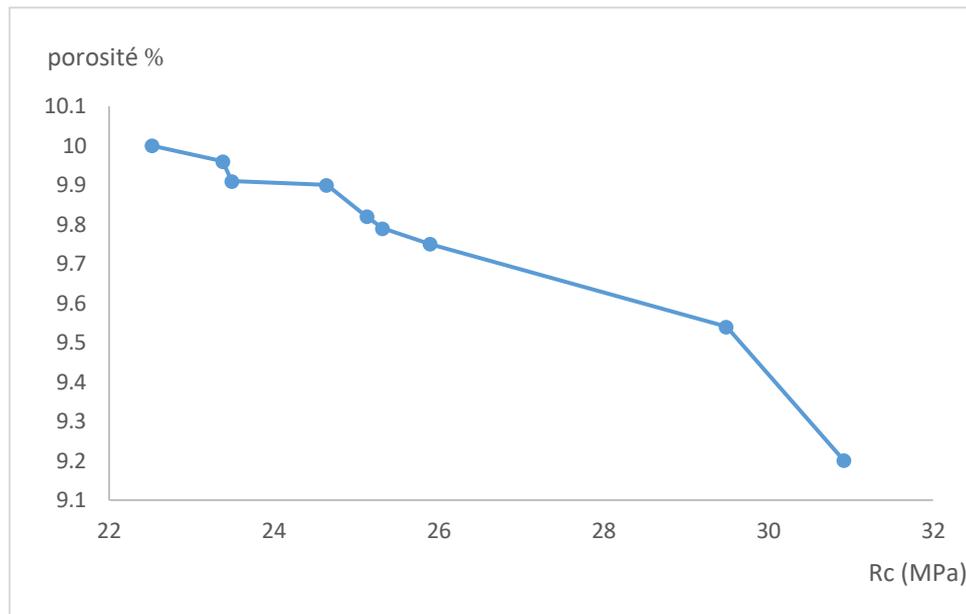


Figure 4.12 : Porosité en fonction de la résistance à la compression (R_c) des bétons.

(Modèle Expérimental) .

On peut observer que la porosité diminue de manière non linéaire à mesure que la résistance à la compression augmente. La courbe présente une forme en cloche, avec un maximum de porosité atteint autour de 30 MPa de résistance à la compression. Alors qu'en revanche on retrouve quasiment la même chose dans la partie expérimentale, sauf que la possibilité d'erreur est grande pour cette partie .

5.6 Résistance à la compression (R_c) en fonction Conductivité thermique (λ) :

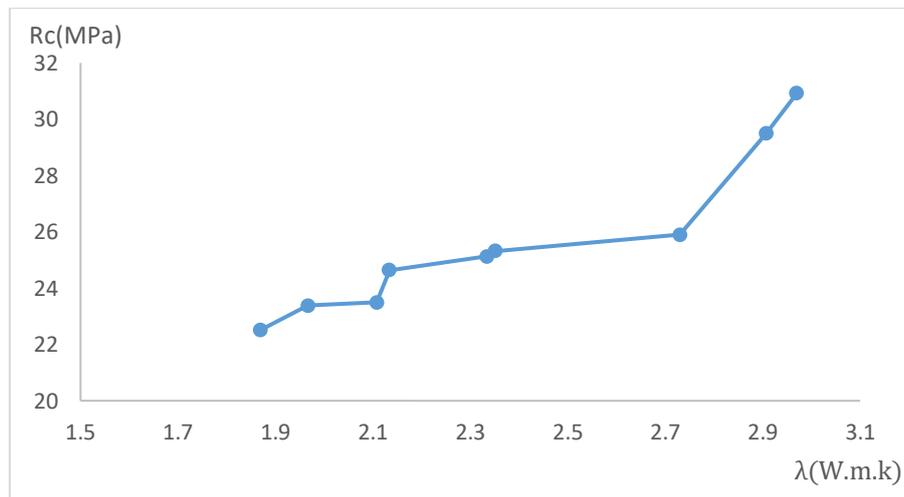


Figure 4.13 : Résistance à la compression (R_c) en fonction Conductivité thermique (λ) des bétons. (Modèle Théorique).

Ce graphique (Figure 4.13) illustre la relation positive entre la conductivité thermique (λ en W/m.K) et la résistance à la compression (R_c en MPa) d'un béton.

Cette corrélation positive entre la conductivité thermique et la résistance mécanique est une caractéristique courante observée dans certains types de matériaux. Les propriétés

microstructurales qui permettent une meilleure conduction thermique tendent également à conférer une meilleure résistance mécanique au matériau.

La relation linéaire observée indique que l'augmentation de la conductivité thermique s'accompagne d'une augmentation proportionnelle de la résistance à la compression

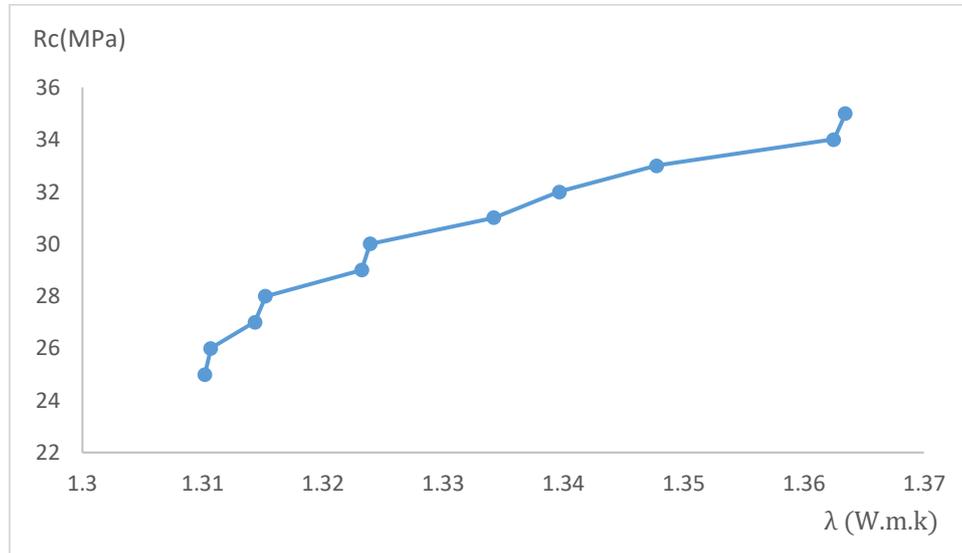


Figure 4.14 : Résistance à la compression (R_c) en fonction Conductivité thermique (λ) des bétons. (Modèle Expérimental).

Les deux graphes (figure « 13 » et « 14 ») montrent une relation positive et linéaire entre la conductivité thermique et la résistance à la compression.

En résumé, les deux graphes illustrent le même phénomène fondamental de la relation positive entre la conductivité thermique et la résistance à la compression des matériaux

Cette relation inverse entre les propriétés thermiques et mécaniques est caractéristique de nombreux matériaux. Plus un matériau est bon conducteur de chaleur, plus il a tendance à être résistant mécaniquement. Cela s'explique par le fait que les mêmes propriétés structurales qui favorisent la conduction thermique, comme une faible porosité, confèrent également une meilleure résistance mécanique.

18 Conclusion :

L'étude de la relation entre la porosité, la résistance mécanique et la conductivité thermique des bétons révèle des interactions complexes et non linéaires entre ces différentes propriétés.

L'analyse des courbes montre que la porosité évolue de manière inverse à la résistance à la compression et à la conductivité thermique. Plus le matériau est poreux, moins il est résistant mécaniquement et plus faible est sa capacité de transfert de chaleur.

Ces observations mettent en évidence les compromis à trouver lors de la conception des bétons selon les besoins spécifiques de l'application. Par exemple, pour optimiser l'isolation thermique d'un béton à pouvoir isolant, il faudra privilégier une légère augmentation de la porosité, tout en assurant une résistance minimale à garantir d'un béton de structure.

A travers cette étape d'approche de la formulation optimale en intégrant les paramètres clés qui gouvernent les propriétés physiques, thermiques et mécanique d'un béton de structure à pouvoir isolant, on constate que cette approche est efficace pour définir les limites de formulation à préconiser dans l'aide de décision pour un mélange de béton approprié.

Conclusion générale

Cette étude a permis de développer une nouvelle approche expérimentale complète pour la caractérisation des propriétés physico-thermiques des bétons isolants. La méthode proposée se fonde sur l'utilisation d'un dispositif innovant permettant l'évaluation simultanée de la masse volumique, de la porosité, de la résistance mécanique et de la conductivité thermique des échantillons.

Les résultats obtenus ont démontré la fiabilité et la pertinence de cette nouvelle approche de caractérisation. Elle offre en effet une évaluation précise et détaillée du comportement thermomécanique des bétons de structure à pouvoir isolant, en prenant en compte l'ensemble de leurs propriétés clés.

Les principaux apports de cette nouvelle approche sont :

- ✓ Une évaluation directe et simultanée des paramètres physiques (masse volumique, porosité) et thermiques (conductivité) des bétons corrélés àaux performances mécaniques des bétons.
- ✓ Une meilleure compréhension des interactions entre les différentes propriétés des bétons isolants.
- ✓ Une approche expérimentale standardisée, permettant une comparaison fiable des résultats.
- ✓ Un outil d'aide à la décision pour la conception de la formulation d'un béton de structure à pouvoir isolant.

Cette nouvelle démarche devrait ainsi permettre d'optimiser la conception et le développement de bétons à hautes performances thermiques et mécaniques, répondant aux exigences des applications dans le bâtiment. Ses perspectives d'utilisation sont nombreuses, aussi bien dans le domaine de la recherche que dans celui de l'industrie du génie civil.

La présente étude mérite d'être poursuivie en perspective de consolider les résultats dans les aspects de recherches suivantes :

- ✓ Approfondir les études pour une gamme élargie des bétons.
- ✓ Pousser plus d'avantage dans la minimisation de la conductivité thermique des bétons tout en gardant le niveau de résistance assuré.
- ✓ Etude de la structure poreuse du béton pour pouvoir identifier au mieux l'influence de la porosité du béton comme étant un paramètre clé de formulation.
- ✓ Poursuivre la recherche dans le domaine d'optimisation de l'énergie par les méthodes de conception de la formulation des matériaux.

Références bibliographiques :

- [1] Sarah Julisson, « Optimisation de formes de coques minces pour des géométries complexes », Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2 décembre 2016.
- [2] Daoudi, Djillali, and Brahim Fatmi. Caractérisation des granulats pour la formulation d'un béton. Diss. Faculté des sciences appliquées département génie civil, 2021.
- [3] Peter, L., Cathleen, H., Erich, R., Jean-Gabriel, H., Kertin, W., & Thomas, S. (2015). Guide pratique du béton: Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables.
- [4] Baron-Ollivier, « Durabilité des bétons », Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées 1996.
- [5] Savadogo, Nafissatou, et al. "Durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de Tefereyre (Niger): absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et attaque acide." J. Mater. Eng. Struct 2 (2015)
- [6] De Larrard, François. "Structures granulaires et formulation des bétons." (2000)
- [7] Jean Festa, et Georges Dreux, « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Eyrolles, 2007.
- [8] Nabil Issaadi. « Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d'une approche probabiliste. Matériaux ». Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2015.
- [9] Orjuela, Rodolfo, et al. "State estimation for non-linear systems using a decoupled multiple model." International Journal of Modelling, Identification and Control 4.1 (2008): 59-67.
- [10] J.F.Picardat G.dreux. « Composition des bétons ». Technique de l'ingénieur. «Le béton », Edition «brutdebeton.com».
- [11] Bruno, Yvan. Web site 'Grand guide de la maçonnerie' vendredi 31 mars 2017
- [12] B. Ranaivo Rabehaja, 'Etude des Caractéristiques Thermique et Mécaniques de Béton de Pouzzolane', Thèse de Doctorat, Université Paris 7, 1986.
- [13] Y. Jannot, Séminaire per auf 'Métrologie Thermique', Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), Nancy, Laboratoire d'Energie Appliquée ,(LEA), Dakar, 12-18 Novembre 2008.
- [14] Neville, A. M. (2011). « Properties of Concrete », (5th Edition). Pearson Education.
- [15] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). « Concrete: Microstructure, Properties, and Materials », (4th Edition). McGraw-Hill Education.