

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE



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

En : Génie Civil

Spécialité : Structure

Présenté par :

Alioui Zoulikha

Mehdi Kawtar

Sujet :

Etude du retrait de mortiers à base de fibres métalliques

Soutenu publiquement, le 09 / 06 /2024, devant le jury composé de :

Mme. SAIL Latéfa

Professeur

Présidente

Mme. BELAIDI Amina

Docteur

Examinatrice

Mme. BRIXI Nezha Khedoudja

Docteur

Encadrante

Mme. YOUSARI Fatima Zohra

Docteur

Co-Encadrante

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Nous remercions **Allah** le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il nous a donné de mener à bien ce modeste ouvrage pour réaliser ce travail.

Nous souhaitons exprimer nos premiers remerciements à Monsieur **Taleb Omar**, chef de département génie civil. Nous prenons un instant pour témoigner notre sincère gratitude pour son soutien inestimable et sa confiance envers notre équipe.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Madame **Brixi Nezha Khedoudja** pour ses encouragements, ses conseils précieux prodigués tout au long de notre projet, et surtout pour sa gentillesse. Nous avons eu la chance extraordinaire d'avoir une encadrante aussi attentive à notre travail.

Nous tenons également à manifester toute notre reconnaissance à notre co-encadrante, Madame **Youssari Fatima Zohra** pour son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Nous vous remercions, Madame **Sail Latéfa**, de l'honneur que vous nous avez fait en acceptant de présider notre jury.

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à Madame **Belaidi Amina** pour avoir pris le temps de lire et d'examiner attentivement notre travail.

Nous souhaitons également exprimer notre sincère gratitude envers tous les techniciens du laboratoire pédagogique de Génie Civil, en particulier le Docteur **Henaoui Mustapha**, ainsi qu'à l'ensemble du personnel du département de génie civil de la Faculté de Technologie.

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma
remise de diplôme et ma joie

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et
le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, à ma reine **maman**.

A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection, à mon support qui
était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon roi **papa**.

A mes chers frères **Amine**, et **Younes**.

A mon adorable petit frère **Sadak** qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur
pour toute la famille.

À mon fiancé **Mohammed**, merci pour ta présence, ta confiance en moi et ton soutien
indéfectible, qui ont été des sources inestimables de force et de motivation tout au long de
cette période, malgré la distance qui nous sépare.

A ma nièce **Iline**.

A tous les membres de ma grande famille.

Sans oublier mon binôme **Kawtar** pour son soutien moral sa patience et sa compréhension
tout au long de ce projet.

Alioui Zoulikha

Dédicace

A force de tentatives, on finit toujours par réussir.

ومن كان الله معه فمن عليه

Je voudrais exprimer toute ma gratitude envers mes très chers parents, **Zoubir** et **Nadjjet**, qui ont été une source inépuisable de tendresse et de soutien tout au long de ma vie. Leurs conseils avisés m'ont constamment guidé et orienté, et je suis profondément reconnaissante de leur présence indéfectible à mes côtés.

A mes chères sœurs **Nawal** et **Wisseem**.

A mon cher frère **Mohamed**.

A mes nièces d'amour, **Inaya**, **Aya** et **Janna**, sont la source de mon bonheur. Leurs sourires lumineux et leur présence joyeuse illuminent chaque jour de ma vie.

A mon binôme et ma copine **Zoulikha**, notre partenariat est une source constante d'inspiration et de bonheur.

Mehdi Kawtar

Résumé

Le développement technologique a entraîné une véritable révolution dans le domaine de la construction, notamment grâce à l'évolution des matériaux cimentaires. Ces matériaux, cruciaux pour les infrastructures modernes, sont en constante amélioration, tant sur le plan des performances mécaniques que de leur composition. L'association de ces matériaux avec d'autres, tels que l'acier et les fibres, permet d'améliorer significativement leur comportement mécanique et leur durabilité.

Cette étude présente les résultats d'une investigation expérimentale visant à évaluer le retrait total, endogène, dessiccation de mortiers fibrés et non fibrés, ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques. Cependant, un programme expérimental a été mené en variant le pourcentage de fibres (0%, 0,5%, 1% et 1,5%).

Des essais ont été réalisés sur des mortiers fibrés et non fibrés à l'état frais. Par la suite, ces mortiers ont été soumis à des essais à l'état durci, notamment pour évaluer la vitesse de propagation, pesée hydrostatique, la résistance à la flexion ainsi que la résistance à la compression. En parallèle, des mesures du retrait linéique et de la perte de masse ont été obtenus sur des échantillons de mortiers fibrés et non fibrés de forme prismatiques de dimensions 4x4x16cm, munis de plots à leurs extrémités.

Les résultats expérimentaux indiquent que l'ajout de fibres métalliques a conduit à une amélioration des performances mécaniques et physiques, tout en réduisant le retrait des mortiers, surtout avec des pourcentages plus élevés de fibres.

Mots clés : Mortier, fibres métalliques, résistance, retrait, fissuration.

Abstract

Technological development has brought about a veritable revolution in the field of construction, especially through the evolution of cementitious materials. These materials, which are essential to modern infrastructure, are constantly improving, both in terms of their mechanical performance and their composition. The association of these materials with others, such as steel and fibres, significantly improves their mechanical behaviour and durability.

This study presents the results of an experimental investigation aimed to evaluate the total, endogenous and desiccation shrinkage on mortars with and without fibres, as well as their physical and mechanical properties. However, an experimental program was carried out by varying the fibre percentage (0%, 0.5%, 1% and 1.5%).

Tests were carried out on mortars with and without fibres, in their fresh state. Concurrently, measurements of linear shrinkage and mass loss were obtained from mortars specimens with and without fibres, of prismatic shape, measuring 4x4x16cm, and equipped with pins at their ends.

Experimental results indicated that the addition of metal fibres led to improved mechanical and physical performance, while reducing mortar shrinkage, especially with higher fibre percentages.

Keywords : Mortar, metal fibres, strength, shrinkage, cracking.

ملخص

أحدث التطور التكنولوجي ثورة حقيقية في مجال البناء، خاصةً من خلال تطور المواد الإسمنتية. ويجري باستمرار تحسين هذه المواد، التي تعتبر ضرورية للبنية التحتية الحديثة، سواء من حيث أدائها الميكانيكي أو من حيث تركيبها. يؤدي الجمع بين هذه المواد ومواد أخرى، مثل الفولاذ والألياف إلى تحسين سلوكها الميكانيكي ومتانتها بشكل كبير.

تقدم هذه الدراسة نتائج تحقيق تجريبي يهدف إلى تقييم الانكماش الكلي والانكماش الداخلي والجفاف للملاط المقوى بالألياف وغير المقوى بالألياف، بالإضافة إلى خواصه الفيزيائية والميكانيكية. ومع ذلك، تم تنفيذ برنامج تجريبي متغير النسبة المئوية للألياف (0%، 0,5%، 1%، 1,5%).

في الحالة الطازجة، تم إجراء الاختبارات على الملاط المقوى بالألياف وغير المقوى بالألياف. ثم تم اختبار هذا الملاط في الحالة المتصلبة من حيث سرعة الانتشار، والوزن الهيدروستاتيكي، وقوة الانثناء وقوة الضغط. بالتوازي مع ذلك، تمت دراسة الانكماش المقاس خطيًا وفقدان الكتلة على عينات من الملاط المنشوري بقياس $4 \times 4 \times 16$ سم مزودة بمسامير في نهاياتها.

أظهرت النتائج التجريبية أن دمج الألياف المعدنية أدى إلى تحسين الأداء الميكانيكي والفيزيائي وتقليل انكماش الملاط، خاصة مع ارتفاع نسب الألياف.

الكلمات المفتاحية: الملاط، الألياف المعدنية، القوة، الانكماش، التشقق

Table des matières

Page de garde

Remerciements II

Dédicace III

Résumé V

Abstract VI

ملخص VII

Table des matières VIII

Liste des Figures XIII

Liste des Tableaux XVII

Liste des notations et abréviations XVIII

Introduction générale..... 1

Chapitre I. Recherche bibliographique..... 3

I.1. Introduction..... 4

I.2. Caractéristiques et composition de ciment..... 4

I.3. Structure d'une pâte de ciment 5

I.4. Sable 7

I.5. Les adjuvants 7

I.5.1. Plastifiant et superplastifiants..... 7

I.5.2. Retardateur de prise..... 7

I.6. Eau de gâchage..... 8

I.7. Les fibres..... 8

I.8. Types des fibres..... 9

I.8.1. Fibres de verre 9

I.8.2. Fibres d'amiante 10

I.8.3. Fibres naturelles 10

I.8.4. Fibres polypropylène..... 11

I.8.5. Fibres métalliques	12
I.9. Mortier	13
I.9.1. Mortier des bétons équivalents (MBE)	13
I.9.2. Mortier normalisé	14
I.9.3. Mortier fibrés.....	15
I.10. Rôle des fibres dans les matériaux cimentaires.....	15
I.11. Mécanisme de fonctionnement des fibres dans les matériaux cimentaires	16
I.12. Influence du dosage de fibres.....	17
I.13. Influence de l'orientation des fibres.....	17
I.14. Influence de la longueur des fibres.....	18
I.15. Influence de la fibre- matrice cimentaire	18
I.16. Comportement mécanique des matériaux cimentaires renforcés par des fibres.....	19
I.16.1. Résistance à la compression	19
I.16.2. Résistance à la traction	20
I.16.3. Résistance à la flexion.....	21
I.16.4. Module d'élasticité	21
I.17. Le retrait et ses formes	22
I.17.1. Risque de fissuration au jeune âge	22
I.17.2. Retrait chimique (retrait au très jeune âge)	23
I.17.3. Retrait plastique.....	23
I.17.4. Retrait endogène (autodessiccation).....	24
I.17.5. Retrait thermique.....	26
I.17.6. Retrait de séchage (de dessiccation).....	26
I.17.7. Retrait de carbonatation	27
I.17.8. Retrait total	27
I.18. Mécanisme à l'origine de retrait.....	27
I.18.1. Tassement.....	27

I.18.2. Gonflement	28
I.18.3. La porosité interne et l'état de l'eau dans la pâte de ciment	28
I.18.4. Mécanisme de dépression capillaire.....	28
I.18.5. Mécanisme de variation de la tension superficielle	30
I.18.6. Mécanisme de la variation de la pression disjonctive	30
I.19. Facteurs affectant le retrait	31
I.19.1. Facteurs Externes (effet de température)	31
I.19.2. Facteurs internes.....	31
i. Effet de rapport E/C.....	31
ii. Effet de la concentration granulaire.....	33
iii. Effet de la finesse de ciment	33
iv. Effet des adjuvants	34
v. Effet d'ajout de fibres métalliques.....	34
I.20. Mesure de retrait	35
I.20.1. Mesure linéique	35
I.20.2. Mesure de retrait endogène par l'essai RAJA	39
I.20.3. Mesure volumique.....	39
i. Le suivi du niveau du liquide d'immersion	39
ii. Pesée hydrostatique	40
I.21. Essai physico-mécaniques sur des mortiers	41
I.21.1. Essais physique	41
i. Perte en poids.....	41
ii. Pesée hydrostatique	41
I.21.2. Essai mécanique	42
i. Vitesse ultrasoniques	42
ii. Flexion et compression.....	43
I.22. Conclusion	44

I.23. Références Bibliographique du chapitre I.....	45
I.24. Webographie	55
Chapitre II. Matériels et Méthodes.....	56
II.1. Introduction	57
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés	57
II.2.1. Ciment.....	57
i. Caractéristiques chimiques	57
ii. Caractéristiques physico – mécaniques	57
II.2.2. Sable.....	60
i. Analyse granulométrique.....	60
ii. Masse volumique de sable	62
iii. L'équivalent de sable	63
iv. Foisonnement du sable.....	64
v. La teneur en eau.....	66
vi. Absorption de sable.....	66
II.2.3. Eau	67
II.2.4. Adjuvant.....	68
i. Mise en œuvre	68
ii. Essai de consistance.....	68
II.2.5. Les fibres.....	69
II.3. Formulation du mortier normal	70
II.4. Caractéristiques à l'état frais (essai au mini cône).....	71
II.5. Caractéristiques à l'état durci.....	72
II.5.1. Essai mécanique.....	72
II.5.2. La vitesse d'impulsion d'ultrason et le module dynamique	73
II.5.3. Pesée hydrostatique.....	74
II.5.4. Perte de masse	75

II.5.5. Mesure de retrait	75
II.6. Conclusion.....	77
II.7. Références bibliographique du chapitre II	78
Chapitre III. Résultats et interprétations.....	80
III.1. Introduction	81
III.2. Essai d'affaissement	81
III.3. Résistance à la compression.....	82
III.4. Résistance à la flexion.....	83
III.5. Vitesse ultrasonique et le module dynamique	83
III.6. La pesée hydrostatique.....	85
III.7. Résultats expérimentaux de retrait.....	85
III.8. Perte de masse	88
III.9. Corrélation entre la perte de masse et le retrait	90
III.10. Conclusion	91
III.11. Références bibliographiques du chapitre III	93
Conclusion général	95
Perspectives.....	95

Liste des Figures

Figure 1.1. Structure d'une pâte de ciment (Bouasker, 2007).....	6
Figure 1.2. Les différents types de fibres (Mokhtari, 2006).....	9
Figure 1.3. Fibres de verre (Source : https://m.indiamart.com).....	10
Figure 1.4. Analyse des fibres végétales.....	11
Figure 1.5. Fibres polypropylène (Source : https://m.indiamart.com).....	12
Figure 1.6. Différentes géométries des fibres (Vu, 2022).....	13
Figure 1.7. Passage de béton au MBE (Rouis, 2017).....	14
Figure 1.8. Rôle des fibres dans la matrice de béton (Zarga, 2015).....	16
Figure 1.9. Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres (Meddah, 2014).....	16
Figure 1.10. Effets des fibres sur l'affaissement du béton au cône d'Abram (Jejcic, Zanghlline, 1977 cité par Zarga, 2015).....	17
Figure 1.11. Schéma de disposition des fibres (Abdou, 2007 cité par Belhadj, 2015).....	18
Figure 1.12. Diagramme représente comportement de charge-déformation de béton avec fibres et béton sans fibres (Makhlouf, 2010).....	20
Figure 1.13. Représentation de la fissuration initiale et intermédiaire par flexion d'une poutre en béton armé (Hamri, 2015).....	21
Figure 1.14. Evolution de la résistance en compression et du module de Young en fonction de la teneur en fibre (Djebali, 2013).....	22
Figure 1.15. Volume absolu et volume apparent (Bouasker, 2007).....	24
Figure 1.16. Retrait chimique et retrait endogène (Soliman, 2011).....	25
Figure 1.17. Présentation schématique de la dépression capillaire (Mounanga, 2003).....	29
Figure 1.18. Influence du rapport E/C sur le retrait endogène sue différent types de béton (Bouhamou et al., 2009).....	32

Figure 1.19. Influence du rapport E/C sur le retrait dessiccation sue différent types de béton (Bouhamou et al., 2009).....	32
Figure 1.20. Retrait endogène de la pâte et de mortier (même rapport E/C) (Holt, 2001).....	33
Figure 1.21. Rétractomètre pour la mesure linéique (Chaib, 2017).....	36
Figure 1.22. Dispositif expérimental utilisé par le (Roy, 1995).....	36
Figure 1.23. Dispositif de mesure de retrait linéique horizontale (Bouasker, 2007).....	37
Figure 1.24. Tube en plastic ondulé (direction horizontale) (Ghanem et al., 2024).....	38
Figure 1.25. Tube en plastic ondulé (direction verticale) (Ghanem et al., 2024).....	38
Figure 1.26. Nouveau dispositif de mesure linéaire horizontale (Ghanem et al., 2024).....	38
Figure 1.27. Vue générale et schéma de principe de l'essai de RAJA (Monge, 2007).....	39
Figure 1.28. Mesure de retrait externe Par variation de niveau de mercure (Del Campo, 1659 cité par Bouasker, 2007).....	40
Figure 1.29. Mesure de retrait externe automatisé (Setter et Roy, 1978).....	40
Figure 1.30. Banc de mesure des variations volumiques par pesée hydrostatique. (Ghanem et al., 2024).....	41
Figure 1.31. Schéma de la méthode de mesure de la vitesse d'impulsion des ultrasons (Benaïcha et al., 2015).....	42
Figure 1.32. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (Savadogo et al., 2015).....	43
Figure 1.33. Dispositif de rupture en compression.....	44
Figure 2.1. Détermination de la masse volumique apparente.....	58
Figure 2.2. Toluène pour déterminer la masse volumique absolue de ciment.....	58
Figure 2.3. Appareil de VICAT.....	59
Figure 2.4. Perméabilimètre de Blaine Manuel.....	60
Figure 2.5. Analyse granulométrique du sable.....	62
Figure 2.6. Essais des masses volumiques du sable : (a) masse volumique absolue, (b) masse volumique apparent.....	63

Figure 2.7. Essai équivalent de sable : (a) ESV, (b) ESP.....	64
Figure 2.8. Essai foisonnement du sable.....	65
Figure 2.9. Foisonnement du sable.....	65
Figure 2.10. Essai teneur en eau.....	66
Figure 2.11. Essai d'absorption du sable.....	67
Figure 2.12. Essai de consistance.....	68
Figure 2.13. Essai de dosage de saturation.....	69
Figure 2.14. Fibres métalliques utilisé.....	69
Figure 2.15. Formulation des mortiers fibrés.....	71
Figure 2.16. Consistance des mélanges étudiés.....	72
Figure 2.17.a. Essai flexion.....	73
Figure 2.17.b. Essai compression.....	73
Figure 2.18. Essai auscultation sonique.....	74
Figure 2.19. Essai pesée hydrostatique.....	74
Figure 2.20. Moules prismatiques.....	75
Figure 2.21. Rétractomètre et ses composants – Etalon et billes.....	76
Figure 2.22.a. Mesure du retrait total.....	76
Figure 2.22.b. Mesure du retrait endogène.....	76
Figure 2.23. Organigramme de la méthodologie expérimentale.....	77
Figure 3.1. Evolution d'étalement en fonction de pourcentage de fibres.....	81
Figure 3.2 : Agglomérats de fibres.....	82
Figure 3.3. Evolution de résistances à la compression des mortiers.....	82
Figure 3.4. Evolution de résistances à la flexion des mortiers fibrés et non fibrés.....	83
Figure 3.5. Vitesse ultrasonique des mortiers fibrés et non fibrés.....	84

Figure 3.6. Module dynamique des mortiers fibrés et non fibrés.....	84
Figure 3.7. Evolution de la masse volumique des mortiers étudiée en fonction de l'âge.....	85
Figure 3.8. Retrait total et endogène du mortier normalisé à base des fibres métalliques.....	86
Figure 3.9. Retrait de dessiccation du mortier normalisé à base des fibres métalliques.....	86
Figure 3.10. Retrait total et endogène du mortier normalisé à base des fibres métalliques à 28 jours.....	88
Figure 3.11. Evolution de la perte de masse en fonction du temps.....	89
Figure 3.12. Retrait endogène en fonction de la perte de masse.....	90
Figure 3.13. Retrait total en fonction de la perte de masse.....	91

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Compositions de clinker (Habita et Bouabdallah ,2017).....	5
Tableau 1.2. Exemple d’une perte de volume entre les réactifs et les produites (Nicolas, 2014).....	23
Tableau 2.1. Propriétés chimiques du ciment (Youssari et al., 2023).....	57
Tableau 2.2. Propriétés minéralogique du ciment (Youssari et al., 2023).....	57
Tableau 2.3. Masse volumique absolue et apparente du ciment.....	58
Tableau 2.4. Propriétés physico – mécaniques du ciment.....	60
Tableau 2.5. Analyse granulométrique du sable utilisé.....	61
Tableau2.6. Masse volumique absolue et apparente du sable.....	62
Tableau 2.7. Essai équivalent de sable.....	64
Tableau 2.8. Résultats du foisonnement du sable.....	65
Tableau 2.9. Résumé caractéristiques physiques de sable.....	67
Tableau 2.10. Composition chimique de l’eau de gâchage (mg/l). (Youssari, 2023).....	67
Tableau 2.11. Caractéristiques du Superplastifiant.....	68
Tableau 2.12. Caractéristiques techniques.....	70
Tableau 2.13. Masses des constituants des mélanges.....	71

Liste des notations et abréviations

Al₂O₃ : Oxyde d'aluminium.

C₂S : Silicate becalcique.

C₃A : Aluminate tricalcique.

C₃S : Silicate tricalcique.

C₄AF : Alumino-ferrite tétra calcique

Ca (OH)₂ : Hydroxide de calcium.

Ca CO₃ : Carbonate de calcium.

Ca²⁺ : Ion de calcium.

CaO : Oxyde de calcium.

C-S-H : Silicate de calcium hydraté.

E/C : Rapport eau/ciment.

E/L : Rapport eau/liant.

Ed : Module d'élasticité dynamique.

Ed : Module dynamique.

ESP : Equivalent de sable par piston.

ESV : Equivalent de sable visuel.

ε_{dessiccation} : Déformation de dessiccation.

ε_{endogène} : Déformation endogène.

ε_{total} : Déformation total.

F_c : Résistance à la compression.

F_f : Charge de rupture.

H₂O : Molécule d'eau.

HR : Humidité relative L.

L : La longueur de l'éprouvette à l'instant de la mesure.

L : La longueur de parcours.

L/E : Rapport Liant sur eau.

L₀ : La longueur initiale.

M : Masse molaire de l'eau.

m₁ : Masse à l'air libre d'éprouvette.

m₂ : Masse dans l'eau de l'éprouvette.

MBE : Mortier de béton équivalent.

m_{ini} : La masse initiale de l'éprouvette avant dessiccation.

m_t : La masse mesurée à l'instant t.

Θ : L'angle de mouillage.

Ø : Diamètre de pore.

P₁ : La pression de l'eau.

P_g : La pression de la phase gazeuse.

R : Constante des gaz parfaits.

r : Le rayon de pore ou le ménisque existe.

R_f : Résistance à la flexion.

SiO₂: Dioxyde de silicium.

t : Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur.

T : Température absolue

UPV : Vitesse des ondes ultrasonores.

V: Vitesse des ondes.

W % : Teneur en eau.

ξ : Variation dimensionnelle.

Δm (%) : Le pourcentage de perte en masse.

ν : Coefficient de poisson de mortier.

ρ : Masse volumique de mortier.

ρ_1 : Masse volumique de l'eau.

σ : La tension superficielle de l'interface d'eau liquide-vapeur.

$\tau_{\max}$: Cisaillement maximale.

Introduction générale

Les matériaux cimentaires sont largement privilégiés dans la construction pour leur facilité de mise en œuvre, leurs excellentes propriétés mécaniques et leur durabilité. Cependant, les principaux défis en termes de durabilité des matériaux se manifestent généralement à des stades avancés. Dès leur mise en place, les matériaux cimentaires sont sujets à des variations volumiques dues aux effets environnementaux externes. Malgré une résistance initiale adéquate de la matrice cimentaire, des changements de performance comme le retrait peuvent influencer les paramètres du matériau jusqu'à sa détérioration.

L'incorporation de fibres dans le mortier joue un rôle crucial en renforçant sa résistance à la traction. Les fibres agissent en couturant les microfissures et les macrofissures qui se forment dans une matrice fragile du mortier à cause des phénomènes de retrait. Cette action de couture améliore significativement la capacité du mortier à résister aux contraintes mécaniques, augmentant ainsi sa durabilité et sa résistance globale. Dans ce contexte plusieurs questions peuvent se poser : Dans quelle mesure l'utilisation de fibres métalliques dans les mortiers affecte-t-elle le comportement du retrait ? Comment cela impacte-t-il la performance globale et la durabilité des structures en matériaux cimentaires fibrés ?

Cette étude vise à évaluer les propriétés mécaniques et le retrait d'un mortier renforcé par des fibres à différents pourcentages, afin d'analyser l'impact de ces fibres sur les caractéristiques du mortier, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

A cet effet, le manuscrit est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique et se divise en deux parties. La première partie présente un état de l'art des différents types de fibres utilisées dans les bétons. La seconde partie traite le phénomène du retrait, en détaillant ses mécanismes et en présentant les dispositifs expérimentaux nécessaires à sa mesure.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés dans notre étude, ainsi que sur les techniques expérimentales nécessaires à la réalisation de nos essais.

Enfin, le troisième chapitre détaille le programme expérimental mis en place pour atteindre nos objectifs. Ce programme inclut une analyse du comportement mécanique et physique ainsi que la performance du mortier avec et sans fibres. Les principales conclusions issues des résultats expérimentaux sont présentées pour clôturer ce chapitre.

En conclusion générale, nous résumons les principaux résultats obtenus et proposons des perspectives pour des recherches futures dans le domaine de la durabilité des bétons fibrés.

Chapitre I.

Recherche Bibliographique

I.1. Introduction

Lorsqu'un mortier est exposé à un environnement non saturé, il peut subir un processus de séchage qui entraîne une perte d'eau. Cette perte d'eau peut conduire à une contraction ou à une diminution de la taille du mortier c'est-à-dire des contraintes de traction se développent à l'intérieur de la matrice cimentaire, et, peuvent devenir importantes lorsque la force exercée dépasse la capacité de traction du mortier. Cela peut être dû à divers facteurs tels que la composition du mortier, sa densité, la teneur en eau, les conditions environnementales, etc, et ceci peut engendrer la formation des fissures sur le mortier. Ces dernières peuvent compromettre l'intégrité structurelle du mortier et éventuellement conduire à des défaillances plus graves si elles ne sont pas traitées.

Parmi la cause principale de la fissuration de la pâte de ciment (ou béton), est le retrait. Ce dernier se présente sous différents types, tels que le retrait endogène, le retrait chimique, le retrait plastique, le retrait de séchage, etc. Ces types de retrait sont souvent provoqués par des phénomènes tels que la tension capillaire, la tension de surface et la pression de désinsertion à l'intérieur de la pâte de ciment (ou béton).

Cependant, plusieurs méthodes ont été mises au point afin de réduire les fissures causées par le retrait dans le béton. Parmi ces méthodes, on trouve l'utilisation des fibres métalliques souvent en acier, sont incorporées dans le mélange de béton afin de contrôler le retrait et restreindre les fissures.

Le présent chapitre consiste à donner les connaissances essentielles sur les différents types de mortiers utilisés dans l'industrie de la construction, ainsi d'une présentation de diverses fibres et leurs impacts sur le mortier, particulièrement sur le comportement mécanique. Nous présenterons de manière générale les matériaux utilisés dans le mortier, tels que le ciment et son processus d'hydratation, ainsi que les différents types de mortier et leur utilisation. Ainsi, un état des recherches actuelles sur l'étude du retrait des mortiers fibrés.

I.2. Caractéristiques et composition de ciment

Les ciments sont des particules fines fabriquées en broyant un mélange de clinker et d'environ 4 à 8% de gypse, qui ont pour fonction de réguler la prise (retardateur de prise).

Le clinker de ciment portland est fabriqué en utilisant un mélange de 80% de calcaire et de 20% d'argile, soigneusement dosé et homogénéisé. Ensuite, il est cuit à une température de 1450°C, puis broyé.

Ces poudres sont composées de minéraux instables (notamment des silicates et des aluminates de chaux) qui se combinent avec l'eau pour créer une pâte qui peut être prise et durcir progressivement par hydratation (d'où le nom de liant hydraulique).

Quand les températures sont élevées (1450°C), l'argile, calcaire et gypse se décomposent de la manière suivante :

- La calcination de l'argile entraînera la formation d'oxyde chimique acide tel que SiO_2 et Al_2O_3 .
- La CaO sera produite à partir de celle de calcaire, présentant une composition chimique basique.

Lorsque le clinker est cuit, les deux types d'oxydes interagissent entre eux dans leur état solide pour créer les minéraux qui sont :

Tableau 1.1. Compositions de clinker (Habita et Bouabdallah ,2017).

Composants	N°	Composant du Clinker	Symbole	Composition chimique	Pourcentage (%)
Principaux	1	Silicate tricalcique (l'Alite)	C_3S	3CaO SiO_2	55 à 70
	2	Silicate bicalcique (la Bélite)	C_2S	2CaO SiO_2	10 à 25
	3	Aluminate tricalcique	C_3A	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	0,5 à 13
	4	Alumino-ferrite tétra calcique	C_4AF	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	1 à 15
Secondaires	5	La chaux libre	C	CaO	0,2 à 2,2
	6	Sulfate Alcalin	-	-	0,2 à 2,2

I.3. Structure d'une pâte de ciment

Plusieurs scientifiques ont étudié le processus de prise (Bensaid, 2007 ; Khalil, 2018 ; Beaudoin et Odler, 2019). On peut décrire ce phénomène en quatre phases, illustrées dans la figure 1.1. L'analyse des résultats obtenus par méthode ultrasonique combinés à des mesures de retrait chimique et interne est la base de cette description.

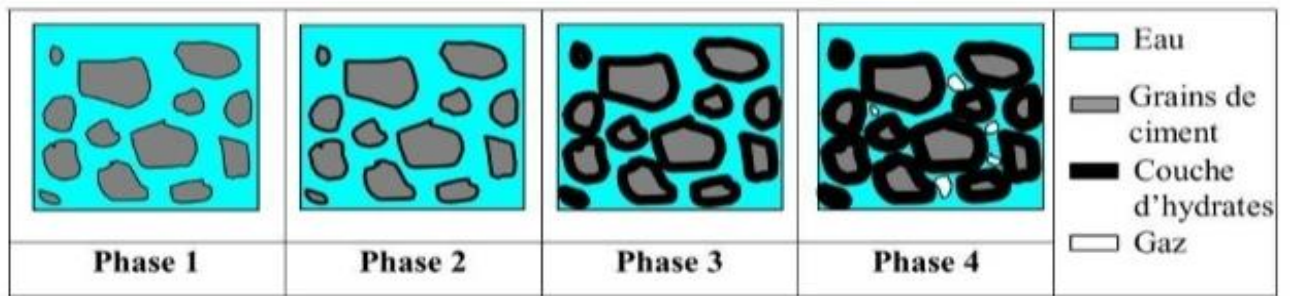


Figure 1.1. Structure d'une pâte de ciment (Bouasker, 2007).

- **Phase 1 et 2**

Pendant cette période, les grains de ciment anhydre sont séparés de la phase liquide. L'hydratation commence, étant liquide, le mélange ne peut pas résister aux fluctuations de volume causées par la contraction du Chatelier. La durée de cette phase varie en fonction du rapport E/C : Elle est généralement courte pour des rapports E/C faibles.

- **Phase 3**

La troisième étape consiste à former des hydrates autour des grains de ciment anhydre, formant progressivement une phase solide et un réseau capillaire interconnectés. On observe une structure continue, c'est le seuil de percolation qui marque le début de la prise. En raison de la continuité de la réaction d'hydratation, le matériau est confronté à une variation de volume, ce qui est localement perturbé par les formations solides.

- **Phase 4**

Cette étape correspond à la transition d'un liquide à un solide, en ce qui concerne le Comportement mécanique. Les changements de volume causés par l'hydratation sont supérieurs aux déformations qui pourraient être supportées par le squelette. Dans les pores capillaires, de la vapeur d'eau se forme pour compenser les contraintes associées à l'apparition de la dépression capillaire.

Les produits d'hydratation remplissent progressivement les capillaires, ce qui favorise la densification du matériau. Le réseau poreux perd ainsi de son interconnexion. Lorsque les hydrates augmentent, cela entraîne une augmentation du volume des micropores (pores de gel). Dans ces micropores, de l'eau est encore retenue.

I.4. Sable

Le sable est un mélange de substances granulaires et meubles, caractérisées par des grains passant à travers des ouvertures de 5mm de côté pour les formes carrées, ou de 6,3 mm de diamètre pour les formes rondes. Il est indispensable à la fabrication du béton et du mortier. Chimiquement inerte dans la plupart des cas, le sable agit comme une charge dans la structure granulaire, contribuant ainsi à maintenir les propriétés des matériaux à l'état frais et durci. Le sable siliceux ou quartzueux est généralement privilégié pour la préparation de mortier standardisé, bien que d'autres types de sables (sable calcaire ou recyclé). Souvent, les sources de sable sont préférées pour limiter les coûts de transport (Arreteau, 2023).

I.5. Les adjuvants

Lorsque les grains de ciment portland entrent en contact avec l'eau, leurs charges électriques les poussent à former des floccs stables (Kubens, 2010), entravant la dispersion uniforme des grains dans le mélange et piégeant de l'eau à l'intérieure des floccs (Laichaoui, 2019). Pour remédier à cela, des adjuvants sont ajoutés au béton ou au mortier en quantités limitées, agissant chimiquement ou physiquement pour améliorer les propriétés du matériau, notamment en contrôlant la floculation et en optimisant la lubrification.

I.5.1. Plastifiant et superplastifiants

Les plastifiants et superplastifiants sont des polymères hydrosolubles, ont été intégrés dans la fabrication du béton dès les années 1930. Souvent désignés comme des « réducteurs d'eau », leur rôle principal est d'optimiser les caractéristiques rhéologiques du béton selon deux objectifs distincts : d'une part réduire la quantité d'eau nécessaire tout en préservant la maniabilité du matériau, et d'autre part, améliorer la maniabilité du béton en utilisant une quantité d'eau constante. Ces deux approches offrent des avantages significatifs : la réduction de la quantité d'eau diminue la porosité du béton, améliorant ainsi ses propriétés mécaniques sur le long terme, tandis que l'amélioration de la maniabilité réduit considérablement les coûts et les efforts nécessaires lors de la mise en place du béton (Chapelier, 2020).

I.5.2. Retardateur de prise

Le retardateur de prise retarde la réaction d'hydratation du ciment selon la quantité utilisée, ce qui prolonge les phases de début et de fin de prise. En outre, il préserve la maniabilité du béton tout en renforçant ses propriétés mécaniques. Il est spécialement recommandé d'utiliser pendant les périodes chaudes.

I.6. Eau de gâchage

L'eau est essentielle pour permettre les réactions d'hydratation du liant dans les matériaux de construction. La quantité d'eau utilisée lors du mélange, appelée eau de gâchage, est cruciale pour favoriser la formation des phases cristallines hydratées des liants hydrauliques, telles que la portlandite, nécessaire au développement de la résistance mécanique recherchée. Cette quantité d'eau est définie par un rapport masse eau/ciment (Arreteau, 2023).

I.7. Les fibres

Les fibres sont des éléments solides et flexibles. Elles ont une fonction de résistance qui compense la fragilité du béton en évitant la microfissuration. Toutefois, l'utilisation de fibres pour renforcer le mortier est un excellent moyen de leur donner une ductilité accrue, de réduire le retrait et de prévenir efficacement l'apparition de fissures en les réduisant au minimum.

Les fibres se caractérisent par leur caractère discontinu, leur nature variable, leur forme cylindrique sensible, leur diamètre et leur longueur variable. Elles sont dispersées dans la matrice de ciment de manière aléatoire ou selon une orientation préférée. Différents types de fibres se caractérisent par leur nature, leurs dimensions (diamètres, longueur (macro ou micro fibres)), leur forme et leur état de surface (droite, lisse, aiguille, crantée, ondulée, bi-ondulée, à crochet, avec des cônes aux extrémités, etc.), ainsi que leurs résistances mécaniques (résistance à la traction).

Les fibres sont classées en fonction de leur nature qui peut être naturelle ou artificielle et leur sélection est basée sur l'utilisation souhaitée. Les quantités habituelles de fibres sont de 0,5 à 2% en volume, ce qui correspond à 5 à 150 kg par m³ de béton.

I.8. Types des fibres

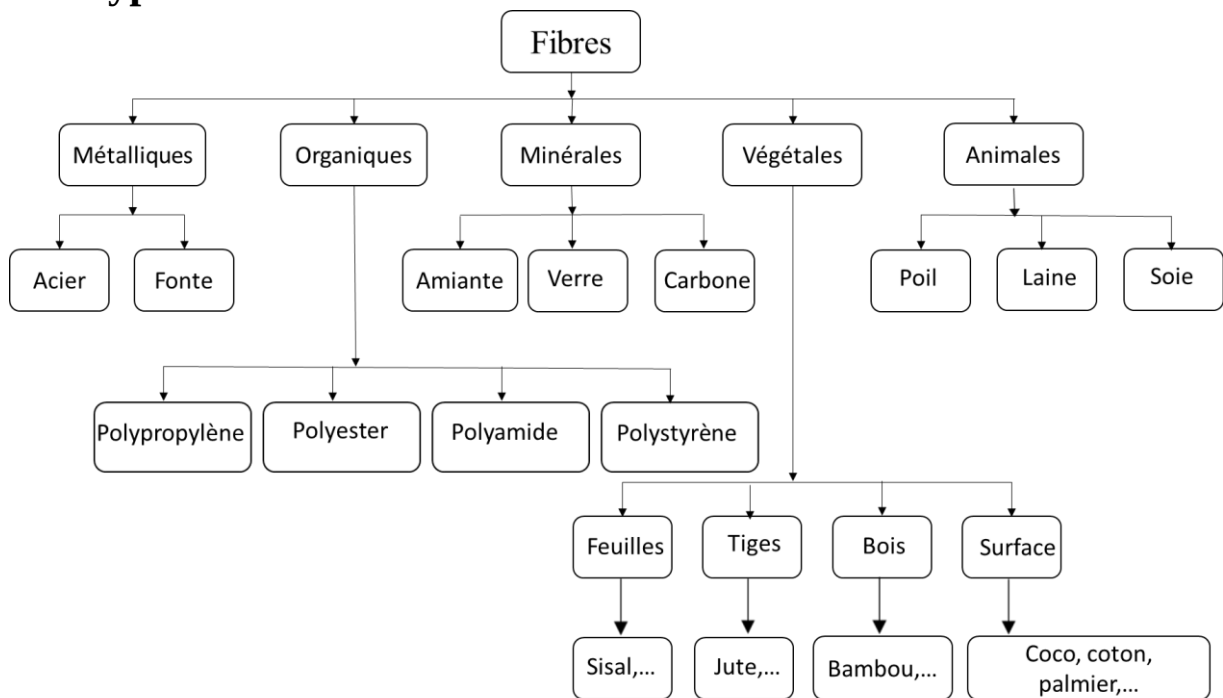


Figure 1.2. Les différents types de fibres (Mokhtari, 2006).

I.8.1. Fibres de verre

Il y a des milliers d'années que les fibres de verre existent, mais la première production commerciale de la fibre de verre remonte à 1936. Leur fabrication est réalisée à partir de verre fendu (Jones et Huff, 2018). Avec un coût adorable (Zhu et al., 2022), elles proposent une adhérence solide et des propriétés mécaniques satisfaisantes (Boufaïda, 2015), mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment. Elles sont employées afin de produire des éléments de faible épaisseur. Elles se distinguent par une extrême vulnérabilité aux chocs.

Les fibres de verre offrent divers bénéfices :

- Elles ont une résistance à la traction élevée de 3000 MPa (Zhu et al., 2022).
- Elles sont capables de faire face à des températures élevées et commencent à diminuer entre 400 et 650 °C (Rani et al., 2021).



Figure 1.3. Fibres de verre (Source : <https://m.indiamart.com> consulté le 06/05/2024).

I.8.2. Fibres d'amiante

Depuis longtemps, les fibres d'amiante étaient employées pour renforcer les matrices en ciment. Les industriels se sont intéressés à elles en raison de leur capacité à résister à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques (Taallah, 2014). Cette composition est composée de silicates de magnésium hydratés qui sont parfaitement adaptés à la pâte de ciment (Mimoun F.Z. et Mimoun M., 1994 cité par Youssari, 2023).

Elles ont une excellente résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Très répandues pour l'isolation des constructions (Potiron et al., 2023).

Depuis les années 1990, les scientifiques ont mis en garde contre l'usage de ces fibres en raison des risques qu'elles présentent pour la santé publique. Cependant, leur utilisation a été restreinte puis interdite (Belkhir, 2022).

I.8.3. Fibres naturelles

On peut mentionner différentes fibres naturelles utilisées dans le domaine du génie civil, ces différentes fibres sont regroupées dans la figure 1.4, telles que le sisal et la banane (Dujardin, 2014), le diss (Laifa et al., 2018), la noix de coco (Bheel et al., 2024), le jute, le maguey, le palmier (Belkadi, 2018), le lin (Toupe, 2015), la bagasse (Potiron et al., 2023) et le bambou (Ahmad et al., 2023). Ces fibres sont utilisées comme renfort dans les matériaux composites à base de ciment (Lumingkewas, 2015), ainsi que diverses fibres issues de diverses sources végétales et animales.

Bien que présentant de nombreux avantages, les fibres naturelles ont également des désavantages tels qu'une absorption élevée d'humidité, une résistance biologique faible à la

dégradation, une résistance thermique faible au feu et des variations de qualité en fonction du lieu et de la saison (Bensaid, 2016).

Les fibres de ce genre présentent de nombreux bénéfices tels que leur capacité à être facilement éliminées à la fin de leur cycle de vie grâce au compostage ou à la récupération de leur pouvoir calorifique dans le but d'alléger les mélanges de béton (Haba et al., 2017).

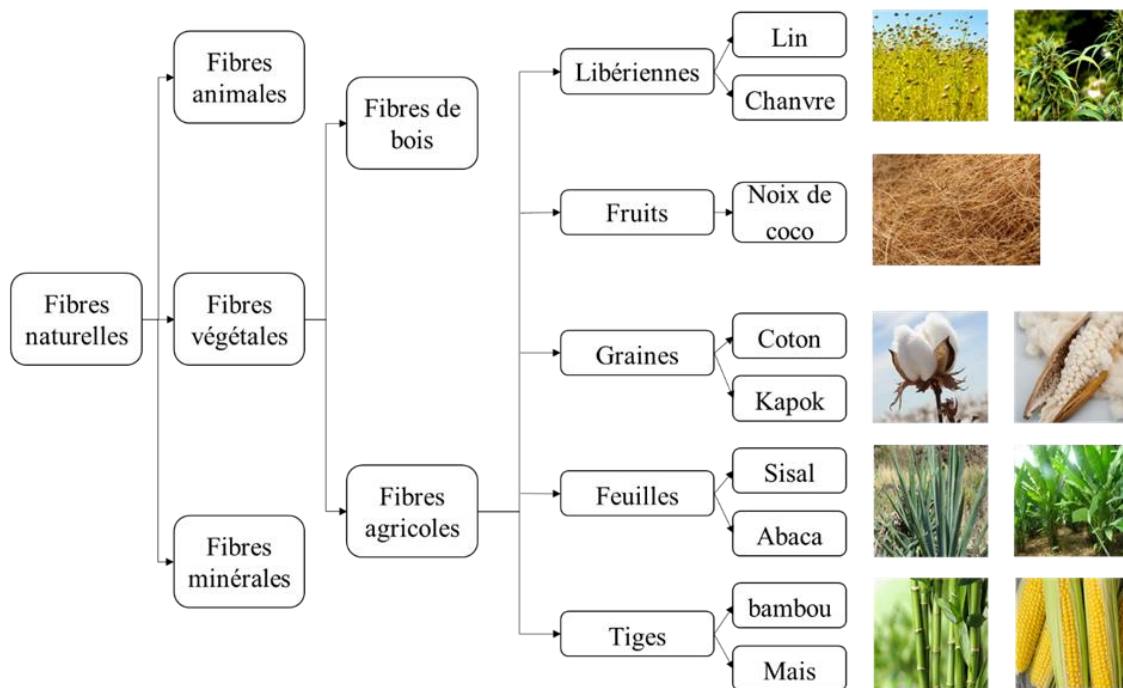


Figure 1.4. Analyse des fibres végétales.

I.8.4. Fibres polypropylène

Ces fibres fabriquées à partir de polypropylène sont présentes sous forme de faisceaux ou de filaments individuels. Ce genre est présent dans le commerce et le plus fréquemment utilisé (Saradar et al., 2018).

Cependant, elles ne sont pas suffisamment solides pour influencer le béton durci, mais elles permettent de couvrir des fissures dans le béton frais.

Elles fournissent les bénéfices suivants (Li et al., 2024) et (Yoo et Banthia, 2019) :

- Diminue les fissures.
- Résistance élevée aux chocs.
- Une bonne expansion à la rupture qui accroît la résistance du béton.

Il y a également des désavantages (li et al., 2024) :

- Réduction de la capacité d'ouverture du béton.
- Un module d'élasticité plutôt bas.

On les retrouve dans les constructions, notamment pour la fabrication de panneaux décoratifs, de revêtements de façades, des tuyaux et des pieux.



Figure 1.5. Fibres polypropylène (Source : <https://m.indiamart.com> consulté le 06/05/2024).

I.8.5. Fibres métalliques

Les fibres métalliques sont les plus généralement utilisées (Zhao et al., 2018). Elles sont employées dans le béton afin de prévenir la formation de microfissures. On les retrouve sous différentes formes telles que des fibres ondulées, droites, rubans, de fonte, des extrémités aplaties, des crochets, des têtes coniques, etc. Les fibres métalliques, qui se distinguent par un module d'élasticité élevée, contribuent à renforcer la résistance à la traction du matériau où elles sont incorporées en augmentant leur ductilité (Boulekbache et al., 2014) et leur capacité à résister à l'usure, aux chocs et à la fatigue (Meddah, 2014), mais elles sont également peu résistantes aux milieux acides.

Par ailleurs, leurs formes et leurs dimensions favorisent l'adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités) (Belferrag, 2006).

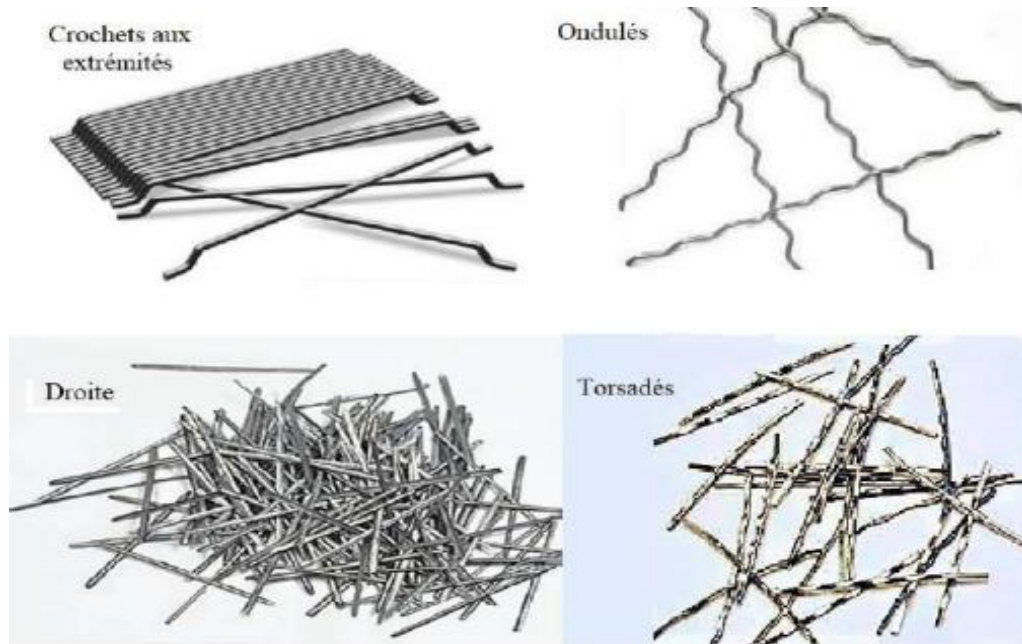


Figure 1.6. Différentes géométries des fibres (Vu, 2022)

I.9. Mortier

Parfois, il est bénéfique d'analyser la façon dont les bétons se comportent en utilisant des mortiers spécifiquement sélectionnés. Cette approche permet de rendre les essais moins contraignants, car elle nécessite moins de matériau en raison de la réduction du volume requis. Il existe diverses méthodes pour créer des mortiers à partir des composants d'un béton : par exemple, en préservant sa fluidité initiale, la distance entre les grains et son comportement thermique (Dierkens, 2005).

I.9.1. Mortier des bétons équivalents (MBE)

Dans le cadre du projet national français « Calibé », la méthode de calcul des MBE a été élaborée pour résoudre les difficultés liées à l'utilisation des bétons adjuvantés. Quelques-uns d'entre eux ont des prises erronées sans raison apparente. Afin d'accomplir cela, il était essentiel de chercher des méthodes qui facilitent les essais sur des mortiers.

La composition des MBE est calculée en se basant sur l'idée que ce sont les surfaces de contact des composants qui ont une importance plus grande que leur volume. Deux conclusions en découlent (Dierkens, 2005) :

- La première est due à la capacité d'un béton à s'ouvrir en raison de la manière dont ses composants parviennent à se « glisser » les uns sur les autres pour s'écouler.

- La seconde est due à la chimie de la prise, avec les hydrates se formant principalement le long des interfaces.

Cette méthode consiste à créer le mortier en utilisant la composition du béton correspondant en substituant la surface spécifique des gros granulats par une surface spécifique équivalente de sable (figure 1.7)

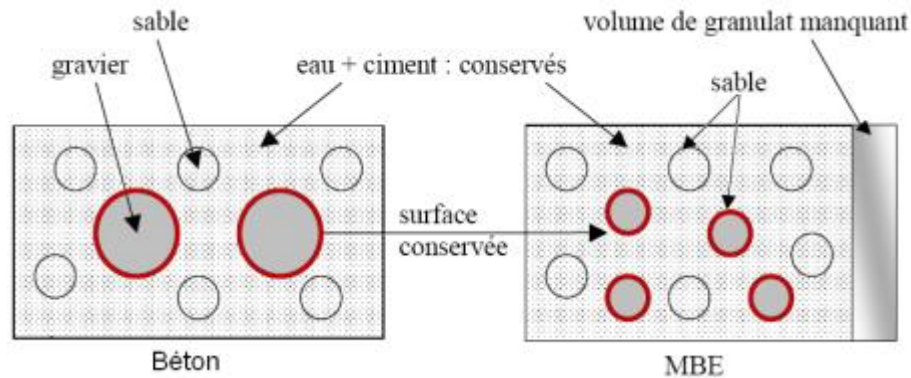


Figure 1.7. Passage de béton au MBE (Rouis, 2017).

I.9.2. Mortier normalisé

Le mortier normalisé est un mortier destiné à évaluer certaines caractéristiques des ciments, telles que leur capacité à résister à la compression. Il est constitué d'un mélange de ciment, de sable et d'eau, préparé selon des proportions et des procédures rigoureusement définies par des normes nationales ou internationales, comme la norme NF EN 196-1 en Europe ou la norme ISO 679 à l'échelle mondiale.

L'objectif principal des tests sur mortier standard utilisé pour la présente étude sont non seulement d'examiner la capacité du mortier à s'étirer et à se comprimer en présence et en absence de fibre métallique (Ben Allal et al., 2011), et aussi pour son utilisation la plus fréquente dans nos différents chantiers tel que : les dalles, les dalles industrielles, les chapes ...etc. Toutefois, Il a pour but est de déterminer comment le mortier se comporte dans des situations réelles de construction et d'identifier s'il répond aux exigences de résistance et de durabilité nécessaires pour ces applications spécifiques. Cela permet aux professionnels du bâtiment de choisir le bon type de mortier et d'optimiser sa formulation pour garantir la qualité et la solidité des structures construites.

I.9.3. Mortier fibrés

Selon (Ezziane et al., 2015), la microstructure des mortiers est généralement dense et leur perméabilité est faible. En général, on définit les mortiers renforcés de fibres comme des composites composés de deux éléments principaux : les fibres et la matrice ciment, et qui offrent le meilleur comportement mécanique. La répartition des fibres dans la matrice cimentaire est aléatoire.

Selon les recherches menées par (Ezziane et al., 2015) et (Setti, 2012), l'ajout de fibres vise à obtenir un matériau qui présente un comportement mécanique amélioré (à la compression et à la traction) et qui ralentit la propagation des fissures. Les fibres, réduisent les fissures, améliorent le comportement de la matrice cimentaire après fissuration en maintenant une forte portance pendant l'accroissement des déformations.

I.10. Rôle des fibres dans les matériaux cimentaires

Dans un premier temps, les chercheurs ont tenté d'améliorer les caractéristiques mécaniques du béton en ajoutant des fibres, telles que la résistance à la compression et à la flexion (Meddah, 2014).

Les fibres vérifient la propagation d'une fissure dans un matériau de travail en diminuant la profondeur de la fissure. Ce rôle se manifeste par des améliorations concernant :

- La cohésion du béton frais.
- La ductilité et le comportement post-fissuration sont augmentés.
- La réduction des effets du retrait par couture des microfissures.
- La résistance mécanique du béton à l'âge avancé.
- La résistance à la traction par flexion.
- La résistance au feu, aux chocs, à la fatigue, à l'usure et à l'abrasion.

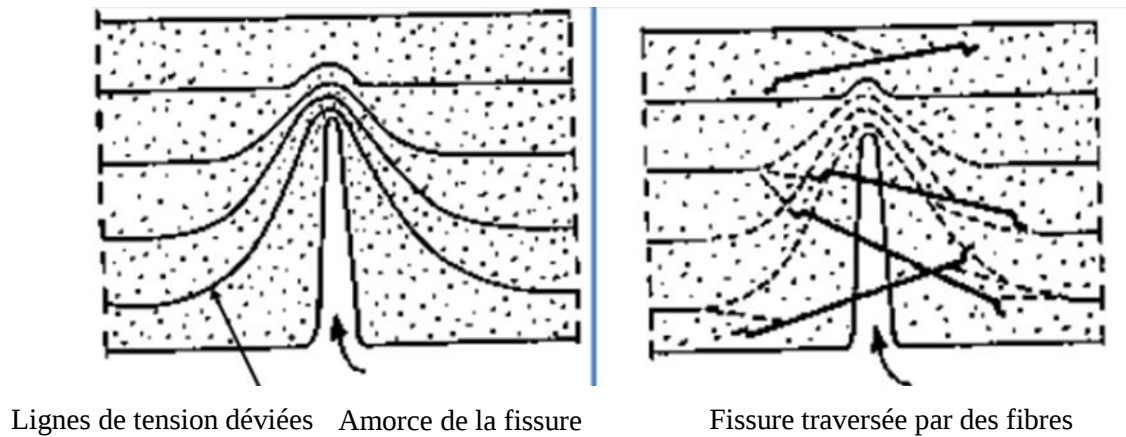


Figure 1.8. Rôle des fibres dans la matrice de béton (Zarga, 2015)

La figure 1.9. Présentée les différents facteurs influençant le comportement des fibres de béton armé.

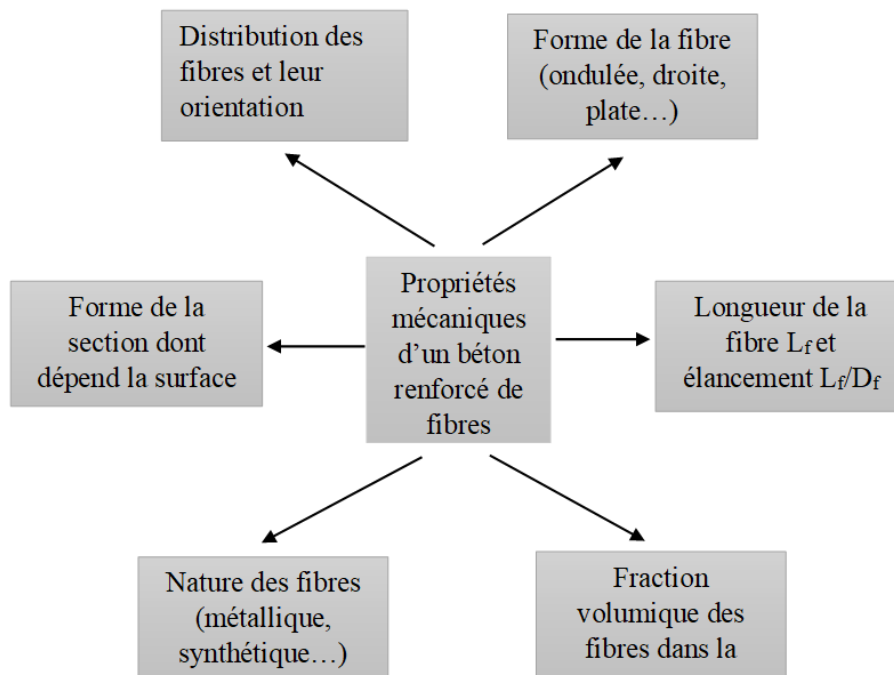


Figure 1.9. Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres (Meddah, 2014) L_f / D_f

I.11. Mécanisme de fonctionnement des fibres dans les matériaux cimentaires

Depuis plusieurs décennies, le renforcement des matériaux composites par des fibres a été employé afin d'améliorer leur ductilité et leurs caractéristiques mécaniques (Vilfayeau, 2014).

Leur principal rôle est de contrôler la formation de fissures. Cependant, les performances des fibres et leur utilisation ont changé au fil du temps.

I.12. Influence du dosage de fibres

Les fibres qui se trouvent dans la matrice jouent un rôle de retardateur dans la formation des microfissures. Effectivement, les recherches menées par (Ghaffar et al., 2014) ont démontré que :

- L'ouvrabilité du béton diminue de manière significative à mesure que le taux de dosage des fibres augmente.
- Le pourcentage maximal d'augmentation de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion est de 3% et 4% des fractions de volume des fibres.
- En règle générale, on constate une amélioration satisfaisante des différentes résistances lorsque des fibres d'acier sont ajoutées au béton classique. Toutefois, la résistance maximale du béton varie en fonction de la quantité de fibres.
- Le béton devient plus ductile lorsque des fibres à des teneurs plus élevées sont ajoutées.

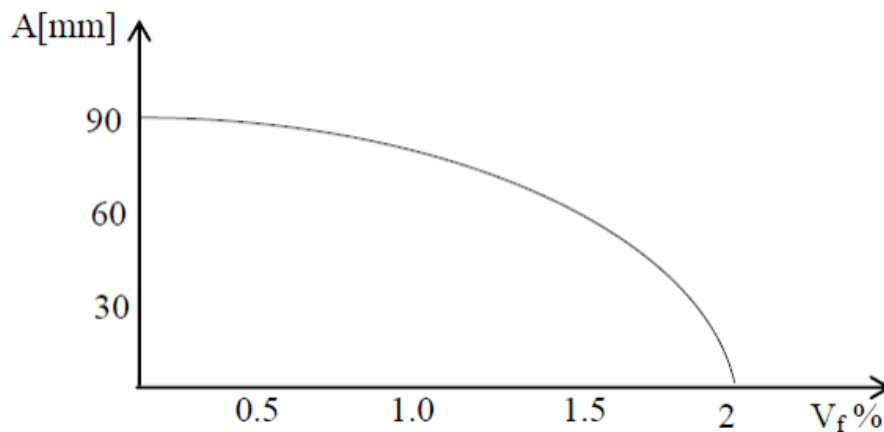


Figure 1.10. Effets des fibres sur l'affaissement du béton au cône d'Abrams (Jejcic, Zanghlline, 1977 cité par Zarga, 2015)

I.13. Influence de l'orientation des fibres

Les fibres sont disposées de manière perpendiculaire au plan de la fissure, ce qui leur permet de nouer la fissure. En revanche, l'orientation parallèle des fibres à celle-ci n'a aucun impact. On considère que l'orientation des fibres joue un rôle essentiel dans l'évaluation des

propriétés mécaniques (Doyon Barbant, 2018), et dans l'activation du transfert de charge entre la matrice et les fibres (Boulekbache et al., 2014).

Selon (Guenet, 2016), la vibration du béton de fibres encourage une orientation bidimensionnelle optimale des fibres dans un plan horizontal, ce qui améliore la performance du matériau si cette orientation correspond à la direction des contraintes majeures. De plus, l'utilisation de la table vibrante favorise une orientation supérieure des fibres, perpendiculairement au sens de la vibration.

I.14. Influence de la longueur des fibres

Selon (Ouedroago, 2017), la longueur des fibres peut avoir un impact sur la résistance mécanique. En outre, les fibres plus longues ont une meilleure capacité à couder les fissures, tandis que les fibres courtes seraient contournées, voire même responsables de la rupture si la liaison fibre était de mauvaise qualité (Saradar et al., 2018). Ainsi, l'énergie de rupture et la longueur caractéristique d'un béton simple augmentent, tandis que sa résistance à la traction et son module d'élasticité diminuent (Han et al., 2019).

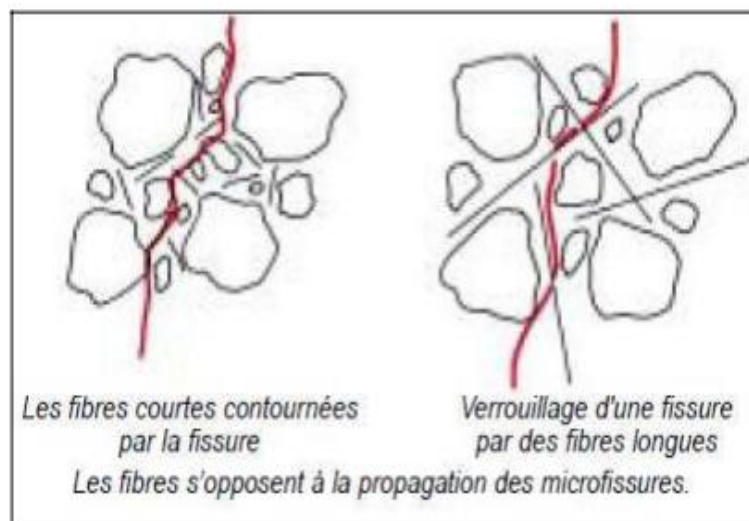


Figure 1.11. Schéma de disposition des fibres (Abdou, 2007 cité par Belhadj, 2015)

I.15. Influence de la fibre- matrice cimentaire

L'adhérence fibre-matrice joue un rôle crucial dans le comportement mécanique du béton renforcé à base de fibres.

Selon (Chanvillard, 1992 cité par Vu, 2022), elle est fournie par trois catégories de liaison :

- Une liaison élastique due à un collage des fibres et de la matrice par des liants.

- Une liaison causée par le frottement.
- Une liaison causée par l'ancrage mécanique lorsqu'il s'agit de fibres non rectilignes (crochets, ondulations...).

A l'heure actuelle, les fibres les plus couramment employées dans le domaine du béton structural sont soit lisses, soit avec des crochets aux extrémités. En général, l'énergie requise pour extraire entièrement une fibre ayant une extrémité crochue est supérieure à celle d'une fibre droite.

L'essai d'arrachement est une méthode assez simple, économique et pratique, fréquemment employée afin de mesurer la résistance de la liaison entre la fibre et la matrice (Deng et al., 2023). La résistance correspond à la force de cisaillement maximale ($\tau_{\max}$) qui se forme à la surface de la fibre lors de son arrachement.

La contrainte d'adhérence d'une fibre droite est généralement de 2 à 3 MPa, tandis qu'elle peut atteindre 6 à 7 MPa pour une fibre à crochets aux extrémités (Deng et al., 2023).

Si les fibres lisses résistent principalement à l'arrachement par adhésion, les fibres crochetées aux extrémités sont plus résistantes mécaniquement.

I.16. Comportement mécanique des matériaux cimentaires renforcés par des fibres

I.16.1. Résistance à la compression

Selon les recherches menées par (Zhao et al., 2018), (Ragi, 2015), et (Mohamed et al., 2023), il a été démontré que l'ajout de fibres entraîne une amélioration significative des caractéristiques mécaniques du matériau. Selon (Khan et Ahmad, 2015) et (Mohamed et al., 2023), les valeurs de résistance à la compression les plus élevées ont été obtenues pour un dosage de 1% de fibres.

Grâce au fibrage des bétons, ils sont améliorés pour résister davantage à la propagation des fissures et accroître leur résistance mécanique (Slebi-Acevedo et al., 2019).

Par ailleurs, il est fréquent d'utiliser des fibres de plus grande longueur et de diamètres variés pour renforcer le béton à haute performance mécanique (Wilson et Philip, 2015).

I.16.2. Résistance à la traction

Les chercheurs privilégient généralement l'étude de la traction par flexion et évitent donc les essais de traction directe, car ils sont fragiles et très onéreux.

Selon (Koushkbaghi, 2019), la résistance à la traction joue un rôle essentiel dans la conception de structures en béton, car elle permet d'éviter l'apparition et le développement de fissures.

D'après (Hamri, 2015) et (Akhtar et al., 2022), les fibres permettent d'augmenter légèrement la résistance à la traction du béton en fibres (avec une augmentation de 16%) et d'améliorer la ductilité du comportement après la rupture du composite.

Les fibres sont incorporées dans le béton afin de pallier la fragilité du matériau lors de la traction en couturent les macro-fissures. Ces fibres ont un effet écouissant et adoucissant remarquables en traction (Melais et al., 2015).

En effet, tandis que le béton sans fibres se désagrège rapidement après une fissure, les bétons en fibres d'acier continuent à reprendre des efforts même après une fissure, les bétons en fibres d'acier continuent à reprendre des efforts même après avoir atteint la charge maximale (Zarga, 2015).

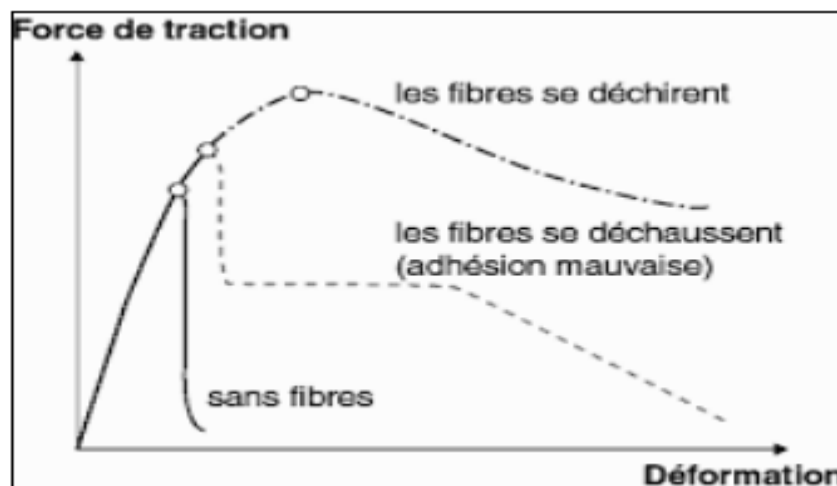


Figure 1.12. Diagramme représente comportement de charge-déformation de béton avec fibres et béton sans fibres (Makhlouf, 2010).

I.16.3. Résistance à la flexion

Dans ce contexte, (Melais et al., 2015) a montré que les fibres métalliques offrent une ductilité, améliorent comportement après une fissure et augmentent la capacité portante résiduelle.

La combinaison de matériaux cimentaires et de fibres offre de bonnes performances à la flexion et aux sollicitations dynamiques (Suiffi et al., 2019), ce qui réduit le retrait et lutte efficacement contre l'apparition des fissures en les limitant au maximum. D'après (Hamri, 2015), la flexion du béton est influencée par la fissuration de la zone tendue.

Selon (Boulekbache et al., 2014), la flexion est le type de sollicité le plus fréquent dans les structures.

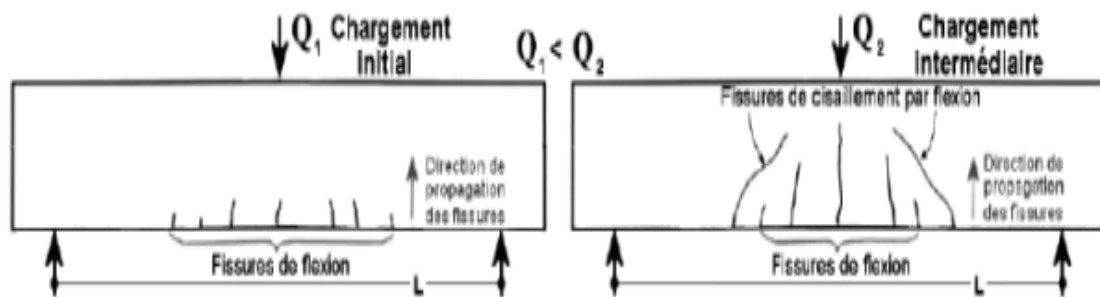


Figure 1.13. Représentation de la fissuration initiale et intermédiaire par flexion d'une poutre en béton armé (Hamri, 2015).

I.16.4. Module d'élasticité

Selon (Slebi-Acevedo et al., 2019), le module d'élasticité augmente lorsque les fibres sont ajoutées. (Ezziane et al., 2015) ont montré que la nature des fibres n'a pas d'impact sur le module d'élasticité. D'après (Djebali, 2013), il a employé des fibres métalliques en forme de spirale. Il a constaté que la présence d'un faible pourcentage de fibres spirales entraîne une augmentation de la rigidité de 3% à 4%. Toutefois, lorsque le volume de ces fibres augmente, le module d'élasticité du béton tend à diminuer, ce qui peut avoir un impact sur la compacité du mélange.

Selon les auteurs, une concentration optimale de fibres spirales de 0,4% est recommandée afin d'obtenir un module optimal (figure 1.14).

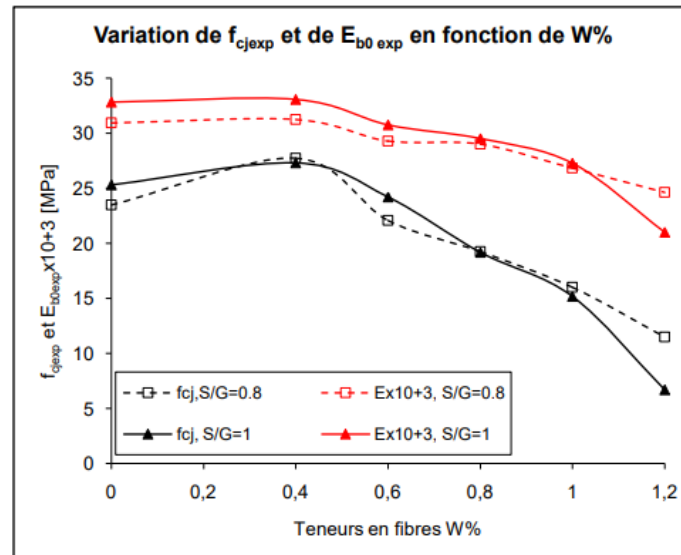


Figure 1.14. Evolution de la résistance en compression et du module de Young en fonction de la teneur en fibre (Djebali, 2013).

I.17. Le retrait et ses formes

Le retrait est un phénomène physique et chimique intrinsèque au béton, se produisant de manière systématique dès sa prise jusqu'à son vieillissement. Lorsque le béton perd de l'humidité, il subit un retrait qui se traduit par une diminution volumétrique. Bien que ce phénomène affecte les trois dimensions du matériau, il est généralement mesuré et exprimé sous forme de déformation linéaire (Aitcin et al., 1998). Ce processus complexes se présente sous différentes formes tout au long de la durée de vie du béton.

I.17.1. Risque de fissuration au jeune âge

Le retrait de béton est la principale raison de diverses fissures qui impacte la facilité d'entretien et la durabilité de béton. Le retrait peut être classé en deux catégories principales :

Selon (Holt, 2001 ; Wongtanakitcharoen et Naaman, 2007 ; Khan, 1995), le jeune âge se traduit par une diminution au cours des premières 24 heures après le premier contact entre le ciment et l'eau, tandis que le retrait à long terme s'étend au-delà du premier jour (Holt, 2001). En général, le retrait au jeune âge est moins important que le retrait de séchage à long terme (Holt, 2001). Cependant lorsqu'il y a un séchage rapide, l'ampleur du retrait précoce peut facilement dépasser celle du retrait permanent. Étant donné sa résistance limitée et sa capacité à se déformer dès son jeune âge, le béton est extrêmement vulnérable aux contraintes internes. Selon (Holt et Leivo 2004), toute contrainte de traction entraînera soit des fissures similaires à celles qui se produisent à un âge plus avancé, soit des fissures internes et microscopiques qui

peuvent être réactivées à des âges plus tardifs, ce qui entraîne des problèmes graves. La fissuration précoce est causée par une combinaison de trois types de déformation : la dilatation thermique, le retrait de séchage et le rétrécissement autogène.

I.17.2. Retrait chimique (retrait au très jeune âge)

Ce phénomène est causé par les réactions d'hydratation du ciment, comme on peut le constater dans le tableau 1.2 ci-dessous, il y a une diminution de volume entre les réactifs et les produits de réaction, cette diminution de volume est également connue sous le nom de contraction de Chatelier est la cause de retrait chimique.

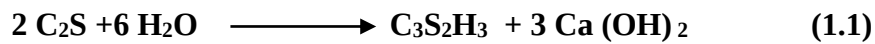


Tableau 1.2. Exemple d'une perte de volume entre les réactifs et les produits (Nicolas, 2014).

	2 C ₂ S	6 H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃	3 Ca (OH) ₂
Poids (g)	456,6	108	342	222,3
Masse volumique (g/ml)	3,15	1	2,71	2,24
Volume	145	108	123,4	99,2

I.17.3. Retrait plastique

Il est possible qu'il se forme à la surface du béton dès la fin de sa mise en place, par dessiccation, et il se manifeste ainsi avant et pendant la prise initiale du béton. Le problème résulte d'une évaporation excessive de l'eau en surface qui ne peut pas être compensé ce qui entraîne une contraction intense de la pâte provoquant des fissures sur la surface externe.

Les fissures de retrait plastique sont des fissures qui se forment dans le béton frais pendant le processus de durcissement. Elles apparaissent généralement à une distance de 15 à 50 cm de la surface et peuvent être assez profondes. Ces fissures se produisent lorsque la force de traction exercée sur le béton dépasse sa capacité à résister à la traction. Elles se présentent sous forme de motifs de dommages, qui peuvent être maillés ou parallèles, et peuvent mesurer jusqu'à 1 mm de largeur et de 50 à 1000 mm de longueur. Plus la quantité de ciment dans le mélange est élevée et que le rapport entre l'eau et le ciment est faible, plus le retrait plastique sera important (Parmentier et al., 2009 ; Amran et al., 2023).

I.17.4. Retrait endogène (autodessiccation)

Le retrait endogène, également appelé autodessiccation, se produit dans le béton après la phase d'hydratation, lorsque le mélange d'eau et de ciment commence à durcir. Pendant cette phase, les particules de ciment se lient entre elles pour former des ponts cristallins, créant une structure plus rigide. Ce processus limite la diminution de volume causée par l'hydratation continue de la pâte de ciment. En conséquence, la pression exercée sur le système cristallin entraîne la formation de bulles dans les pores du béton et une libération de gaz similaire à une évaporation. Ce phénomène est connu sous le nom de retrait endogène ou autodessiccation car il se produit naturellement à l'intérieur du matériau sans influence externe significative.

- **Le concept de volume apparent et de volume absolu**

L'analyse de la déformation endogène nécessite une distinction entre les concepts de volume apparent et de volume absolu. Les différentes phases du matériau qu'elles soient solides, liquides ou gazeuses, peuvent être représentées par le volume apparent. La somme des volumes des phases solides et liquides est connue sous le nom de volume absolu (figure 1.15).

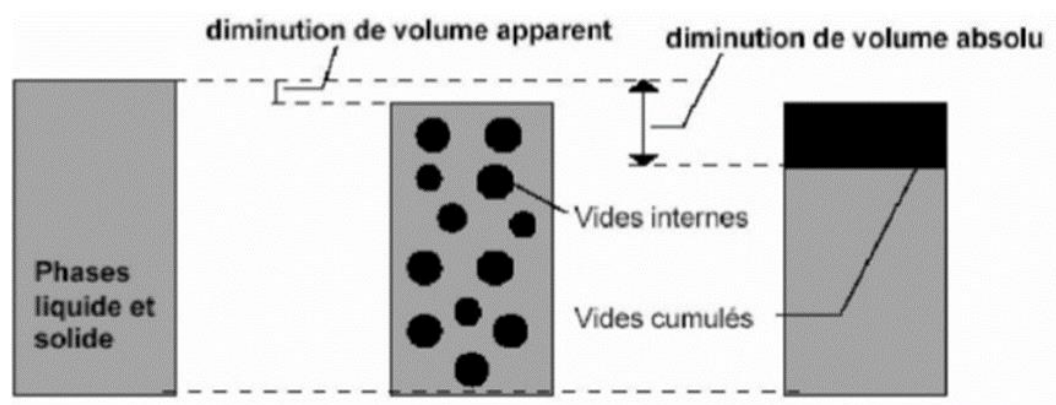


Figure 1.15. Volume absolu et volume apparent (Bouasker, 2007).

Néanmoins, la réduction autogène est perçue comme une modification de volume externe (changement de volume apparent), tandis que la réduction chimique est perçue comme une diminution de volume interne (changement de volume absolu), comme mentionné dans la figure 1.15 (Bouasker, 2007 ; Soliman, 2011).

En raison du fait que le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau + ciment), le retrait endogène se produit. Après la prise de béton, ce processus provoque une réduction de volume. Une fois obtenu, il entraîne la formation des vides dans la pâte de ciment hydraté (vides capillaires) qui entraînent une baisse de l'humidité interne (autodessiccation). Le processus de réorganisation de l'eau dans la pâte de ciment entraîne une

contraction appelée retrait endogène. Ce retrait peut avoir deux origines : d'origine chimique, connue sous le nom de " la contraction le Chatelier ", et d'origine physique, connue sous le nom de retrait de "retrait d'autodessiccation", figure 1.16.

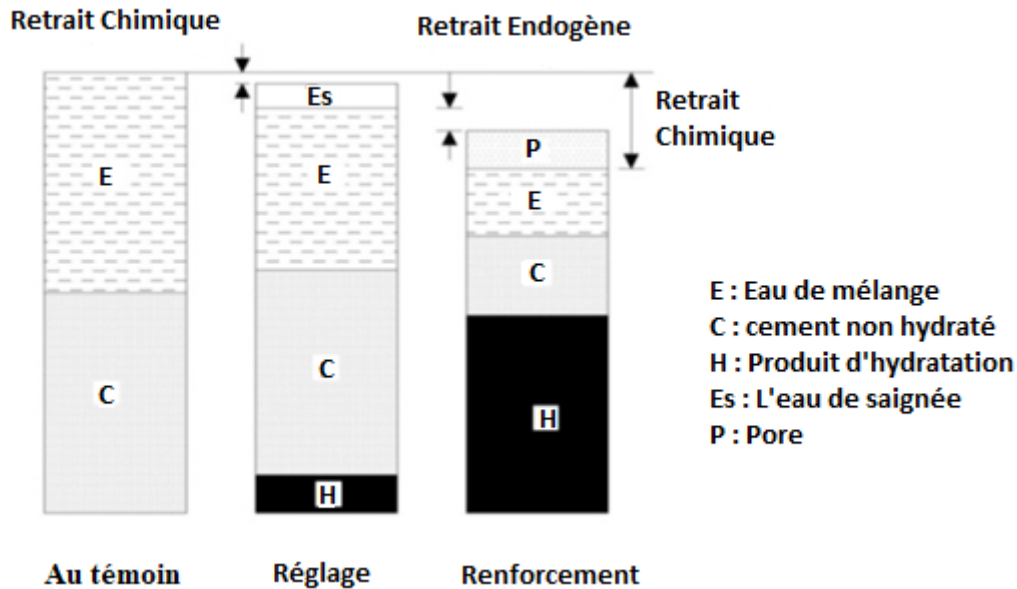


Figure 1.16. Retrait chimique et retrait endogène (Soliman, 2011).

La contraction le Chatelier entraine un retrait endogène d'origine physique. Il est possible de le réaliser uniquement si le matériau n'a aucun contact avec l'environnement, effectivement, dans un environnement fermé, le ciment commence à se fixer et provoque la création d'un squelette solide qui empêche les déformations de la pâte. Les vides gazeux se formant dans La porosité des capillaires.

Les ménisques de l'interface maintiennent l'équilibre entre ces vides gazeux et l'eau capillaire. Cet équilibre est expliqué par les lois de Kelvin et de Laplace, qui montrent que l'eau capillaire est en dépression par rapport à la phase gazeuse.

D'après la théorie, une augmentation du taux de retrait autogène serait due à l'augmentation de la courbure des ménisques et des capillaires en raison du diamètre réduit des pores (Amran et al., 2023). Les ménisques se forment dans les pores les plus grands, tandis que les plus petits se remplissent d'eau. Pendant l'hydratation, les pores deviennent de plus en plus petits, les ménisques d'interface se contractent et se forment dans les vides. L'autodessiccation se produit lorsque l'humidité relative dans les pores capillaires diminue et que la dépression capillaire augmente.

Une dépression capillaire est entraînée par la contraction le Chatelier engendre une compression de la partie solide de la pâte de ciment, ce qui entraîne une réduction du volume externe. Dans cette situation, on désigne la réduction du volume externe sous le nom de retrait d'autodessiccation. Dans un environnement scellé (aucun échange hydrique avec l'environnement) avant l'introduction du ciment, le retrait endogène est un retrait chimique directement liée à la réaction d'hydratation. Après la prise, le retrait endogène correspond à la combinaison du retrait chimique et du retrait d'autodessiccation. Lorsque le rapport E/L est inférieur à 0,4, le retrait endogène peut être significatif (Jianxia, 2012 cité par Aghaee, 2022).

I.17.5. Retrait thermique

Le retrait thermique du béton, souvent à l'origine de la pré fissuration, résulte de plusieurs facteurs interdépendants. Pendant la prise et le durcissement, le béton génère de la chaleur, puis se contracte en refroidissant. Ce phénomène est accentué dans les structure massives où la chaleur d'hydratation peut varier, avec une température plus élevée au cœur et plus basse près des parois en raison des échanges thermiques avec l'extérieur. Pendant l'hydratation, des réactions chimiques se produisent, libérant de la chaleur, augmente la résistance, mais entraînant également une contraction du volume solide lors du refroidissement vers la température ambiante, cette contraction thermique est connue sous le nom de retrait thermique (Aïtcin et al., 1997 cité par Apaya, 2013).

I.17.6. Retrait de séchage (de dessiccation)

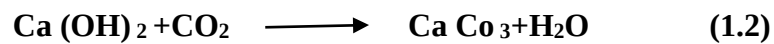
Le retrait de séchage, également appelé retrait exogène ou de dessiccation, découle directement de l'évaporation de l'eau hors du matériau, induisant ainsi des contraintes de traction à l'intérieur des pores capillaires et conduisant au retrait (Dupain et al., 1995 cité par Chaib et al., 2017).

Le retrait de séchage est un processus de dessiccation localisé qui commence à se produire à la surface du béton, ce qui permet à l'eau interne du béton de s'évaporer (Aïtcin et al., 1997 cité par Apaya, 2013). L'évaporation de l'eau contenu dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir des surfaces de béton exposées à l'air est la principale raison du retrait de séchage. Une fois que le taux d'humidité de l'air ambiant est inférieur à celui qui règne dans le réseau capillaire, l'évaporation se produit. Une contraction du béton est causée par les forces de tension qui se forment dans les ménisques à l'intérieur du béton. La valeur de retrait de séchage varie en fonction de divers éléments. L'évaporation de l'eau présente dans le béton frais peut être maîtrisée en utilisant une méthode de cure appropriée (utilisation d'un produit

pour la cure, installation d'un jute humide). De plus le retrait de séchage débute dès la prise du béton et persiste tout au long de son processus de durcissement, se prolongeant sur tout sa durée de vie (Rostami, 2021). Les valeurs de retrait de séchage sont approximatives 100 à 800 $\mu\text{m/m}$ (Parmentier et al., 2009).

I.17.7. Retrait de carbonatation

Le retrait de carbonatation se produit suite à une réaction chimique (Houst, 1989) ; lorsque le béton durci est exposé à l'air, le gaz carbonique qui se trouve dans l'air pénètre à l'intérieur du béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium (portlandite), qui est libéré par l'hydratation, pour créer du carbonate de calcium.



Le retrait causé par la carbonatation ne serait pas exclusivement le résultat de la conversion de la Portlandite en Calcite, mais résulterait également de la déshydratation et de la polymérisation du gel de silice formé après la carbonatation des silicates de calcium hydratés (CSH), (Swenson et Sereda, 1967).

I.17.8. Retrait total

Deux parties composent la déformation de retrait total : la première est liée au retrait de séchage et la deuxième est liée au retrait endogène (Dupain et al., 1995 cité par Chaib et al., 2017). La déformation de retrait totale est calculée suivant cette relation :

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{endogène}} + \epsilon_{\text{dessiccation}} \quad (1.3)$$

I.18. Mécanismes à l'origine de retrait

I.18.1. Tassement

Le tassement est le terme utilisé pour décrire le retrait vertical qui se produit avant la prise initial d'un matériau cimentaire. Le ressuage (sédimentation des particules solides en suspension dans la phase liquide), la montée des bulles d'air en surface et le retrait chimique peuvent être à l'origine de cela. Le tassement est également connu sous le nom de retrait de tassement. Un béton solide et sans ressuage présente un tassement minime. Il est fréquent que le tassement excessif soit causé par une mauvaise consolidation du béton frais. Les risques de fissures de tassement sont réduits grâce à l'air entraîné, à un dosage suffisant en particules fines et à un faible dosage en eau (Abdelhafid, 2010).

I.18.2. Gonflement

Le béton, le mortier et la pâte de ciment en présence d'eau commence à gonfler. Lorsque l'eau de l'extérieur est aspirée dans la porosité capillaire pour remplir les espaces créés par le retrait chimique, la masse de béton augmente. Il est possible d'inclure de l'eau extérieure en utilisant une couche humide ou immergeant complètement. La croissance cristalline, l'absorption d'eau et la pression osmotique sont responsables du gonflement. Lorsque le béton n'est plus en contact avec de l'eau externe, le gonflement s'arrête et le béton se contracte en raison du retrait endogène et de séchage (Abdelhafid, 2010).

I.18.3. La porosité interne et l'état de l'eau dans la pâte de ciment

Plusieurs familles de vides font partie de la porosité de la pâte, avec une taille allant de quelques millimètres à quelque dizaine de nanomètres. Les familles les plus grandes comprennent les vides d'air piégés et les défauts de compactage, les bulles d'air entraînées (de 10 μm à 1 mm), les pores capillaires (de 0,01 μm à 5 μm), et les plus petits sont les pores de gel ($\varnothing < 40 \text{ nm}$).

En fonction de sa localisation et son état, l'eau de la pâte de ciment hydratée interviendra différemment dans les processus liés à la durabilité. Elle est présente sous diverses formes.

Le surplus d'eau des capillaires n'a pas réagi avec le ciment. Dans les gros capillaires, l'eau est libre car les forces de surface n'ont pas d'impact sur le volume total des pores, tandis que dans les petits capillaires, l'eau est non-libre car elle est retenue par des tensions capillaires. Pour une humidité inférieure à 90%, elle a beaucoup d'influence sur le retrait de la pâte. L'eau absorbée, qui est physiquement liée à la surface des solides, est ensuite absorbée. Si le taux d'humidité est inférieur à 50%, une grande partie de cette eau peut être retirée. Le retrait de la pâte ou du béton est la principale cause de cette perte d'eau (Apaya, 2013).

I.18.4. Mécanisme de dépression capillaire

Qui traduit l'autodessiccation au sein de la porosité capillaire. Il repose sur l'apparition de ménisques à l'interface eau liquide-vapeur dans la porosité capillaire (figure 1.17).

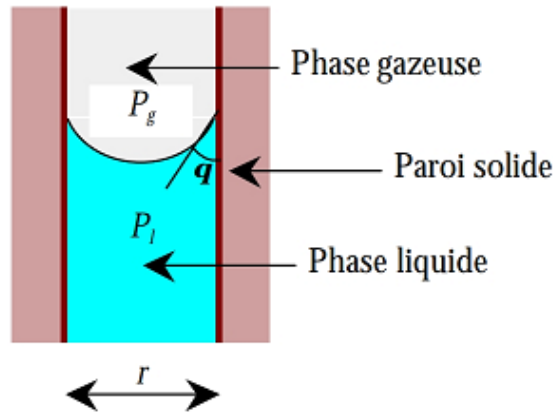


Figure 1.17. Présentation schématique de la dépression capillaire (Mounanga, 2003).

Les ménisques impliquent la traction de la phase liquide dans le but de rapprocher les parois des pores. L'approche thermodynamique de cet événement repose sur deux lois, celles de la place et de kelvin, qui expliquent respectivement l'équilibre mécanique d'un ménisque soumis à des pressions variables, ainsi que l'équilibre hygrométrique entre eau liquide et vapeur.

- **Loi de la place**

$$P_l = P_g - \left(\frac{2 \times \sigma}{r} \times \cos \Theta \right) \quad (1.4)$$

Avec :

P_l : La pression de l'eau [Pa]

P_g : La pression de la phase gazeuse [Pa]

r : Le rayon de pore ou le ménisque existe [m]

σ : La tension superficielle de l'interface d'eau liquide-vapeur [N.m⁻¹]

Θ : l'angle de mouillage [rad]

- **Loi de Kelvin**

$$P_l - P_g = (RT\rho_l/M) \ln (HR) \quad (1.5)$$

Avec :

M : Masse molaire de l'eau [Kg mol⁻¹]

R : Constante des gaz parfaits [J mol⁻¹ K⁻¹]

T : Température absolue [kelvin]

ρ_1 : Masse volumique de l'eau [kg m^{-3}]

HR : Humidité relative [%] avec ($HR=P_v/P_{vs}$)

L'intensité de la dépression capillaire, le rayon du pore dans lequel se situe le ménisque et l'humidité relative régnant dans le pore peuvent être liées par la combinaison de ces lois. Les hydrates remplissent progressivement les espaces entre les grains de ciment au cours de l'hydratation. Par conséquent, la diminution du rayon moyen des pores capillaires entraîne une réduction de l'humidité relative interne, ce qui entraîne une autodessiccation de la pâte de ciment et une augmentation de la dépression capillaire. La compression de la phase solide de la pâte provoque le retrait qui compense cette dépression capillaire.

I.18.5. Mécanisme de variation de la tension superficielle

Qui se traduit lorsque l'eau est adsorbée sur le squelette solide. En effet, la dissymétrie des forces d'attraction que subissent les atomes au voisinage de la surface est responsable de la tension superficielle des solides et des liquides. La variation de la tension superficielle d'un corps entraîne une variation dimensionnelle, qui est beaucoup plus importante dans les matériaux avec une surface spécifique importante comme la pâte de ciment. L'adsorption des molécules d'eau sur les surfaces solides dans la pâte relaxe les tensions superficielles. Cependant, la désorption augmente la tension superficielle du squelette solide, ce qui provoque un retrait (Apaya, 2013).

I.18.6. Mécanisme de la variation de la pression disjonctive

Lié à l'autodessiccation des nano pores des gels d'hydrates. Il concerne la façon dont deux surfaces solides recouvertes de molécules d'eau adsorbées interagissent. L'humidité relative détermine la température à laquelle la couche d'eau adsorbée ne peut plus se développer librement. Si l'humidité relative augmente au-dessus de cette limite, l'adsorption a tendance à séparer ces deux surfaces solides, augmentant ainsi l'épaisseur de la couche adsorbée. La pression de disjonction sera donc exercée sur les deux surfaces solides. La pression de disjonction entre les surfaces solides d'une pâte de ciment atteint son point culminant lorsque la pâte de ciment est saturée. Si l'humidité relative de la pâte diminue, la pression de disjonction diminue également et les surfaces solides s'approchent en développant le retrait (Apaya, 2013).

I.19. Facteurs affectant le retrait

I.19.1. Facteurs Externes (effet de température)

Le premier paramètre à examiner est la température ambiante. C'est un paramètre d'influence générale car il affecte tous les types de retraits (thermique, dessiccation et plastique).

Par temps chaud, l'eau de ressuage s'évapore plus rapidement, ce qui augmente le risque de retrait plastique. De plus, la chaleur d'hydratation est plus importante car l'hydratation se produit plus rapidement (réaction thermo-activée). Cette chaleur augmente la température générale. Le retrait thermique ultérieur sera plus important car le squelette solide se forme alors qu'il est dilaté thermiquement. Si le béton reste dans un environnement chaud (non abrité du soleil), l'évaporation augmentera également.

Le froid réduit le retrait thermique et évapore l'eau de ressuage. De plus, comme la prise intervient plus tard, le ressuage est plus important (le flux d'eau de ressuage est constant jusqu'au début de la prise). Ainsi, la fraîcheur limite le retrait.

I.19.2. Facteurs internes

i. Effet de rapport E/C

La résistance du béton et l'amplitude du retrait sont directement influencées par le rapport E/C, d'après (Holt, 2001 ; Bouasker, 2007), l'augmentation du rapport E/C réduit le retrait endogène. Lorsque le rapport E/C est faible, l'hydratation réduit rapidement la quantité d'eau dans les pores capillaires, ce qui augmente le retrait endogène (Bouhamou et al., 2009). La diminution de l'eau réduit le volume total des pores et leur diamètre. Lorsque le rapport E/L est inférieur à 0,4, le retrait endogène peut être significatif (Jianxia, 2012 cité par Aghaee, 2022 et Gowripalan, 2020). Cet effet du rapport E/C est confirmé par les résultats présents dans la figure 1.18 et figure 1.19.

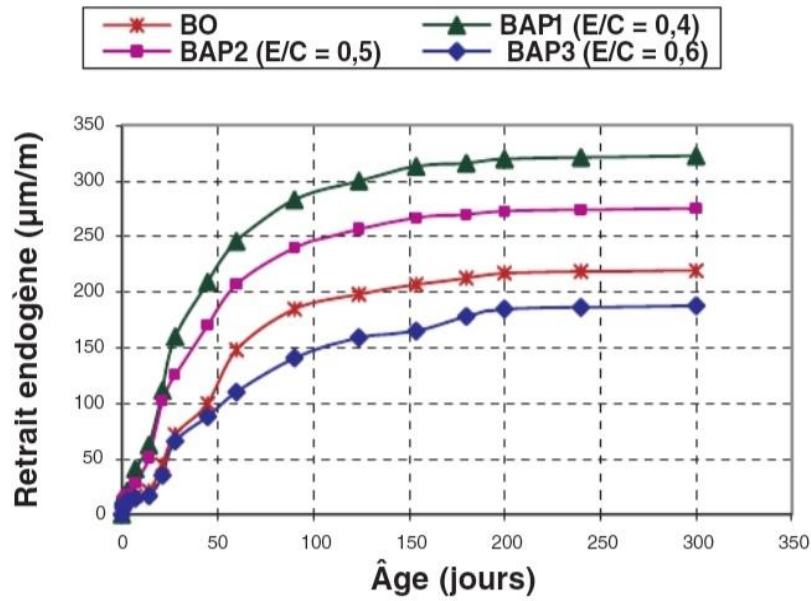


Figure 1.18. Influence du rapport E/C sur le retrait endogène sur différents types de béton (Bouhamou et al., 2009).

Lorsque la densité des hydrates augmente (E/C faible), le retrait de dessiccation diminue (Nicolas, 2014 ; Bouhamou et al., 2009), (figure 1.19).

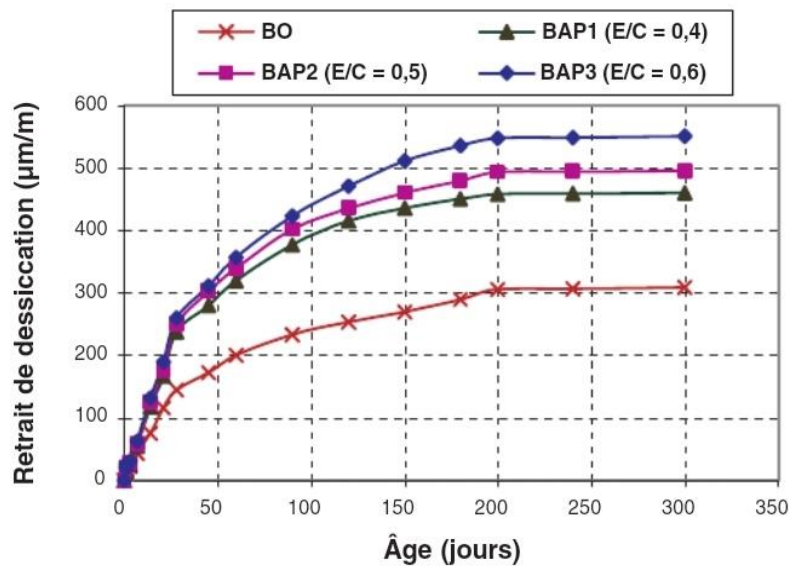


Figure 1.19. Influence du rapport E/C sur le retrait de dessiccation sur différents types de béton (Bouhamou et al., 2009).

Pour résumer, pour les bétons avec un E/C faible, le retrait endogène est le plus efficace. Dans ce cas, il convient de prendre des mesures de traitement à court terme pour s'assurer que les effets du retrait sont limités.

ii. Effet de la concentration granulaire

Ajouter du sable au mélange de mortier ou de béton peut diminuer la contraction totale et prévenir la formation de fissures. Il est important de souligner que la répartition des tailles de particules de sable, appelée distribution granulaire, joue un rôle significatif dans la contraction causée par le séchage (Trincal, 2022).

Plusieurs chercheurs ont étudié l'impact de la concentration de granulats sur le retrait : Selon (Baron, 1971 cité par Bouasker, 2007), le retrait d'un béton est de 6 à 10 fois plus petit que celui de la pâte de ciment correspondante. Il a été démontré par (Tazawa et Miyazawa, 1995) que le retrait dépend de la fraction volumique de la pâte ciment dans la matrice cimentaire. En effet, lorsque la fraction volumique des granulats augmente, la fraction de pâte dans la même section diminue, ce qui entraîne une diminution du retrait. Selon (Holt, 2001), le retrait d'une pâte de ciment est plus grand que le retrait d'un mortier (figure 1.20).

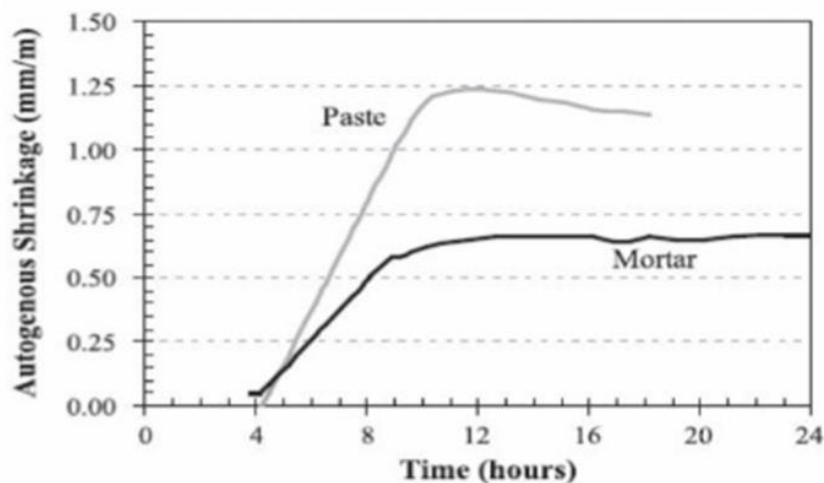


Figure 1.20. Retrait endogène de la pâte et de mortier (même rapport E/C) (Holt, 2001).

De telles fissures peuvent être assez importantes (3 micro d'ouverture), d'autant plus que cette zone connue sous le nom d'auréole de transition est fragile car elle est très poreuse. La relaxation du matériau provoquée par ce réseau de fissures contrebalancera en partie le retrait. Ce sont deux facteurs qui expliquent la diminution du retrait causée par l'inclusion granulaire.

iii. Effet de la finesse de ciment

Plus le ciment est broyé finement, plus les grains de ciment s'hydrateront (la surface spécifique attaquable sera plus grande) et plus le réseau poreux sera étroit. L'humidité interne diminuera plus rapidement, ce qui entraînera une augmentation du retrait endogène qui apparaîtra également plus rapidement. Il s'est également avéré que la chaleur d'hydratation

augmente proportionnellement à la surface spécifique, ce qui tend à augmenter le retrait thermique (Nicolas, 2014 ; Bouasker, 2007).

iv. Effet des adjuvants

Parce que l'adjuvant retarde la croissance du squelette solide s'opposant aux efforts capillaire, l'amplitude de retrait plastique augmente avec le dosage en superplastifiants (Turcry, 2003).

v. Effet d'ajout de fibres métalliques

En raison de l'absence d'optimisation de la compacité, la quantité d'air peut varier considérablement. Cela explique souvent les résultats contradictoires d'un article à l'autre.

Il est vrai que les fibres ne semblent pas avoir un impact significatif sur l'amplitude des retraits, mais elles aident à répartir la fissuration lorsque les retraits sont empêchés (Kovler, 1993), en ce qui concerne l'amplitude des retraits, travailler sur la composition de la pâte est plus efficace. Il est important de noter que lors du retrait plastique (qui consiste en une dessiccation prématurée de la surface), l'ajout de fibre synthétique réduit la fissuration. Mais une bonne cure peut également produire le même résultat (Casanova, 1996).

L'une des solutions techniques pour réduire le phénomène de retrait est le renforcement des matériaux cimentaires par des fibres métalliques, selon (Mahmoud et al., 2022 ; Qasim, 2018 ; Wu et al., 2019). La teneur en fibres idéale pour le retrait était de 2 % ; au-delà, le retrait diminuait légèrement (Wu et al., 2019), aussi pour (Setti et al., 2010), a trouvé que pour un pourcentage de 1% de fibres réduit le phénomène de retrait de 16 % et de 27 % lorsque le dosage de fibres est égal à 2. L'emploi de 2 % de fibres métalliques à extrémité crochetée peut entraver l'expansion initiale et diminuer le retrait final de 13 % et 35 % respectivement (Corinaldesi et Nardinocchi, 2016).

Selon une recherche (Amran et al., 2023) le béton renforcé par des fibres présentait un retrait à sec compris entre 8 % et 65 %, ce qui est inférieure à celui du béton classique.

Le retrait est fortement influencé par la longueur des fibres d'acier et le pourcentage volumique. Des réductions allant jusqu'à 14% ont également été rapportées lors de la comparaison des résultats d'un exemple fabriqué avec 2 % de fibres d'acier droites par rapport à ceux obtenus à partir d'un mélange contenant 2 % de fibres d'acier ondulées et crochetées pour le retrait par séchage du béton cellulaire autoclavé (Song et al., 2019).

Selon les auteurs, la distribution tridimensionnelle des fibres peut diminuer la perte d'humidité, les complications de retrait des pores et la formation de microfissures. De plus, les fibres ont préservé le tassement des agrégats et ont créé un béton homogène. On a mentionné que la force de traction créée à l'interface entre la matrice de béton et les fibres a réussi à supporter l'expansion initiale et le retrait après séchage final. Toutefois, l'impact était plus important pour réduire l'expansion initiale que le retrait par séchage (Aghaee, 2022).

Toutefois, les fibres ne sont pas en mesure d'éviter entièrement les fissures causées par le retrait. Selon des recherches, il a été démontré que les fibres sont plus performantes lorsqu'elles sont associées à des matériaux qui atténuent le retrait, comme des agents expansifs, adjuvant réducteur de retrait, super absorbent polymères ...etc. (Aghaee, 2022).

I.20. Mesure de retrait

I.20.1. Mesure linéique

Enregistrer les variations dimensionnelles d'une éprouvette dans une direction horizontale et une autre verticale est le principe de la mesure linéique. Les résultats sont affichés comme suit :

$$\xi = (L - L_0) / L_0 \quad (1.6)$$

Avec :

L : la longueur de l'éprouvette à l'instant de la mesure,

L₀ : la longueur initiale.

Les deux normes NF EN 1367-4 et NF EN 12617-4 sont utilisées pour mesurer le retrait sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16cm³ pour les mortiers, dotées de plots métalliques à chaque extrémité. L'échantillon est placé verticalement entre deux billes métalliques, et la variation de la longueur est suivie à l'aide d'un comparateur. Ce dernier a des graduations de 0.001 mm et une erreur maximale pour un demi-tour de ± 0.001 mm.

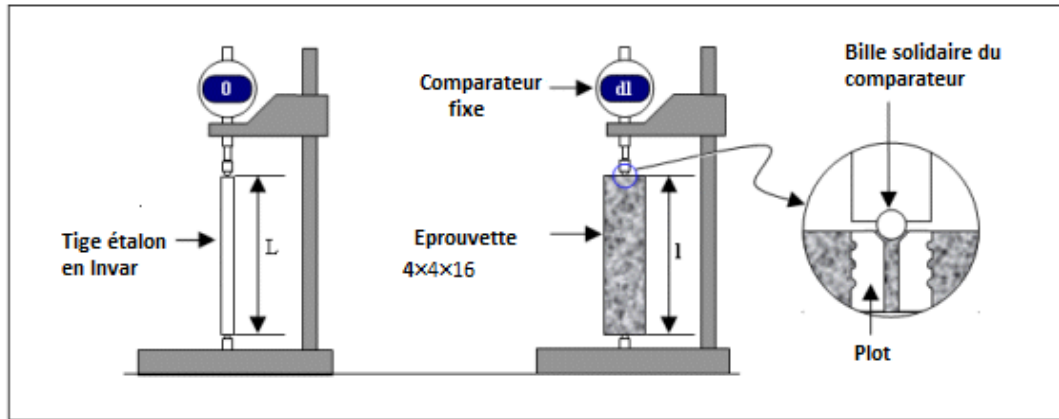


Figure 1.21. Rétractomètre pour la mesure linéique (Chaib, 2017)

Cette méthode de mesure a été étudiée par de nombreux chercheurs parmi eux (Roy, 1995). La norme NF P 15-433 (Tazawa, 1998 cité par Mitani, 2003) a inspiré cette méthode, qui consiste à couler les éprouvettes dans un moule métallique, ce qui permet d'équiper chaque éprouvette de plots métalliques à ses deux extrémités. Les éprouvettes sont recouvertes de deux couches de papier aluminium adhésif après démoulage. Les mesures sont ensuite effectuées verticalement. La longueur au moment du démoulage est considérée comme la longueur de référence. (Tazawa, 1998 cité par Mitani, 2003) a publié un document intitulé « Technical Committee on autogenous shrinkage of concrete » qui soutient ce type de mesure. Après démoulage et protection contre la dessiccation (Roy, 1995) utilise des moules en téflon fermés à leur extrémités la mesure se fait avec deux LVDT (Figure 1.22).

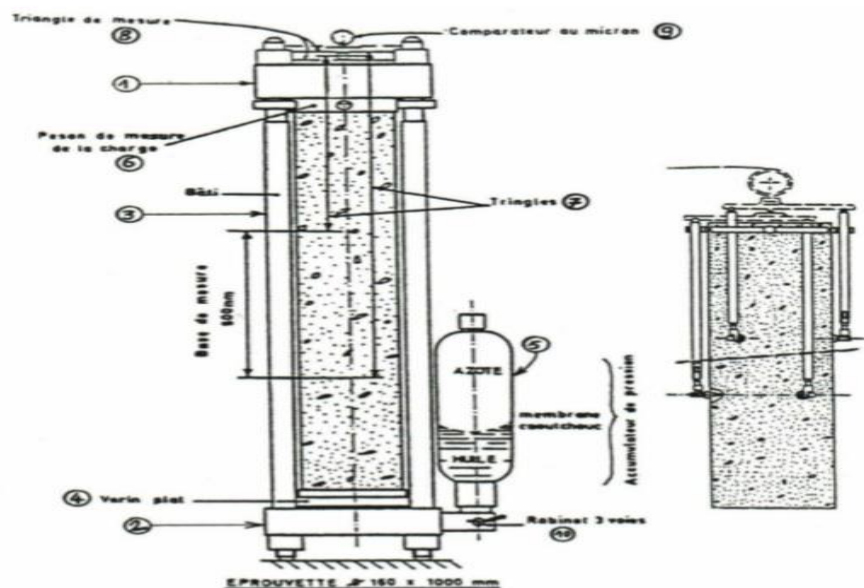


Figure 1.22. Dispositif expérimental de la mesure de retrait linéique utilisé par (Roy, 1995).

(Bouasker, 2007) a utilisé un autre outil pour mesure linéique (figure 1.23), dont le principe est basé sur une manchette ondulée en PVC noir moulé. Ce type de manchette est parfaitement étanche, ce qui permet d'isoler efficacement le matériau et de fonctionner dans l'hypothèse d'un système Fermé, ou il n'y a pas d'échange d'eau ni d'humidité avec le milieu extérieur. En plus de leur souplesse, les ondulations réduisent le risque de glissement entre la manchette et le matériau coulé à l'intérieur. Ainsi, le déplacement mesuré est celui de la manchette et de l'échantillon en question. Lorsque vous placez le matériau dans la manchette, vibrez-la pendant 60 secondes pour éviter la formation de bulles d'air. Après l'introduction de l'échantillon. Un ruban élastique entoure la manchette à deux extrémités pour bloquer l'éprouvette. Des plots d'ancrage sont fixés à chaque embout de l'éprouvette pour surveiller la déformation du matériau après la prise. Enfin, pour le dispositif horizontal, l'ensemble est placé entre quatre tiges de guidage, tandis que pour le dispositif vertical, il est placé sur deux tiges (figure 1.24 et 1.26). Figurines les appareils sont immergés dans un bain d'eau thermostaté à une température constante de 20°C (plus ou moins 1°C) ou 20 °C (plus ou moins 0,5°C).

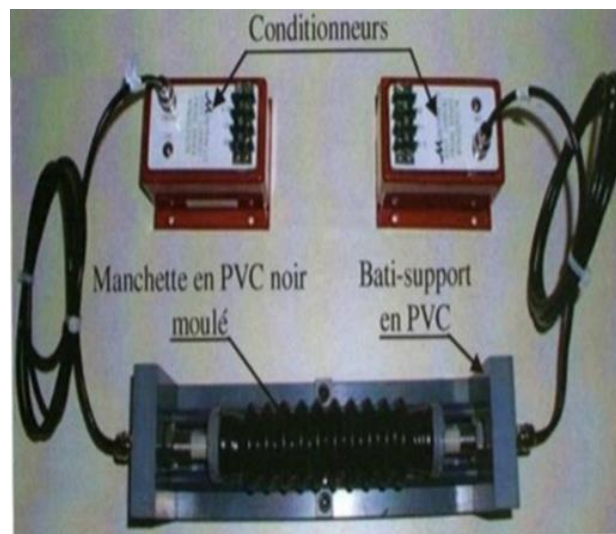


Figure 1.23. Dispositif de mesure de retrait linéique horizontale (Bouasker, 2007)

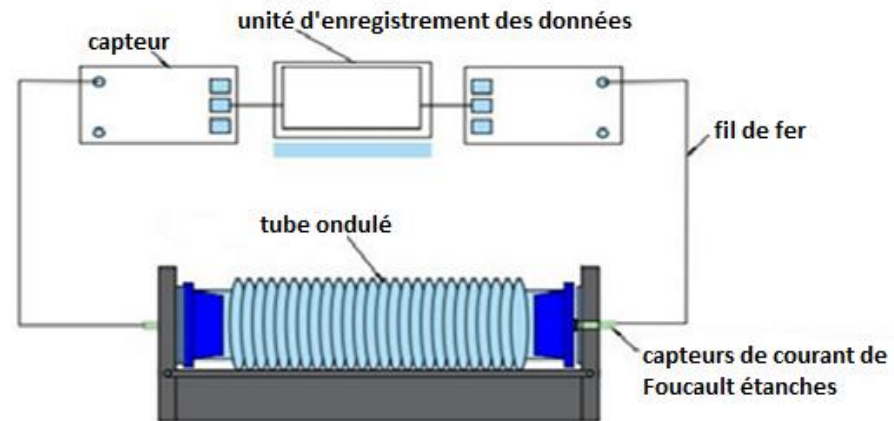


Figure 1.24. Tube en plastic ondulé (direction horizontale) (Ghanem et al., 2024)

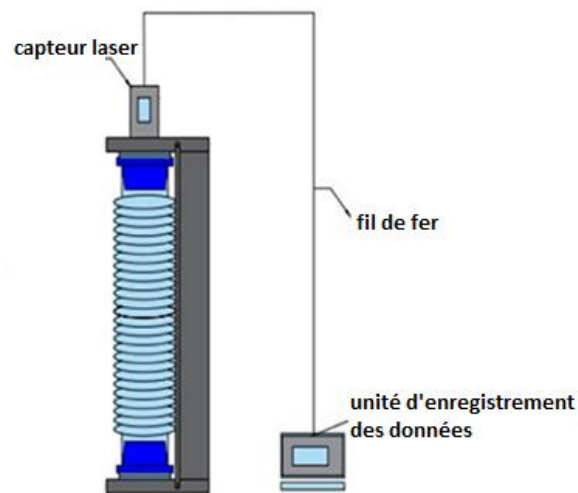


Figure 1.25. Tube en plastic ondulé (direction verticale) (Ghanem et al., 2024)

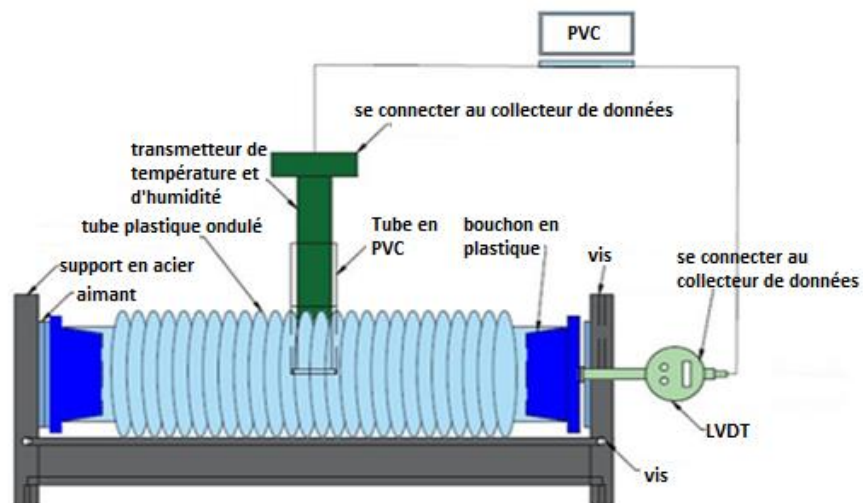


Figure 1.26. Nouveau dispositif de mesure linéaire horizontale (Ghanem et al., 2024).

I.20.2. Mesure de retrait endogène par l'essai RAJA

Un banc technique appelé RAJA, crée par le CSTB, est utilisé pour identifier le retrait endogène de certain mortier (Monge, 2007). Principalement, cela permet de garantir que les déformations causées par ce retrait sont assez faibles pour être négligés pour les produits avec un fort rapport E/C. Dans cet essai, une dalle trapézoïdale de mortier de 50 cm de long 70 cm de large sur sa grande base et 3 cm de haut est coulée dans un moule en acier recouvert de deux couches de film de polyane et entre deux cales en plexiglas équipée d'inserts. Ensuite, une couche de polyane est appliquée sur le mortier pour le protéger de la déshydratation. La déformation longitudinale de cette éprouvette longue est mesurée à l'aide de deux capteurs LVDT placés aux extrémités et palpant les inserts contenus dans le mortier. Une vue et un schéma de l'essai sont présentés en figure 1.27.

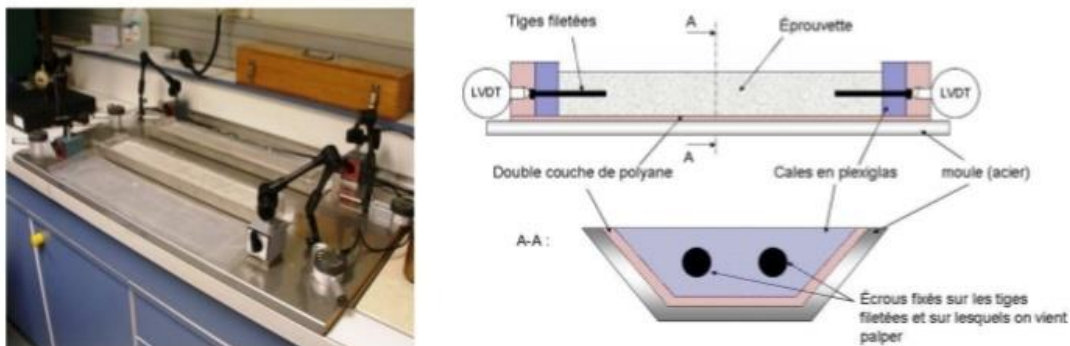


Figure 1.27. Vue générale et schéma de principe de l'essai de RAJA (Monge, 2007).

I.20.3. Mesure volumique

Les méthodes sont généralement basées sur la mesure de la variation volumique d'un échantillon de matériau immédiatement après son coulage. Il existe deux méthodes disponibles dans la recherche : la mesure par surveillance du niveau du liquide immergé et la mesure de la variation de volume par pesée hydrostatique.

i. Le suivi du niveau du liquide d'immersion

Dans cette méthode, on utilise une membrane pour isoler un volume de pâte de ciment, puis on immerge l'ensemble dans un liquide (eau, mercure, huile de paraffine...). La déformation est calculée en surveillant le niveau du liquide pendant l'hydratation. Pour surveiller la déformation, (Del Campo, 1959, cité par Bouasker, 2007) a employé une approche où le matériau est placé dans une membrane en latex et l'ensemble est placé dans une cuve en acier inoxydable (figure 1.28). Par la suite, on recouvre la cuve de mercure et la fluctuation du niveau

de mercure permet de déterminer la déformation de l'échantillon. Le désavantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle requiert un relevé manuel des mesures.

Selon (Bouasker, 2007), (Setter et Roy, 1978) ont développé un système qui s'inspire de Del Campo, mais qui permet un relevé automatique des mesures. On place l'échantillon dans une membrane imperméable, plongée dans un récipient rempli d'eau et équipé d'un tube souple. On suspend la partie supérieure du tube à une balance connectée à un système d'acquisition automatique qui enregistre les fluctuations du niveau du liquide (figure 1.29).

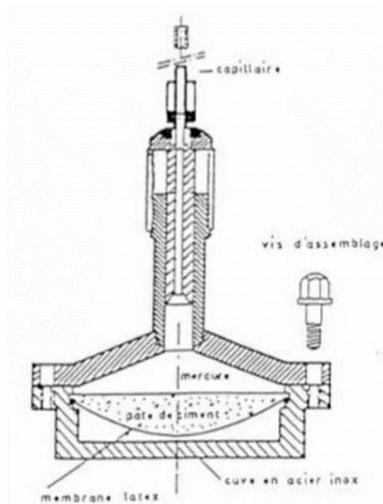


Figure 1.28. Mesure de retrait externe Par variation de niveau de mercure (Del Campo, 1659 cité par Bouasker, 2007).

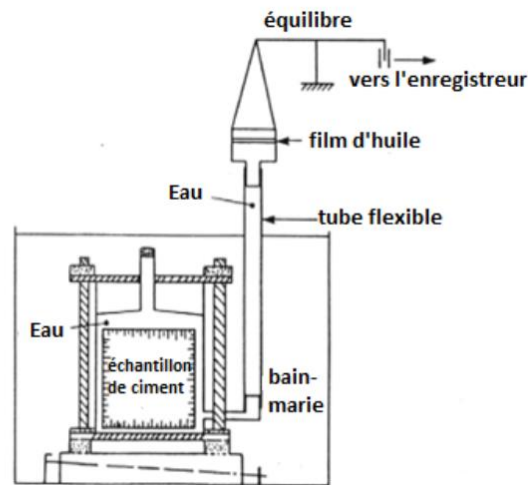


Figure 1.29. Mesure de retrait externe automatisé (Setter et Roy, 1978).

ii. Pesée hydrostatique

La méthode implique l'introduction d'un échantillon de pâte de ciment ou de mortier dans une membrane en latex étanche. Ensuite, l'ensemble est plongé dans un bain thermostaté et reliée à une balance par un fil (figure 1.30). La balance enregistre une variation de la poussée d'Archimède en fonction de la variation de volume. La déformation volumétrique peut être convertie en une déformation linéaire en prenant l'hypothèse d'isotropie : ϵ volumétrique (ϵ_v) = 3 ϵ linéaire (Trincal et al., 2022). La méthode avancée de mesure des changements de volume par pesée hydrostatique continue, proposé par (Hermann et al., 2021), est appropriée pour les matériaux cimentaires, elle est aussi applicable à des mesures prolongées de la rétraction autogène.

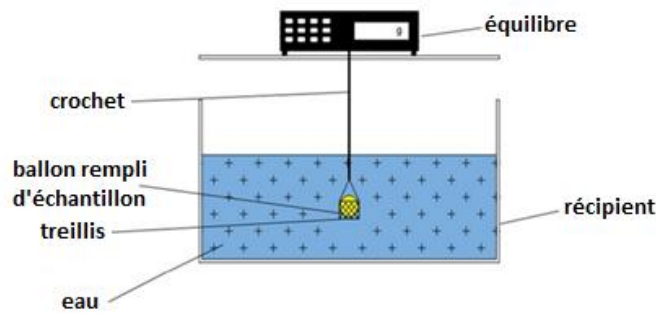


Figure 1.30. Banc de mesure des variations volumiques par pesée hydrostatique. (Ghanem et al., 2024).

I.21. Essai physico-mécaniques sur des mortiers

I.21.1. Essais physique

i. Perte en poids

Les mesures de perte de poids ont été effectuées en pesant les éprouvettes après démoulage et à des intervalles de temps spécifiques pour les deux cas : éprouvette couverte (retrait endogène) et non couverte (retrait total). Les résultats seront obtenus en soustrayant le poids mesuré à l'instant t du poids initial de l'éprouvette.

Ce calcul sera exprimé en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'éprouvette (Zreiki, 2009).

$$\Delta m = [(m_{ini} - m_t) / m_{ini}] * 100 \quad (1.7)$$

Avec :

Δm (%) : le pourcentage de perte en masse.

m_{ini} : la masse initiale de l'éprouvette avant dessiccation.

m_t : la masse mesurée à l'instant t .

Les éprouvettes de chaque type de mortier ont été soumises à des mesures de perte de masse.

ii. Pesée hydrostatique

Les mesures par pesée hydrostatique sont réalisées sur des éprouvettes ayant des âges de 7, 14, 21 et 28 jours, ainsi que d'autres mesures sur les mêmes éprouvettes à l'air libre.

Pour obtenir une précision accrue dans l'évaluation de la masse volumique du mortier, la méthode de la pesée hydrostatique peut être utilisée. Cette méthode consiste à peser des

éprouvettes de mortier à l'air libre (m_1) puis dans l'eau (m_2). La différence entre m_1 et m_2 représente la masse du d'eau déplacé (v). Si ρ_e est la masse volumique de l'eau, la masse volumique des éprouvettes est calculée comme m_1/v (Dupain, 2000 cité par Brix, 2014).

$$\rho = \rho_e (m_1/m_1 - m_2) \quad (1.8)$$

I.21.2. Essai mécanique

i. Vitesse ultrasoniques

La mesure de la vitesse ultrasonique de pulsation (VUP) consiste à transférer une impulsion d'onde dans l'éprouvette de mortier étudiée, afin d'évaluer le temps mis par l'impulsion pour se transmettre à l'intérieur de celle-ci. Pour garantir un transfert efficace de l'onde entre l'éprouvette et le transducteur, une fine couche de graisse est appliquée sur la surface du transducteur figure 1.31.

La vitesse de l'impulsion est calculée par l'expression :

$$V = L/t \quad (1.9)$$

Avec :

V : la vitesse des ondes (m/s).

L : la longueur de parcours (mm).

t : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (μs).

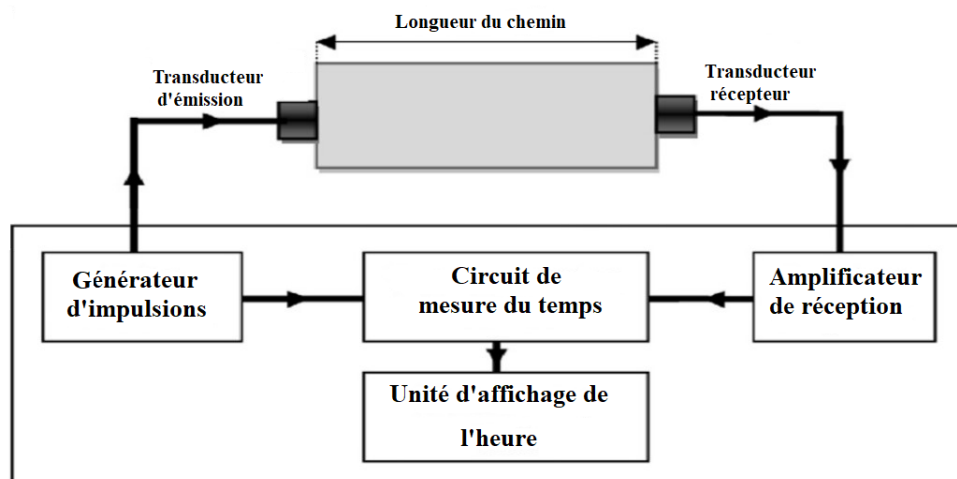


Figure 1.31. Schéma de la méthode de mesure de la vitesse d'impulsion des ultrasons (Benaïcha et al., 2015).

ii. Flexion et compression

Tous les tests portant sur les propriétés mécaniques des mortiers sont menés à l'aide d'une presse équipée de deux systèmes de chargement, permettant ainsi la réalisation d'essais de flexion et de compression. La rupture de chaque éprouvette soumise à une flexion est réalisée selon le dispositif dans la figure 1.32.

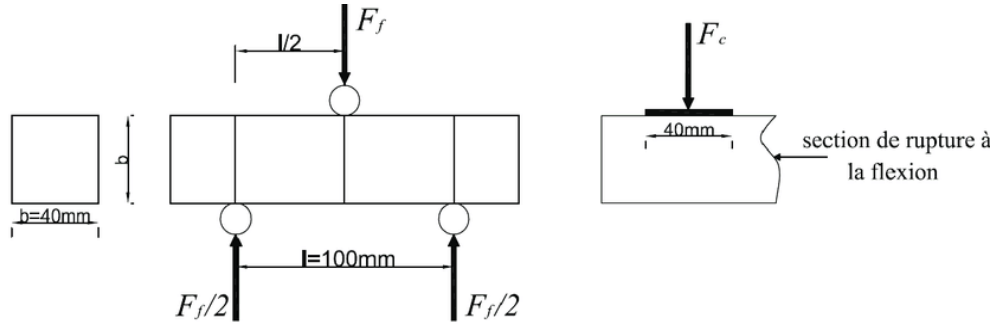


Figure 1.32. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (Savadogo et al., 2015).

Si F_f représente la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, alors le moment de rupture est calculé comme $(F_f \times L) / 4$. La contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette peut être exprimée comme suit :

$$R_f = (F_f \times L) / b^3 \quad (1.10)$$

Cette contrainte est dénommée résistance à la flexion calculée, en tenant compte des dimensions de b , L et F_f exprimée en newtons (N).

Les demi-prismes de l'éprouvette, obtenus après rupture en flexion, seront ensuite soumis à une rupture en compression comme illustré dans la figure 1.33. Si F_c représente la charge de rupture, alors la contrainte de rupture peut être formulée comme suite :

$$R_c = F_c / b^2 \quad (1.11)$$

Cette contrainte est dénommée résistance à la compression et F_c , exprimée en newtons (N).

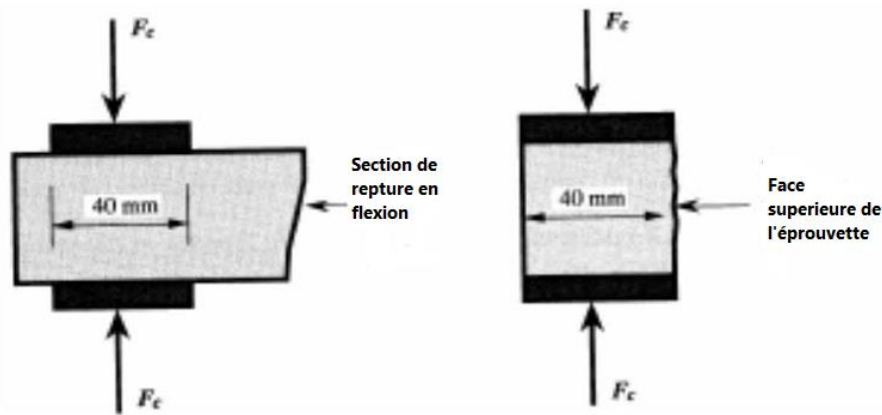


Figure 1.33. Dispositif de rupture en compression.

I.22. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé une synthèse bibliographique sur l'état actuel des connaissances concernant les fibres et les matériaux cimentaires fibrés.

Nous avons offert une vue d'ensemble des fibres et de leur utilisation dans les mortiers renforcés, en passant en revue les différents types de fibres et en détaillant certaines de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Il est intéressant de noter que les fibres métalliques sont largement privilégiées dans la construction de bétons et de mortier, comme le soulignent plusieurs études. De plus, un consensus se dégage quant à l'utilisation d'un taux de fibres oscillant généralement entre 1% et 1,5%, ce qui contribue à retarder la propagation des fissures et à améliorer de manière significative les performances mécaniques ainsi que la durabilité des matériaux.

Nous avons également abordé les notions générales relatives au phénomène de retrait. Bien que l'intégration de fibres puisse légèrement accélérer la perte d'eau, elle tend à réduire le retrait des mortiers renforcés. Il est essentiel de souligner que cette diminution du retrait dépend non seulement de l'utilisation des fibres, mais aussi d'autres facteurs environnementaux et de la composition intrinsèque du mortier lui-même.

Dans le prochain chapitre, nous concentrerons sur la présentation des matériaux utilisés et des formulations testées. Nous fournirons également une description détaillée des méthodes d'essai utilisées dans le cadre de notre programme expérimental.

I.23. Références Bibliographique du chapitre I

Abdelhafid, B. (2010). « Comparaison des Caractéristiques mécaniques et retrait du béton en utilisant les différentes methods de composition de béton », Thèse de Doctorat, Université de Abderrahmane Mira, Béjaia.

Aghaee, K. (2022). « Synergistic effect of shrinkage mitigating strategies on performance of fiber-reinforced cementitious composites », Thèse de Doctorat, Université du Missouri.

Ahmad, J., Zhou, Z., Deifalla, A. F. (2023). « Structural properties of concrete reinforced with bamboo fibers: A review », Journal of materials Research and Technology, vol 24, pages 844-865.

Aitcin, P. C., Neville, A., Acker, P. (1998). « Les différents types de retrait du béton », Bulletin-Laboratoires des ponts et chaussées, pages 41-52.

Akhtar, T., Ali, B., Kahla, N. B., Kurda, R., Rizwan, M., Javed, M. M., Raza, A. (2022). « Experimental investigation of eco-friendly high strength fiber-reinforced concrete developed with combined incorporation of tyre-steel fiber and fly ash », Construction and Building Materials, vol 314.

Amar, M., Benzerzour, M., Abriak, N. E. Maherzi, W. (2016). « Étude de valorisation des sédiments de dragage », journal académique du génie civil, vol 34, N° 1, pages 882-889.

Amran, M., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., Tang, W. C., Alsulami, B. T., Alluqmani, A. E., Gamil, Y. (2023). « Shrinkage mitigation in alkali-activated composites: A comprehensive insight into the potential applications for sustainable construction », Results in Engineering, vol 20, pages 101452.

Apaya, L., Gagné, P. R., Sharman, M. J. G., Yahia, P. A. (2013). « Retrait endogène et de séchage des BAP à air entraîné contenant divers composés organiques comme anti- retrait », Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa.

Arreteau, M. (2023). « Optimisation de la méthode d'impression et étude des performances à l'état frais et durci ». Thèse de Doctorat, Normandie Université.

Beaudoin, J. et Odler, I. (2019). « Hydration setting and hardening of portland cement », Lea's chemistry of cement and concrete, vol 5, pages 157-250.

Belferrag, A. (2006). « Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes » Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla.

Belhadj, N. (2015). « Modélisation du comportement du béton de fibres par la mécanique de l'endommagement », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

Belkadi, A.A. (2018). « Contribution à l'étude de la durabilité et les performances des bétons autoplaçants (fibres végétales, milieu agressif, formulation, modélisation », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra.

Belkhir, Z. (2022). « Amélioration des propriétés mécaniques des composites à différentes matrices à base de fibres naturelles locales », Thèse de Doctorat, Université Larbi Tébessi, Tébessa.

Ben Allal, L., Ammari, M., Frar, I., Azmani, A., Belmokhtar, N. E. (2011). « Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc) », Revue Paralia, vol 4, pages 1-13.

Benaicha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A.H., Burtschell, Y. (2015). «Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete », Construction and Building Materials, vol 101, pages 702-709.

Bensaid, K. (2016). « Développement d'un non-tissé structuré à base de fibres naturelles », Mémoires de Maitrise, Ecole de technologie supérieure, Université Du Québec, Canada.

Bensaid, M. (2007). « Analyse expérimentale et modélisation numérique non linéaire de propagation des fissures de mortier et béton à base du ciment au calcaire », Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab, Blida, Algérie.

Bheel, N., Kumar, S., Kirgiz, M. S., Ali, M., Almujiabah, H. R., Ahmad, M., Roberto Alonso Gonzalez-Lezcano, R. A. (2024). « Effect of wheat straw ash as cementitious material on the mechanical characteristics and embodied carbon of concrete reinforced with coir fiber », Heliyon, vol 10.

Bouasker, M. (2007). « Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeunes âge des pâtes de ciment avec et sans inclusion », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France.

Boufaïda, Z. (2015). « Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice », Thèse de Doctorat, Université de Lorraine.

Bouhamou, N., Belas, N., Mesbah, H., Jauberthie, R., Ouali, A., Mebrouki, A. (2009). « Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens ». Canadian journal of civil engineering, vol 36, N° 7, pages 1195-1206.

Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S. (2014). « Comportement en flexion des bétons fibrés sous chargement cyclique », MATEC Web de Conférences, EDP Sciences, vol 10.

Brixi, N. K., (2014). « Etude du retrait des bétons autoplaçants », Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen.

Casanova, P. (1996). « Béton renforcé de fibres métallique du matériau à la structure », Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, France.

Chaib, O., Benosman, A. S., Tani, N. K., Senhadji, Y., Mouli, M., Taïbi, H., Hamadache, M. (2017). « The evolution of shrinkage strain of pet-mortar composite eco-materials », Journal of Fundamental and Applied Sciences, vol 9, N° 1, pages 136-152.

Chanvillard, G. (1992). « Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire », Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Canada.

Chapelier, A. B. (2020). « Etude de l'influence de différents adjuvants sur l'état de dispersion et la réactivité de pâtes de ciments sulfoalumineux bélitiques », Thèse de Doctorat, IMT-MINES ALES-IMT-Mines Alès Ecole Mines-Télécom.

Corinaldesi, V., et Nardinocchi, A. (2016). « Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites », Construction and Building Materials, vol 107, pages 321-331.

Deng, Y., Zhang, Z., Shi, C., Wu, Z., Zhang, C. (2023). « Steel fiber-matrix interfacial bond in ultra-high performance concrete: A review », Engineering, vol 22, pages 215-232.

Dierkens, M. (2005). « Mesures rhéologique et modélisation de matériaux en cours de prise », Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale des Travaux Public de l'Etat, France.

Djebali, S. (2013). « Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques », Thèse de Doctorat, Faculté du Génie de la construction, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

Doyon Barbant, J. (2018). « Impact de l'orientation des fibres sur les comportements en traction, en flexion et en cisaillement d'un béton renforcé de fibres métalliques », Mémoire de Maîtrise ès sciences appliquées, Ecole Polytechnique De Montréal, Université de Montréal.

Dujardin, N. (2014). « Un matériau biosource de choix : les fibres naturelles. Caractérisations et applications », 25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement-L 'économie verte en question, Créteil. France.

Ezziane, M., Molez, L., Messaoudene, I., Kadri, T., Jauberthie, R. (2015). « Caractérisations non destructive de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température », Nouveau Matériaux et Durabilité.

Ghaffar, A., Chavhan, A. S., Tatwawadi, R. S. (2014). « Steel Fibre Reinforced Concrete », International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), vol 9, N° 15.

Ghanem, H., Ramadan, R., Khatib, J., Elkordi, A (2024). « A review on chemical and autogenous shrinkage of cementitious systems », Materials, vol 17, N° 2, page 283.

Gowripalan, N. (2020). « Autogenous shrinkage of concrete at early ages », In ACMSM25: Proceeding of the 25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials, Springer Singapore, pages 269-276.

Guenet, T. (2016). « Modélisation du comportement des bétons fibrés à ultra-hautes performances par la micromécanique : effet de l'orientation des fibres à l'échelle de la structure », Université Paris-Est, France.

Haba, B., Agoudjil, B., Boudenne, A., Benzarti, K. (2017). « Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete », Construction and Building Materials, vol 154, pages 963-971.

Habita, M. F. et Bouandallah, F. (2017). « Rappel sur la structure de la pâte de ciment hydraté », Conférence destinée aux Doctorants de génie civil, Université Larbi Ben M'Hidi-Oum El Bouaghi, Algérie.

Hamri, A. (2015). « Influence des fibres sur la résistance et la rupture à l'effort tranchant des éléments de structures », Mémoire de Magistère, Faculté du Génie de la construction, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

Han, J., Zhao, M., Chen, J., Lan, X. (2019). « Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete », Construction and Building Materials, Tome 209, pages 577-591.

Hermann, R., Drochytka, R., Cerny, V., Figala, P. (2021). « Utilization of continuous hydrostatic weighing for monitoring of volume changes », IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol 1039, N° 1, p. 012019, IOP Publishing.

Holt, E. E., (2001). « Early age autogenous shrinkage of concrete », Thèse de Doctorat, Université de Washington.

Holt, E., et Leivo, M. (2004). « Cracking risks associated with early age shrinkage », Cement and Concrete composites, vol 26, N° 5, pages 521-530.

Houst, Y. F. (1989). « Le retrait de carbonatation », Chantiers (Suisse), vol 20, pages 55-60.

ISO 679, (2009). « Ciments - Méthodes d'essai - Détermination de la résistance mécanique ».

Jejcic, O, et Zanghlline, F. (1977). « Mortier et ciment armé de fibres : une étude bibliographique », Annales de l'I.T.B.T.P., Suppl. n°347, Série matériaux 51, pages 46-87.

Jones, F. R. et Huff, N. T. (2018). « The structure and properties of glass fibers ». Handbook of properties of textile and technical fibres, Elsevier, pages 757-803.

Khalil, N. (2018). « Formulation et caractérisation chimique et rhéologique des mortiers imprimables en 3D à base de mélange de ciment portland et sulfoalumineux », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Mines, Lille, France.

Khan, A. A. (1995). « Concrete properties and thermal stress analysis of members at early ages », Thèse de Doctorat, Université McGill, Canada.

Khan, F. et Ahmad, J. (2015). « To Study the Properties of Latex Modified Steel Fibre Reinforced Concrete », International of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering, vol 2, Issue 1, pages 261-267, ISSN 2393-8471.

Koushkbaghi, M., Kazemi, M. J., Mosavi, H., Mohseni, E. (2019). « Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate », *Construction and Building Materials*, vol 202, pages 266-275.

Kovler, K., Sikuler, J., Bentur, A. (1993). « Restrained shrinkage tests of fibre-reinforced concrete ring specimens: effect of core thermal expansion », *Materials and Structures*, vol 26, pages 231-237.

Kubens, S. (2010). « Interaction of cement and admixtures and its influence on rheological properties », *Cuvillier Verlag*, pages 192.

Laichaoui, A. (2019). « Effet du type du superplastifiant sur les propriétés des bétons à base de laitiers », Thèse de Doctorat, Ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie.

Laifa, W., Ali Boucetta, T., Behim, M., Turatsinze, A. (2018). « Etude de l'effet des fibres sur le retrait empêché et la durabilité des bétons autoplaçants », *Conférence Internationale Francophone*, Liège Université, Belgique.

Li, Z., Guo, T., Chen, Y., Fang, C., Chang, Y., Nie, J. (2024). « Influence of basalt fiber and polypropylene fiber on the mechanical and durability properties of cement-based composite materials », *Journal of Building Engineering*, vol 90, pages 109335.

Lumingkewas, R. H. (2015). « Development of materials for construction with low environmental impact made with low content of cement and with natural fibers », Thèse de Doctorat, Université De Bretagne Sud.

Mahmoud, H. A., Shaker, Q., Hemn, U. A., Emadd, W., Rabar, H. F., Ahmed, S. M., Bassam, A. T., Afonso, R. G. A. (2022). « Béton fibré à hautes performances. Partie III : Frais et propriétés durcies, études de cas sur les matériaux de construction », vol 17, e01265.

Makhlouf, N. (2010). « Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

Meddah, H. (2014). « L'apport Mécanique Des Fibres Métalliques Dans Le Renforcement D'un Tablier D'un Pont Caisson », Mémoire de Magister, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.

Melais, S., Melais, F. Z., Achoura, D. (2015). « Influence of fiber type and volume contents on the physical and mechanical behaviour of sandcrete with blast furnace slag fillers », vol 30, pages 91-102.

Mitani, H. (2003). « Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux », Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Mohamed, A. M., Tayeh, B. A., Aisheh, Y. I. A., Salih, M. N. A. (2023). « Exploring the performance of steel fiber reinforced lightweight concrete: A case study review » Case Studies in Construction Materials, vol 18, e01968.

Mokhtari, A. (2006). « Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de palmier Dattier ». Mémoire de Magister, Université De Kasdi Merbah, Ouargla.

Monge, J. (2007). « Fissuration des mortiers en couches minces-effet de l'hydratation, du séchage et de la carbonatation », Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan-ENS, France.

Mounanga, P. (2003). « Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques », Thèse de Doctorat, Nantes.

NF EN 12617-4. (2002). « Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton – Méthodes d'essai – Partie 4 : détermination du retrait et du gonflement ».

NF EN 1367-4. (2008). « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 4 : détermination du retrait au séchage ».

NF EN 196-1, (2016). « Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances ».

NF P 15-433, (1994). « Méthodes d'essai des ciments – Détermination du retrait et du gonflement ».

Nicolas, (2014). « Le retrait (Partie 1) : Aspect théorique ». <https://www.geniecvl.com/le-retrait-aspect-theorique/>.

Ouedroago, M., Dao, K., Millogo, Y., Seynou, M., Aubert, J. E., Gomina, M. (2017, juin). « Influence des fibres de kenaf (*Hibiscus altissima*) sur les propriétés physiques et mécaniques

des adobes », Journal de la Société Ouest-Africaine de chimie, vol 043, pages 48-63, ISSN 0796-6687.

Parmentier, B., Pollet, V., Zarmat, G. (2009). « Le retrait empêché du béton », Prédiction selon l'Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d'exécution. https://www.buildwise.be/umbraco/surface/publicationitem/downloadfile?file=31850/fr/unprotected/cstc_artonline_2009_2_no3.pdf

Potiron, C. O., Bilba, K., Arsene, M. A. (2023). « Formulation et caractérisations thermique, hydrique de composites fibres de bagasse/liant minéral », Symposium Caribéen et Amazonien sur les matériaux durables.

Qasim, O. A. (2018). «Experimental investigation on autogenous shrinkage of high and ultra-high strength concrete », IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol 454, N° 1, IOP Publishing.

Ragi, S. (2015). « A comparative and experimental properties of various steel and glass fibre reinforced high strength concrete », International research journal of engineering and technology, vol 03, pages 129-133.

Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., Zafar, S. (2021). « A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades », Composites Part B, Engineering, vol 215, 108768.

Rostami, R., Klemm, A. J., Almeida, F.C. (2021). « Réduction du retrait par les polymères superabsorbants (SAP) dans les mortiers renforcés de fibres », Construction et matériaux de construction, vol 288, page 123109.

Rouis, F. (2017). « Effet des caractéristiques physico-chimiques des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques des mortiers de bétons fluides équivalents », Thèse de Doctorat, Université Sherbrooke (Québec), Canada.

Roy, R. (1995). « Déformation instantanées et différées des bétons à hautes performances », Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Saradar, A., Tahmouresi, B., Mohseni, E., Shadmani, A. (2018). « Restrained shrinkage cracking of fiber-reinforced high-strength concrete », Fibers, vol 6, N° 1, page 12.

Savadogo, N., Messan, A., Hannawi, k., Tsobnang, F., Agbodjan, W. P. (2015). « Durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de Tefereyre (Niger): absorption capillaire, porosité

accessible à l'eau et attaque acide », *Journal of materials and engineering structures* 2, pages 213-223.

Setter, N. et Roy, D. M. (1978). « Mechanical features of chemical shrinkage of cement paste, *Cement and Concrete Research* », Université the Pennsylvania State, Vol. 8, pages 623-634.

Setti, B., Hammoudi, S., Mustapha, T., Achit-henni, M. (2010). « Etude de la ductilité des nœuds de structures poteaux – poutres en béton de fibres métalliques », *symposium international sur la construction en zone sismique*, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, pages 26-27.

Setti, F. (2012). « Comportement mécanique et rhéologique d'un mortier contenant des fibres métalliques », *Mémoire de magister*, Université Hassiba Benbouali, Chlef.

Slebi-Acevedo, C. J., Lastra-Gonzalez, P., Pascual-Munoz, P., Castro-Fresno, D. (2019). « Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review », *Construction and Building Materials*, vol 200, pages 756-769.

Soliman, A. M. (2011). « Early-age shrinkage of ultra high-performance concrete: mitigation and compensating mechanisms », *Université de Western Ontario*, Canada.

Song, W., Yi, J., Wu, H., He, X., Song, Q., Yin, J. (2019). « Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag », *Journal of Cleaner Production*, vol 238, pages 117819.

Suiffi, H., Maliki, A. EL., Cherkaoui, O., Dalal, M. (2019, Aout). « Influence de fibres en polypropylène sur la ductilité d'un béton de sable », 24^{ème} Congrès Français de Mécanique, Brest, France.

Swenson, E. G., et Sereda, P. J. (1967). « Some ageing characteristics of lime », *Journal of Applied Chemistry*, vol 17, N° 7, pages 198-202.

Taallah, B. (2014). « Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres », *Thèse de Doctorat*, Université Mohamed Khider, Biskra.

Tazawa, E.I., et Miyazawa, S. (1995). « Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete », *Cement and Concrete Research*, vol 25, N° 8, pages 1633-1638.

Toupe, J. L. (2015). « Optimisation des propriétés mécaniques de composites à base de fibres naturelles : Application à un composite de fibre de lin avec un mélange de

polyéthylène/polypropylène d'origine post-consommation », Thèse de Doctorat, Université Laval, Canada.

Trincal, V., Multon, S., Benavent, V., Lahalle, H., Balsamo, B., Caron, A., Bucher, R., Caselles, L. D., Cyr, M. (2022). « Shrinkage mitigation of metakaolin-based geopolymer activated by sodium silicate solution », *Cement and Concrete Research*, vol 162, pages 106993.

Turcry. P. (2003). « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : influence de la formulation », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France.

Vilfayeau, J. (2014). « Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France.

Vu, D. T. (2022). « Modélisation numérique du comportement des bétons de fibres métalliques sous des sollicitations multiaxiales tenant compte l'effet de l'orientation des fibres : application aux voussoirs du tunnel », Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université Gustave Eiffel, France.

Wilson, E. J. et Philip, N. (2015). « The influence of fibres in concrete: A review », *International Journal of Civil Engineering*, vol 4, Issue 6.

Wongtanakitcharoen, T., et Naaman, A. E. (2007). « Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers », *Materials and Structures*, vol 40, pages 289-300.

Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H. (2019). « Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra high performance concrete: influence of steel fiber content and shape », *composites Part B: Engineering*, vol 174, pages 107021.

Yoo, D.-Y. et Banthia, N. (2019). « Impact resistance of fiber-reinforced concrete-A review », *Cement and Concrete Composites*, vol 104, pages 103389.

Youssari, F. Z. (2023). « Etude de la résistance des bétons à base de fibres métalliques à la lixiviation et aux attaques acides », Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen.

Zarga, D. (2015). « Simulation de l'effet des fibres métalliques sur le module de cisaillement des poutres », Mémoire de Magister, Faculté du Génie de la Construction, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

Zhao, M., Zhao, M., Chen, M., Li, J., Law, D. (2018). « An experimental study on strength and toughness of steel fiber reinforced expanded-shale lightweight concrete », *Construction and Building Materials*, vol 183, pages 493-501.

Zhu, J., Y. Deng, Chen, P., Wang, G., Min, H., Fang, W. (2022). « Prediction of long-term tensile properties of glass fiber reinforced composites under acid-base and salt environments », *Polymers*, vol 14, 3031.

Zreiki, J. (2009). « Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages », Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France.

I.24. Webographie

<https://m.indiamart.com>, consulté le 06/05/2024, 20 :09.

<https://m.indiamart.com>, consulté le 06/05/2024, 20 :13.

Chapitre II.

Matériels et Méthodes

II.1. Introduction

L'expérimentation permet de caractériser les matériaux de constructions utilisés pour but de déterminer les possibilités diverses de leur utilisation et de montrer leur capacité de résistance afin d'optimiser la formulation qui répond aux propriétés souhaitées.

Dans ce chapitre, nous exposons les principales caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés, ainsi l'ensemble des démarches expérimentales élaborées qui permettent de déterminer l'influence des fibres métalliques sur le retrait des mortiers.

II.2. Caractérisation des matériaux utilisés

II.2.1. Ciment

i. Caractéristiques chimiques

Le ciment utilisé dans cette étude expérimentale est le ciment Portland composé fabriqué par la Société des Ciments de Béni-Saf, wilaya de Ain-Temouchent. Il est composé de 80% de clinker, d'environ 17% de pouzzolane naturelle et de 3% de gypse. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont données sont résumées dans les tableaux 2.1 et 2.2.

Tableau 2.1. Propriétés chimiques du ciment (Youssari et al., 2023).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	LoI	PF%
19,24	5,11	4,76	55,99	1,51	2,05	0,59	0,42	0,16	0,41	2,06	4,42

Tableau 2.2. Propriétés minéralogique du ciment (Youssari et al., 2023).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
41,20	31,25	10,72	14,48

ii. Caractéristiques physico – mécaniques

a. Masses volumiques (apparente et absolue)

La masse volumique apparente d'un matériau représente la masse de celui-ci par unité de volume, incluant les vides perméables et imperméables ainsi que les espaces entre les particules. En revanche (figure 2.1), la masse volumique absolue est déterminée en divisant la masse du matériau par son volume réel, après avoir soustrait le volume occupé par les pores, qu'ils soient ouverts ou fermés (figure 2.2). On a calculé les masses volumiques (apparentes et absolues) en respectant la norme NF EN 15-435. En utilisant la méthode du pycnomètre, nous avons obtenu

la moyenne de 3 essais pour calculer la masse volumique absolue. La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Masse volumique absolue et apparente du ciment.

Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
1,09	3

Il est évident que ces quantités de volume respectent les normes établies par la norme NA 231, avec des valeurs de 0,9 à 1,1 g/cm³ pour la masse volumique apparente et de 2,9 à 3,150 g/cm³ pour la masse volumique absolue.



Figure 2.1. Détermination de la masse volumique apparente.

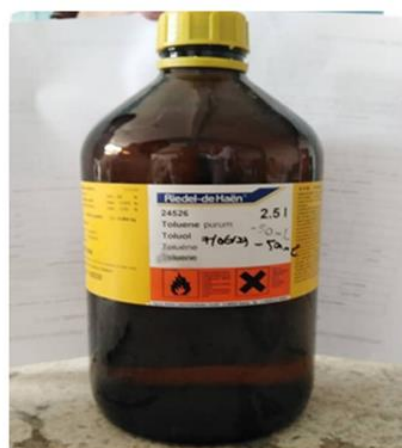
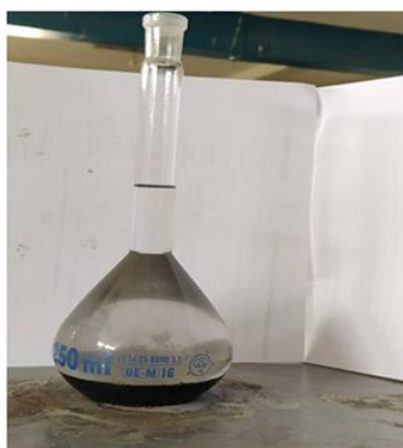


Figure 2.2. Toluène pour déterminer la masse volumique absolue de ciment.

b. Essai de consistance

Le but de cette expérience est d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la consistance normale du ciment CEM II/A 42,5 utilisé. Cette évaluation a été réalisée en utilisant l'appareil VICAT, conforme à la norme NF EN 196-3. Les résultats de la mesure de la consistance sont consignés dans le tableau 2.4.

c. Essai de prise

Le temps de prise est déterminé en observant la pénétration d'une aiguille (à l'aide de l'appareil de Vicat) (figure 2.3) dans une pâte de ciment de consistance normalisée jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur spécifiée. Au fil du temps, l'aiguille s'enfonce de moins en moins, ce qui reflète l'évolution de l'hydratation du ciment testé. Les résultats concernant le début et la fin de la prise de ciment sont résumés dans le tableau 2.4.



Figure 2.3. Appareil de VICAT.

d. Surface spécifique de Blaine

La finesse d'un ciment peut être définie par sa surface spécifique, conforme à la norme NF EN 196-6, qui correspond à la surface totale des grains présents dans une unité de masse exprimée en m^2/kg de poudre ou cm^2/g . Il est d'autant plus crucial d'analyser la surface spécifique car elle a un impact direct sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du mortier et du béton. Cette évaluation se fait en fonction du temps en utilisant l'appareil de Blaine, également appelé « perméabilimètre de Blaine » (figure 2.4). La surface spécifique de Blaine est récapitulée dans le tableau 2.4.



Figure 2.4. Perméabilimètre de Blaine Manuel.

La surface spécifique de Blaine est récapitulée dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Propriétés physico – mécaniques du ciment.

Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3186,63
Consistance (%)	32
Début de prise (min)	165
Fin de prise (min)	275

II.2.2. Sable

Pour la préparation du mélange nous avons utilisé un sable 0/4 prévenant de la carrière de l'ENG à sidi Abdeli, Tlemcen.

i. Analyse granulométrique

Le test d'analyse granulométrique détermine la taille des particules et le pourcentage de particules de chaque taille. La courbe granulométrique reflète la répartition pondérale du granulat de sable de base et représente le pourcentage cumulé tamisé. Agréger en fonction de ses dimensions. Il est obtenu en tamisant un échantillon de granulats secs à travers une série de tamis de taille décroissante. L'analyse granulométrique est réalisée conformément à la norme NF EN 933-2 (figure 2.5). Les résultats de l'analyse sont regroupés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5. Analyse granulométrique du sable utilisé.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus Cum. (g)	% Refus Cum.	% Tam. Cum.
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	40	40,000	4,003	95,996
3,15	36	76,000	7,606	92,393
2,5	50	126,000	12,610	87,389
2	179,8	305,800	30,604	69,395
1,6	98	403,800	40,412	59,587
1,25	46	449,800	45,016	54,983
1	47,3	497,100	49,749	50,250
0,8	33,2	530,300	53,070	46,927
0,63	19	549,300	54,973	45,026
0,5	53,6	602,900	60,338	39,661
0,4	40,5	643,400	64,391	35,608
0,315	75,6	719,000	71,957	28,042
0,25	25	744,000	74,459	25,540
0,2	22,6	766,600	76,721	23,278
0,16	19,2	785,800	78,642	21,357
0,125	45,6	831,400	83,206	16,793
0,1	12,4	843,800	84,447	15,552
0,08	16,6	860,400	86,108	13,891
0,063	23,8	884,200	88,490	11,509
Fond	115	999,200	100	0

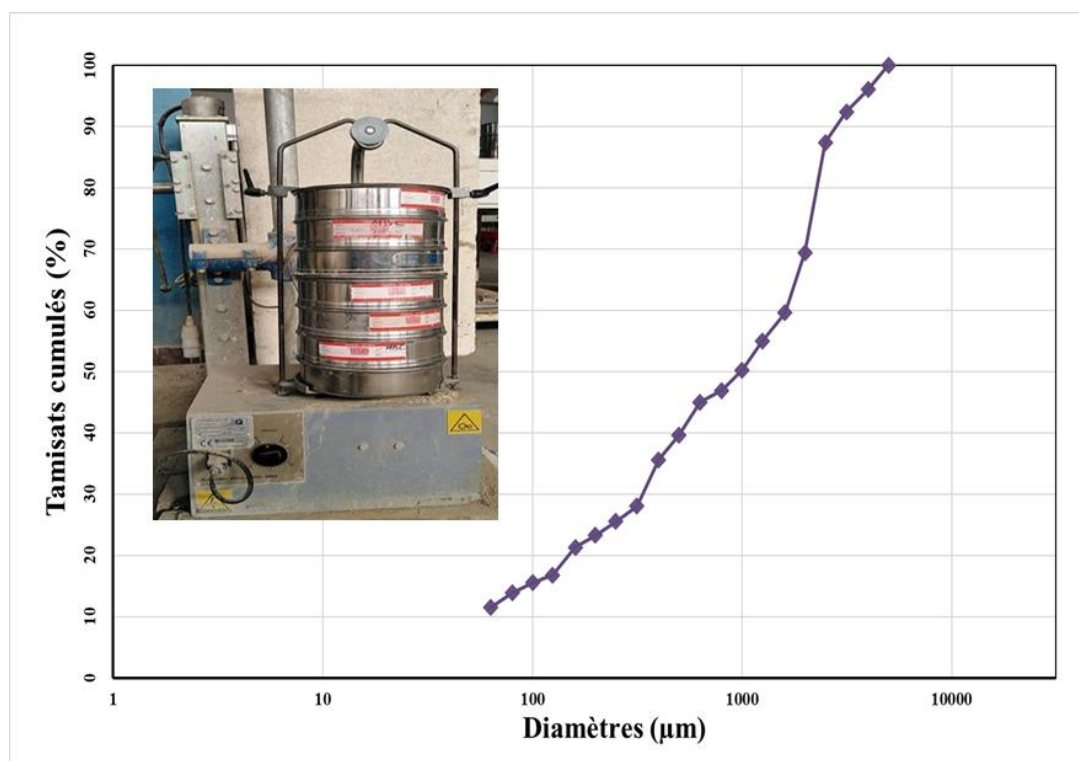


Figure 2.5. Analyse granulométrique du sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique indiquent que le sable présente un module de finesse de 2,3 et un pourcentage de fines de 11,51%. Ces caractéristiques suggèrent que le sable est bien adapté pour offrir une bonne résistance, tout en étant facile à travailler et à manipuler, avec un risque de ségrégation limité.

ii. Masse volumique de sable

Les masses volumique (apparente et absolues) ont été calculées conformément à la norme NF P 18-560 en utilisant deux méthodes : la méthode du ballon et la méthode de l'éprouvette graduée (figure 2.6). La moyenne des résultats de trois essais a été présentée dans le tableau 2.6 synthétique.

Tableau 2.6. Masse volumique absolue et apparente du sable.

Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolu (g/cm ³)	
	Ballon	Eprouvette graduée
1,71	2,87	2,57

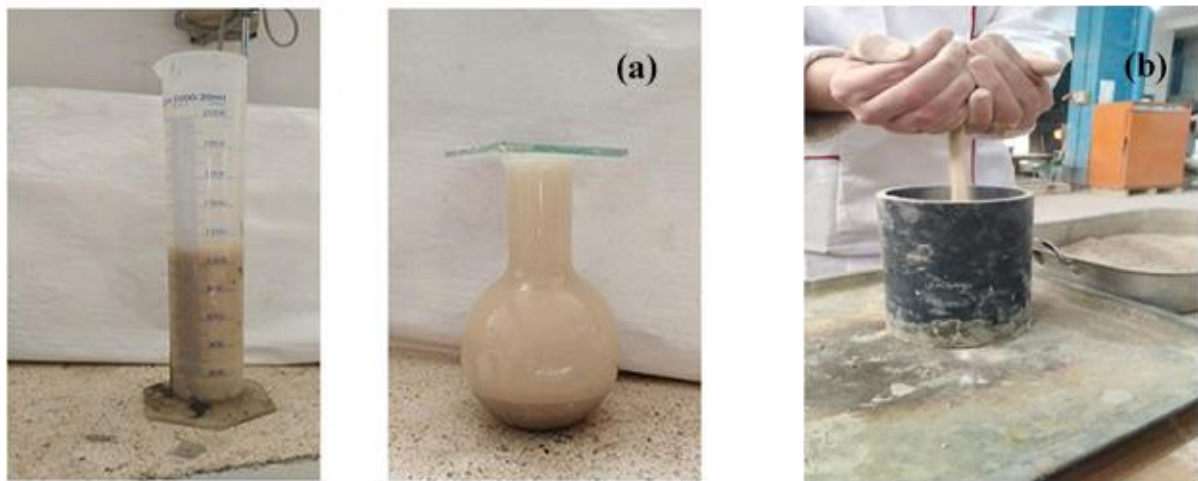


Figure 2.6. Essais des masses volumiques du sable : **(a)** masse volumique absolue, **(b)** masse volumique apparent.

Les résultats obtenus montrent que les masses volumiques (apparentes et absolues) répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620 qui impose une masse volumique apparente comprise entre $1,30 \text{ g/cm}^3$ et $1,60 \text{ g/cm}^3$ et une masse volumique absolue comprise entre $2,50 \text{ g/cm}^3$ et $2,70 \text{ g/cm}^3$.

iii. L'équivalent de sable

Il s'agit de détecter la présence d'élémentaires fins (argiles, limon, impuretés) dans un sable. On sait qu'il faut plus d'eau pour mouiller des éléments fins que pour de gros éléments. La résistance mécanique varie dans le même sens que le rapport liant/eau ; toutes choses égales par ailleurs ; un sable contenant beaucoup d'éléments fins conduira à une faible valeur de L/E qui donnera un mortier de moindre résistance. Les éléments forment avec l'eau une pellicule qui isolerait les granulats du liant et gênerait l'adhérence.

L'essai se fait en principe sur un sable écrêté à 5mm qu'il est recommandé de tamiser par voie humide. On utilise une solution lavante qui fait flocculer les éléments fins et en régularité la sédimentation (figure 2.7).



Figure 2.7. Essai équivalent de sable : (a) ESV, (b) ESP.

Nous avons étudié la propreté de sable selon la norme NF EN 933-8. Les résultats sont regroupés dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7. Essai équivalent de sable.

Echantillon de sable passé au tamis 5mm	Hauteur totale h_1 (Sable + fines) (cm)	Hauteur du sable h_2 (Visuel) (cm)	ESV $(h_2/h_1)100$	Hauteur tassée au piston (h'_2)	ESP $(h'_2/h_1)100\%$
Eprouvette 1	9,8	8,6	87,75	7,8	79,59
Eprouvette 2	10,2	8,3	81,37	7,3	71,56

L'équivalent de sable obtenu en utilisant le piston est égale à 75,57%. Ce qui montre que le sable est propre convenant parfaitement pour les mortiers de haute qualité.

iv. Foisonnement du sable

L'essai consiste à mesurer la variation de la masse volumique apparente d'un échantillon de sable en fonction de l'accroissement progressif de sa teneur en eau. Quand le sable est exposé à la pluie, nous avons jugé utile d'étudier le foisonnement de sable (figure 2.8).



Figure 2.8. Essai foisonnement du sable.

Les résultats sont portés sur un tableau 2.8 et la figure 2.9.

Tableau 2.8. Résultats du foisonnement du sable.

Teneur en eau (w %)	0	1	2	3	4	5	6
Masse vol. ρ_{app} (g/cm ³)	1,71	1,25	1,14	1,16	1,18	1,18	1,18
Teneur en eau (w %)	7	8	9	10	12	15	20
Masse vol. ρ_{app} (g/cm ³)	1,00	1,25	1,33	1,16	1,35	1,51	2,02

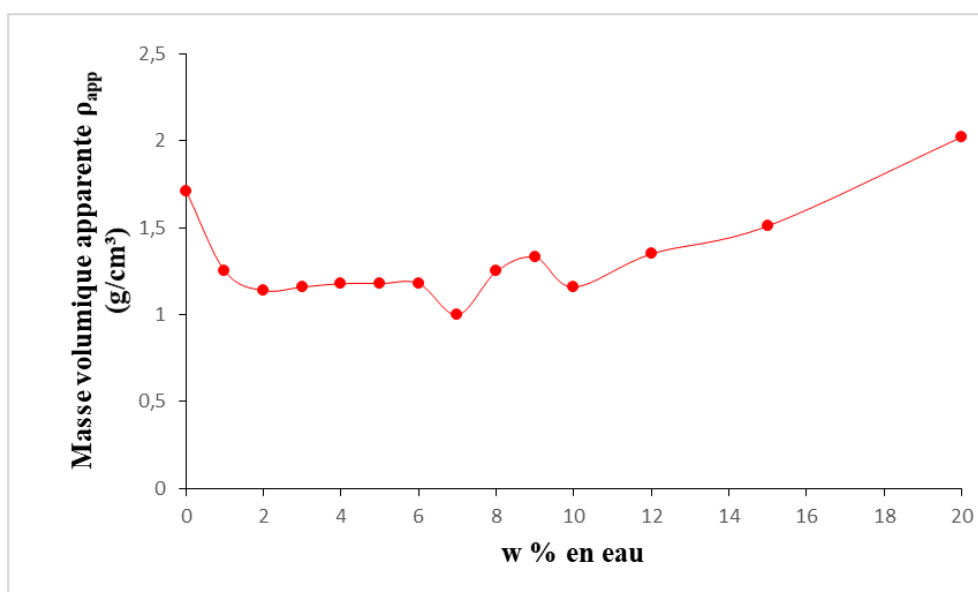


Figure 2.9. Foisonnement du sable.

v. La teneur en eau

La teneur en humidité d'un matériau fait référence au rapport entre le poids de l'humidité contenue dans le matériau et le poids du même matériau sec. En utilisant la méthode de combustion de l'alcool, une teneur en eau de 1,52% a été trouvée (figure 2.10).

Le taux d'humidité des sables varie fortement, ce qui détruit d'une part leur dosage volumétrique et d'autre part la quantité d'eau contenue dans le mortier frais. En effet, le sable fourni au chantier n'est jamais sec, et son taux d'humidité correspond généralement à des valeurs inférieures : le dosage volumétrique entraîne donc un manque de matière solide et un excès d'eau, ce qui est préjudiciable à la fabrication du mortier.



Figure 2.10. Essai teneur en eau.

vi. Absorption de sable

Le coefficient d'absorption, qui mesure la quantité d'eau que le granulat peut absorber lors d'une immersion totale dans l'eau pendant 24 heures, a été établi à 1,6% (figure 2.11).

Le tableau 2.9 regroupe les résultats retrouvés dans cette étude.



Figure 2.11. Essai d'absorption du sable.

Tableau 2.9. Résumé caractéristiques physiques de sable.

Caractéristiques physiques	Sable
Masse volumique apparente	1,71g/cm³
Masse volumique absolue (éprouvette gradué)	2,57 g/cm³
Masse volumique absolue (ballon)	2,870g/cm³
Module de finesse	2,3
Pourcentage des fines	11,51 %
Equivalent de sable ESV	84,56 %
Equivalent de sable ESP	75,57 %
La teneur en eau	1,52 %
Coefficient d'absorption	1,6 %

II.2.3. Eau

L'eau utilisé est potable et présente une composition chimique conforme aux exigences de la norme NF EN 1008, 2003 (tableau 2.10) (Youssari et al., 2023).

Tableau 2.10. Composition chimique de l'eau de gâchage (mg/l). (Youssari et al., 2023).

Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Ph (-)
110,62	42,28	-	-	99,40	473,51	312,74	8,00

II.2.4. Adjuvant

Pour notre étude, nous avons utilisé Sika® ViscoCrete® – 4037 RMX. Cet adjuvant est conforme à la norme NF EN 934 – 2. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération à base de polycarboxylates pour béton prêt à l'emploi. La plage d'utilisation recommandée : 0,4% à 2,5% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

i. Mise en œuvre

L'adjuvant Sika® ViscoCrete® – 4037 RMX est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Tableau 2.11. Caractéristiques du Superplastifiant.

Etat	Liquide
Couleur	Brun clair à brun foncé
Densité	1,06 à 1,07
PH	$5 \pm 1,0$
Teneur en chlorure	$\leq 0,1\%$

ii. Essai d'étalement

Cette méthode permet d'évaluer le dosage de saturation de superplastifiant en effectuant un essai d'affaissement sur une quantité très limitée de pâte de ciment en utilisant le mini cône (figure 2.12). Ce dosage de saturation a été trouvé à 1,4 % (figure 2.13).



Figure 2.12. Essai d'étalement.

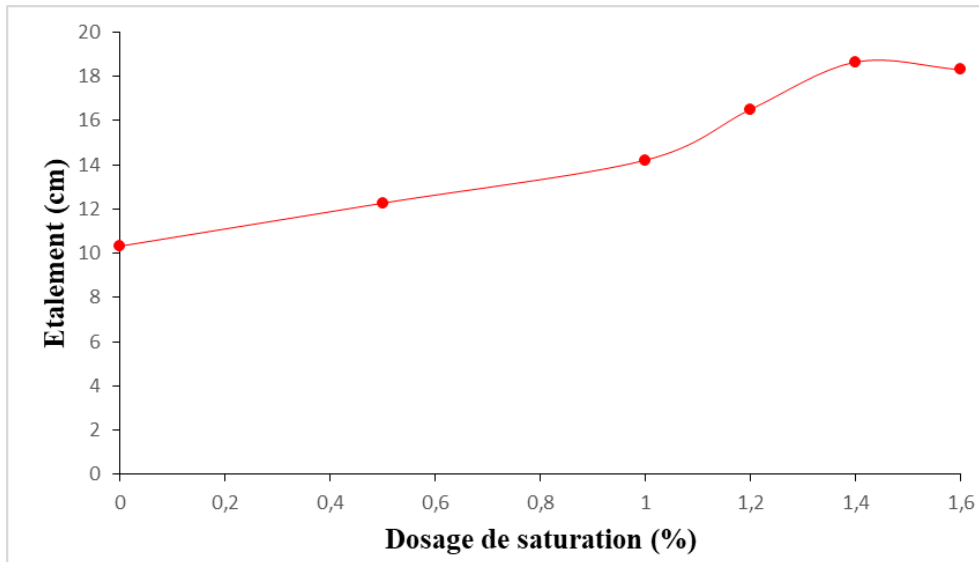


Figure 2.13. Dosage de saturation du superplastifiant Sika ViscoCrete.

II.2.5. Les fibres

Les fibres présentent des comportements contrainte-déformation très différents selon leurs propriétés, caractéristiques géométriques et mécaniques spécifiques. La capacité de renforcement des fibres dépend entre autres de leur ancrage, de leur résistance à la traction et du module d'Young.

Dans notre étude nous avons choisi des fibres métalliques qui présentent sous forme de bâtonnets métalliques avec des crochets aux extrémités qui facilitent l'adhérence à la matrice cimentaire (figure 2.14). Leurs propriétés sont résumées dans le tableau 2.12.



Figure 2.14. Fibres métalliques utilisés.

- **Caractéristiques techniques**



Tableau 2.12. Caractéristiques techniques.

Longueur (mm)	50 ± 1
Diamètre (mm)	$1 \pm 0,1$
Rapport d'aspect	(L/de) 50
Format	A crochet
Section transversale	Circulaire
Tension à la rupture à la traction (N/mm^2)	1100-2700
Allongement à la rupture	$< 4 \%$

II.3. Formulation du mortier normal

Le travail consiste à préparer des mortiers normalisés selon la norme NF EN 196-1.

La composition du mortier à étudier est le suivant :

- Sable normalisé = 1350g.
- Ciment = 450g.
- Eau de gâchage = 255g (rapport E/C=0,5).

Malaxage :

1. Humidifier les matériels utilisés (cuve de malaxeur).
2. Verser les composantes sèches (ciment +sable) et mettre le malaxeur en marche à petite vitesse pendant 30 secondes.
3. Introduire l'eau mélangée avec l'adjuvant.
4. Mélanger avec la main pendant 15 min en suite 90 secondes avec le malaxeur à une vitesse lente.
5. Raclage du pourtour du bol et le fond pendant 15 secondes.
6. Malaxage 90 secondes avec le malaxeur à petite vitesse.
7. Pour le mortier à base des fibres métalliques en ajoute en dernier les fibres et on malaxe pendant 1 min à grand vitesse.



Figure 2.15. Formulation des mortiers fibrés.

Tableau 2.13. Masses des constituants des mélanges.

Matériaux	Ciment	Sable	Eau	Adjuvant	Fibre			
					0%	0,5%	1%	1,5%
Masse (g)	450	1350	225	6,3	0	30	60	100

II.4. Caractéristiques à l'état frais (essai au mini cône)

L'essai d'étalement consiste à accomplir le mini cône placé au centre d'une plaque plexiglas une fois le cône est soulevé rapidement de telle sorte que la pâte se répande sur la plaque on mesure le diamètre de la pâte de chaque mélange sur deux directions perpendiculaires (figure 2.16).

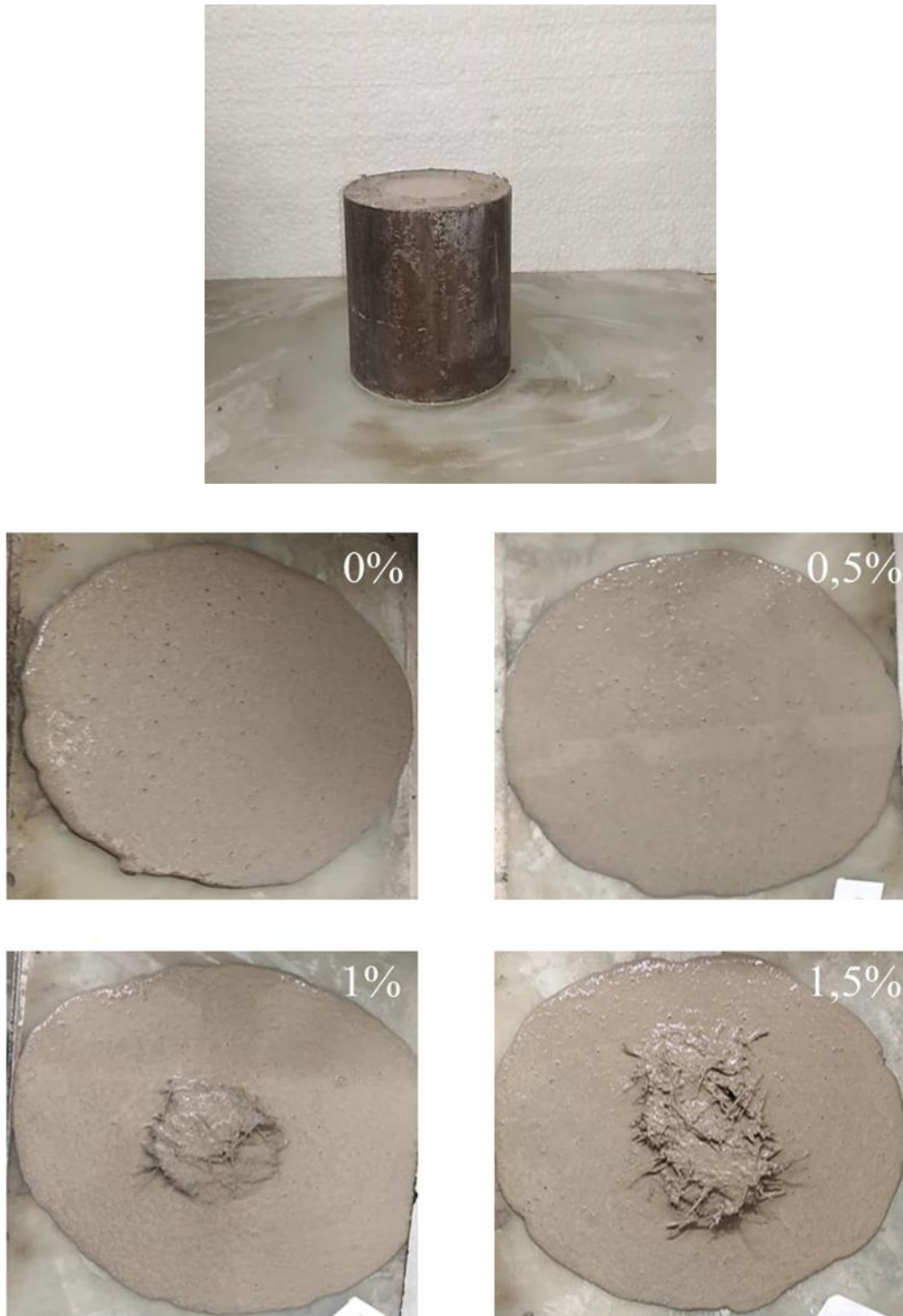


Figure 2.16. Consistance des mélanges étudiés.

II.5. Caractéristiques à l'état durci

II.5.1. Essai mécanique

Les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de mortier normalisé de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm (figure 2.17 (a) et (b)). Les résistances en

compression ont été évaluées à 7,14, 21 et 28 jours selon la norme ASTM C39. Simultanément les résistances en flexion ont été évaluées selon la norme BS EN 12390-5.



Figure 2.17.a. Essai flexion.



Figure 2.17.b. Essai compression.

II.5.2. La vitesse d'impulsion d'ultrason et le module dynamique

L'essai est basé sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes dans l'éprouvette étudié à l'aide d'un appareil électronique constitué d'un émetteur d'ondes, d'un récepteur et d'un dispositif qui permet de mesurer le temps de parcours (figure 2.18). Cet essai est normalisé par ASTM C597-22 La méthode permet de déterminer la résistance du mortier et les diverses irrégularités que peut présenter le mortier (fissures, cavités ...).

On calcule la vitesse de propagation selon l'expression suivante :

$$V = L/t \quad (2.1)$$

Avec :

V : la vitesse des ondes (m/s).

L : la longueur de parcours (mm).

t : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (μs).

On en déduit le module d'élasticité dynamique (Ed) selon la norme ASTM C215-02 :

$$E_d = \frac{v^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2.2)$$

Avec :

ρ : masse volumique de mortier [kg/m^3].

ν : coefficient de poisson de mortier.

v : vitesse du son [km/s].

E_d : module d'élasticité dynamique exprimé en MPa.

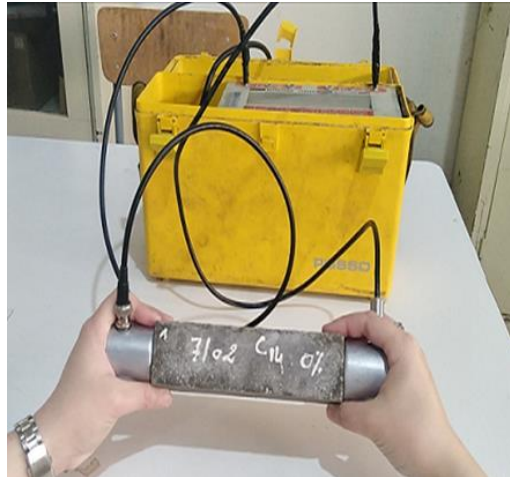


Figure 2.18. Essai auscultation sonore.

II.5.3. Pesée hydrostatique

L'essai a pour but de déterminer la masse volumique apparente des échantillons par immersion dans l'eau. Cette méthode est basée sur le principe de la poussée d'Archimède (figure 2.19).



Figure 2.19. Essai pesée hydrostatique.

II.5.4. Perte de masse

Durant la mesure du retrait endogène et total nous avons suivi en parallèle la perte de masse des éprouvettes au moyen de la balance électrique.

Les résultats sont la différence entre la masse mesurée au temps t et la masse initiale de l'éprouvette.

Le calcul est effectué en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'éprouvette (Zreiki, 2009) :

$$\Delta_m = [(m_{ini} - m_t) / m_{ini}] * 100 \quad (2.3)$$

Avec :

Δ_m (%) : le pourcentage de perte en masse.

m_{ini} : la masse initiale de l'éprouvette avant dessiccation.

m_t : la masse mesurée à l'instant t .

II.5.5. Mesure de retrait

Les essais de retrait ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³. Les éprouvettes ont été coulés dans des moules prismatiques avec des plots métalliques qui se fixent dans le moule lors de l'application du mortier (figure 2.20).



Figure 2.20. Moules prismatiques.

Avant de procéder à toute mesure, il est impératif de nettoyer les orifices situés aux deux extrémités de l'éprouvette et de calibrer l'appareil (figure 2.21). Le dispositif utilisé pour

effectuer les mesures de retrait dans nos essais est un rétractomètre d'une précision de 0,001mm équipé d'un comparateur de longueur ajusté à la taille des éprouvettes, ainsi que d'une barre d'étalonnage et de billes. Il permet de mesurer la déformation le long de l'axe longitudinal des éprouvettes (retrait endogène et total) pour chaque pourcentage de fibres métalliques.



Figure 2.21. Rétractomètre et ses composants – Etalon et billes.

Après le durcissement, les échantillons ont été retirés. Pour mesurer le retrait total, les extrémités de l'éprouvette ont été enveloppées d'une feuille adhésive en aluminium afin de ne considérer que le séchage sur les quatre faces latérales (figure 2.22 (a) et (b)). Pour le retrait endogène, l'éprouvette a été isolée de l'humidité ambiante grâce à une couche d'aluminium adhésif.



Figure 2.22.a. Mesure du retrait total.



Figure 2.22.b. Mesure du retrait endogène.

L'organigramme représenté par la figure 2.23. Illustre la méthodologie expérimentale adoptée pour notre étude.

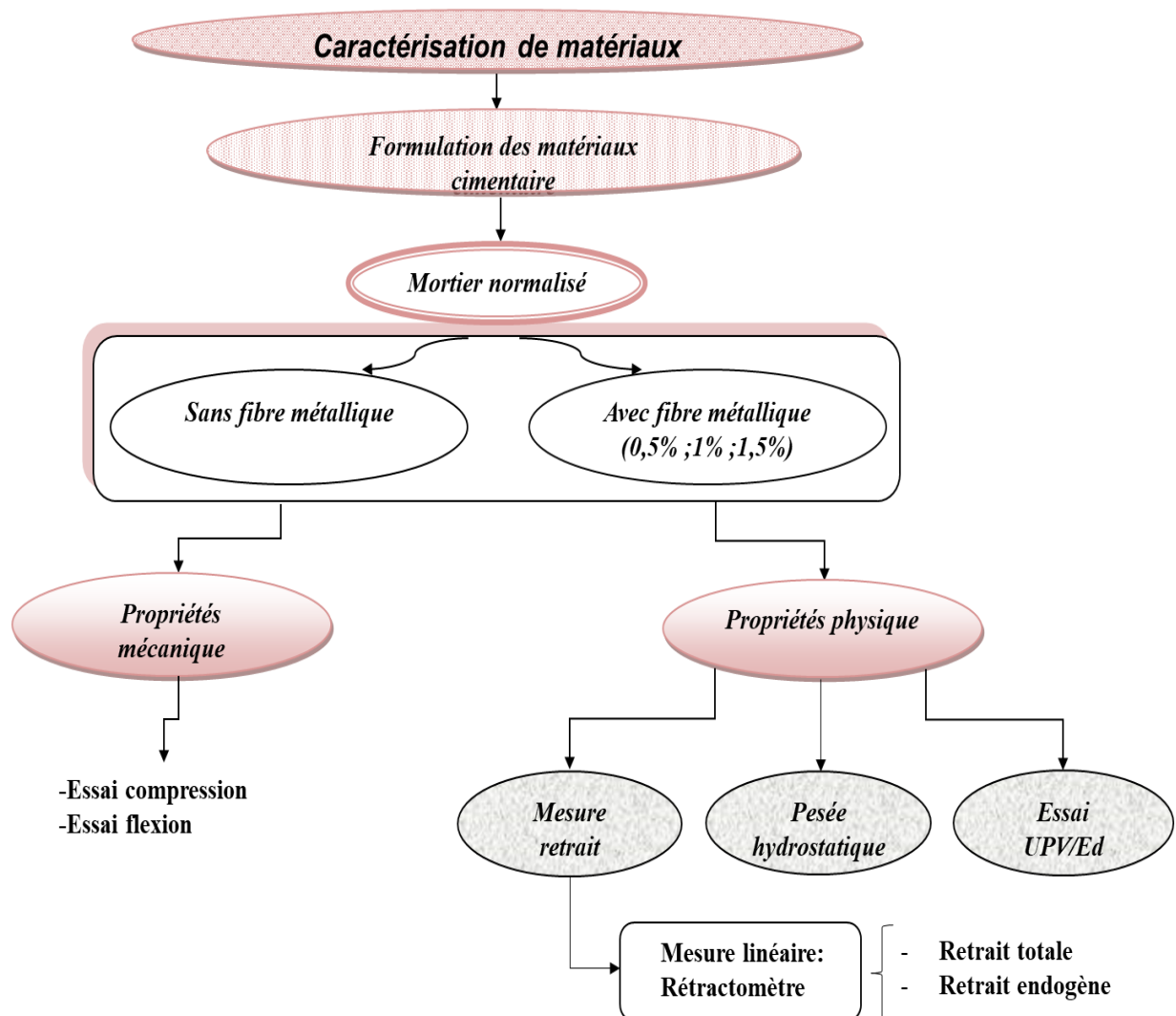


Figure 2.23. Organigramme de la méthodologie expérimentale.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats indiquent que les propriétés physico-chimiques des matériaux étudiés sont en adéquation avec les normes en vigueur, ce qui facilite la mise en œuvre du programme expérimental.

Les différents résultats des mortiers étudiés seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

II.7. Références bibliographique du chapitre II

ASTM C215-02, (2017). « Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens ».

ASTM C39, (2023). « Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens », American Society for Testing and Materials, Annual Books of ASTM Standards.

ASTM C597-22, (2023). « Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete ».

BS EN 12390-5, (2019). « Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens ».

NA 231, (2006). « Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse ».

NF EN 1008, (2003). « Eau de gâchage pour bétons – Spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton ».

NF EN 12620, (2003). « Granulats pour béton ».

NF EN 15-435, (2021). « Méthodes d'essais des ciments –Détermination de la masse volumique.

NF EN 196-1, (2016). « Méthodes d'essais des ciments-Partie 1 : Détermination des résistances ».

NF EN 196-3, (2017). « Méthodes d'essai des ciments –Partie 3 : Détermination du temps de prise et de stabilité ».

NF EN 196-6, (2018). « Méthodes d'essai des ciments –Détermination de la finesse ».

NF EN 933-2, (2020). « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures ».

NF EN 933-8, (2012). « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- Partie 8 : évaluation des fines –Equivalent de sable ».

NF EN 934-2, (2022). « Adjuvants pour béton, mortier et coulis- Partie 2 : adjuvants pour bétons. Définitions et exigences ».

NF P 18-560, (1990). « Granulats –Analyse granulométrique par tamisage ».

Youssari, F. Z. (2023). « Etude de la résistance des bétons à base de fibres métalliques à la lixiviation et aux attaques acides », Thèse de Doctorat, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie.

Youssari, F. Z., Taleb, O., Benosman, A. S. (2023). « Towards understanding the behavior of fiber-reinforced concrete in aggressive environments : Acid attacks and leaching », *Construction and Building Materials*, vol 368, 130444, (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130444>.

Zreiki, J. (2009). « Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages ». Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France. Cité par Bixi, 2014.

Chapitre III.

Résultats et Interprétations

III.1. Introduction

Afin de comprendre et d'évaluer les performances du mortier renforcé aux fibres métallique face au retrait, nous procéderons à une analyse minutieuse des données provenant des essais et des analyses effectuées. Ce chapitre sera dédié à la présentation des résultats concernant le comportement du mortier fibré à l'état frais et durci, en mettant l'accent sur les résistances et les propriétés mécaniques. De plus, nous étudierons les résultats obtenus lors de la mesure linéique des différents types de retrait (total, endogène, dessiccation). Enfin, nous explorerons diverses relations corrélatives établies entre les différentes propriétés de performance.

III.2. Essai d'affaissement

Les résultats représentés par la figure 3.1 montrent que le diamètre d'étalement diminue avec l'augmentation des pourcentages de fibres. En effet, à des dosages plus élevés en fibres le mélange du mortier devient cohérent, moins fluide et moins maniable en raison de la formation d'agglomérats de fibres figure 3.2, qui se produisent lorsque les fibres se regroupent pour former des amas dans le mélange. Ces agglomérats de fibres créent des zones de concentration élevée de fibres plutôt qu'une distribution uniforme dans le mélange. Ces conclusions ont également été observé par (Sebaibi et al., 2014), (Hedjazi et Castillo, 2020) et (Ige, 2017).

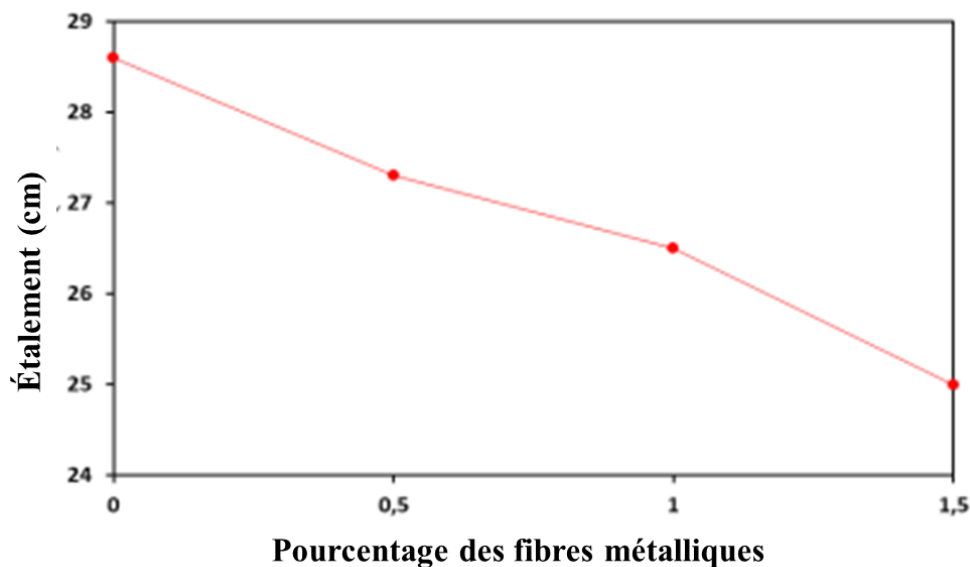


Figure 3.1. Evolution d'étalement en fonction de pourcentage de fibres.



Figure 3.2 : Agglomérats de fibres.

III.3. Résistance à la compression

Les résistances mécaniques du mortier ont été mesurées à différents intervalles, notamment à 7, 14, 21 et 28 jours (figure 3.3). Les échantillons montrent un gain de 17 %, 20% et 23% pour un dosage volumique en fibres respectivement de 0,5, 1 et 1,5 %. Cette amélioration est attribuée à l'adhérence mécanique des fibres qui permet d'augmenter la capacité à retarder la formation des fissures et arrêter leur propagation. Ce résultat est en accord avec la littérature (Xie et Ozbakkaloglu, 2015) et (Ammari et al., 2020). De plus, la fraction volumique optimale de fibres pour atteindre une résistance élevée est de 1,5 %.

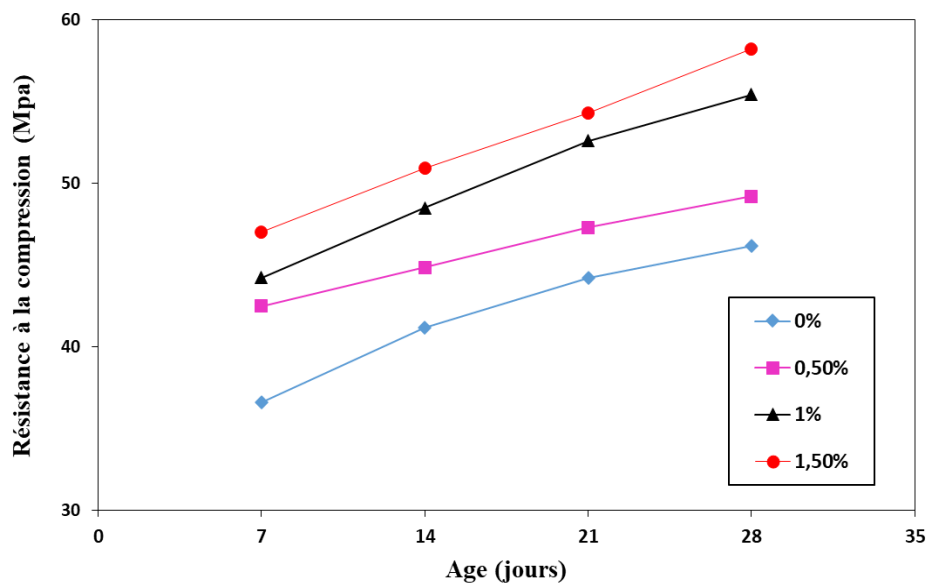


Figure 3.3. Evolution de résistances à la compression des mortiers.

III.4. Résistance à la flexion

Les données illustrées dans la figure 3.4 démontrent que les mortiers fibrés ont présenté des résistances à la flexion allant de 7,68 à 20,35 MPa surpassant ainsi celles du mortier témoin. Cette amélioration est attribuée au module d'élasticité élevé de l'acier et à son mécanisme d'ancrage. L'ajout de fibres métalliques à la matrice induit une modification significative du comportement fragile en limitant la propagation rapide et instable de la rupture. Leur présence entraîne non seulement une propagation de fissure plus lente et progressive avec l'augmentation de la charge, mais permet également un transfert de contrainte à travers les lèvres de la fissure. Ces conclusions sont cohérentes avec les résultats présentés par (Yoo et al, 2015), (Afroughsabet et al., 2017) et (Youssari et al., 2023).

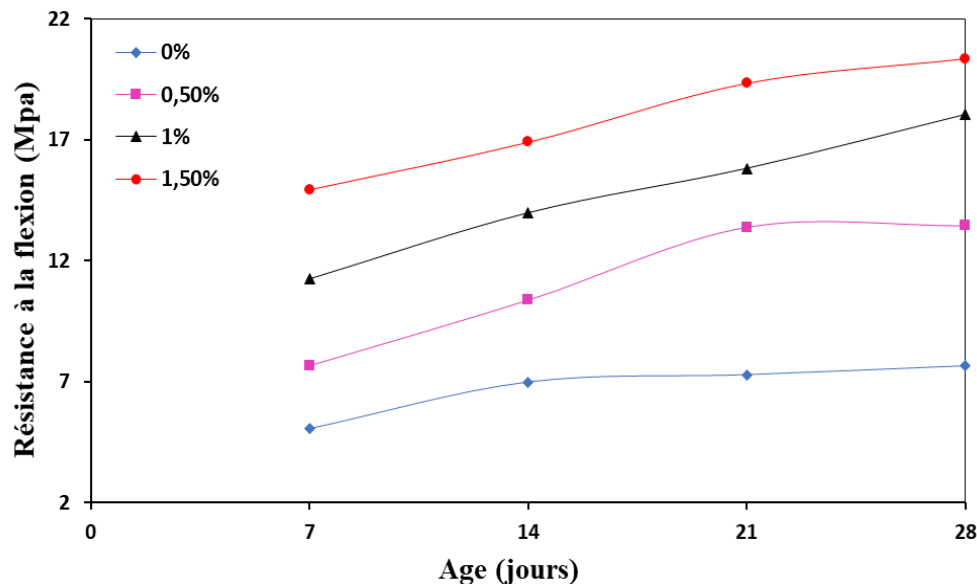


Figure 3.4. Evolution de résistances à la flexion des mortiers fibrés et non fibrés.

III.5. Vitesse ultrasonique et le module dynamique

Les résultats obtenus pour l'UPV (Vitesse des Ondes Ultrasonores) et le module dynamique (Ed) sont étroitement liés aux propriétés de résistance mécanique. Une tendance ascendante, presque linéaire de l'UPV et de l'Ed a été observée en fonction de pourcentages de fibres, comme indique dans la figure 3.5. Cette augmentation de la vitesse ultrasonique peut être attribuée au rôle des fibres dans la création d'un milieu plus dense, entraînant ainsi une réduction du temps de propagation de l'onde. Ce phénomène s'explique par la capacité des fibres métalliques à transmettre les impulsions ultrasonores plus rapidement que les matériaux non métalliques. On observe un comportement similaire du module dynamique, avec une variation presque linéaire pour tous les types de mortier (figure 3.6). Ces Résultats sont en

accord avec ceux de (Benaicha et al., 2015), (Gebretsadik et al., 2021), (Youssari et al., 2023) et (Al-Ridha et al., 2020).

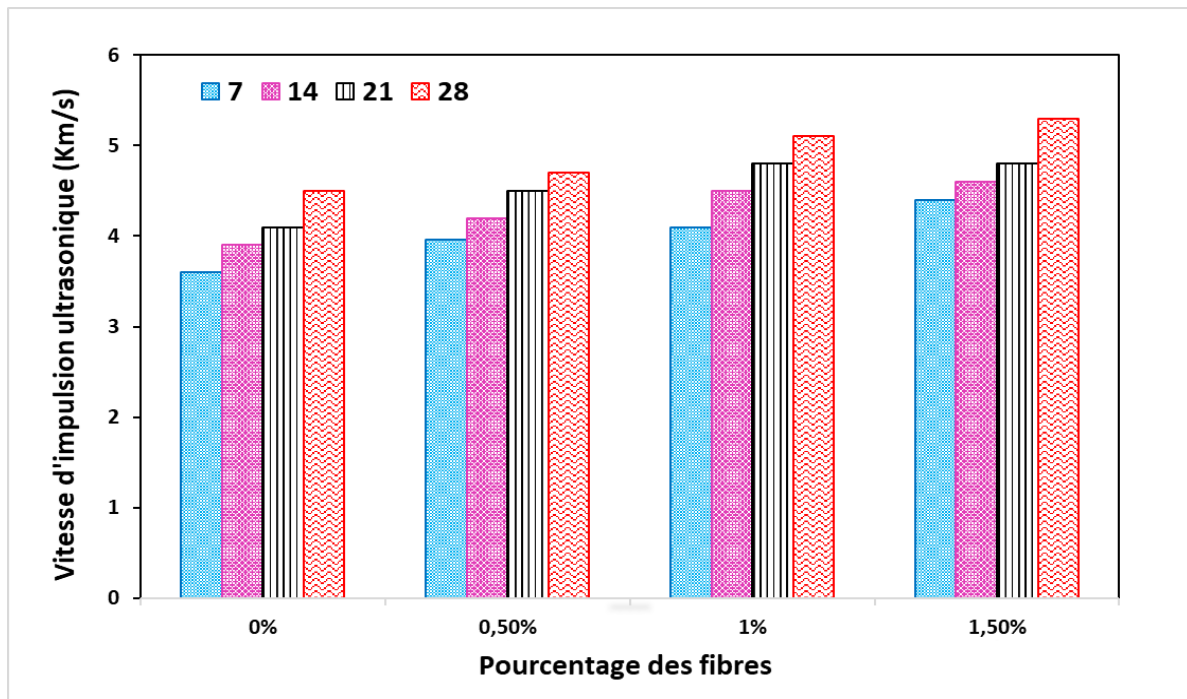


Figure 3.5. Vitesse ultrasonique des mortiers fibrés et non fibrés.

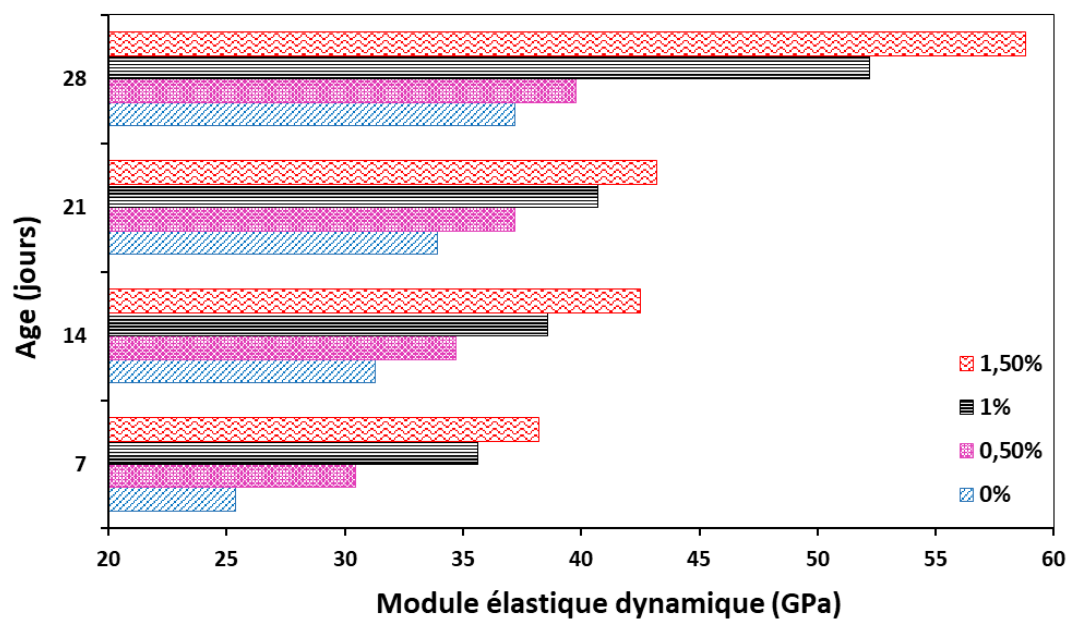


Figure 3.6. Module dynamique des mortiers fibrés et non fibrés.

III.6. La pesée hydrostatique

La tendance observée dans la figure 3.7 démontre que la masse volumique du mortier accroît en proportion avec l'augmentation du pourcentage en fibres. Cette croissance est en partie attribuée à la densité naturellement élevée des fibres par rapport aux autres éléments constitutifs du mortier, tel que le ciment et les agrégats. En conséquence, l'intégration de fibres peut accroître la masse volumique totale du mortier tout en aidant à atténuer son retrait. Les fibres agissent comme des renforts internes, dispersent les contraintes et limitent ainsi la formation de fissures, contribuant ainsi à la robustesse structurelle du matériau.

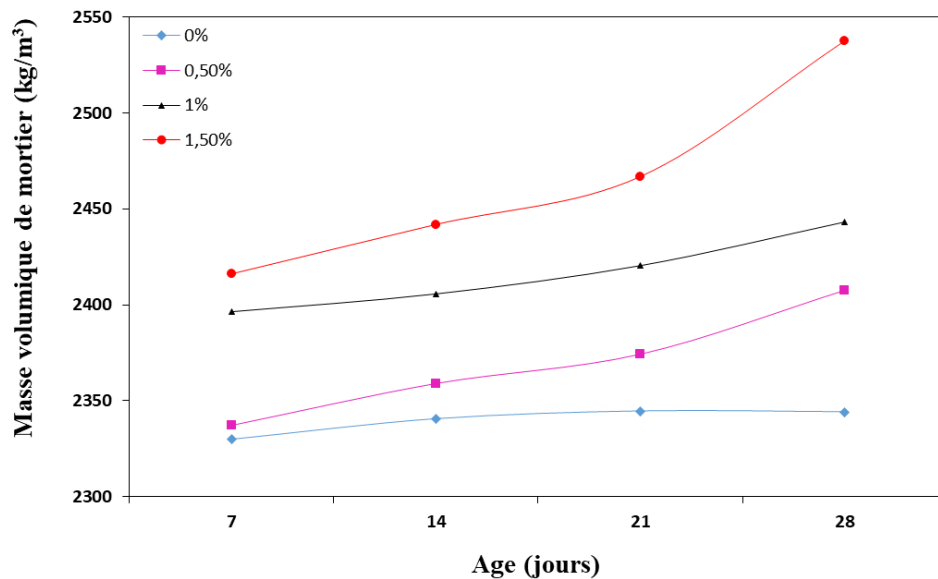


Figure 3.7. Evolution de la masse volumique des mortiers étudiés en fonction de l'âge.

III.7. Résultats expérimentaux de retrait

Dans un premier temps, nous avons examiné comment le dosage des fibres métalliques affecte le retrait endogène (RE), total (RT) et de dessiccation. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures (3.8 et 3.9).

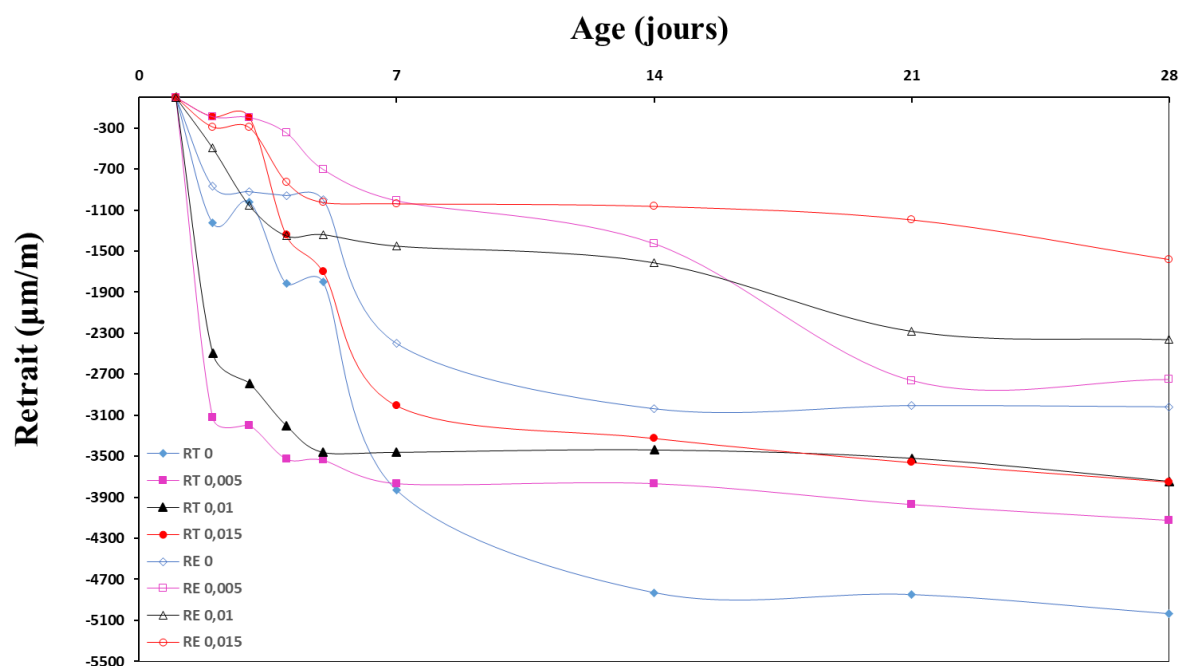


Figure 3.8. Retrait total (RT) et endogène (RE) du mortier normalisé à base des fibres métalliques.

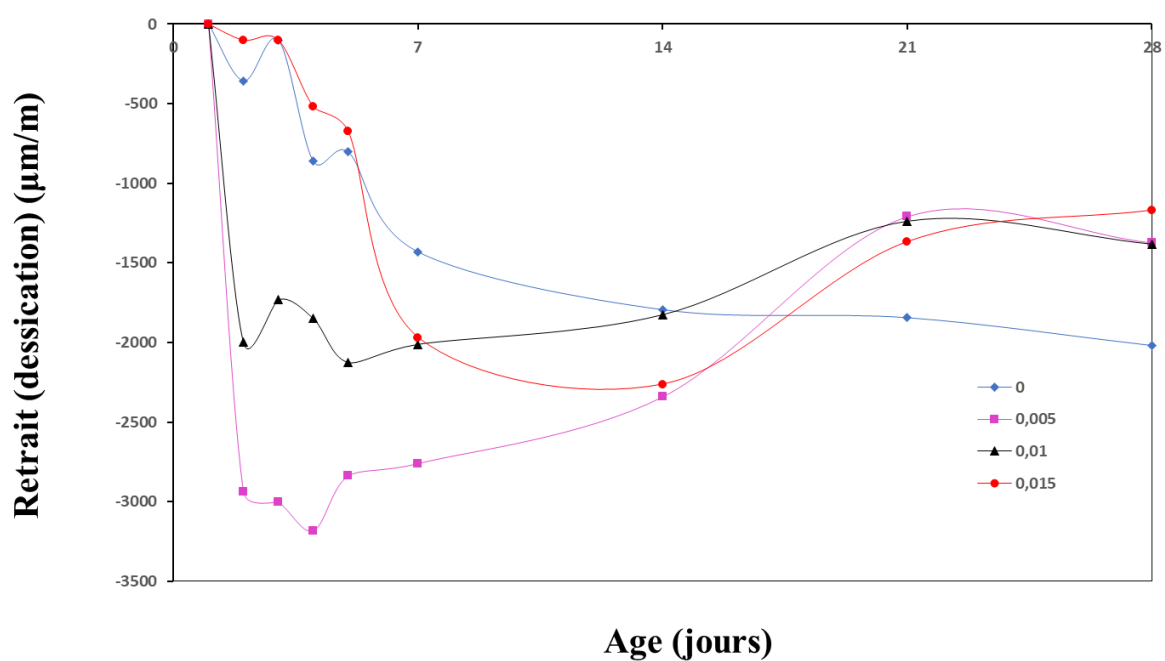


Figure 3.9. Retrait de dessiccation du mortier normalisé à base des fibres métalliques.

La compréhension des courbes du retrait n'est pas toujours simple, car différents facteurs et leur interaction peuvent influencer le phénomène.

Il est possible de constater que l'incorporation des fibres métalliques entraîne une réduction du retrait total et endogène figure 3.8. Dans un premier temps, il est observé que la déformation est significative présentant des fluctuations (retrait- expansion) pendant les premiers jours après la prise. A long terme, la déformation se distingue par une très faible vitesse de déformation. Cela n'est dû au fait que la réaction d'hydratation s'arrête en raison d'un déficit d'eau dans le réseau poreux.

Toutefois, le retrait total prend une importance accrue du fait qu'il implique à la fois le retrait endogène et le retrait dessiccation. Par exemple, pour un mortier normalisé contenant 0% de fibres métalliques, le retrait à 2 jours varie de $-868,75\mu\text{m/m}$ pour un retrait endogène à $-1225\mu\text{m/m}$ pour un retrait total, et de $-3018,75\mu\text{m/m}$ à $-5037,5\mu\text{m/m}$ à 28 jours, respectivement.

La perte d'une partie de l'eau de gâchage est causée par le retrait de dessiccation lorsque le mortier est stocké dans une atmosphère à humidité relative inférieure à celle de la matrice cimentaire. La différence entre le retrait total et le retrait endogène est utilisée pour calculer le retrait de dessiccation, qui est présenté en fonction du temps. L'effet de la teneur en fibres sur le retrait par séchage des mortiers fibrés est illustré dans la figure 3.9. Le retrait par séchage a rapidement diminué jusqu'à 7 jours, puis a lentement diminué pour atteindre une valeur presque stable après 21 jours. L'utilisation de fibres d'acier a permis de limiter efficacement la déformation lors du séchage. Par exemple, le retrait de référence était de $-2018,73\mu\text{m/m}$ à 28 jours, et a diminué à $-1168,75\mu\text{m/m}$ pour 1,5 %. Ces résultats sont adéquation avec ceux rapportés par (Aydin et Baradam, 2013) et (Wu et al., 2019).

La teneur en fibres optimale pour limiter le retrait a été trouvée à 1,5 %. Cela est dû à l'augmentation du module d'élasticité de la matrice avec l'âge, ce qui diminue l'effet de restriction des fissures par les fibres. L'incorporation de fibres peut produire un réseau d'ancrage mécanique entre les particules. Cela signifie que les fibres ayant une plus grande résistance de liaison à la matrice cimentaire sont plus efficaces pour limiter le rétrécissement.

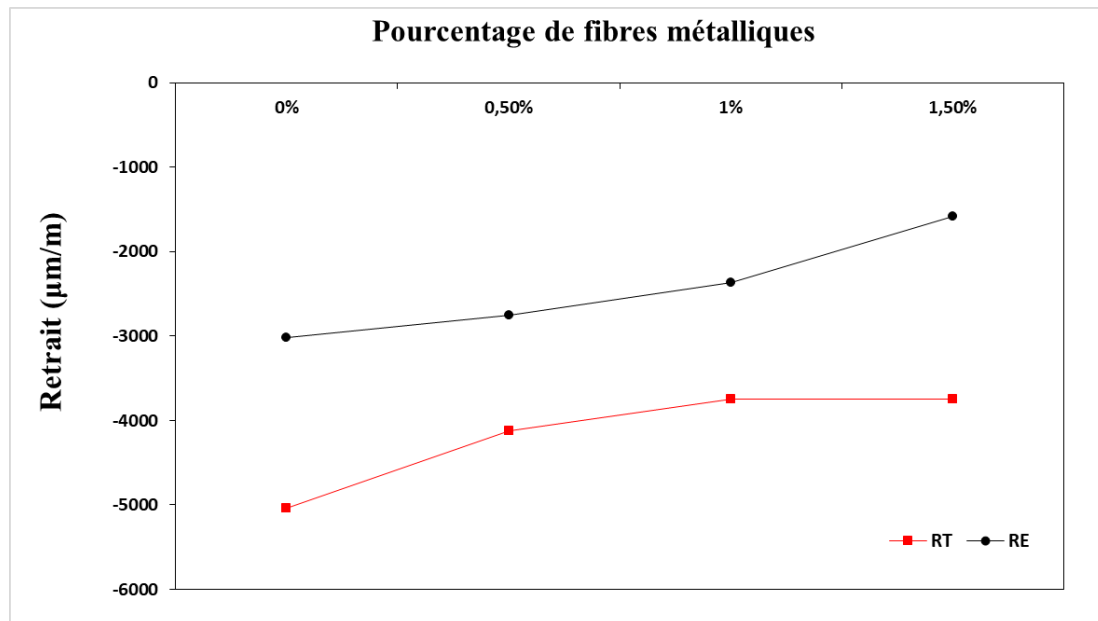


Figure 3.10. Retrait total et endogène du mortier normalisé à base de fibres métalliques à 28 jours.

La figure 3.10 représente la variation du retrait endogène en comparaison avec le retrait total avec différents pourcentages en fibre métalliques à 28 jours. A travers cette figure (3.10) peut constater que l'incorporation de fibres métalliques peut aussi avoir un impact sur le retrait endogène après 28 jours. Toutefois, la présence d'une concentration accrue de fibres peut influencer les rythmes de réaction du mortier, ce qui peut éventuellement diminuer le retrait endogène.

III.8. Perte de masse

Lorsque le mortier durcit et que l'eau s'évapore pendant le processus de séchage, ces vides peuvent devenir plus apparents. Le processus de séchage peut entraîner une augmentation de la quantité d'air piégé dans le mortier, car l'eau qui occupait auparavant ces espaces s'évapore. Cela peut conduire à une plus grande perte de masse, car l'air est moins dense que l'eau, donc lorsque l'eau s'évapore, le matériau perd du poids. Ainsi, l'ajout de fibres peut indirectement contribuer à une plus grande perte de masse du mortier en favorisant la formation de vides qui piègent l'air.

La figure 3.11 illustre comment la perte de masse des mortiers à base de fibres métalliques (0%, 0,5%, 1% ; 1,5%) a évolué au fil du temps.

D'après la représentation graphique 3.11, on observe que la perte de masse est plus importante lors du retrait total par rapport au retrait endogène, car la perte de masse est causée

par la dessiccation et ceci peut être dû à la non-couverture de l'éprouvette de mortier au complet. D'où on constate que l'accroissement des fibres réduit la perte de masse.

On observe aussi que le mortier sans fibres métalliques (0 %) au retrait total est celui qui se dégrade le plus par rapport aux autres types de mortiers. Après la première semaine de retrait total, il perd 3,34 % de son poids, tandis que pour la même période (7 jours), la perte de poids diminue de seulement 0,08 % dans le mortier soumis au retrait endogène.

De plus, il est observé que le mortier contenant 1,5 % de fibres métalliques résiste mieux après la première semaine par rapport aux autres mortiers soumis au retrait total.

De cette manière, la diminution du poids se manifeste par la présence de fibres qui favorisent le départ de l'eau, comme le constate (Al-kamyani et al., 2018) dans ses recherches.

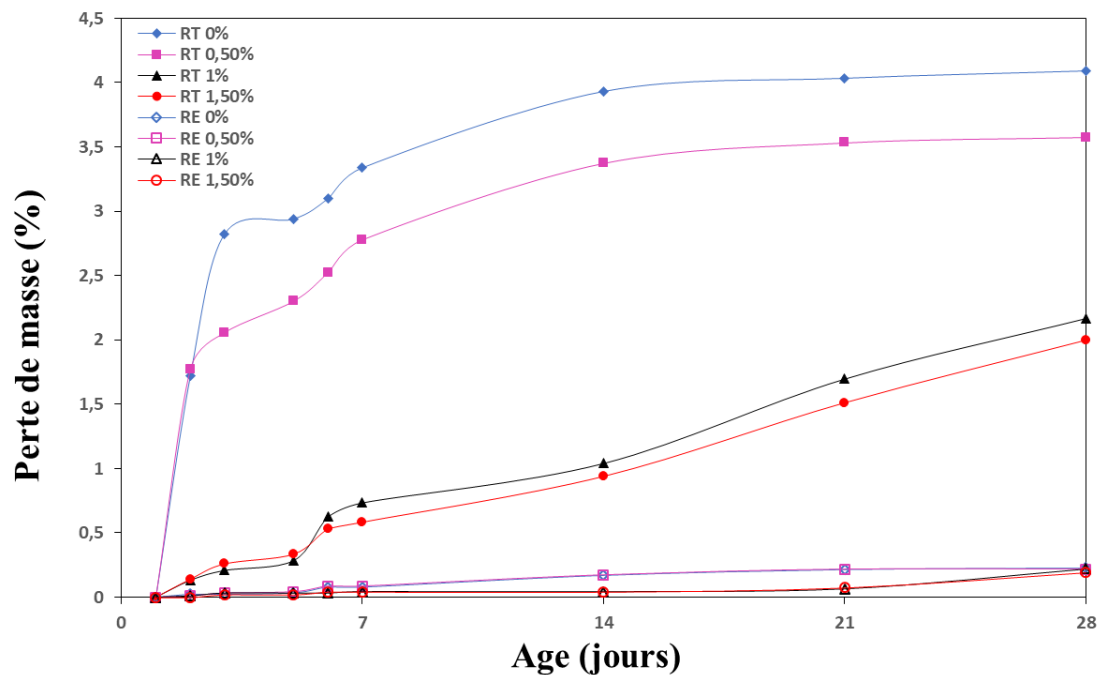


Figure 3.11. Evolution de la perte de masse en fonction du temps.

Les mortiers contenant 0 % et 0,5 % de fibres métalliques (soumis au retrait endogène) ont tendance à perdre un poids similaire en général pendant toute la période d'essai, tout comme les mortiers contenant 1 % et 1,5 %. De plus, il est à noter que les mortiers soumis au processus de retrait endogène présentent une résistance supérieure par rapport à ceux soumis au processus de retrait total.

III.9. Corrélation entre la perte de masse et le retrait

L'étude de la perte de masse en fonction du retrait est également un paramètre crucial. Selon la figure 3.12, il est évident que la corrélation entre le retrait endogène et la perte de masse est étroite, car ils sont tous deux soumis aux mêmes réactions chimiques de durcissement. En particulier, on utilise fréquemment la perte de masse comme indicateur indirect du niveau d'hydratation du ciment, ce qui peut avoir un impact sur le retrait endogène. D'après (Bertelsen et al., 2020), la perte de masse est associée aux conditions environnementales et à la capacité d'absorption d'humidité des divers éléments qui composent le matériau.

On peut constater une corrélation positive entre la perte de masse et le retrait endogène et ceci est en accord avec les résultats de la littérature comme celle de (Noushini et al., 2014), ce qui implique que, en général, à la mesure que la perte de masse augmente (en raison d'une hydratation plus importante du ciment), le retrait endogène augmente aussi.

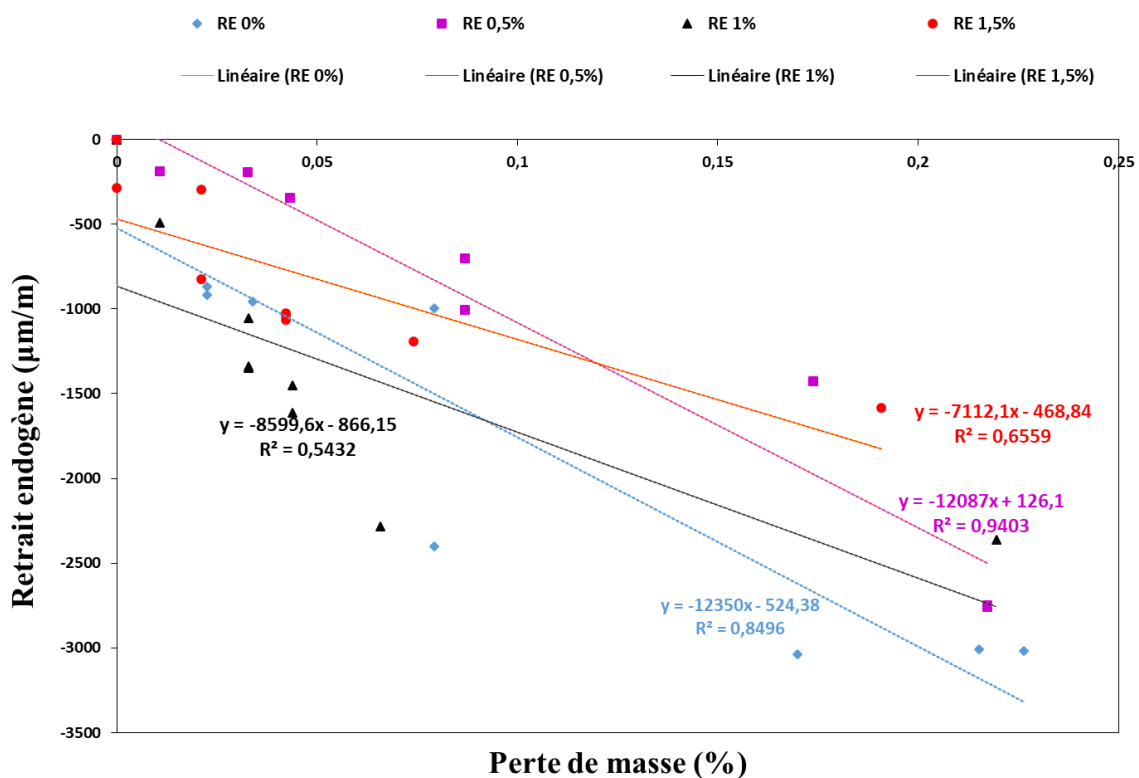


Figure 3.12. Retrait endogène en fonction de la perte de masse.

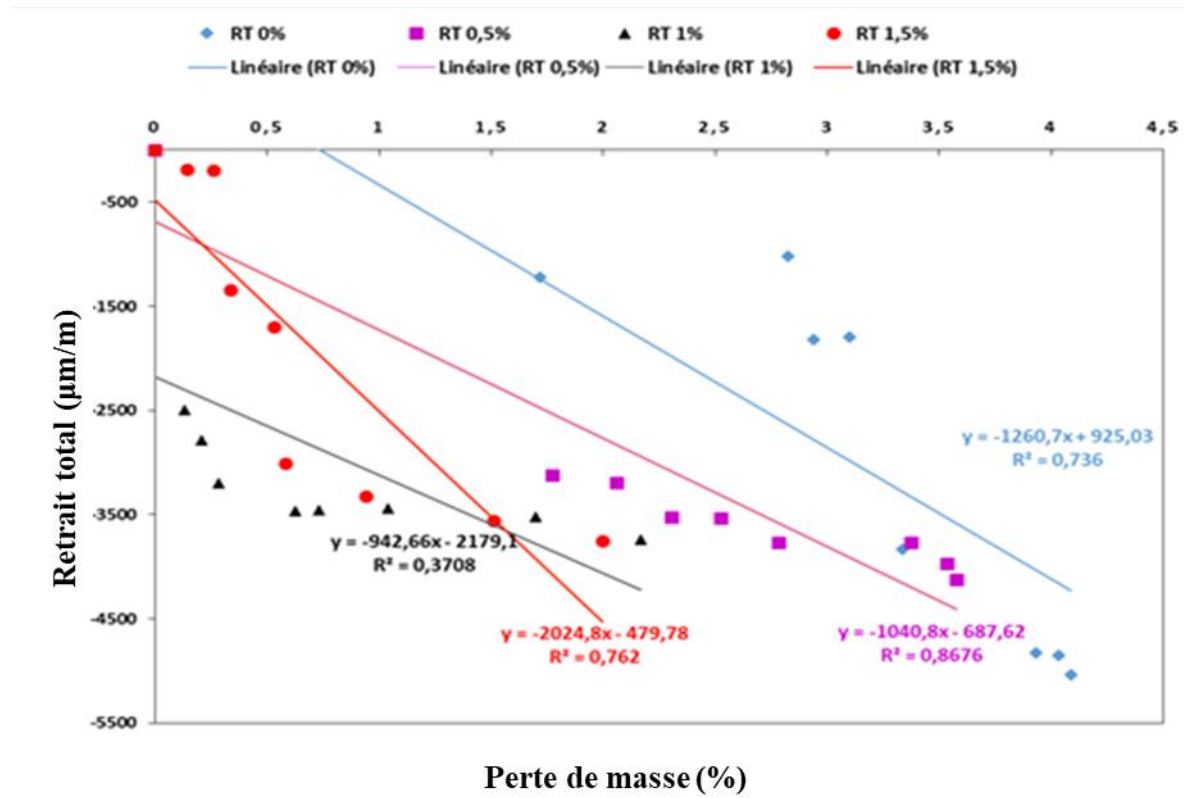


Figure 3.13. Retrait total en fonction de la perte de masse.

La figure 3.13 confirme également qu'il y a une corrélation positive entre la perte de masse et le retrait total.

III.10. Conclusion

Une étude expérimentale portant sur la durabilité vis-à-vis du retrait a été menée sur deux types de mortier : le mortier normalisé utilisé comme référence et le mortier fibré. L'objectif principal était d'évaluer l'impact des fibres métalliques à différents pourcentages (0%, 0,5%, 1%, 1,5%) sur le retrait du mortier, tout en cherchant à identifier le pourcentage optimal de fibres métalliques pour minimiser ce phénomène. En parallèle, l'étude visait à évaluer les résistances et les propriétés mécaniques des mortiers testés. Voici un résumé des principaux résultats obtenus :

- L'incorporation de fibres d'acier dans le mortier a entraîné une diminution de la maniabilité du mélange, comme en témoigne l'essai d'affaissement.
- Les résultats des tests de résistance à la flexion et la compression démontrent que l'ajout de fibres d'acier au mortier améliore considérablement sa résistance mécanique par rapport au mortier de référence.

- Les fibres favorisent la création d'un environnement plus dense, ce qui entraîne une diminution du temps de propagation de l'onde, suivi d'une augmentation de la vitesse et du module dynamique.
- La densité élevée des fibres dans le mortier accroît sa masse volumique, créant ainsi une structure plus robuste et moins sujette à la contraction lors dû au durcissement. Cette caractéristique contribue à minimiser le retrait du mortier pendant ce processus.
- Il est toujours plus crucial de considérer le retrait total, car il représente la somme du retrait endogène et du retrait de dessiccation. L'incorporation de fibres métalliques dans le mortier fibré a réduit significativement ce retrait par rapport aux mortiers sans fibres. Notre analyse démontre clairement une évolution continue du retrait tout au long de la période d'étude.
- L'étude de la perte de masse au fil du temps offre des données cruciales pour évaluer la performance et la durabilité des mortiers à base de fibres métalliques, plus spécifiquement, le mortier de référence au retrait total, enregistre la plus grande perte de masse.
- Les observations montrent une corrélation positive entre le retrait et la perte de masse dans le mortier. En d'autres termes, une augmentation du retrait total et endogène est fréquemment liée à une augmentation de la perte de masse, ce qui laisse supposer une dégradation plus importante du matériau.

III.11. Références bibliographiques du chapitre III

Afroughsabet, V., Biolzi, L., Ozbakkaloglu, T. (2017). « Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete », Composite structure, ISSN: 0263-8223.

Al-Kamyani, Z., Guadagnini, M., Pilakoutas, K. (2018). « Predicting shrinkage induced curvature in plain and reinforced concrete », Engineering structures, vol 176, pages 468-480.

AL-Ridha, A. S. D., Abbood, A. A., Al-Chalabi, S. F., Aziz, A. M., Dheyab, L.S. (2020). « A comparative study between the effect of steel fiber on ultrasonic pulse velocity (UPV) in light and normal weight self-compacting concretes », Materials science and engineering, vol 888.

Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A., Quéneudec, M. (2020). « Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers », Construction and Building Materials, vol 233, 117374.

Aydin, S., Baradan, B. (2013). « The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars », composites: part B, vol 45, pages 63-69.

Benaicha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A. H., Burtschell, Y. (2015). « Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete », Construction and Building Materials, vol 101, pages 702-709.

Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M., Fischer, G., (2020). « Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials »: A review, Construction and Building Materials, vol 230, 116769.

Gebretsadik, B., Jdidirendi, K., Farhangi, V., Karakouzian, M. (2021). « Application of ultrasonic measurements for the evaluation of steel fiber reinforced concrete », Engineering, technology and applied science research, vol 11, N° 1, pages 6662-6667.

Hedjazi, S., Castillo, D. (2020). « Relationships among compressive strength and UPV of concrete reinforced with different types of fibers », Heliyon, vol 6, e03646.

Ige, O. A. (2017). « Key factors affecting distribution and orientation of fibres in steel fiber reinforced concrete and subsequent effects on mechanical properties », Thèse de Doctorat, Université de Portsmouth.

Noushini, A., Vessalas, K., Arabian, G., Samali, B. (2014). « Drying shrinkage behavior of fiber reinforced concrete incorporating polyvinyl alcohol fibres and fly ash », Advances in civil engineering, vol 2014.

Sebaibi, N., Benzerour, M., Abriak, N. E. (2014). «Influence of the distribution and orientation of fibres on a reinforced concrete with waste fibres and powders», *Construction and building materials*, vol 65, pages 254-263.

Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H. (2019). « Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape », *composites: part B*, vol 174, 107021.

Xie, T., Ozbakkaloglu, T. (2015). « Behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete-filled FRP tube columns under axial compression », *Engineering Structures*, vol 90, pages 158-171.

Yoo, D. Y., Yoon, Y.S., Banthia, N. (2015). « Prediction the post-cracking behavior of normal- and high-strength steel-fiber-reinforced concrete beams », *Construction and Building Materials*, vol 93, pages 477-485.

Youssari, F.Z., Taleb, O., Benosman, A.S. (2023). « Towards understanding the behavior of fiber-reinforced concrete in aggressive environments », *Construction and Building Materials*, vol 368, 130444.

Conclusion générale

Dans cette thèse, l'étude a porté sur l'impact des fibres métalliques sur le retrait de mortier et la position des fibres sur les caractéristiques mécaniques du matériau composite. Les facteurs (dosage, type, orientation, etc) qui ont un impact sur l'interaction des fibres d'acier avec la matrice de mortier ont été choisis, ainsi que différentes étapes d'expérimentation en laboratoire. L'étude a porté sur un seul type de mortier (mortier normal) préparé avec différents taux de fibres métalliques. Pour ce faire, plusieurs dispositifs expérimentaux ont été utilisés avec des protocoles d'essai adaptés aux compositions des mélanges.

En analysant les résultats précédemment présentés, il est clair que l'incorporation de fibres d'acier dans le mortier a eu un impact négatif sur sa maniabilité, tel que démontré par le test d'affaissement. La maniabilité du mortier renforcé de fibres d'acier a diminué à mesure que le dosage en fibres augmentait, atteignant son point le plus bas avec le dosage le plus élevé de 1,5%.

Les fibres métalliques possèdent une caractéristique distinctive : leurs extrémités en crochet agissent comme des points d'ancrage dans la matrice cimentaire, améliorant ainsi l'adhérence entre les fibres et le matériau environnant. Cette configuration renforce la capacité du matériau à résister aux forces de traction.

La mesure de la masse volumique apparente des mélanges de mortier, tant pour les références que pour ceux renforcés de fibres métalliques, effectuée au moyen d'éprouvettes prismatiques, a révélé une augmentation. Cette observation est attribuée à la présence des fibres métalliques à densité élevée dans le mélange.

Les fibres ont grandement influencé les propriétés mécaniques, incluant la résistance à la compression, à la flexion ainsi que le module d'élasticité dynamique (E_d), avec une résistance maximale constatée à un dosage de fibres de 1,5%.

Pendant toute la durée de l'étude, le retrait a été observé, surtout marqué pendant la première semaine. L'incorporation de fibres métalliques a permis de réduire les déformations liées au retrait des mortiers, englobant à la fois le retrait total, endogène et exogène.

De plus, toute forme de retrait est toujours associée à une perte de masse, et cette relation demeure linéaire. La pente de la ligne dépend de la géométrie des pores.

Perspectives

Ce mémoire a ouvert la voie à des sujets intéressants et peuvent s'exprimer comme suite :

- Etude de béton (mortier) fibré vis-à-vis la corrosion.

- Etude l'impact de combinaison de fibres métalliques avec des agents réducteurs de retrait.
- Etude améliorer la répartition des fibres dans le béton (mortier).