



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. Mira Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Structures

Mémoire de fin d'études

*Impact des Cycles Thermiques et Hydriques sur les Propriétés
Mécaniques et Physiques des Mortiers.*

Préparé par :

ALOUIDINA

ZOUBIRI ABDELJALLIL

Encadré par :

Mme. S. ATTIL

Membres de jury :

Mr A. TAHAKOURT
Mme K. GUENOUNOU

Promotion : 2023/2024

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Tout d'abord, nous souhaitons à remercier chaleureusement Madame Attil, notre encadrante, pour son accompagnement, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de ce projet. Sa bienveillance et son expertise ont été des sources inestimables d'inspiration et de motivation.

Nous remercions également les membres de jurys pour le temps qu'ils ont consacré à évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives qui ont enrichi ce mémoire.

Un grand merci à toute l'équipe technique de L.T.P Est, où on a eu la chance de réaliser notre stage, et plus particulièrement à Monsieur Tahir Mekki et Madame Oussalah Kahina. Leur aide technique et leur disponibilité ont été déterminantes pour la réussite de ce mémoire.

Nous sommes également reconnaissants envers l'équipe technique du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimique à Béjaia, en particulier Monsieur Djermoune, pour leur soutien et leurs conseils précieux.

Enfin, nous tenons à remercier Monsieur Belaid Fayçal pour son soutien constant et ses encouragements tout au long de ce travail.

Votre aide et votre soutien ont été essentiels pour mener à bien ce travail. Nous nous sommes profondément reconnaissants.

Avec nos sincères remerciements,

ABDELDJALLIL, DINA

Dédicace

À mon père, pour son soutien indéfectible, ses encouragements constants et ses conseils avisés. Tu as toujours été une source d'inspiration et de force.

À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa patience infinie et ses sacrifices quotidiens. Ta gentillesse et ton dévouement sont des piliers dans ma vie.

À mon frère Yanis, pour sa camaraderie, son humour et ses encouragements. Ta présence a rendu ce parcours plus joyeux et supportable.

À ma sœur Sondra, pour son affection, son soutien et sa compréhension. Ta douceur et ta sagesse m'ont été d'une grande aide.

À ma tante Nadia, pour ses conseils précieux, son aide précieuse et sa générosité sans limites. Tu as toujours été là pour moi.

À ma tante Sabiha, pour son amour et son soutien constants. Ta bienveillance et ta chaleur humaine m'ont profondément touchée.

À mes grands-parents Abdessadek et Yamina, pour leur amour, leurs prières et leurs encouragements. Votre sagesse et votre expérience ont guidé mes pas.

À ma grand-mère Zineb, pour son amour inconditionnel et ses bénédictions. Ta présence est une bénédiction dans ma vie.

À mes cousins et cousines Sonia et Walid, Narimene et Tinhinane, Ghiles et Ouahab, Yasmine et Lamine, pour leur soutien et leurs encouragements. Vous avez tous contribué à ma réussite d'une manière ou d'une autre.

À mes copines Dyhia, Rezqiya, Werda et Wassila, pour leur amitié, leur soutien moral et leurs encouragements. Votre présence à mes côtés a rendu ce parcours plus agréable.

À vous tous, je dédie ce travail avec amour et gratitude. Merci pour votre soutien indéfectible et vos encouragements constants.

Avec toute ma reconnaissance,

Dina

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À mes **chers parents** : qui m'ont toujours aidé et soutenu tout au long de mon cursus, à cette occasion j'ai voulu partager ma joie avec eux et voir leurs sourires, que Dieu les garde à nous.

À mes deux chères sœurs **AMINA** et **CHANEZ** qui m'ont beaucoup soutenu et a toujours été présentes pour moi et en particulier mes deux anges **ISLAM** et **ADEM ELIAN**.

À jamais dans mon cœur, ta lumière continuera toujours à briller ma chère grand mère **FATIHA**.

A mon binôme **ALOUI DINA**, ainsi que tous les membres de sa famille pour tous les efforts qu'elle a fournis et tout son engagement particulier.

À mes chères amies : **DJIMY ; YASMINE, LUDMILA, WALID**.

A tous **les enseignants du département génie civil**, merci d'avoir illuminé mon chemin vers le savoir et l'avenir, et une dédicace particulière pour la secrétaire de notre département **MADAME HASSIBA** pour sa bienveillance et sa gentillesse extraordinaire.

A tous mes ex-collègues et mes amis de **CANDLE CALL** qui ont partagé avec moi ce chemin et qui m'ont beaucoup soutenu.

A tous ce qui m'aime et me connaît.

À toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail à tous ceux que j'ai omis de citer.

ABDELDJALLIL

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations

Introduction générale

Chapitre 1 : Recherche bibliographique.

| | | |
|-------|---|----|
| I. | Introduction : | 1 |
| II. | Généralités sur le béton ordinaire et le mortier : | 1 |
| 1. | Béton ordinaire : | 1 |
| 2. | Le mortier : | 2 |
| III. | État de l'eau dans la pâte de ciment : | 3 |
| 1. | Effet du rapport E/C sur la porosité : | 3 |
| 2. | Influence des pores capillaires sur la durabilité du béton : | 5 |
| 3. | Effets de murissement : | 6 |
| IV. | Propriétés mécaniques des bétons et mortiers : | 6 |
| 1. | Résistance à la compression en fonction de la température : | 6 |
| 2. | Résistance à la traction : | 8 |
| 3. | Le module d'élasticité : | 8 |
| V. | La durabilité des matériaux cimentaires : | 9 |
| VI. | Propriétés physiques : | 10 |
| 1. | Perte masse du béton : | 10 |
| 2. | Évolution de la porosité : | 11 |
| VII. | Vulnérabilité thermique du béton : | 12 |
| 1. | Impact des variations thermiques sur la durabilité du béton : | 12 |
| 2. | Les facteurs contribuant à l'instabilité thermique : | 12 |
| VIII. | CONCLUSION : | 13 |

Chapitre 2 : Caractérisation des matériaux entrant dans la composition des mortiers.

| | | |
|-------|---|----|
| I. | INTRODUCTION | 14 |
| II. | Essais sur le ciment : | 14 |
| 1. | Détermination des masses volumiques du ciment : | 15 |
| 1.1 | Détermination de la masse volumique apparente : EN 459-2..... | 15 |
| 1.1.1 | Équipement utilisé : | 15 |
| 1.1.2 | Mode opératoire : | 15 |
| 1.1.3 | Résultats obtenus : | 16 |

TABLE DES MATIERE.

| | | |
|-------|---|----|
| 1.2 | Détermination de la masse volumique absolue : EN 196-60..... | 16 |
| 1.2.1 | Matériel utilisé : | 16 |
| 1.2.2 | Mode opératoire : | 17 |
| 1.2.3 | Expression des résultats : | 18 |
| 2. | Essai de prise du ciment : | 18 |
| 2.1.1 | Équipement utilisé : | 18 |
| 2.1.2 | Déroulement de l'essai : | 19 |
| 2.1.3 | Résultats : | 19 |
| 2.1.4 | Interprétation des résultats : | 19 |
| 2.2 | Essai de consistance : EN 193-3 | 19 |
| 2.2.1 | Matériels utilisés : | 19 |
| 2.2.2 | Protocole de l'essai : | 20 |
| 2.2.3 | Expression des résultats : | 20 |
| 3. | Essai d'expansion : EN 196-3 | 21 |
| 3.1 | Équipement nécessaire : | 21 |
| 3.2 | Conduite de l'essai : | 21 |
| 3.3 | Résultats : | 22 |
| III. | Les essais sur les granulats (sable) : | 22 |
| 1. | Analyse granulométrique (NF EN 933-1) : | 23 |
| 1.1 | Mode opératoire : | 23 |
| 2. | Détermination de la propreté : | 25 |
| 2.1.1 | Détermination de la teneur en eau W (NF P 94-050) : | 25 |
| 2.1.2 | Détermination de la teneur en fines f (Equivalent de sable) (NF EN 933-8) : | 26 |
| 2.2 | Bleu de méthylène (NF EN 933-9) : | 29 |
| 2.2.1 | Mode opératoire : | 29 |
| 3. | Détermination des masses volumiques : | 31 |
| 3.1.1 | Mode opératoire : | 31 |
| 3.2 | Détermination de la masse volumique apparente (NF EN 1097-3) : | 32 |
| 3.2.1 | Mode opératoire : | 32 |
| IV. | L'eau : | 34 |
| V. | Conclusion : | 34 |

Chapitre 3 : Formulation mortiers et les différents essais réalisés

| | | |
|-----|--|----|
| I. | Introduction : | 35 |
| II. | Composition des mortiers (éprouvettes d'étude) : | 35 |

TABLE DES MATIERE.

| | |
|---|----|
| 1. Le malaxage : | 35 |
| 2. Mode préparatoire : Malaxeur normalisé. | 36 |
| 3. Confection des éprouvettes : | 36 |
| 4. Conservation et murissement : | 36 |
| 4.1 Conservation avant démoulage :..... | 37 |
| 4.2 Conservation après démoulage : | 37 |
| III. Evaluations des propriétés physiques des mortier durcis :..... | 38 |
| 1. Suivi de la masse : | 38 |
| 2. Essai non destructif par l’ultrason :..... | 38 |
| 3. Mesure des dimensions (variation de longueur) par pied à coulisse :..... | 39 |
| IV. Variation thermique : | 39 |
| 1. Cycles chauffage-refroidissement [33] : | 39 |
| 1.1 Equipement utilisé : | 39 |
| 1.2 Programme des essais : | 40 |
| 2. Cycles de séchage- mouillage : | 40 |
| 2.1 Murissement 5h et séchage 24h (EN 12390-11) :..... | 40 |
| 3. Cycle gel et dégel [34] | 40 |
| V. Analyses physico-chimiques :..... | 40 |
| 1. Diffraction des Rayons X (DRX) :..... | 40 |
| 2. Evaluation de la porosité par dessiccateur [36] :..... | 41 |
| 3. La poussée d’Archimède :..... | 41 |
| 4. Conductivité thermique :..... | 42 |
| VI. Evaluation des propriétés mécaniques : | 43 |
| 1. La résistance à la flexion :..... | 43 |
| 2. La résistance à la compression :..... | 43 |
| VII. Conclusion:..... | 43 |

Chapitre 4 : résultats et discussions

| | |
|---|----|
| I. INTRODUCTION :..... | 44 |
| II. RESULTATS ET DISCUSSIONS : | 44 |
| 1. Analyse des propriétés physiques : | 44 |
| 1.1 Suivi de la masse pendant 28j :..... | 44 |
| 1.2 La perte de la masse :..... | 46 |
| 1.2.1 Expression des résultats : | 46 |
| 1.2.2 Interprétation des résultats : | 48 |

TABLE DES MATIERE.

| | | |
|-------|---|----|
| 1.3 | Les variations dimensionnelles :..... | 48 |
| 1.3.1 | Résultats : | 48 |
| 1.3.2 | Interprétation des Résultats : | 50 |
| 1.3 | Mesure Ultrasonique :..... | 50 |
| 1.3.1 | Présentation des résultats : | 50 |
| 1.3.2 | Interprétions des résultats : | 52 |
| 1.4 | La conductivité thermique : | 53 |
| 1.4.1 | Résultats (λ) :..... | 53 |
| 1.4.2 | Analyse des résultats : | 53 |
| 1.5 | La pesé hydrostatique : | 54 |
| 1.5.1 | Résultats des masses volumiques apparentes par pesée hydrostatique :..... | 54 |
| 1.5.2 | Analyse des résultats : | 55 |
| 1.6 | Dessiccateur : | 55 |
| 1.6.1 | Résultats obtenus : | 55 |
| 1.6.2 | Interprétation des résultats : | 56 |
| 2. | Interprétation des résultats des propriétés mécanique :..... | 56 |
| 2.1 | Résistance à la compression : | 56 |
| 2.1.1 | Résultats d'essai : | 56 |
| 2.1.2 | Analyse des résultats : | 57 |
| 2.2 | Résistance à la traction : | 57 |
| 2.2.1 | Résultats de l'essai : | 57 |
| 2.2.2 | Analyse des données obtenus : | 58 |
| 3. | Interprétation des propriétés physico-chimiques :..... | 59 |
| 3.1 | Fluorescence des rayons X (FRX): | 59 |
| 3.1.1 | Résultats de l'analyse : | 59 |
| 3.1.2 | Interprétation des résultats : | 60 |
| 3.2 | Diffraction des Rayons X : | 60 |
| 3.2.1 | Résultats de l'essai : | 60 |
| 3.2.2 | Interprétation des résultats : | 62 |
| | Comparaison Synthétique des Éprouvettes | 63 |
| | Conclusion :..... | 64 |

Conclusion générale

Liste de figures :

| | |
|--|----|
| Figure 1. 1: Influence du rapport E/C sur la porosité ouverte d'un mortier. | 4 |
| Figure 1. 2: Schéma représentatif de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci qui montre l'influence du rapport E/C. | 4 |
| Figure 1. 3: Résistance à la compression relative pour les bétons. | 7 |
| Figure 1. 4: Résultats des essais de résistance en traction [??] | 8 |
| Figure 1. 5: Perte de masse des éprouvettes de béton étuvées à 105°C. | 10 |
| Figure 1. 6: Densité apparente des bétons du Projet National BHP. | 11 |
| | |
| Figure 2. 1: Composition chimique et caractéristiques du ciment. | 14 |
| Figure 2. 2: essai de la masse volumique apparente. | 15 |
| Figure 2. 3: Détermination de la masse volumique apparente du ciment. | 16 |
| Figure 2. 4: Essai de volume absolu du ciment. | 17 |
| Figure 2. 5: Appareil de Vicat. | 18 |
| Figure 2. 6: Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance. | 20 |
| Figure 2. 7: Essai d'expansion du ciment. | 21 |
| Figure 2. 8: Analyse granulométrique. | 23 |
| Figure 2. 9: Courbes granulométriques selon EN 933-1. | 24 |
| Figure 2. 10: Essai d'équivalent de sable. | 27 |
| Figure 2. 11: Essai au bleu de méthylène. | 30 |
| Figure 2. 12: Détermination de masse volumique absolue du sable. | 31 |
| Figure 2. 13: Mesure de la masse volumique apparente. | 33 |
| | |
| Figure 3. 1: Constituants du mortier normalisé. | 35 |
| Figure 3. 2: Malaxeur normalisé. | 35 |
| Figure 3. 3: Confection des éprouvettes. | 36 |
| Figure 3. 4: Moulage et démoulage des mortiers. | 37 |
| Figure 3. 5: Conservation des éprouvettes dans l'eau. | 37 |
| Figure 3. 6: Eprouvettes après démoulage. | 37 |
| Figure 3. 7: Eprouvettes après 28 jours de cure. | 37 |
| Figure 3. 8: Essai par ultrason. | 38 |
| Figure 3. 9: Mesure des dimensions des éprouvettes avec un pied à coulisse. | 39 |
| Figure 3. 10: Une étuve. | 40 |
| Figure 3. 11: Dessiccateur. | 41 |
| Figure 3. 12: Eprouvettes couvertes de paraffine. | 42 |
| Figure 3. 13: Pesée hydrostatique. | 42 |
| Figure 3. 14: conductimètre. | 42 |
| Figure 3. 15: Essai de résistance à la flexion. | 43 |
| Figure 3. 16: Essai de résistance à la compression. | 43 |
| Figure 4. 1: poids des éprouvettes après décoffrage. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figure 4. 2: Poids des éprouvettes après 1jour de murissement..... | 45 |
| Figure 4. 3: Poids des éprouvettes après murissement pour 7j..... | 45 |
| Figure 4. 4: Poids des éprouvettes après murissement pour 14j..... | 45 |
| Figure 4. 5: Poids des éprouvettes après murissement pour 28j. | 46 |
| Figure 4. 6: Variation des masses de mortiers soumis aux cycles de chauffage-refroidissement. | 46 |
| Figure 4. 7 : Variation des masses de mortier soumis aux cycles séchage- mouillage..... | 47 |
| Figure 4. 8: Variation des masses des mortiers soumis aux cycles gel- dégel. | 47 |
| Figure 4. 9 : Variation des masses des mortiers de référence (témoins). | 48 |
| Figure 4. 10 : Variation de la longueur des éprouvettes pendant les cycles thermiques. | 49 |
| Figure 4. 11 : Variation de la hauteur des éprouvettes après des cycles de traitement thermiques. | 49 |
| Figure 4. 12 : Vitesse des ondes sonores pour chaque cycle de température | 50 |
| Figure 4. 13 : Vitesse des ondes sonores pour les cycles séchage-mouillage. | 51 |
| Figure 4. 14 : Vitesse des ondes sonores pour les cycles gel-dégel..... | 51 |
| Figure 4. 15 : Vitesse des ondes sonores pour les différentes échéances des éprouvettes témoins | 52 |
| Figure 4. 16: La conductivité thermique des éprouvettes étudiées. | 53 |
| Figure 4. 17 : La pesé hydrostatique des éprouvettes de mortier. | 55 |
| Figure 4. 18 : Les masses des éprouvettes de mortier à l'essai de dessiccateur. | 56 |
| Figure 4. 19 : Résistance à la compression des mortiers des différents cycles thermique. | 57 |
| Figure 4. 20 : Résistance à la traction des mortiers de différents cycles thermique. | 58 |
| Figure 4. 21: Spectre DRX de la poudre du mortier 19 | 61 |
| Figure 4. 22 : Spectre DRX de la poudre du mortier 21 | 61 |
| Figure 4. 23 : Spectre DRX de la poudre du mortier 22 | 62 |
| Figure 4. 24 : Spectre DRX de la poudre du mortier 24 | 62 |
| Figure 4. 25: Spectre DRX de la poudre du mortier 33..... | 62 |

Liste des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tableau 2. 1: Mesure de la masse volumique apparente du ciment. | 16 |
| Tableau 2. 2: Mesure de la masse volumique absolue du ciment..... | 18 |
| Tableau 2. 3: Détermination du temps de début et fin de prise. | 19 |
| Tableau 2. 4: Résultats d'essai de consistance du ciment..... | 20 |
| Tableau 2. 5: Résultats d'essai d'expansion. | 22 |
| Tableau 2. 6: Analyse granulométrique du sable 0/4..... | 24 |
| Tableau 2. 7: Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4..... | 26 |
| Tableau 2. 8: Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/4. | 28 |
| Tableau 2. 9: Résultats d'équivalent de sable. | 28 |
| Tableau 2. 10: Résultats de l'essai au bleu de méthylène. | 30 |
| Tableau 2. 11: Résultats des masses volumiques absolues du sable. | 32 |
| Tableau 2. 12: Résultats des masses volumiques apparentes du sable..... | 34 |
| | |
| Tableau 3. 1: Opération de malaxage de mortier normalisé..... | 36 |
| | |
| Tableau 4. 1 : Les éléments détectés par l'analyse FRX <i>du mortier</i> 19..... | 57 |

LISTE DES NOTATIONS

Si : silicium

OH : hydroxyle

Ca : calcium

Al : aluminium

(E/C) : Eau/Ciment

BHP : bétons à hautes performances

BO : béton ordinaire

DTU : Document Technique Unifié

°C : degrés Celsius

MPa : méga pascal

CaO : la chaux

CaCO₃ : carbonate de calcium

Ca(OH)₂ : hydroxyde de calcium

Si-oh : silanol.

Al-OH : l'hydroxyde d'aluminium

C-S-H. : Calcium-Silicate-Hydrate

M100C : béton de résistance caractéristique à la compression de 100 MPa après un certain nombre de jours de durcissement.

M75SC : béton avec une résistance caractéristique à la compression de 75 MPa et avec une certaine spécification ou un additif spécial (comme le superplastifiant, d'où le "SC" signifie Superplasticized Concrete).

M75C : béton de résistance caractéristique à la compression de 75 MPa, mais sans les caractéristiques spéciales ou les additifs.

M : masse.

V : volume.

Gr : gramme.

MF : Module de finesse.

ESP : Equivalent de sable par piston.

VB : Valeur au bleu.

Introduction générale

Introduction générale : Contexte de l'étude et problématique :

Les matériaux cimentaires jouent un rôle prépondérant dans le domaine du Génie Civil. Dans de nombreux cas de vie quotidienne, certains matériaux sont soumis collectivement à des charges mécaniques et à des températures potentiellement élevées ou basses [1]. Cette situation peut se produire dans des conditions d'utilisation normales, telles que le stockage de déchets radioactifs, où la température maximale des colis de béton avoisine les 250 °C. Cependant, dans des conditions critiques ou accidentelles, comme les incendies, la température à laquelle le béton est exposé peut dépasser les 1000 °C. Lorsqu'un matériau cimentaire est confronté à des températures élevées, au-delà de 100 °C, ses propriétés physiques telles que la masse et la porosité, ses performances mécaniques telles que la résistance à la compression et le module d'élasticité, ainsi que ses propriétés de transfert, se détériorent en raison de la modification de sa microstructure [2].

L'objectif global de cette étude est d'évaluer expérimentalement et empiriquement, à l'échelle macroscopique, les modifications de morphologie et de propriétés mécaniques et physiques d'un matériau cimentaire soumis à un traitement thermique préalable. Spécifiquement, l'impact de l'endommagement thermique, tel que la microfissuration et la fragilisation du squelette solide, sur le comportement poro-mécanique d'un matériau cimentaire est peu connu. De plus, la documentation actuelle ne propose pas d'étude complète caractérisant l'effet d'un traitement thermique sur les performances mécaniques et physiques, poro-mécaniques et de durabilité d'un matériau cimentaire. Le Chapitre I présente une revue bibliographique sur ces aspects, justifiant également nos choix méthodologiques et expérimentaux. Lorsque le matériau poreux est microfissuré, il est essentiel de prendre en compte la localisation des microfissures, leur ouverture ou leur fermeture, ainsi que la présence de fluide saturant à l'intérieur des fissures, entre autres facteurs [3].

Il est pertinent de reconnaître les propriétés physiques et mécaniques après le traitement thermique, mais également à des cycles hydriques.

Pour notre étude, nous avons choisi un mortier ordinaire (rapport Eau/Ciment = 0,5) comme matériau modèle, pour mener nos recherches. Dans un premier temps, nous avons caractérisé expérimentalement le comportement des matériaux après des cycles hydriques et des cycles de chauffage/refroidissement jusqu'à une température maximale 200 à 250°C. Nous avons examiné : leurs propriétés mécaniques et physiques, telles que : la porosité et la conductivité thermique, la résistance à la compression unie axiale (R_c), les dimensions des prismes, qui sont mesurés par un pied à coulisse, les masses (pesées) de nos prismes sont aussi déterminées, ainsi que et la vitesse des ondes sonores optimale de nos échantillons déterminés à partir d'un appareil ultrason.

Ce travail porte sur l'influence des Cycles Thermiques et Hydriques sur les Propriétés Mécaniques et Physiques des Mortiers. Il est présenté comme suit :

- Une introduction générale
- Chapitre I : recherche bibliographique.
- Chapitre II : Caractérisation des matériaux entrant dans la composition des mortiers.
- Chapitre III : Formulation mortiers et les différents essais réalisés.
- Chapitre IV : Résultats et discussions.

INTRODUCTION GENERALE.

En fin une conclusion générale clôturera ce mémoire.

***Chapitre J : ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE.***

I. Introduction :

Aujourd'hui, le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. Il est employé dans les différents types de construction. Cependant, la durabilité des ouvrages en béton est étroitement liée à celle du béton lui-même. Ce dernier est un matériau hétérogène et poreux en équilibre chimique réagissant avec son environnement.

Ce chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les bétons et ses composants ainsi que les mortiers. Aussi, le paramètre thermique influant la durabilité des bétons est abordée.

II. Généralités sur le béton ordinaire et le mortier :

1. Béton ordinaire :

Le béton ordinaire est l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés dans le bâtiment, les voiries et les ouvrages d'art. Il est composé principalement de ciment, de granulats (le sable et le gravier) et d'eau. Il existe ainsi de nombreux types de béton, selon leur composition. Généralement, les composants des bétons sont quantifiés ainsi :

Eau : entre 07 et 14 %.

Ciment : entre 14 et 22 %.

Granulats (gravier et sable) : entre 60 et 78 %

Voici quelques généralités sur le béton ordinaire :

- **Composition** : Le béton ordinaire est généralement composé de ciment Portland, qui est un mélange de clinker, de gypse et de quelques additifs, de granulats (sable, gravier ou pierre concassée), et d'eau.
- **Propriétés mécaniques** : Le béton ordinaire offre une bonne résistance à la compression, mais sa résistance à la traction est généralement faible. Cependant, grâce à l'armature en acier incorporée dans certains cas (béton armé), il peut également résister aux forces de traction.
- **Durabilité** : Le béton ordinaire peut offrir une bonne durabilité dans des conditions environnementales normales. Cependant, des facteurs tels que la qualité des matériaux, la qualité de la mise en œuvre, l'exposition aux éléments et le maintien jouent un rôle crucial dans sa durabilité à long terme.
- **Fabrication et mise en œuvre** : Le béton ordinaire est fabriqué en mélangeant les ingrédients secs (ciment, granulats) ensemble, puis en ajoutant de l'eau pour former une pâte homogène. Cette pâte est ensuite coulée dans des coffrages où elle durcit et acquiert sa résistance. La mise en œuvre du béton nécessite généralement une vibration pour éliminer les bulles d'air et assurer une distribution uniforme dans les coffrages.

- **Applications** : Le béton ordinaire est utilisé dans une large gamme d'applications de construction, telles que les fondations, les dalles, les poteaux, les poutres, les murs, les planchers, les routes, les ponts et de nombreux autres éléments de structures.
- **Entretien** : Pour assurer sa durabilité à long terme, le béton ordinaire nécessite parfois un entretien régulier, notamment le scellement des fissures, le retrait des débris et la protection contre les attaques chimiques ou les agents environnementaux agressifs.

En résumé, le béton ordinaire est un matériau polyvalent et largement utilisé dans la construction en raison de sa disponibilité, de sa facilité de fabrication et de sa polyvalence d'utilisation. Son utilisation judicieuse et une bonne pratique de construction sont essentielles pour garantir des performances optimales dans diverses applications structurelles.

2. Le mortier :

Le mortier est un mélange de ciment, de sable, et d'eau, utilisé principalement comme liant dans la construction pour coller ensemble des éléments de maçonnerie tels que des briques, des pierres, des blocs ou des carreaux. Ci-dessous quelques généralités sur le mortier [10]:

- **Composition** : Le mortier est principalement composé de ciment, de sable et d'eau. Le ciment agit comme liant, tandis que le sable agit comme agrégat fin, fournissant de la résistance et la cohésion au mélange. Des additifs peuvent être utilisés pour améliorer certaines propriétés du mortier, comme la résistance à l'eau, la plasticité ou le temps de prise.
- **Types de ciment** : Différents types de ciment peuvent être utilisés dans la fabrication du mortier, selon les exigences spécifiques du projet. Le ciment Portland est le type de ciment le plus couramment utilisé, mais d'autres types comme le ciment prompt, le ciment alumineux ou le ciment mélangé peuvent également être utilisés en fonction des besoins.
- **Propriétés** : Le mortier offre une bonne adhérence aux surfaces de maçonnerie et une certaine résistance à la compression. Sa plasticité permet de le manipuler facilement lors de l'application. Les propriétés du mortier peuvent être ajustées en modifiant la proportion des ingrédients et en utilisant des additifs appropriés.
- **Fabrication et mise en œuvre** : Le mortier est généralement préparé sur le chantier en mélangeant le ciment, le sable et l'eau dans des proportions spécifiques jusqu'à obtention d'une consistance homogène. Il est ensuite appliqué sur les surfaces de maçonnerie à l'aide d'une truelle, en couches uniformes, pour lier les éléments de construction entre eux.
- **Les types de mortier** : Il existe différents types de mortier en fonction de leur composition et de leur usage. Les mortiers les plus courants sont le mortier de ciment, le mortier de chaux, le mortier de ciment-sable, et le mortier de ciment-sable-lime.
- **Les applications** : Le mortier est largement utilisé dans la construction pour réaliser des joints entre des éléments de maçonnerie, pour fixer des carreaux, pour enduire des murs ou des surfaces, et pour d'autres applications de finition.

En résumé, le mortier est un matériau essentiel dans la construction, utilisé pour relier et renforcer les éléments de maçonnerie. Sa composition et ses propriétés peuvent être adaptées

en fonction des exigences spécifiques du projet, ce qui en fait un matériau polyvalent et largement utilisé dans l'industrie de la construction.

III. État de l'eau dans la pâte de ciment :

L'eau joue un rôle crucial dans la formation et le durcissement de la pâte de ciment. Voici les principaux états de l'eau dans la pâte de ciment :

- **Eau libre** : C'est l'eau qui n'est pas chimiquement liée et qui reste disponible pour l'hydratation des particules de ciment. L'eau libre est nécessaire pour faciliter la réaction chimique entre le ciment et l'eau, et elle est également importante pour la maniabilité et le travail de la pâte de ciment lors de sa mise en place.
- **Eau capillaire** : L'eau capillaire est piégée dans les pores capillaires du ciment et des granulats. Elle contribue à la maniabilité et à la fluidité de la pâte de ciment, mais elle peut également être responsable de la porosité du matériau durci si elle n'est pas correctement contrôlée.
- **Eau adsorbée** : Une partie de l'eau est adsorbée à la surface des particules de ciment et des granulats en raison des forces d'attraction superficielle. Cette eau adsorbée peut affecter la plasticité et la consistance de la pâte de ciment, mais elle n'est pas directement impliquée dans le processus d'hydratation.

Il existe trois types d'eau coexistent dans la pâte de ciment : [4] [5] [6] [7]

- **Eau de constitution ou eau chimiquement liée dans les hydrates** : Cette eau est éliminée pendant l'ignition du ciment, généralement entre 105°C et 1000°C. Elle est qualifiée de non évaporable, représentant les groupements hydroxyles Si-OH, Ca-OH ou Al-OH présents dans la structure cristalline de la portlandite, de l'ettringite, du monosulfate et des particules de C-S-H.

En résumé, l'eau dans la pâte de ciment existe sous différentes formes, chacune jouant un rôle spécifique dans le processus d'hydratation, la maniabilité et les propriétés du matériau durci. Un contrôle adéquat de la teneur en eau et de sa distribution est essentiel pour obtenir des performances optimales du béton durci en termes de résistance, de durabilité et de compacité.

1. Effet du rapport E/C sur la porosité :

Le rapport eau/ciment (E/C) est un paramètre crucial, car augmenter la quantité d'eau dans les matériaux cimentaires à l'état frais améliore leur maniabilité et leur ouvrabilité, mais cela entraîne également une augmentation de la porosité du matériau. En effet, l'excès d'eau, qui n'est pas nécessaire pour les processus d'hydratation du ciment, s'évapore lors du séchage du matériau, laissant des vides à leur emplacement. Lors de la fabrication de la pâte fraîche, le rapport E/C contrôle directement l'espacement initial entre les particules de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Comme le montre la **figure 1.1**, un rapport E/C plus faible

rapproche initialement les particules de ciment les unes des autres. Cela réduit l'espacement entre les particules à combler et diminue les risques de formation de grands vides qui ne pourraient pas être entièrement remplis par les hydrates.

Donc, ce rapport E/C dans la fabrication du béton a un impact significatif sur les propriétés du matériau durci. Voici quelques effets du rapport eau/ciment :

- **Résistance du béton** : En général, une diminution du rapport E/C conduit à une augmentation de la résistance du béton. Cela est dû au fait qu'une quantité moindre d'eau par rapport au ciment favorise une hydratation plus complète des particules de ciment, ce qui entraîne une meilleure formation de produits d'hydratation et donc une augmentation de la résistance.
- **Durabilité** : Un rapport E/C plus faible est souvent associé à une meilleure durabilité du béton. Cela est principalement dû à une diminution de la porosité, car moins d'eau signifie moins de vide pour les pores capillaires. Une moindre porosité réduit la perméabilité du béton aux agents agressifs tels que l'eau, les ions chlorures et les gaz carboniques, ce qui améliore sa durabilité à long terme.
- **Maniabilité** : Un rapport E/C plus élevé rend généralement le mélange plus fluide et plus facile à travailler. Cependant, un excès d'eau peut entraîner une ségrégation et une diminution de la résistance et de la durabilité du béton durci. Il est donc important de trouver un équilibre entre la maniabilité du mélange frais et les propriétés du béton durci.
- **Retrait et fissuration** : Un rapport E/C plus faible peut réduire le retrait plastique et le risque de fissuration du béton. Cependant, ce rapport excessivement bas peut entraîner un mélange trop sec, ce qui peut rendre le béton difficile à couler et entraîner des problèmes de compaction et de consolidation.
- **Chaleur d'hydratation** : Un rapport E/C plus élevé peut générer plus de chaleur d'hydratation, car il y a plus d'eau réagissant avec le ciment. Cela peut être un problème dans les applications où le contrôle de la température est crucial, comme dans le bétonnage massif.

En résumé, le rapport eau/ciment est un facteur clé dans la conception du béton, car il influence directement ses propriétés mécaniques, sa durabilité, sa maniabilité et d'autres aspects importants.

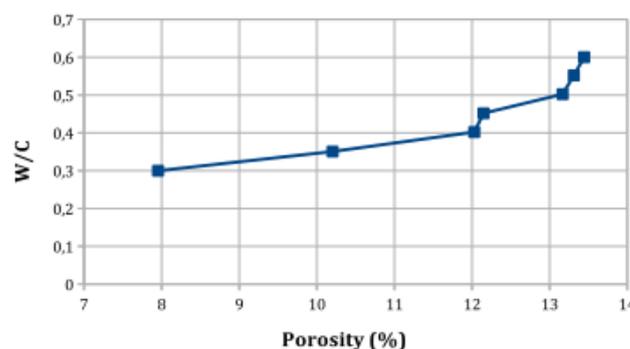


Figure 1. 1: Influence du rapport E/C sur la porosité ouverte d'un mortier [8].

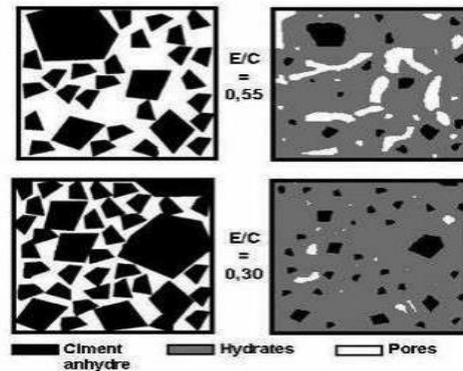


Figure 1. 2: Schéma représentatif de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci qui montre l'influence du rapport E/C.

2. Influence des pores capillaires sur la durabilité du béton :

Les pores capillaires ont une influence significative sur la durabilité du béton. Voici quelques aspects clés de leur influence :

- **Perméabilité** : Les pores capillaires agissent comme des voies d'entrée pour les agents agressifs tels que l'eau, les chlorures et les gaz carboniques. Plus les pores sont nombreux et larges, plus la perméabilité du béton est élevée, ce qui peut entraîner une détérioration accélérée du matériau.
- **Résistance aux cycles gel-dégel** : L'eau piégée dans les pores capillaires peut geler pendant les cycles de gel-dégel, provoquant des contraintes de pression qui endommagent la structure du béton. Les pores capillaires facilitent la pénétration de l'eau, augmentant ainsi le risque de dommages liés au gel-dégel.
- **Corrosion de l'armature** : Les ions chlorures peuvent pénétrer dans le béton par les pores capillaires et atteindre l'armature en acier. Cela peut entraîner la corrosion de l'armature, ce qui affaiblit la structure et peut causer des fissures et des dégradations du béton.
- **Réaction alcali-silice** : Les pores capillaires permettent la pénétration des ions alcalins, qui peuvent réagir avec certains types d'agrégats contenant des minéraux réactifs de silice. Cette réaction chimique provoque un gonflement progressif des agrégats, ce qui peut entraîner des fissures et une détérioration du béton.
- **Infiltration d'eau** : Les pores capillaires permettent également l'infiltration d'eau dans le béton, ce qui peut entraîner des problèmes d'humidité et de moisissures à l'intérieur des structures, compromettant ainsi leur intégrité et leur durabilité.

Pour améliorer la durabilité du béton, il est essentiel de réduire la taille et la quantité des pores capillaires. Cela peut être réalisé en utilisant des mélanges de béton à faible rapport eau/ciment, en utilisant des adjuvants réducteurs d'eau, en compactant correctement le béton lors de la mise en œuvre, en utilisant des matériaux cimentaires supplémentaires tels que les fumées de silice

ou les cendres volantes, et en appliquant des traitements de scellement de surface pour réduire la perméabilité.

3. Effets de murissement

Les effets du murissement font référence aux changements et aux améliorations que subissent les matériaux cimentaires (comme le béton) au fil du temps après leur coulée ou leur fabrication. Voici quelques principaux effets de murissement :

- **Durcissement** : Au fil du temps, les matériaux cimentaires subissent un durcissement progressif à mesure que les réactions d'hydratation du ciment se poursuivent et que les produits d'hydratation se forment et se développent. Cela entraîne une augmentation de la résistance mécanique et une amélioration des propriétés du matériau.
- **Gonflement initial** : Pendant les premiers stades du murissement, il peut y avoir un certain gonflement initial causé par les réactions d'hydratation du ciment. Ce gonflement peut entraîner des contraintes internes et des microfissures dans le matériau, mais il est généralement suivi d'un retrait progressif à mesure que le durcissement se poursuit.
- **Rétrécissement** : Au fur et à mesure que les réactions d'hydratation du ciment progressent et que les produits d'hydratation se forment, les matériaux cimentaires ont tendance à subir un certain rétrécissement. Ce rétrécissement peut être causé par la perte d'eau due à l'évaporation ou à l'absorption, ainsi que par la contraction des produits d'hydratation eux-mêmes.
- **Stabilisation à long terme** : Une fois que les réactions d'hydratation du ciment sont complètes et que le matériau a atteint un état de maturité, il tend à se stabiliser et à présenter des propriétés mécaniques et physiques relativement constantes à long terme. Cependant, des changements environnementaux ou des charges externes peuvent encore affecter ses performances au fil du temps.
- **Amélioration des propriétés** : En général, les matériaux cimentaires tendent à présenter une amélioration progressive de leurs propriétés mécaniques, telles que la résistance à la compression, la résistance à la traction et la durabilité, au fur et à mesure que le processus de murissement se poursuit.

En résumé, les effets de murissement sont essentiels pour comprendre et prédire le comportement à long terme des matériaux cimentaires. Ils sont le résultat des réactions d'hydratation du ciment et de divers processus physiques et chimiques qui se produisent au fil du temps, et ils influencent les propriétés mécaniques, physiques et durables du matériau durci.

IV. Propriétés mécaniques des bétons et mortiers :

1. Résistance à la compression en fonction de la température :

L'essai de résistance à la compression résiduelle est largement utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques du béton selon la température. Il peut être effectué avec un équipement simple comme une presse hydraulique et ne nécessite pas de personnel hautement qualifié. Ce test est généralement réalisé à la fin de la période de stabilisation thermique et est réputé pour offrir une représentation précise du comportement du matériau à des températures élevées. [9]

Phan compile les résultats de résistance à la compression résiduelle de ses essais et ceux d'autres chercheurs. Les courbes montrent une diminution de la résistance entre 100 et 150°C, suivie d'une augmentation entre 300 et 350°C, puis d'une nouvelle diminution au-delà de 350°C [10]. Khoury explique que la baisse initiale de résistance est due à la fluidification de l'eau à ces températures, réduisant les liaisons entre les couches de C-S-H et favorisant la formation de groupes silanols à faible liaison. [11]

D'après Dias, l'augmentation de la résistance entre 300 et 350°C est due au renforcement des liaisons entre les hydrates et à une augmentation des énergies de surface. Les bétons à hautes performances (BHP) montrent une augmentation de résistance plus prononcée, décalée vers des températures plus élevées par rapport aux bétons ordinaires (BO) [12] [13]. La baisse de résistance du béton est souvent attribuée à une modification de sa microstructure due à la déshydratation, une réaction chimiquement irréversible qui diminue la résistance en relation avec le degré d'hydratation de la matrice cimentaire. Cependant, il est important de noter que le clivage du quartz α en quartz β dans les granulats siliceux à 573°C fragilise également le granulats, contribuant ainsi à une diminution des propriétés mécaniques du béton. [14]

Les études menées par Gaweska, Dias et ses collaborateurs, ainsi que Harada et d'autres chercheurs portant sur l'évolution des résistances à chaud et résiduelles sur un même béton, démontrent une diminution plus marquée de la résistance résiduelle à la compression. [15][16][17]

Le comité technique de la RILEM (T-129) [18] régule la vitesse de montée en température selon la taille des éprouvettes pour éviter les gradients thermiques intenses dans les échantillons de béton, susceptibles de provoquer des contraintes élevées et des instabilités. Khoury [19] a comparé la résistance à la compression résiduelle de bétons chauffés à différentes vitesses (1°C/min et 0,2°C/min), montrant que les bétons chauffés plus lentement présentent une résistance inférieure. Ainsi, la durée d'exposition aux hautes températures est cruciale pour le comportement du béton, une montée en température plus lente favorisant une transformation chimique plus complète et une réduction significative de la résistance.

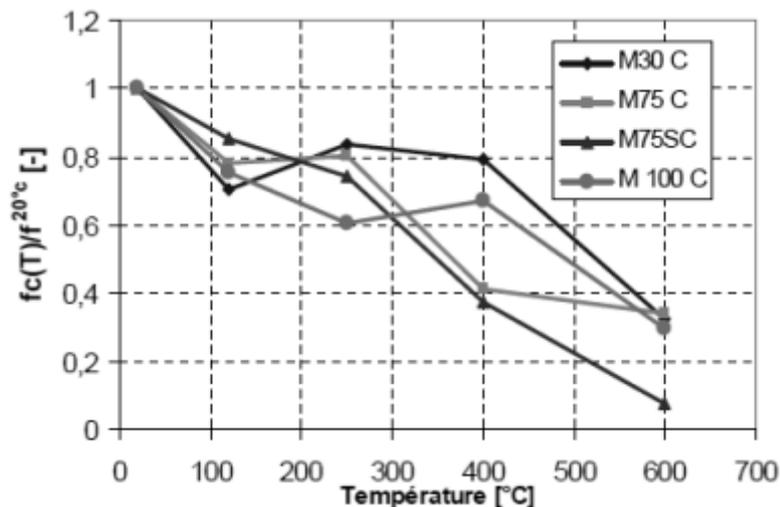


Figure 1. 3: Résistance à la compression relative pour les bétons. [20]

2. Résistance à la traction :

Peu de recherches ont été menées pour déterminer la résistance à la traction à haute température, en raison de la complexité des essais. La plupart des observations sur l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température sont réalisées après le refroidissement par fendage. [21] [22]

Les résultats de traction directe à chaud obtenus par Thelandersson (1971) [22] et Felicetti et al. (1985) [23] sont présentés, comparés aux valeurs proposées par l'EUROCODE 2 et le DTU Feu-Béton.

Toutes les valeurs déterminées se situent en dessous de celles du DTU. À partir du graphe suivant, tout comme pour la variation de la résistance en compression, il est observé que la résistance en traction diminue avec l'augmentation de la température. En effet, la résistance en traction du béton est affectée par les mêmes paramètres que pour la résistance en compression.

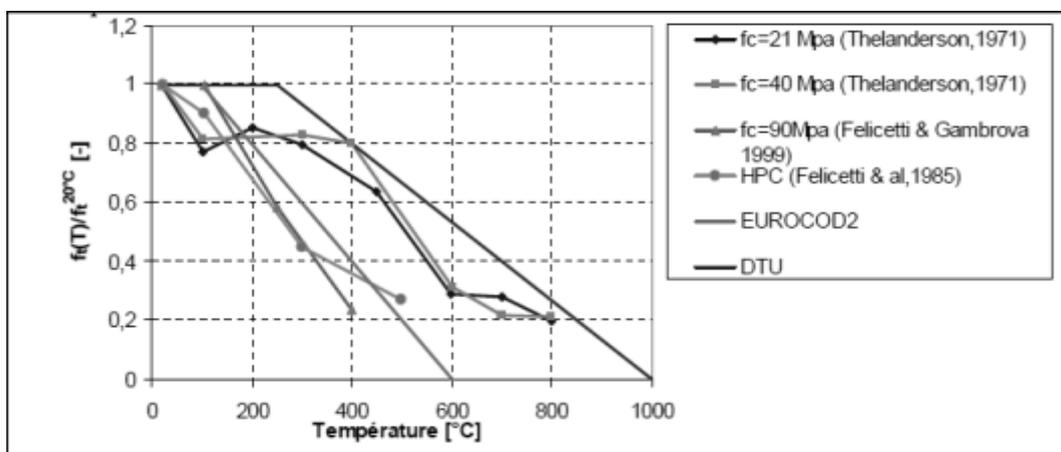


Figure 1. 4: Résultats des essais de résistance en traction [22][23]

3. Le module d'élasticité :

Le module d'élasticité statique peut être mesuré à chaud à la fin de la période de stabilisation ou en résiduel après le refroidissement, ce qui permet de suivre l'évolution de la rigidité du béton avec la température.

Noumowé [21] a réalisé des essais de module d'élasticité résiduel après un chauffage à 150°C, 300°C, 450°C et 600°C sur un béton ordinaire (38,1 MPa) et sur un béton à hautes performances (61,1 MPa). Il observe que la diminution du module d'élasticité des deux types de béton se produit de manière linéaire avec l'augmentation de la température. De plus, il constate que la courbe d'évolution du module élastique résiduel du béton à hautes performances reste très proche et semble similaire à celle du béton traditionnel. Des conclusions similaires ont été obtenues par Sabeur pour des mesures de module d'élasticité réalisées à chaud. [24]

Gaweska a réalisé des essais de module d'élasticité à chaud sur trois bétons de rapport E/C égal à 0,3, 0,4 et 0,5, chauffés aux températures respectives de 120°C, 250°C, 400°C et 600°C, avec

une vitesse de montée en température de 1°C/min. Malgré des modules initiaux différents, elle observe une baisse quasi identique du module d'élasticité à chaud normalisé. Pour cette gamme de température, elle conclut que le rapport E/C n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température. [20]

La comparaison du module d'élasticité mesuré à chaud et en résiduel, réalisée par Gaweska, montre une diminution plus marquée du module d'élasticité résiduel au-delà de 120°C. Cette différence entre les deux types d'essais semble augmenter avec l'élévation de la température. Le gradient thermique supplémentaire induit pendant la période de refroidissement et la réaction de réhydratation expansive de la chaux CaO semblent être responsables d'une fissuration supplémentaire du matériau. [20]

V. La durabilité des matériaux cimentaires :

La durabilité des bétons fait référence à leur capacité à résister aux conditions environnementales et aux agressions extérieures tout au long de leur durée de vie prévue. Elle est influencée par divers facteurs, notamment la composition du béton, les conditions de fabrication, les conditions environnementales et les charges appliquées.

Certains des principaux aspects de la durabilité des bétons comprennent :

- **Résistance aux cycles de gel-dégel** : Les bétons doivent pouvoir résister aux cycles répétés de gel et de dégel sans subir de dommages structurels dus à la formation de glace dans les pores.
- **Résistance à la corrosion des armatures** : La corrosion des armatures en acier peut affaiblir considérablement la structure du béton. Les bétons doivent être conçus pour empêcher l'eau et les ions chlorures d'atteindre les armatures métalliques.
- **Résistance chimique** : Les bétons peuvent être exposés à divers agents chimiques, tels que les sulfates, les acides et les sels, qui peuvent altérer leur structure. La résistance chimique est importante pour assurer la durabilité du béton dans des environnements corrosifs.
- **Résistance à l'abrasion** : Certains bétons sont soumis à des charges abrasives, telles que le trafic routier ou les charges mécaniques dans les structures industrielles. La résistance à l'abrasion est essentielle pour maintenir l'intégrité structurelle du béton dans de telles conditions.
- **Perméabilité** : La perméabilité du béton influence sa capacité à résister à la pénétration de l'eau, des gaz et des agents agressifs. Un béton moins perméable est généralement plus durable car il limite la migration des agents corrosifs à travers sa structure.
- **Adhérence** : Une bonne adhérence entre les agrégats, la pâte de ciment et les armatures renforce la résistance et la durabilité du béton en assurant une meilleure distribution des charges et une meilleure résistance aux fissures.
- **Rétrécissement et fissuration** : Les fissures dans le béton peuvent compromettre sa durabilité en permettant aux agents agressifs de pénétrer plus facilement. Minimiser le rétrécissement et contrôler la formation des fissures est crucial pour garantir la durabilité à long terme du béton.

En intégrant ces considérations lors de la conception, de la fabrication et de l'entretien des structures en béton, il est possible d'améliorer significativement leur durabilité et leur longévité.

VI. Propriétés physiques :

1. Perte masse du béton :

Lorsqu'un béton est soumis à une sollicitation thermique à haute température, il subit une perte de masse en raison de la libération de l'eau libre contenue dans les capillaires et de l'eau liée présente dans les hydrates, qui s'évaporent et s'échappent à travers les pores. Il est important de faire la distinction entre la perte de masse des bétons mesurée en régime permanent (en maintenant la température fixe) et celle mesurée en régime transitoire (en maintenant la vitesse de chauffage) lors des cycles thermiques. [25]

Lors d'une sollicitation thermique en régime permanent, la température à l'intérieur de l'enceinte chauffante est fixée dès le début et ne varie pas pendant le chauffage. Pendant ce type d'essai, la perte de masse des échantillons se déroule en deux étapes de manière logarithmique vers un seuil (**voir figure 1.5**). Au cours de la première étape, le béton perd rapidement l'eau contenue dans les capillaires, puis la perte de masse ralentit progressivement jusqu'à atteindre un seuil limite de déshydratation lors de la seconde étape. La température seuil appliquée pendant ce type d'essai est de 105°C, correspondant à la limite conventionnelle de départ de l'eau libre contenue dans les matériaux. [25]

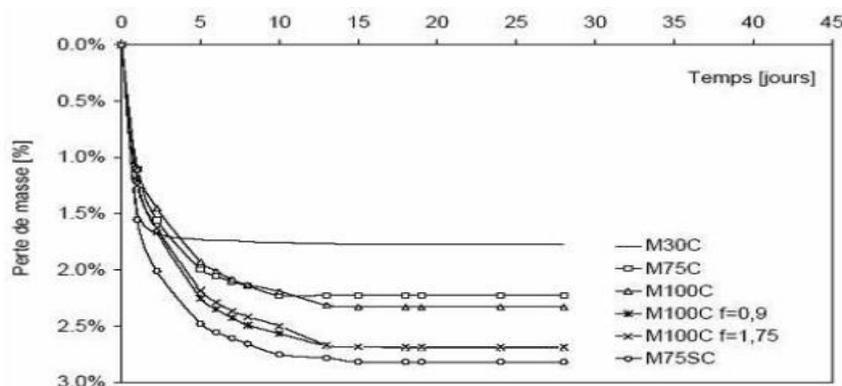


Figure 1. 5: Perte de masse des éprouvettes de béton étuvées à 105°C. [15]

Pendant les essais en régime transitoire, une cinétique de montée en température est appliquée, passant de la température ambiante à la température cible. La littérature identifie trois phases d'évolution de la perte de masse, caractérisées par une variation régulière du poids jusqu'à ce qu'une variation significative de la perte hydrique du béton soit observée. Les limites de ces phases varient selon les auteurs, mais de manière générale :

- Entre la température ambiante et 120°C : Une faible variation de poids (< 1%) est observée, principalement due au départ de l'eau libre des capillaires. Cette eau migre à travers les pores et s'évapore. [26]

- De 120°C à 300°C : On observe une augmentation de la perte de poids des bétons. Cette variation de masse est attribuée au départ de l'eau liée des hydrates, principalement du gel de C-S-H. C'est dans cette plage de température que le taux de séchage atteint un maximum, correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable. [27]
- De 300°C à 600°C : Le phénomène de déshydratation du béton ralentit. C'est pendant cette phase que se produit la déshydratation de la Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et du carbonate de calcium (CaCO_3). [11]

2. Évolution de la porosité :

Lorsque le béton est exposé à des températures élevées, les modifications physiques et chimiques qui se produisent au sein de ses phases solides entraînent des changements dans sa porosité totale ainsi que dans la distribution des tailles de pores.

Un travail expérimental approfondi sur l'évolution de la porosité a été réalisé par Hager (2004) sur trois types de bétons à hautes performances (BHP) : M100C, M75SC, M75C, ainsi que sur un béton ordinaire (BO) : M30C. La technique de porosimétrie au mercure a été utilisée pour déterminer la distribution volumique cumulée des rayons des pores ainsi que la distribution des tailles de pores. [20]

L'analyse révèle qu'après exposition à des températures élevées, le béton présente une augmentation significative (environ quatre fois) de sa porosité totale ainsi que de la taille des pores. Cette augmentation de porosité est principalement due à la déshydratation du gel C-S-H, aux contraintes thermiques et à l'incompatibilité entre le retrait de la pâte et la dilatation des granulats. [28]

D'une façon générale, pour les quatre bétons, la distribution des tailles de pores à 600°C est décalée par rapport à celle de 20°C avec une augmentation d'intensité des pics. Ceci traduit le fait qu'une augmentation de température induit une augmentation des tailles des pores.

4.3 Variation de la densité apparente

Parallèlement à la porosité à l'eau, il est possible de déterminer la densité apparente des bétons. A travers la même étude, la variation de la densité avec la température a été étudiée (Voir figure 1.6). Les auteurs constatent une faible diminution de la densité avec la température. [29]

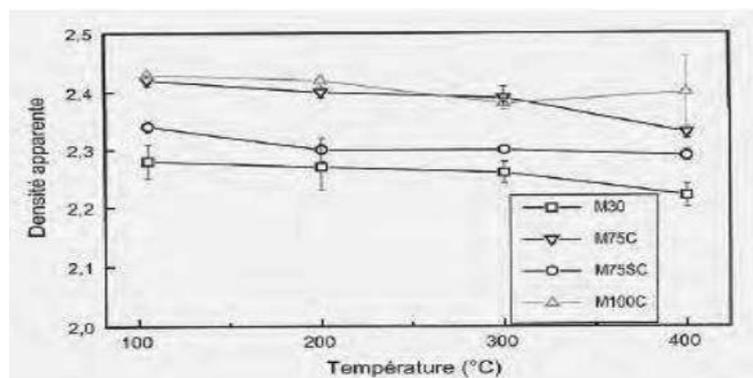


Figure 1. 6: Densité apparente des bétons du Projet National BHP.

VII. Vulnérabilité thermique du béton :

1. Impact des variations thermiques sur la durabilité du béton :

Les variations thermiques peuvent avoir un impact significatif sur la durabilité du béton. Voici quelques-uns des principaux effets :

- **Fissuration :** Les changements rapides de température peuvent entraîner des contraintes thermiques dans le béton, ce qui peut conduire à des fissures. Ces fissures permettent à l'eau et à d'autres agents agressifs de pénétrer dans le béton, ce qui peut accélérer la détérioration du matériau.
- **Expansion et contraction :** Les variations de température provoquent l'expansion et la contraction du béton. Cela peut entraîner des mouvements des éléments structurels, des déformations et des contraintes internes, ce qui peut altérer la performance et la durabilité du béton sur le long terme.
- **Dégradation des hydrates :** Les températures élevées peuvent provoquer la déshydratation des hydrates de ciment, ce qui affaiblit la structure interne du béton. Cela peut entraîner une perte de résistance et une augmentation de la perméabilité, rendant le béton plus vulnérable à la détérioration par des agents externes tels que l'eau et les produits chimiques.
- **Altération des propriétés mécaniques :** Les variations thermiques peuvent affecter les propriétés mécaniques du béton, telles que sa résistance à la compression, sa résistance à la traction et son module d'élasticité. Ces changements peuvent compromettre la performance structurale du béton et réduire sa durabilité.
- **Effet sur les armatures :** Les variations thermiques peuvent également avoir un impact sur les armatures métalliques incorporées dans le béton. Des températures élevées peuvent provoquer une expansion des armatures, ce qui peut entraîner des tensions dans le béton et éventuellement des défaillances de l'adhérence entre le béton et les armatures.

En résumé, les variations thermiques peuvent affaiblir la structure du béton et compromettre sa durabilité à long terme en favorisant la fissuration, en altérant les propriétés mécaniques et en augmentant sa perméabilité aux agents agressifs. Il est donc essentiel de prendre en compte les effets des variations thermiques lors de la conception, de la construction et de l'entretien des structures en béton afin de garantir leur durabilité et leur performance à long terme.

2. Les facteurs contribuant à l'instabilité thermique :

Plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'instabilité thermique du béton :

- **Composition du béton :** La composition du béton, y compris le type de ciment, les types et proportions d'agréats, ainsi que l'ajout éventuel d'adjuvants ou d'additions minérales, peut influencer sa réponse aux variations de température. Par exemple, certains types de ciment peuvent être plus sensibles aux changements de température que d'autres, et la présence d'adjuvants peut modifier les propriétés thermiques du béton.
- **Rapport eau/ciment (E/C) :** Le rapport eau/ciment influence la porosité et la perméabilité du béton, ce qui peut affecter sa résistance aux variations thermiques. Un

rapport E/C élevé peut entraîner une plus grande porosité et une plus grande vulnérabilité aux dommages thermiques.

- **Taille et distribution des agrégats** : La taille et la distribution des agrégats dans le béton peuvent influencer sa réponse aux variations de température. Les bétons contenant des agrégats de tailles différentes peuvent présenter une réponse thermique non uniforme, ce qui peut entraîner des contraintes internes et des fissures.
- **Présence d'armatures métalliques** : Les armatures métalliques incorporées dans le béton peuvent réagir différemment aux variations de température par rapport au béton environnant, ce qui peut entraîner des contraintes internes et des défaillances de l'adhérence entre le béton et les armatures.
- **Humidité** : La présence d'humidité dans le béton peut influencer sa réponse thermique. L'eau présente dans les pores du béton peut se dilater ou se contracter en fonction de la température, ce qui peut contribuer à des tensions internes et à des dommages thermiques.
- **Vitesse de refroidissement** : La vitesse à laquelle le béton est refroidi peut également influencer sa réponse thermique. Des taux de refroidissement rapides peuvent entraîner des gradients de température élevés à travers le matériau, ce qui peut favoriser la formation de fissures et d'autres dommages thermiques.

En tenant compte de ces facteurs lors de la conception, de la construction et de l'entretien des structures en béton, il est possible de réduire les risques d'instabilité thermique et d'améliorer la durabilité et la performance à long terme du béton.

VIII. CONCLUSION :

Ce chapitre explore les principales avancées des matériaux cimentaires exposés à des cycles de traitement thermique, telles que documentées dans la littérature. Un aperçu général sur les bétons et mortiers est aussi abordé dans cette partie de recherche bibliographique. Les prochains chapitres de ce mémoire seront consacrés à l'étude pratique et expérimentale.

CHAPITRE 2 :
CARACTERISATION DES
MATERIAUX ENTRANT
DANS LA COMPOSITION
DES MORTIERS

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

I. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on vise à caractériser les constituants indispensables pour la formulation d'un mortier qui sont : le sable et le ciment, afin de garantir la qualité de ces matériaux et qu'ils répondent aux normes exigées en assurant la résistance et la durabilité du matériau ainsi élaboré.

II. Essais sur le ciment :

Le ciment utilisé pour la confection de nos matériaux (éprouvettes de mortier) est le ciment portland artificiel CPA - CEM I 42.5 N-LH/SR5 de la cimenterie Ain El Kebira, wilaya de Sétif, sa fiche technique est donnée par la figure 2.1 ci-dessous.

Conformément à la norme NA 442 édition 2013

| COMPOSITIONS CHIMIQUES Norme (EN 196-2) | | | Essais physiques Norme (EN 196-3 et 6) | | Garantie NA 442 | Mesures |
|--|--------|---------|---|------------------------|--------------------|---------|
| ELEMENTS | | Mesures | P.S | (g / Cm ³) | | 3.22 |
| SiO ₂ -T | % | 20.82 | SSB | cm ² /g | | 3318 |
| Al ₂ O ₃ | % | 4.37 | Temps De Prise Min | Début | ≥ 60 | 211 |
| Fe ₂ O ₃ | % | 5.34 | | Fin | | 316 |
| CaO-T | % | 63.38 | Expansion mm | A. Chaud | ≤ 10 | 0.09 |
| MgO | % | 1.42 | | | | |
| SO ₃ | ≤ 3 % | 2.15 | Refus % | 45 μ | | 22.06 |
| K ₂ O | % | 0.27 | S.C.A.E.K | | | 24.52 |
| Na ₂ O | % | 0.13 | | | | |
| Cl | ≤ 0,1% | 0.000 | | | | |
| P.A.F. | % | 0.77 | | | | |
| CaO Libre (PT207 CERILH 1970) | % | 0.64 | | | | |
| R.Insoluble | % | 0.80 | | | | |
| | | | | | | |
| COMPOSITION POTENTIELLE DU CIMENT (BOGUE) | | | CARACTERISTIQUES MECANIQUE Norme (196-1) | | | |
| C ₃ S | % | 60.13 | R. Flexion MPa | 02 JOURS | | 3.8 |
| C ₂ S | % | 12.06 | | 28 JOURS | | 7.5 |
| C ₃ A | % | 2.55 | R. Compression MPa | 02 JOURS | ≥ 10 | 16.4 |
| C ₄ AF | % | 16.23 | | 28 JOURS | ≥ 42.5 | 46.4 |

Figure 2. 1: Composition chimique et caractéristiques du ciment.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelles et en utilisant des normes d'essais, ci-dessous quelques essais réalisés :

1. Détermination des masses volumiques du ciment :

La masse volumique du ciment est définie comme étant le rapport masse/volume. La variation des valeurs de ces masses volumiques dépend du type de ciment et de sa finesse modulante.

La détermination des masses volumiques permet d'évaluer les masses volumiques apparente et absolue du ciment, ainsi que d'optimiser l'utilisation du ciment et garantir la conformité aux normes.

1.1 Détermination de la masse volumique apparente : EN 459-2

La masse volumique du ciment est le rapport entre la masse du ciment et le volume apparent correspondant.

1.1.1 Équipement utilisé :

Pour réaliser l'essai, on a utilisé le matériel suivant :

- Un récipient d'une forme cylindrique.
- Une règle métallique à araser.
- Un entonnoir porté par un trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile.
- Une balance.



Figure 2. 2: essai de la masse volumique apparente.

1.1.2 Mode opératoire :

- On pèse un récipient cylindrique à vide et noter M_1 .
- On place le récipient au-dessous d'un entonnoir porté par un trépied.
- On verse ensuite le ciment en petites quantités et la faire passer dans l'entonnoir à l'aide d'une spatule.
- Araser avec une règle métallique.
- On pèse le contenu, et noter M_2 .
- On calcul par la suite la masse volumique apparente du ciment.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

$$\rho = \frac{M2 - M1}{V}$$



Figure 2. 3: Détermination de la masse volumique apparente du ciment.

1.1.3 Résultats obtenus :

Tableau 2. 1: Mesure de la masse volumique apparente du ciment.

| | Volume du récipient (cm ³) | Masse du récipient vide (g) | Masse du récipient plein (gr) | ρ_{app} | Moyenne (gr/cm ³) |
|-----------|--|-----------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| Mesure 01 | 1051,96 | 485,63 | 1600,37 | 1,0596 | 1,06 |
| Mesure 02 | | 485,63 | 1604,45 | 1,0635 | |
| Mesure 03 | | 485,63 | 1599,63 | 1,0589 | |

1.2 Détermination de la masse volumique absolue : EN 196-60

La masse volumique absolue est le rapport entre la masse du ciment et le volume absolu correspondant.

1.2.1 Matériel utilisé :

Le matériel suivant été utilisé pour exécuter cet essai :

- Un densitomètre le Chatelier.
- Une balance.
- Un entonnoir.
- Un agitateur en verre.



Figure 2. 4:Matériel utilisé pour l'essai de masse volumique absolue du ciment.

1.2.2 Mode opératoire :

- On introduit l'essence dans le densimètre à l'aide d'un entonnoir jusqu'au niveau $V_1=0$.
- On pèse le densimètre rempli d'essence et noter M_1 .
- On pèse 60g du ciment.
- On introduit le ciment très lentement dans le densimètre en vérifiant qu'il ne se bloque pas, et on note V_2
- On pèse le densimètre et on note M_2 .
- On calcul la masse volumique absolue du ciment : $\rho_{cs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$



Figure 2. 4: Essai de volume absolu du ciment.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

1.2.3 Expression des résultats :

Tableau 2. 2: Mesure de la masse volumique absolue du ciment.

| | M1 (gr) | M2 (gr) | V2 (cm ³) | Résultat (gr/cm ³) |
|--------|------------|------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Mesure | 354,39 | 412,69 | 17,5 | 3,331 |

2. Essai de prise du ciment :

2.1 Durée du début et fin de prise : EN 196-3

La pâte du ciment hydraté par un volume d'eau adéquat, donne une texture plastique qui se solidifie au cours de temps. Cet essai a l'objectif de déterminer le temps de début et fin de prise. L'essai doit être exécuté dans une salle de température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et d'une humidité relative $\geq 90\%$.



Figure 2. 5: Appareil de Vicat.

2.1.1 Équipement utilisé :

- Un malaxeur normalisé (EN 196-1).
- Un appareil de Vicat.
- Une aiguille d'une épaisseur 1,13 mm.
- Un moule tronconique de dimensions : $h = 40\text{mm}$, $d = 70$ à 80mm .
- Une plaque en verre.
- Une balance.
- Une truelle.
- Un chronomètre.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

2.1.2 Déroulement de l'essai :

- On pèse 400 gr du ciment.
- On pèse 100 gr d'eau.
- On introduit le ciment puis l'eau dans la cuve du malaxeur.
- Démarrer le chronomètre à l'instant où la dernière goutte d'eau tombe dans la cuve.
- Malaxer.
- On introduit la pâte rapidement dans le moule tronconique posé sur une plaque en verre.
- On enlève l'excès de la pâte par une truelle.
- On ramène l'aiguille à la surface de l'échantillon puis la relâcher sans vitesse initiale.
- On attend 30s puis mesurer la distance « d » et noter l'heure.
- On nettoie l'aiguille et la remettre à sa position initiale.
- Répéter l'opération à un intervalle de temps.

2.1.3 Résultats :

Tableau 2. 3: Détermination du temps de début et fin de prise.

| | |
|-------------------------|------------|
| Temps de début de prise | 1h54min13s |
| Temps de fin de prise | 4h54min13s |

2.1.4 Interprétation des résultats :

Le début de prise se manifeste après «1h54min13s », ce ciment est donc classé en catégorie des liants à prise lente.

2.2 Essai de consistance : EN 193-3

La maniabilité de la pâte de ciment se fait caractériser par l'essai de consistance en utilisant l'appareil de Vicat qui a un objectif de définir « **une consistance normalisée** » ou « **la quantité d'eau optimale pour gâcher un liant** ». Cet essai est déterminé en mesurant l'enfoncement de la pâte sous l'effet d'une charge constante d'une tige cylindrique.

2.2.1 Matériels utilisés :

- Un appareil de Vicat.
- Un malaxeur normalisé (EN 196-1).
- Une sonde de 10mm de diamètre.
- Un moule tronconique de dimensions : h = 40mm, d = 70 à 80 mm.
- Une plaque en verre.
- Une balance.
- Une truelle.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

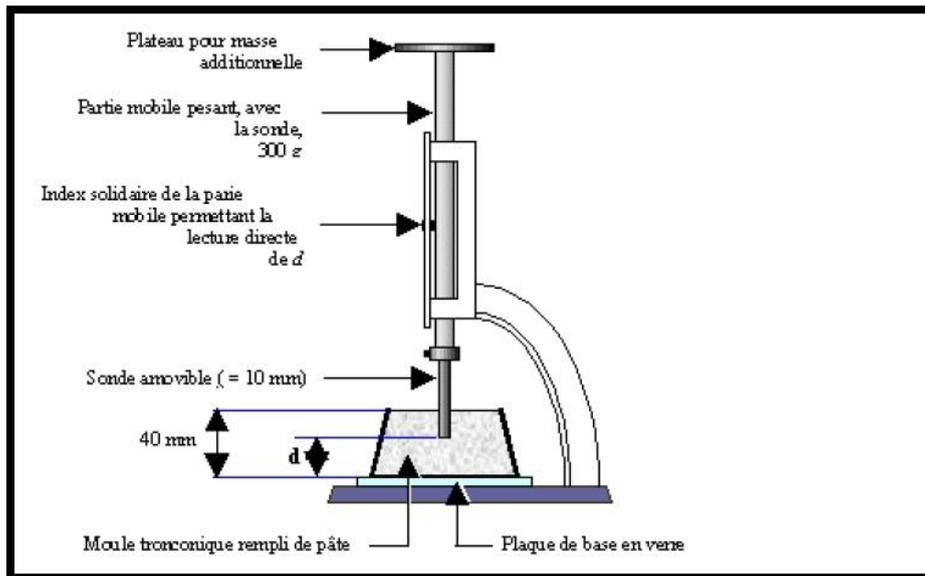


Figure 2. 6: Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance.

2.2.2 Protocole de l'essai :

- On pèse 500 gr du ciment.
- On pèse 125 gr d'eau.
- On introduit le ciment puis l'eau dans la cuve du malaxeur.
- On procède au malaxage pendant 90s à une vitesse lente.
- Arrêter pour 15s et nettoyer les parois de la cuve.
- On remet le malaxeur en vitesse lente pour 90s.
- On introduit la pâte rapidement dans le moule tronconique posé sur une plaque en verre.
- On enlève l'excès de la pâte par une truelle.
- On ramène la sonde après 4 minutes à la surface de l'échantillon puis la relâcher sans vitesse initiale.
- Attendre 30s puis mesurer la distance « d » et noter l'heure.
- Répéter l'opération avec un rapport E/C différent, si $d \neq 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ (c.à.d $d > 7\text{mm}$ ou $d < 5\text{mm}$).

2.2.3 Expression des résultats :

Tableau 2. 4: Résultats d'essai de consistance du ciment.

| N° de l'essai | Rapport E/C | D (mm) |
|---------------|-------------|--------|
| 1 | 0,25 | 35 |
| 2 | 0,27 | 31 |
| 3 | 0,30 | 16 |
| 4 | 0,325 | 6 |

Ce tableau présente les résultats d'un essai de consistance du ciment en fonction du rapport Eau/Ciment (E/C) et de la pénétration (D en mm). À mesure que le rapport E/C augmente de

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

0,25 à 0,325, la pénétration diminue de 35 mm à 6 mm. Cela indique que la consistance du ciment devient de plus en plus épaisse et moins fluide avec l'augmentation du rapport E/C. Ainsi, un rapport E/C plus élevé signifie moins d'eau relative au ciment, rendant le mélange plus rigide et moins fluide.

3. Essai d'expansion : EN 196-3

La chaux, la magnésie et le gypse présent dans les ciments sont des éléments expansifs qui risquent de diminuer la durabilité de la structure et mener à l'éclatement du béton et mortier. L'essai d'expansion à chaud permet de prévenir ces risques en cas de doute, en évaluant l'augmentation de volume susceptible d'être provoquée.



Figure 2. 7: Essai d'expansion du ciment.

3.1 Équipement nécessaire :

- Une truelle.
- Un récipient.
- Une balance.
- Appareil « le Chatelier » : moules en laiton élastique de 0,5 mm d'épaisseur ; contiennent deux aiguilles soudées de part et d'autre.
- Un bain d'eau équipé d'un dispositif de chauffage dans lequel il est envisageable d'immerger les éprouvettes.

3.2 Conduite de l'essai :

- On confectionne une pâte de ciment : 200 gr de ciment + 50 gr d'eau.
- On introduit la pâte dans 3 moules.
- On conserve les moules dans une salle humide pendant 24h.
- On mesure l'écartement entre les pointes des aiguilles des trois moules (A).
- On met les moules dans le bain d'eau, ce bain d'eau sera maintenu à la température d'ébullition pendant $3h \pm 5 \text{ min}$.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

- On retire les éprouvettes et on mesure l'écartement (C).
- La stabilité est caractérisée par la valeur C-A exprimé en mm à 0,5 mm près :

$$\textit{stabilité (ST)} = (C - A) \pm 0,5\textit{mm}$$

3.3 Résultats :

Tableau 2. 5: Résultats d'essai d'expansion.

| Essai | 24h dans une salle humide (A) | 3h dans un bain d'eau chauffée (C) | ST (mm) |
|-------|-------------------------------|------------------------------------|---------|
| 1 | 4,94 | 6,15 | 1,21 |
| 2 | 2,39 | 4,7 | 2,31 |
| 3 | 2,71 | 4,05 | 1,34 |

On prend la moyenne des 3 moules.

D'après la norme, l'expansion doit être inférieur à 10 mm, pour toutes les classes de ciments, et c'est le cas pour le ciment étudié dans cet essai : **ST=1,62 mm ± 0.5mm.**

III. Les essais sur les granulats (sable) :

Le sable utilisé dans notre étude est un sable 0/4 de la carrière EL MEHIR, COSIDER, wilaya de Bordj-Bou-Arreridj.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

1. Analyse granulométrique (NF EN 933-1) :

Cet essai nous permet de :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions des grains de même dimension (% pondéral).
- Déduire le module de finesse (MF).

1.1 Mode opératoire :

- On sèche la prise d'essai à une température de (110 ± 5) °c jusqu'à masse constante M1.
- On réalise ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments de dimension inférieur à 0,063 mm.
- Poursuivre le lavage jusqu'à ce que l'eau passant à travers le tamis 0,063 mm soit claire.
- On sèche l'échantillon lavé à (110 ± 5) °c.
- On laisse refroidir, puis peser jusqu'à masse constante M2.
- Le matériau séché est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas vers le haut.
- Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé, soit R1.
- Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé, soit R2 la somme de R1+R2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis.
- Cette opération est poursuivie pour tous les tamis, ceci permet de connaître la masse des refus cumulés Rn.
- La somme des refus cumulés mesuré sur les différents tamis et du tamisât sur le fond doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de la colonne, la perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder de plus de 1% du poids total de l'échantillon.
- On calcule le pourcentage de fines (**f**) passant à travers le tamis de 0,063 mm.



Figure 2. 8: Analyse granulométrique.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

Les résultats d'analyse granulométrique pour ce sable étudié sont représentés dans le tableau et la figure ci-après :

Tableau 2. 6 : Analyse granulométrique du sable 0/4.

| Ouvertures des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (g) | Refus cumulés (%) | Tamisât cumulés (%) |
|---------------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| 6,3 | 3 | 0,18 | 100 |
| 4,0 | 30 | 1,79 | 98 |
| 2,0 | 492 | 29,3 | 71 |
| 1,0 | 822 | 48,96 | 51 |
| 0,5 | 1077 | 64,14 | 36 |
| 0,315 | 1178 | 70,16 | 30 |
| 0,25 | 1212 | 72,18 | 28 |
| 0,125 | 1337 | 79,63 | 20 |
| 0,063 | 1436 | 85,53 | 14 |

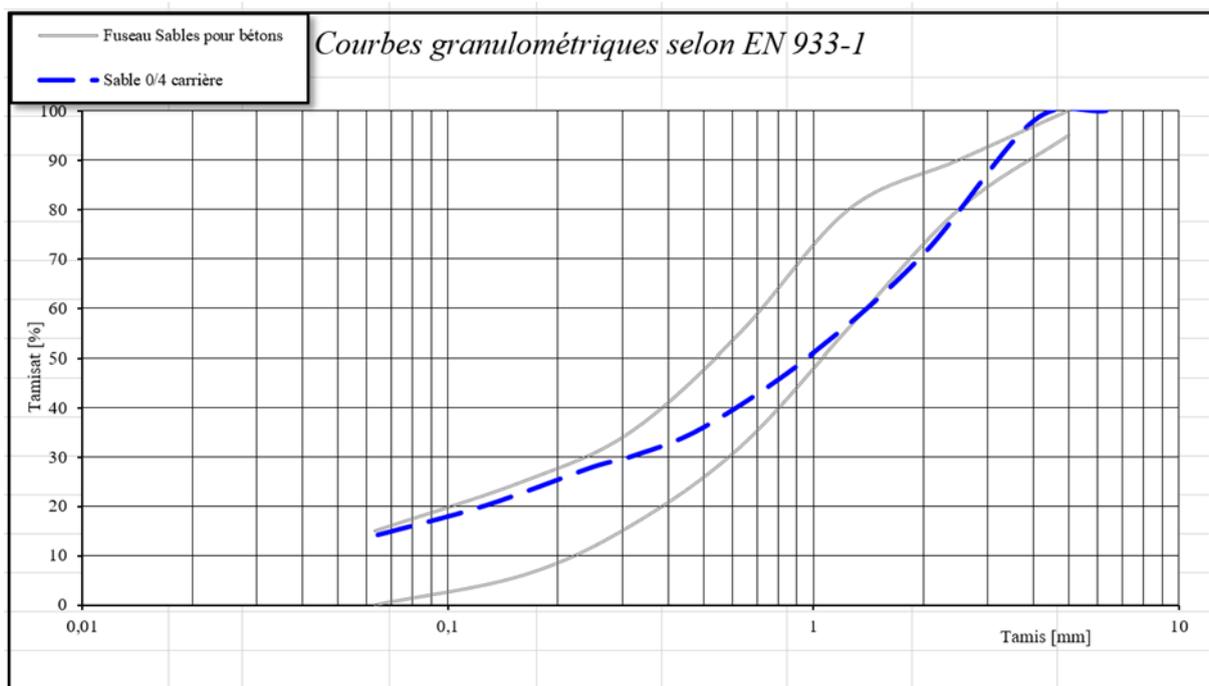


Figure 2. 9: Courbes granulométriques selon EN 933-1.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

$$\text{On a : } f = \frac{(1-M2)+P}{M1} * 100 = \mathbf{14,41\%}$$

Avec :

- ✓ $M1$: Masse sèche (1679 g).
- ✓ $M2$: Masse sèche après lavage (1438 g).
- ✓ P : Matériau dans le réceptacle ($P = 1$).
- ✓ f : Pourcentage de fines.

2. Détermination de la propreté :

2.1 Equivalent sable (NF EN 933-8) :

Il consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers et déterminer un coefficient d'équivalent qui quantifie la propreté du sable [30].

2.1.1 Détermination de la teneur en eau W (NF P 94-050) :

A. Mode opératoire :

- On préchauffe le four à une température comprise entre 105°C et 110°C.
- On prend un échantillon représentatif de sable et on le pese avec une balance précise.
- On note cette masse comme M_s .
- On place le sable dans le plat ou le contenant résistant à la chaleur et on l'étale uniformément.
- On couvre le plat avec du papier aluminium pour éviter toute perte d'eau par évaporation.
- On met le plat dans le four préchauffé et on le laisse sécher pendant environ 24 heures.
- Après le temps de séchage, on sort le plat du four et on le laisse refroidir dans une atmosphère contrôlée pour éviter la condensation d'humidité.
- Une fois refroidi, on pèse à nouveau le plat avec le sable séché. Notez cette masse comme M_h .

La formule de calcul est :

$$w = \frac{M2 - M3}{M3 - M1} * 100$$

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

Avec :

- ✓ Mh : la masse humide.
- ✓ Ms : la masse sèche.

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 2. 7: Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4.

| N° échantillon | Echantillon 1 | Echantillon 2 |
|----------------------------|---------------|---------------|
| M1 (masse tare) (g) | 241.16 | 237.94 |
| M2 (ech humide + tare) (g) | 559.19 | 538,01 |
| M3 (ech sec+tare) (g) | 555.83 | 534,92 |
| La teneur en eau W (%) | 1.07 | 1.04 |
| La moyenne de W (%) | 1.055 | |

2.1.2 Détermination de la teneur en fines f (Equivalent de sable) (NF EN 933-8) :

A. Mode opératoire :

- Réduire l'échantillon de laboratoire conformément à la norme EN 932-2 afin d'obtenir deux sous échantillons.
- A partir du premier sous échantillon, on prend deux prises d'essai qui serviront pour la détermination des teneurs en eau et en fines.
- On procède au séchage de la première prise d'essai dans une étuve a (110 ± 5 °c), afin de déterminer et d'enregistrer la teneur en eau w.
- On pèse et on enregistre la masse de la seconde prise d'essai M1, puis on lave sur tamis 0.063 mm, tout en séchant les particules retenues et on pèse et on enregistre M2.
- On détermine la teneur en fines f selon la relation cite en bas.
- Si la teneur en fines de la fraction 0/2 mm est supérieure à 10%, les particules lavées retenues sur le tamis 0.063 mm sont utilisées comme sable correcteur.
- On réduit le second sous échantillon afin d'obtenir deux éprouvettes de masse Mt.
- On remplit les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'à premier trait.
- On verse la quantité du sable Mt en veillant à éliminer les bulles d'air et laisser reposer 20 min. On ferme les éprouvettes et les agiter, mouvement rectiligne et horizontal de 20 cm d'amplitude, 90 aller et retour en 30s.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

- On lave et on remplit les éprouvettes avec le tube laveur pour cela rincer le bouchon en dessus de l'éprouvette, faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts, on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette, on lave le sable en faisant
- Descendre et remonter lentement le tube laveur dans la masse du sable pour faire remonter les particules fines de la solution supérieure.
- On sort le tube laveur lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur puis laisser reposer 20 min.
- On mesure la hauteur du flocculat pour chaque éprouvette h_1 au millimètre près.
- On détermine la hauteur des sédiments h_2 au millimètre près en mesurant la distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon.



Figure 2. 10: Essai d'équivalent de sable.

La formule de calcul est :

$$f = \frac{M_2(100+W)}{M_1} \times 100$$

Avec :

M2 : la masse après lavage et séchage.

M1 : la masse de l'échantillon préparé.

W : la teneur en eau.

Les résultats sont représentés dans les tableaux ci-dessous :

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

Tableau 2. 8: Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/4.

| Teneur en eau sous échantillon N°1 | | |
|---|----------------------|----------------------|
| W = 1,18% | | |
| N° échantillon | Echantillon 1 | Echantillon 2 |
| Masse humide M1 (g) | 849.20 | 62.88 |
| Masse sèche après lavage M2 (g) | 677.29 | / |
| Masse du sable correcteur (g) | / | 57.86 |
| La teneur en fines f (%) | 19.31 | / |
| La masse de chaque éprouvette MT (g) | 120.74 | |

⇒ La formule du calcul d'équivalent de sable est donnée comme suivant :

$$Esp = \frac{h2}{h1} \times 100$$

Avec :

h2 : la hauteur totale du sable par piston.

h1 : la hauteur totale du flocculat.

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau 2. 9: Résultats d'équivalent de sable.

| Eprouvette s | Hauteur totale du flocculat h1 (mm) | Hauteur r du sable par piston h2 (mm) | Expression des résultats | Moyenn e | Spécification | Nature de l'échantillon |
|---------------------|--|--|---------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------------------|
| | | | ESp (%) | ESpmoy (%) | | |
| 1 | 10.4 | 8.1 | 77.88 | 78.19 | > 60% | Sable légèrement argileux |
| 2 | 10.7 | 8.4 | 78.5 | | | |

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

2.2 Bleu de méthylène (NF EN 933-9) :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins d'un sable à absorber du bleu de méthylène [31]. Il a pour but de révéler la présence d'éléments fins de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

2.2.1 Mode opératoire :

- Les échantillons de laboratoire doivent être réduits conformément à l'EN 933-2 pour obtenir deux sous échantillons de 200 g minimum de la fraction 0/2 mm.
- On sèche l'échantillon 1 à $110 \pm 5^\circ\text{C}$ et on calcule la teneur en eau.
- On pèse une masse M_0 de sous échantillon 2 de plus 200 gr pour la fraction 0/2 mm.
- On place la masse M_1 dans un bécher contenant 500 ± 5 ml d'eau déminéralisée.
- On met en agitation à 600 tr/min pendant 5 min l'ensemble (eau+m1).
- On introduit dans le bécher une dose de 5ml de solution de colorant et on procède à l'agitation à 400 ± 40 tr/min pendant au moins une minute et on effectue un test à la tâche (prélever à l'aide d'une baguette de verre une goutte en suspension et déposer la sur le papier filtre pour obtenir un dépôt qui doit avoir un diamètre de 8 à 12 mm).
- Si après ajout de 5 ml de solution l'auréole n'apparaît pas, on effectue des additions de 5 ml tout en agitant pendant 1 min et faire des tests à la tâche jusqu'à apparition de l'auréole.
- On continue l'agitation sans ajout de solution et on effectue des tests à la tâche toutes les minutes pendant 5 min.
- Si l'auréole persiste toujours pour les 5 tâches le test est positif.
- Sinon si l'auréole disparaît au bout de la 5^{ème} tâche, on ajoute 2 ml de colorant et faire le test à tâche si l'auréole disparaît au bout de la 5^{ème} tâche, on ajoute 5 ml de colorant et faire le test à la tâche.
- On enregistre le volume total de solution de colorant V_1 , on ajoute pour obtenir une auréole visible pendant 5min à 1ml près.

La valeur de bleu méthylène est donnée par la formule suivante :

$$VB = \frac{V}{M}$$

Avec :

V : volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du **test positif**.

M : masse sèche de la prise de l'essai.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

Tableau 2. 10: Résultats de l'essai au bleu de méthylène.

| Echantillon | Masse initiale de la prise d'essai (g) | Volume du bleu introduit (cm ³) | Valeur du bleu VB (cm ³ /g) | Spécification | Nature de l'échantillon |
|---------------|--|---|--|---------------|-------------------------|
| Sable mélange | 200 | 7 | 0.35 | < 1 | Sable non argileux |



Figure 2. 11: Essai au bleu de méthylène.

3. Détermination des masses volumiques :

3.1 Détermination de la masse volumique réelle (absolue) (NF EN 1097-6) :

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le sable sans tenir compte des vides pouvant exister entre ou bien dans les grains [32].

3.1.1 Mode opératoire :

- La masse de la prise d'essai de 0,063/4 mm ne doit pas être inférieure à 300g.
- On lave la prise d'essai sur un tamis de 4mm et de 0,063 mm afin d'éliminer les grains les plus fins.
- Immerger la prise d'essai préparée dans le pycnomètre rempli d'eau à $(22\pm 3^{\circ}\text{C})$ et éliminer l'air occlus en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre en position inclinée, placer le pycnomètre dans le bain d'eau et maintenir la prise d'essai à une température de $(22\pm 3^{\circ}\text{C})$ pendant $(24\pm 0,5)$ h.
- On fait déborder le pycnomètre en rajoutant de l'eau et placer le couvercle en évitant de piéger de l'air dans le récipient.
- Puis on sèche l'extérieur de pycnomètre et le peser (M2), noter la température de l'eau.
- On laisse décanter la majeure partie de l'eau recouvrant la prise d'essai et vider le pycnomètre sur un plateau.
- Puis on sèche l'extérieur du récipient et le peser (M3), noter la température de l'eau la différence entre les mesures de la température de l'eau du pycnomètre pour les pesées M2 et M3 ne doit pas dépasser 2°C .
- Etaler la prise d'essai imbibé pour obtenir une couche régulière au fond du plateau
- On expose les granulats à un faible courant d'air chaud pour évaporer l'humidité en surface.
- On laisse l'échantillon refroidir à la température ambiante tout en le remuant.
- Pour s'assurer que le séchage de surface est atteint, poser le moule tronconique sur le fond du plateau le plus grand diamètre dirigé vers le haut, remplir le moule sans tassement avec une partie de la prise d'essai en cours de séchage, introduire le pilon dans l'orifice supérieur du moule tronconique jusqu'à ce qu'il vienne en contact du sable, tasser la surface de celui-ci à 25 reprises en laissant le pilon tomber sous son propre poids, ne pas rajouter de granulats après les avoir tassés.
- On soulève doucement le moule, si le cône de granulat ne s'effondre pas, il faut poursuivre le séchage et recommencer l'essai jusqu'à ce que le cône s'effondre une fois le moule retiré.
- Peser la prise d'essai saturée et séchée en surface (M1).
- On sèche les granulats dans une étuve ventilée à une température de $(110\pm 5^{\circ}\text{C})$ jusqu'à masse constante et laisser refroidir à température ambiante et peser (M4).

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS



Figure 2. 12: Détermination de masse volumique absolue du sable.

La formule de calcul est donnée comme suivant :

$$\rho_s = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

Avec :

M2 : la masse du pycnomètre rempli d'eau et de l'échantillon.

M3 : la masse du pycnomètre rempli d'eau

M4 : la masse sèche des granulats après refroidissement

(Dès leur sortie de l'étuve à 105°C).

$\rho_w = 0.9975 \text{ (g/cm}^3\text{)}$: la masse volumique d'eau.

Tableau 2. 11: Résultats des masses volumiques absolues du sable.

| Echantillon | M1 (g) | M2 (g) | M3 (g) | M4 (g) | ρ_w (g/cm ³) | $\rho_s = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$ (g/cm ³) |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------|--|
| Sable 0/4 | 704,86 | 1257,84 | 808,33 | 804,75 | 0,9975 | 2,25 |

3.2 Détermination de la masse volumique apparente (NF EN 1097-3) :

Cette masse appelée aussi la masse volumique en vrac, est le rapport entre la masse du matériau et le volume apparent des grains (qui comprend la porosité) [21].

3.2.1 Mode opératoire :

- Prélever trois éprouvettes conformément à l'EN 932-2.
- Le sable doit être séché à 110±5°C jusqu'à masse constante.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

- La masse de chaque prise d'essai doit être comprise entre 120 et 150 % de la masse nécessaire.
- On pèse les conteneurs vides secs et propres (M1).
- On pèse le conteneur sur une surface horizontale et le remplir à l'aide de la pelle jusqu'à ce qu'il déborde.
- Durant le remplissage, limiter la ségrégation en appuyant sur le bord supérieur, à aucun moment le bord de la pelle ne doit être à plus de 50 mm au-dessus du conteneur, enlever avec soin tout excédent au sommet du conteneur en veillant à ce que la surface soit étalée de manière uniforme afin d'éviter tout phénomène de ségrégation, niveler la surface des granulats à l'aide de la règle en ayant soin d'éviter tout compactage à la surface.
- On pèse le conteneur rempli et enregistrer la masse à 0,1 % près (M2), soumettre trois prises d'essai à cet essai.



Figure 2. 13: Mesure de la masse volumique apparente.

La masse volumique apparente est définie par :

$$\rho_p = \frac{(M' - M)}{V_r}$$

Avec :

M : la masse du récipient vide.

M' : la masse du récipient plein.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MORTIERS

V_r : le volume du récipient.

Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2. 12: Résultats des masses volumiques apparentes du sable.

| Matériau | N° de l'échantillon | Masse pleine (g) | M'-M (g) | Volume du récipient (cm ³) | $\rho_p = \frac{(M' - M)}{V_r}$ | ρ_p moy (g/cm ³) |
|-----------|---------------------|------------------|----------|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| Sable 0/4 | 1 | 3072 | 1796 | 1036,19 | 1,733 | 1,731 |
| | 2 | 3070 | 1794 | 1036,19 | 1,731 | |
| | 3 | 3069 | 1793 | 1036,19 | 1,730 | |

IV. L'eau :

Selon les spécifications de la norme XP P 18-303, Afin de prévenir l'impact des ajouts agressifs présents dans l'eau et pour assurer une réaction optimale entre l'eau et les compositions de ciment, le mélange de mortier normalisé est fabriqué à partir de l'eau du robinet disponible au niveau de laboratoire pédagogique de matériaux de construction (MDC) du département de Génie Civil de l'université Abderrahmane Mira, Bejaia.

V. Conclusion :

On a réalisé dans ce chapitre les différents essais de caractérisations et d'identifications selon les normes sur les différents matériaux entrant dans la composition des mortiers (Sable et ciment). Le chapitre suivant fera objet de confection de mortiers à base de ces deux matériaux identifiés.

CHAPITRE 3 :
FORMULATION MORTIERS
ET LES DIFFERENTS
ESSAIS REALISES

I. Introduction :

La partie expérimentale de notre projet porte sur l'étude des caractéristiques mécaniques et physiques des mortiers soumis aux différents cycles répétitifs de chauffage-refroidissements et mouillage-séchage. Ce chapitre consiste à préparer d'abord des prismes de mortier, puis tout un protocole expérimental réalisé afin de suivre la durabilité des matériaux confectionnés.

II. Composition des mortiers (échantillons d'étude) :

Pour réaliser cette étude, on a confectionné des échantillons de mortier selon la norme **EN 196-1**. Pour la préparation d'un moule composé de trois (03) échantillons prismatiques (4*4*16) cm³ de mortier normal pour un rapport E/C= 0.5, le mortier se compose des constituants suivants :

- Sable ⇒ 1350 ± 5g
- Ciment ⇒ 450 ± 5g
- Eau ⇒ 225 ± 5g



Figure 3. 1: Constituants du mortier normalisé.

1. Le malaxage :

Les constituants de mortier doivent être mélangés à l'aide d'un malaxeur normalisé pendant 4 min selon les prescriptions de la norme.



Figure 3. 2: Malaxeur normalisé.

CHAPITRE 3 : FORMULATION MORTIERS ET LES DIFFERENTS ESSAIS REALISES

2. Mode préparatoire : Malaxeur normalisé.

On mélange à l'aide d'un malaxeur normalisé la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

Ci-dessous un tableau qui résume bien la formulation des mortiers.

Tableau 3. 1: Opération de malaxage de mortier normalisé.

| OPERATION | Introduction de l'eau et ciment | | Introduction de sable | | Raclage de cuve | | |
|------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|----------------|-----------------|---------|----------------|
| DUREE | | 30s | 30s | 30s | 15s | 1min15s | 60s |
| ETAT DE MALAXEUR | Arrêt | Vitesse lente | | Vitesse rapide | Arrêt | | Vitesse rapide |

3. Confection des éprouvettes :

Après que l'opération de malaxage de mortier normal soit terminé, on procède à sa mise en place dans un moule de dimensions 4*4*16 cm³ à l'aide d'une table à chocs.



Figure 3. 3: Confection des éprouvettes.

4. Conservation et murissement :

Le but de conserver et de mûrir les éprouvettes de mortier est de permettre à ce dernier de développer ses propriétés mécaniques et physiques optimales. Pendant cette période, le mortier subit un processus de durcissement et de consolidation, ce qui améliore sa résistance et sa durabilité. En outre, le mûrissement permet également de simuler les conditions réelles auxquelles le mortier sera exposé une fois mis en œuvre, ce qui contribue à mieux évaluer ses performances dans diverses applications de construction.

III. Evaluations des propriétés physiques des mortier durcis :

1. Suivi de la masse :

Au cours des 28 jours, on détermine à chaque fois les pesées des échantillons pour suivre et évaluer le degré de saturation des éprouvettes « le développement de la masse ».

2. Essai non destructif par l'ultrason :

Le principe des essais ultrasons (**Figure 3.8**) est d'estimer le temps nécessaire pour la propagation d'une onde sonore d'une fréquence élevée, elle permet d'évaluer les propriétés mécaniques, physiques et le module d'élasticité du matériau cimentaire sans le détruire. Les essais sont appliqués selon la norme [NF P 18-418].



Figure 3. 8: Essai par ultrason.

La vitesse de diffusion des ondes ultrasonore est donnée par la formule :

$$V = \frac{D}{T} \left(\frac{m}{s} \right)$$

D : La longueur de l'éprouvette.

T : Le temps de propagation d'onde affiché sur l'appareil ultrason.

V : La vitesse de propagation des ondes.

Après avoir calculé la vitesse, il est possible de calculer la résistance à la compression suivant la formule suivante :

$$R_c = 0,08177 \times e^{(0,00147 \times V)}$$

3. Mesure des dimensions (variation de longueur) par pied à coulisse :

Le pied à coulisse est un outil de vérification utilisé pour le but des mesures rapides. Il se compose d'une règle rigide graduée en millimètres, équipée d'un bec fixe. Un coulisseau, doté d'un vernier et d'un bec mobile, glisse le long de cette règle. Au sommet du coulisseau se trouve une vis de pression pour le fixer sur la règle, et un lardon permet d'ajuster le jeu.



Figure 3. 9: Mesure des dimensions des éprouvettes avec un pied à coulisse.

IV. Variation thermique :

Les mécanismes de dégradation du béton et mortier sont liés à l'alternance de cycle répétés de phases chauffage-refroidissement, séchage-mouillage et gèle-dégel. Pour observer l'effet de la variation de ces températures sur nos échantillons de mortier, les essais suivants sont réalisés :

1. Cycles chauffage-refroidissement [33] :

Dans le cadre de cette recherche, on a fixé des températures à appliquer sur nos échantillons. Cette opération se fait en trois phases principales qui sont : phase chauffage, palier de température, refroidissement à l'air libre ; et cela pendant 1heure pour chaque phase.

On a estimé un cycle de chauffage-refroidissement de la température ambiante T_1 jusqu'à la température T_r avec une vitesse de montée correspondante à chaque température, quand la température choisie est atteinte, on laisse les éprouvettes pour une durée de temps d'une heure pour uniformiser la température à l'intérieur des éprouvettes et stabiliser leurs poids (on maintient la température pendant 1H de temps), Le refroidissement des éprouvettes se fait naturellement à l'air libre.

1.1 Equipement utilisé :

Pour réaliser l'essai, une étuve (de la marque « Controlab ») de température maximale de 250°C est utilisée pour effectuer les différents cycles de chauffage-refroidissement.



Figure 3. 10: Une étuve.

1.2 Programme des essais :

Chaque cycle de température dure au minimum 3h à 3h10min, à la fin de chaque cycle et pour chaque température, on procède aux mesures suivantes :

- La pesée des échantillons.
- La mesure des dimensions des prismes à l'aide d'un pied à coulisse.
- Détermination du temps de propagation des ondes en utilisant un ultrason.

2. Cycles de séchage- mouillage :

Dans le contexte de cet essai, ce protocole été réalisé :

2.1 Murissement 5h et séchage 24h (EN 12390-11) :

Cet essai est divisé en deux étapes constitutives, tout d'abord on commence par faire immerger les éprouvettes pendant 5h dans l'eau à la température du milieu ambiant, ensuite les mettre dans l'étuve à une température de 105°C pendant une durée de 24h.

3. Cycle gel et dégel [34]

Le principe de l'essai est d'effectuer sur deux prismes de mortier différents (non saturé et saturé) le gel et le dégel. Les éprouvettes sont soumises à une température de -20°C pendant un temps d'1H. Après ce temps, les échantillons seront à l'air libre pour dégeler naturellement jusqu'à atteindre une température ambiante de 20°C.

V. Analyses physico-chimiques :

1. Diffraction des Rayons X (DRX) :

La diffraction des rayons X réalisée sur des échantillons solides est une technique essentielle pour la caractérisation des matériaux. Elle exploite la diffraction simultanée de nombreux cristaux pour révéler des informations détaillées sur la structure cristalline. Cette méthode est cruciale pour l'étude des matériaux polycristallins, qui sont courants dans la pratique, elle est aussi considérée comme une avancée en science des matériaux [35].

CHAPITRE 3 : FORMULATION MORTIERS ET LES DIFFERENTS ESSAIS REALISES

2. Evaluation de la porosité par dessiccateur [36] :

L'évaluation de la porosité par dessiccateur permet de quantifier la proportion de volume de pores dans un matériau en mesurant la perte de masse due à l'évaporation de l'eau. Cette méthode est couramment utilisée pour les matériaux cimentaires et les bétons, permettant d'évaluer leur capacité à absorber et à retenir l'eau, ce qui est crucial pour déterminer leur durabilité et leur performance.

La porosité P, exprimée en pourcentage volumique est calculée comme suit :

$$P_{\text{eau}} = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sat}} - m_{\text{initial}}} * 100$$

Avec :

- msat est la masse saturée de l'échantillon.
- msec est la masse sèche de l'échantillon.
- minitial est la masse initiale de l'échantillon avant saturation.



Figure 3. 11: Dessiccateur.

3. La poussée d'Archimède :

La poussée hydrostatique vise à déterminer la porosité et la densité des échantillons solides, cette méthode est basée sur le principe d'Archimède. L'échantillon est d'abord pesé à sec, puis immergé dans l'eau et pesé de nouveau une fois sorti du dessiccateur pour déterminer la perte de poids apparent due à la poussée d'eau [37].

CHAPITRE 3 : FORMULATION MORTIERS ET LES DIFFERENTS ESSAIS REALISES



Figure 3.13: Eprouvettes couvertes de paraffine.



Figure 3.12: Pesée hydrostatique.

4. Conductivité thermique :

La conductivité thermique λ d'un matériau mesure sa capacité à transférer la chaleur dans un laps de temps donné. Cette propriété est essentielle dans la conception de systèmes nécessitant une isolation thermique efficace et dans le domaine de l'ingénierie des matériaux [38].



Figure 3.14: conductimètre.

VI. Evaluation des propriétés mécaniques :

1. La résistance à la flexion :

La résistance à la flexion est la capacité d'un matériau à supporter une telle force sans se fissurer.

La résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés est évaluée par des essais de flexion 3 points effectués sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, avec une vitesse de chargement de 50 N/s.



Figure 3. 15: Essai de résistance à la flexion.

2. La résistance à la compression :

La résistance à la compression est définie par la capacité d'un matériau à supporter une force axiale sans se rompre. Elle est détectée par l'application d'une charge axial jusqu'à la rupture. Sa valeur permet discuter la résistance maximale d'un matériau pour garantir la sécurité et la durabilité [39].



Figure 3. 16: Essai de résistance à la compression.

VII. Conclusion:

Après avoir présenté dans ce chapitre, les formulations des mortiers, les essais réalisés et présenter toutes les procédures expérimentales sur ces mortiers une fois durcis, nous allons présenter dans le prochain chapitre les résultats obtenus et leurs discussions.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I. INTRODUCTION :

Dans ce dernier chapitre de notre étude, on va présenter l'ensemble des résultats obtenus au cours de la phase expérimentale. Cette présentation est suivie d'une analyse approfondie et d'une discussion détaillée, permettant une compréhension claire et précise de l'influence de la température sur la performance et la durabilité de nos matériaux cimentaires. En particulier, nous allons indiquer comment les conditions thermiques variables affectent les propriétés mécaniques et physiques des mortiers étudiés.

II. RESULTATS ET DISCUSSIONS :

Tous les résultats obtenus à partir des essais réalisés dans le chapitre précédent seront donnés dans cette partie, tout en les discutant afin de déduire la dégradation de nos mortiers exposés aux différents cycles thermiques et hydriques.

1. Analyse des propriétés physiques :

Les résultats des propriétés physiques des mortiers permettent d'évaluer la qualité et la performance de ces matériaux exposés aux conditions climatiques variables dans le domaine de la construction.

1.1 Suivi de la masse pendant 28j :

Au cours des 28 jours, on affecte sur 5 phases des pesés des échantillons pour suivre et évaluer le degré de saturation des éprouvettes « le développement de la masse », les résultats ont été exprimés sous la forme des graphes suivants :

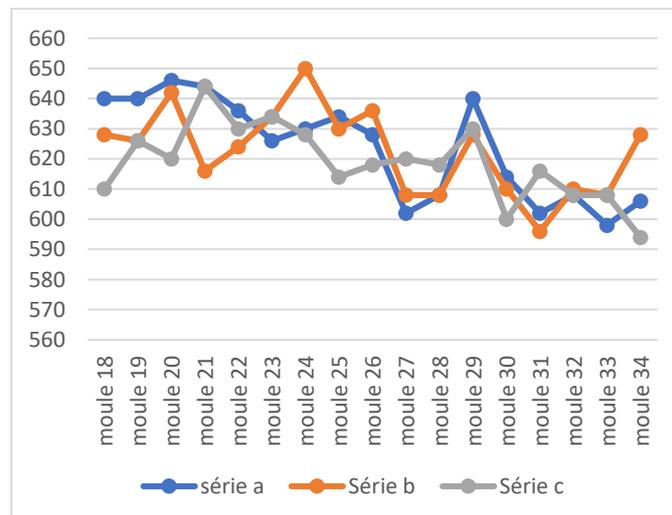


Figure 4. 1: poids des éprouvettes après décoffrage.



Figure 4. 2: Poids des éprouvettes après 1jour de murissement.

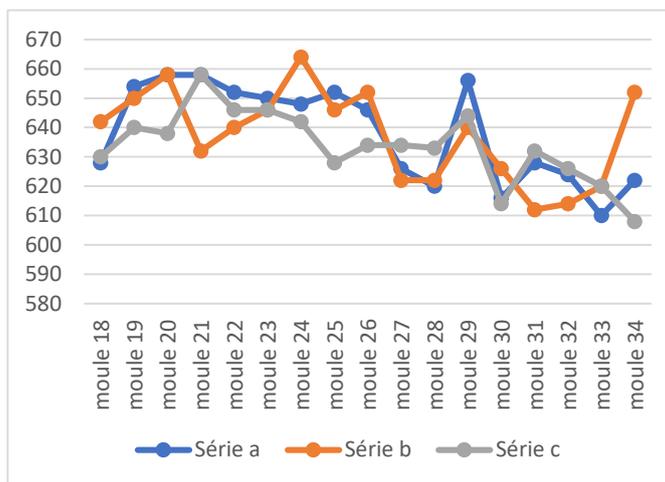


Figure 4. 3: Poids des éprouvettes après murissement pour 7j.

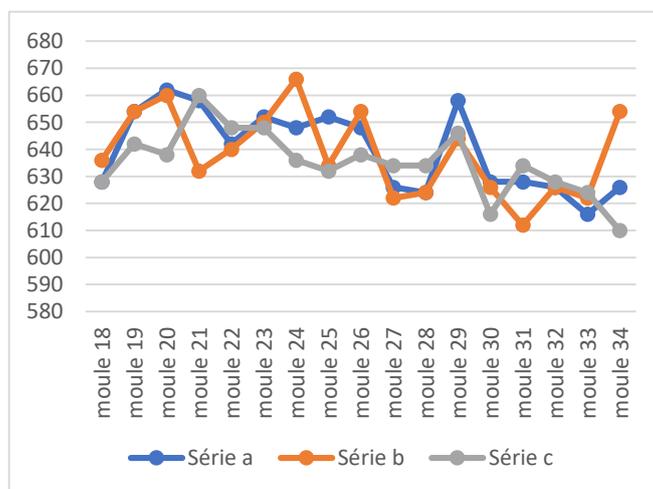


Figure 4. 4: Poids des éprouvettes après murissement pour 14j.

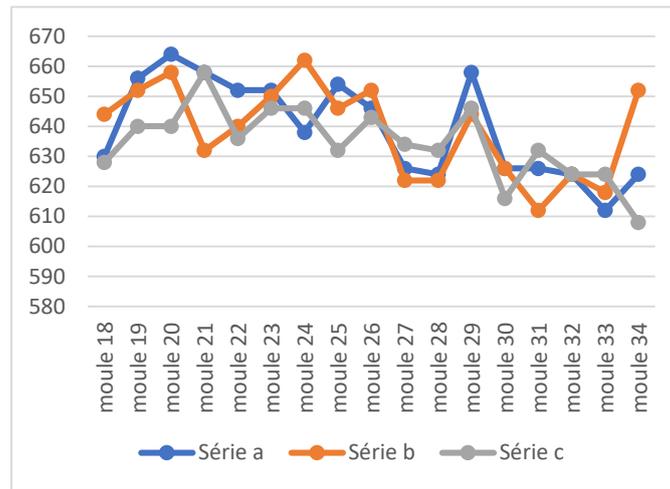


Figure 4. 5: Poids des éprouvettes après murissement pour 28j.

1.2 La perte de la masse :

La perte ou le gain de masse des mortiers soumis aux traitements thermiques est un paramètre essentiel pour évaluer leur comportement sous l'effet de la chaleur et de l'eau. Analyser cette variation de masse, permet de comprendre la performance des mortiers.

1.2.1 Expression des résultats :

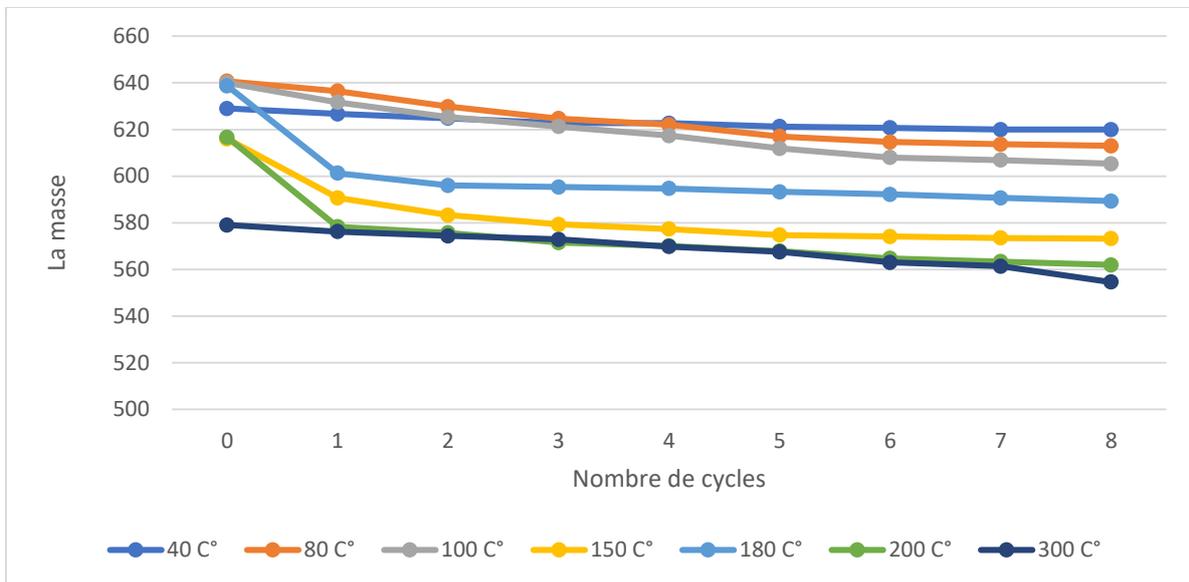


Figure 4. 6: Variation des masses de mortiers soumis aux cycles de chauffage-refroidissement.

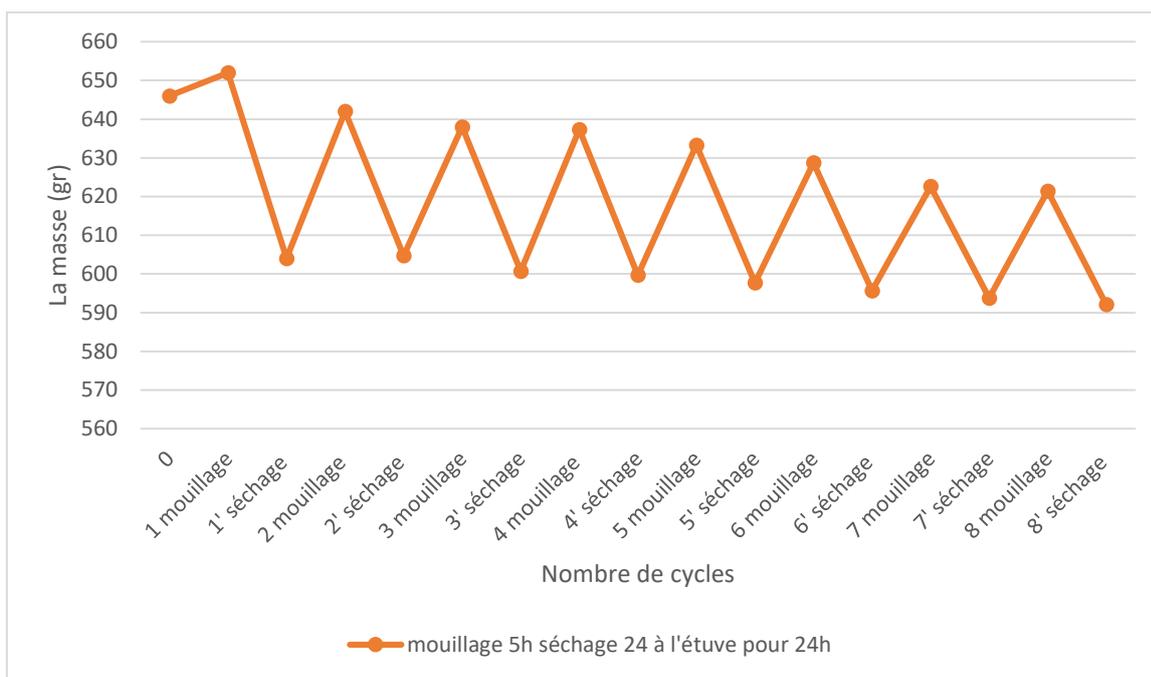


Figure 4. 7 : Variation des masses de mortier soumis aux cycles séchage- mouillage.

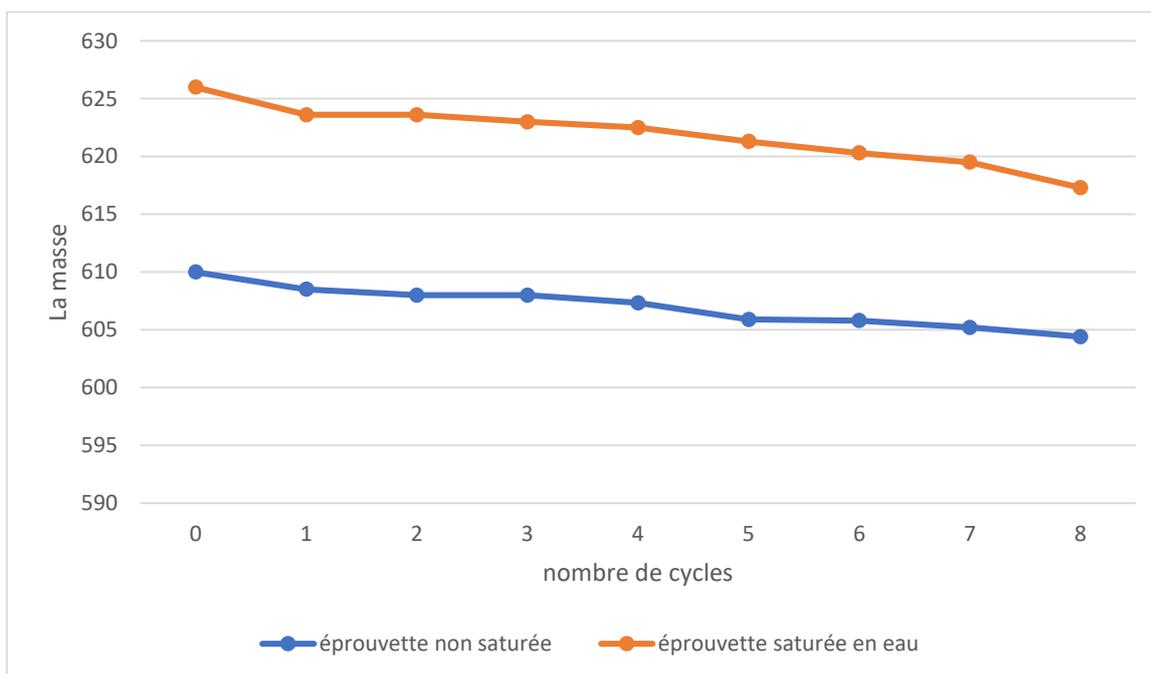


Figure 4. 8: Variation des masses des mortiers soumis aux cycles gel- dégel.

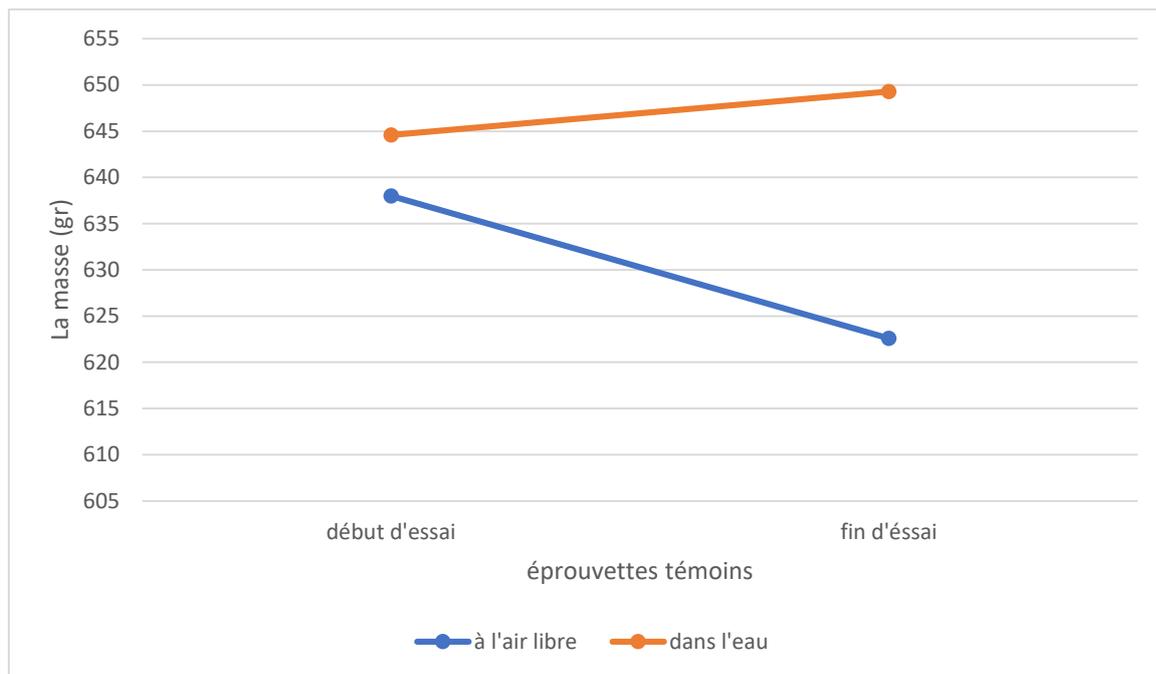


Figure 4. 9 : Variation des masses des mortiers de référence (témoins).

1.2.2 Interprétation des résultats :

A la fin des cycles thermiques, la masse des éprouvettes subit une diminution significative spécifiquement à la température 300°C où la perte de la masse surpasse 40 gr après 8 cycles. Cependant les températures modérées (40 C°-100 C°) engendrent une perte plus lente. L'essai de séchage mouillage affectent aussi la dégradation de la masse, où les cycles de 2 jours de mouillage suivis de 3 jours de séchage provoquant une diminution notable, alors que les cycles plus courts (5 heures de mouillage, 24 heures de séchage) donnent des variations plus marquées. Les essais de gel et dégel révèlent que les éprouvettes saturées en eau subissent initialement une perte de masse rapide, bien que les éprouvettes non saturées restent stables au cours des cycles, cela indique que l'eau fait accélérer la dégradation. Les éprouvettes témoins exposées à l'air libre perdent de la masse en raison de l'évaporation, alors que celles mouillés dans l'eau engendrent un gain de masse, qui est du à l'hydratation continue du ciment.

En conclusion, ces expériences démontrent que la température et les cycles d'humidité ont un impact sur la perte de masse des matériaux, les hautes températures et les cycles de mouillage et séchage accélérant la dégradation, tandis que les essais de gel et dégel montrent l'influence de la saturation en eau.

1.3 Les variations dimensionnelles :

1.3.1 Résultats :

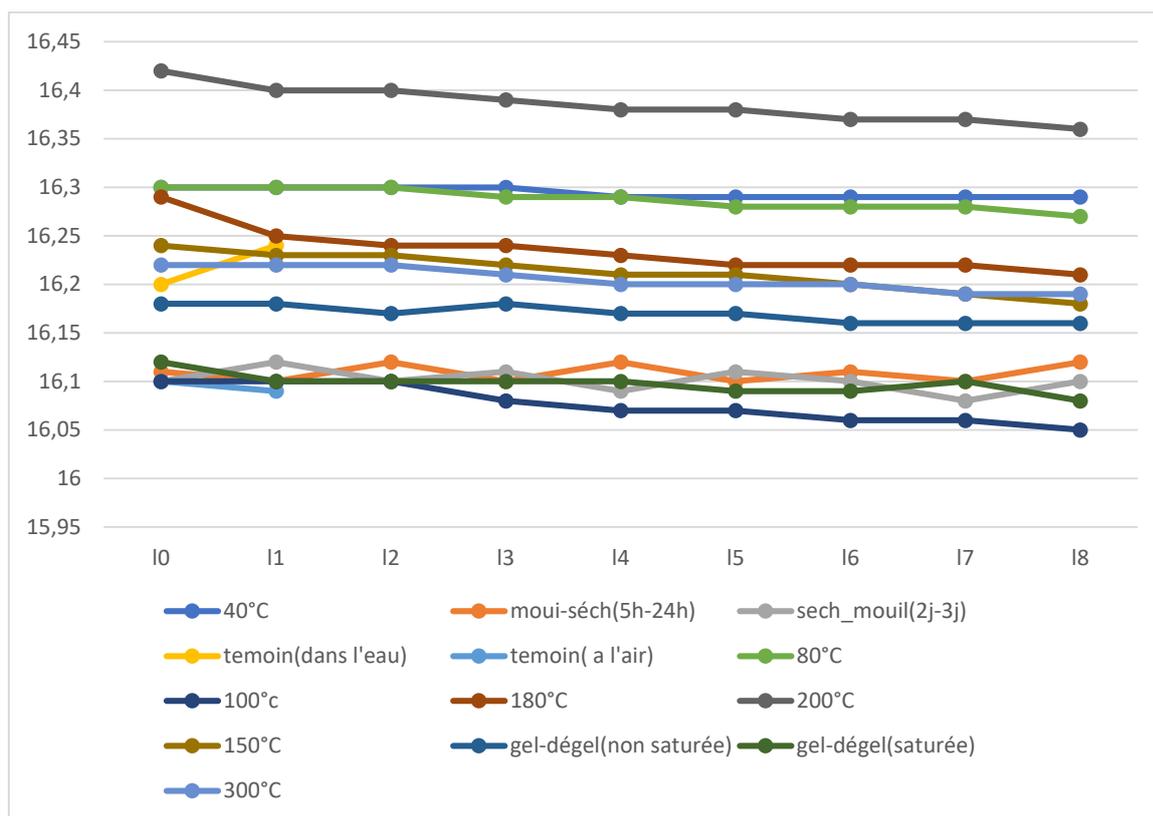


Figure 4. 10 : Variation de la longueur des éprouvettes pendant les cycles thermiques.

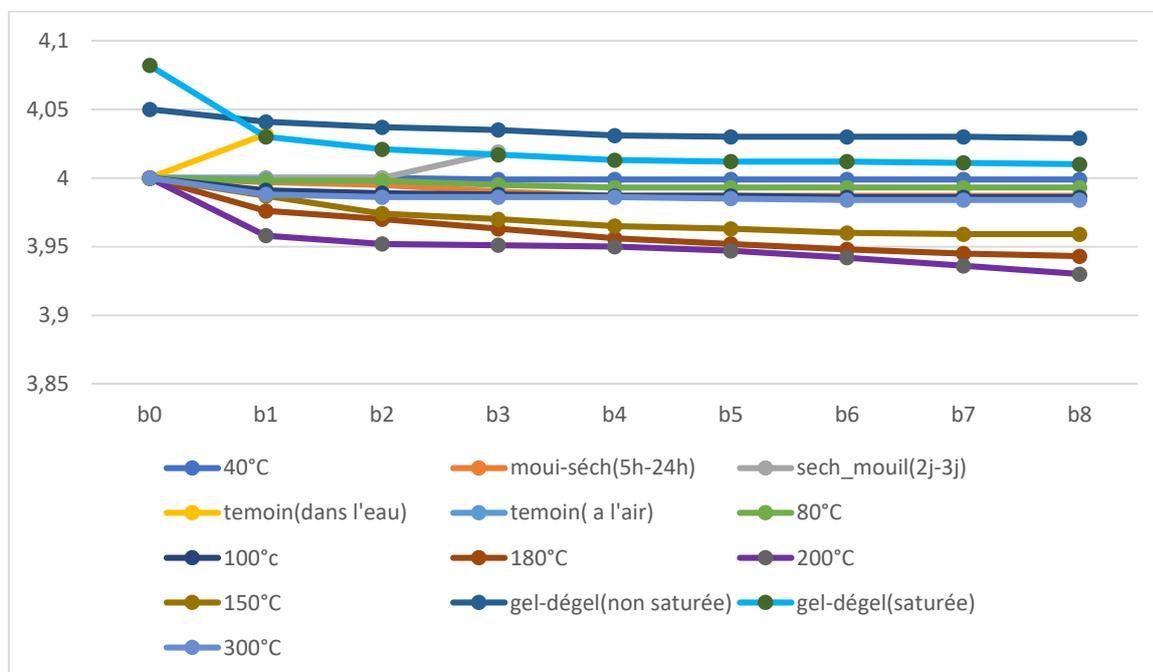


Figure 4. 11 : Variation de la hauteur des éprouvettes après des cycles de traitement thermique.

1.3.2 Interprétation des Résultats :

Les résultats obtenus après les différents cycles thermiques montrent des variations dans la hauteur et la longueur des éprouvettes. Pendant les cycles thermiques, la longueur des éprouvettes a été mesurée et tracée dans le graphe 4.10. Il a été observé que les éprouvettes subissent une contraction notable en réponse aux variations de température. De même, la hauteur des éprouvettes, illustrée dans le graphe 4.11, a également montré des variations suivant les cycles de traitement thermique. Ces variations dimensionnelles indiquent une réaction du matériau soumis aux cycles de chauffage et de refroidissement, entraînant une déformation due aux contraintes thermiques.

On remarque que toutes les courbes ont presque la même allure, tel que la variation dimensionnelle apparente dans les premiers cycles, puis une légère stabilisation à partir du quatrième cycle.

Les modifications observées suggèrent une altération de la structure interne des matériaux, possiblement causée par des fissures microscopiques.

1.3 Mesure Ultrasonique :

1.3.1 Présentation des résultats :

Les résultats du temps de propagation des ondes, évidemment des vitesses sont présentés par les figures suivantes :

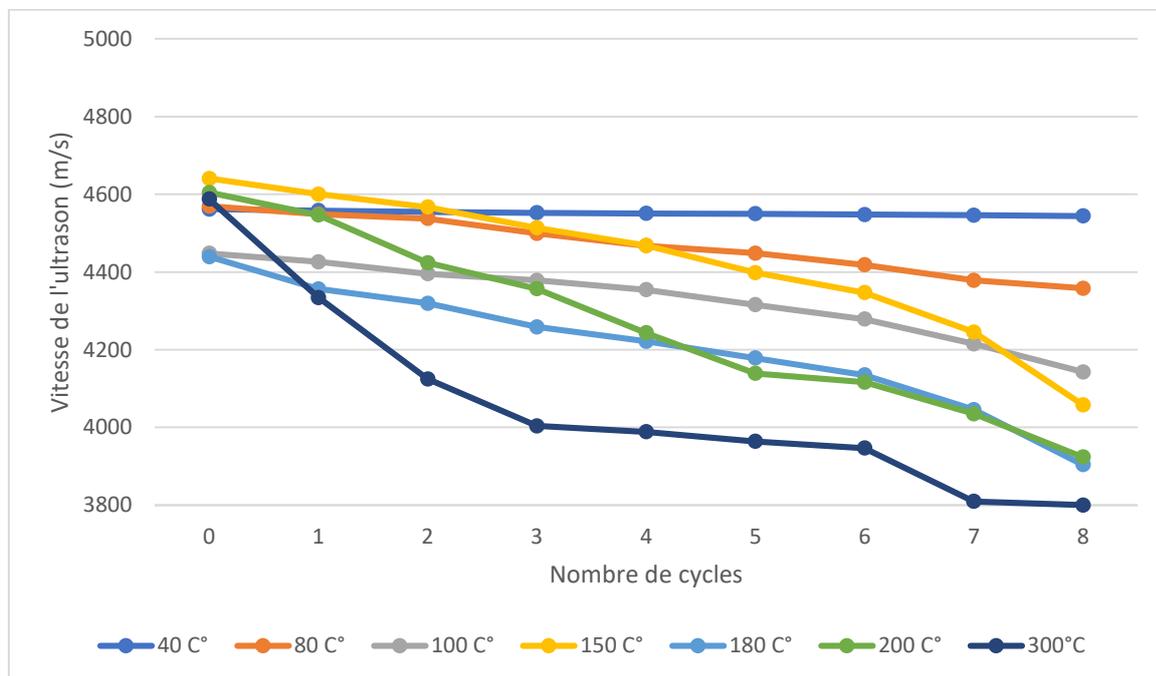


Figure 4. 12 : Vitesse des ondes sonores pour chaque cycle de température

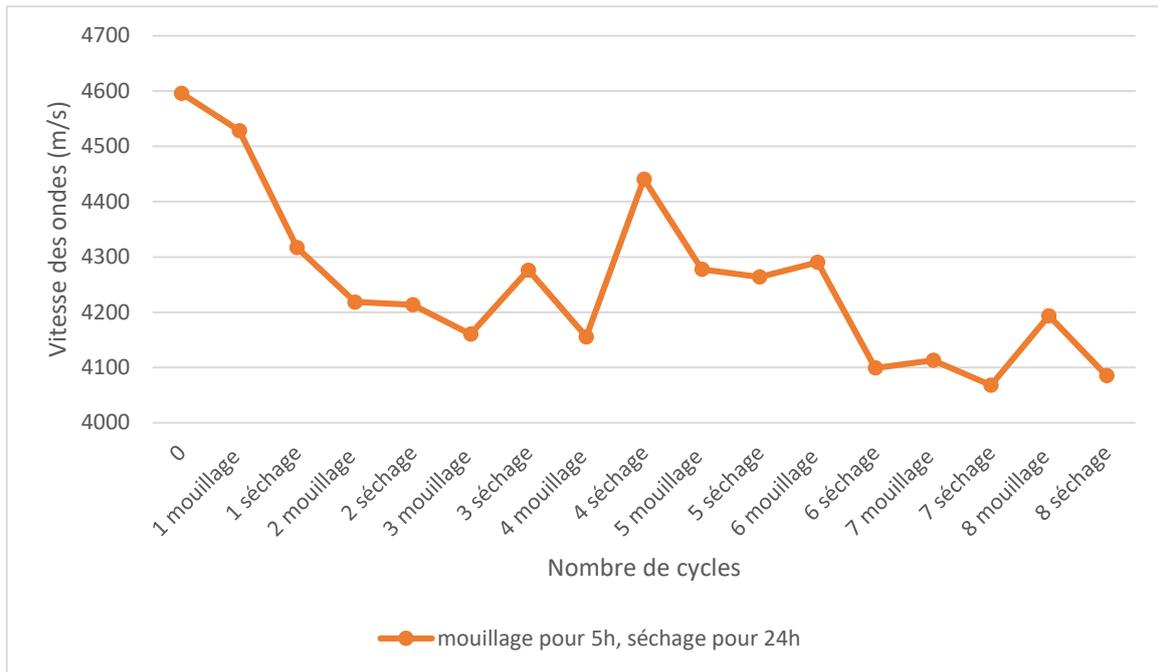


Figure 4. 13 : Vitesse des ondes sonores pour les cycles séchage-mouillage.

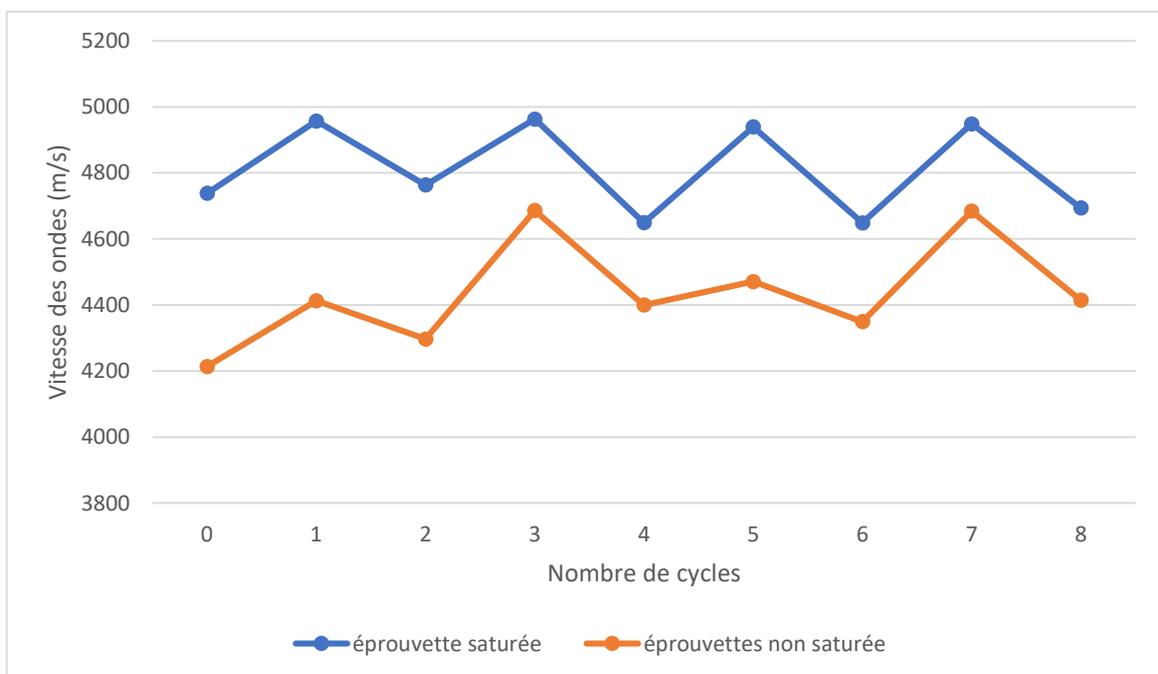


Figure 4. 14 : Vitesse des ondes sonores pour les cycles gel-dégel.

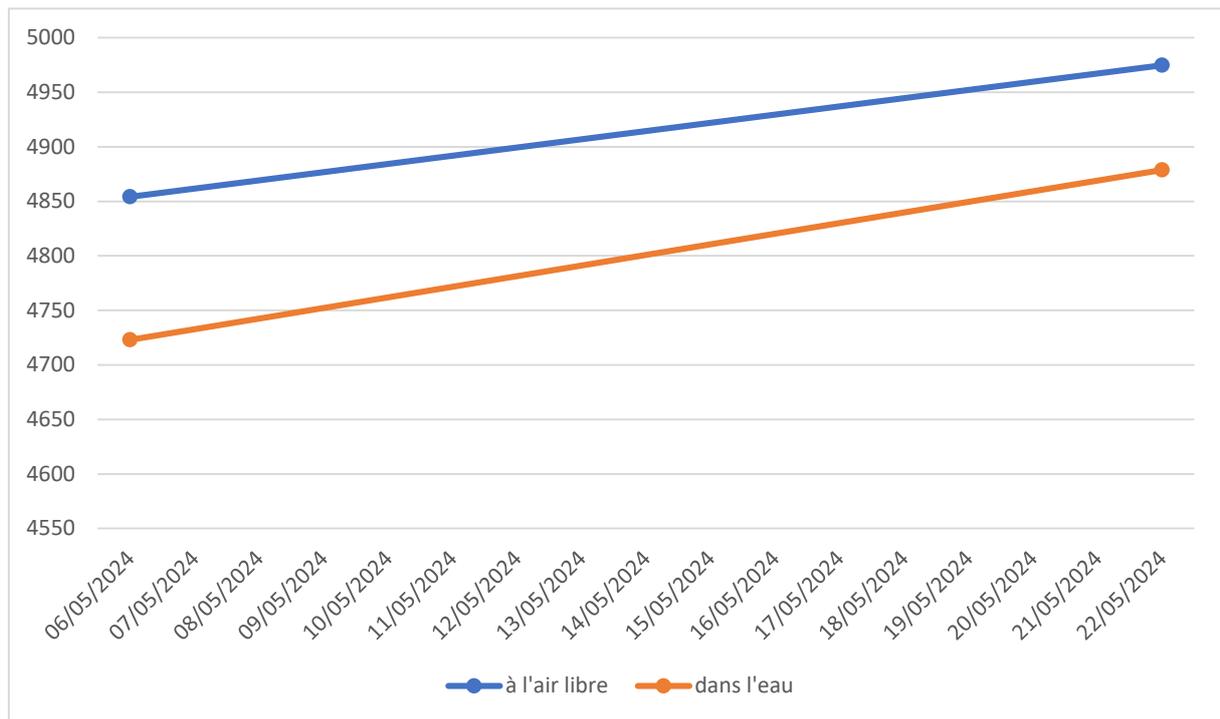


Figure 4. 15 : Vitesse des ondes sonores pour les différentes échéances des éprouvettes témoins

1.3.2 Interprétions des résultats :

Selon l'étude des graphiques de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les mortiers, il est démontré que les matériaux subissent une détérioration en raison des températures élevées, des cycles de séchage-mouillage et de gel-dégel. La vitesse des ondes diminue considérablement au-dessus de 100°C, ce qui révèle une diminution de la cohésion interne causée par des fissures microscopiques et des tensions internes. Des variations importantes sont observées lors des cycles de séchage-mouillage : une amélioration temporaire pendant le mouillage suivie d'une dégradation accrue pendant le séchage, ce qui suggère des dommages cumulatifs. Les échantillons saturés en eau sont rapidement dégradés par les cycles de gel-dégel, tandis que ceux non saturés résistent mieux, mettant en évidence l'importance de la gestion de l'humidité. L'humidité peut maintenir la structure interne dans les conditions ambiantes, comme cela a été constaté dans les échantillons à l'air libre et immergés. Il est primordial de réduire l'exposition aux températures élevées, de réguler les variations d'humidité et de surveiller la vitesse des ondes sonores afin d'évaluer l'intégrité structurelle à long terme.

1.4 La conductivité thermique :

La conductivité thermique est une propriété physique des matériaux qui mesure leur capacité à conduire la chaleur. Elle est généralement représentée par le symbole λ et s'exprime en watts par mètre-kelvin (W/m·K) dans le système international d'unités (SI).

La conductivité thermique est une caractéristique importante pour différents matériaux, car elle détermine leur efficacité à transférer la chaleur. Les matériaux avec une conductivité thermique élevée transfèrent rapidement la chaleur, tandis que ceux avec une conductivité faible ont une capacité réduite à le faire.

1.4.1 Résultats (λ) :

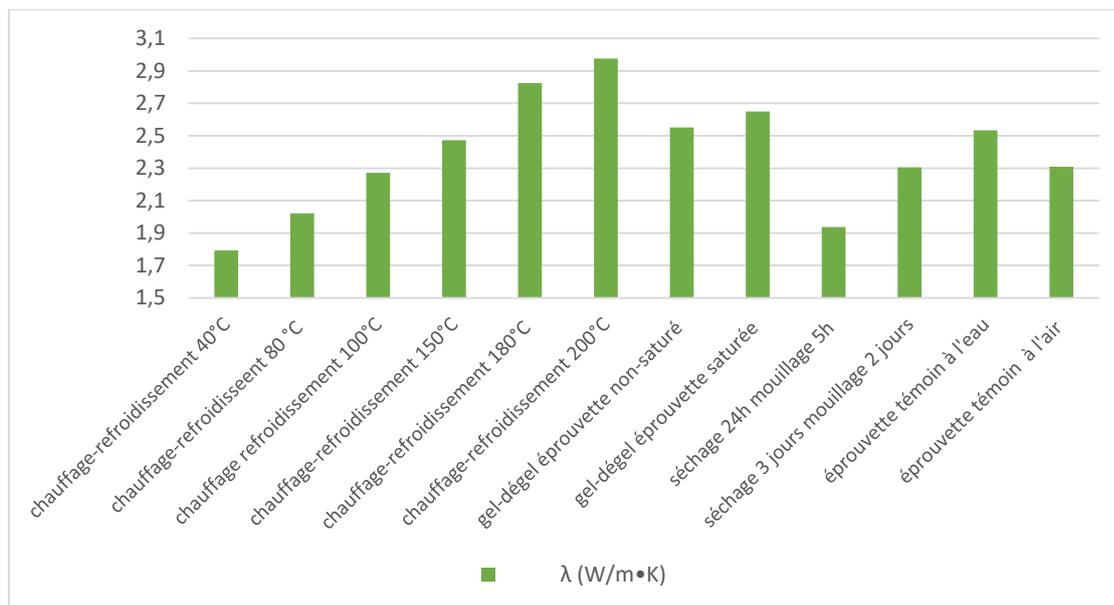


Figure 4. 16: La conductivité thermique des éprouvettes étudiées.

1.4.2 Analyse des résultats :

Les résultats des conductivités thermiques présentées dans le graphe 4.11 révèlent des variations significatives entre les différentes éprouvettes. Les mesures montrent que la conductivité thermique des éprouvettes varie en fonction des conditions de cycle thermique auxquelles elles ont été soumises. Les éprouvettes soumises à la température de 40°C présentent une conductivité thermique relativement stable autour de 2.79 W/m.K. Cependant, des variations sont observées avec des températures plus élevées, où les éprouvettes à 80°C, 100°C, 150°C, 180°C, et 200°C montrent des baisses significatives de leur conductivité thermique, descendant à 1.82 W/m.K pour les éprouvettes exposées à 200°C. Ces baisses peuvent être attribuées à la dégradation de la structure matérielle sous des températures élevées, réduisant ainsi leur capacité à conduire la chaleur efficacement. Les cycles de mouillage et de séchage influencent également la conductivité thermique, avec des valeurs fluctuantes entre les cycles. Les

échantillons mouillés pour 2 jours et séchés pour 3 jours affichent des variations, atteignant des valeurs aussi basses que 1.91 W/m.K, tandis que les échantillons séchés pendant 24 heures après un mouillage de 5 heures montrent une réduction similaire. Les échantillons soumis à des cycles de gel-dégel montrent que la saturation en eau augmente la conductivité thermique initiale mais la dégradation rapide due au gel-dégel diminue cette conductivité, illustrant l'importance de la gestion de l'humidité dans la prévention de la dégradation thermique. En conclusion, la conductivité thermique des éprouvettes est fortement influencée par les conditions thermiques et les cycles d'humidité, avec des températures élevées et des cycles de gel-dégel montrant une tendance à réduire la conductivité thermique en raison de la dégradation matérielle. Ces résultats suggèrent que pour maintenir une conductivité thermique optimale, il est essentiel de minimiser l'exposition à des températures élevées et de gérer efficacement les cycles d'humidité.

1.5 La pesé hydrostatique :

La pesée hydrostatique d'un mortier fait référence à la pression exercée par l'eau sur le mortier immergée. Cette pression est due à la colonne d'eau au-dessus de la structure et dépend de la profondeur à laquelle la structure est immergée. Le mortier, étant un matériau poreux et souvent utilisé dans des structures immergées comme les barrages, les fondations marines, les ponts, etc., est soumis à la pression hydrostatique de l'eau environnante. Cette pression peut être significative en fonction de la profondeur d'immersion et peut influencer la conception et la durabilité des structures en béton. Il est crucial de prendre en compte la pression hydrostatique lors de la conception de structures en béton immergées pour assurer qu'elles puissent supporter les charges hydrostatiques sans subir de défaillance ou de dommage excessif.

1.5.1 Résultats des masses volumiques apparentes par pesée hydrostatique :

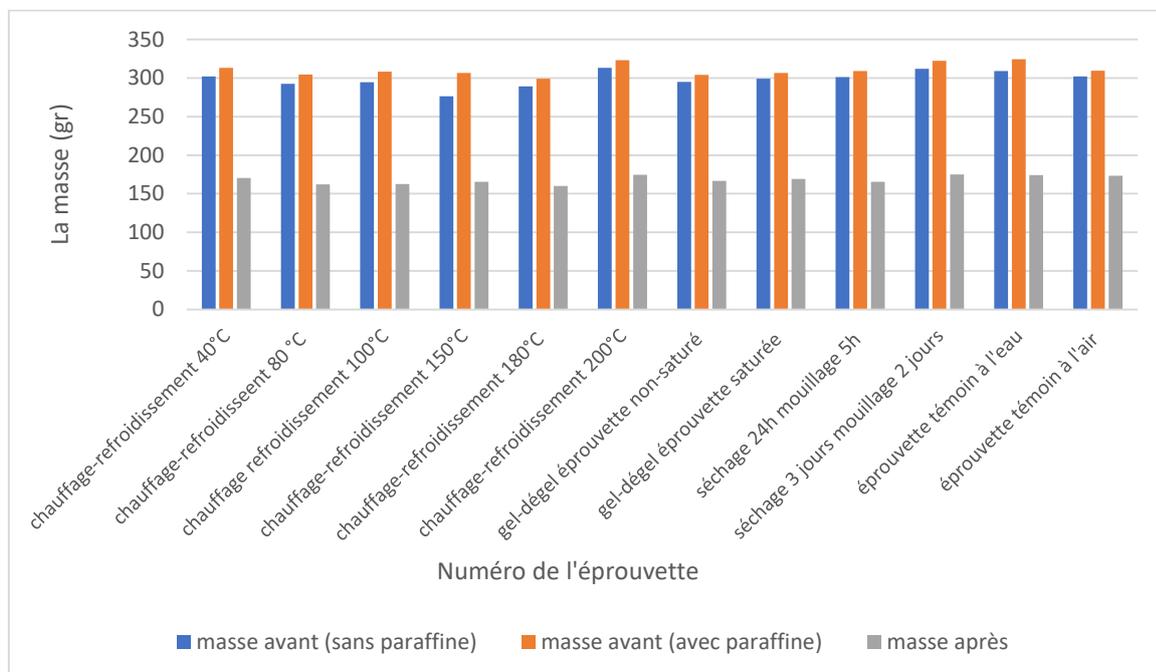


Figure 4. 17 : La pesé hydrostatique des éprouvettes de mortier.

1.5.2 Analyse des résultats :

Les résultats de la pesée hydrostatique révèlent des variations significatives de la masse des échantillons de mortier avant et après immersion, ainsi qu'après les cycles de gel et dégel, mettant en évidence les effets des cycles thermiques et des cycles de mouillage et de séchage sur les propriétés physiques des matériaux. Les échantillons soumis à des températures de 40°C ont une masse initiale plus élevée par rapport à ceux chauffés à 200°C, avec des différences atteignant jusqu'à 20%, suggérant une déshydratation et une porosité accrues à des températures plus élevées. Après immersion, les échantillons montrent une augmentation de masse due à l'absorption d'eau, plus prononcée pour ceux ayant subi des traitements thermiques élevés, indiquant une porosité accrue. Par exemple, les échantillons soumis à une température de 200°C montrent une augmentation de masse post-immersion jusqu'à 30% supérieure à ceux soumis à 40°C de température, révélant la formation de fissures et de pores sous l'effet de la chaleur. Les cycles de gel et dégel ont également un impact significatif sur la masse des échantillons, avec une perte de masse due à l'expansion de l'eau lors du gel, créant des fissures et augmentant la porosité. Les échantillons traités à 200°C montrent une perte de masse plus prononcée après plusieurs cycles de gel et dégel, confirmant que les températures élevées fragilisent davantage la structure du mortier. Les échantillons témoins, n'ayant subi que les cycles de séchage et mouillage, montrent une variation de masse plus stable et modérée par rapport à ceux ayant subi des traitements thermiques élevés ou des cycles de gel et dégel. Ces observations, renforcées par le comportement des échantillons après plusieurs cycles de mouillage et de séchage, montrent que ceux exposés à de multiples cycles ont des fluctuations de masse plus importantes, reflétant la sensibilité des matériaux de mortier aux variations environnementales.

Les résultats soulignent l'importance de comprendre les effets des conditions thermiques, hydriques et des cycles de gel et dégel sur la microstructure des mortiers, car la porosité et la capacité d'absorption d'eau influencent directement la durabilité et la résistance mécanique des matériaux de construction.

1.6 Dessiccateur :

Un dessiccateur est un appareil utilisé pour maintenir un environnement sec et sans humidité. Il est souvent constitué d'un récipient hermétique qui contient un agent desséchant, tel que le gel de silice ou le chlorure de calcium, pour absorber l'humidité. Le rôle principal du dessiccateur est de protéger des échantillons sensibles à l'humidité en les conservant dans un environnement sec, il garantit que les résultats des tests ne sont pas influencés par l'humidité ambiante.

1.6.1 Résultats obtenus :

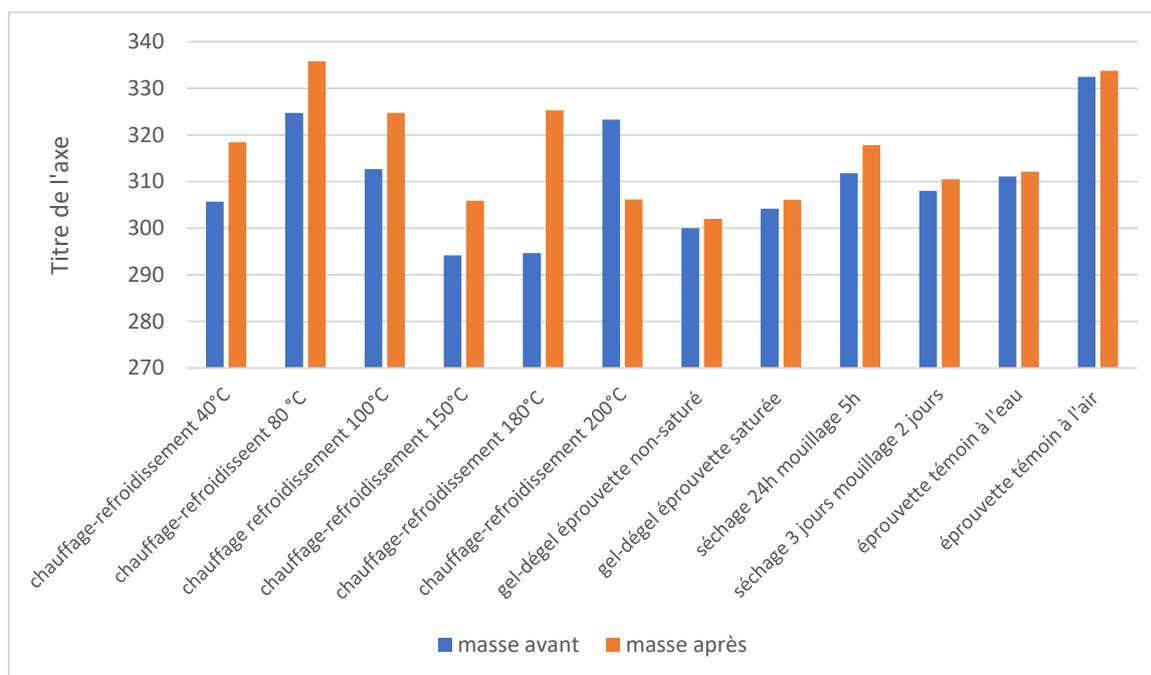


Figure 4. 18 : Les masses des éprouvettes de mortier à l'essai de dessiccateur.

1.6.2 Interprétation des résultats :

Les essais de dessiccateur montrent des variations significatives de masse dans les échantillons de mortier, indiquant une absorption d'humidité liée à leur porosité. Les échantillons avec une absorption d'humidité élevée signifient une augmentation notable de masse, possèdent une structure interne très poreuse avec de nombreux pores interconnectés. À l'inverse, ceux avec des augmentations de masse modestes ont une structure moins poreuse, limitant leur capacité de rétention d'eau.

2. Interprétation des résultats des propriétés mécanique :

Les caractéristiques mécaniques étudiées sont les résistances à la flexion par traction et les résistances à la compression, ci-dessous les résultats obtenus.

2.1 Résistance à la compression :

2.1.1 Résultats d'essai :

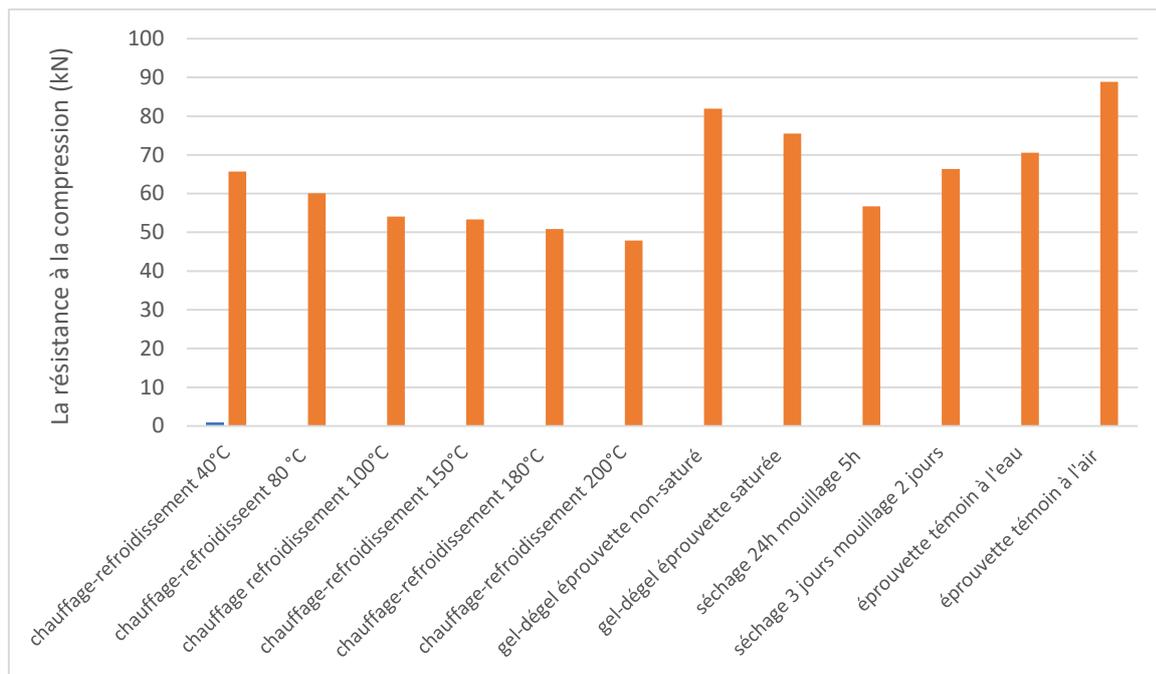


Figure 4. 19 : Résistance à la compression des mortiers des différents cycles thermique.

2.1.2 Analyse des résultats :

La résistance à la compression des mortiers peut être affectée de différentes manières par un traitement thermique, c'est-à-dire par exposition à des températures élevées comme on peut l'apercevoir et le remarquer dans nos résultats présentés dans la figure 4.14 ci-dessus et cela peut être justifié par le phénomène de durcissement d'où le ciment hydraté dans le mortier peut subir une augmentation initiale de sa résistance à la compression. Cela est dû à l'accélération des réactions chimiques et à une meilleure liaison entre les particules de ciment. Le mortier commence à perdre sa résistance à la compression et ceci peut être causé par la déshydratation du ciment, la réduction de la cohésion entre les grains, voire la dégradation thermique de certains composants du mortier. La résistance à la compression peut être significativement réduite en raison de la dégradation chimique et structurale du ciment et des agrégats dans le mortier.

Pour conclure, bien que le mortier puisse initialement montrer une augmentation de sa résistance à la compression à des températures modérées en raison d'un durcissement accéléré, des températures plus élevées peuvent entraîner une perte de résistance à long terme en raison de divers processus de dégradation. Pour les applications où la résistance à haute température est cruciale, il est essentiel de choisir des compositions de mortier adaptées et de prendre en compte les effets du traitement thermique sur leurs performances mécaniques.

2.2 Résistance à la traction :

2.2.1 Résultats de l'essai :

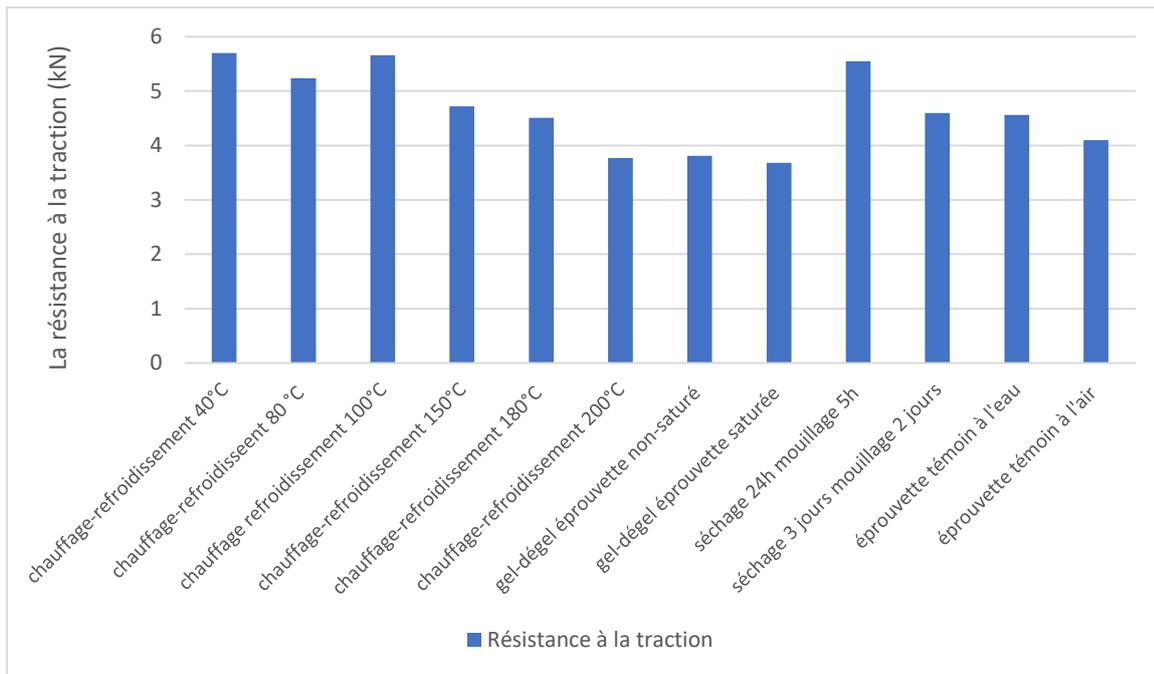


Figure 4. 20 : Résistance à la traction des mortiers de différents cycles thermique.

2.2.2 Analyse des données obtenus :

Les résultats de la résistance à la traction après un traitement thermique montrent des variations significatives en fonction des conditions appliquées. Les échantillons soumis à un cycle de chauffage-refroidissement à 40°C présentent une résistance à la traction relativement élevée, qui est de 5,7 MPa, légèrement réduite à 5,55 MPa après un séchage-mouillage de 5 heures dans l'eau et 24 heures dans l'étuve. En revanche, des conditions de séchage-mouillage plus sévères (2 jours dans l'eau suivis de 3 jours à l'air libre) diminuent la résistance à 4,6 MPa. Les échantillons témoins exposés à l'eau et à l'air libre montrent des résistances de 4,56 MPa et 4,1 MPa respectivement. Lorsque la température de chauffage augmente à 80°C et 100°C, la résistance reste relativement stable autour de 5,24 MPa et 5,66 MPa respectivement. Cependant, des températures plus élevées (180°C et 200°C) entraînent une diminution notable de la résistance, diminuant à 4,51 MPa et 3,77 MPa. De même, les cycles de gel-dégel affectent la résistance, les échantillons non saturés en eau affichant une résistance de 3,81 MPa contre 3,68 MPa pour les échantillons saturés. Ces variations indiquent que le traitement thermique et les conditions d'humidité influencent fortement la résistance à la traction des matériaux, soulignant l'importance de contrôler ces paramètres pour optimiser les performances mécaniques des matériaux étudiés.

3. Interprétation des propriétés physico-chimiques :

Après avoir réalisé les essais mécaniques sur les mortiers, des morceaux d'échantillons de ces derniers sont récupérés, broyés et tamisés afin d'effectuer des analyses chimiques qui sont la FRX et la DRX, dont les résultats sont donnés ci-dessous.

3.1 Fluorescence des rayons X (FRX):

La fluorescence des rayons X (FRX) est une méthode d'analyse non destructive qui permet de déterminer la composition élémentaire d'un matériau en utilisant l'interaction des rayons X avec les atomes du matériau. Lorsque le matériau est irradié par un faisceau de rayons X primaires, les atomes du matériau absorbent l'énergie et émettent des rayons X secondaires, appelés rayons X fluorescents. Chaque élément chimique émet des rayons X à des longueurs d'onde spécifiques, ce qui permet de les identifier et de les quantifier, et elle sert à déterminer la composition chimique des ciments, des bétons, des mortiers et des divers agrégats. Cela aide à assurer la qualité et la conformité des matériaux utilisés.

3.1.1 Résultats de l'analyse :

Tableau 4.1: Les éléments détectés par l'analyse FRX du mortier 19

| | |
|--|--|
| E.L 72,61% ^{+/-0,000%} Léger | Mg 1,97% ^{+/-0,415%} Magnesium |
| Al 1,30% ^{+/-0,034%} Aluminium | Si 1,72% ^{+/-0,020%} Silicon |
| S 2910,9 PPM ^{+/-35,3 PPM} Sulfur | Ca 21,18% ^{+/-0,022%} Calcium |
| Mn 97,6 PPM ^{+/-21,3 PPM} Manganese | Fe 8386,4 PPM ^{+/-125,5 PPM} Iron |
| Zn 87,5 PPM ^{+/-6,6 PPM} Zinc | As 37,0 PPM ^{+/-4,5 PPM} Arsenic |
| Sr 565,8 PPM ^{+/-6,7 PPM} Strontium | Pb 128,8 PPM ^{+/-6,8 PPM} Lead |

3.1.2 Interprétation des résultats :

Les résultats de la fluorescence des rayons X (FRX) pour le mortier 19, comme illustré dans le tableau 4.1, fournissent une analyse détaillée de la composition chimique du mortier. Cette technique permet de déterminer les éléments présents dans l'échantillon et leurs concentrations respectives. L'analyse FRX révèle la présence de plusieurs éléments majeurs dans le mortier 19. Typiquement, dans un mortier, on s'attend à trouver des composants comme le calcium (Ca), le silicium (Si), l'aluminium (Al), et le fer (Fe), qui sont les constituants principaux des ciments Portland. Les résultats de l'analyse montrent des pics significatifs pour ces éléments, indiquant leurs abondances dans l'échantillon.

- **Calcium (Ca):** La présence de calcium en grande quantité confirme l'utilisation de ciment à base de calcaire, qui est le principal ingrédient du ciment Portland.
- **Silicium (Si):** Le silicium, généralement présent sous forme de silicates, provient des agrégats et du ciment. Il joue un rôle crucial dans la résistance et la durabilité du mortier.
- **Aluminium (Al) et Fer (Fe):** Ces éléments sont également des constituants typiques des ciments et des argiles utilisés comme additifs dans les mélanges de mortier.

Ces composants sont essentiels pour la structure et la performance du mortier, particulièrement sous des cycles de chauffage et refroidissement. La composition chimique identifiée par FRX permet de prédire comment le mortier réagira à ces conditions extrêmes. D'où une forte présence de calcium peut indiquer une bonne capacité de liaison et de durcissement, mais également une susceptibilité à la dégradation chimique à haute température. Ces résultats sont fondamentaux pour optimiser la formulation du mortier afin de garantir sa durabilité et sa performance dans des conditions de chauffage et de refroidissement répétés.

3.2 Diffraction des Rayons X :

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique qui permet d'étudier les différentes phases de matières et matériaux cristallins. Lorsque les rayons X rencontrent les plans atomiques du cristal, ils sont diffractés selon des angles spécifiques qui dépendent de l'espacement des plans atomiques et de la longueur d'onde des rayons X. En enregistrant les angles et les intensités des rayons X diffractés, on peut obtenir un motif de diffraction qui est unique pour chaque matériau cristallin, et elle sert à Déterminer la composition minéralogique des matériaux de construction tels que les ciments, les bétons, et les roches. Cela permet d'identifier les phases cristallines présentes et d'évaluer leur influence sur les propriétés mécaniques et durabilité de nos matériaux cimentaires (mortiers).

3.2.1 Résultats de l'essai :

- **Mortier 19 :**

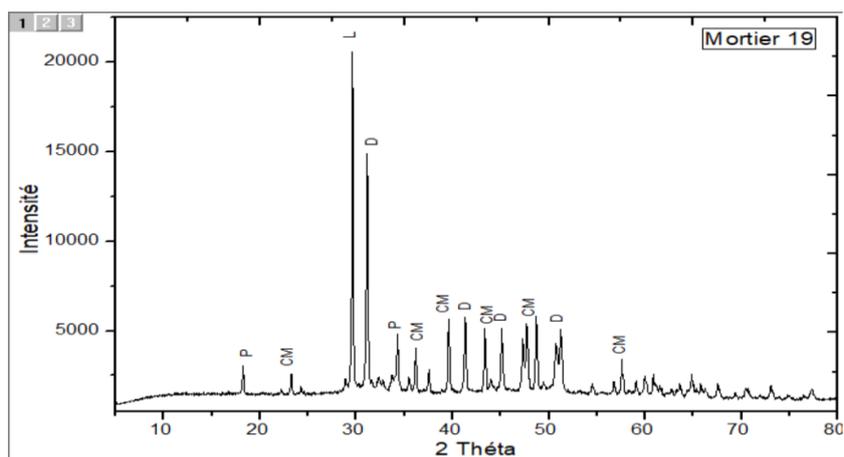


Figure 4. 21: Spectre DRX de la poudre du mortier 19

○ Mortier 21 :

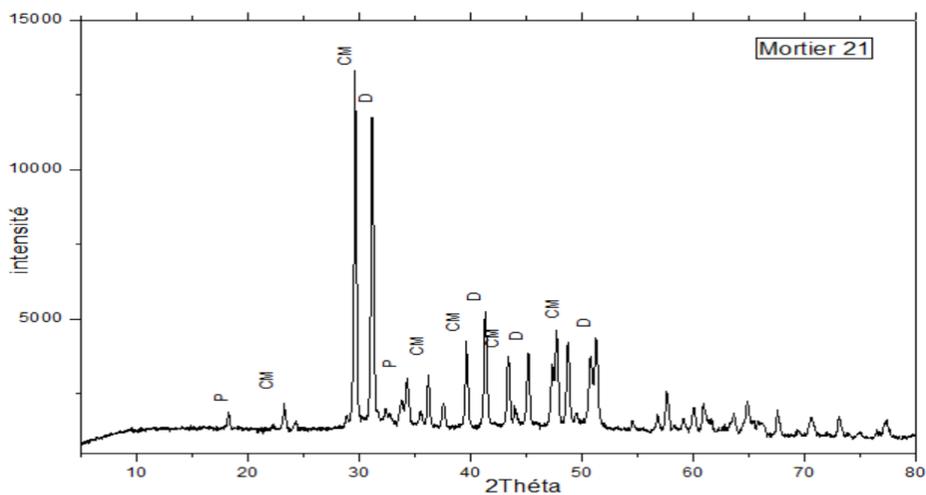


Figure 4. 22 : Spectre DRX de la poudre du mortier 21

○ Mortier 22 :

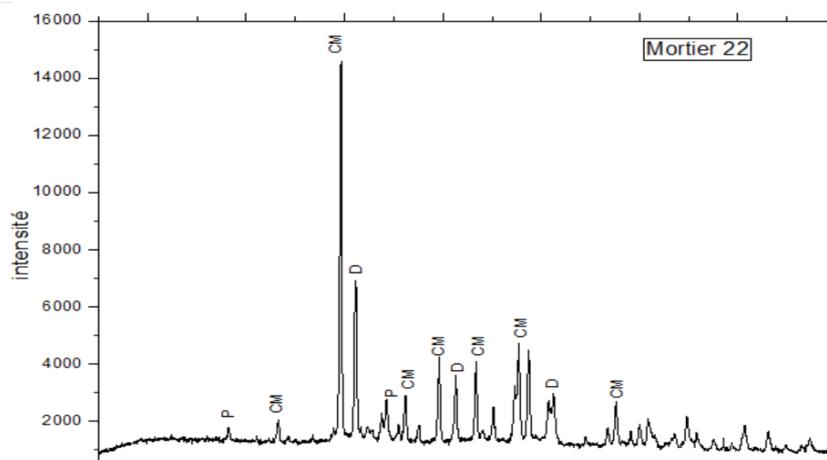


Figure 4. 23 : Spectre DRX de la poudre du mortier 22

○ Mortier 24 :

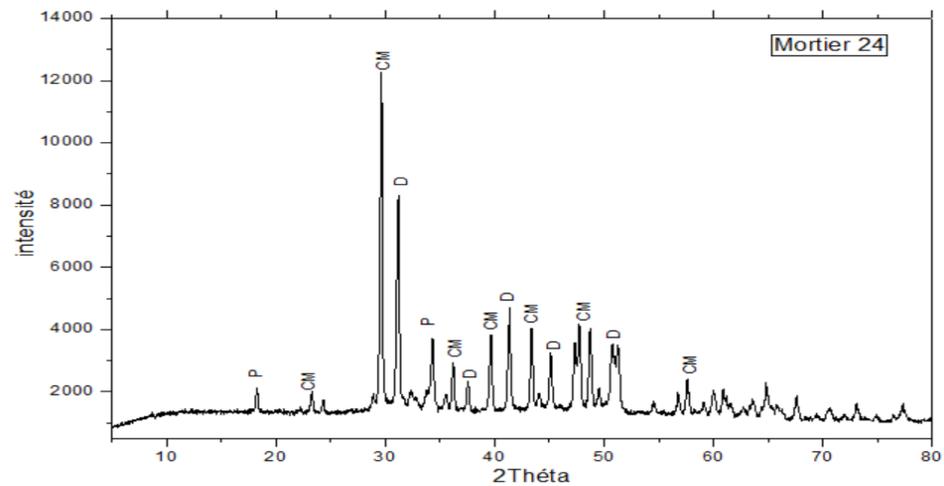


Figure 4. 24 : Spectre DRX de la poudre du mortier 24

○ Mortier 33 :

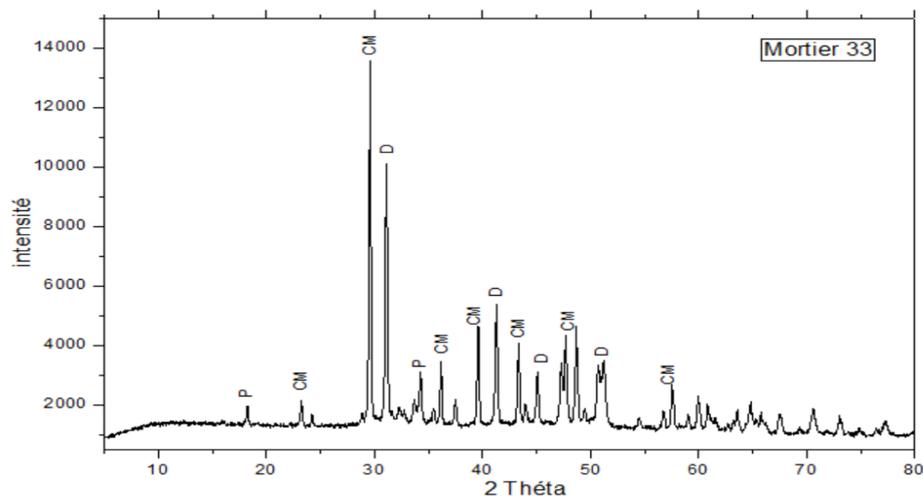


Figure 4. 25: Spectre DRX de la poudre du mortier 33

3.2.2 Interprétation des résultats :

Éprouvette 19 : 24h Séchage, 5h Mouillage

- **Dolomite (D)** : Présente en quantité notable, ce qui indique une bonne résistance thermique et une stabilité chimique.
- **Calcite Magnésium (CM)** : Modérément présente, favorisant la réactivité à l'humidité.
- **Portlandite (P)** : Abondante, ce qui est typique pour les ciments en cours d'hydratation, contribuant à la résistance initiale.

Éprouvette 21 : Éprouvette Témoin dans l'Eau

- **Dolomite (D)** : Quantité légèrement réduite par rapport à l'éprouvette 19, probablement en raison de l'absence de cycles thermiques extrêmes.
- **Calcite Magnésium (CM)** : Stable, favorisant une réactivité à l'eau constante.
- **Portlandite (P)** : Réduction relative, indiquant une possible dissolution ou réaction continue dans l'eau.

Éprouvette 22 : Éprouvette Témoin à l'Air Libre

- **Dolomite (D)** : Quantité similaire à celle des éprouvettes précédentes, indiquant une stabilité minéralogique sous des conditions ambiantes.
- **Calcite Magnésium (CM)** : Constante, montrant une bonne stabilité chimique.
- **Portlandite (P)** : Quantité comparable à celle de l'éprouvette 21, montrant un comportement similaire à l'air libre par rapport à l'immersion dans l'eau.

Éprouvette 24 : Chauffage/Refroidissement à 100°C

- **Dolomite (D)** : Quantité stable, ce qui montre une bonne résistance aux cycles de température élevée.
- **Calcite Magnésium (CM)** : Légère augmentation, indiquant une possible transformation chimique favorisée par la chaleur.
- **Portlandite (P)** : Quantité similaire à celle des éprouvettes 21 et 22, indiquant une résistance similaire au changement thermique.

Éprouvette 33 : Cycles Gel et Dégel -10°C à +20°C

- **Dolomite (D)** : Notablement présente, ce qui est bénéfique pour la stabilité thermique.
- **Calcite Magnésium (CM)** : Augmentation notable, suggérant une amélioration de la réactivité à l'humidité due aux cycles de gel-dégel.
- **Portlandite (P)** : Diminution relative, ce qui pourrait indiquer une dégradation progressive des produits d'hydratation sous cycles gel-dégel.

Comparaison Synthétique des Éprouvettes

1. **Stabilité Thermique et Minéralogique :**
 - Toutes les éprouvettes montrent une présence stable de dolomite, indiquant une bonne résistance thermique et une stabilité chimique.
 - Les cycles thermiques extrêmes (chauffage à 100°C et cycles gel-dégel) n'affectent pas significativement la stabilité minéralogique de la dolomite.
2. **Réactivité à l'Humidité :**
 - La calcite magnésium reste constante dans les conditions ambiantes (éprouvettes 21 et 22) et montre une légère augmentation dans les conditions extrêmes (éprouvettes 24 et 33), suggérant une amélioration de la réactivité à l'humidité due aux cycles de température.
3. **Durcissement et Hydratation :**
 - La portlandite est abondante dans l'éprouvette 19 (24h séchage, 5h mouillage), ce qui indique un bon processus de durcissement initial.

- Les éprouvettes 21 (dans l'eau) et 22 (à l'air libre) montrent une réduction de la portlandite par rapport à l'éprouvette 19, probablement en raison de la dissolution continue ou de l'évaporation.
- Les éprouvettes soumises à des cycles thermiques extrêmes (24 et 33) montrent une réduction progressive de la portlandite, indiquant un possible épuisement des produits d'hydratation.

Pour conclure, Les analyses montrent que les différents cycles de traitement influencent de manière significative la composition chimique et minéralogique des mortiers. Les cycles de chauffage et de refroidissement à 100°C et les cycles de gel-dégel (-20°C à +20°C) augmentent la réactivité à l'humidité tout en réduisant progressivement la portlandite, suggérant une diminution de la capacité de durcissement du ciment à long terme. Les conditions ambiantes (éprouvettes témoin) maintiennent une stabilité chimique relative, tandis que les cycles de séchage et mouillage favorisent un processus de durcissement initial plus rapide.

Conclusion :

En conclusion, les cycles thermiques influencent la réactivité chimique et la stabilité minéralogique des mortiers, affectant potentiellement leur durabilité et leur résistance à long terme. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les conditions environnementales lors de la conception et de la sélection des matériaux de construction pour garantir la performance et la longévité des infrastructures. Les techniques FRX et XRD se révèlent être des outils essentiels pour évaluer et comprendre ces impacts, permettant une optimisation des formulations de mortier pour des applications spécifiques.

CONCLUSION GENERALE.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude menée sur l'impact des cycles thermiques et hydriques et voir leurs influences sur les propriétés mécaniques et physiques des mortiers a permis de mettre plusieurs observations et conclusions essentielles pour la compréhension du phénomène de dégradation des matériaux cimentaires. Cette conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus lors de notre protocole expérimental.

Les cycles thermiques, incluant le chauffage à 100°C et les cycles de gel-dégel (-20°C à +20°C), ont montré des effets significatifs sur la réactivité chimique et la stabilité minéralogique des mortiers. Les principaux points à retenir sont :

- **Stabilité Minéralogique** : La dolomite, présente dans toutes les éprouvettes de mortiers a démontré une stabilité thermique, ne subissant pas de modifications significatives même sous des conditions extrêmes de température.
- **Réactivité à l'Humidité** : Les cycles thermiques ont augmenté la réactivité à l'humidité, comme en témoigne l'augmentation de la calcite magnésium dans certaines éprouvettes. Cela suggère que des conditions thermiques extrêmes peuvent favoriser l'hydratation et la réactivité des composants du mortier.
- **Réduction de la Portlandite** : Une réduction progressive de la portlandite a été observée, indiquant un possible épuisement des produits d'hydratation. Ceci est crucial car la portlandite joue un rôle important dans le processus de durcissement initial des mortiers.

Les cycles de séchage et de mouillage ont également un impact notable sur les propriétés des mortiers :

- **Processus de Durcissement** : Les cycles de séchage et de mouillage ont favorisé un processus de durcissement initial plus rapide. Cela est dû à l'humidité ambiante qui aide à l'hydratation continue du ciment, ce qui est essentiel pour le développement des propriétés mécaniques à long terme.
- **Stabilité Chimique** : Les conditions ambiantes ont permis de maintenir une stabilité chimique relative des mortiers, contrairement aux conditions extrêmes qui ont accéléré certains processus de dégradation.

Les résultats de cette étude soulignent l'importance de considérer les conditions environnementales lors de la conception et de la sélection des matériaux de construction :

- **Durabilité** : Les cycles thermiques et hydriques influencent la durabilité des mortiers. Les conditions de gel-dégel, en particulier, montrent que la saturation en eau est un facteur crucial, accélérant la dégradation des matériaux.
- **Résistance Mécanique** : Les propriétés mécaniques, telles que la résistance à la compression, sont affectées par les cycles de traitement thermique. Les essais ont montré une diminution progressive de la résistance en fonction des cycles thermiques appliqués.

On conclut aussi pour les propriétés physiques, ce qui suit :

- Les résultats ont montré des variations significatives dans la hauteur et la longueur des éprouvettes soumises aux cycles thermiques. Une contraction notable a été observée en réponse aux variations de température.
- La stabilité chimique relative des éprouvettes témoins ou de référence a été maintenue, suggérant que les conditions ambiantes sont plus favorables à long terme.

Les conclusions tirées de cette étude ont des implications pratiques importantes pour le domaine du génie civil et la construction :

- **Optimisation des Formulations** : Les techniques d'analyse, telles que la FRX et la DRX, sont essentielles pour évaluer et comprendre les impacts des cycles thermiques et hydriques. Elles permettent d'optimiser les formulations de mortier pour des applications spécifiques, garantissant ainsi la performance et la longévité des infrastructures.
- **Conception des Infrastructures** : Il est crucial de prendre en compte les conditions environnementales extrêmes lors de la conception des infrastructures. Une meilleure compréhension des effets des cycles thermiques et hydriques permet de sélectionner des matériaux plus résistants et durables et adapté à chaque environnement, assurant ainsi une meilleure performance des constructions sur le long terme.

D'une manière générale, cette étude démontre que les cycles thermiques et hydriques influencent de manière significative les propriétés mécaniques et physiques des mortiers. Les changements observés dans la réactivité chimique, la stabilité minéralogique et la durabilité des échantillons mettent en évidence la nécessité de choisir les matériaux de construction en fonction des conditions environnementales auxquelles ils seront exposés. Ces résultats offrent une base pour des recherches futures visant à améliorer la durabilité et la performance des infrastructures dans des environnements variés et potentiellement extrêmes.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES.

REFERENCE :

- [1] Soleilhet, F. (2017). Étude expérimentale et numérique des matériaux cimentaires sous sollicitation hydro-mécanique. *Academic Journal of Civil Engineering*, 35(1), 627-634.
- [2] Nguyen, T. H. (2015). « *Contribution à l'étude du comportement thermomécanique à très haute température des matériaux composites pour la réparation et/ou le renforcement des structures de Génie Civil* ». thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I).
- [3] M'jahad, S. (2012). *Impact de la fissuration sur les propriétés de rétention d'eau et de transport de gaz des géomatériaux: Application au stockage géologique des déchets radioactifs* (Doctoral dissertation, Ecole centrale de Lille).
- [4] Tamtsia, B. T., Beaudoin, J.J. (2000). "Basic creep of hardened cement paste. A reexamination of the role of water". *Cement and Concrete Research* 30: pp: 1465-1475
- [5] Wang, P.S., Ferguson, M. M., Eng, G., Bentz, D. P., Ferraris, C. F., Clifton, J. R. (1998). "1H nuclear magnetic resonance characterization of Portland cement: molecular diffusion of water studied by spin relaxation and relaxation time-weighted imaging". *Journal of Material Science* 33 pp: 3065-3071.
- [6] Jensen, O.M., Hansen, P.F. (2001). "Water-entrained cement-based materials.I". Principles and theoretical background. *Cement and Concrete Research* 31, pp: 647-654.
- [7] Brouwers, H.J.H. (2004). "The work of Powers and Brownyard revisited" Part 1. *Cement and Concrete Research* 34, pp: 1697-1716.
- [8] Z. Lafhaj, M. Goueygou, A. Djerbi, M. Kaczmarek, Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content, *Cement and Concrete Research* 36 (4) (2006) 625–633.
- [9] CASTELLOTE M., ALONSO C., ANDRADE C., TIRILLAS X., CAMPO J., , (2004)"Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction". *Cement and concrete research*, Vol. 34, pp: 1633-1644.
- [10] PHAN. L.T AND CARINO. N.J, (2003)"Codes provisions for high strength concrete strength – temperature relationship at elevated temperature". National institute of standards and technology, Materials and structures, Vol. 36, N°256, pp: 91-98.
- [11] KHOURY. G.A, (1992)"Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment". *Magazine of Concrete Research*, 44, n° 161, pp: 291-309.
- [12] DIAS W.P.S, KHOURY G.A, SULLIVAN P.J.E, (1990)"Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C". *ACI materials journal*, title n°87-M18.
- [13] CASTILLO. C AND DURRANI. A.J, (1990), "Effect of transient high temperature on high-strength concrete". *ACI materials journal*, title n°87-M7, pp: 47-53.

- [14] FELICITTIR., GAMBAROVA.P.G., SORAM.N., KHOURY G.A. (2000)"Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling". Fifth Rilem symposium on fibre-reinforced concretes N°5 Lyon, France, pp: 749-758.
- [15] HAGER.I, (2004)"Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécaniques". Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et de chaussées.
- [16] DIAS W.P.S, KHOURY G.A, SULLIVAN P.J.E, (1990)"Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C". ACI materials journal, title n°87-M18.
- [17] HARADA T., TAKEDA J., YAMANE S., FURUMURA F., (1970)"Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures". International seminar on concrete for nuclear reactors, Germany, 5 October, Vol. 1, pp: 377-406.
- [18] Rilem Technical Committees 129-MHT, (1995)"Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 1: Introduction, Part 2: Stress-strain relation, Part 3: Compressive strength for service and accident conditions". Materials and Structures, Vol. 28, N° 181, pp: 410-414.
- [19] Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E ,(1986)"Strain of concrete during first cooling from 600°C under load". Magazine of concrete research, Vol. 38, pp: 3-12.
- [20] HAGER.I,(2004)"Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécaniques". Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et de chaussées.
- [21] NOUMOWE. A, (1995)"Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton - Cas particulier du béton à hautes performances". Thèse de doctorat Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ (INSA), Lyon I.
- [22] THELANDERSSON. S, (1971)"Effect of high temperatures on tensile strength of concrete". Lund Institute of Technology, Division of Struct, Mech, and Concrete Constr, Neostyled, Lund, p: 27.
- [23] FELICETTI, R., GAMBAROVA, P.G., SORA, MP.N., KHOURY, G.A (1985)"Mechanical Behaviour of HPC and UHPC in Direct Tension at High Temperature and After Cooling".
- [24] SABEUR H., COLINA H., BEJJANI M., (2007)"Elastic strain, young's modulus variation during uniform heating of concrete». Magazine of concret research, vol59, pp : 559- 566.
- [25] KANEMA. T, (2007)"Influence des paramètres de formulations sur le comportement à haute température des bétons". Thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pontoise.
- [26] MALIER. Y, (1982)"Action de la température sur les propriétés du béton durci". In : Baron J., Sauterey R., Le béton hydraulique, Paris presses de l'ENPC, pp :409-422.

- [27] Fares H., (2009), "Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée ", thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise.
- [28] J. BARON et al, (1995) " Le béton hydraulique (connaissance et pratique) " ; Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [29] COLLET. Y, (1977)"Etude des propriétés du béton soumis à des températures élevées entre 200 et 900°C". Annales des Travaux Publics Belges, no 4, pp :332-338.
- [30] S. ATTIL, TP 3eme année licence sur les matériaux de construction, Université de Bejaia, 2010.
- [31] G. DREUX, J.Festa. Nouveau guide de béton et ses constitutions, 8eme Edition, 1998.
- [32] IBOUZITEN.D, Valorisation des déchets industriels (Boues d'usinage) dans les bétons et les mortier, Mémoire fin d'études, Université de Bejaia, 2015.
- [33] Souhil, L. A. K. (2016, 21 juin). *IMPACT DU RAPPORT EAU-CIMENT SUR LES MORTIERS SOUMIS AUX HAUTES TEMPÉRATURES*. <https://dspace.univ-bba.dz/handle/123456789/774#:~:text=Les%20r%C3%A9sultats%20obtenus%20montrent%20qu,3%20et%200%2C4>).
- [34] ASTM International. (2015). ASTM C666/C666M-15: Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0666_C0666M-15
- [35] Guinebertière, R. (2002). Diffraction des rayons X sur échantillons polycristallins. Hermès.
- [36] MethodeDEssai-LCPC-ME58.pdf : https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/MethodeDEssai/MethodeDEssai-LCPC-ME58.pdf
- [37] ASTM International. (2020). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement (ASTM D792-20). West Conshohocken, PA : ASTM International.
- [38] Lydon, F.D., & Balendran, R.V. (1986). "Some observations on the thermal conductivity of plain concrete." *Cement and Concrete Research*, 16(4), 683-694.
- [39] ASTM International. (2018). ASTM C39/C39M-18: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M

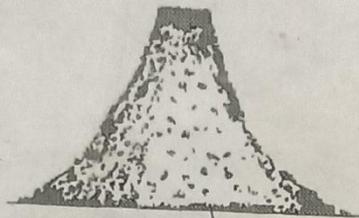
ANNEXES

ANNEXE A : indications relatives à l'état saturé surface sèche des sables

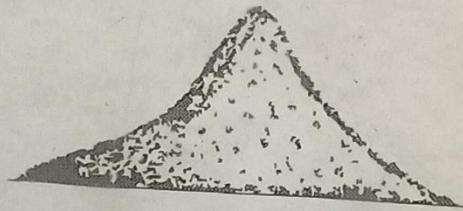
EN 109

Annexe F
(informative)

Indications relatives à l'état saturé surface sèche des sables



a) Granulats humides ; conservent la forme presque complète du moule métallique



b) Granulats légèrement humides ; affaissement sensible observé



c) Granulats saturés surface sèche ; effondrement presque total mais un pic bien défini reste visible et les surfaces sont réglées



d) Granulats presque secs en étuve ; pas de pic distinct, profil de la surface quasiment courbe

NOTE Ces croquis ne sont pas à l'échelle et ne sont donnés qu'à titre indicatif.

ANNEXE B : suivi des masses pendant 28j

| Masses des éprouvettes après découffrage | Série a | Série b | Série c |
|--|---------|---------|---------|
| 18 | 640 | 628 | 610 |
| 19 | 640 | 626 | 626 |
| 20 | 646 | 642 | 620 |
| 21 | 644 | 616 | 644 |
| 22 | 636 | 624 | 630 |
| 23 | 626 | 634 | 634 |
| 24 | 630 | 650 | 628 |
| 25 | 634 | 630 | 614 |
| 26 | 628 | 636 | 618 |
| 27 | 602 | 608 | 620 |
| 28 | 608 | 608 | 618 |
| 29 | 640 | 628 | 630 |
| 30 | 614 | 610 | 600 |
| 31 | 602 | 596 | 616 |
| 32 | 608 | 610 | 608 |
| 33 | 598 | 608 | 608 |
| 34 | 606 | 628 | 594 |

| Masse des éprouvettes après 1j de murissement | Série a | Série b | Série c |
|---|---------|---------|---------|
| 18 | 626 | 642 | 626 |
| 19 | 652 | 648 | 640 |
| 20 | 658 | 656 | 634 |
| 21 | 644 | 628 | 656 |
| 22 | 648 | 636 | 634 |

ANNEXES

| | | | |
|----|-----|-----|-----|
| 23 | 638 | 646 | 642 |
| 24 | 646 | 662 | 640 |
| 25 | 648 | 634 | 628 |
| 26 | 634 | 640 | 632 |
| 27 | | | |
| 28 | | | |
| 29 | | | |
| 30 | | | |
| 31 | | | |
| 32 | | | |
| 33 | | | |
| 34 | | | |

| Masse des éprouvettes après 7j de murissement | Série a | Série b | Série c |
|---|---------|---------|---------|
| 18 | 628 | 642 | 630 |
| 19 | 654 | 650 | 640 |
| 20 | 658 | 658 | 638 |
| 21 | 658 | 632 | 658 |
| 22 | 652 | 640 | 646 |
| 23 | 650 | 646 | 646 |
| 24 | 648 | 664 | 642 |
| 25 | 652 | 646 | 628 |
| 26 | 646 | 652 | 634 |
| 27 | 626 | 622 | 634 |
| 28 | 620 | 622 | 633 |
| 29 | 656 | 640 | 644 |
| 30 | 616 | 626 | 614 |
| 31 | 628 | 612 | 632 |
| 32 | 624 | 614 | 626 |

ANNEXES

| | | | |
|----|-----|-----|-----|
| 33 | 610 | 620 | 620 |
| 34 | 622 | 652 | 608 |

| Masse des éprouvettes après 14j de murissement | Série a | Série b | Série c |
|--|---------|---------|---------|
| 18 | 628 | 636 | 628 |
| 19 | 654 | 654 | 642 |
| 20 | 662 | 660 | 638 |
| 21 | 658 | 632 | 660 |
| 22 | 642 | 640 | 648 |
| 23 | 652 | 650 | 648 |
| 24 | 648 | 666 | 636 |
| 25 | 652 | 634 | 632 |
| 26 | 648 | 654 | 638 |
| 27 | 626 | 622 | 634 |
| 28 | 624 | 624 | 634 |
| 29 | 658 | 644 | 646 |
| 30 | 628 | 626 | 616 |
| 31 | 628 | 612 | 634 |
| 32 | 626 | 626 | 628 |
| 33 | 616 | 622 | 624 |
| 34 | 626 | 654 | 610 |

| Masse des éprouvettes après 28j de murissement | Série a | Série b | Série c |
|--|---------|---------|---------|
| 18 | 630 | 644 | 628 |
| 19 | 656 | 652 | 640 |
| 20 | 664 | 658 | 640 |
| 21 | 658 | 632 | 658 |

| | | | |
|----|-----|-----|-----|
| 22 | 652 | 640 | 636 |
| 23 | 652 | 650 | 646 |
| 24 | 638 | 662 | 646 |
| 25 | 654 | 646 | 632 |
| 26 | 646 | 652 | 643 |
| 27 | 626 | 622 | 634 |
| 28 | 624 | 622 | 632 |
| 29 | 658 | 644 | 646 |
| 30 | 626 | 626 | 616 |
| 31 | 626 | 612 | 632 |
| 32 | 624 | 624 | 624 |
| 33 | 612 | 618 | 624 |
| 34 | 624 | 652 | 608 |

ANNEXE C : propriétés physiques après le traitement thermique et hydrique.

Perte de masse après traitement thermique et hydrique.

| Chauffage- refroidissement | 40 C° | 80 C° | 100 C° | 150 C° | 180 C° | 200 C° | 300 C° |
|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 629 | 640,7 | 640 | 616 | 638,7 | 616,7 | 579 |
| 1 | 626,7 | 636,5 | 631,7 | 590,7 | 601,3 | 578,29 | 576,2 |
| 2 | 624,8 | 629,8 | 625,3 | 583,3 | 596 | 575,65 | 574,4 |
| 3 | 622,7 | 624,7 | 621,3 | 579,33 | 595,33 | 571,51 | 572,9 |
| 4 | 622,7 | 622 | 617,4 | 577,33 | 594,7 | 570,09 | 569,8 |
| 5 | 621,3 | 617 | 611,9 | 574,7 | 593,3 | 567,9 | 567,5 |
| 6 | 620,7 | 614,6 | 608 | 574,1 | 592,2 | 564,7 | 563 |
| 7 | 620 | 613,7 | 606,9 | 573,5 | 590,7 | 563,33 | 561,4 |
| 8 | 620 | 613 | 605,3 | 573,2 | 589,3 | 561,9 | 554,6 |

| Cycles séchage-mouillage | La masse |
|--------------------------|----------|
| 0 | 646 |
| 1 mouillage | 652 |
| 1' séchage | 604 |
| 2 mouillage | 642 |

ANNEXES

| | |
|-------------|--------|
| 2' séchage | 604,7 |
| 3 mouillage | 638 |
| 3' séchage | 600,7 |
| 4 mouillage | 637,33 |
| 4' séchage | 599,7 |
| 5 mouillage | 633,3 |
| 5' séchage | 597,7 |
| 6 mouillage | 628,7 |
| 6' séchage | 595,7 |
| 7 mouillage | 622,6 |
| 7' séchage | 593,8 |
| 8 mouillage | 621,4 |
| 8' séchage | 592,1 |

| Cycles gel-dégel | Éprouvette non saturée | Éprouvette saturée en eau |
|------------------|------------------------|---------------------------|
| 0 | 610 | 626 |
| 1 | 608,5 | 623,6 |
| 2 | 608 | 623,6 |
| 3 | 608 | 623 |
| 4 | 607,33 | 622,5 |
| 5 | 605,9 | 621,3 |
| 6 | 605,8 | 620,3 |
| 7 | 605,2 | 619,5 |
| 8 | 604,4 | 617,3 |

| Éprouvettes témoin | À l'air libre | Dans l'eau |
|--------------------|---------------|------------|
| Début d'essai | 638 | 644,6 |
| Fin d'essai | 622,6 | 649,3 |

Les variations dimensionnelles.

| Longueur | 40°C | mou- séch(5h- 24h) | temoi n(dans l'eau) | temoi n(a l'air) | 80°C | 100°c | 180°C | 200°C | 150°C | gel- dégel(non saturé e) | gel- dégel(saturé e) | 300°C |
|----------|-------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|--------------------------------|-------|
| 10 | 16,3 | 16,11 | 16,2 | 16,1 | 16,3 | 16,1 | 16,29 | 16,42 | 16,24 | 16,18 | 16,12 | 16,22 |
| 11 | 16,3 | 16,1 | 16,24 | 16,09 | 16,3 | 16,1 | 16,25 | 16,4 | 16,23 | 16,18 | 16,1 | 16,22 |
| 12 | 16,3 | 16,12 | | | 16,3 | 16,1 | 16,24 | 16,4 | 16,23 | 16,17 | 16,1 | 16,22 |
| 13 | 16,3 | 16,1 | | | 16,29 | 16,08 | 16,24 | 16,39 | 16,22 | 16,18 | 16,1 | 16,21 |
| 14 | 16,29 | 16,12 | | | 16,29 | 16,07 | 16,23 | 16,38 | 16,21 | 16,17 | 16,1 | 16,2 |
| 15 | 16,29 | 16,1 | | | 16,28 | 16,07 | 16,22 | 16,38 | 16,21 | 16,17 | 16,09 | 16,2 |
| 16 | 16,29 | 16,11 | | | 16,28 | 16,06 | 16,22 | 16,37 | 16,2 | 16,16 | 16,09 | 16,2 |
| 17 | 16,29 | 16,1 | | | 16,28 | 16,06 | 16,22 | 16,37 | 16,19 | 16,16 | 16,1 | 16,19 |
| 18 | 16,29 | 16,12 | | | 16,27 | 16,05 | 16,21 | 16,36 | 16,18 | 16,16 | 16,08 | 16,19 |

| La hauteur | 40°C | mou- séch(5 h-24h) | temoi n(dans l'eau) | temoi n(a l'air) | 80°C | 100°c | 180°C | 200°C | 150°C | gel- dégel(non saturé e) | gel- dégel(saturé e) | 300°C |
|---------------|-------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|--------------------------------|-------|
| b0 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4,05 | 4,082 | 4 |
| b1 | 4 | 3,997 | 4,032 | 3,999 | 3,998 | 3,991 | 3,976 | 3,958 | 3,987 | 4,041 | 4,03 | 3,988 |
| b2 | 4 | 3,995 | | | 3,998 | 3,989 | 3,97 | 3,952 | 3,974 | 4,037 | 4,021 | 3,986 |
| b3 | 3,999 | 3,99 | | | 3,995 | 3,988 | 3,963 | 3,951 | 3,97 | 4,035 | 4,017 | 3,986 |
| b4 | 3,999 | 3,987 | | | 3,993 | 3,987 | 3,956 | 3,95 | 3,965 | 4,031 | 4,013 | 3,986 |
| b5 | 3,999 | 3,987 | | | 3,993 | 3,987 | 3,952 | 3,947 | 3,963 | 4,03 | 4,012 | 3,985 |

ANNEXES

| | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| b6 | 3,999 | 3,987 | | | 3,993 | 3,986 | 3,948 | 3,942 | 3,96 | 4,03 | 4,012 | 3,984 |
| b7 | 3,999 | 3,987 | | | 3,993 | 3,986 | 3,945 | 3,936 | 3,959 | 4,03 | 4,011 | 3,984 |
| b8 | 3,999 | 3,987 | | | 3,993 | 3,986 | 3,943 | 3,93 | 3,959 | 4,029 | 4,01 | 3,984 |

Mesures ultrasoniques.

| Chauffage- refroidisse ment | 40 C° | 80 C° | 100 C° | 150 C° | 180 C° | 200 C° | 300°C |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 0 | 4561,62 | 4569,33 | 4447,98 | 4640,44 | 4439,13 | 4604,58 | 4587,34 |
| 1 | 4558,1 | 4548,67 | 4426 | 4600,15 | 4356,37 | 4546,36 | 4334,27 |
| 2 | 4554,72 | 4537,47 | 4395,21 | 4567,023 | 4319,27 | 4423,62 | 4124,75 |
| 3 | 4552,38 | 4499,17 | 4378,49 | 4513,6 | 4258,56 | 4356,51 | 4004 |
| 4 | 4550,38 | 4467,45 | 4354,26 | 4467,85 | 4221,35 | 4243,44 | 3988,56 |
| 5 | 4549,95 | 4448,33 | 4315,65 | 4398,36 | 4178,37 | 4139,03 | 3963,98 |
| 6 | 4547,58 | 4418,19 | 4278,58 | 4346,75 | 4134,69 | 4116,31 | 3946,9 |
| 7 | 4545,87 | 4378,28 | 4214,8 | 4245,47 | 4045,65 | 4034,92 | 3809,65 |
| 8 | 4543,96 | 4357,82 | 4142,56 | 4058,17 | 3904,12 | 3923,61 | 3800,23 |

| mouillage pour 5h, séchage pour 24h | La masse (gr) |
|-------------------------------------|---------------|
| 0 | 4596,12 |
| 1 mouillage | 4528,5 |
| 1 séchage | 4316,78 |
| 2 mouillage | 4218,57 |
| 2 séchage | 4213,4 |
| 3 mouillage | 4160,5 |
| 3 séchage | 4276,31 |
| 4 mouillage | 4155,54 |
| 4 séchage | 4440,81 |

ANNEXES

| | |
|-------------|---------|
| 5 mouillage | 4277,5 |
| 5 séchage | 4263,91 |
| 6 mouillage | 4290,47 |
| 6 séchage | 4099,3 |
| 7 mouillage | 4112,92 |
| 7 séchage | 4068,08 |
| 8 mouillage | 4193,65 |
| 8 séchage | 4085,26 |

| Cycles gel-dégel | Éprouvette saturée | Éprouvettes non saturée |
|------------------|--------------------|-------------------------|
| 0 | 4738,23 | 4213,54 |
| 1 | 4957,06 | 4412,57 |
| 2 | 4763,31 | 4296,79 |
| 3 | 4963,31 | 4686,05 |
| 4 | 4649,14 | 4399,62 |
| 5 | 4939,5 | 4470,91 |
| 6 | 4648,7 | 4349,3 |
| 7 | 4948,7 | 4684,06 |
| 8 | 4693,88 | 4414,29 |

| | À l'air libre | Dans l'eau |
|------------------|---------------|------------|
| Début de l'essai | 4854,27 | 4723,03 |
| Fin de l'essai | 4974,87 | 4878,78 |

Conductivité thermique.

| Essai | λ |
|---|-----------|
| chauffage-refroidissement 40°C | 1,7926 |
| séchage 24h mouillage 5h | 1,937 |
| séchage 3 jours mouillage 2 jours | 2,306 |
| éprouvette témoin laissée dans l'eau | 2,5345 |
| éprouvette témoin laissée à l'air libre | 2,31 |

| | |
|------------------------------------|--------|
| chauffage-refroidissement 80 °C | 2,0208 |
| chauffage refroidissement 100°C | 2,2707 |
| chauffage-refroidissement 200°C | 2,9771 |
| chauffage-refroidissement 150°C | 2,4722 |
| chauffage-refroidissement 180°C | 2,8256 |
| gel-dégel éprouvette non-saturé 33 | 2,5518 |
| gel-dégel éprouvette saturée 41 | 2,65 |

La pesé hydrostatique.

| | masse avant (sans paraffine) | masse avant (avec paraffine) | masse après |
|--|------------------------------|------------------------------|-------------|
| Chauffage-refroidissement 40°C | 302,17 | 313,34 | 170,3 |
| Séchage-mouillage 5h dans l'eau 24h dans l'étuve | 301,08 | 309,3 | 165,38 |
| Séchage-mouillage 2jours dans l'eau 3jours à l'air libre | 311,84 | 322,24 | 175,01 |
| Eprouvette témoin laissée dans l'eau | 309,12 | 324,61 | 174 |
| Eprouvette témoin laissée à l'air libre | 302,25 | 309,57 | 173,47 |
| Chauffage-refroidissement 80°C | 292,77 | 304,74 | 162,37 |
| Chauffage-refroidissement 100°C | 294,55 | 308,24 | 162,51 |
| Chauffage-refroidissement 180°C | 289,33 | 299,23 | 160,26 |
| Chauffage-refroidissement 200°C | 313,18 | 323,22 | 174,6 |

ANNEXES

| | | | |
|----------------------------------|--------|--------|---------|
| Chauffage-refroidissement 150°C | 276,25 | 306,82 | 165,49 |
| Gel-dégel éprouvette non saturée | 295,25 | 304,19 | 166,709 |
| Gel-dégel éprouvette saturée | 299,1 | 306,67 | 169,39 |

Dessiccateur :

| | masse avant | masse après |
|--|-------------|-------------|
| Chauffage-refroidissement 40°C | 305,7 | 318,4 |
| Séchage-mouillage 5h dans l'eau 24h dans l'étuve | 311,8 | 317,8 |
| Eprouvette témoin à l'eau | 311,1 | 312,1 |
| Eprouvette témoin à l'air libre | 332,5 | 333,8 |
| Chauffage-refroidissement 80°C | 324,7 | 335,8 |
| Chauffage-refroidissement 100°C | 312,7 | 324,7 |
| Chauffage-refroidissement 180°C | 294,7 | 325,3 |
| Chauffage-refroidissement 200°C | 323,3 | 306,2 |
| Chauffage-refroidissement 150°C | 294,2 | 305,9 |
| Gel-dégel éprouvette non saturée | 300 | 302 |
| Gel-dégel éprouvette saturée | 304,2 | 306,1 |

ANNEXE D : propriétés mécaniques après traitement mécanique.

Résistance à la compression.

| Essai | b |
|--|-------|
| Chauffage-refroidissement 40°C | 65,67 |
| Séchage-mouillage 5h dans l'eau 24h dans l'étuve | 56,72 |
| Eprouvette témoin laissée dans l'eau | 70,6 |
| Eprouvette témoin laissée à l'air libre | 88,85 |
| Chauffage-refroidissement 80°C | 60,1 |
| Chauffage-refroidissement 100°C | 54,05 |
| Chauffage-refroidissement 180°C | 50,88 |
| Chauffage-refroidissement 200°C | 47,86 |
| Chauffage-refroidissement 150°C | 53,37 |
| Gel-dégel éprouvette non saturée | 81,92 |
| Gel-dégel éprouvette saturée | 75,49 |

Résistance à la traction.

| | Résistance à la traction |
|--|--------------------------|
| Chauffage-refroidissement 40°C | 5,7 |
| Séchage-mouillage 5h dans l'eau 24h dans l'étuve | 5,55 |
| Eprouvette témoin laissée dans l'eau | 4,56 |

ANNEXES

| | |
|---|------|
| Eprouvette témoin laissée à l'air libre | 4,1 |
| Chauffage-refroidissement 80°C | 5,24 |
| Chauffage-refroidissement 100°C | 5,66 |
| Chauffage-refroidissement 180°C | 4,51 |
| Chauffage-refroidissement 200°C | 3,77 |
| Chauffage-refroidissement 150°C | 4,72 |
| Gel-dégel éprouvette non saturée | 3,81 |
| Gel-dégel éprouvette saturée | 3,68 |

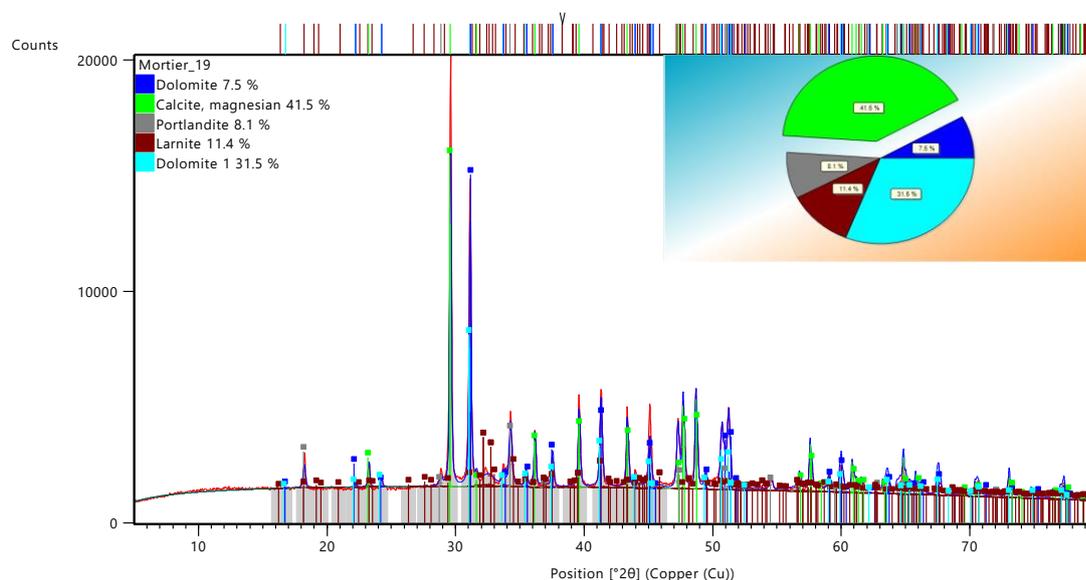
ANNEXES E : les propriétés physico-chimiques après le traitement thermique et hydrique.

Fluorescence des rayons X (FRX):

| | |
|--|--|
| E.L 72,61% ^{+/-0,000%} Léger | Mg 1,97% ^{+/-0,415%} Magnesium |
| Al 1,30% ^{+/-0,034%} Aluminium | Si 1,72% ^{+/-0,020%} Silicon |
| S 2910,9 PPM ^{+/-35,3 PPM} Sulfur | Ca 21,18% ^{+/-0,022%} Calcium |
| Mn 97,6 PPM ^{+/-21,3 PPM} Manganese | Fe 8386,4 PPM ^{+/-125,5 PPM} Iron |
| Zn 87,5 PPM ^{+/-6,6 PPM} Zinc | As 37,0 PPM ^{+/-4,5 PPM} Arsenic |
| Sr 565,8 PPM ^{+/-6,7 PPM} Strontium | Pb 128,8 PPM ^{+/-6,8 PPM} Lead |

Diffraction des rayons x :Mortier 19 :

Graphics: (Bookmark2)

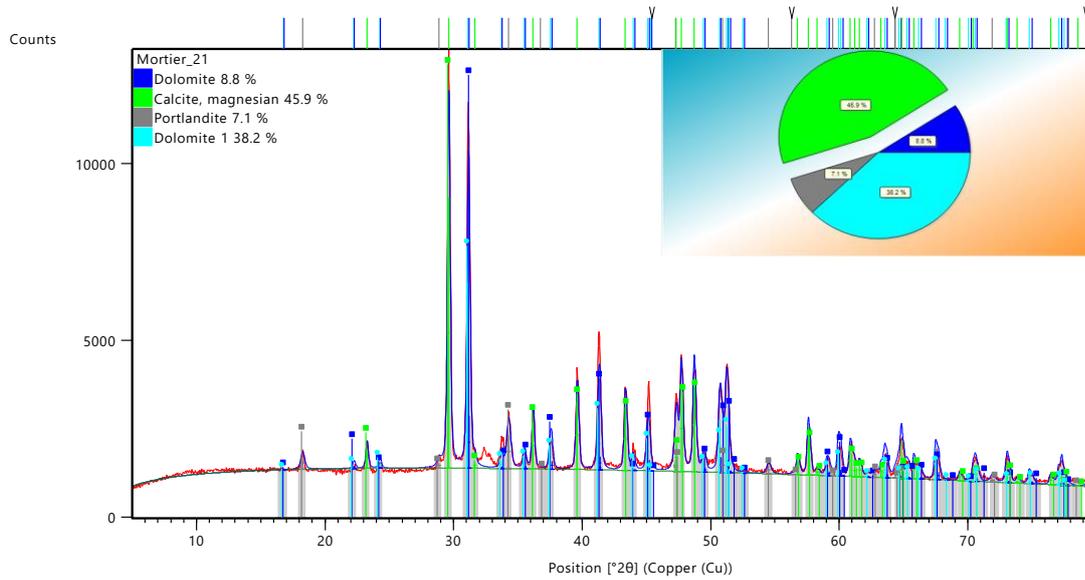


Identified Patterns List: (Bookmark4)

| Visible | Ref.Code | Score | Compound Name | Displ.[°2θ] | Scale Fac. | Chem. Formula |
|---------|-------------|-------|-----------------------------|-------------|------------|-----------------------|
| * | 01-071-4892 | 61 | Calcium Magnesium Carbonate | 0.000 | 0.666 | Ca Mg (C O3)2 |
| * | 98-004-0108 | 59 | Calcite, magnesian | 0.000 | 0.707 | C1 Ca0.936 Mg0.064 O3 |
| * | 98-004-3433 | 49 | Portlandite | 0.000 | 0.120 | H2 Ca1 O2 |
| * | 01-072-1130 | 39 | Calcium Silicate | 0.000 | 0.105 | Ca2 (Si O4) |
| * | 01-071-1662 | 67 | Calcium Magnesium Carbonate | 0.000 | 0.324 | Ca Mg (C O3)2 |

Mortier 21 :

Graphics : (Bookmark2)

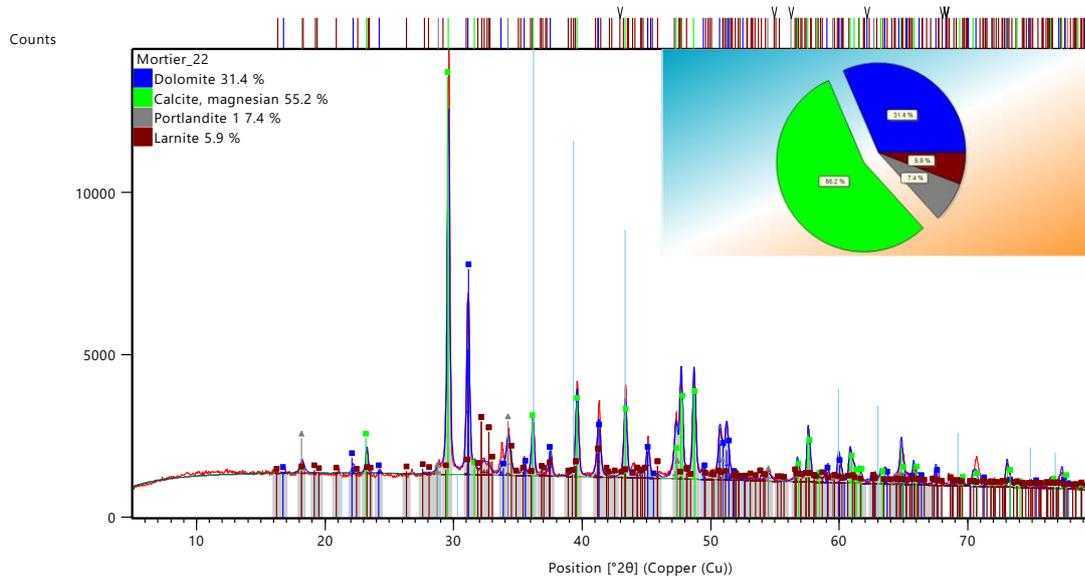


Identified Patterns List: (Bookmark4)

| Visible | Ref.Code | Score | Compound Name | Displ.[°2θ] | Scale Fac. | Chem. Formula |
|---------|-------------|-------|-----------------------------|-------------|------------|-----------------------|
| * | 01-071-4892 | 53 | Calcium Magnesium Carbonate | 0.000 | 0.839 | Ca Mg (C O3)2 |
| * | 98-004-0108 | 51 | Calcite, magnesian | 0.000 | 0.861 | C1 Ca0.936 Mg0.064 O3 |
| * | 98-004-3433 | 33 | Portlandite | 0.000 | 0.126 | H2 Ca1 O2 |
| * | 01-071-1662 | 43 | Calcium Magnesium Carbonate | 0.000 | 0.475 | Ca Mg (C O3)2 |

Mortier 22 :

Graphics : (Bookmark2)

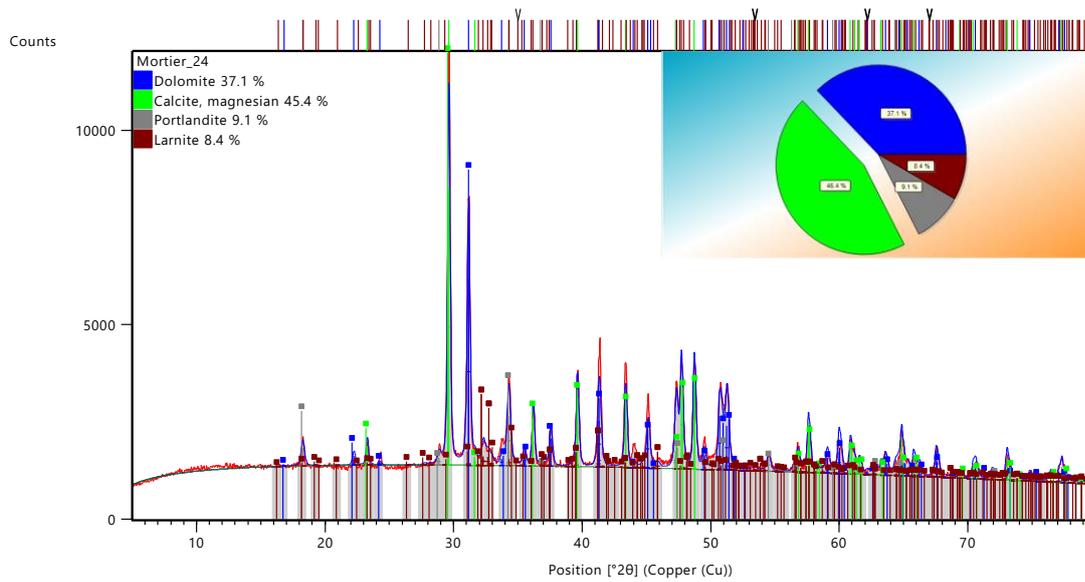


Identified Patterns List: (Bookmark4)

| Visible | Ref.Code | Score | Compound Name | Displ.[°2θ] | Scale Fac. | Chem. Formula |
|---------|-------------|-------|-----------------------------|-------------|------------|-----------------------|
| * | 01-071-4892 | 40 | Calcium Magnesium Carbonate | 0.000 | 0.438 | Ca Mg (C O3)2 |
| * | 98-004-0108 | 44 | Calcite, magnesian | 0.000 | 0.848 | C1 Ca0.936 Mg0.064 O3 |
| * | 98-004-3433 | 29 | Portlandite | 0.000 | 0.116 | H2 Ca1 O2 |
| * | 01-072-1130 | 31 | Calcium Silicate | 0.000 | 0.113 | Ca2 (Si O4) |

Mortier 24 :

Graphics: (Bookmark2)

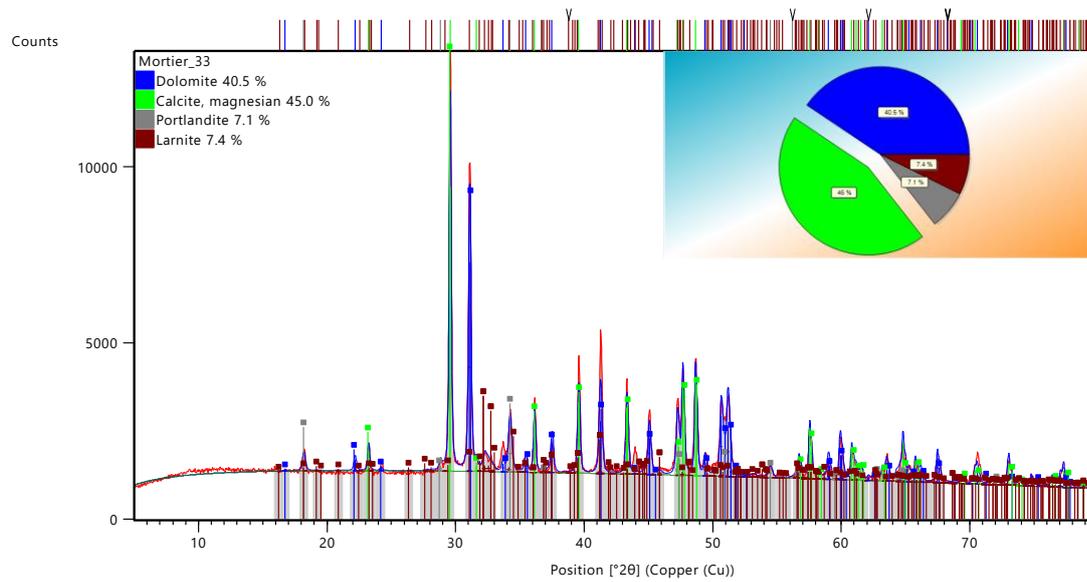


Identified Patterns List: (Bookmark4)

| Visible | Ref.Code | Score | Compound Name | Displ.[°2θ] | Scale Fac. | Chem. Formula |
|---------|-------------|-------|-----------------------------|-------------|------------|-----------------------|
| * | 01-071-4892 | 62 | Calcium Magnesium Carbonate | 0.000 | 0.631 | Ca Mg (C O3)2 |
| * | 98-004-0108 | 71 | Calcite, magnesian | 0.000 | 0.880 | C1 Ca0.936 Mg0.064 O3 |
| * | 98-004-3433 | 47 | Portlandite | 0.000 | 0.183 | H2 Ca1 O2 |
| * | 01-072-1130 | 39 | Calcium Silicate | 0.000 | 0.151 | Ca2 (Si O4) |

Mortier 33 :

Graphics: (Bookmark2)



Identified Patterns List: (Bookmark4)

| Visible | Ref.Code | Score | Compound Name | Displ.[°2θ] | Scale Fac. | Chem. Formula |
|---------|-------------|-------|-----------------------------|-------------|------------|-----------------------|
| * | 01-071-4892 | 61 | Calcium Magnesium Carbonate | 0.000 | 0.589 | Ca Mg (C O3)2 |
| * | 98-004-0108 | 59 | Calcite, magnesian | 0.000 | 0.926 | C1 Ca0.936 Mg0.064 O3 |
| * | 98-004-3433 | 44 | Portlandite | 0.000 | 0.146 | H2 Ca1 O2 |
| * | 01-072-1130 | 35 | Calcium Silicate | 0.000 | 0.161 | Ca2 (Si O4) |