



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar – EL OUED

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

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

Option : Génie civil des matériaux

Thème :

**Valorisation des fibres végétales -sisal-par
exploitation en béton de sable**

Encadrant :

Dr. MANI MOHAMMED

Présenté par :

BOUTERA Amine

LABED Khaled

AIDANE Aymen

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, le Clément, le Miséricordieux, de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail. Je voudrais exprimer ma gratitude au Dr. Mani Mohammed qui supervisait cette thèse. Il m'a soutenu tout au long de ce travail, a été disponible et a apporté un soutien continu, m'offrant son assistance, sa confiance et des conseils précieux conformément à ses compétences et à ses véritables qualités humaines.

Je le remercie également pour les nombreuses heures qu'il a passées à lire et à corriger le manuscrit. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury. Tout d'abord, à M. Logabi Abdelaziz, "Maître de conférences de classe A", pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance, mes remerciements vont également à M. Beddadi Laid, "Maître de conférences de classe B", pour avoir accepté de rapporter cette thèse.

Je tiens à remercier le chef du département de technologie de l'Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, M. Chemsaa Ali, pour sa disponibilité et son soutien.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé et encouragé, que ce soit de près ou de loin. J'espère qu'ils trouveront ici l'expression de ma gratitude profonde. Et je ne peux pas non plus oublier de dédier ce travail à mes parents et à toute ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes divers choix académiques et personnels.



إهداء

الحمد لله والشكر له دائماً وأبداً، الحمد لله في السراء والضراء، الحمد لله حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه، والصلاة والسلام على خير الأنام، محمد بن عبد الله، الذي أضاءت برسالته طريق الحق والهداية.

أهدي هذا العمل المتواضع إلى:

****والدي ووالدي الغاليين****: أنتما من زرعتما في قلبي بذور حب العلم والسعي نحو النجاح. لقد كنتم دائماً الداعمين الأساسيين لي، وبفضل تشجيعكم ودعواتكم الدائمة، استطعت أن أحقق ما وصلت إليه اليوم. إن تضحياتكم وصبركم لا تقدر بثمن، ولا كلمات تعبر عن امتناني وحيي لكما.

****أخوتي الأعزاء****: أنتم من شهدتم معي متاعب الدراسة وسهر الليالي، وكنتم خير عون لي في دربي. لم تكن رحلتي لتكون كما هي بدون دعمكم المستمر وتواجدكم بجاني في الأوقات الصعبة.

****أصدقائي الأكارم****: رفاق خطوات النجاح، بدءاً من أول خطوة وانتهاءً بأخر خطوة. كنتم دائماً الحافز الذي يشجعني، والأصدقاء الذين يقفون بجاني في كل مراحل هذه الرحلة. دعمكم ومساندتكم لي كانا جزءاً أساسياً من نجاحي، وأشكركم على كل لحظة كنتم فيها بجاني.

****كل من علمني حرقاً وتمنى لي الخير سرّاً أو جهراً****: إلى كل من أسهم في تعليمي وتوجيهي، سواء كان ذلك في الفصل الدراسي أو خارج جدران المدرسة. إلى من أرسل لي نواياها الطيبة والدعوات الصادقة، شكراً من القلب على كل دعم وتوجيه ونصيحة. إن جهودكم لم تذهب سدى، وأثرت في مسيرتي بشكل كبير.

أختم هذه الكلمات بدعاء إلى الله أن يبارك في كل من ساندي ودعمني، وأن يوفق الجميع في مساعيهم وجهودهم. الحمد لله أولاً وأخيراً، والشكر لكل من كان جزءاً من رحلتي.

العابد خالد



إهداء

سبحان الله الذي كان سببا في النجاح والتوفيق الذي خلقنا وأنار لنا
السير في الطريق المستقيم

أهدي هذا العمل المتواضع لأمي اولا و أبي حفظهما الله وكل عائلتي،
أشكر كل من ساهم في نجاحنا و اتمام مذكرتنا

إلى القريبين من القلب والداعمين والمساندين في السراء والضراء شكرا
لكم.. دمتم لي

إلى أصدقائي الخطوة الأولى والخطوة الأخيرة إلى من كانوا في سنوات
العجاف سحبا ممطرة انا ممتن جدا لوقوفهم معي في هذا اليوم

إلى من علمونا حروفا من ذهب وكلمات من درر وعبارات من أسمى
عبارات العلم إلى من صاغوا من علمهم حروفا ومن أفكارهم منارة تنير لنا
سيرة العلم والنجاح إلى أساتذتنا الكرام

واخيرا

اسأل الله أن يوفقنا جميعا في درب الحياة

عيدان أيمن



إهداء

أهدي ثمرة جهدي إلى:

من وضعني في الأمام ورباني وعلمني الصواب إلى والدي: عبد العزيز.

وإلى نبع الحنان أمي الغالية: الزهرة.

وإلى سندي ومن شجعتني على إكمال دراستي زوجتي الغالية: شيماء.

إلى قرّة عيني ابني: محمد رائد.

بوقة أمين

Résumé

Résumé

L'ajout de fibres dans les matériaux de construction, notamment les bétons de sable et les bétons, est une méthode de plus en plus courante visant à améliorer leurs propriétés mécaniques, telles que la résistance à la flexion et à la fissuration. Ces propriétés sont influencées par divers facteurs, notamment les conditions de mise en œuvre et la distribution des fibres.

En Algérie, l'utilisation de matériaux locaux comme le marbre, produit en grande quantité, présente un potentiel important. Le marbre, souvent utilisé dans la construction et la décoration, peut également être transformé en fillers minéraux pour les bétons de sable, offrant ainsi des performances mécaniques accrues et valorisant les ressources locales.

Objectifs de la Recherche

- 1) Utilisation du Filler de Marbre : Explorer l'incorporation de fillers de marbre dans les bétons de sable pour améliorer leurs propriétés mécaniques et réduire l'impact environnemental de l'extraction du marbre.
- 2) Renforcement par Fibres de Sisal : Étudier le renforcement des bétons de sable avec des fibres de sisal, reconnues pour leur robustesse, afin d'améliorer la résistance à la traction et la ductilité des bétons de sable. Nous avons testé diverses compositions de bétons de sable avec trois taux de fibres (0,5 %, 1 % et 1,5 %) et deux longueurs de fibres (6 mm et 12 mm).

Méthodologie et Résultats

Nous avons évalué les bétons de sable à l'état frais et durci en termes de maniabilité, densité, résistance à la compression, à la traction, retrait, vitesse ultrasonique et absorption d'eau. Les résultats montrent que l'ajout de fibres de sisal améliore la résistance à la flexion, tandis que l'incorporation de 20 % de filler de marbre avec des fibres de sisal offre les meilleures performances mécaniques. Cependant, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres en raison de la création de micro-espaces. Malgré cela, les bétons de sable renforcés présentent une réduction notable du retrait et une meilleure compacité et homogénéité, ce qui augmente leur capacité à absorber les chocs et les vibrations.

En conclusion, l'utilisation de fillers de marbre et de fibres de sisal dans les bétons de sable améliore leurs propriétés mécaniques et valorise les ressources locales, offrant une solution durable et performante pour la construction.

Mots clés : bétons de sable, fibre de sisal, filler de marbre, résistances mécaniques.

Résumé

Abstract

The addition of fibers to construction materials, particularly sand concrete and conventional concrete, is an increasingly common method aimed at improving their mechanical properties, such as flexural strength and crack resistance. These properties are influenced by various factors, including implementation conditions and fiber distribution.

In Algeria, the use of local materials like marble, which is produced in large quantities, presents significant potential. Marble, often used in construction and decoration, can also be transformed into mineral fillers for sand concrete, thus offering enhanced mechanical performance while valorizing local resources.

Research Objectives

- 1) Use of Marble Filler: To explore the incorporation of marble fillers in sand concrete to improve its mechanical properties and reduce the environmental impact of marble extraction.
- 2) Reinforcement with Sisal Fibers: To study the reinforcement of sand concrete with sisal fibers, known for their robustness, in order to improve the tensile strength and ductility of sand concrete. We tested various compositions of sand concrete with three fiber contents (0.5%, 1%, and 1.5%) and two fiber lengths (6 mm and 12 mm).

Methodology and Results

We evaluated the sand concrete in both fresh and hardened states in terms of workability, density, compressive strength, tensile strength, shrinkage, ultrasonic pulse velocity, and water absorption. The results show that the addition of sisal fibers significantly improves the flexural strength, while the incorporation of 20% marble filler with sisal fibers offers the best mechanical performance. However, compressive strength decreases with the increase in fiber content due to the creation of micro-spaces. Despite this, the reinforced sand concrete exhibits a notable reduction in shrinkage and better compaction and homogeneity, enhancing its capacity to absorb shocks and vibrations.

In conclusion, the use of marble fillers and sisal fibers in sand concrete improves its mechanical properties and valorizes local resources, providing a sustainable and high-performance solution for construction.

Keywords: sand concrete, sisal fiber, marble filler, mechanical strengths.

Résumé

المخلص

يعدُّ إضافة الألياف إلى مواد البناء، لا سيما الخرسانة الرملية والخرسانة التقليدية، طريقةً شائعةً بشكلٍ متزايد بهدف تحسين خصائصها الميكانيكية، مثل قوة الانحناء ومقاومة التصدع. تتأثر هذه الخصائص بعوامل مختلفة، بما في ذلك ظروف التنفيذ وتوزيع الألياف.

في الجزائر، يُعدُّ استخدام المواد المحلية مثل الرخام، الذي يُنتج بكميات كبيرة، ذا إمكانيات كبيرة. يُستخدم الرخام، الذي غالبًا ما يُستخدم في البناء والديكور، أيضًا كمادة مضافة معدنية في الخرسانة الرملية، مما يوفر أداءً ميكانيكيًا مُحسَّنًا ويُعزِّز الموارد المحلية.

أهداف البحث

(1) استخدام مسحوق الرخام: استكشاف دمج مسحوق الرخام في الخرسانة الرملية لتحسين خصائصها الميكانيكية وتقليل الأثر البيئي لاستخراج الرخام.

(2) تعزيز الألياف النباتية من السيزال: دراسة تعزيز الخرسانة الرملية بألياف السيزال المعروفة بمتانتها، بهدف تحسين قوة الشد وليونة الخرسانة الرملية. قمنا باختبار تركيبات مختلفة من الخرسانة الرملية بثلاثة نسب من الألياف (0.5%، 1%، و1.5%) وطولَي ألياف (6 مم و12 مم).

المنهجية والنتائج

قمنا بتقييم الخرسانة الرملية في حالتها الطازجة والمتصلبة من حيث قابلية التشغيل، الكثافة، مقاومة الضغط، مقاومة الشد، الانكماش، سرعة النبضات فوق الصوتية، وامتصاص الماء. أظهرت النتائج أن إضافة ألياف السيزال تحسن بشكل كبير من قوة الانحناء، في حين أن دمج 20% من مسحوق الرخام مع ألياف السيزال يوفر أفضل أداء ميكانيكي. ومع ذلك، تنخفض مقاومة الضغط مع زيادة نسبة الألياف بسبب تكوين فراغات دقيقة. على الرغم من ذلك، تُظهر الخرسانة الرملية المعززة انخفاضًا ملحوظًا في الانكماش وتحسنًا في الكثافة والتجانس، مما يزيد من قدرتها على امتصاص الصدمات والاهتزازات..

في الختام، إن استخدام مسحوق الرخام وألياف السيزال في الخرسانة الرملية يُحسِّن خصائصها الميكانيكية ويُعزِّز الموارد المحلية، مما يوفر حلاً مستدامًا وعالي الأداء للبناء..

الكلمات الرئيسية: الخرسانة الرملية، ألياف السيزال، مسحوق الرخام، القوى الميكانيكية.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------|-----|
| REMERCIEMENTS..... | I |
| DEDICACE..... | II |
| RESUME..... | V |
| ABSTRACT..... | VI |
| ملخص..... | VII |
| LISTES DES FIGURES..... | XI |
| LISTE DES TABLEAUX..... | XIV |
| Introduction générale..... | 1 |

TABLE DE MATIÈRES

| | |
|--|----|
| I. Chapitre I : généralité sur le béton de sable | 4 |
| I.1. Introduction | 4 |
| I.2. Généralité..... | 4 |
| I.3. Définition..... | 4 |
| I.4. Composants du béton de sable | 5 |
| I.4.1. Les Sables :..... | 5 |
| I.4.2. Les ciments : | 5 |
| I.4.3. L'eau de gâchage : | 6 |
| I.4.4. Les adjuvants :..... | 6 |
| I.4.5. Les fines d'ajouts :..... | 8 |
| I.5. Propriétés des bétons de sable..... | 10 |
| I.6. Domaines d'utilisation et application du béton de sable | 12 |
| I.6.1 Les bétons non vibrés : | 13 |
| I.6.2 Les bétons projetés : | 13 |
| I.6.3 Les travaux d'injection : | 14 |
| I.6.4 La préfabrication : | 14 |
| I.6.5 Béton de sable coulé : | 14 |
| I.7. Avantages et limites d'emploi des bétons de sable | 14 |
| I.7.1 Avantages des bétons de sable : | 14 |
| I.7.2 Limites des bétons de sable : | 15 |
| I.8. Conclusion..... | 15 |
| II. Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales | 17 |
| II.1. Introduction | 17 |

SOMMAIRE

| | | |
|---------|---|----|
| II.2. | Fibres naturelles | 17 |
| II.2.1 | Définition des fibres naturelles : | 17 |
| II.2.2 | Classification des fibres naturelles : | 17 |
| II.3. | Fibres végétales..... | 18 |
| II.3.1 | Définition de la fibre végétale : | 18 |
| II.3.2 | Classification des fibres végétales :..... | 18 |
| II.3.3 | Structure générale d'une fibre végétale | 20 |
| II.3.4 | Composition chimique d'une fibre végétale..... | 21 |
| II.4. | Propriétés des fibres végétales | 25 |
| II.4.1 | Propriétés physiques des fibres végétales : | 25 |
| II.4.2 | Propriétés mécaniques des fibres végétales : | 26 |
| II.4.3 | Avantages et inconvénients des fibres végétales | 26 |
| II.4.4 | Application des fibres végétales | 27 |
| II.4.5 | La fibre de sisal..... | 29 |
| II.5. | Conclusion..... | 36 |
| III. | Chapitre III : PROCEDURE EXPERIMENTALE ET MATERIAUX | 37 |
| III.1 | Introduction | 37 |
| III.2 | Matériaux utilisés | 37 |
| III.2.1 | Ciment | 37 |
| III.2.2 | Additions minérales | 38 |
| III.2.3 | Sable | 39 |
| III.2.4 | Fibres de sisal..... | 42 |
| III.2.5 | Eau de gâchage | 43 |
| III.2.6 | Superplastifiant | 43 |
| III.3 | Méthode de formulation des bétons de sable..... | 44 |
| III.3.1 | Formulation des bétons de sable témoin | 44 |
| III.3.2 | Composition du béton de sable de Fibres | 44 |
| III.3.3 | Composition du béton de sable avec filet de marbre | 45 |
| III.4 | Confection des éprouvettes..... | 46 |
| III.4.1 | Malaxage et vibration | 46 |
| III.4.2 | Conservation des éprouvettes..... | 47 |
| III.5 | Caractérisation des bétons de sable à l'état frais | 47 |
| III.5.1 | Masse volumique | 47 |
| III.5.2 | Maniabilité | 48 |
| III.6 | Résultats et interprétation | 52 |

SOMMAIRE

| | | |
|---------|--|----|
| III.6.1 | Maniabilité des béton de sable | 48 |
| III.6.2 | Compacité des bétons de sable | 50 |
| III.7 | Conclusion..... | 52 |
| IV. | Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable | 54 |
| IV.1 | Introduction | 54 |
| IV.2 | Essais physico-mécaniques | 54 |
| IV.2.1 | Masse Volumique..... | 54 |
| IV.2.2 | Absorption d'eau | 54 |
| IV.2.3 | Essai de compression..... | 54 |
| IV.2.4 | Essai de traction par flexion | 55 |
| IV.2.5 | Essai de Retrait..... | 56 |
| IV.2.6 | Essai d'auscultation sonore (Essai non destructif)..... | 57 |
| IV.3 | Résultats et discussion..... | 58 |
| IV.3.1 | Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable, avec et sans fibres | 58 |
| IV.3.2 | Absorption d'eau | 67 |
| IV.3.3 | Effet du taux de fibres sur l'évolution du retrait des bétons de sable | 69 |
| IV.3.4 | Effet du taux de fibres sur la vitesse d'impulsion ultrasonique (Essai non destructif).. | 71 |
| IV.4 | Mode de rupture..... | 71 |
| IV.5 | Conclusion..... | 73 |

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Figure I.1 Effet de l'ajout du superplastifiant sur la dispersion des grains de ciment (Amélioration du rendement cimentaire). [3] | 7 |
| Figure I.2 Table à secousses. [13]. | 10 |
| Figure I.3 Principe de fonctionnement du maniabilimètre. [13]. | 11 |
| Figure I.4 Le béton de sable peut être utilisé pour la projection sur des surfaces anciennes. [19] ... | 13 |
| Figure I.5 Réalisation d'une piscine. [19] | 13 |
| Figure II.1 Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine. [23] | 18 |
| Figure II.2 tissus de fibres végétales. [27] | 19 |
| Figure II.3 Illustration de la structure détaillée d'une fibre lignocellulosique. [30] | 20 |
| Figure II.4 Arrangement des micros fibrilles et de la cellulose dans la paroi cellulaire végétale. [33] | 21 |
| Figure II.5 Composition d'une fibre végétale. [38] | 22 |
| Figure II.6 Structure de la cellulose. [40] | 23 |
| Figure II.7 Analyse détaillée de la structure complexe de la microfibrille de cellulose. [41]. | 23 |
| Figure II.8 Morphologie de cellulose. [42] | 24 |
| Figure II.9 Structure moléculaire de l'hémicellulose. [43] | 24 |
| Figure II.10 Structure de la lignine .[44] | 25 |
| Figure II.11 Différentes utilisations des fibres végétales : a) corde artisanale, b) couffins artisanaux, c) cordages, d) tapis artisanaux, e) voiles de bateaux. | 28 |
| Figure II.12 Plante de sisal..... | 29 |
| Figure II.13 (a) Plante de sisal, (b) fibre extraite de la plante, (c) cordes fabriquées à partir de la fibre de sisal et (d) fibre de sisal utilisée dans ce travail. [53] | 30 |
| Figure II.14 Différentes étapes de la méthode d'extraction de la fibre. (a) Les lames plongées dans l'eau ; (b) biodégradation des fibres après 15 à 21 jours à température supérieure à 25°C ; (c) fibres lavées à l'eau et séchées à l'air et au soleil ; (d) fibres finales obtenues. [53] | 31 |
| Figure II.15 Lame après 90 à 100 jours de l'enfouissement. [55] | 32 |
| Figure II.16 Fibres de sisal (Agave americana) obtenues. [55] | 32 |
| Figure II.17 Utilisation du sisal entre 2000 et 2015 (plus de 500 t/an). [52] | 34 |
| Figure III.1 Photo de filler de marbre | 39 |
| Figure III.2 Photo de sable de dune utilisé. | 40 |
| Figure III.3 Mesure de la masse volumique apparente..... | 40 |
| Figure III.4 Mesure de la masse volumique absolue. | 40 |
| Figure III.5 Courbe granulométrique de sable utilisé..... | 41 |
| Figure III.6 Fibre de sisal..... | 42 |
| Figure III.7 (a) Profil de la fibre de sisal (b) section droite de la fibre de sisal. | 42 |
| Figure III.8 Superplastifiant VISCOCRETE TEMPO 12. | 44 |
| Figure III.9 Elaboration des bétons de sable..... | 46 |
| Figure III.10 Fabrication et moulage des éprouvettes. | 47 |
| Figure III.11 Conservation des éprouvettes..... | 47 |
| Figure III.12 Essai d'étalement à la table à secousses..... | 48 |
| Figure III.13 Maniabilité des bétons de sable témoin et béton de sable avec 20% filler du marbre. | 49 |
| Figure III.14 Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal..... | 49 |
| Figure III.15 Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal et 20% filler du marbre..... | 50 |
| Figure III.16 Masse volumique des bétons de sable témoin et béton de sable avec 20% filler du marbre..... | 51 |
| Figure III.17 Masse volumique des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal..... | 51 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure III.18 Masse volumique des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal et 20% du filler de marbre | 52 |
| Figure IV.1 Description d'essai de compression. | 55 |
| Figure IV.2 Description d'essai de traction par flexion. | 56 |
| Figure IV.3 Description d'essai de mesure du retrait..... | 57 |
| Figure IV.4 Description d'essai de la mesure de la vitesse de son. | 58 |
| Figure IV.5 Masse volumique à l'état durcis des bétons de sable témoin et béton de sable avec 20% filler du marbre..... | 59 |
| Figure IV.6 Masse volumique à l'état durcis des bétons de sable témoin et béton de sable avec fibre de sisal et 20% filler du marbre..... | 59 |
| Figure IV.7 Effet de filler de marbre sur la résistance en traction par flexion..... | 60 |
| Figure IV.8 Effet du taux de fibres de sisal sur la résistance en traction par flexion..... | 61 |
| Figure IV.9 Effet du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en traction par flexion..... | 62 |
| Figure IV.10 Effet de la longueur de fibres de sisal sur la résistance en traction par flexion..... | 63 |
| Figure IV.11 Effet de filler de marbre sur la résistance en compression. | 63 |
| Figure IV.12 Effet du taux de fibres de sisal sur la résistance en compression. | 64 |
| Figure IV.13 Effet du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en compression. . | 65 |
| Figure IV.14 Effet du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en compression. . | 65 |
| Figure IV.15 Effet de la longueur de fibres de sisal sur la résistance en compression. | 66 |
| Figure IV.16 Effet de la longueur de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en compressions. | 67 |
| Figure IV.17 Absorption d'eau des bétons de sable témoin et avec fibre de sisal et 20% de filler de marbre..... | 69 |
| Figure IV.18 Evolution du retrait des bétons de sable selon le taux de fibres..... | 70 |
| Figure IV.19 Effet du taux de fibres sur la vitesse d'impulsion ultrason. | 71 |
| Figure IV.20 Mode de rupture des bétons de sable en compression..... | 71 |
| Figure IV.21 Mode de rupture de béton de sable témoin..... | 72 |
| Figure IV.22 Mode de rupture de béton de sable avec 0,5% de fibre de sisal..... | 72 |

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 La relation entre la taille des grains et la quantité de ciment est importante. [1]. | 9 |
| Tableau II-1 Composition chimique de quelques fibres végétales.[37] | 22 |
| Tableau II-2 Caractéristiques morphologiques de quelques fibres végétales.[45] [47]. | 26 |
| Tableau II-3 Caractéristiques botaniques de la plante de sisal. | 38 |
| Tableau III-1 Caractéristiques physiques et mécanique du ciment. | 38 |
| Tableau III-2 Composition chimique du ciment. | 39 |
| Tableau III-3 Composition chimique du filler de marbre. | 39 |
| Tableau III-4 Caractéristiques physiques du filler de marbre. | 39 |
| Tableau III-5 Propriétés physiques de sable. | 41 |
| Tableau III-6 Composition chimique de fibre de sisal en % massique. | 43 |
| Tableau III-7 Propriétés physiques de fibre de sisal. | 43 |
| Tableau III-8 Composition des bétons de sable témoin et béton de sable avec substitution de 20% de filler du marbre. | 45 |
| Tableau III-9 Composition des bétons de sable à base de fibre de sisal. | 45 |
| Tableau III-10 Composition des bétons de sable à base de filler du marbre et fibre de sisal. | 45 |

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation des fibres dans le béton constitue une solution efficace pour améliorer les propriétés mécaniques du composite. L'introduction des fibres dans le béton permet de créer un matériau durable avec d'excellentes performances mécaniques. En effet, l'ajout de fibres dans le béton permet d'améliorer de nombreuses caractéristiques, telles que : i) la réduction de l'apparition des fissures dues au retrait de séchage, ii) la diminution de la propagation et de la largeur des fissures, iii) l'augmentation de la ductilité et de la résistance à la traction, et iv) l'augmentation de la résistance à l'abrasion.

Cependant, le coût élevé des fibres a conduit les chercheurs à explorer les fibres naturelles comme alternative aux fibres conventionnelles. Ces fibres sont également résistantes et moins coûteuses que les fibres commerciales. Les fibres naturelles présentent d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques, tout en étant renouvelables et recyclables. Elles peuvent remplacer les fibres de verre et de carbone dans de nombreux domaines d'application.

L'industrie des fibres naturelles est en pleine expansion grâce aux nombreux avantages qu'elles offrent à divers secteurs (textile, automobile, bâtiment, etc.). De plus, le marché des fibres naturelles devrait connaître une forte croissance entre 2019 et 2025. Le coton, par exemple, est l'une des fibres naturelles les plus produites, représentant plus de 80 % de la production mondiale.

Grâce à leur faible coût d'extraction, l'incorporation des fibres naturelles dans différents matériaux permet de concevoir des matériaux bioéconomiques et écologiques qui protègent l'environnement et réduisent les émissions de gaz à effet de serre. Le renforcement des matériaux cimentaires par des fibres végétales est relativement nouveau comparé à l'utilisation de fibres d'amiante ou d'acier. La caractérisation de ce nouveau composite nécessite donc de nombreuses recherches, essais et le développement de nouveaux procédés expérimentaux.

Face à l'évolution des matériaux composites, le béton et le béton de sable ne font pas exception. Chercheurs et producteurs de fibres ont donc exploré l'incorporation de fibres comme matériau de renforcement dans les matrices cimentaires. Depuis, l'utilisation des fibres dans le béton est devenue de plus en plus courante. Ces nouveaux composites se sont révélés capables de limiter et de contrôler la fissuration sous sollicitations mécaniques, tout en améliorant la résistance à la flexion et aux chocs.

En génie civil, l'objectif principal est de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments en utilisant des matériaux de construction performants sur le plan thermique, tout en diminuant le coût et l'énergie de leur fabrication, ainsi que leur impact environnemental. À cet égard, l'utilisation des fibres végétales représente une solution alliant performance technique et environnementale. Plusieurs études confirment que l'intégration de fibres végétales dans le béton de sable est avantageuse, compte tenu de leur abondance et de leurs impacts socio-économiques et environnementaux.

L'Algérie possède des ressources extraordinaires en fibres végétales (palmier, alfa, coton, sisal, etc.), mais leur valorisation dans les domaines pratiques, notamment les matériaux de construction, reste peu exploitée. De nombreux procédés de développement de nouveaux matériaux innovants sont proposés par des chercheurs pour répondre aux exigences environnementales de plus en plus strictes.

Introduction générale

L'idée d'introduire les fibres végétales dans le domaine du génie civil ne date pas d'aujourd'hui. En s'appuyant sur les travaux de plusieurs chercheurs dans ce domaine, nous avons entrepris une étude sur le comportement physico-mécanique d'un béton de sable à base de fibres de sisal.

Le travail initié dans le cadre de ce mémoire consiste en la caractérisation expérimentale, à l'état frais et à l'état durci, de bétons de sable à base de fibres végétales de sisal traitées chimiquement. L'objectif est d'identifier l'effet de cette fibre végétale et son dosage sur les propriétés des bétons de sable.

Pour réaliser ce travail, une recherche bibliographique sur les bétons de sable fibrés et l'importance d'utiliser les fibres végétales dans la matrice cimentaire, donc dans un béton de sable classique, est nécessaire.

Le travail de recherche est structuré en quatre chapitres et se termine par une conclusion générale et des perspectives:

- 1- Le premier chapitre est une analyse bibliographique sur les bétons de sable (définitions, types, classifications et propriétés, etc.).
- 2- Dans le deuxième chapitre, une étude bibliographique sur les fibres végétales est présentée.
- 3- Le troisième chapitre présente l'étude expérimentale, la caractérisation de tous les matériaux (ciment, sable, super plastifiant, fibre végétale) utilisés pour la confection des différents échantillons, ainsi que la méthode de formulation des différents bétons de sable. Les paramètres de variation de la longueur et les différents dosages de fibres incorporées dans la matrice du béton de sable sont présentés sous forme de tableaux, et les propriétés des bétons de sable à l'état frais sont présentées sous forme de diagrammes avec interprétation des résultats obtenus.
- 4- Le quatrième chapitre propose un protocole d'essai pour la caractérisation mécanique des bétons de sable élaborés. Les résultats des essais de compression simple et des essais de flexion trois points sont représentés sous forme d'histogrammes et de courbes interprétées.

Enfin, une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de fibres de sisal. Des perspectives de recherche sont également présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes à ces matériaux de génie civil.

Chapitre I : généralité sur le béton de sable

Chapitre I : généralité sur le Béton de sable

I. Chapitre I : généralité sur le béton de sable

I.1. Introduction

Le béton de sable, un matériau de construction utilisé depuis longtemps avant l'avènement du béton traditionnel, suscite désormais un regain d'intérêt parmi les chercheurs. Dans un contexte où les gros granulats deviennent rares dans certaines régions et où les coûts de transport augmentent, l'abondance des sables offre une alternative économique et écologique prometteuse. Avec sa composition principalement à base de sable, ce matériau bénéficie de l'abondance quasi-illimitée de cette ressource en Algérie, ce qui en fait un substitut potentiel aux granulats du béton conventionnel. En outre, le béton de sable présente des propriétés spécifiques attrayantes telles qu'une excellente maniabilité et cohésion, une bonne adaptation aux environnements fortement armés, ainsi que des qualités esthétiques. Dans les régions riches en sable, il peut également offrir des économies par rapport au béton traditionnel.

Dans ce premier chapitre, on présente les différents composants et les principales propriétés du béton de sable.

I.2. Généralité

Le béton de sable, introduit en France par F. Coignet à la fin du 19^{ème} siècle, a été utilisé dans des projets tels que le mur de soutènement à Passy et la maison Coignet à Saint-Denis, ainsi que dans des constructions emblématiques comme la tour de Port Saïd en Égypte et le pont de New York. Après la Seconde Guerre mondiale, le professeur académicien Rebindet a favorisé son utilisation dans divers domaines, propulsant sa production à des volumes significatifs. [1]

En France, malgré l'abondance de gros granulats jusqu'aux années 1970-1980, l'intérêt pour le béton de sable a émergé en raison de la limitation de l'extraction des granulats des rivières pour préserver l'écosystème. Ainsi, le sable, ressource abondante, est devenu le principal constituant de ces nouveaux bétons, similaire aux bétons traditionnels. [2]

Les recherches ultérieures, menées par différentes institutions et laboratoires, ont examiné divers aspects du béton de sable, notamment sa composition, ses propriétés mécaniques et son comportement dans diverses applications. Cependant, malgré les progrès réalisés, des défis persistent quant à son utilisation à grande échelle. [3]

I.3. Définition

Le béton de sable, tel que défini par la norme NF P 18-500, est principalement composé de ciment, de sable, d'eau et de filler naturel ou industriel. Sa caractéristique principale est son fort dosage en sable (s), associé à l'absence ou à une faible proportion de gravillons (avec un rapport pondéral Gravillons/sable inférieur à 0,7), ce qui le distingue du béton traditionnel. De plus, il se différencie des bétons de sable par une teneur en ciment moins élevée et, surtout, par son utilisation en tant que matériau de construction, similaire au béton traditionnel. [4]

I.4. Composants du béton de sable

Le béton de sable, constitué de liant (chaux ou ciment), de sable et d'eau, requiert désormais l'utilisation d'adjuvants pour répondre aux propriétés diverses nécessaires selon l'application et les performances souhaitées. En plus de sa composition de base, l'ajout possible de gravillons, de fibres ou d'adjuvants spécifiques permet de répondre aux besoins particuliers de divers projets. [1]

I.4.1. Les Sables :

Le terme "sable" fait référence à tous les granulats 0/D conformes aux normes NF P 18-301 et NF P 18-101, qu'il s'agisse de sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, ou de sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. Aucun critère granulométrique n'est initialement requis pour la fabrication du béton de sable : il est possible d'utiliser aussi bien un sable fin (même homométrique, tel que le sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou encore un O/D de concassage. La seule restriction quant à l'utilisation des sables réside dans leur propreté. Ils proviennent de deux sources :

- Les granulats naturels, provenant de la mer, des oueds ou du Sahara, sont largement utilisés dans la majorité des constructions.
- Les granulats de concassage, issus du broyage des granulats de carrière, et dans une moindre mesure du recyclage des déchets de construction, sont également employés. [5]

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour le béton de sable est :

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- Fins : jusqu'à 1,6 mm
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm
- Gros : jusqu'à 6.3 mm.

I.4.2. Les ciments :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température et le broyage d'un mélange minéral composé principalement de calcaire et d'argile. Le clinker est le principal constituant des ciments, et ces poudres contiennent des sels minéraux anhydres instables, notamment des silicates de chaux, qui, lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau, forment une pâte capable de durcir progressivement par hydratation. Cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau, ce qui justifie le terme de "liant hydraulique". Les différents types de ciments sont caractérisés par leurs constituants principaux et secondaires. [1] [5]

I.4.2.1. La classification des ciments se fait selon leur composition : [6]

Les ciments, composés de clinker et des éléments énumérés, sont classés en cinq types principaux selon leur composition, conformément aux normes NF P 15-301 et EN 197-1. Ils sont désignés par CEM et numérotés de I à V en chiffres romains dans la notation européenne (l'ancienne notation française est mentionnée entre parenthèses) :

- CEM I : Ciment Portland Artificiel (CPA).
- CEM II : Ciment Portland Composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau (CHF).
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment Composé (ou ciment au laitier et aux cendres : CLC).

I.4.3. L'eau de gâchage :

L'eau représente un ingrédient indispensable dans la composition du béton de sable. Elle remplit deux fonctions principales : elle confère au béton sa maniabilité à l'état frais et favorise l'hydratation des grains de ciment, permettant ainsi la prise et le durcissement du mélange. La quantité d'eau utilisée, ou plus précisément le rapport eau/ciment, exerce une influence significative sur divers aspects du béton de sable, tels que sa porosité, sa perméabilité, ses propriétés mécaniques, sa durabilité, sa microstructure, la cinétique d'hydratation, entre autres. [7]

I.4.4. Les adjuvants :

I.4.4.1. Définition :

Les adjuvants, agents chimiques ajoutés en petites quantités, modifient certaines propriétés du béton telles que la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Bien qu'ils aient plusieurs actions secondaires, les types d'adjuvants sont définis en fonction de leur action principale.

Les bétons de sable utilisent les mêmes adjuvants que les bétons traditionnels, exploitant ainsi les mêmes propriétés. Cependant, la spécificité du béton de sable favorise l'utilisation de plastifiants ou de superplastifiants, qui améliorent la maniabilité et souvent augmentent la résistance en réduisant la teneur en eau et en défloculant les éléments fins.

I.4.4.2. Classification des adjuvants :

La norme [8] classe les adjuvants pour bétons, bétons de sable et coulis en fonction de leur principale fonction. On peut les regrouper en trois grandes catégories :

I.4.4.2.1. Les adjuvants améliorant l'ouvrabilité du béton :

Ces agents chimiques ajustent le comportement rhéologique des bétons, bétons de sable et coulis lorsqu'ils sont frais, avant le début de la prise. Ils réduisent la contrainte de cisaillement de la pâte et modifient sa viscosité. [9]

➤ Les plastifiants et les réducteurs d'eau :

Ces produits permettent de réduire la quantité d'eau dans le béton sans altérer sa consistance, ou d'augmenter son étalement sans modifier la teneur en eau, voire d'agir simultanément sur les deux aspects. [10]

➤ Les superplastifiants, ou hauts réducteurs d'eau :

Ces agents, tout en préservant la consistance du mélange, permettent une réduction significative de la teneur en eau du béton ou, sans altérer cette dernière, augmentent considérablement l'affaissement (ou l'étalement), voire agissent simultanément sur les deux aspects. Ils représentent une innovation plus récente, offrant des réductions d'eau plus importantes, généralement entre 20 % et 30 %. Ils se déclinent en trois types : naphthalène-sulfonate, résine mélamine et, plus récemment, éther polycarboxylique.[6] [10]

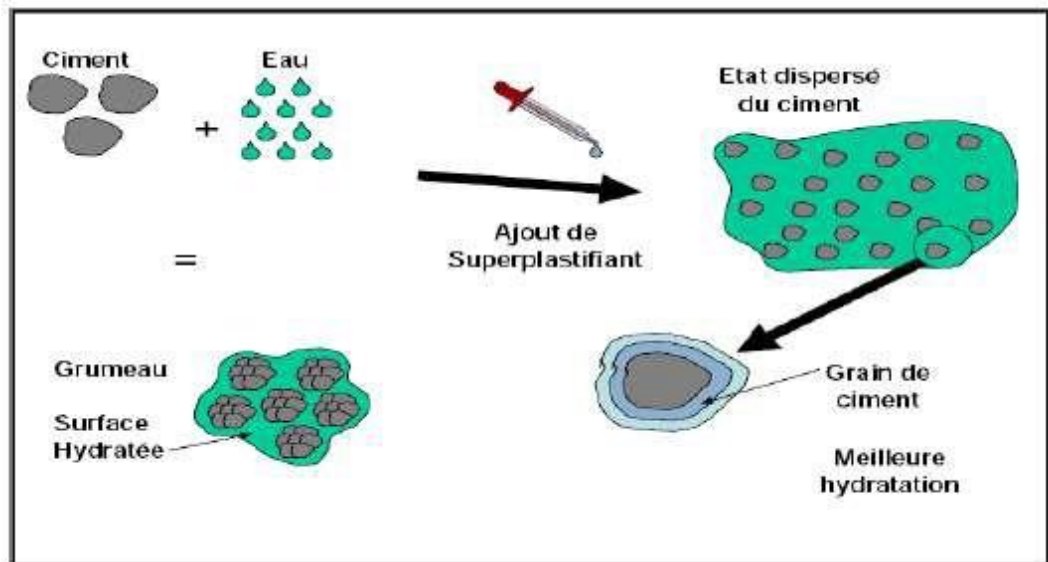


Figure I.1. : Effet de l'ajout du superplastifiant sur la dispersion des grains de ciment (Amélioration du rendement cimentaire). [3]

I.4.4.2.2. Adjuvants influençant le processus de prise et de durcissement :

Ces agents modifient la solubilité des divers constituants des ciments, en particulier leur vitesse de dissolution. Leur impact se manifeste par une évolution distincte de la résistance d'un béton, béton de sable ou coulis lorsqu'ils sont adjuvés, par rapport à celui d'un échantillon témoin. On peut classer ces adjuvants en deux catégories distinctes. [9]

➤ Accélérateurs de prise et de durcissement :

Certains accélérateurs réduisent le temps nécessaire au passage du mélange de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont souvent utilisés dans le domaine de la préfabrication. D'autres accélérateurs augmentent la vitesse à laquelle les premières résistances du béton se développent, avec ou sans altération du temps de prise. Ils sont particulièrement utiles par temps froid.

➤ Retardateurs de prise :

Ces adjuvants prolongent le temps nécessaire au passage du mélange de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont généralement utilisés lorsque les températures sont élevées. [10]

I.4.4.2.3. Adjuvants altérant certaines propriétés du béton :

On peut classer ces adjuvants en deux catégories distinctes :

➤ Agents entraîneurs d'air :

En injectant des bulles d'air, on protège le béton contre le gel, renforçant ainsi sa résistance aux cycles de gel et dégel. Ce processus consiste à permettre au gel de chasser l'eau vers les bulles d'air présentes dans le béton. Lors de l'utilisation de ces agents, la quantité d'espaces d'expansion n'est pas le seul critère important ; la distance maximale entre n'importe quel point et une bulle d'air ne doit généralement pas dépasser 200 micromètres.

➤ Hydrofuges :

Ces adjuvants limitent la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, préservant ainsi ses propriétés plastiques et esthétiques, sans les altérer. [10]

I.4.5. Les fines d'ajouts :

La compacité est une caractéristique essentielle du béton en général. Plusieurs facteurs influent sur cette compacité : [1]

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- L'énergie utilisée pour le placement du béton.

Pour obtenir une compacité optimale, il est important de suivre certaines règles en fonction de la granulométrie. En gros, les particules fines remplissent les espaces vides entre les particules plus grosses, un peu comme les tables gigognes. Les particules fines sont principalement constituées de ciment, car la quantité de ciment nécessaire pour assurer la résistance est corrélée à celle requise pour une bonne compacité. Cette relation entre le besoin de fines et le dosage en ciment est exprimée par la règle bien connue :

$$C = 550/\sqrt[5]{D} \quad \text{ou} \quad C = 700/\sqrt[5]{D} \quad (\text{selon l'usage du béton}),$$

où C est le dosage minimal en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat utilisé. (**Tab I.1**)

Tableau I.1 La relation entre la taille des grains et la quantité de ciment est importante. [1]

| Granularité | $\sqrt[5]{D}$ | $550/\sqrt[5]{D}$ | $700/\sqrt[5]{D}$ | |
|-------------|---------------|-------------------|-------------------|----------------|
| 0/25 | 1.904 | 290 | 370 | BETON |
| 0/20 | 1.821 | 300 | 385 | |
| 0/16 | 1.741 | 315 | 400 | |
| 0/8 | 1.516 | 360 | 460 | |
| 0/6.3 | 1.445 | 380 | 480 | |
| 0/4 | 1.320 | 415 | 530 | MORTIER |
| 0/2 | 1.149 | 480 | 610 | |
| 0/1 | 1.000 | 550 | 700 | |

On distingue deux types de fines dans les mélanges de béton : les fines actives (telles que les laitiers moulus, les cendres volantes, le fumé de silice, les pouzzolanes broyées...) et les fines inertes (comme les fines calcaires ou issues du broyage de roches massives...). Les dosages en fines additives peuvent être significatifs, variant généralement entre 70 et 220 kg/m³, voire plus. En conséquence, leurs caractéristiques (origine géologique, forme, etc.) influent considérablement sur les propriétés du mélange utilisé. À dosage constant en fines additives :

- La maniabilité s'améliore lorsque le rapport eau/ciment augmente.
- Pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines additives. Parmi les fines additives, on peut citer la fumée de silice (fines actives) et les fillers calcaires (fines inertes).

Le terme "filler" désigne tout matériau obtenu par broyage ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, bentonite, cendres volantes...) naturelles ou artificielles, dont le plus gros grain ne dépasse pas 0,2 mm. L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer diverses propriétés du béton, à l'état frais (meilleure maniabilité, réduction du ressuage...) et durci (diminution de la perméabilité, réduction des risques de fissuration...). L'impact du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse : un filler finement broyé permet de réduire la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une maniabilité donnée

- **Filler calcaire**

Le filler calcaire, non réactif comme la pouzzolane, présente l'avantage de sa finesse, ce qui permet d'ajuster la granulométrie des mélanges de béton. Son ajout peut servir à plusieurs fins, comme compléter la courbe granulométrique d'un ciment pauvre en fines particules, ou enrichir la granulométrie du sable, notamment dans le cas des bétons de sable. De plus, les fillers peuvent influencer le processus d'hydratation, occuper les pores

Chapitre I : généralité sur le Béton de sable

capillaires (réduisant la perméabilité), et affecter les propriétés rhéologiques du béton.
[11] [12]

I.5. Propriétés des bétons de sable

I.5.1 Ouvrabilité : L'ouvrabilité d'un béton de sable se mesure à l'aide de divers appareils.

Les plus connus sont : [13]

I.5.2 Table à secousses : Après le démoulage du béton de sable, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule :

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i} \quad (\text{Eq I.1})$$

Avec : D_r : diamètre final
 D_i : diamètre initial

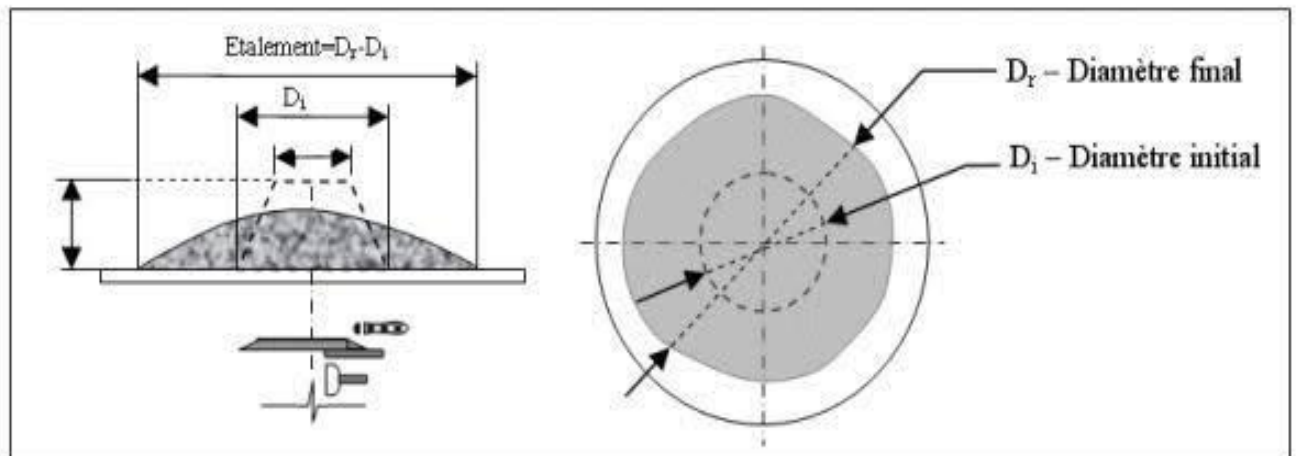


Figure I.2. Table à secousses. [13]

I.5.3 Maniabilimètre du LCPC : Cet essai implique l'utilisation d'un moule parallélépipédique équipé d'une paroi mobile et d'un vibreur. Le processus de test implique de retirer la paroi mobile et de mesurer le temps nécessaire au béton de sable, sous l'effet des vibrations, pour atteindre un repère gravé sur la face interne du moule.

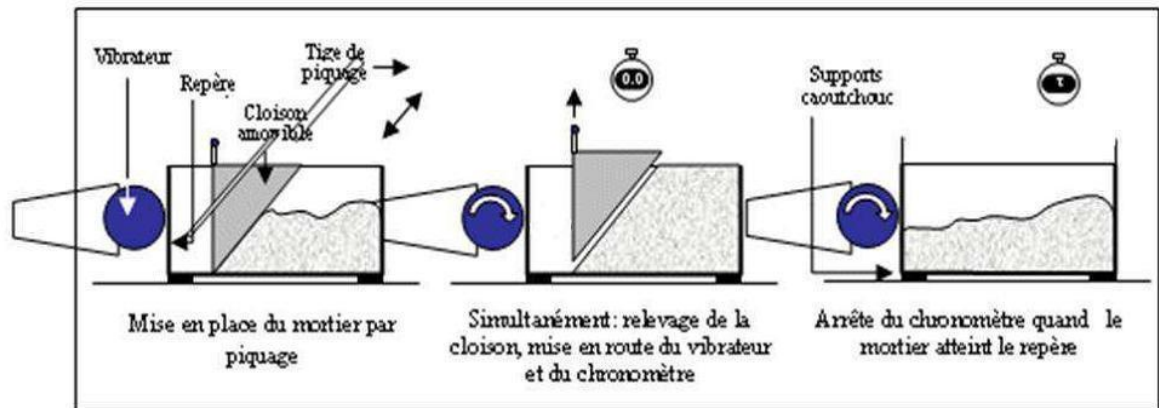


Figure I.3. Principe de fonctionnement du maniabilimètre. [13]

I.5.4 Le cône :

Pour un béton de sable fluide, il est possible de mesurer le temps nécessaire à l'écoulement d'une quantité définie du béton de sable à travers un dispositif calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Ce dernier peut également être équipé d'un vibreur.

I.5.5 Retrait :

Lorsque l'élément du béton ou béton de sable se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; C'est le retrait. On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques du béton de sable de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%. [14]

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont : [15]

- La nature du ciment.
- La finesse de mouture.
- Le dosage en ciment, dans le béton.
- Le dosage en eau.
- La propreté et nature des granulats.

I.5.6 Résistance mécanique :

Les tests sont généralement effectués sur des prismes de dimensions 4×4×16 cm, conservés dans l'eau à 20°C. Les échantillons sont soumis à une rupture en traction par flexion, puis en compression. Les résistances, tant en traction par flexion qu'en compression, évoluent à peu près de manière logarithmique dans le temps (jusqu'à 28 jours). Les rapports entre les résistances en

Chapitre I : généralité sur le Béton de sable

compression et en traction par flexion augmentent avec le temps. Pour un ciment ordinaire, on obtient : [16]

- Entre 4 et 4,5 à 1 jour.
- Entre 4,5 et 5,5 à 2 jours.
- Entre 5,5 et 6 à 7 jours.
- Entre 6 et 7 à 28 jours.

Les résistances des bétons de sable dépendent de nombreux facteurs, notamment :

- La nature et le dosage en ciment.
- Le rapport eau-ciment.
- La granulométrie et la nature du sable.
- L'énergie de malaxage et de mise en œuvre.
- La protection pendant les premiers jours.

I.5.7 La prise :

Le temps de prise est généralement mesuré sur une pâte de ciment pure de consistance normale (24 à 26 % d'eau) conformément à la norme NF P 15-431 à l'aide de l'appareil de Vicat. Il est également possible, bien que non standardisé, de mesurer le temps de prise d'un béton de sable avec le même appareillage en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Dans ce cas, le poids de l'aiguille pénétrant dans le béton de sable est de 1000 grammes. Le début de la prise est défini comme l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (correspondant à la taille des plus gros grains de sable), et la fin de la prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur. Les temps de prise sur béton de sable normalisé sont généralement un peu plus longs que sur la pâte pure de consistance normale (en raison de variations dans le rapport eau/ciment). [17]

I.6. Domaines d'utilisation et application du béton de sable

Le béton de sable peut être employé dans divers domaines et sous plusieurs formes. Les applications modernes de ce matériau sont principalement dues à ses propriétés distinctives comparées à celles du béton traditionnel, plutôt qu'à l'économie potentielle de le substituer à ce dernier. [18]

Chapitre I : généralité sur le Béton de sable

I.6.1 Les bétons non vibrés :

Ces bétons, généralement fluides, sont principalement employés lorsque la vibration est impraticable, notamment pour la fabrication de pieux forés et pour la réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants.

I.6.2 Les bétons projetés :

Ils se sont révélés particulièrement intéressants, tant sur le plan technique qu'économique, et sont adaptés au renforcement de structures par projection. Par exemple :

- Réhabilitation des collecteurs d'assainissement.
- Stabilisation des parois ou des talus.

De manière générale, le béton de sable peut également être utilisé en projection pour des travaux de rénovation, tels que les ponts, les égouts visitables et les bâtiments (voir Photos 4, 5).



Figure I.4. Le béton de sable peut être utilisé pour la projection sur des surfaces anciennes. [19]



Figure I.5. Réalisation d'une piscine. [19]

I.6.3 Les travaux d'injection :

En raison de sa fine granulométrie et de sa maniabilité, le béton de sable est idéal pour les techniques de reprise en sous-œuvre par injection ou coulage gravitaire. Il est particulièrement adapté pour :

- Le comblement de cavités.
- La réparation des fondations et le renforcement des ouvrages portuaires.

I.6.4 La préfabrication :

L'esthétique prenant une importance croissante dans toutes les constructions, les bétons de sable se prêtent parfaitement à la création d'effets architecturaux variés, tant en termes de forme que d'apparence. Ils sont utilisés en préfabrication pour des murs architecturaux, du mobilier urbain, ainsi que dans les bâtiments et les aménagements routiers.

I.6.5 Béton de sable coulé :

Il peut être mis en place sur site dans les routes, les autoroutes, les aérodromes et les bâtiments.

I.7. Avantages et limites d'emploi des bétons de sable

On peut présenter les avantages et limites d'emploi des bétons de sable ainsi :

I.7.1 Avantages des bétons de sable :

Dans de nombreuses applications, le béton ne nécessite pas une résistance extrêmement élevée, mais il doit souvent présenter des propriétés particulières que le béton de sable peut mieux garantir. Parmi ces propriétés :

- a) Ouvrabilité :** Grâce à sa grande maniabilité, le béton de sable permet une mise en œuvre plus facile, en remplissant les moules avec moins d'effort de serrage, tout en conservant ses autres propriétés matérielles. Cela représente un avantage considérable.
- b) La cohésion et l'absence de ségrégation :** Étant donné la faible variation des dimensions des grains, ce matériau offre une bonne cohésion, un faible ressuage et évite totalement les problèmes de ségrégation.
- c) Le transport :** Le béton de sable peut être transporté du site de production au lieu d'utilisation par les mêmes moyens que les bétons traditionnels. Grâce à sa plus grande plasticité et à son faible risque de ségrégation, il peut être acheminé sur de longues distances sans problème.
- d) L'aspect de surface:** La granulométrie fine et uniforme des bétons de sable permet des effets architecturaux esthétiques recherchés. De plus, il présente un avantage économique en utilisant les sables abondants dans le sud algérien.

Chapitre I : généralité sur le Béton de sable

I.7.2 Limites des bétons de sable :

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques. [5] [20]

- a) **Raisons économiques** : L'utilisation d'additifs peut significativement renforcer la résistance du béton de sable, mais cela peut augmenter les coûts. Si le béton de sable ne présente aucun avantage distinctif pour l'application envisagée, chercher à améliorer ses performances peut être superflu. Le choix dépend du contexte local en termes de disponibilité des granulats et de l'application prévue. En Algérie, des fillers peuvent être obtenus à partir de déchets de carrière, et des fillers naturels sont présents dans certaines régions, notamment dans le sud du pays. [11]
- b) **Raisons techniques** : Les connaissances sur les propriétés et le comportement du béton de sable, telles que le retrait, le fluage et la durabilité, sont limitées, ce qui peut exclure ce matériau de l'utilisation dans des éléments fortement sollicités ou précontraints.

I.8. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons effectué une analyse bibliographique sur les bétons de sable (BS), abordant leur concept général et décrivant en détail leurs constituants et leurs propriétés spécifiques telles que la maniabilité et la granularité. Nous avons souligné que le BS se distingue par son caractère non fissurant, en raison de l'absence de gros granulats et de son faible module d'élasticité, ainsi que par son séchage uniforme, sa porosité et son homogénéité.

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

II. Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

II.1. Introduction

Ce chapitre aborde l'essor récent des fibres naturelles dans diverses industries, notamment la construction, l'automobile et la plasturgie. Il présente une analyse détaillée des fibres végétales, incluant leur classification, leur structure, leur composition chimique, ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques. Les fibres végétales telles que les grignons d'olives, les noyaux de dattes et les coques de noix d'arganier sont de plus en plus utilisées dans ces domaines. L'intégration de ces fibres dans les matrices cimentaires offre des avantages significatifs, bien que leurs applications restent encore limitées. Ce chapitre propose également une synthèse sur les différents types de fibres et leurs utilisations potentielles.

II.2. Fibres naturelles

II.2.1 Définition des fibres naturelles :

Le terme « fibre naturelle » englobe une variété de fibres issues de différentes sources telles que le végétal, l'animal ou le minéral, comme le lin, la soie et l'amiante respectivement. Leur utilisation remonte à plusieurs millénaires, comme en témoignent les premiers composites datant de l'ancienne Égypte, où la paille et l'argile étaient mélangées pour la construction. Au cours des dernières années, les composites renforcés de fibres naturelles ont suscité un intérêt croissant de la part des chercheurs et de l'industrie, offrant des avantages tels qu'un coût de production plus faible par rapport aux fibres synthétiques comme le verre ou le carbone.[21]

II.2.2 Classification des fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont principalement classées en trois catégories en fonction de leur origine : végétale, animale et minérale :[22] [23]

- Les fibres végétales sont extraites de diverses parties des plantes, notamment les graines (coton), les tiges (lin, chanvre, jute), les feuilles (sisal) et même les troncs ou les enveloppes de fruits (palmier, noix de coco).
- Les fibres animales proviennent des poils d'animaux ou de sécrétions telles que la soie.
- Les fibres minérales sont constituées de minéraux à texture fibreuse, tel que le basalte, bien que leur utilisation soit limitée en raison de leurs propriétés toxiques, comme c'est le cas avec l'amiante.

La figure II.1 montre les trois classes des fibres naturelles.

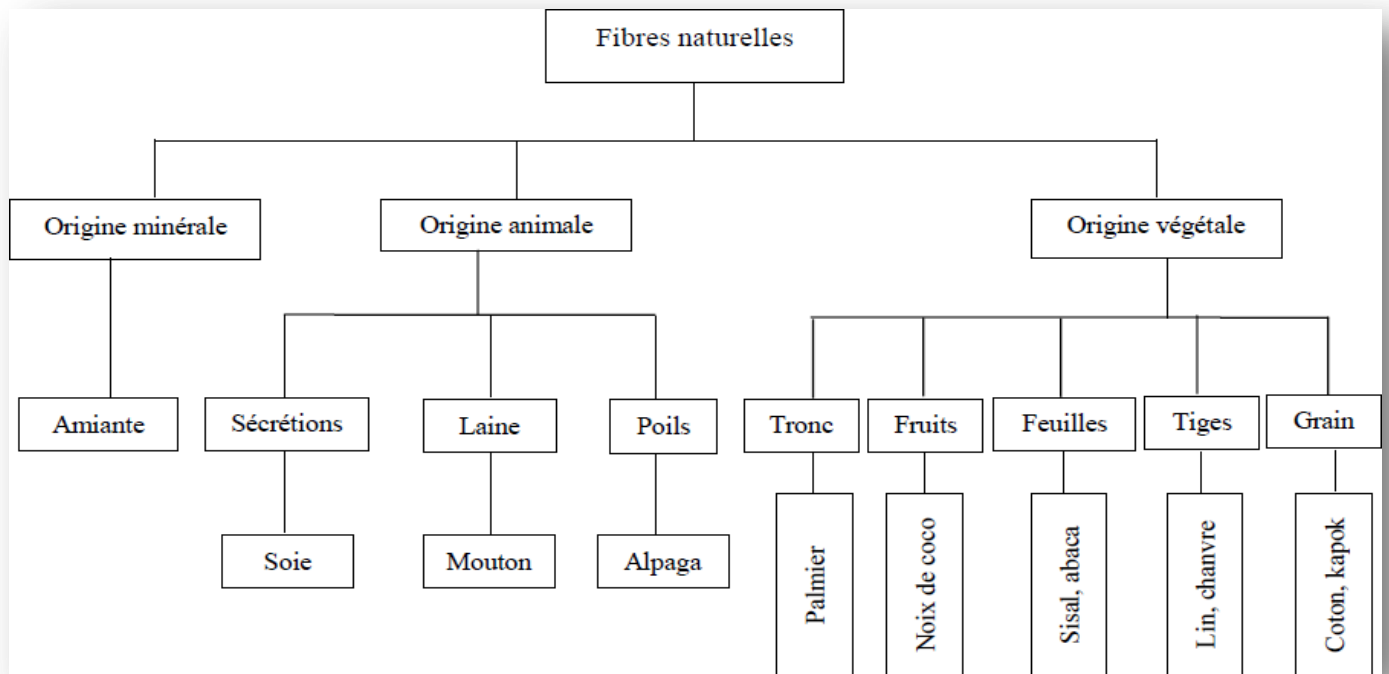


Figure II.1 Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine. [23]

II.3. Fibres végétales

II.3.1 Définition de la fibre végétale :

Les fibres végétales, d'origine naturelle, ont été utilisées pour la première fois dans la construction pour fabriquer des briques renforcées avec de la paille ou des roseaux. Aujourd'hui, le renforcement des matériaux cimentaires avec des fibres végétales connaît des avancées significatives. Des ouvrages en plâtre renforcé de fibres végétales sont courants, et de nombreuses recherches cherchent à remplacer les fibres d'amiante, en raison des problèmes de santé qu'elles posent, par des fibres végétales. [24] [25]

Les fibres végétales se caractérisent physiquement par leur diamètre, leur densité, leur teneur en eau et leur capacité d'absorption d'eau. Sur le plan mécanique, elles se distinguent par leur résistance à la traction, leur résistance à la rupture et leur module d'élasticité. [24]

II.3.2 Classification des fibres végétales :

Les fibres végétales se divisent en quatre catégories selon leur provenance : [26]

les fibres de feuilles, les fibres de tiges, les fibres de bois et les fibres de surface.

II.3.2.1 Fibres de feuilles :

Les fibres de feuilles sont obtenues à partir des rejets des plantes monocotylédones. Elles sont formées par le chevauchement de faisceaux qui s'enroulent le long des feuilles pour les renforcer. Ces fibres sont dures et rigides. Les types de fibres de feuilles les plus couramment cultivées sont celles du sisal et de l'abaca.

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

II.3.2.2 Fibres de tiges :

Les fibres de tiges proviennent des plantes dicotylédones et ont pour fonction de renforcer la rigidité des tiges. Elles sont commercialisées sous forme de faisceaux ou de fibres longues. Les fibres de tige les plus couramment utilisées sont celles de jute, de lin, de ramie, de kénaf et de chanvre.

II.3.2.3 Fibres de bois :

Les fibres de bois sont obtenues par le broyage d'arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement de courte longueur.

II.3.2.4 Fibres de surfaces :

Les fibres de surface entourent généralement la surface des tiges, des fruits ou des graines. Les fibres de surface des graines constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres, parmi lesquelles on trouve notamment le coton et la noix de coco.

La figure II.2 représente quelques exemples de tissus de fibres végétales



Chanvre



Jute



Sisal



Coton



Coco



Lin

Figure II.2 tissus de fibres végétales. [27]

II.3.3 Structure générale d'une fibre végétale

Une fibre végétale unique ou élémentaire est une cellule unique typiquement d'une longueur de 1 à 50 mm et d'un diamètre d'environ 10-50 μm . [28]

Au niveau macroscopique, les fibres cellulaires présentent toutes une paroi cellulaire composée de plusieurs couches. Cependant, seules trois de ces couches ont été identifiées par microscopie électronique. Les fibres végétales adoptent une structure semblable à des tubes microscopiques, avec des parois cellulaires entourant un espace vide appelé la lumière centrale, qui joue un rôle dans le comportement d'absorption d'eau des fibres végétales.

La figure II.3 présente une représentation schématique de la structure fine d'une fibre ligno-cellulosique. Cette fibre est constituée de plusieurs parois cellulaires formées à partir d'une microfibre de cellulose semi-cristalline, renforcée et orientée, intégrée dans une matrice de lignine dont la composition peut varier. Les parois cellulaires se divisent en deux sections : la paroi cellulaire primaire mince, notée P, d'une épaisseur généralement comprise entre 0,1 μm et 0,5 μm , et la paroi cellulaire secondaire épaisse, représentant généralement 80 % de la section de la fibre. [29]

La paroi cellulaire primaire contient un réseau régulier de microfibrilles de cellulose étroitement emballées. Quant à la paroi secondaire, elle se compose de trois couches distinctes et superposées : S1 (couche externe, d'une épaisseur de 0,5 μm à 2 μm), S2 (couche intermédiaire, d'une épaisseur de 5 μm à 10 μm) et S3 (couche interne, d'une épaisseur de 0,5 μm à 1 μm). La couche S2, la plus épaisse et la plus importante, détermine principalement les propriétés mécaniques de la fibre.

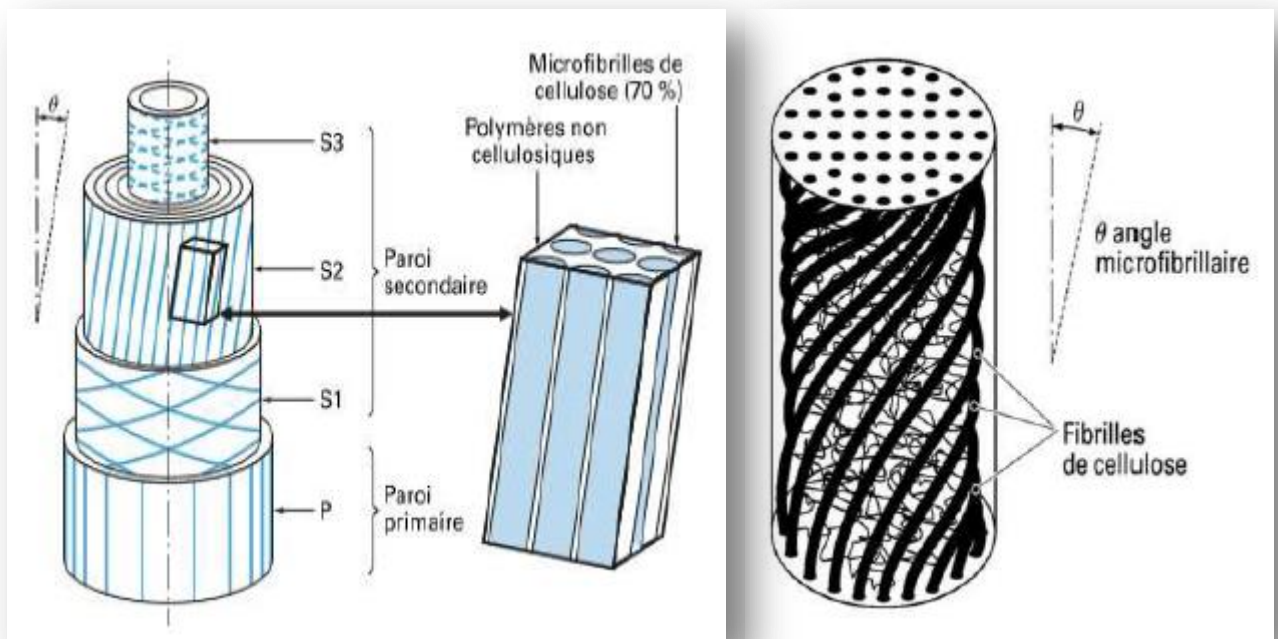


Figure II.3 Illustration de la structure détaillée d'une fibre lignocellulosique. [30]

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

La Figure II.4 présente la disposition des fibrilles, des microfibrilles et de la cellulose dans les parois cellulaires d'une fibre végétale. Les microfibrilles adoptent une structure hélicoïdale le long de l'axe des fibres, formant finalement des couches annulaires dans la section transversale de la fibre. Les molécules d'hémicellulose dans la paroi cellulaire se lient par des liaisons hydrogène à la cellulose, agissant ainsi comme une matrice de cimentation entre les microfibrilles de cellulose. Cela crée un réseau cellulose/hémicellulose considéré comme le principal composant structural des cellules fibreuses. En outre, les lignines hydrophobes agissent comme un ciment, renforçant la rigidité du composite cellulose/hémicellulose. [31]

Les propriétés mécaniques de la fibre dépendent de la teneur en cellulose, de l'angle de spirale ou d'inclinaison des microfibrilles et du degré de polymérisation. L'angle de spirale ou d'inclinaison des microfibrilles varie selon le type de fibre végétale, tandis que le degré de polymérisation dépend de la partie de la plante à partir de laquelle la fibre est extraite. [32]

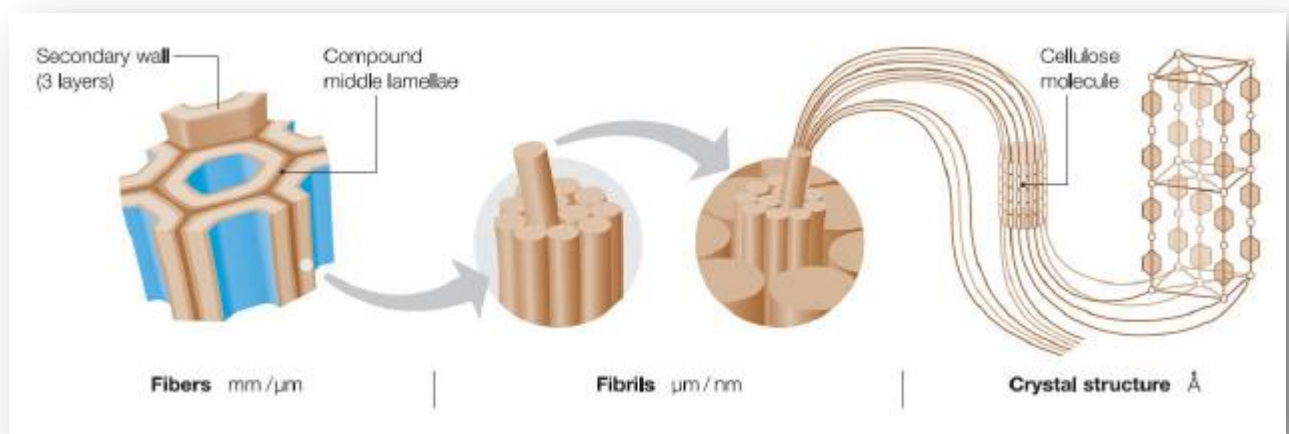


Figure II.4 Arrangement des micros fibrilles et de la cellulose dans la paroi cellulaire végétale. [33]

II.3.4 Composition chimique d'une fibre végétale

La composition des fibres végétales est diversifiée, principalement composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Elles contiennent également de petites quantités de protéines, d'éléments extractibles et quelques composés inorganiques. La proportion de ces composants varie selon l'espèce végétale considérée. [34,35,36] (tableau II.1)

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

Tableau II.1 Composition chimique de quelques fibres végétales.[37]

| Type de fibre | Cellulose (%) | Lignine (%) | Hémicellulose (%) | Pectine (%) | Cendres (%) |
|---------------|---------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| Lin | 71 | 2,2 | 18,6 - 22,6 | 2,3 | - |
| Kenaf | 31,3 - 57 | 15,3 - 19 | 21,5 - 23 | - | 2,3 - 5 |
| Jute | 45,3 - 71,5 | 12,3 - 26 | 13,6 - 21 | 0,2 | 0,5 - 3,2 |
| Chanvre | 57,3 - 77 | 3,7 - 13 | 14,3 - 22,4 | 0,9 | 0,8 |
| Ramie | 68,6 - 91 | 0,6 - 3,0,7 | 5,3 - 16,7 | 1,9 | - |
| Abaca | 56,3 - 63 | 7,3 - 9 | 15,3 - 17 | - | 3 |
| Sisal | 47 - 78 | 7 - 11 | 10,3 - 24 | 10 | 0,6 - 3,1 |

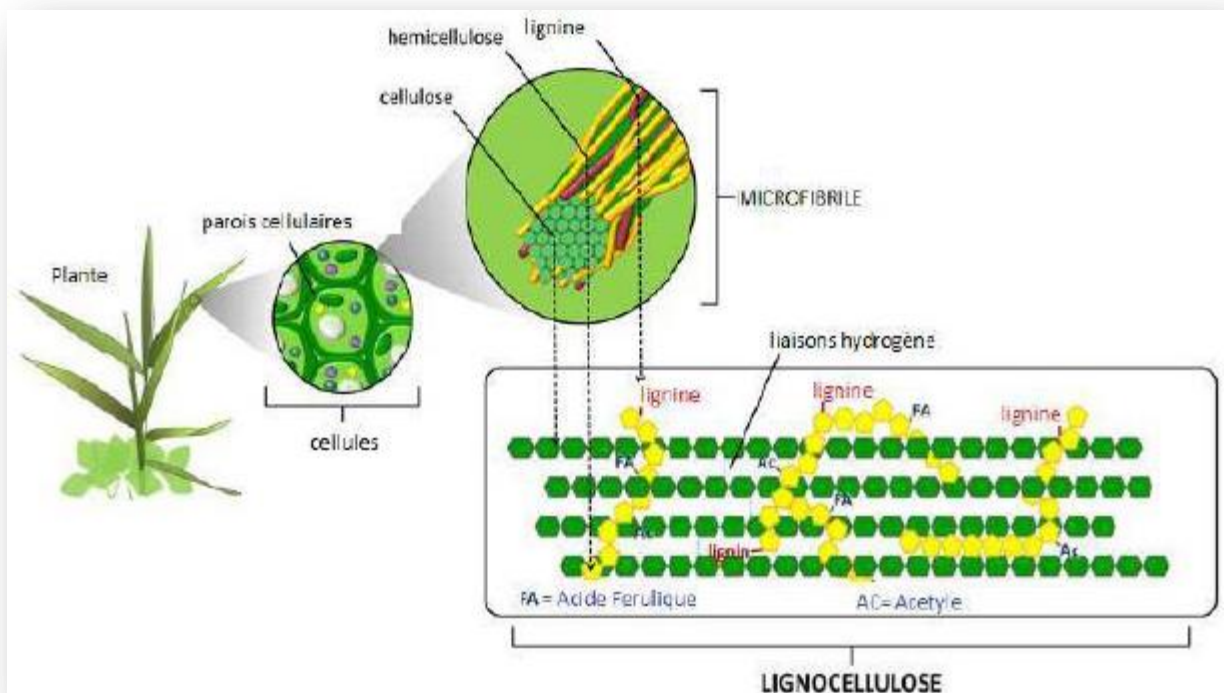


Figure II.5 Composition d'une fibre végétale. [38]

a) Cellulose :

La cellulose, abondante et renouvelable, est structurée en microfibrilles qui s'assemblent pour former des fibres. Elle consiste en des unités de -D-glucopyranose liées par des liaisons β (1,4)-glycosidiques, comme illustré dans la figure (II.6 - II.7). [39]

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

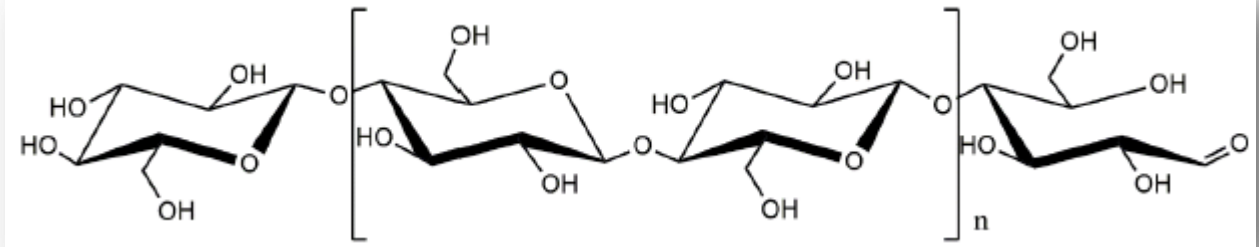


Figure II.6 Structure de la cellulose. [40]

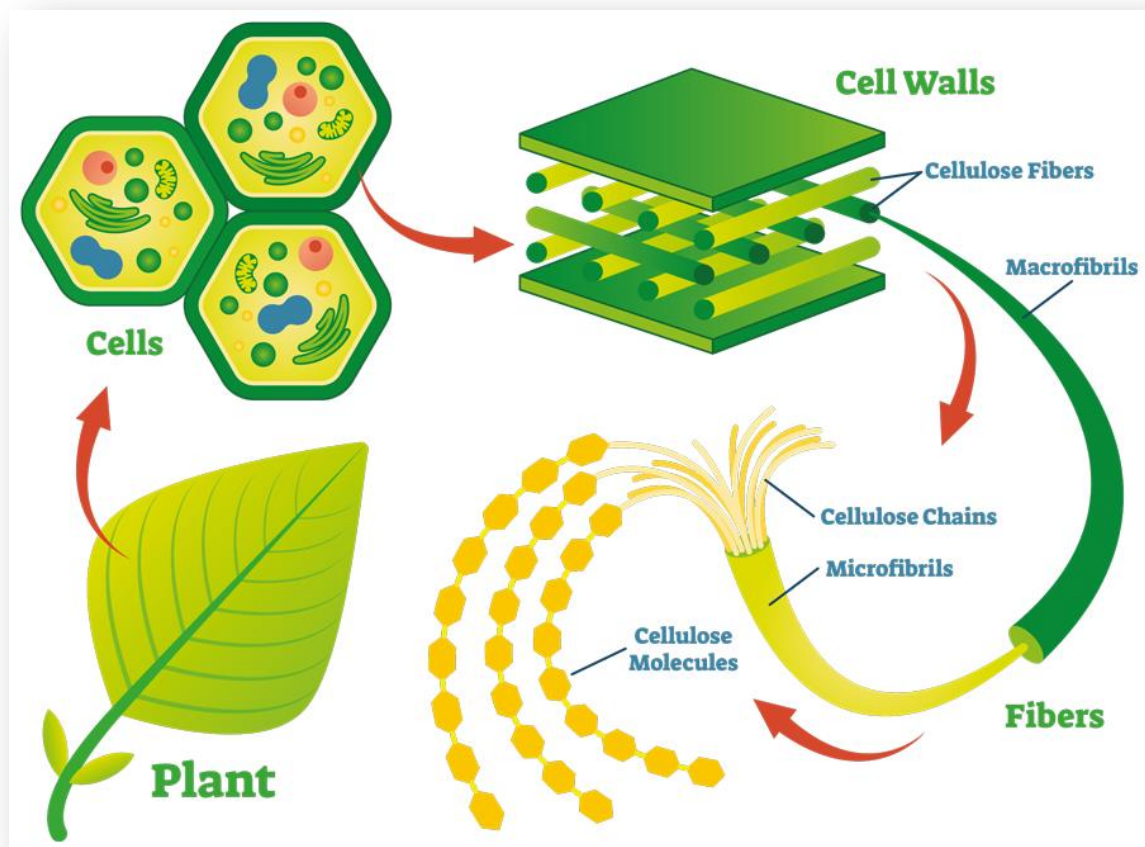


Figure II.7 Analyse détaillée de la structure complexe de la microfibrille de cellulose. [41]

Les chaînes de cellulose se regroupent en microfibrilles, formant ainsi des cristaux de cellulose liés par des domaines amorphes. Contrairement aux autres constituants des fibres qui présentent une structure amorphe, la cellulose est principalement cristalline, ce qui lui confère le plus haut module d'élasticité. (voir figure II.8)

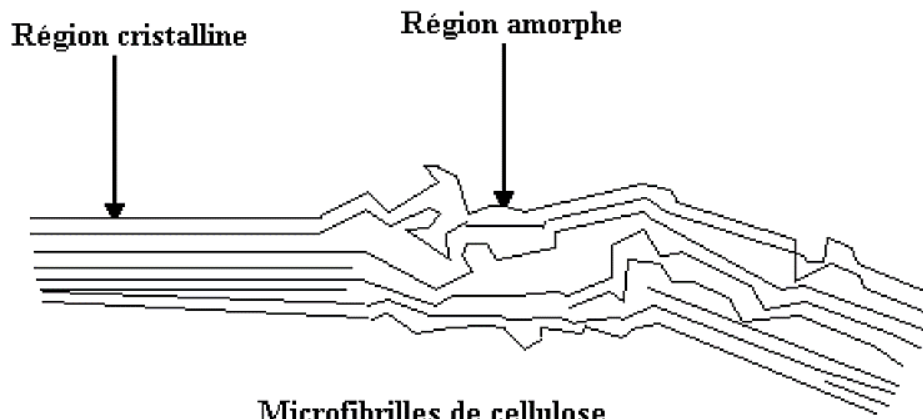


Figure II.8 Morphologie de cellulose. [42]

b) Hémicellulose :

L'hémicellulose, malgré son nom trompeur, diffère fondamentalement de la cellulose. Constituée de polysaccharides contenant des cycles carbonés à 5 et 6 atomes, elle joue le rôle d'une matrice de soutien pour les microfibrilles de cellulose. Par rapport à la cellulose, l'hémicellulose se distingue par sa composition, comprenant des sucres neutres tels que la xylose, l'arabinose et d'autres, ainsi que des acides uroniques. De plus, sa structure non cristalline lui confère un degré significatif de ramification latérale. Enfin, contrairement à la cellulose qui a un degré de polymérisation élevé, l'hémicellulose présente un degré de polymérisation plus faible, ce qui la rend plus hydrophile et susceptible de gonfler au contact de l'eau, contribuant ainsi à l'instabilité dimensionnelle. [43]

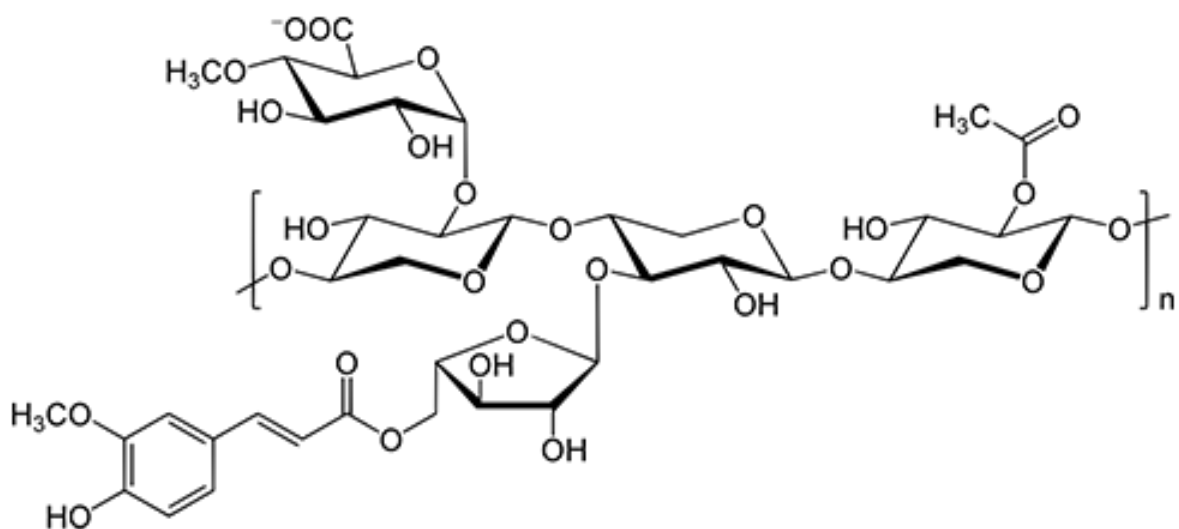


Figure II.9 Structure moléculaire de l'hémicellulose. [43]

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

c) Lignine :

La lignine est un polymère tridimensionnel complexe constitué de composés aromatiques et aliphatiques de très haute masse moléculaire. Elle est composée de trois types d'unités phénylpropane : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique (Figure II.10). Matériau amorphe et hydrophobe par nature, sa chimie exacte reste encore à être complètement élucidée, bien que ses principaux groupes fonctionnels et unités structurales soient connus. La lignine, caractérisée par une faible teneur en hydrogène, renforce et rigidifie les parois cellulaires, tout en les protégeant contre les agents pathogènes microbiens. Sa concentration varie selon les plantes et les méthodes d'analyse employées. Étroitement associée à l'hémicellulose et à la cellulose dans les parois cellulaires des plantes, la lignine joue un rôle de ciment dans cette matrice, justifiant son surnom de "colle" des parois cellulaires végétales. Outre la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, les parois cellulaires végétales contiennent d'autres molécules organiques telles que des protéines, des tanins, des pectines, des cires, des composés aromatiques et des glucides de faible masse moléculaire.[44]

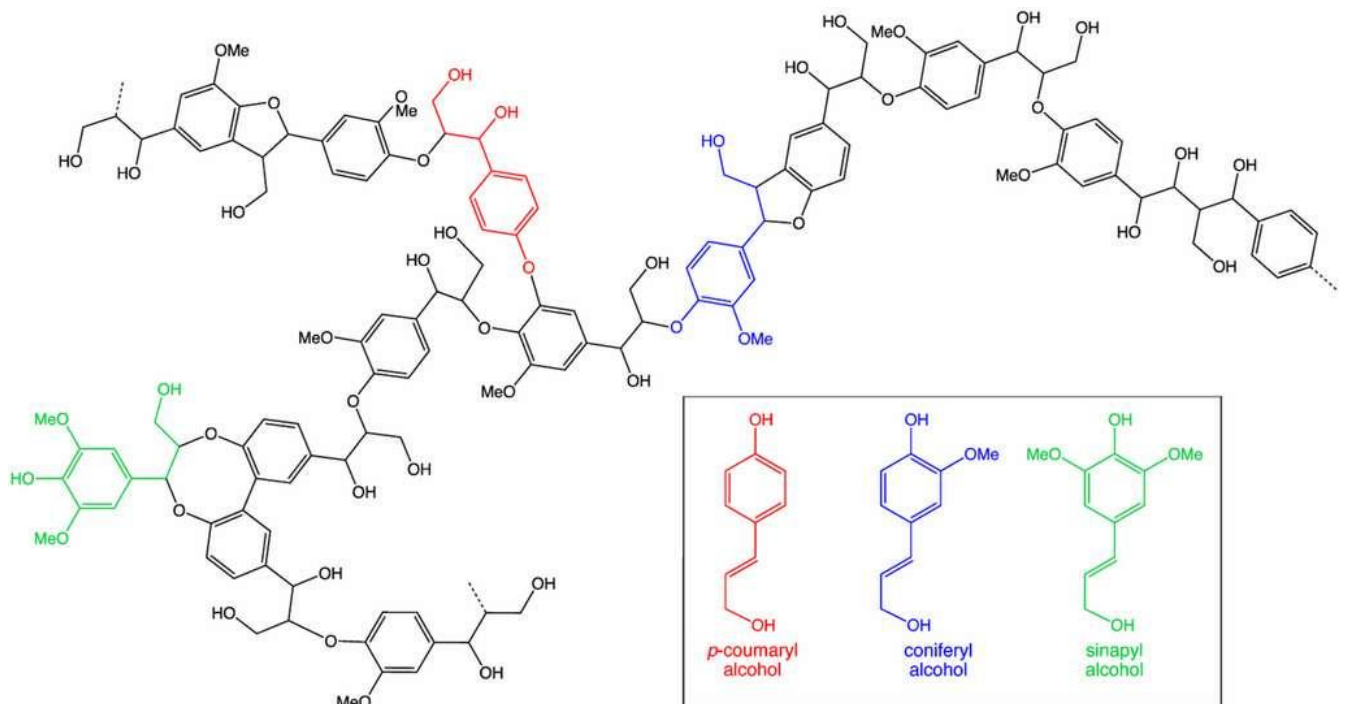


Figure II.10 Structure de la lignine .[44]

II.4. Propriétés des fibres végétales

II.4.1 Propriétés physiques des fibres végétales :

Les fibres végétales sont généralement caractérisées physiquement par leur longueur, leur diamètre et leur densité. Le tableau II.2 présente les caractéristiques morphologiques de diverses fibres végétales. La variabilité des paramètres géométriques, tels que la longueur et le diamètre, est influencée par de nombreux facteurs liés à leur développement agricole et à leur transformation industrielle. Parmi les fibres végétales, les fibres de lin sont réputées pour être parmi les plus fines et les plus longues.

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

Un autre facteur déterminant des propriétés physiques des fibres est l'organisation micro-fibrillaire. Les excellentes propriétés mécaniques des fibres peuvent s'expliquer en partie par cette organisation. Les fibres végétales se distinguent également les unes des autres par l'orientation des microfibrilles dans leurs parois.[45] [46]

Tableau II.2 Caractéristiques morphologiques de quelques fibres végétales.[45] [47]

| Fibre | Longueur (mm) | | Diamètre (µm) | | L/d |
|---------------------|---------------|------------|---------------|-----------|-------------|
| | Intervalle | Valeur | Intervalle | Valeur | |
| Lin | 4-80 | 33 | 5-76 | 19 | 1500 |
| Jute | 0,8-6 | 3 | 15-25 | 20 | 150 |
| Chanvre | 5-55 | 25 | 10-51 | 25 | 1000 |
| Ramie | 40-250 | 120 | 16-126 | 50 | 2400 |
| Coton | 15-56 | 18 | 12-25 | 20 | 900 |
| Noix de coco | 0,3-1 | 0,7 | 12-24 | 20 | 350 |

II.4.2 Propriétés mécaniques des fibres végétales :

Les propriétés mécaniques des fibres végétales dépendent de leurs caractéristiques intrinsèques, comme la composition chimique (cellulose, hémicellulose, lignine, pectines), la structure de la fibre, la porosité, l'angle des microfibrilles, le facteur de forme, et le rapport longueur/diamètre. Elles sont également influencées par des facteurs anthropiques et des variables indépendantes telles que le taux d'humidité, la position des fibres dans la tige, les défauts naturels et les conditions de croissance. Le module de Young (GPa), la contrainte à la rupture (MPa) et l'allongement à la rupture (%) sont particulièrement affectés par l'origine, la variété, la croissance et la récolte des plantes. [47]

II.4.3 Avantages et inconvénients des fibres végétales

L'incorporation de fibres végétales dans les matrices polymères présente de nombreux avantages par rapport aux fibres traditionnelles comme les fibres de verre : [48]

- Faible densité
- Coût réduit ou modéré
- Renouvelabilité par culture
- Faible consommation d'énergie pour leur production
- Biodégradabilité
- Propriétés spécifiques élevées

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

Cependant, certains inconvénients peuvent freiner leur développement industriel :

- Absorption d'eau
- Mauvaise tenue au vieillissement (biodégradabilité)
- Faible résistance thermique (maximum de 200°C à 300°C)
- Anisotropie des fibres

Nécessité d'une gestion rigoureuse des stocks pour garantir une qualité constante dans les applications industrielles.

II.4.4 Application des fibres végétales

Initialement, l'homme utilisait divers organes végétaux sous forme de fibres pour fabriquer des fils, des ficelles et des cordes (figure II.11, a, b, c). Avec l'avancée des technologies, telles que le tissage à la main, le tricotage et le tissage mécanique, l'utilisation des fibres végétales s'est étendue à la fabrication de tissus (figure II.11, d, e). Ainsi, on a vu l'émergence de produits comme des couffins artisanaux, des cordes, des tapis artisanaux et des voiles de bateaux.

Depuis 2002, la production de fibres végétales n'a pas pu satisfaire la demande croissante, signe de l'intérêt grandissant des industriels. Ce phénomène s'explique par les nouveaux débouchés offerts par les contextes économiques et environnementaux récents, allant bien au-delà des secteurs traditionnels du papier et du textile. Les industries voient dans ces fibres des atouts précieux pour la fabrication de matériaux composites alliés aux polymères, ouvrant des applications dans la plasturgie, le bâtiment et l'automobile. Ces composites sont également utilisés dans l'électroménager, les emballages, le secteur pharmaceutique, les cosmétiques et bien d'autres domaines.

Les fibres végétales, en raison de leur faible coût, de leur disponibilité renouvelable et de leurs propriétés mécaniques spécifiques, sont de plus en plus prisées pour ces applications variées. Leurs avantages écologiques, comme la faible empreinte carbone et la biodégradabilité, en font une option attractive face aux matériaux synthétiques traditionnels. Les défis tels que l'absorption d'eau et la gestion de la qualité des stocks doivent cependant être relevés pour maximiser leur utilisation industrielle. [49] [50]

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales



a



b



d



c



e

Figure II.11 Différentes utilisations des fibres végétales : a) corde artisanale, b) couffins artisanaux, c) cordages, d) tapis artisanaux, e) voiles de bateaux..

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

II.4.5 La fibre de sisal

II.4.5.1 Définition de sisal :

Le sisal est une plante vivace qui se caractérise par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire, pouvant atteindre jusqu'à 2 mètres de longueur. Cultivée principalement en Amérique du Sud et en Afrique, cette plante tropicale appartient à la famille des Agavaceae. Originnaire de l'est du Mexique, le sisal est aussi connu sous le nom d'henequen. Les fibres de sisal, extraites des feuilles de cette plante, mesurent en moyenne 3 mm de long et sont réputées pour leur grande résistance. Ces fibres sont largement utilisées pour la fabrication de cordages, de tissus grossiers et de tapis.

Le nom "sisal" provient de la ville de Sisal, située dans la province du Yucatan au Mexique. C'est de ce port que les fibres étaient historiquement expédiées à travers le monde. La production mondiale de sisal est estimée à environ 300 000 tonnes par an. Les principaux producteurs mondiaux de sisal



Figure II.2 Plante de sisal.

sont le Brésil, la Tanzanie et le Kenya. Le Brésil est le leader avec une production d'environ 120 000 tonnes, dont près de 100 000 tonnes sont exportées sous forme de fibres brutes et de produits manufacturés (Figure II.13). La Tanzanie produit environ 30 000 tonnes, tandis que le Kenya en produit environ 25 000 tonnes, exportant respectivement 15 000 et 20 000 tonnes.

En plus de ses applications traditionnelles dans la fabrication de cordages et de tissus, le sisal est de plus en plus utilisé dans diverses industries modernes. Grâce à sa résistance et à sa durabilité, il est employé dans la production de matériaux composites, d'articles de construction, et même dans l'automobile. Les fibres de sisal, étant biodégradables et renouvelables, représentent une alternative écologique aux fibres synthétiques, contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone dans divers secteurs industriels.

L'intérêt croissant pour les fibres de sisal reflète une tendance mondiale vers des matériaux plus durables et respectueux de l'environnement, soutenant à la fois des pratiques agricoles durables et le développement économique des régions productrices. [51]

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

Les caractéristiques botaniques de cette plante sont résumées dans le tableau suivant : [52]

Tableau II.3 Caractéristiques botaniques de la plante de sisal.

| | |
|---------------------|---------------------------------------|
| Noms communs | Sisal, sisal vert, chanvre du Yucatan |
| Nom latin | <i>Agave sisalana</i> |
| Famille | Amaryllidacées (amaryllidaceae) |
| Type | Succulente |
| Origine | Amérique centrale, Mexique |
| Couleur de la fleur | Jaune-vert |
| Plantation | Printemps |
| Floraison | Eté |



Figure II.13 (a) Plante de sisal, (b) fibre extraite de la plante, (c) cordes fabriquées à partir de la fibre de sisal et (d) fibre de sisal utilisée dans ce travail. [53]

II.4.5.2 Extraction des fibres de sisal :

L'un des principaux objectifs des chercheurs est de découvrir comment extraire les fibres à partir de ressources naturelles en utilisant des méthodes économiquement rentables. Plusieurs techniques existent pour l'extraction des fibres de sisal, y compris les méthodes par immersion dans l'eau et celles utilisant des solutions chimiques telles que les alcalins.

La première méthode consiste à immerger les feuilles de sisal dans un fût fermé pendant 15 à 21 jours à une température ambiante d'environ 25 °C. Cette immersion accélère la biodégradation, facilitant ainsi l'extraction des fibres. Après immersion, les fibres sont rincées, lavées à l'eau, séchées à l'air libre, puis brossées. [54]



Figure II.14 Différentes étapes de la méthode d'extraction de la fibre. (a) Les lames plongées dans l'eau ; (b) biodégradation des fibres après 15 à 21 jours à température supérieure à 25°C ; (c) fibres lavées à l'eau et séchées à l'air et au soleil ; (d) fibres finales obtenues. [53]

La deuxième méthode repose sur l'utilisation d'équipements mécaniques, comme une machine à découper ou un grattoir, pour extraire les fibres.



Figure II.15 Lame après 90 à 100 jours de l'enfouissement. [55]



Figure II.16 Fibres de sisal (*Agave americana*) obtenues. [55]

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

Il existe également une technique relativement nouvelle qui implique l'enfouissement des feuilles de sisal à une profondeur de 30 cm dans la terre pendant 90 à 100 jours. Cette méthode favorise la biodégradation des feuilles, rendant l'extraction des fibres plus facile. Les fibres sont ensuite rincées, lavées à l'eau, et séchées à l'air libre.

Ces différentes techniques visent à rendre le processus d'extraction des fibres de sisal plus efficace et économiquement viable. [54]

II.4.5.3 La composition chimique des fibres de sisal :

Les fibres de sisal présentent une composition chimique caractéristique qui en fait un matériau intéressant pour diverses applications industrielles. En détail, elles contiennent environ 70 % de cellulose, ce qui leur confère une grande résistance et une rigidité appréciable. La cellulose est un polymère naturel qui forme la structure principale des parois cellulaires des plantes, offrant aux fibres de sisal une solidité comparable à celle des matériaux synthétiques. [56]

En outre, les fibres de sisal contiennent environ 12 % d'hémicellulose. L'hémicellulose est un groupe de polysaccharides complexes qui, bien que moins rigide que la cellulose, joue un rôle crucial dans la liaison des fibres et l'absorption de l'humidité, améliorant ainsi la flexibilité et la durabilité du matériau.

La lignine représente environ 10 % de la composition des fibres de sisal. Cette substance amorphe et hydrophobe agit comme un ciment entre les microfibrilles de cellulose, augmentant la rigidité et la résistance aux attaques biologiques et chimiques. La présence de lignine confère également aux fibres de sisal une certaine résistance aux rayons UV, ce qui est avantageux pour les applications extérieures.

Enfin, les fibres de sisal contiennent une petite proportion, environ 2 %, de pectine, de cires et de graisses. Ces composants mineurs jouent un rôle dans la flexibilité et la manipulation des fibres, facilitant leur utilisation dans diverses industries. La pectine, par exemple, contribue à la cohésion des fibres, tandis que les cires et les graisses peuvent aider à protéger les fibres contre l'humidité et les dégradations superficielles. [56]

II.4.5.4 Utilisation de la fibre de sisal

Historiquement, la fibre de sisal était principalement utilisée pour la confection de ficelles et de cordes destinées aux usages agricoles et commerciaux. Elle servait également à la fabrication de matelas, au rembourrage de meubles et au tissage de sacs ou de revêtements de sol de qualité médiocre. Cependant, au cours des quarante dernières années, le sisal a été largement remplacé par des fibres synthétiques, plus économiques. [51]

Aujourd'hui, le sisal africain connaît une nouvelle dynamique. Grâce à sa qualité constante et supérieure, il est de plus en plus employé dans des produits finis à forte valeur ajoutée et pour divers autres usages. Par exemple, il est utilisé pour le renforcement du plâtre dans le secteur de la construction et pour la production de pulpe, des segments qui connaissent une croissance continue depuis plusieurs années.

Chapitre II : Généralité sur les fibres végétales

Malgré ses avantages, l'utilisation du sisal dans les matériaux composites est restée limitée, principalement en raison de coûts élevés. Cependant, cette tendance pourrait changer dans les années à venir. En effet, le sisal présente des atouts significatifs : il est biodégradable et plus léger que les matériaux de construction traditionnels, ce qui le rend de plus en plus attractif pour des applications industrielles variées. [51]

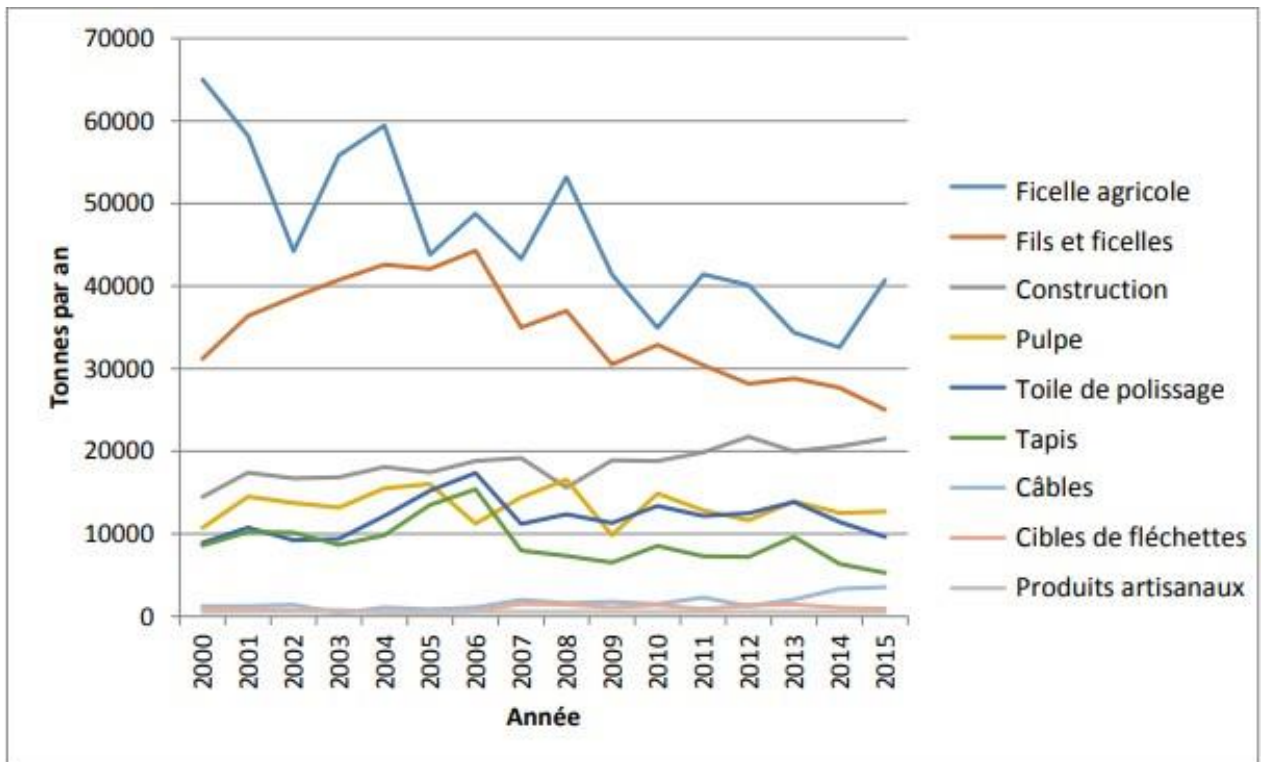


Figure II.17 Utilisation du sisal entre 2000 et 2015 (plus de 500 t/an). [52]

II.5. Conclusion

Comme tous les produits naturels, les propriétés mécaniques et physiques des fibres naturelles varient considérablement. Ces propriétés sont principalement déterminées par la composition chimique et structurale des fibres, ainsi que par le type de fibre et les conditions de croissance. La cellulose, composant principal de toutes les fibres végétales, varie d'une fibre à une autre, influençant ainsi leurs caractéristiques distinctives.

Cette recherche bibliographique a mis en évidence l'intérêt croissant des études sur les bétons de sable renforcés par des fibres végétales, en particulier les fibres de sisal. Les fibres de sisal, grâce à leur résistance et leur biodégradabilité, représentent une option prometteuse pour le renforcement des matériaux de construction. Leur incorporation dans le mélange du béton de sable offre plusieurs avantages, tels qu'une meilleure résistance à la traction et à la flexion, ainsi qu'une amélioration des propriétés de durabilité.

L'utilisation des fibres de sisal dans le béton de sable est une piste très intéressante à explorer et à développer, car elle peut non seulement améliorer les performances mécaniques des matériaux de construction, mais aussi contribuer à des pratiques plus durables et écologiques dans le secteur du bâtiment. En outre, la recherche continue dans ce domaine pourrait révéler de nouvelles applications et optimisations pour les fibres de sisal, ouvrant la voie à des innovations dans les techniques de construction et les matériaux composites.

Chapitre III : Identification des matériaux

III. Chapitre III : PROCEDURE EXPERIMENTALE ET MATERIAUX

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons évalué diverses propriétés et caractéristiques des matériaux employés pour la fabrication de notre béton de sable (sable naturel, ciment, fillers de marbre, etc.). Ces évaluations ont été réalisées à l'aide de méthodes et d'essais normalisés, en fonction des équipements disponibles au Laboratoire Universitaire Echahid Hamma Lakhdar – El Oued N°06 . Par la suite, nous avons présenté les formulations du béton de sable témoin ainsi que celles du béton de sable avec des fillers de marbre et des fibres de sisal.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland composé de classe CPJ-CEM II 42,5 avec ajout de laitier granulé de haut fourneau et du 5% du gypse, conforme à la norme Algérienne NA 442. [57]

Il est fabriqué par la cimenterie algérienne Hadjar Essoud, dont les caractéristiques physiques et chimiques du ciment sont données respectivement dans les tableaux III.1 et III.2.

Chapitre III : Identification des matériau

Tableau III-1 Caractéristiques physiques et mécanique du ciment.

| Caractéristiques physiques | Unités | Ciment CPJ |
|-----------------------------|--------------------|------------|
| Masse volumique apparente | g /cm ³ | 1.06 |
| Masse volumique absolue | g /cm ³ | 3.10 |
| Surface de Blaine | cm ² /g | 3480 |
| Consistance normale | % | 29 |
| Début de prise | H /min | 2/34 |
| Finesse de mouture | % | 9.6 |
| Résistance à la traction | MPa | 7.50 |
| Résistance à la compression | MPa | 44.6 |

Tableau III-2 Composition chimique du ciment.

| Élément | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SiO ₂ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Cl ⁻ | SO ₃ | CaO libre | Perte du feu |
|-----------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------|--------------|
| Pourcentage (%) | 61.38 | 5.18 | 3.34 | 19.97 | 0.99 | 0.2 | 0.44 | 0.19 | 2.9 | 0.6 | 3.71 |

III.2.2 Additions minérales

L'addition minéral que nous avons utilisé dans notre étude est le filler de marbre de la carrière de Fil fila Skikda. Cette addition a été préparée au laboratoire de Matériaux Géo matériaux et Environnement de l'université d'Annaba. Un broyeur à boulets d'une capacité de 10kg à servi au broyage. La configuration des boulets ainsi que le temps du broyage ont été maintenus constants tout au long de la procédure.



Figure III.1 Photo de filler de marbre.

Tableaux III.3 et III.4 montrent la composition chimique et les propriétés physiques du filler de marbre.

Tableau III-3 Composition chimique du filler de marbre.

| CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | CL- | P.A.F |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|-------------------|-----------------|------|-------|
| 56.01 | 0.73 | 0.23 | 0.15 | 1.96 | 0.01 | 0.43 | 0.01 | 0.12 | 40.35 |

Tableau III-4 Caractéristiques physiques du filler de marbre.

| Densité absolue (g/cm ³) | Densité apparente (g/cm ³) | Surface spécifique (BLAINE) |
|--------------------------------------|--|-----------------------------|
| 2.79 | 1.06 | 6700 |

III.2.3 Sable

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé un sable siliceux (SS), provenant de la région de Tébessa. Ce sable a été caractérisé par les essais physiques suivants :

- Une analyse granulométrique.
- Détermination de la masse volumique apparente.
- Détermination de la masse volumique absolue.
- Détermination de l'équivalent du sable.



Figure III.2 Photo de sable de dune utilisé

➤ Les masses volumiques du sable

La masse volumique de l'éprouvette traduit dans une large mesure ses propriétés techniques. Elle est évaluée à partir de l'essai au pycnomètre selon la norme NF P94-054.



Figure III.3 Mesure de la masse volumique apparente.



Figure III.4 Mesure de la masse volumique absolue.

Chapitre III : Identification des matériau

Les caractéristiques physiques de sable utilisé sont regroupées dans le tableau III.5.

Tableau III-5 Propriétés physiques de sable.

| <i>Propriétés physiques des granulats</i> | |
|---|-----------------|
| <i>Forme</i> | <i>Roulé</i> |
| <i>Caractéristiques</i> | <i>Sable SS</i> |
| <i>Nature minéralogiques</i> | <i>Siliceux</i> |
| Masse volumique apparente (g/cm³) | 1,41 |
| Masse volumique absolue (g / cm³) | 2,60 |
| <i>Module de finesse</i> | 2,19 |
| <i>Equivalent de sable (%)</i> | 70.5 |
| Porosité inter granulaire (%) | 45,77 |

À partir des masses volumiques apparente et absolue on a déduit la porosité inter granulaire qui est définie par la formule suivant : $P = (1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}) \times 100$.

L'analyse granulométrique permet également d'évaluer la teneur en éléments fins à travers la valeur du module de finesse, la continuité et la régularité de la granularité. Cet essai s'effectue selon les normes. [58] [59]

Il permet de déterminer la proportion massique du passant cumulé d'un échantillon de matériau divisé selon la taille de l'ouverture des tamis. Les pourcentages de passant cumuler sont également représentés sous la forme de courbes granulométriques sur la figure III.5.

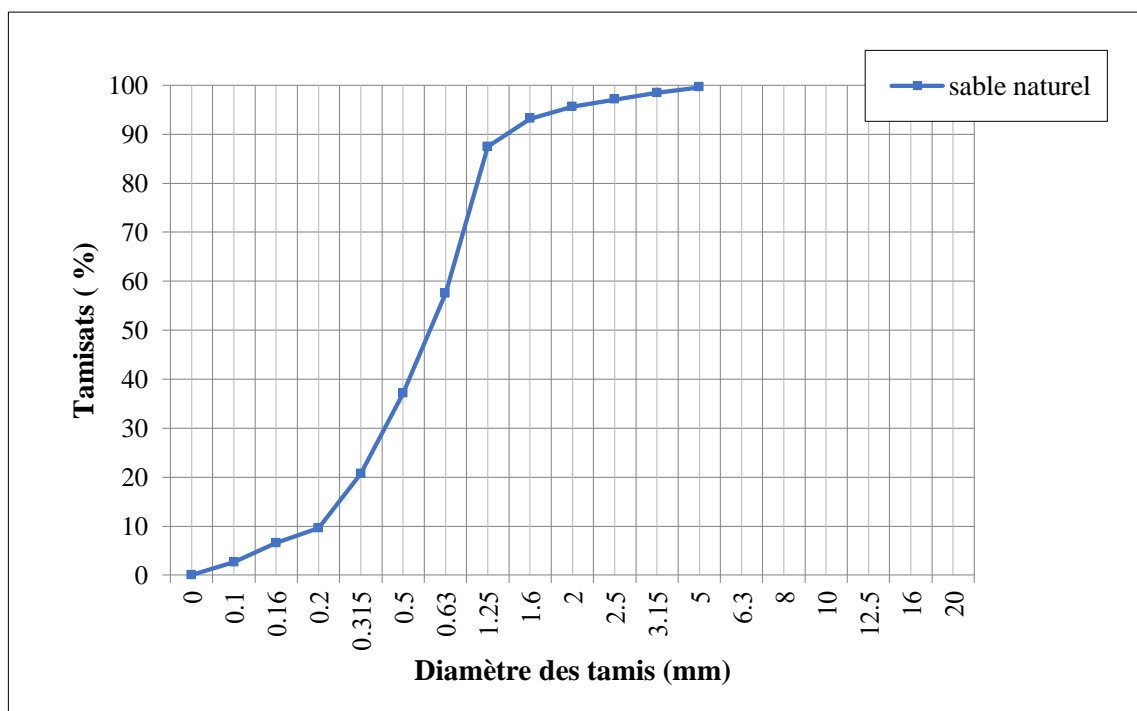


Figure III.5 Courbe granulométrique de sable utilisé.

Chapitre III : Identification des matériaux

III.2.4 Fibres de sisal

Le sisal est une fibre bien connue, fréquemment mentionnée dans la littérature sur les composites à base de fibres végétales. Parmi les diverses fibres du genre *Agave*, le sisal est l'une des fibres dures les plus robustes, cultivées dans des conditions tropicales et subtropicales. Il est plus rugueux que le jute et les autres fibres libériennes.



Figure III.6 Fibre de sisal.

III.2.4.1 Morphologie des fibres de sisal

Les figures III.7 (a) et III.7 (b) donnent des renseignements sur l'aspect et la forme de la fibre de sisal. Il est à noter que le lumen n'apparaît pas distinctement sur ces images, ce qui laisse croire que leur structure vue suivant la section droite est semblable à un enroulement en peau d'oignon.



Figure III.7 (a) Profil de la fibre de sisal

(b) section droite de la fibre de sisal

III.2.4.2 Composition chimique de fibre de sisal

La cellulose, l'hémicellulose, la lignine et la teneur en cendre en sont les principaux constituants, ils sont donnés par le tableau (III.6).

Chapitre III : Identification des matériau

Tableau III-6 Composition chimique de fibre de sisal en % massique.

| Cellulose | Hémicellulose | Lignine | Teneur en cendre |
|-----------|---------------|---------|------------------|
| 60 | 28 | 8 | 0,8 |

III.2.4.3 Propriétés physiques de la fibre de sisal

Les propriétés physiques de fibres de sisal sont données dans le tableau (III.7).

Tableau III-7 Propriétés physiques de fibre de sisal.

| Paramètre | Valeurs |
|-------------------------------|-----------|
| Diamètre [mm] | 0,19 |
| W (%) | 11,02 |
| TAE (%) | 67 |
| Densité [g/cm ³] | 0,92 |
| Absorption de l'eau (%) | 6 |
| Contrainte à la rupture [MPa] | 300 – 500 |
| Module d'élasticité [GPa] | 10,04 |
| Déformation [%] | 2 – 5 |
| Aspect de surface | Rugueuse |

III.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des différents mélanges est une eau potable de robinet conforme à la norme NF EN 1008. [60]

III.2.6 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est du type VISCOCRETE TEMPO 12 haut réducteur d'eau, commercialisé par la société algérienne Sika El- Djazair, et conforme à la norme NF EN 934-2. [61]

Ses propriétés essentielles sont données par le fabricant :

- Forme..... Liquide.
- Couleur Brun clair.
- PH 6 ± 1 .
- Densité $1,06 \pm 0,01$.
- Teneur en chlore $\leq 0,1 \%$.

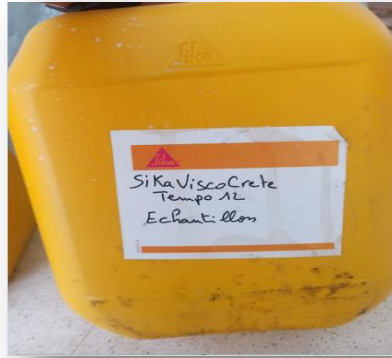


Figure III.8 Superplastifiant VISCOCRETE TEMPO 12.

III.3 Méthode de formulation des bétons de sable

III.3.1 Formulation des bétons de sable témoin

La méthode de composition du béton de sable classique utilisée est celle donnée par la norme EN-196-1. [62]

La composition massique du béton de sable classique utilisée est comme suite :

- 03 Parties de sable.
- 01 Partie de ciment.
- 0.5 Partie d'eau.

- 0.5 % de superplastifiant de la masse du ciment.

Nous avons travaillé avec une ouvrabilité constante. Cette ouvrabilité est déterminée par l'essai d'étalement et cela pour l'optimisation du rapport E/C et l'obtention d'une meilleure ouvrabilité.

III.3.2 Composition du béton de sable de Fibres

Pour la composition du béton de sable de fibre, nous avons utilisé la même démarche que celle du béton de sable classique. De ce fait la quantité de ciment et l'eau sont celles d'un béton de sable classique. Pour la quantité de sable, nous avons substitué le volume de fibre du volume de sable de sorte que le volume de fibre plus le volume du sable reste constant et égale à celui d'un béton de sable classique.

Nous avons travaillé avec une ouvrabilité constante au VÉBé test, avec un temps d'écoulement de 21 ± 5 s. [61]

Nous avons opté par l'essai VÉBé, pour des raisons pratiques. En effet, à cause de vibration électrique qu'offre l'essai VÉBé. La mesure de l'ouvrabilité par l'essai VÉBé est plus simple que par l'essai flow-test. En effet, l'incorporation des fibres rend l'écoulement du béton de sable de plus en plus difficile. Pour pouvoir travailler avec une ouvrabilité constante, nous avons ajouté un superplastifiant avec différents pourcentages. Le dosage en masse de fibre est de 0.5%, 1% et 1.5% et deux longueurs de fibres sont utilisés à savoir 6mm et 12mm.

Chapitre III : Identification des matériau

Les béton de sable de fibres utilisés sont composés comme suite :

- 03 Parties de sable.
- 01 Partie de ciment.
- 0.5 Partie d'eau.
- 0.5 % de superplastifiant de la masse du ciment.

III.3.3 Composition du béton de sable avec filler de marbre

Les béton de sable avec filler de marbre est composé comme suit :

- 03 Parties de sable.
- 01 Partie de ciment (80% ciment+ 20% filler de marbre).
- 0.5 Partie d'eau.
- 0.5 % de superplastifiant de la masse du liant (ciment +filler de marbre).

La composition des différents types du béton de sable utilisés dans cette étude est donnée aux tableaux III.8, III.9 et III.10.

Tableau III-8 Composition des bétons de sable témoin et béton de sable avec substitution de 20% de filler du marbre.

| | Type du béton de sable | % de ciment | % de filler de marbre |
|--------|---|-------------|-----------------------|
| BST | béton de sable témoin | 100 | 0 |
| BS20%M | béton de sable avec 20% de filler du marbre | 80 | 20 |

Tableau III-9 Composition des bétons de sable à base de fibre de sisal.

| | Type du béton de sable | % de fibre | % de ciment | % de filler de marbre |
|--------------|---|------------|-------------|-----------------------|
| BST | béton de sable témoin | 0 | 100 | 0 |
| BS (0,5%) FS | béton de sable témoin avec 0,5% de fibre de sisal subit aux traitements chimiques | 0,5 | 100 | 0 |
| BS (1%) FS | béton de sable témoin avec 1% de fibre de sisal | 1 | 100 | 0 |
| BS (1,5%) FS | béton de sable témoin avec 1,5% de fibre de sisal | 1,5 | 100 | 0 |

Tableau III-10 Composition des bétons de sable à base de filler du marbre et fibre de sisal.

| | Type de béton de sable | % de | % de | % de filler de |
|--|------------------------|------|------|----------------|
|--|------------------------|------|------|----------------|

Chapitre III : Identification des matériaux

| | | fibre | ciment | marbre |
|--------------------|---|--------------|---------------|---------------|
| BS20%M + (0,5%) FS | béton de sable témoin avec 0,5% de fibre de sisal | 0,5 | 80 | 20 |
| BS20%M + (1%) FS | béton de sable témoin avec 1% de fibre de sisal | 1 | 80 | 20 |
| BS20%M + (1,5%) FS | béton de sable témoin avec 1,5% de fibre de sisal | 1,5 | 80 | 20 |

III.4 Confection des éprouvettes

III.4.1 Malaxage et vibration

Le malaxage et la confection du béton de sable de fibre sont effectués selon une méthode inspirée de la norme EN-196-1[62] en suivant les démarches développées par KRIKER[63] qui consiste à imbiber les fibres dans 10% d'eau de gâchage pendant 5 mn ensuite malaxer les agrégats (sable) avec 30 % d'eau de gâchage durant 30 s, par la suite introduire progressivement les fibres humides avec 30 % de l'eau de gâchage et malaxer durant 3 mn afin d'éviter d'une part, l'absorption brusque d'une très grande quantité d'eau de gâchage ce qui générerait l'opération de malaxage et d'autre part de faciliter la séparation des fibres, dans le but d'éviter leur regroupement.

Enfin ajouter le ciment et le reste de l'eau en continuant le malaxage durant 2 mn et 30s. L'adjuvant est mélangé au préalable dans la totalité de l'eau de gâchage.

Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur de capacité de 5L avec une durée de malaxage totale de 4 minutes selon la norme EN 196-1. [62]

Le gâchage est réalisé à l'aide d'un malaxeur à axe verticale d'une capacité de 5 litres spécifié par la norme (NF P 18-411) montré sur la figure III.9 en suivant le même protocole. Le gâchage comme le malaxage sont des opérations délicates. Il faut, d'une part, s'assurer d'une qualité d'enrobage acceptable, d'une bonne dispersion des fibres et d'autre part, éviter la ségrégation des granulats.



Figure III.9 Elaboration des béton de sable.

du mélange.

Chapitre III : Identification des matériaux

Le mélange du béton de sable est gâché dans des moules (4×4 ×16) cm³, préalablement huilés afin de permettre un décoffrage facile voir figure (III.10). La vibration a été réalisée sur une table vibrante à amplitude de vibration réglable avec une durée de vibration d'une minute.



Figure III.10 Fabrication et moulage des éprouvettes.

III.4.2 Conservation des éprouvettes

Après coulage du béton de sable et assurer le surfacage des faces supérieures des moules, les éprouvettes sont ensuite entreposées dans la salle du laboratoire pendant 24 heures. Les moules sont couverts d'un sac plastique afin d'éviter toute évaporation de l'eau. Une fois démoulées, les éprouvettes sont conservées dans un bac à eau pour une cure de 28 jours d'âge.

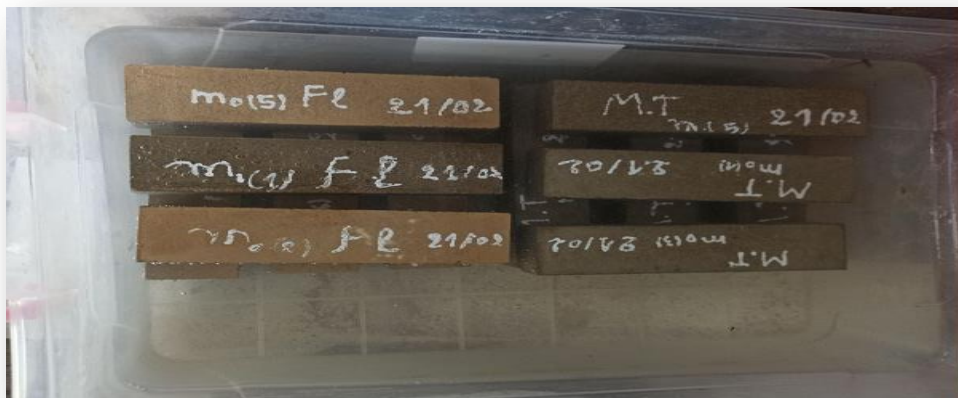


Figure III.11 Conservation des éprouvettes.

III.5 Caractérisation des bétons de sable à l'état frais

III.5.1 Masse volumique

Elle est estimée à partir de la détermination de la masse volumique des mélanges de béton frais selon la norme NF EN 12350-6. [64]

Chapitre III : Identification des matériau

Cette dernière caractérisée par la masse d'une quantité de béton frais rapporté à son volume après vibration, comme il est indiqué dans la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Où :

m_1 : masse du récipient en kg,

m_2 : masse du récipient rempli de béton en kg,

V : volume du récipient en m^3 .

III.5.2 Maniabilité

L'ouvrabilité des béton de sable est déterminée selon la norme NBN EN 1015-3[65] , l'essai consiste à déterminer la valeur d'étalement, cette valeur est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement du béton de sable frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée.



Figure III.12 Essai d'étalement à la table à secousses.

III.6 Résultats et interprétation

III.6.1 Maniabilité des béton de sable

D'après la norme NBN EN 1015-3[66], la valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement du béton de sable frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée, l'étalement des bétons de sable avec substitution de filler de marbre est donné par la figure III.13, III.14 et III.15.

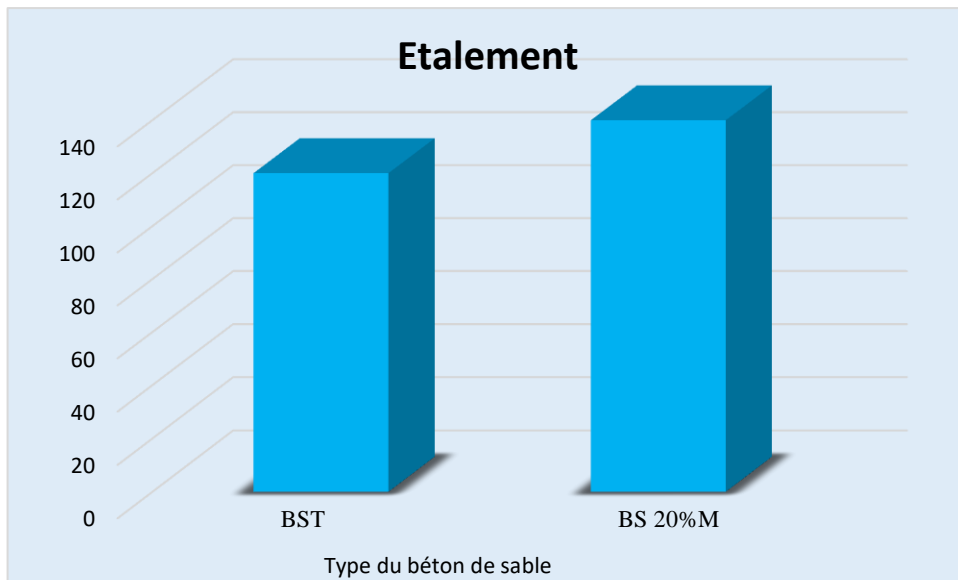


Figure III.13 Maniabilité des bétons de sable témoin et béton de sable avec 20% filler du marbre.

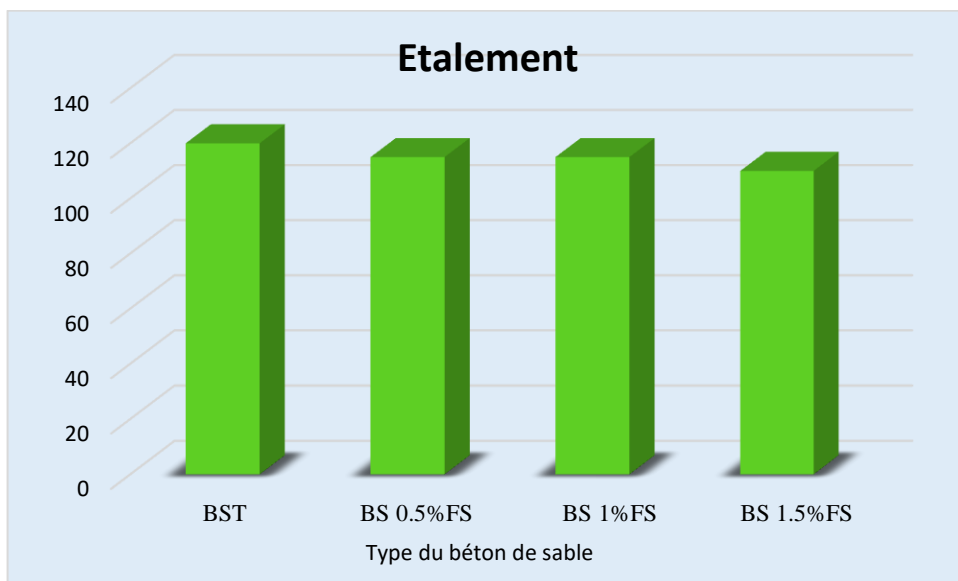


Figure III.14 Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal.

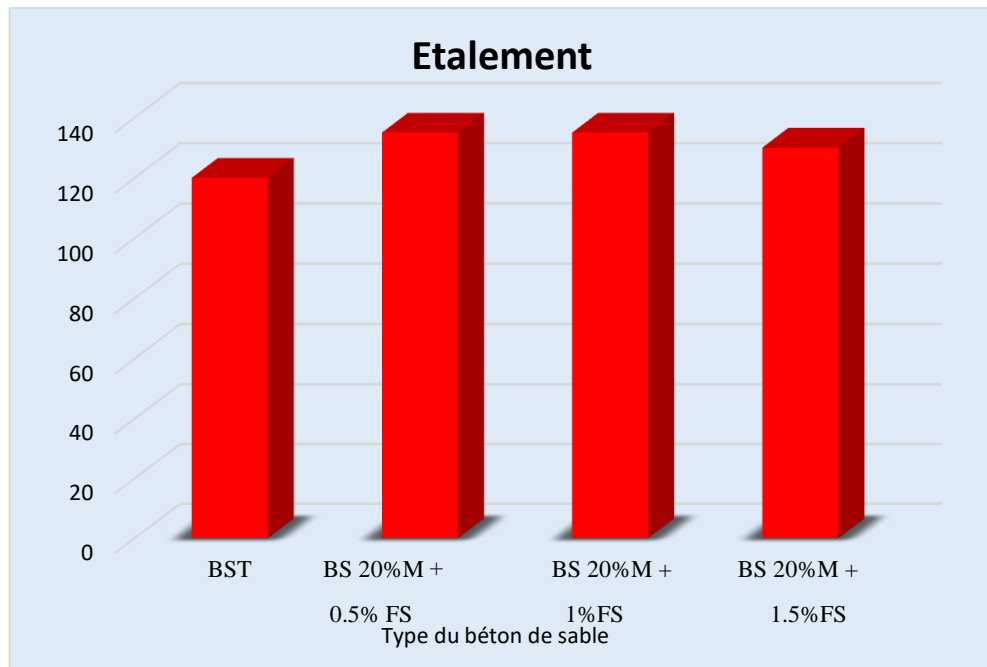


Figure III.15 Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal et 20% filler du marbre.

D'après les figures III.13, III.14 et III.15, on constate que la maniabilité des bétons de sable est affectée par le taux des fibres de sisal. Avec un rapport E/C fixe, les bétons de sable avec substitution de filler de marbre présentent une maniabilité supérieure à celle des bétons de sable témoin. Ceci s'explique par l'effet fillers ou effet de remplissage des additions minérales qui améliore la maniabilité des bétons de sable.

L'addition des fibres de sisal affecte légèrement la maniabilité.

III.6.2 Compacité des bétons de sable

La compacité des bétons de sable est estimée à partir de la détermination de la masse volumique des mélanges à l'état frais, Les résultats expérimentaux de cette masse volumique sont donnés par les figures III.16, III.17 et III.18.

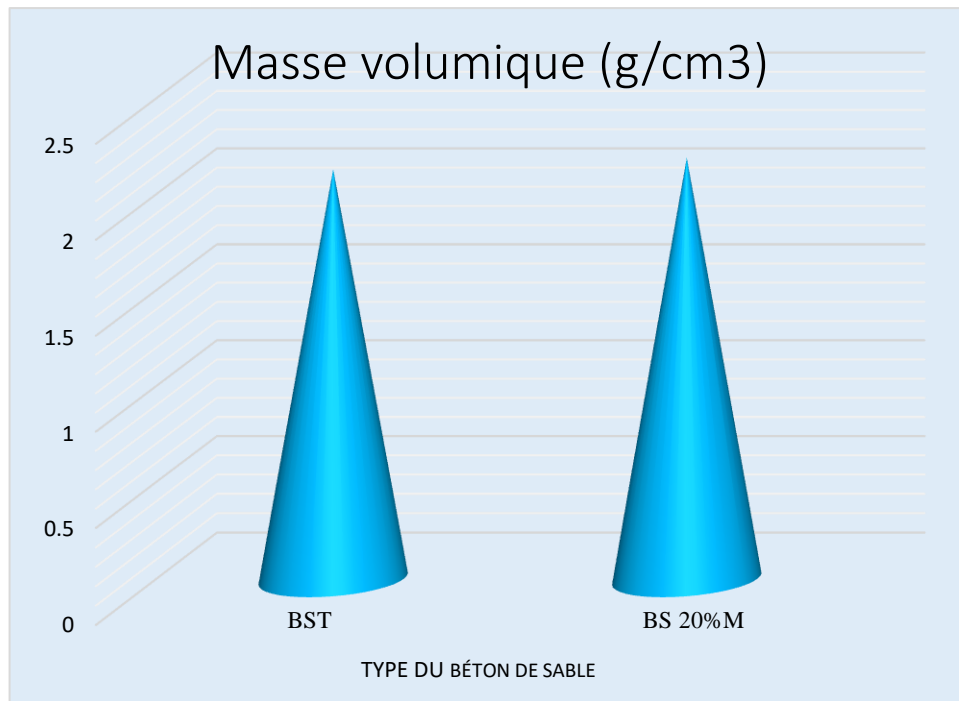


Figure III.16 Masse volumique des bétons de sable témoin et béton de sable avec 20% filler du marbre.

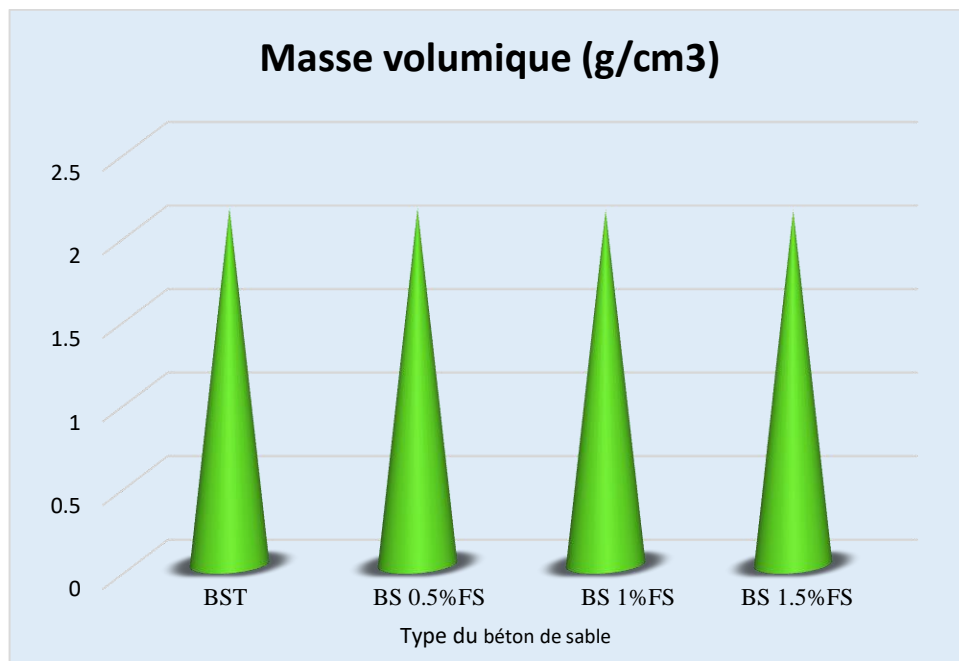


Figure III.17 Masse volumique des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal.

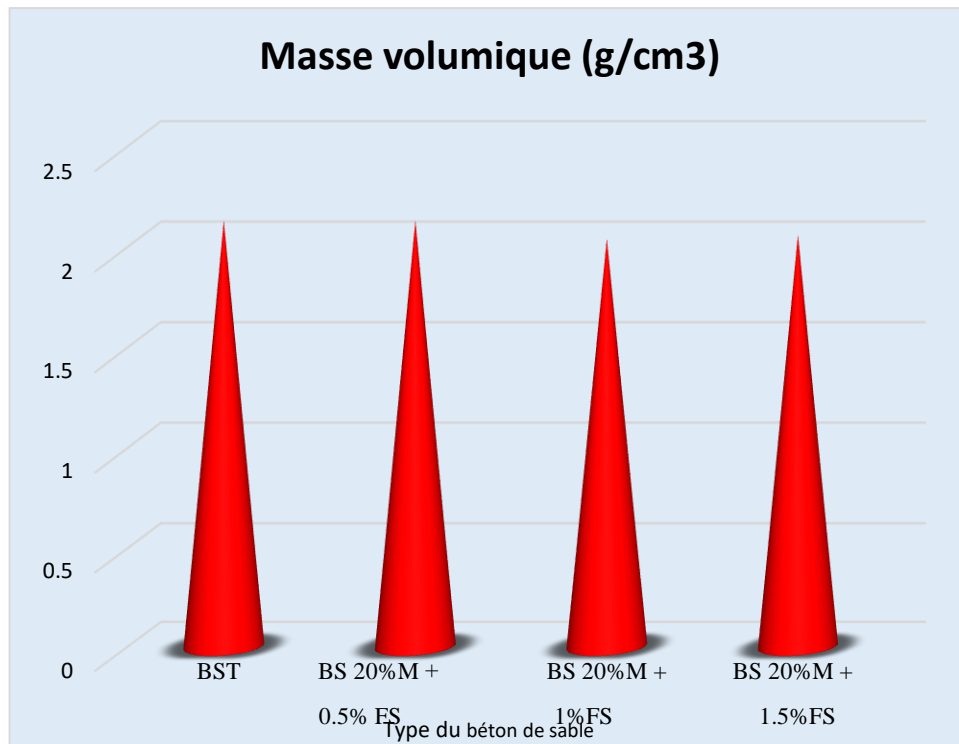


Figure III.18 Masse volumique des bétons de sable en fonction de taux des fibres de sisal et 20% du filler de marbre.

D'après les figures III.16, III.17 et III.18, on constate que la masse volumique des bétons de sable à l'état frais avec addition de 20% de filler du marbre est supérieure à celle des bétons de sable témoin cela est due à la densité intrinsèque de filler du marbre.

On constate aussi que l'effet de l'ajout des fibres de sisal sur la masse volumique des bétons de sable comme l'effet sur la maniabilité est négligeable. Une légère diminution est enregistrée pour un taux de 1,5%, cela est dû à la faible densité des fibres de sisal.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude avec leurs caractéristiques, la formulation des différents mélanges. Deux paramètres ont été variés (la longueur de la fibre et le pourcentage en fibres). On a mentionné aussi l'identification et la caractérisation des différents matériaux utilisés dans notre étude. Nous avons présenté le programme expérimental retenu dans cette recherche : le choix de corps d'épreuve et les conditions de conservation.

**Chapitre IV : Comportement
physico mécanique des bétons
de sable**

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

IV. Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

IV.1 Introduction

Afin de valoriser les matériaux locaux dans la fabrication des bétons de sable et d'améliorer leurs propriétés, ce chapitre est dédié à l'analyse et à l'évaluation de l'influence de la longueur et du taux de fibres de sisal sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable. La résistance mécanique demeure le critère primordial pour juger de la qualité du béton, cette résistance étant tributaire de divers paramètres tels que le rapport eau/ciment, la nature et le dosage du ciment et des additions minérales, le type et la dimension des granulats, etc.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents résultats obtenus à partir des essais expérimentaux, incluant les mesures des masses volumiques à l'état durci, les résistances mécaniques (compression et traction par flexion) ainsi que les tests de retrait. Ces essais ont été réalisés sur diverses formulations de bétons de sable, tant sans fibres (témoin) qu'avec l'ajout de fibres de sisal.

IV.2 Essais physico-mécaniques

IV.2.1 Masse Volumique

La masse volumique du béton à l'état durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume après 28 jours de durcissement selon la norme NF EN 12390-7[66], Les essais de la masse volumique ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm.

IV.2.2 Absorption d'eau

L'essai d'absorption d'eau est un essai qui nous donne une information sur la capacité d'absorption d'eau dans un béton. Il consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton conservé sous l'eau pendant 7 jours, 14 jours et 28 jours.

À partir des mesures des masses on peut déterminer l'absorption d'eau par l'équation suivante

$$A = (M1 - M0) / M0 \times 100$$

A : L'absorption d'eau (%).

M1 : Masse de l'éprouvette après durcissement sous l'eau (kg).

M0 : Masse initiale de l'éprouvette (kg).

IV.2.3 Essai de compression

Les éprouvettes utilisées pour l'essai de compression sont des éprouvettes prismatiques (4x4x4) cm obtenus après l'essai de traction par flexion. La machine d'essai est une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN à vitesse constante, l'essai de compression est conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvette. [67]

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

La résistance à la compression est calculée selon la formule suivante :

$$f_{c j} = P / S \text{ (M P a)}$$

P : charge de rupture en N

S : Section d'éprouvette en mm².



Figure IV.1 Description d'essai de compression.

IV.2.4 Essai de traction par flexion

Les éprouvettes utilisées dans l'essai de traction par flexion sont des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm. L'essai consiste à rompre en deux points des éprouvettes à l'aide d'un appareillage de traction par flexion de la presse de ZWICK Roel de capacité maximale de 20 KN. La valeur de la résistance et de la charge à la rupture est enregistrée directement au cours de l'essai.

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

Cette résistance aussi est déterminée par la formule suivante :

$$R_{tf} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{MPa})$$

P : l'effort de rupture en N

L : la distance ente les appuis en mm

b, h : dimension d'éprouvette en mm².



Figure IV.2 Description d'essai de traction par flexion.

IV.2.5 Essai de Retrait

L'essai de retrait a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm équipés de plots fixés aux extrémités de l'axe central selon la norme NFP 15-433[68]. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un rétractomètre équipé d'un comparateur.

L'essai consiste à mesurer en fonction du temps, la variation dimensionnelle des éprouvettes conservées dans une salle qui est en permanence à une température de (20±2) °C et à humidité relative de (50±5) °.

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

La variation de longueur ou la déformation de retrait a été déterminée par la formule suivante et exprimé en micromètre sur mètre.

$$\varepsilon_{\text{retrait}} = \frac{\Delta L}{L} \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right]$$

Δ : La variation de longueur en μm , et égale à $l_t - l_0$

L : représente la hauteur de l'éprouvette entre les faces des deux plots de mesure en contact avec le béton. Dans notre cas $L = 160 \text{ mm}$.

l_0 : la mesure de référence, soit la longueur mesurée lors de la première échéance en mm.

l_t : la mesure relevée à un temps t en mm.



Figure IV.3 Description d'essai de mesure du retrait.

IV.2.6 Essai d'auscultation sonore (Essai non destructif)

La détermination du module d'élasticité dynamique du béton de sable a été effectuée par auscultation ultrasonique des éprouvettes. Le principe est basé sur la mesure du temps de propagation des ondes ultrasoniques dans le matériau à l'aide d'un appareil muni d'un émetteur et d'un ou plusieurs récepteurs (figure IV.4) selon la norme NF EN 12504-4. [69]

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

Le matériau est soumis à des oscillations longitudinales à l'aide d'un jeu de Trans conducteurs électroacoustiques. Une impulsion de vibration longitudinale est produite par l'un des Trans conducteurs, appliquée sur l'une des faces de l'élément. Après avoir parcouru une longueur L dans le matériau, cette onde est convertie en un signal électrique par un second Trans conducteur électroacoustique.



Figure IV.4 Description d'essai de la mesure de la vitesse de son.

IV.3 Résultats et discussion

IV.3.1 Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable, avec et sans fibres

IV.3.1.1 Masse volumique à l'état durci

La masse volumique des bétons de sable d'étude est mesurée à l'état durci après 24 heures de séchage et jusqu'à masse constante, les résultats obtenus illustrés par les figures IV.5 et IV.6.

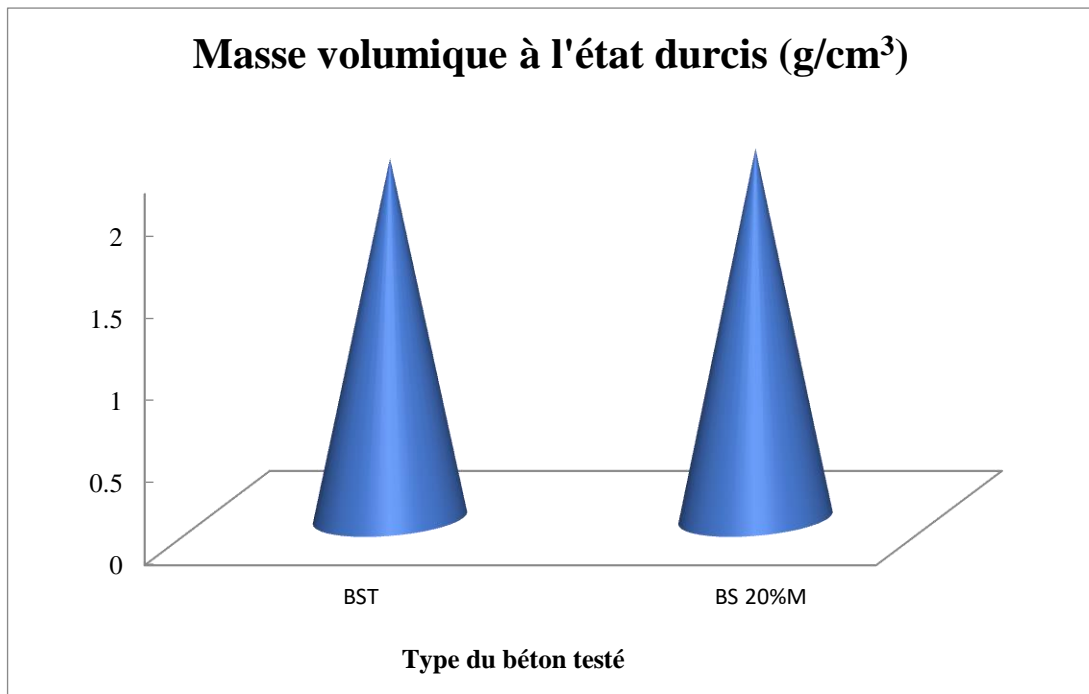


Figure IV.5 Masse volumique à l'état durcis des bétons de sable témoin et béton de sable avec 20% filler du marbre.

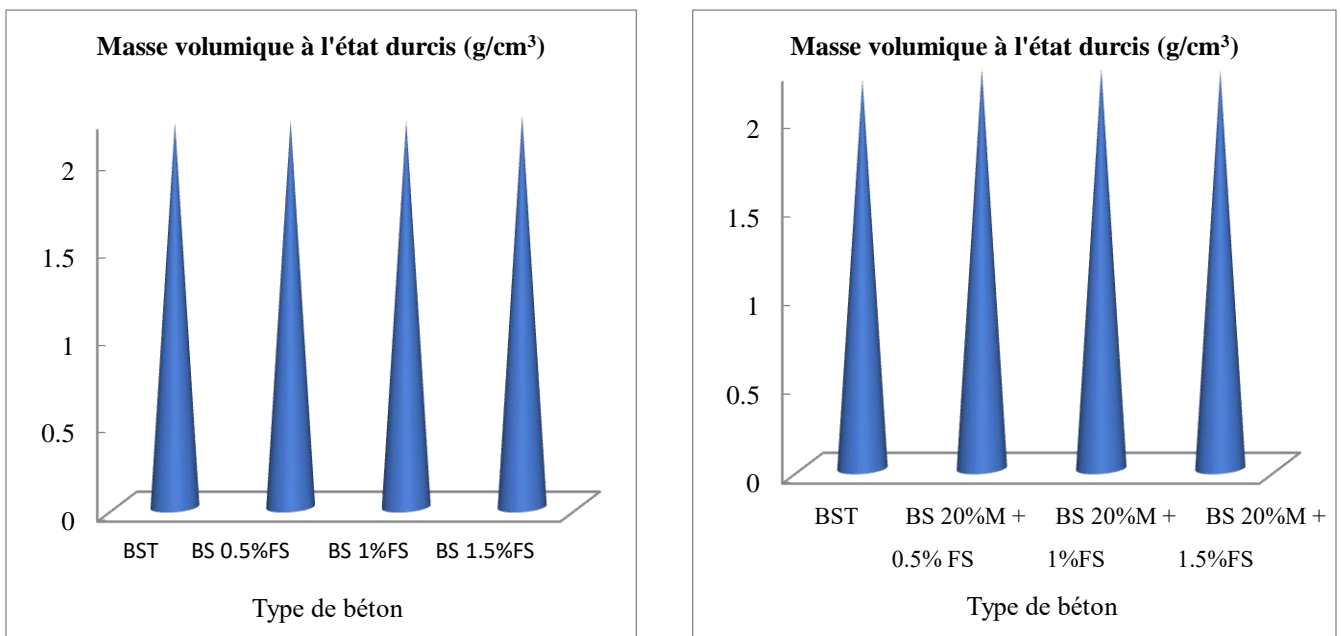


Figure IV.6 Masse volumique à l'état durcis des bétons de sable témoin et béton de sable avec fibre de sisal et 20% filler du marbre.

La masse volumique des bétons de sable à l'état durcis avec addition de 20% de filler du marbre est supérieure à celle des bétons de sable témoin cela est due à la densité intrinsèque de filler du marbre.

Dans le but d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable on a visé d'étudier l'effet du taux de fibres de sisal.

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

Une légère variation des masses volumiques a été enregistrée pour les différents dosages en fibres comme la montre les figures IV.5 et IV.6 qui montre l'effet du taux des fibres sur la variation de la masse volumique des bétons de sable.

Les fibres de sisal sont de faible densité, de petites dimensions ($L=12\text{mm}$ et $L=6\text{ mm}$) ajoutés aux bétons de sable avec un faible dosage. Dans ce cas on peut dire que l'effet du taux de fibres sur la masse volumique à l'état durci est négligeable.

IV.3.1.2 Résistance mécanique des bétons de sable

IV.3.1.2.1 Résistance en traction par flexion

IV.3.1.2.1.1 Effet de l'ajout de filler de marbre sur la résistance en traction par flexion

Les essais mécaniques de traction par flexion ont été réalisés sur les éprouvettes du béton de sable témoin et avec fibre de sisal dans le but d'étudier l'effet de l'effet de filler de marbre sur l'évolution de la résistance mécanique de traction par flexion.

Les essais ont été effectués aux différents âges du béton : 7, 14, et 28 jours. Les résultats de la résistance mécanique de traction par flexion sont représentés par la moyenne de trois éprouvettes pour la traction par flexion, sont associés par l'écart type. Ces résultats sont illustrés par la figure IV.7.

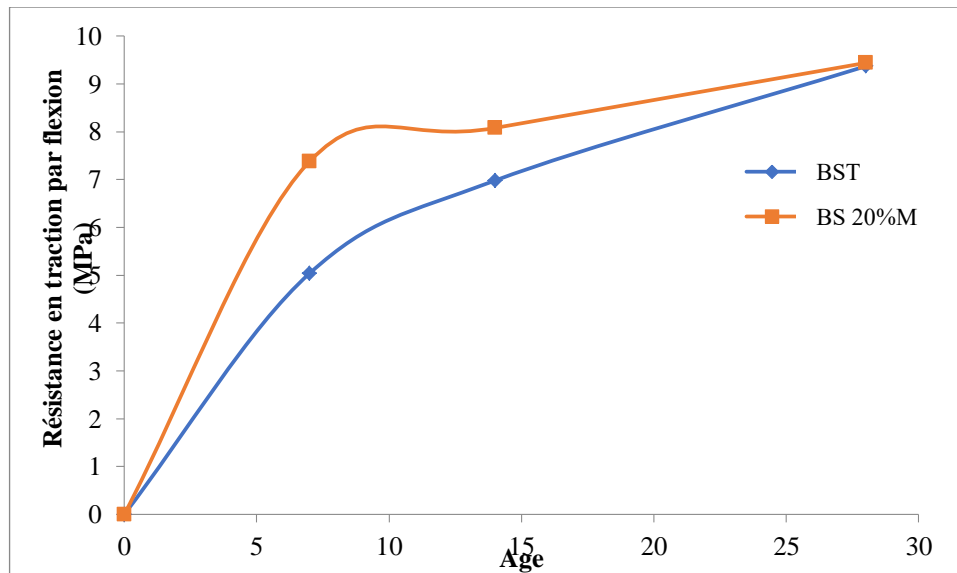
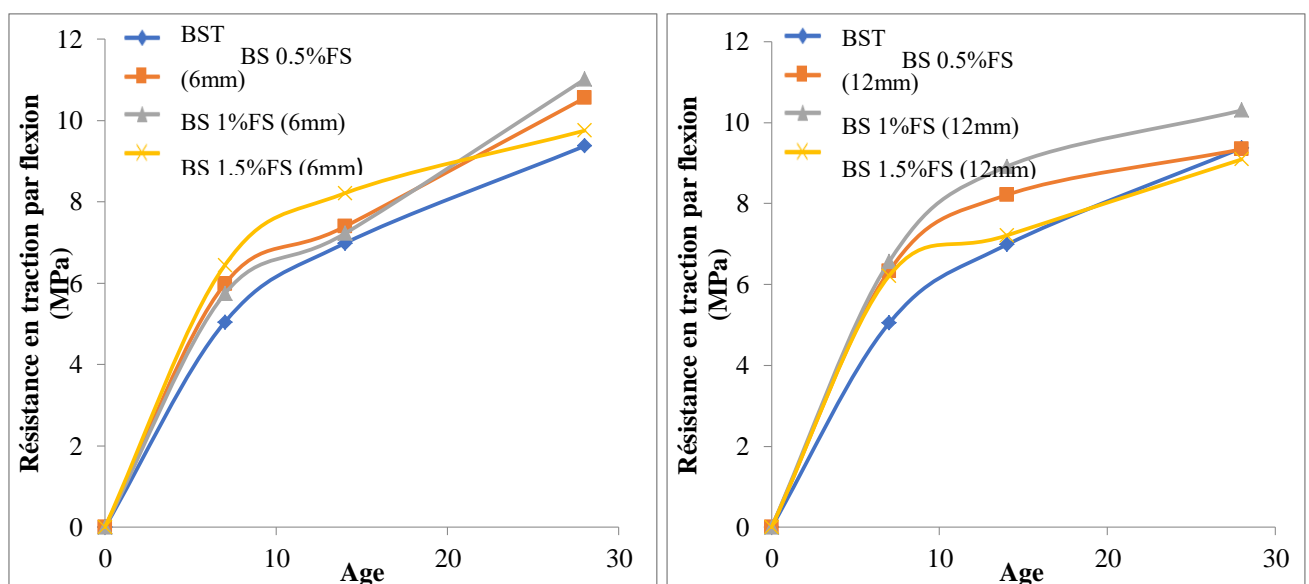


Figure IV.7 Effet de filler de marbre sur la résistance en traction par flexion.

Les résistances initiales à jeune âge (7 jours) des bétons de sable avec filler de marbre donnent des bonnes performances par rapport au béton de sable de référence. Cela est dû à l'utilisation des ajouts comme poudre fine et aussi à l'utilisation des adjuvants de superplastifiant qui permet aussi d'améliorer la rhéologie des bétons de sable à l'état frais. Les mêmes résultats précédents à 14 jours on a observé dans la figure IV.7, une augmentation de la résistance en compression.

D'après la figure IV.7, on constate la résistance des bétons de sable avec addition de 20% de filler de marbre présentent une résistance en traction par flexion supérieure à celle de béton de sable témoin. Cela peut s'expliquer par le broyage poussé malgré la faible réactivité de la poudre de marbre par rapport au ciment. Sur le plan physico-mécanique, la poudre de marbre réagit par sa finesse, engendrant ainsi un squelette plus cohérent, une peau de béton relativement plus imperméable et par conséquent un béton plus résistant. Il paraît intéressant, d'insister sur le fait que l'influence de la finesse de la poudre de marbre est d'autant plus significative que l'on cherche à fabriquer des bétons plus performants. L'emploi de la poudre de marbre en ajout au béton de sable permet d'améliorer les résistances en compression et en traction par flexion.

IV.3.1.2.1.2 Influence du taux de fibres de sisal sur la résistance en traction par flexion



D'après la figure IV.8, on constate que les bétons de sable fibrés avec 0,5% de fibres de sisal montrent une meilleure résistance à la flexion comparativement au béton de sable témoin. Les fibres présentes dans les mélanges reprennent les chargements appliqués et contribuent à l'augmentation globale de la résistance à la flexion du composite.

La figure IV.8 montre aussi l'effet du taux des fibres de sisal sur la résistance en traction par flexion, d'après cette figure on constate que la résistance mécanique de traction par flexion des les bétons de sable avec fibre de sisal est supérieure à celle du béton de sable témoin, cela est due au pont d'encrage créé par les fibres qui augmente la résistance en traction par flexion. De plus les bétons de sable avec 1 % de fibre de sisal présentent les meilleures résistances en traction par flexion.

Figure IV.8 Effet du taux de fibres de sisal sur la résistance en traction par flexion

IV.3.1.2.1.3 Influence du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en traction par flexion

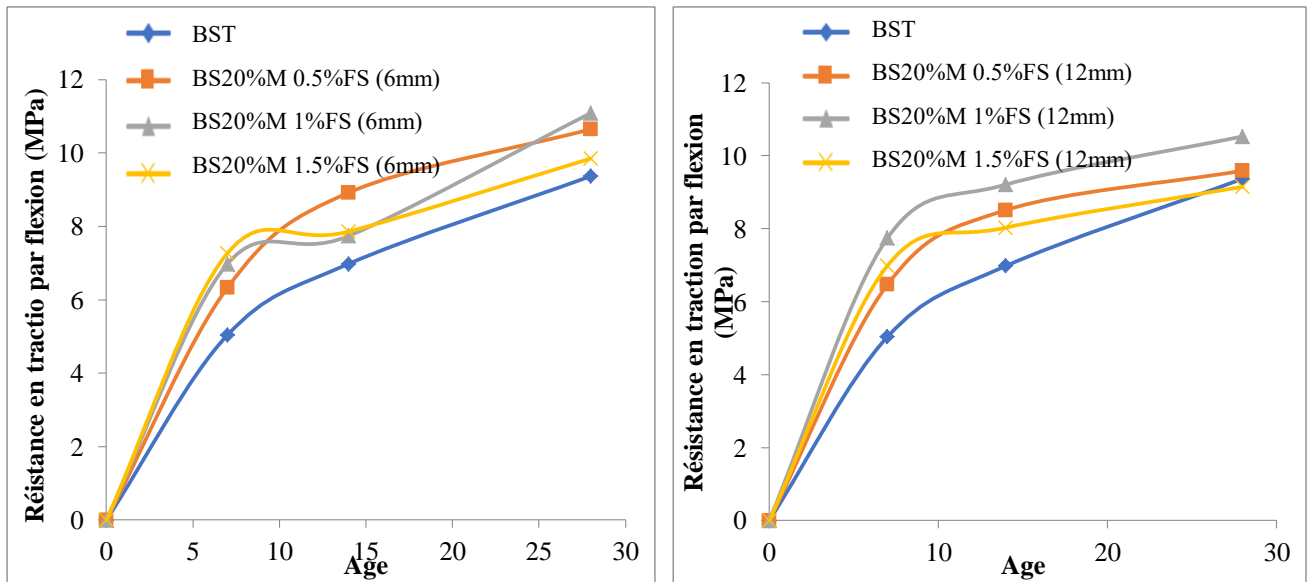
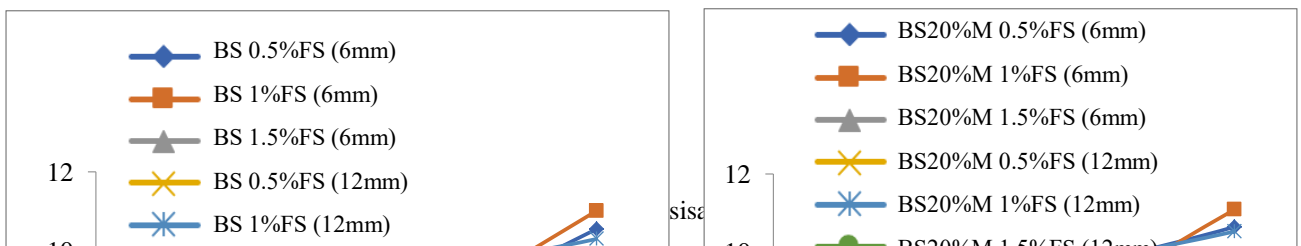


Figure IV.9 Effet du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en traction par flexion.

D'après la figure IV.9 qui présente l'effet du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en traction par flexion, on constate que les bétons de sable avec addition de 20% de filler de marbre et un renforcement de 1,0% des fibres de sisal présentent les meilleures résistances en traction par flexion. Cela est dû à l'utilisation des ajouts comme poudre fine de marbre et aussi à l'utilisation des adjuvants de superplastifiant qui permet d'améliorer la rhéologie des bétons de sable à l'état frais. La valeur maximale de la résistance en traction par flexion à 28 jours est de 10.53 MPa. Ce résultat correspond au béton de sable avec addition de 20% de filler de marbre et 0,5% de fibre de sisal.

IV.3.1.2.1.4 Influence de la longueur de fibre de sisal sur la résistance en traction par flexion



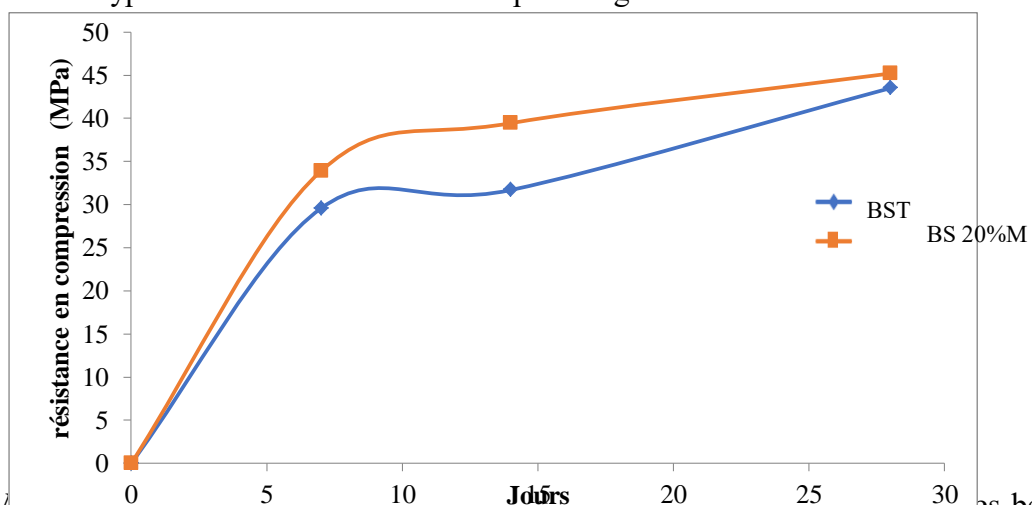
D'après les figure IV.10, on constate que les bétons de sable avec 20% de filler de marbre et un pourcentage de 1%% et une longueur de 6mm présentent les meilleurs résultats.

IV.3.1.2.2 Résistance en compression

IV.3.1.2.2.1 Effet de l'ajout de filler de marbre sur la résistance en compression

Les essais mécaniques de compression ont été réalisés sur les éprouvettes du béton de sable témoin et avec fibre de sisal.

Les essais ont été effectués aux différents âges du béton : 7, 14, et 28 jours. Les résultats de la résistance mécanique de compression sont représentés par la moyenne de six éprouvettes, sont associés par l'écart type. Ces résultats sont illustrés par la figure IV.11.



La figure IV.11 Effet de filler de marbre sur la résistance en compression. es bétons de sal

l'hydratation du C_3S en présence du $CaCO_3$ de la poudre de marbre ce qui produit des hydrates de carbo-silicate de calcium qui affectent de bonnes performances mécaniques. Selon J. Baron et J.P. Ollivier, il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. En ce qui concerne les pâtes avec ajout de poudre de marbre, les amas de CSH sont très denses ce qui induit une grande compacité. [70] L'évolution de la résistance à la compression est similaire à celle de la résistance en traction par flexion.

IV.3.1.2.2 Influence du taux de fibres de sisal sur la résistance en compression

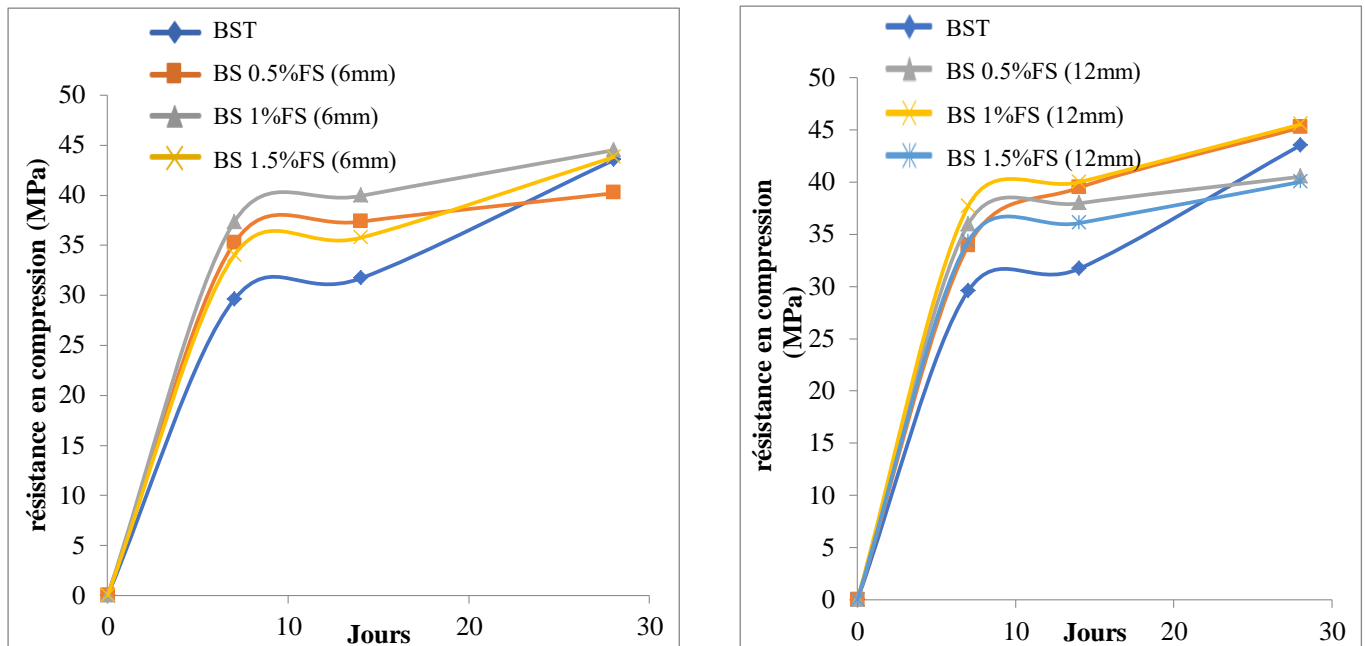


Figure IV.12 Effet du taux de fibres de sisal sur la résistance en compression.

Les propriétés mécaniques dans un composite dépendent principalement de la teneur en fibres, de leur orientation, mais aussi de la qualité du transfert de charge à l'interface fibre-matrice. Ceci est particulièrement vérifié pour les composites renforcés par des fibres courtes du fait de la multiplication des interfaces. Le transfert d'efforts entre la fibre et la matrice a lieu au niveau de leur interface et joue un rôle essentiel dans le comportement du composite. Cet effet est amplifié par la répartition aléatoire des fibres dans le composite. L'adhésion interrassiale est une combinaison de trois phénomènes agissant simultanément à des degrés différents[71] :

- Interpénétration mécanique entre la pâte de ciment et la surface des fibres.
- Adhésion physique.
- Adhésion chimique.

Il est donc important de s'intéresser à l'interaction fibre-matrice en termes d'adhésion et également d'étudier l'influence de la teneur en fibre du composite sur ses propriétés mécaniques.

La figure IV.12 présente l'effet de taux de fibre de sisal sur la résistance en compression des bétons de sable en comparaison à celle témoin, d'après cette figure on observe une augmentation de la résistance par l'ajout des fibres de sisal avec un taux de 1%.

IV.3.1.2.2.3 Influence du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en compression

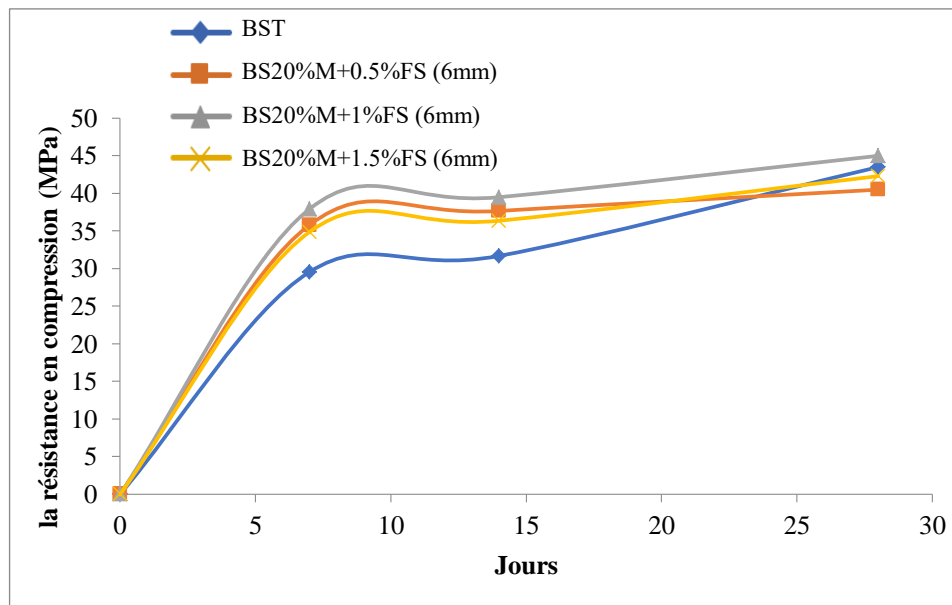


Figure IV.13 Effet du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en compression.

D'après les résultats représentés par la courbe IV.13 on constate que les meilleures résistances en compression sont obtenues par le mélange de 20% de filler de marbre et un taux de 1% de fibre de sisal.

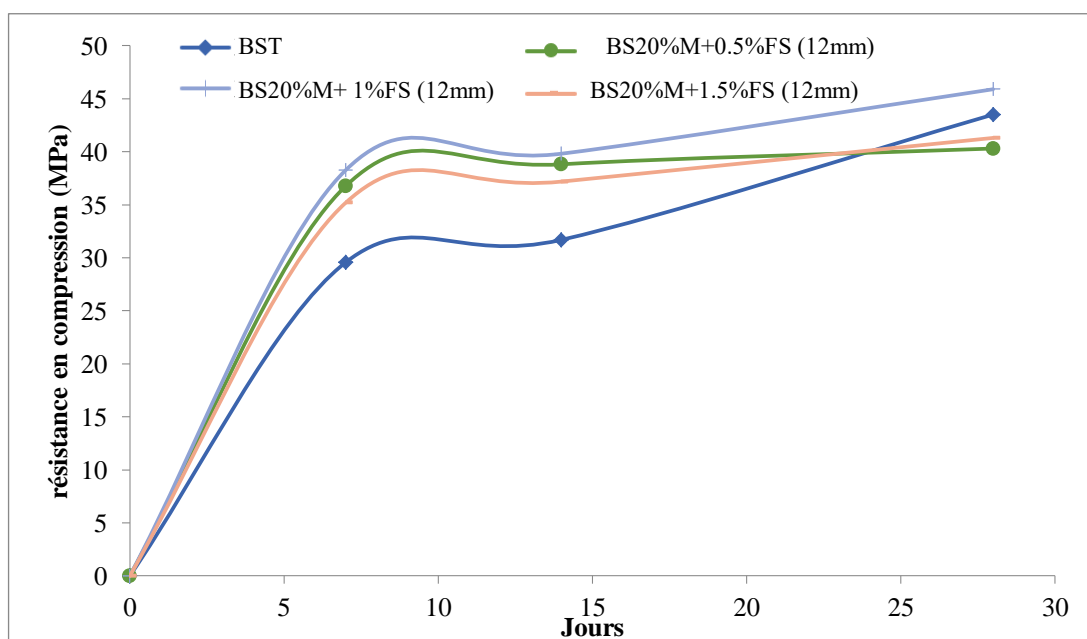


Figure IV.14 Effet du taux de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en compression.

Comme on peut l'observer sur les Figures IV.13 et IV.14 l'utilisation de fibres de sisal à 0,5 % a augmenté la résistance en traction par flexion des mélanges du béton de sable après 7 jours de cure par rapport au mélange des bétons de sable témoin. L'augmentation de la résistance à la flexion peut

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

être due à la contribution de l'eau libérée à l'hydratation du ciment et à l'amélioration de la résistance à la flexion et en compression. Dans ce cas, les fibres naturelles contribuent au durcissement interne de la matrice, améliorant ainsi la liaison entre les fibres et la matrice. D'autre part, l'utilisation d'une dose plus élevée de 1 % de fibres a entraîné une résistance à la flexion plus élevée, Une augmentation supplémentaire du dosage des fibres à 1,5% a entraîné, en général, un développement plus faible de la résistance à la compression, quel que soit l'âge. Cela peut être dû à la quantité relativement élevée d'eau libérée qui a augmenté le rapport E/C. L'agglomération et le manque de répartition des fibres peuvent induire un lâche arrangement, augmentant ainsi la distance inter-particules et diminuant les performances mécaniques de la matrice.

IV.3.1.2.2.4 Influence de la longueur de fibre de sisal sur la résistance en compression

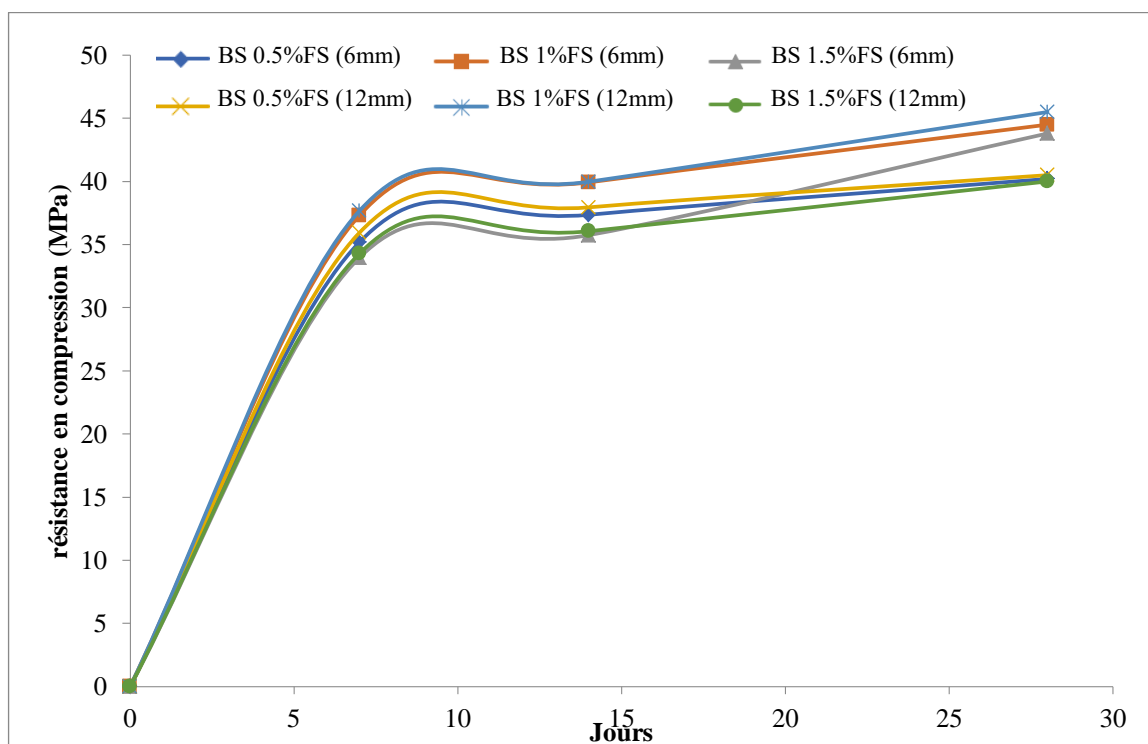


Figure IV.15 Effet de la longueur de fibres de sisal sur la résistance en compression.

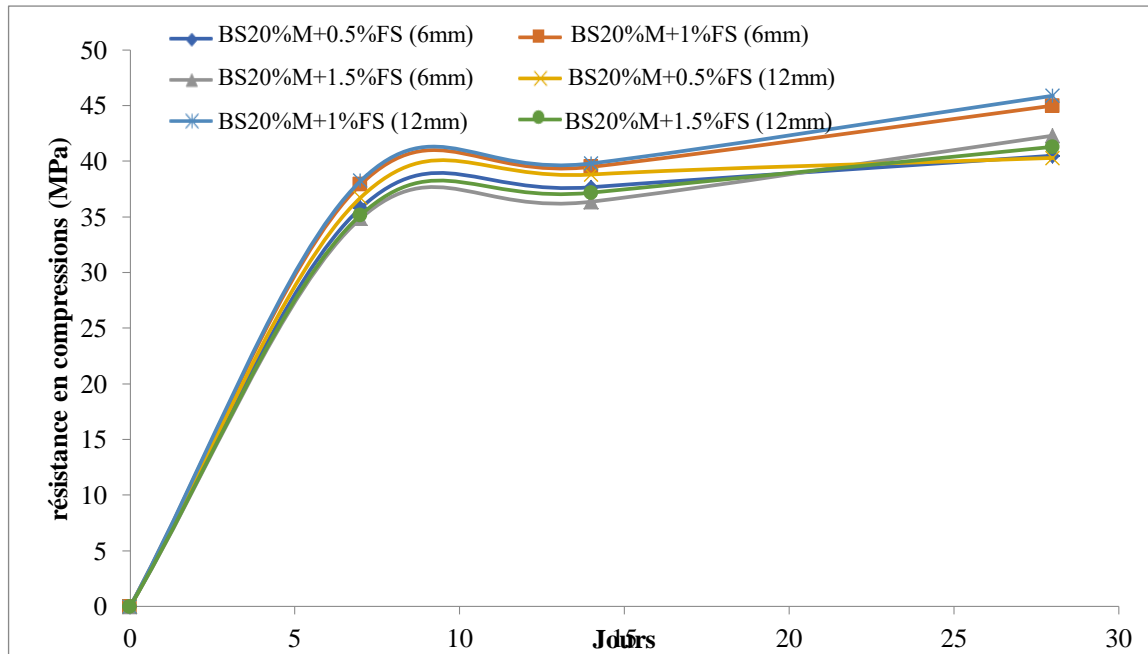


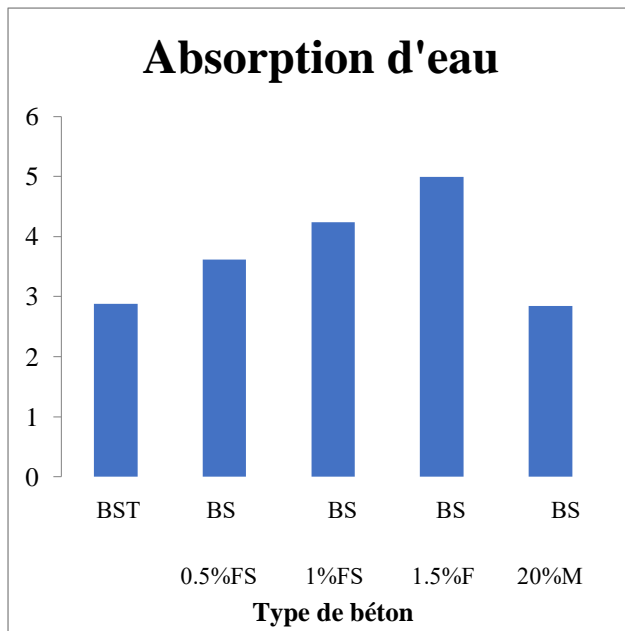
Figure IV.16 Effet de la longueur de fibres de sisal et filler de marbre sur la résistance en compressions.

La figure IV.16 représente l'effet des fibres et filler du marbre sur la résistance en compression.

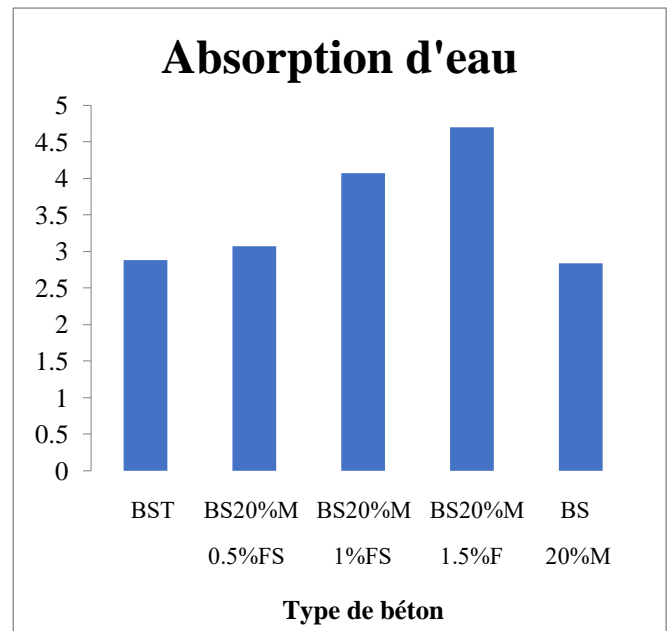
L'augmentation de la longueur des fibres de sisal conduit généralement à la réduction de la résistance à la compression.

IV.3.2 Absorption d'eau

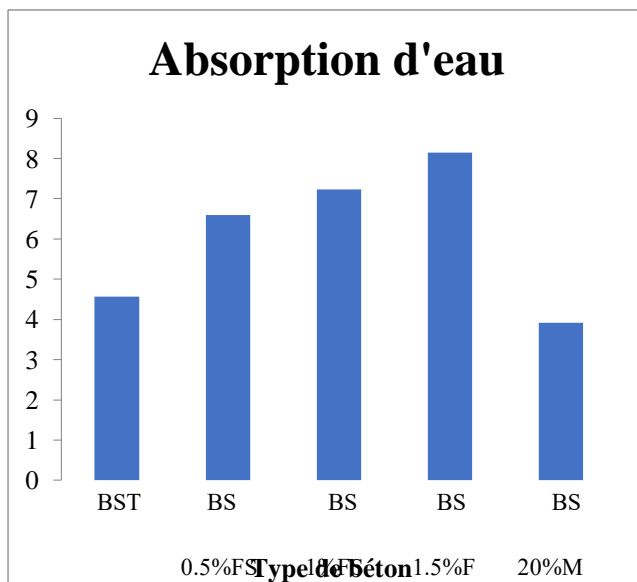
L'essai d'absorption d'eau est un essai qui nous donne une information sur la capacité d'absorption d'eau dans notre béton de sable témoin et avec fibre de sisal. Les résultats obtenus sont regroupés dans les histogrammes suivants :



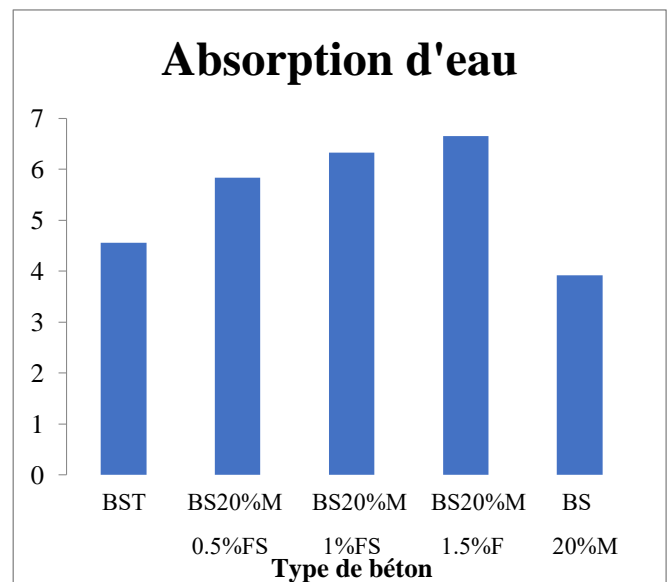
A) 7 jours



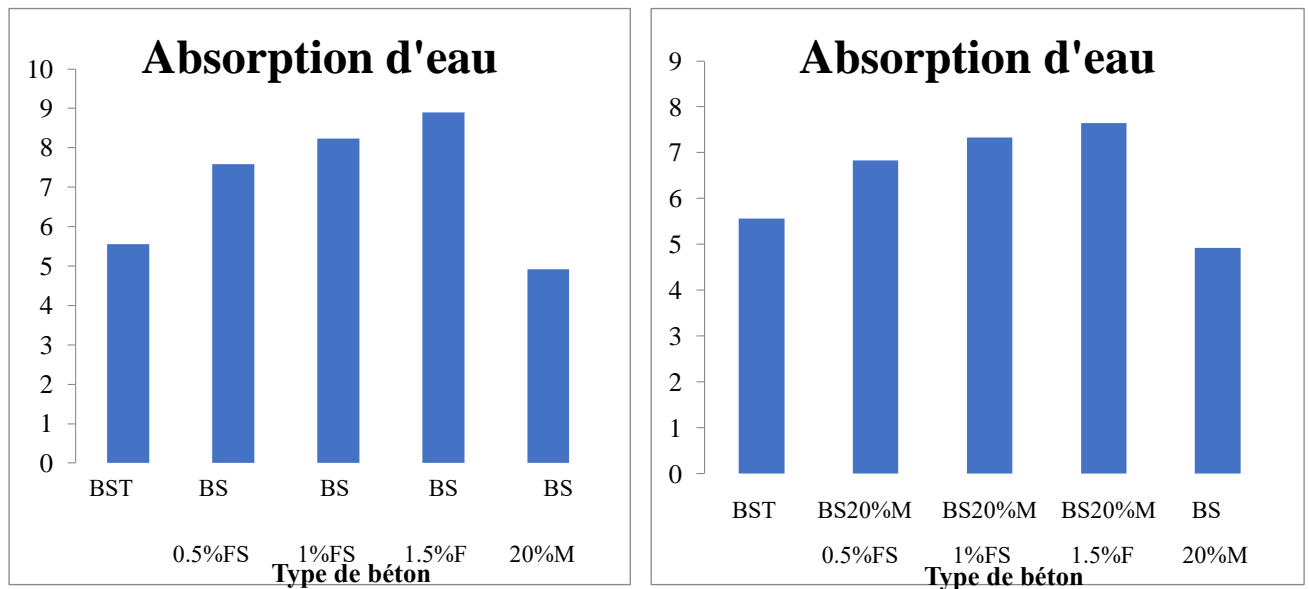
A) 7 jours



B) 14 jours



B) 14 jours



C) 28 jours

C) 28 jours

Figure IV.17 Absorption d'eau des bétons de sable témoin et avec fibre de sisal et 20% de filler de marbre.

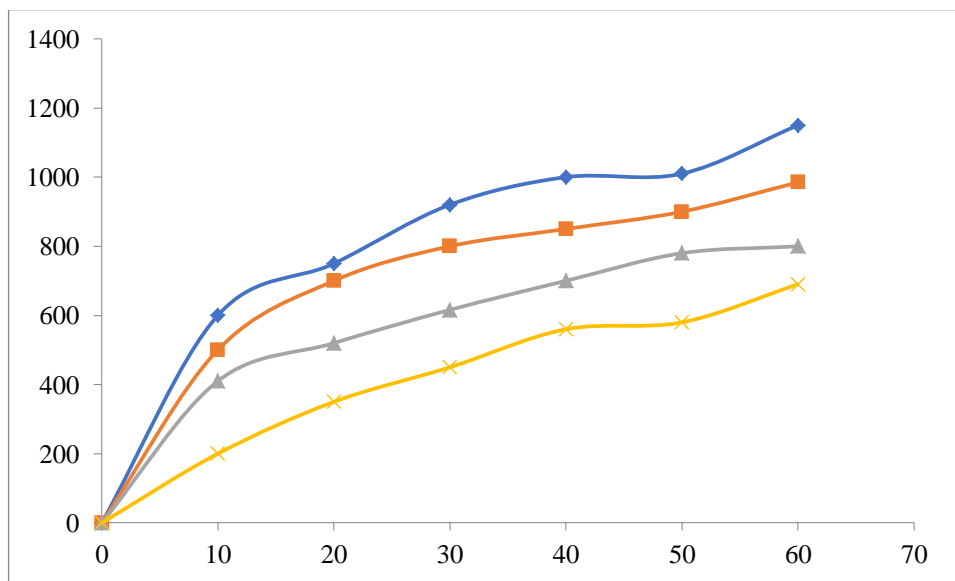
D'après cette figure on peut constater que les bétons de sable fibrés ont montré une porosité et un taux d'absorption à l'eau supérieure à celle du béton de sable référence. Les bétons de sable fibrés avec 5% de fibres de sisal ont montré une porosité légèrement supérieure aux bétons de sable fibrés avec 1,5% de fibres. L'association des fibres végétales avec la chaux conduit à une certaine hétérogénéité du mélange, ce qui donne lieu à l'apparition d'un nombre important de pores. Ainsi, l'augmentation de la teneur en fibres est proportionnelle à la porosité à l'eau.

IV.3.3 Effet du taux de fibres sur l'évolution du retrait des bétons de sable

L'essai du retrait a été effectué sur des éprouvettes en Effet du taux de fibres sur l'évolution du retrait des bétons de sable avec différents taux en fibres de sisal. Les mesures de la déformation ont été faites aux différentes échéances qui sont 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10,30 et 60 jours. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure IV.18.



Figure IV.18 Evolution du retrait des bétons de sable selon le taux de fibres.



La figure IV.18 présente l'évolution des valeurs de retrait total des bétons de sable avec différents taux de fibres de sisal. D'après cette figure on constate une diminution des valeurs de retrait avec l'augmentation de taux de fibres de sisal. Cette diminution à l'âge de 60 jours est de l'ordre de 18,34%, 20,51% et 23,44% respectivement avec les taux de fibres de 0,5%, 1% et 1,5% par rapport au béton de sable témoin (sans fibre). Ceci est dû essentiellement aux caractéristiques géométriques des fibres de sisal utilisé (fibre courte). Les fibres courtes s'opposent aux contraintes de déformation du retrait et limitent ainsi les variations dimensionnelles et entraîne une réduction au niveau de la formation et la propagation des microfissures.

Les matrices cimentaires pures qui présentent un comportement fragile passent à un comportement plus ductile lorsqu'elles sont additionnées de fibres végétales. Il a été noté dans de nombreuses études que les résistances en traction, en flexion ainsi que la ténacité du composite croissent avec la longueur des fibres jusqu'à un seuil d'à peu près 2% d'ajout en volume, seuil qui dépend de la nature des fibres végétales. L'ajout de fibres est aussi reconnu comme améliorant la résistance à l'impact des matrices solides. De plus, nombreux sont les travaux qui mentionnent que l'incorporation de fibres limite le retrait plastique de la matrice.

IV.3.4 Effet du taux de fibres sur la vitesse d'impulsion ultrasonique (Essai non destructif)

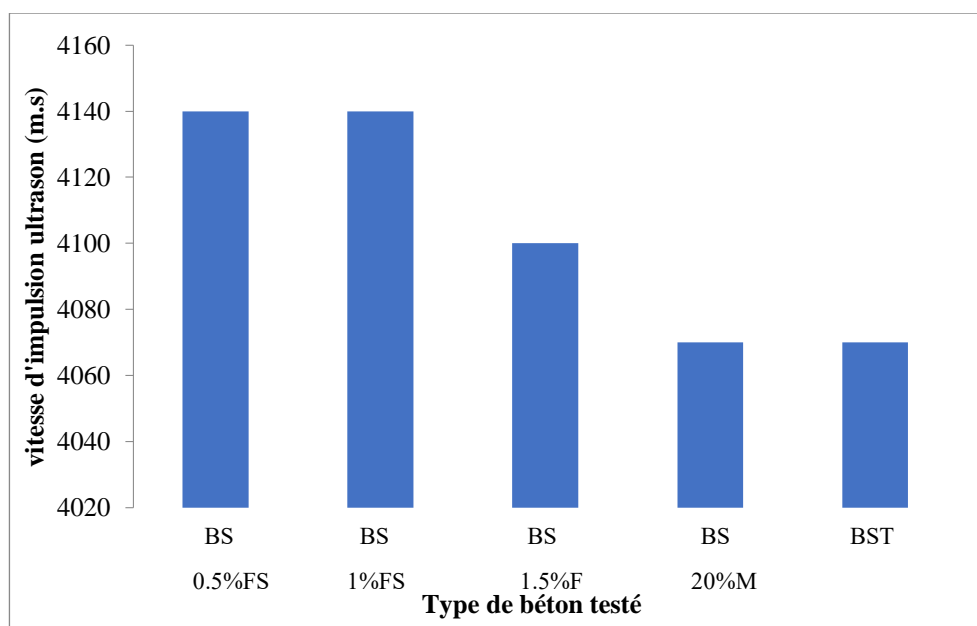


Figure IV.19 Effet du taux de fibres sur la vitesse d'impulsion ultrason.

D'après la figure IV.19, on constate que les bétons de sable avec fibres de sisal donnent les meilleurs résultats de vitesse ultrason en comparaison et même supérieur par rapport au béton de sable témoin.

IV.4 Mode de rupture

D'après la norme EN 12390-3[67] le mode de rupture générale des éprouvettes des bétons de sable d'étude sans fibre est incliné par un angle de 45° , ce mode est conditionné par les forces de frottement qui se développent entre les plateaux de la presse et les faces de l'éprouvette, ces forces de frottement sont dirigées vers l'intérieur de l'éprouvette et freinent l'évolution des déformations transversales du béton (Figure IV.20).

Chapitre IV : Comportement physico mécanique des bétons de sable

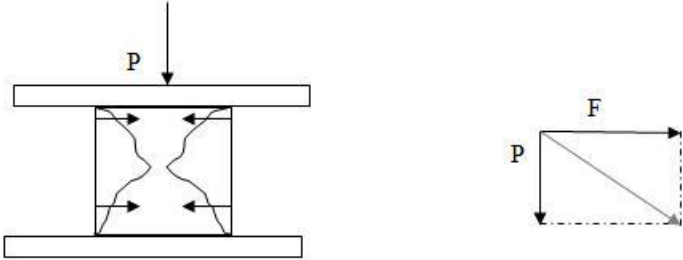


Figure IV.20 Mode de rupture des bétons de sable en compression.

P : Force de rupture.
F : Force de forttement



Figure IV.21 Mode de rupture du béton de sable témoin.



béton de

La figure IV.22 montre clairement que les bétons de sable avec fibres de sisal possèdent un caractère ductile lors de la rupture, cela veut dire que l'éprouvette reste après la rupture attachée par les fibres de sisal et aucun éclat n'a été observé, cela présente un avantage majeur pour la stabilité des éléments porteurs de structures en bétons de sable.

IV.5 Conclusion

Cette étude vise à analyser l'impact de l'ajout de filler de marbre et de fibres végétales de sisal sur les propriétés mécaniques des bétons de sable. Les principales conclusions sont les suivantes :

- ✓ La masse volumique des bétons de sable, une fois durcis, augmente avec l'ajout de 20 % de filler de marbre par rapport aux échantillons de référence.
- ✓ Les variations des masses volumiques sont légères pour les différents dosages en fibres.
- ✓ La résistance à la flexion s'améliore avec l'incorporation des fibres de sisal, et les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'ajout de 20 % de filler de marbre, dépassant ainsi ceux du béton de sable classique basé sur le CPJ.
- ✓ La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres, ce qui est en accord avec la littérature qui indique que l'ajout de fibres végétales au béton ou au béton de sable n'améliore pas la résistance à la compression.
- ✓ Les valeurs de retrait diminuent avec l'augmentation du taux de fibres de sisal.
- ✓ Les bétons de sable renforcés avec des fibres de sisal montrent des résultats excellents en termes de vitesse ultrasonique, surpassant les échantillons de référence.
- ✓ Les bétons de sable contenant des fibres de sisal présentent une meilleure ductilité lors de la rupture.

Conclusion générale

Conclusion générale Perspectives et Travaux Futurs

Utilisation des Ressources Naturelles dans les Bétons de Sable : Avantages et Perspectives

L'utilisation des ressources naturelles peut être extrêmement bénéfique dans les filières du béton de sable, tant sur le plan environnemental qu'économique et technique. Leur incorporation contribue non seulement à l'amélioration des performances physiques et mécaniques, mais le renforcement des bétons de sable par des fibres naturelles, telles que le sisal, offre également une solution très efficace en termes de ductilité. Cette étude se penche sur l'influence de l'utilisation du filler de marbre et de la fibre végétale de sisal sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sable.

Analyse et Conclusions des Résultats

L'analyse des résultats obtenus permet de tirer les conclusions suivantes:

1. **Maniabilité** : La maniabilité des bétons de sable est affectée par le taux des fibres de sisal. Un dosage approprié est crucial pour maintenir une bonne maniabilité.
2. **Masse Volumique à l'État Frais** : La masse volumique des bétons de sable à l'état frais avec addition de 20% de filler de marbre est supérieure à celle des bétons de sable témoins. Cependant, l'effet de l'ajout des fibres de sisal sur la masse volumique est négligeable, avec une légère diminution enregistrée pour un taux de 1,5%, attribuable à la faible densité des fibres de sisal.
3. **Résistances Mécaniques** : L'ajout de filler de marbre comme addition minérale est très bénéfique en termes de résistances mécaniques, notamment la résistance en compression et la résistance en traction par flexion. La résistance à la flexion s'améliore significativement avec l'incorporation des fibres de sisal, surtout avec 20% de filler de marbre, dépassant les performances du béton de sable classique à base de CPJ.
4. **Résistance à la Compression** : La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage des fibres, en accord avec la littérature. La majorité des auteurs rapportent que l'ajout de fibres végétales au béton ou au béton de sable n'améliore pas la résistance à la compression.
5. **Retrait** : Une diminution des valeurs de retrait est observée avec l'augmentation du taux de fibres de sisal, ce qui est favorable pour la durabilité du béton.
6. **Vitesse Ultrasonique** : Les bétons de sable renforcés avec des fibres de sisal montrent des résultats supérieurs en termes de vitesse ultrasonique par rapport aux bétons de sable témoins.
7. **Ductilité** : Les bétons de sable contenant des fibres de sisal possèdent une meilleure ductilité lors de la rupture, ce qui est un avantage crucial pour certaines applications structurales.

Perspectives et Travaux Futurs

Les perspectives de cette étude sont vastes et prometteuses. Le programme expérimental pourrait être complété par les études suivantes:

1. Interactions Mécaniques aux Interfaces : Étudier les interactions mécaniques aux interfaces entre les fibres végétales de sisal et la matrice cimentaire (béton de sable) pour comprendre les mécanismes d'adhésion et de transfert de charge.
2. Dosages et Additions Diverses : Examiner le potentiel d'utilisation de pourcentages plus élevés de fibres de sisal en combinaison avec d'autres additions minérales et en explorant différentes longueurs de fibres végétales.
3. Association de Fibres : Investiguer l'effet de l'association de deux ou même plusieurs types de fibres dans un même béton de sable pour potentialiser les avantages combinés de différentes fibres.
4. Traitement Chimique des Fibres : Évaluer l'impact du traitement chimique des fibres avant leur incorporation dans les différents mélanges pour améliorer l'adhérence et la durabilité des composites.

En conclusion, l'incorporation de ressources naturelles telles que le filler de marbre et les fibres de sisal dans les bétons de sable offre des avantages significatifs et ouvre de nouvelles voies pour la recherche et le développement de matériaux de construction plus durables et performants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] SABLOCRETE, (1994). Béton de sable, Presse de l'école nationale des ponts et des chaussées, Paris, France.
- [2] H. AZZOUZ, (2009). Etude des bétons à base des sables de dune, Mémoire de Magister; Université Mohamed Khider, Biskra.
- [3] S. Rezzig, Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra.
- [4] GADRI KARIMA ; « contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résinedestine pour la préparation mince des structures » mémoire de magister université MOHAMED KHIDER BISKRA 2007
- [5] Eric Aldo DJITRINO ; «modélisation de comportement mécanique de supports de lignes électriques en béton de sables armé et précontraint pour le réseau d'électrification rurale de Diplôme d'Ingénieur école supérieur Sénégal 2003
- [6] R. DUPAIN, R. LANCHOR, et J.C. SAINT-ARROMAN, (2004). Granulats, sols, ciments et bétons, caractéristique des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire.
- [7] B. Loukman, «L'effet des ajouts cimentaires (la fumée de silice et le laitiergranulé) Sur les propriétés des Bétons A Hautes Performances,» Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil, UNIVERSITÉ de Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2020.
- [8] NF EN 934-2: Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement: P 18-342.
- [9] CIMBETON, (2006). Les constituants des bétons et des mortiers, chapitre 2, les adjuvants, Paris.
- [10] NF EN 934-2: Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement: P 18-338.
- [11] Yanéric Roussel, «Béton autoplaçant avec fibres comme matériau de réparation du béton» Mémoire de maîtrise ès science appliquées, Université Sherbrooke (Québec) CANADA (2000).
- [12] Sandrine Catinard, « Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaire en contact avec des solutions salines ».Thèse (P.H.D), Université LAVAL (Québec) CANADA (2000).

Références bibliographiques

- [13] B. Khaled, «élaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires,» thèse de doctorat, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2014.
- [14] S. & H. C. Zoubida, «étude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux,» Mémoire de master, université de ouargla , 2011.
- [15] A. Abdulrahman, «CHARACTERISATION EXPERIMENTALE DES MORTIERS A BASE DES DECHETS DE BRIQUES,» Mémoire de master , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018.
- [16] L. Salah, «Influence des taux élevés des fines calcaires sur le comportement mécanique et rhéologique des mortiers à base du sable de carrière,» Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [17] M. N. Pierre, «Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier,» Thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2008.
- [18] Mr HADJOUJJA Mourad ; «Contribution à l'étude physico-mécanique et durabilité du béton de sable de dunes –Influence du traitement de cure et de l'ajout des fillers» Thèse de magister l'U.S.T.H.B Alger 2001
- [19] CHAUVIN, J.J. « Béton de sable en Union Soviétique » □ Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n°174, juill. - août 1991.
- [20] CHAUVIN, J.J. □ GRIMALDI, G. « Les bétons de sable » □ Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) □ N°157, Sept. 1988.
- [21] Omiri imen Yamina, « l'effet du traitement des fibres naturelles sur l'endommagement d'un béton polymère », mémoire master, université du m'sila ,2014/2015.
- [22] Martin N.A.M, Contribution à l'étude de paramètres influençant les propriétés mécaniques de fibres élémentaires de lin: Corrélation avec les propriétés de matériaux composites, PhD Thesis, Université de Bretagne Sud, 2014.
- [23] Yusriah L., Sapuan S.M., Zainudin E.S., Mariatti M., Underutilized Malaysian agrowastes fiber as reinforcement in polymer composites: Potential and challenges, J. Polym. Mater. 29 2013216, 2012.
- [24] Doan Thi Thu Loan, « Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices », Thèse de doctorat, l'université de Dresden, 2006.

Références bibliographiques

- [25] ADEME, «Etude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales,» 2005. [Enligne].Available: <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>. [Accès le 04 04 2015].
- [26] Mostar Abdessamed, « influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier », université deKasdi Merbah Ouargla option génie civil, novembre, 2006.
- [27] Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable, carma, décembre 2006
- [28] Bismarck, A., S. Mishra and T. Lampke .Plant fibers as reinforcement for green composites. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, CRC Press, 2005.
- [29] Baley, C., Le Duigou, A., Bourmaud, A., et Davies, P.. Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites. Composites parta : Applied Science and Manufacturing, 43 , 1226–1233, 2012.
- [30] C. Baley, <Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites,= Techniques de l'ingénieur, vol. 42142210, no. am5130, pp. 1–17, 2013.
- [31] Samui, A. B., S. Sundararajan, V. Kumar and P. S. Kulkarni. Cellulose modification for imparting smartness: thermoregulation, self-cleaning, solar cell and electroactuation. Cellulose and Cellulose Composites: Modification, Characterization and Applications. M. D. Ibrahim and I. H. Mondal. New York Nova Science Publishers, Inc. : 3-33. 2015.
- [32] Bismarck, A., S. Mishra and T. Lampke. Plant fibers as reinforcement for green composites. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, CRC Press, 2005.
- [33] Zimmermann et al., 2004
- [34] Bourmaud A, Darshil U , Beaugrand J c, Dhakal, Property changes in plant fibres during the processing of bio-based composites, Industrial Crops & Products 154 , 112705,2020.
- [35] Bourmaud A, C Baley,. Effects of thermo mechanical processing on the mechanical properties of biocomposite flax fibers evaluated by nanoindentation. Polym. Degrad. Stab. 95.
- [36] ALMI, Kenza. Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie. Diss. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [37] Oksman, Kristiina, Mikael Skrifvars, and J-F. Selin. "Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites." Composites science and technology 63.9 (2003): 1317-

Références bibliographiques

- 1324.
- [38] P. Bajpai, « Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production »springerbriefs in Green Chemistry for Sustainability, 2016.
- [39] Yosr Ben Mlik. Valorisation des fibres de kénaf dans des applications textiles et paratextiles, thèse de doctorat, Université de Monastir.
- [40] El Hilali, A, « Etude Expérimentale De La Rhéologie Et Du Comportement Des Bétons Autoplaçants (Bap) : Influence Des Fines Calcaires Et Des Fibres Végétales », Doctoral Dissertation, Cergy-Pontoise, 2009.
- [41] Siqueira G, Bras J, Dufresne A; «Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications »; Polymers 2: 728-765, 2010.
- [42] Olivier Pra, Utilisation de cellulose pour l'élaboration de matériaux photo luminescents ou conducteurs, thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [43] M.saiful islam. The influence of Fibre Processing and Treatments on Hemp Fibre/Epoxy and Hemp Fibre/PLA Composites. PhD Thesis-University of waikato, Hamilton, New Zealand, 2008.
- [44] Pan P, Zhu B , Weihua Kai, Masatoshi Iji, Yoshio I, Crystallization Behavior and Mechanical Properties of Bio-Based Green Composites Based on Poly(L-lactide) and Kenaf Fiber, Journal of Applied Polymer Science, 105, 151131520, 2007.
- [45] Talal, B. Utilisation d'une méthode optique sans contact pour décrire le comportement mécanique de composites Bois/Plastiques 78WPC 78. Thèse de doctorat de l'université de Pau et des pays de l'Adour, 2011.
- [46] Charle K., morvan C., Bréard J., Jernot JP., Gomina M., 2006. Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin. Comp. Mater. 16 :11-24.
- [47] Martin N.A.M, Contribution à l'étude de paramètres influençant les propriétés mécaniques de fibres élémentaires de lin: Corrélation avec les propriétés de matériaux composites, PhD Thesis, Université de Bretagne Sud, 2014.
- [48] M. Merzoud et M.F. Habita, «Elaboration and characterization of cementitious composites with diss fibres as masonry units », Asian journal of civil engineering (building and housing), Vol. 9, pp. 367-377, 2008.
- [49] Rouam, kamila. Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles. S.l. : UNIVERSITE M9HAMED BOUGARA - BOUMERDES, 2014.

Références bibliographiques

- [50] Khiri Amel et Bouchiba Maria. Effet des techniques d'extraction des fibres végétales sur leurs caractéristiques physiques chimiques et mécaniques, mémoire de master, université Mohamed Boudiaf- M'SILA, 2019.
- [51] Mémoire RAMANAMBAHOAKA Haingonirina Alexandra Soutenu le 23 avril 2015 essai de fabrication d'un materiau composite : matrice polyester renforcee de fibres de sisal
- [52] <https://www.wgc.de/fr/produkte/sisal>
- [53] A. BELAADI, «ELABORATION ET CARACTERISATION DES MATERIAUX BIOCOSITES,» Thèse DOCTORAT en Génie mécanique UNIVERSITÉ DU 8 MAI 1945 GUELMA, 2015.
- [54] Belaadi Ahmed, Elaboration et caractérisation des matériaux composites à renfort en fibres naturelles (fibre de sisal), Mémoire de Magister, Université 08 Mai 1945-Guelma, (2011).
- [55] Ahmed BELAADI, «Elaboration et caractérisation des matériaux composites à renfort en fibres naturelles (fibre de sisal),» MEMOIRE DE MAGISTER en Génie mécanique UNIVERSITÉ DU 8 MAI 1945 GUELMA, 2011.
- [56] Djebbloun Youcef, « Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales », Thèse de Doctorat en Génie mécanique de l'université de Biskra (2018).
- [57] NA 442. 2005, «Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants,» 2005.
- [58] XP P 18-545, «Granulats, Éléments de définition, conformité et codification,» 2004.
- [59] NF EN 933-1, «Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats,» Partie 1 : Analyse granulométrique, 1997.
- [60] NF EN 1008 2003, «Eau de gâchage pour bétons - Spécifications 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,» Juillet 2003.
- [61] NF EN 934-2 2012, «Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage,» 2012.
- [62] EN 196-1, «Méthodes d'essais des ciments,» Partie 1 : détermination des résistances.
- [63] KRIKER A., «Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec,» Thèse de doctorat d'état, ENP, Alger, 2005.

Références bibliographiques

- [64] NF EN 12350-6 2012, «Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique,» 2012.
- [65] NBN EN 1015-3, «Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses),» 1999.
- [66] NF EN 12390-7, «Essai pour béton durci -Partie 7 : Masse volumique du béton, Indice de classement : P 18-435,» Septembre 2001.
- [67] NF EN12390-3, «Essai pour béton durci -partie3: résistance à la compression sur éprouvette,» Aout 2000.
- [68] NF P15-433, «Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement,» Février 1994.
- [69] NF EN 12504-4 2005, «Essais pour béton dans les structures –Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son,» 2005.
- [69] Chaid R., «Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux,» thèse doctorale, Ecole nationale Polytechnique, Edition : Presses académiques francophones, 2015.
- [70] A.M. Brandt, «"Cement based composites Materials", Mechanical properties and performance,» Editions E&FN Spon, Londres, 1995.