REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX COMPOSITES ET CALCUL DES STRUCTURES

THEME

CONTRIBUTION À L'AMELIORATION DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES D'UN BÉTON DE SABLE LÉGER À BASE DE PAILLES D'ORGE

Par :

AMMARI Mohammed Seghir

Devant le jury composé de :

M^{R}	**KHENFER Mohamed Mouldi**	**Professeur**	**Université de Laghouat**	**Président**
M^{R}	**HADJOUDJA Mourad**	**MC B**	**Université de Laghouat**	**Examinateur**
M^{elle}	**DJOUDI Amina**	**MC B**	**Université de Laghouat**	**Examinatrice**
M^{R}	**BEDERINA Madani**	**Professeur**	**Université de Laghouat**	**Encadreur**
M^{R}	**BELHADJ Belkacem**	**MA A**	**Université de Laghouat**	**Co-encadreur**

---------- Laghouat 07 Avril 2016 ----------

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord « **ALLAH** » le tout puissant de m'avoir donné le courage de surmonter les moments les plus difficiles de ma vie et la volonté de mener à terme ce travail.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mes promoteurs Monsieur **BEDERINA Madani**, Professeur à l'Université de Laghouat, et Monsieur **BELHADJ Belkacem**, Maître assistant à l'Université de Laghouat pour tous les efforts qu'ils ont fournis pour me faciliter le travail et m'aider à accomplir ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **KHENFER Mohamed Mouldi** Professeur à l'université de Laghouat qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur **HADJOUDJA Mourad** et M^{elle} **DJOUDI Amina** Maîtres de conférences à l'Université de Laghouat pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce mémoire.

J'exprime également ma profonde gratitude à messieurs **H. KROBA** et **A. FERHAT** et tout le personnel du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat pour l'aide qu'ils m'ont apporté lors de la phase expérimentale de mes travaux.

Enfin, je remercie tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère

A mon père

A mes sœurs

A mes frères

Aux petits enfants :

Khairo, Anis, Baraa et Douaa

A toute ma famille

A tous mes amis, mes confrères et mes

collègues sans exception.

M.S. AMMARI

SOMMAIRE

Résumés
Nomenclature
Liste des Figures
Liste des Tableaux
INRODUCTION GENERALE 01

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique.

I.1. Introduction 03
I.2. Béton de sable 03
I.2.1. Définition 03
I.2.2. Historique 03
I.2.3. Composition du béton de sable 05
I.2.3.1. Sables 05
I.2.3.2. Les fines d'ajout 06
I.2.3.3. Les ciments 07
I.2.3.4. L'eau 07
I.2.3.5. Adjuvants 08
I.2.3.6. Autres ajouts 08
I.2.4. Domaines d'utilisation des bétons de sable 09
I.2.4.1. Fondations profondes 09
I.2.4.2. Bâtiment 10
I.2.4.3. Routes 11
I.2.4.4. Autres applications 11
I.2.4.5. Techniques particulières 12
I.2.4.5.1. Béton de sable projeté 12
I.2.4.5.2. Bétons de sable fluides 13
I.2.5. Intérêt des bétons de sable 14
I.2.6. Limites des bétons de sable 15
I.2.7. Propriétés essentielles du béton de sable 15
I.2.8. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire 21
I.2.9. Effet des constituants sur les propriétés d'un béton de sable 22
I.2.10. Conclusion 25
I.3. Béton léger 26
I.3.1. Définition 26
I.3.2. Classification des bétons légers 26
I.3.3. Caractérisation technique des bétons légers 29
I.3.4. Durabilité des bétons légers 32
I.3.5. Principaux avantages des utilisations de béton léger 32
I.3.6. L'inconvénient des utilisations de béton léger 32
I.3.7. Utilisations diverses des bétons légers 33
I.4. Les fibres végétales 33
I.4.1. Classification des fibres végétales 34

I.4.2. Etude de la structure des fibres végétales 34
I.4.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales 36
I.5. Généralités sur les propriétés thermiques 36
I.5.1. Les échanges thermiques 36
I.5.2. Différentes paramètres thermiques 36
I.5.3. Différentes techniques de mesure 37
I.6. Conclusion 39

CHAPITRE II : Caractéristiques des Matériaux et Techniques Expérimentales Utilisées.

II.1. Introduction 41
II.2. Caractérisation des matériaux premiers 41
II.2.1. Le sable 41
II.2.1.1. Analyse granulométrique 41
II.2.1.2. Caractéristiques physiques 42
II.2.1.3. Synthèse des résultats 44
II.2.1.4. Caractéristiques chimiques 44
II.2.2. Le ciment 46
II.2.3. Filler calcaire 47
II.2.4. Les ajouts minéraux 48
II.2.4.1. Le calcaire 49
II.2.4.2. La pouzzolane 49
II.2.4.3. La chaux hydraulique 49
II.2.5. L'eau de gâchage 50
II.2.6. L'adjuvant 50
II.2.7. La paille d'orge 51
II.2.7.1. Caractéristiques physiques 51
II.2.7.2. Caractéristiques chimiques 52
II.3. Techniques expérimentales 52
II.3.1. Malaxage et conservation 52
II.3.2. Essai de traction 53
II.3.3. Caractérisation du béton frais 53
• La maniabilité 53
II.3.4. Caractérisation du béton durci 55
II.3.4.1. Masse volumique apparente 55
II.3.4.2. Essai de rupture par flexion 55
II.3.4.3. Essai de rupture par compression 56
II.3.4.4. Variations dimensionnelles 56
II.3.4.5. Essai d'absorption d'eau par immersion 57
II.3.5. Etude macro-structurelle 58
II.3.6. Caractéristiques thermiques 59
II.3.6.1. Méthode de mesure les paramètres thermiques 59
II.3.6.2. Principe de la méthode « Hot Disk » 59
II.4. Conclusion 61

CHAPITRE III : Formulation des Composites et Traitements des Pailles d'Orge.

III.1. Introduction 62
III.2. Formulation des composites 62
III.2.1. Composites étudiés 62
III.2.2. Optimisation de la matrice 63
III.2.3. Propriétés physico-mécaniques des bétons de sable à base de pailles d'orge non traitées 63
III.3. Traitements des pailles d'orge 65
III.3.1. Présentation des types de traitement 65
III.3.1.1. Types de traitements choisis d'après la bibliographie 65
III.3.1.2. Nouveaux traitements proposés 66
III.3.2. Présentation des méthodes des traitements utilisés 68
III.3.3. Adhérence entre la paille d'orge et les différents produits du traitement 70
III.3.4. Influence des traitements sur la masse de paille d'orge 74
III.3.5. Essai de traction 75
III.3.6. Choix des traitements 76
III.4. Conclusion 78

CHAPITRE IV : Caractérisation des Bétons de Sable à Base des Pailles d'Orge Traitées.

IV.1. Introduction 79
IV.2. Influence des traitements sur la capacité d'absorption des pailles d'orge 79
IV.3. Caractérisation du béton frais 81
• Etude de la maniabilité 81
IV.4. Caractérisation du béton durci 81
IV.4.1. Masse volumique 81
IV.4.2. Absorption d'eau par immersion 83
IV.4.3. Relation entre la masse volumique et la porosité 84
IV.4.4. Etude des propriétés mécaniques 85
IV.4.4.1. Résistance à la flexion 85
IV.4.4.2. Résistance à la compression 86
IV.5. Variations dimensionnelles 88
IV.6. Caractéristiques thermiques 89
IV.6.1. Conductivité thermique 90
IV.6.2. Diffusivité thermique 91
IV.6.3. Chaleur spécifique massique 92
IV.7. Etude macro-structurelle 93
IV.8. Conclusion 95
CONCLUSION GENERALE 96
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
ANNEXE

RESUMES

RESUME

La présente étude entre dans le cadre de l'utilisation des matériaux locaux et de la réutilisation des déchets industriels dans la construction et la poursuite des travaux antérieurs sur le béton de sable. Elle a pour objectif d'améliorer les propriétés physico-mécaniques et thermiques du béton de sable à base de paille d'orge. Les matériaux utilisés sont : le ciment Portland au calcaire CPJ CEM/II A-L 42,5 R, des sables dunaires et des sables alluvionnaires, produits locaux disponibles en grandes quantités dans la région de Laghouat, des fillers calcaires provenant des déchets de concassage de granulats, la pouzzolane naturelle, la chaux hydraulique et la paille d'orge qui est disponible en abondance dans la plupart des zones rurales en Algérie.

La composition optimale du béton de sable avec une quantité de 15 kg/m^3 de paille d'orge non traitée a montré que l'ajout des pailles d'orge allège le béton de sable et lui confère des propriétés thermiques largement acceptables avec une composition homogène et une bonne adhérence « paille-matrice ». Cependant, elle a montré une faiblesse au niveau des propriétés mécaniques et une augmentation des variations dimensionnelles.

Afin d'améliorer ces propriétés, nous avons effectué plusieurs traitements sur la paille d'orge. Les pailles traitées ont été testées et des résultats d'essais ont été obtenus. Ces derniers ont permis de sélectionner les quatre traitements meilleurs pour l'élaboration du composite étudié. Il a été constaté que le traitement de la paille conduit à une légère augmentation de la masse volumique ; en revanche nous avons enregistré une bonne amélioration dans la plupart des propriétés mécaniques et thermiques étudiées. En outre, toutes les pailles d'orge traitées ont montré une bonne homogénéité et adhérence « matrice-paille ». Une nette diminution de retrait a également été enregistrée. Enfin, il convient de noter que les résultats obtenus dans cette étude sont très encourageants pour le développement d'un nouveau béton de sable léger capable de répondre aux exigences de la construction locale.

Mots clés :
Béton de sable, béton léger, pailles d'orge traitée, propriétés physico-mécaniques, propriétés thermiques, retrait, microstructure.

الملخـــــص

في إطار محور البحث المتعلق باستغلال المواد المحلية في ميدان البناء، واستمرارا للأعمال السابقة حول الخرسانة الرملية، تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخصائص الفيزيو- ميكانيكية والحرارية للخرسانة الرملية مضافة إليها قش الشعير. المواد المستعملة هي إسمنت بورتلاندي كلسي، رمال كثبانية ورمال أودية الموجودة بكميات كبيرة في منطقة الأغواط، مواد ناعمة كلسيه إضافة إلى مواد بوزولانية طبيعية والجير الناتجة عن غربلة فضلات تكسير الحجارة، إضافة إلى قش الشعير الذي يعتبر منتوج محلي يتم حصاده من مرة إلى مرتين في السنة وهو متوفر بكميات كبيرة في معظم المناطق الريفية في الجزائر.

التركيبة المثالية للخرسانة الرملية مضاف إليها 15 كغ/م^3 من قش الشعير غير معالج, بَينتْ أن الخرسانة المدروسة ذات وزن خفيف، وتملك خصائص حرارية مقبولة ولديها تركيبة متجانسة بين قش الشعير والخرسانة، إلا أنها أظهرت ضعف في الخصائص الميكانيكية مع ارتفاع ملحوظ في تغيّر أبعادها. من أجل تحسين هذه الخواص، قمنا بمعالجة قش الشعير بعدة طرق واخترنا منها أربعة علاجات من أجل إضافتها مع الخرسانة الرملية. تعتبر العلاجات المختارة هي الأفضل وذلك بعد اجتيازها عدة معايير. النتائج المحصل عليها أظهرت إرتفاع طفيف في الكتلة الحجمية ولكن بالمقابل سجلنا تحسن جيد في الخصائص الميكانيكية والحرارية المدروسة، كما أظهر قش الشعير المعالج تجانس وتماسك جيد مع الخرسانة وكذلك سجلنا انخفاض ملحوظ في تغير أبعادها. وفي الأخير يمكن القول أن النتائج المحصل عليها من خلال هذه الدراسة تعتبر جد إيجابية لتطوير الخرسانة الرملية.

الكلمات المفتاحية :

خرسانة رملية، خرسانة خفيفة، معالجة قش الشعير، خصائص فيزيو-ميكانيكية، خصائص حرارية، الانكماش، البنية المجهرية.

ABSTRACT

The present study enters within the frame of the use of local materials and the re-use of the industrial waste in the construction and the continuation of former work on the sand concrete. It aims to improve the physico-mechanical and thermal properties of the sand concrete containing barley straw. The used materials are: the Portland limestone cement (PLC) of type CPJ CEM/II A-L 42.5 R, dune sands and river sands, local products available in great quantities in the area of Laghouat, the limestone fillers coming from waste of crushing from aggregates, natural pozzolan, the hydraulic lime and the barley straw which is available in great quantities in the majority of the rural areas in Algeria.

The optimal composition of the sand concrete with a quantity of 15 kg/m^3 of untreated barley straw showed that the addition of the barley straws reduces the sand concrete and confers largely acceptable thermal properties with a homogeneous composition and a good adherence "straw-matrix". However, it showed a weakness in the mechanical properties and an increase in the dimensional variations.

In order to improve these properties, we carried out several treatments on the barley straw. The treated straws were tested and the test's results were obtained. The latter made it possible to select the four better treatments for the development of the studied composite. It was noted that the treatment of the straw led to a slight increase in the density; on the other hand, we recorded a good improvement in the majority of the studied mechanical properties and thermic. Moreover, all the treated barley straws showed a good homogeneity and adherence "matrix-straw". A reduction in shrinkage was also recorded. Lastly, it should be noted that the results obtained in this study are very encouraging for the development of a new lightweight sand concrete.

Keywords:

Sand concrete, Lightweight sand concrete, treatment barley straws, physico-mechanical properties, thermal properties, shrinkage, microstructure.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

SA : Sable alluvionnaire.
SD : Sable de dune.
SAD : Sable alluvionnaire-dunaire.
f_t : Résistance à la traction.
f_c : Résistance à la compression.
E_b : Module d'élasticité.
E/C : Eau/ciment.
γ : Masse volumique apparente.
γ_s : Masse volumique absolue.
M_f : Module de finesse.
C_p : Compacité.
p : Porosité.
ES_V : Equivalent de sable visuel.
ES_P : Equivalent de sable au piston.
D : Diamètre de granulat.
D_{max} : Diamètre maximal des grains.
T : Température.
HR : Humidité relative.
Δm : Variation de la masse (%).
h1 : Hauteur de sable propre + éléments fins.
h2 : Hauteur de sable propre seulement.
M : Masse du matériau.
V : Volume total du matériau.
V_s : Volume du matériau solide.
d : Densité du matériau.
d_a : Densité apparente du matériau.
M_s : Masse du matériau sec.
M_h : Masse du matériau après saturation.
C_{ab} : Coefficient d'absorption d'eau de la paille.
F_t : Charge de rupture de l'éprouvette.

R_t : Contrainte de traction.

L : Longueur entre les axes des deux appuis.

b : Largeur de la section transversale de l'éprouvette.

R_c : Résistance à la compression.

F_c : Force de compression.

A : Surface transversale de l'éprouvette.

$\Delta l(t)$: Retrait.

$\varepsilon(t)$: Retrait relatif.

A% : Coefficient d'absorption d'eau par immersion du béton.

P : Poids du matériau.

P_h : Poids de l'éprouvette après saturation.

P_s : Poids de l'éprouvette sèche.

C : Dosage en ciment.

A : Dosage de l'addition en fines.

k1 : Coefficient de prise en compte de la nature de l'addition.

G/S : Gravillon /sable.

λ : Conductivité thermique du matériau.

a : Diffusivité thermique du matériau.

c : Chaleur massique du matériau.

ρ : Masse volumique du matériau.

R_T : Résistance thermique du matériau.

T_1-T_2 : Variation de la température.

φ : Flux de chaleur thermique.

e : Epaisseur du matériau.

S : Surface traversée par le flux.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique.

Figure I.1. Phare de Port Said réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte)..... 04
Figure I.2. Le pont de Brooklyn en blocs du béton aggloméré..... 04
Figure I.3. Proportion du gravillon dans le Béton..... 09
Figure I.4. Panneau 3D en béton de sable projeté..... 13
Figure I.5. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)..... 16
Figure I.6. Effets du dosage et de la finesse de d'addition sur la résistance..... 17
Figure I.7. Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance..... 17
Figure I.8. Effet de la granularité sur la résistance..... 18
Figure I.9. Retrait d'auto-dessiccation..... 19
Figure I.10. Retrait total..... 19
Figure I.11. Aspect général du béton de sable [5] 20
Figure I.12. Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un béton de sable..... 23
Figure I.13. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables SD, SA et SAD..... 24
Figure I.14. Evolution de la maniabilité Vebe en fonction de dosage des fillers et de rapport E/C (a : cas du SD, b : cas du SAD)..... 24
Figure I.15. Représentation schématique des différents types de béton légers..... 27
Figure I.16. Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI 213R287..... 29
Figure I.17. Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique..... 30
Figure I.18. Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulat..... 30
Figure I.19. Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose)..... 34
Figure I.20. Principaux glucides constituant les hemicelluloses..... 35

CHAPITRE II : Caractéristiques des Matériaux et Techniques Expérimentales Utilisées.

Figure II.1. Courbe granulométrique des sables utilisés..... 42
Figure II.2. Analyse chimique du sable alluvionnaire..... 45
Figure II.3. Analyse chimique du sable de dune..... 45

Figure II.4. Analyse de ciment par diffractométrie aux rayons X..... 46
Figure II.5. Analyse de filler calcaire par diffractométrie aux rayons X..... 48
Figure II.6. Analyse de la pouzzolane naturelle par diffractométrie aux rayons X..... 49
Figure II.7. Analyse de la chaux hydraulique par diffractométrie aux rayons X..... 50
Figure II.8. Essai de mesure de traction..... 53
Figure II.9. Dispositif de mesure d'affaissement..... 54
Figure II.10. Schémas de l'essai de flexion..... 55
Figure II.11. Schémas de l'essai de compression..... 56
Figure II.12. Dispositif de mesure de retrait..... 57
Figure II.13. Microscope optique « ZEISS »..... 58
Figure II.14. Microscope électronique « Controlab »..... 58
Figure II.15. Procédé de l'essai de la sonde Hot Disk TPS..... 60

CHAPITRE III : Formulation des Composites et Traitements des Pailles d'Orge.

Figure III.1. Elaboration du composite..... 62
Figure III.2. Aspect général de la paille d'orge..... 63
Figure III.3. Aspect général des pailles d'orge utilisées..... 64
Figure III.4. Aspect général des traitements au lait et au bitume..... 71
Figure III.5. Aspect en coupe transversale de la paille d'orge avec et sans traitement..... 73
Figure III.6. Dispositif utilisé pour l'essai de traction de la paille d'orge..... 75

CHAPITRE IV : Caractérisation des Bétons de Sable à Base des Pailles d'Orge Traitées.

Figure IV.1. Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau..... 80
Figure IV.2. Influence des traitements sur la masse volumique à 28 jours..... 82
Figure IV.3. Absorption d'eau par immersion à 28 jours..... 83
Figure IV.4. La relation entre la porosité et la masse volumique..... 84
Figure IV.5. Influence des traitements sur la résistance à la flexion à 28 jours..... 85
Figure IV.6. Influence des traitements sur la résistance à la compression à 28 jours..... 87
Figure IV.7. Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiées..... 88
Figure IV.8. La conductivité thermique des compositions étudiées..... 90
Figure IV.9. La diffusivité thermique des compositions étudiées..... 92
Figure IV.10. La chaleur spécifique massique des compositions étudiées..... 93
Figure IV.11. Aspect général des bétons de sable à base de pailles d'orge avec et sans traitement..... 94

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique.

Tableau I.1. Le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé..... 06
Tableau I.2. Caractéristiques de l'eau exigés selon la norme NFP 18 303..... 08
Tableau I.3. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire..... 21
Tableau I.4. Désignation des différent types des bétons (Légendes de la **Figure I.18.**)..... 30
Tableau I.5. Module d'élasticité de quelques types de bétons légers..... 31

CHAPITRE II : Caractéristiques des Matériaux et Techniques Expérimentales Utilisées.

Tableau II.1. Caractéristiques physiques des sables SD, SA et SAD..... 44
Tableau II.2. Propriétés physiques du ciment utilisé..... 46
Tableau II.3. Analyse chimique du ciment utilisé..... 46
Tableau II.4. Constituants de ciment CEM II / A-L 42,5R..... 47
Tableau II.5. Caractérisation chimique de la CEM II / AL 42,5R..... 47
Tableau II.6. Propriétés physiques du filler utilisé..... 47
Tableau II.7. Les propriétés physiques des additions minérales utilisées..... 48
Tableau II.8. Recommandations de la chaux selon la norme DIN 106..... 49
Tableau II.9. Caractéristiques du superplastifiant..... 51
Tableau II.10. Teneurs en cellulose, hémicelluloses et lignine de paille d'orge..... 52
Tableau II.11. Classes de consistance du béton..... 54

CHAPITRE III : Formulation des Composites et Traitements des Pailles d'Orge.

Tableau III.1. Composition de béton de sable à base de paille d'orge..... 63
Tableau III.2. Les différentes propriétés physico-mécaniques et le retrait de béton de sable pour paille d'orge non traité..... 64
Tableau III.3. Les données de préparations des différents types de laits..... 69
Tableau III.4. La variation de la masse de la paille d'orge..... 74
Tableau III.5. Synthèse d'essai de traction de la paille avec et sans traitement..... 76
Tableau III.6. Comparaison entre les différents traitements (Evaluation par notation/10)..... 77

CHAPITRE IV : Caractérisation des Bétons de Sable à Base des Pailles d'Orge Traitées.

Tableau IV.1. Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau..... 79
Tableau IV.2. La maniabilité des compositions étudiées..... 81

Tableau IV.3. Influence des traitements sur la masse volumique à 28 jours..... 82
Tableau IV.4. Absorption d'eau par immersion à 28 jours..... 83
Tableau IV.5. Influence des traitements sur la résistance à la flexion à 28 jours..... 85
Tableau IV.6. Influence des traitements sur la résistance à la compression à 28 jours..... 86
Tableau IV.7. Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiées..... 88
Tableau IV.8. La conductivité thermique des compositions étudiées..... 90
Tableau IV.9. La diffusivité thermique des compositions étudiées..... 91
Tableau IV.10. La chaleur spécifique massique des compositions étudiées..... 93

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie connaît depuis des années une grande demande des matériaux de construction, car les matériaux utilisés actuellement ne permettent pas de couvrir le déficit en logements. Ce problème peut être surmonté que par la création d'autres alternatives. C'est dans cette optique que l'idée de la valorisation des matériaux locaux dans la construction est survenue. En effet, cette solution, a été adoptée dans de nombreux pays.

La valorisation des matériaux locaux a touché même les déchets industriels et artificiels, ce qui conduit à non seulement un intérêt technologique, mais aussi économique et environnemental. Selon les différents travaux de recherche antérieurs, l'introduction de certains déchets dans les bétons et mortiers a pu quand même améliorer certaines propriétés de ces matériaux.

Par ailleurs et dans ce cadre et dans un contexte d'épuisement progressif des gros granulats dans certaines régions, du coût élevé du transport et de l'abondance des sables, il était aisé d'entrevoir, dès l'origine, l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter la valorisation des sables locaux, peu ou pas exploités, pour la réalisation de béton dont les sables seraient le constituant principal. Il s'agit donc du béton de sable, qui a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 publiée en octobre 1987 par AFNOR [33]. Le béton de sable présente beaucoup d'avantages tels que : la petite granularité, l'absence de ségrégation, la bonne résistance, le bel aspect de surface, la facilité de la mise en œuvre, etc. Notons que parfois, les propriétés spécifiques de ce matériau lui permettent de remplacer et de résoudre certains problèmes mal assurés de béton ordinaire.

Notre étude est une continuation des études antérieures menées sur le béton de sable, dont le but est d'introduire une matière lignocellulosique (paille d'orge) dans ce matériau. En général, l'introduction des matériaux lignocellulosiques dans des matrices de ciment les rend légers, ce qui conduit par conséquent, un nouveau type de béton léger. Ce dernier possède des propriétés qui lui confèrent de nombreux avantages par rapport au béton ordinaire, comme l'isolation thermique et phonique, etc.

Il existe plusieurs types de béton léger qui subissent des perfections et des développements à cause de leur utilisation largement répandue dans les travaux de construction et de rénovation.

L'objectif de notre travail est l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et thermiques du béton de sable allégé par l'ajout de matériau lignocellulosique (paille d'orge) soumis à différents traitements.

Afin d'atteindre ces objectifs, notre travail est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le béton de sable et une généralité sur le béton léger et les fibres végétale puisqu'on y a ajouté les pailles d'orge. A la fin de ce chapitre, on évoque une présentation sur les propriétés thermiques et quelques techniques de mesures expérimentales.

- Le deuxième chapitre comporte une caractérisation générale des matériaux utilisés dans les différentes compositions du composite étudié, ainsi qu'une description détaillée des différentes techniques de mesures expérimentales employées dans cette étude.

- Le troisième chapitre présente la formulation de la composition optimale du béton de sable allégé par des pailles d'orge non traitées ainsi que les traitements utilisés et les déférents essais menés sur les pailles traitées.

- Le quatrième chapitre, et après avoir choisi quatre types de traitements, on a étudié l'influence de ces traitements sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques du composite.

Enfin, une conclusion générale est présentée, suivie de quelques recommandations pour des futurs travaux clôture ce mémoire.

CHAPITRE I :

Recherche Bibliographique

I.1. Introduction

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques à travers différentes documentations concernant le constituant de base à savoir les bétons de sable aussi bien que les bétons léger et les fibres végétales, puisqu'on y a ajouté les pailles d'orge à notre béton. A la fin de ce chapitre, on évoque une présentation sur les propriétés thermiques et quelques techniques de mesures expérimentales, qui sont des caractéristiques importantes pour un béton léger.

I.2. Béton de sable

I.2.1. Définition

Le besoin en granulats connaît, en Algérie, une croissance considérable en rapport avec les travaux de construction et de développement qui ont été lancés dans cette dernière décennie. Dans le sud d'Algérie, où les gros granulats sont peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions, une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire, ainsi que de grands gisements de fines naturels et artificiels. Tout cela nous amène à envisager de remplacer le béton ordinaire avec d'autres bétons, tels que les bétons de sable [1].
Les bétons de sable sont une nouvelle gamme de matériaux de construction qui peuvent présentés une bonne alternative pour remplacer les bétons classiques dans la confection de certains éléments de construction. Les bétons de sable sont composés essentiellement de mélange en proportions convenables de sable (un ou plusieurs), de fines d'ajout, de ciment et d'eau. D'autres additions peuvent être incorporées : adjuvants, fibres, gravillons, etc. [2,3].

I.2.2. Historique

En 1853, dans la perspective de réaliser des constructions monolithes, économiques et résistants, l'Ingénieur COIGNET mit au point « le Béton Aggloméré » destiné à être moulé et pilonné en place et qui n'est autre que l'ancêtre du béton de sable. Il s'agissait, en effet, d'un mélange sans caillou, de sables, de cendres, de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité. Il construisit ainsi en béton aggloméré banché une vaste maison, encore visible au n°72 de la rue Charles-Michels à Saint-Denis au nord de Paris en France. Cette composition fut par suite utilisée dans bon nombre de constructions et réseaux d'assainissement et, après adaptation, servit notamment à réaliser un grand mur de soutènement de la place du Trocadéro à Paris en France.
En Egypte, le phare de Port-Saïd (h=52 m), fut construit, en 1869, en béton de sable de plage et chaux (**Figure I.1.**), ainsi qu'un pont à Brooklyn, édifié en 1871-1872 (**Figure I.2.**).

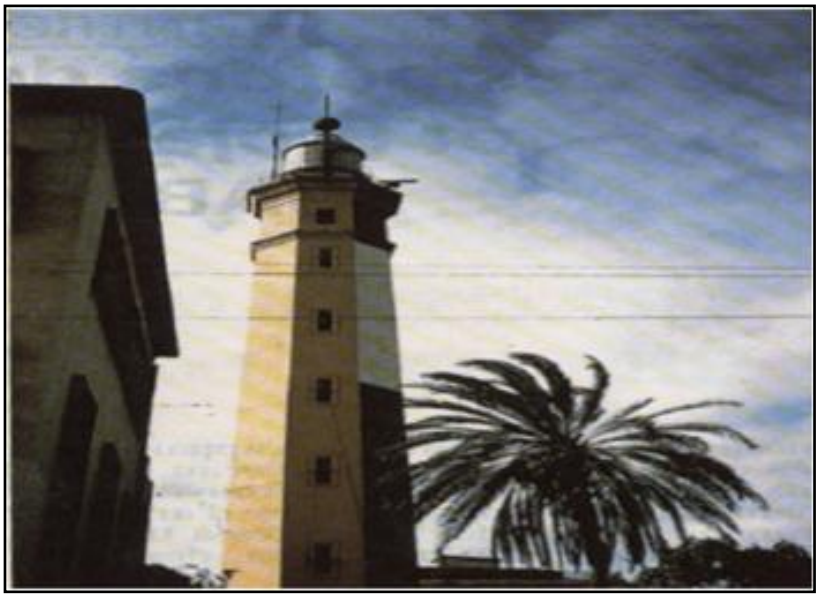


Figure I.1. Phare de Port Said réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte).



Figure I.2. Le pont de Brooklyn en blocs du béton aggloméré.

En 1918, en Union soviétique, une expérience très originale fut faite par Nicolas de Rochefort, à Saint Petersburg. Elle consistait à broyer ensemble sable et clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable). Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en (1/3 de ciment pour 2/3 de sable). Le professeur **REHBINDER**, soviétique eut repris cette expérience comme base de ses propres recherches sur le béton de sable et le mystérieux mécanisme d'activation par broyage du mélange sable/clinker. L'Union soviétique, riche en sable, mais pauvre en gravillons et roches massives sur de vastes étendues, ne cessa, principalement depuis 1941, de faire du béton composé de sable et d'un ou deux liants (ciment et chaux), selon les opportunités.

Les réalisations sont nombreuses. Citons parmi bien d'autres [2] :

- Eléments de préfabrications;
- Tunnels et métros (ombrelles d'étanchéité);
- Mobilier urbain et éléments architecturaux, etc.

La possibilité d'obtenir des niveaux élevés de résistance avec l'utilisation des gros granulats a fait tomber, à une certaine époque, le béton de sable dans l'oubli. A la fin de la deuxième guerre mondiale, le béton de sable revient en force grâce à ses propriétés spécifiques, à la pénurie des gros granulats dans certaines régions et bien entendu à la disponibilité de gros gisements de sable [4].

Dans les dernières décennies, et vu notamment l'insuffisance de connaissances dans son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau [5].

I.2.3. Composition du béton de sable

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme expérimentale P18 500 révisée en octobre 1987 par l'AFNOR, il y a lieu cependant de souligner que les constituants entrant dans la composition d'un béton de sable sont ceux du béton, produit normalisé. Les bétons de sable sont composés essentiellement des [2] :

I.2.3.1. Sables

Par sables, on entend tous granulats 0/D (plus gros grains) conformes aux définitions des normes **NF P 18-101** et **NF P 18-301**. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. D est inférieur ou égal à 5 mm. Mais on peut admettre l'emploi d'un granulat à granulométrie continue de 0 mm jusqu'à 8 mm tant que le rapport pondéral entre les éléments supérieurs à 5 mm et les éléments inférieurs à 5 mm reste inférieur à 0,7.

Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homo-métrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté; si des études ont été faites sur des sables pollués, aucune expérimentation n'a été réalisée avec de tels sables. Autant que la nature de la pollution, c'est aussi sa variabilité à l'intérieur d'un gisement qui rend l'emploi de tels matériaux difficilement envisageables; si on arrivait, en effet, par l'emploi d'adjuvants à rendre utilisable un sable du gisement, compte tenu de cette variabilité.

Par ailleurs, les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau, ce qui entraine une chute de résistance. Dans cette étude, il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sables propres, tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique [2].

I.2.3.2. Les fines d'ajout

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont [2] :

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau ;
- L'énergie de mise en place.

La différence entre un béton classique et un béton de sable réside principalement dans la granulométrie. L'optimisation de la compacité en relation avec la granulométrie obéit à certaines règles : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros. Dans le béton classique, on parle des éléments les plus gros (10 à 20 mm) ils créent des macro-vides que l'on peut remplir par du sables et les vides du sables par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer que la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité (**Tableau I.1.)**. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment se traduit par la règle :

$$\mathbf{C = 700/\sqrt[5]{D}} \quad \text{(selon l'usage du béton)} \qquad \textbf{(I.1.)}$$

Tableau I.1. Le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé.

	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	Granularité
BETON	1,904	290	370	0/25
	1,821	300	385	0/20
	1,741	315	400	0/16
	1,516	360	460	0/8
MORTIER	1,445	380	480	0/6,3
	1,320	415	530	0/4
	1,149	480	610	0/2
	1,000	550	700	0/1

Lorsque la valeur de D diminue (≤ 6 mm), et c'est le cas du béton de sable, le dosage en ciment devient très élevé (> 400 kg/m^3). En effet, les vides d'un sable sont plus petits, plus nombreux et, globalement, plus importants que ceux d'un granulat d/D (D > 6 mm). Il faut donc davantage de ciment pour les remplir : techniquement et économiquement cette règle n'est plus applicable; il n'y a plus concordance entre dosage en fine et en ciment. Dans le cas du béton de sable, on comble d'abord une partie des vides du sable par un filler, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels. Dans ces conditions, la règle en 5D peut encore s'appliquer, en première approximation, non plus au dosage en ciment seul mais à l'ensemble : ciment + fines. Cet aspect est pris en compte dans les normes actuelles qui introduisent la notion de liant équivalent :

$$C / K1.A \qquad (I.2.)$$

Où

C : le dosage en ciment ;

A : le dosage de l'addition en fines ;

k1 : le coefficient de prise en compte de la nature de l'addition.

On peut ainsi parler, non plus de E/C (rapport eau /ciment), mais de :

$$E/C+k1.A \qquad (I.3.)$$

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 220 kg/m^3 et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. Pour un dosage constant en fine d'addition :

- La maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente ;
- Pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables. L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable, les filler peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [6, 7].

I.2.3.3. Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme **NF EN 197-1**. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu, etc.et, d'une façon plus générale de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine [2].

I.2.3.4. L'eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme **NF P 18-303** (**Tableau I.2.)**. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables [2].

Tableau I.2. Caractéristiques de l'eau exigés selon la norme NFP 18 303.

CONSTITUANTS	Limites en pourcentage de l'eau (en masse)
Insoluble	< 0.2
Matières dissoutes	< 0.2
Carbonates + bicarbonates alcalins	< 0.1
Sulfates en SO_3	< 0.1
Sulfites en S	< 0.01
Sucres	< 0.01
Phosphates en P_2O_5	< 0.01
Nitrates en NO_3	< 0.05
Zinc	< 0.01
Acidité en pH	> 4
Acidité humique	Pas de coloration brunâtre

Quand l'une quelconque des limites indiquées dans le (**Tableau I.2.)** est dépassée, l'eau peut éventuellement être utilisée sous réserve qu'elle satisfasse aux prescriptions concernant les essais de début et de fin de prise et les essais de résistance. La teneur en chlorure ne doit pas dépasser 500 mg/l. La teneur maximale en ions-soufre est fixée à 0,5%.

I.2.3.5. Adjuvants

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage de plastifiants ou de superplastifiants : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins [2]. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme **EN 934-2**.

I.2.3.6. Autres ajouts

1) Les fibres

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge: dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout [8-10].
On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe [2].

2) Les gravillons

On considéré qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable (**Figure I.3.**). En admettant que les gravillons sont dispersés dans le sable et ne constituant pas un squelette structure, le

comportement reste le même : l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer sensiblement certains caractéristiques : fluage, retrait, résistance et maniabilité.
D'une façon pratique on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sables) reste inférieur à 0.70 [2].

$$G/S < 0{,}70 \qquad \text{(I.4.)}$$

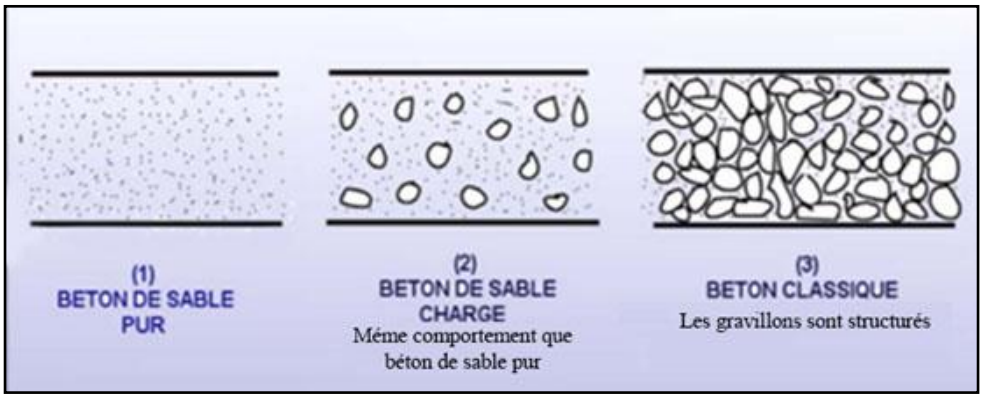


Figure I.3. Proportion du gravillon dans le béton.

3) Les colorants

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de béton de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours au temps. Il est à signaler que l'emploi de sables naturels locaux, couplé notamment à l'utilisation de ciment blanc, procure souvent des teintes très intéressantes, susceptibles de s'insérer avantageusement dans l'environnement [2].

I.2.4. Domaines d'utilisation des bétons de sable

Les applications qui ont concerné des domaines aussi larges que le bâtiment et le génie civil ont mis en évidence l'intérêt que peut présenter l'utilisation de béton de sable, tant techniquement qu'économiquement [13].
Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du béton de sable en font le matériau convenable [2].

I.2.4.1. Fondations profondes

Le béton utilisé dans le bétonnage des pieux profonds doit présenter des spécificités par rapport au béton traditionnel utilisé dans les fondations superficielles. Ainsi, des règles et recommandations énoncent les caractéristiques fondamentales suivantes des bétons pour pieux exécutés en place [14] :

- Fluidité et mise en place sans vibration ;
- Résistance à la ségrégation et au délavage ;
- Prise lente et contrôlée ;
- Compacité élevée ;
- Bonnes performances mécaniques.

Le béton de sable, de par sa conception et sa composition répond à la majorité des conditions évoquées ci-dessus. La fluidité du béton de sable peut être obtenue par l'utilisation d'un adjuvant fluidifiant et non par l'augmentation abusive et incontrôlée de la quantité d'eau. En plus, le béton de sable par sa forte teneur en éléments fins, présente naturellement une homogénéité et une cohésion qui lui assurent un meilleur comportement vis-à-vis du risque de ségrégation que le béton traditionnel.

Lors des travaux confortatifs de fondations d'ouvrages ou de travaux particuliers comme comblements de cavités, reprises en sous-œuvre, injections de massifs d'enrochements ou de corps de digue, etc., les produits utilisés, associés aux diverses techniques de mise en œuvre, fournissent une gamme très étendue allant de bétons traditionnels jusqu'aux coulis de ciments.

Le béton de sable, compte tenu de ses propriétés, vient tout naturellement prendre place dans cette gamme, couvrant un large éventail d'utilisation, entre les bétons traditionnels d'une part et les coulis d'autre part. La possibilité de réunir les propriétés et les avantages d'un coulis et d'un béton, tout en évitant les inconvénients majeurs de chacun d'eux, permet à certaines formulations de béton de sable d'être extrêmement performantes, aussi bien techniquement qu'économiquement, sur des chantiers de réparations, confortements et reprises en sous-œuvre ; de sorte que le béton de sable semble bien le matériau le plus adapté pour ce type de travaux.

Dans le domaine des fondations, le béton de sable, de par ses caractéristiques, permet notamment la construction de pieux à grande profondeur, les injections et reprises en sous-œuvre, d'autant que ces travaux se font le plus souvent en milieu subaquatique et doivent éviter tout délavage; de cela, il facilite tous les travaux délicats ou difficiles à réaliser avec des bétons courants [15].

I.2.4.2. Bâtiment

Le secteur de bâtiment est le gros consommateur de béton. Plusieurs familles de bétons sont apparues pour faire une grande diversité d'usage dans ce secteur. Le béton de sable prend sa place dans ces familles et présente des caractéristiques spécifiques qui lui permettent d'en faire un matériau recherché pour un usage donné. L'avantage d'utiliser le béton de sable dans le secteur de bâtiment est généralement dû à ses qualités d'aspect (bon garnissage des moules, bon enrobage des aciers même en cas de ferraillage dense).

Dans le domaine de préfabrication, le béton de sable garantit, par sa finesse granulométrique, un aspect de surface excellent des éléments préfabriqués par rapport au béton traditionnel. Contrairement aux bétons traditionnels, cette finesse rend aussi le

béton de sable accessible aux cotes minimales des pièces préfabriquées, ce qui permettra de mouler des pièces de formes très complexes avec des ferraillages denses [15].
Des études sur la valorisation des sables locaux (sable alluvionnaire et sable de dunes de la région de Laghouat au sud de l'Algérie) dans la préfabrication des blocs de béton, allant de leur formulation jusqu'à leur production, ont permis de formuler des bétons de sable d'aspects secs et de mettre au point des blocs de bétons conformes aux normes en vigueur [16].
L'introduction de sable de dunes a permis d'obtenir un béton de sable d'une structure granulaire plus compact et de confectionner des blocs plus légers tout en montrant des résistances mécaniques comparables par rapport aux bétons traditionnels [17].

I.2.4.3. Routes

Dans le domaine des routes, les bétons de sable peuvent être utilisés dans la réalisation des structures de chaussées pour améliorer leur résistance à l'usure et dans la production des équipements de voirie extrudés (ex : caniveaux, bordures, séparateurs, etc.).
L'utilisation de béton de sable dans ce domaine se trouve en premier lieu justifiée par l'économie sur le coût des matériaux, la facilité de mise en œuvre et la qualité esthétique des produits. Dans le cas des structures de chaussées ou des dallages utilisant le béton de sable, une étude de dimensionnement est nécessaire. Les calculs doivent être réalisés en respectant les normes et les règles en vigueur, notamment celles des performances mécaniques.

I.2.4.4. Autres applications

L'utilisation du béton de sable peut s'étaler aux applications spéciales telles que : les ouvrages d'art, l'enrochement artificiel et les accessoires de VRD (Voiries et réseaux divers). Le béton de sable peut constituer une réponse technique et économique avantageuse pour certains domaines d'ouvrages d'art privilégiant les qualités de maniabilité et d'esthétique. La réalisation des ouvrages d'art nécessite des bétons de hautes performances et très hautes performances. Formuler un béton de sable de hautes performances est évidemment contrarié par l'absence partielle ou totale de gravillons. Mais on peut optimiser le squelette granulaire des granulats du béton de sable par l'utilisation des éléments fins, qui limitent en même temps le rapport eau/ciment sans affecter d'une manière considérable la maniabilité [18].
Dans le domaine d'enrochements artificiels, le choix de béton de sable se fera en fonction des considérations économiques et esthétiques plutôt que techniques. Les enrochements artificiels sont généralement destinés le plus souvent au milieu marin, donc sont exposés à l'agressivité de l'eau de mer et aux chocs des corps étrangers transportés par les vagues. A cet effet, les caractéristiques requises pour les bétons de sable destinés à la préfabrication d'enrochements artificiels sont la résistance à la compression, la faible porosité, la résistance aux chocs, la résistance à l'attrition et au gel. Le béton de sable

peut constituer une solution économique intéressante dans ce cas, tant il est vrai qu'à la proximité de la mer est souvent liée la présence de sable.
Dans le domaine de préfabrication d'accessoires de VRD, le béton de sable est plus convenable notamment dans la préfabrication de tuyaux, de regards et tout accessoires utilisés dans les canalisations étanches d'assainissement destinés à l'évacuation des eaux usées ou des eaux pluviales. Toutefois, il existe encore d'autres applications qui pourraient trouver intérêt à utiliser le béton de sable tels que : les travaux souterrains (tunnels, galeries, collecteurs, etc.), les barrages et les travaux portuaires [2].
Cependant, presque toutes les applications du béton traditionnel sont également réalisables en béton de sable. Seuls les critères technico-économiques font la différence de choix.

I.2.4.5. Techniques particulières

Les applications citées précédemment, ont privilégié dans certains cas l'utilisation des bétons de sable par rapport aux bétons traditionnels. Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du béton de sable répond parfaitement à la solution de quelques problèmes, qui restent à nos jours, mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton et de bétons fluides.

I.2.4.5.1. Béton de sable projeté

La technique de la projection de béton est apparue au début de vingtième siècle aux Etats-Unis et en France. Le domaine d'application de la projection de béton comprend la réparation et les renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les constructions de formes complexes.
La projection de béton de sable est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines. Par sa finesse granulométrique, le béton de sable représente une alternative aux bétons traditionnels, particulièrement dans le cas de présence des ferraillages denses. Le faible taux de perte liée à l'utilisation de béton de sable projeté, sa granulométrie fine et donc sa pompabilité en fait du béton de sable projeté une solution adaptée à des problèmes mal résolus par les bétons traditionnels.
A. Benaissa et al. ont montré dans une étude sur l'utilisation de béton de sable dans des panneaux 3D en utilisant la technique de projection par voie humide (**Figure I.4.**), en substitution au béton ordinaire que les deux bétons montrent des performances mécaniques semblables avec cependant une amplitude de retrait de dessiccation du béton de sable plus marquée. Les résultats trouvés à l'issue de cette étude montrent aussi que l'avantage du béton de sable par rapport au béton ordinaire réside dans la réduction du rebond de moitié (15% contre 30%), en raison de l'effet combiné de la méthode de projection et la granulométrie fine du béton de sable, et le fini de surface du béton de sable projeté est d'une grande qualité, d'où économie de travaux de finition [19].



Figure I.4. Panneau 3D en béton de sable projeté [19].

I.2.4.5.2. Bétons de sable fluides

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du béton de sable s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le béton de sable minimise le risque de ségrégation [20].

La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants superplastifiants afin d'éviter l'ajout excessive et incontrôlé de l'eau, qui entraîne une diminution des performances physico-mécaniques et de la durabilité. Pour que les bétons de sable fluides soient homogènes et stables vis-à-vis du phénomène de ségrégation et de ressuage, l'utilisation des éléments fins ou d'un adjuvant de viscosité est obligatoire. Les bétons de sable fluides sont intéressants pour certaines applications en génie civil comme les pieux forés, les injections et les reprises en sous-œuvre. Les bétons de sable fluides sont économiquement mieux adaptés aux dallages du bâtiment. S'agissant d'éléments horizontaux, la fluidité convient et l'auto-nivellement est un atout considérable. L'intérêt réside dans les avantages suivants :

- Rapidité et simplicité d'exécution ;
- Limitation des moyens en personnel et en matériels ;
- Nuisances réduites (absence de vibration).

Dans le cas des aménagements de voirie peu dénivelés (comme les aires de stationnement et les voies piétons), où les performances demandées ne seront pas élevées, elles se prêtent parfaitement à la technique de fluidification de béton de sable.

Les bétons de sable fluides présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques, dont l'utilisation semble se développer actuellement. Indépendamment de l'aspect environnemental lié à l'utilisation des bétons de sable, il pourra être mieux adapté aux cas suivants :

- Risques de ségrégation préjudiciables ;
- Forte densité de ferraillages ;
- Recherche d'un produit fini.

Les bétons de sable sont naturellement maniables et se mettent en place facilement sans recours à la vibration. Cet avantage, pour des bétons à performances courantes, constitue un atout qui sera plus important quand, en plus, on peut les fluidifier afin d'améliorer par conséquence leurs performances [21].

Néanmoins, le béton de sable fluidifié présente un surcoût allant de 10 à 25% par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les bétons de sable nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiants et additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques. Indépendamment à l'aspect économique et aux gains de productivité, le béton de sable fluidifié peut être une meilleure adaptation aux plusieurs applications mal assurées par les bétons traditionnels.

I.2.5. Intérêt des bétons de sable

1) Propriétés spécifiques des bétons de sable

Si la résistance est un critère de performance plus facilement assuré par le béton traditionnel, il existe certains critères pour lesquels le béton de sable se révèle plus performant [22].

- **Maniabilité :** mise en œuvre facilitée, énergies de mise en œuvre et de serrage réduites, pompabilité améliorée.
- **Cohésion et absence de ségrégation :** meilleure résistance aux chocs, bétonnage aisé en site aquatique, coulage en place des pieux et micro-pieux facilité, etc.
- **Petite granularité :** 0 à 6 mm facilite les travaux d'injection et le bétonnage de pièces à forte densité de ferraillage et/ou à coffrages complexes. Cette propriété est appréciée en travaux de rénovation, d'autant plus que le béton de sable est plus léger que le béton classique .
- **Bel aspect de surface :** le souci esthétique et la qualité du "fini" étant de plus en plus pris en compte dans les constructions. Les effets architecturaux et la qualité des parements que le béton de sable permet d'obtenir tendent à devenir des critères déterminants.

2) Abondance de la matière première

Les sables sont des matériaux très abondants, on les trouve dans de nombreux pays en quantité quasi inépuisable. Par ailleurs, les alluvions extraits sont souvent plus riches en sables qu'en gravillons.

Un certain nombre de grandes carrières ont des excédents de sable de concassage. La consommation en gravillons étant supérieure à celle sable produit. Dans ces conditions, l'usage du béton de sable en remplacement du béton traditionnel, sans faire appel à ses propriétés spécifiques, peut conduire à des économies.

I.2.6. Limites des bétons de sable

Dans l'état actuel des connaissances, les bétons de sable ne peuvent pas prétendre au remplacement systématique des bétons classiques. Ceci pour des raisons économiques ou techniques [22].

1) Raisons économiques

Avec le béton de sable, nous pouvons atteindre le niveau de résistance des bétons classiques en multipliant le nombre des ajouts ou en augmentant le dosage en ciment.
Par contre, l'incidence sur le coût est importante et dans la mesure où le béton de sable n'apporte pas un "plus" dans l'usage envisagé, il est préférable de recourir à l'utilisation du béton classique.
Tout sera fonction, évidemment, du contexte local en matière de granulats et de l'usage concerné.

2) Raisons techniques

Des "zones d'ombre" existent encore sur la connaissance des caractéristiques et du comportement des bétons de sable :

- S'ils ont le même niveau de retrait que les bétons classiques, leur module d'élasticité est, par contre, inférieur de 20 à 30%.
- Par ailleurs le peu d'éléments disponibles sur leur comportement au fluage les exclut dans l'immédiat des éléments de structure fortement sollicités ou précontraints.
- Même s'il existe des réalisations plus que centenaires (aqueduc de la Vanne sur une section de 40 km à Paris, phare de Port-Saïd en Egypte, mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris, etc.), les données sur la durabilité sont peu nombreuses.
- Il n'existe encore pas de normes universelles sur les bétons de sable.

I.2.7. Propriétés essentielles du béton de sable

Les propriétés essentielles du béton de sable sont :

1) Granulométrie et maniabilité

Le béton de sable nécessite plus d'eau de gâchage que les bétons traditionnels ; ceci se traduit par des valeurs E/C (eau/ciment) systématiquement supérieures à 0,5. Ce rapport se situe entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange; d'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le

rapport E/C+A (A= addition en fines activées), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels [2].

La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau, plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité : l'augmentation du module de finesse entraine une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de maniabilité.

Pour chacun des sables l'augmentation de la teneur en fine (diminution du module de finesse) entraine une maniabilité moins bonne. Le phénomène n'a pas un caractère systématique.

Il dépend de la nature des fines incorporées: logiquement l'ajout des fines de type sphérique en diminuant la quantité des vides devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

La relation dosage en fines-maniabilité peut dépendre aussi de la nature du sable. On constate en effet :

- Un comportement différent selon la granulométrie du sable, la **Figure I.5.** montre l'effet de différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune, à teneur en eau constante.
- Pour le sable de dune, l'ajout de fines entraîne, jusqu'à 200 kg/m^3 une chute de maniabilité ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire (plus compact).

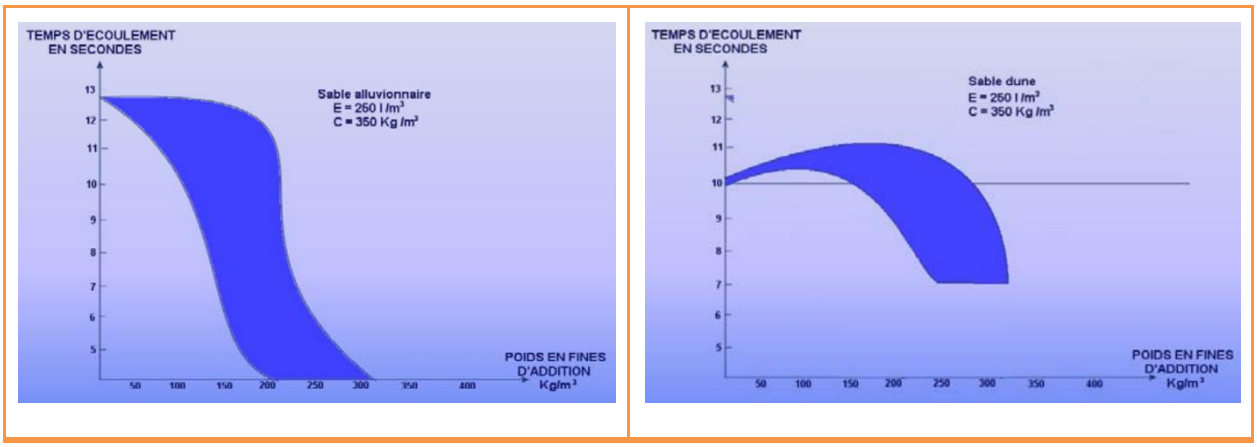


Figure I.5. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire) [2].

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange, plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore.

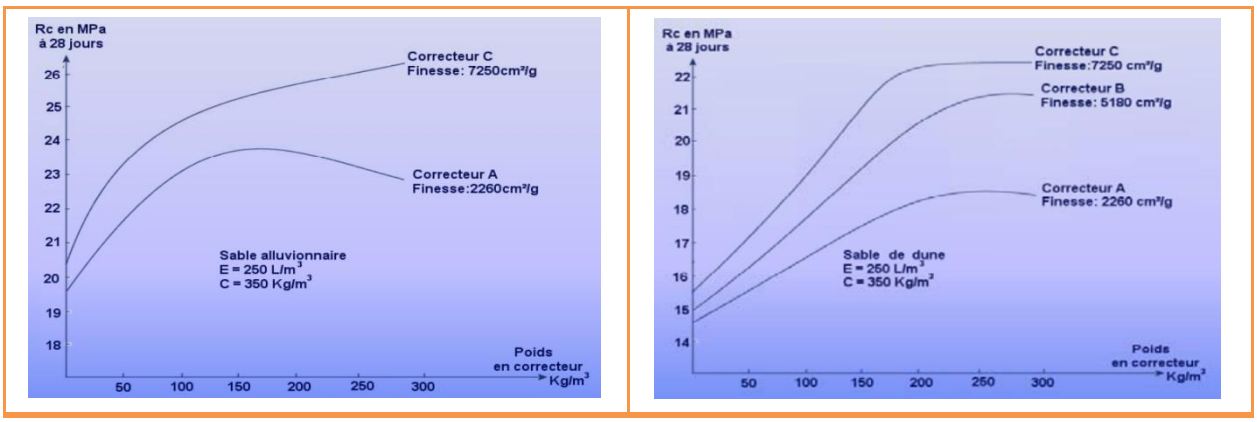
2) Granulométrie et résistance

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres et en particulier :

- **La finesse de l'addition :**

Plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité (et donc du gain en résistance); ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable; on le

constate avec des fines calcaires aussi bien sur un sable alluvionnaire (**Figure I.6.a.**) que sur un sable de dune (**Figure I.6.b.**).



(a) **(b)**

Figure I.6. Effets du dosage et de la finesse de d'addition sur la résistance [2].

- **La nature de l'addition :**

A même dosage, la **Figure I.7.** permet de constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.
La différence est encore plus considérable si l'on se place à maniabilité constante. Les fillers les plus efficaces sont ceux qui, hydrauliquement actifs, entraînent également une réduction d'eau.
Il convient de noter que ces résultats ont été obtenus sans adjuvant et que l'emploi d'un plastifiant permettrait d'augmenter l'efficacité de certains fillers hydrauliquement actifs mais nécessitant un besoin en eau important.

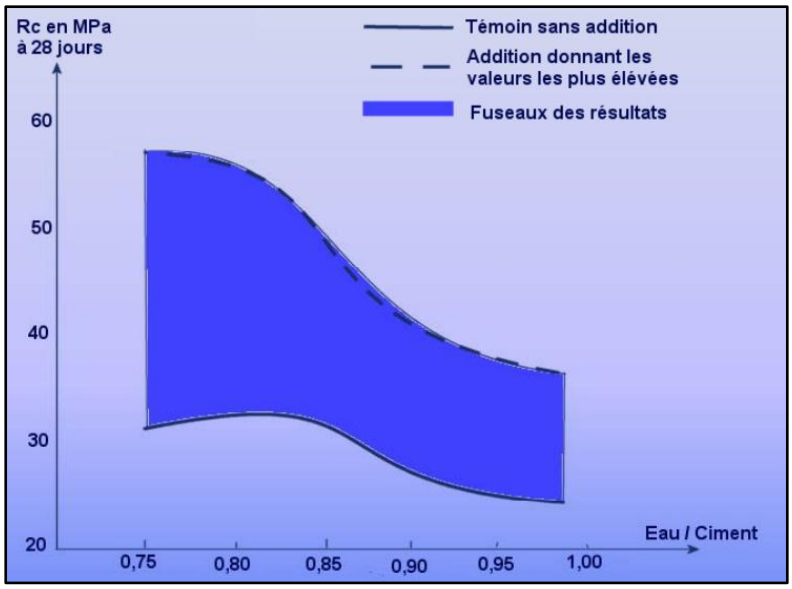


Figure I.7. Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance [2].

- **La dimension du D_{max} :**

La **Figure I.8.** montre l'effet de la granulométrie sur la résistance :

- Pour des rapports E/C (eau/ciment) constants, on constate que l'effet du diamètre du plus gros granulat D_{max} est peu important et en tout état de cause, pas défavorable aux sables [2].

Cependant on constate que la maniabilité est très différente selon le type de sable. A titre d'exemple pour un D_{max} égal à 20 mm, le béton de sable est très maniable, ce qui n'est pas le cas pour un diamètre D_{max} égal à 1,6 mm. Ce dernier cas nécessite une quantité d'eau supplémentaire, et par conséquent une chute de résistance plus ou moins importante.

- L'effet de la granulométrie sur la résistance apparaît plus clairement à des dosages en ciment constants.
- Chaque fois que le diamètre maximal D_{max} diminue, il faut plus d'eau pour garder la même maniabilité ce qui fait chuter implicitement la résistance. Dans le cas du béton de sable (D_{max}< 5mm), et pour minimiser la chute de résistance, on prévoit l'utilisation d'un adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

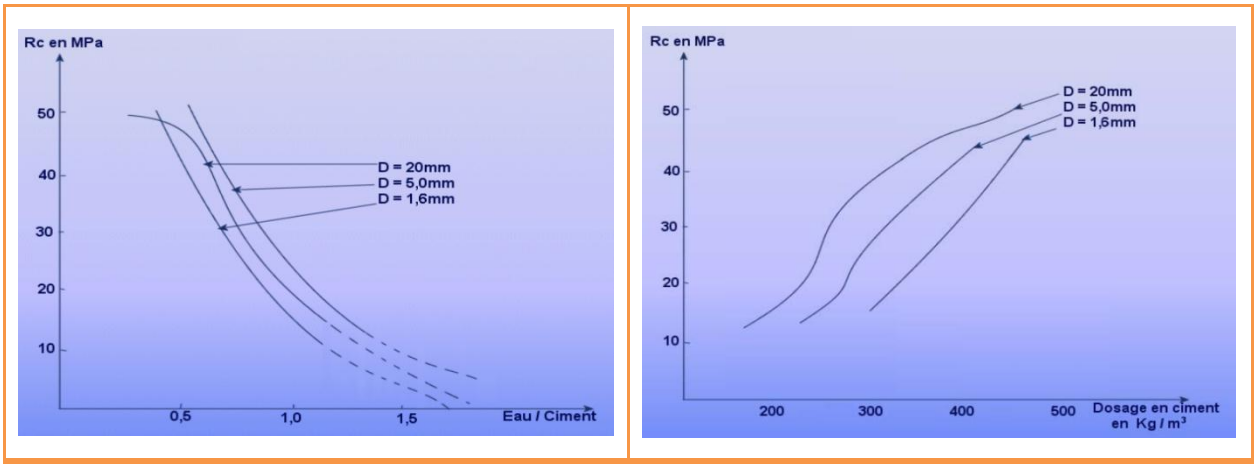


Figure I.8. Effet de la granularité sur la résistance [2].

3) Formulation d'un béton de sable

Dans la formulation des bétons traditionnels, on cherche généralement d'obtenir les propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance mécanique, à partir d'une combinaison de leurs constituants (sable, gravillon, ciment et eau). Dans ce cas, il existe plusieurs méthodes de formulation permettant de viser ces propriétés, en se fixant généralement la taille des plus gros granulats sur la base de considérations technologiques.

Dans le cas du béton de sable (caractérisés par sa granulométrie fine), l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons traditionnels conduit généralement à des dosages très élevés en ciment. A cet effet, les pâtes de ces bétons contiennent toujours, en supplément du ciment et de l'eau, des ajouts et des adjuvants,

afin de minimiser le dosage de ciment. Enfin nous pouvons dire que pour formuler un béton de sable, il faut combiner les deux paramètres : maniabilité et compacité [23].
Dans la plupart des études rencontrées dans la littérature, des compositions ont été proposées pour des matériaux bien déterminés. Les compositions optimales obtenues sont presque toujours basées sur la combinaison des deux paramètres indiqués précédemment la compacité et la maniabilité. La seule méthode de formulation qui semble plus ou moins généralisée est celle publiée par LCPC [23]. Cette méthode se base également sur les mêmes paramètres cités auparavant.

4) Retrait

Des essais de retrait ont été réalisés sur béton de sable en comparaison avec un béton classique. Pour ce qui est du retrait, ils ont permis de constater (**Figure I.9.**) que, lorsqu'on isolait le matériau de l'extérieur (milieu étanche), le retrait, dit d'auto-dessiccation, du béton de sable était voisin de celui du béton traditionnel. Si on laisse le béton sécher (milieu non étanche) le retrait du béton de sable peut atteindre des valeurs doubles de celui d'un béton classique (**Figure I.10.**). Le phénomène a été expliqué et est lié, vraisemblablement, à une distribution et une taille des vides différentes entre les deux matériaux.

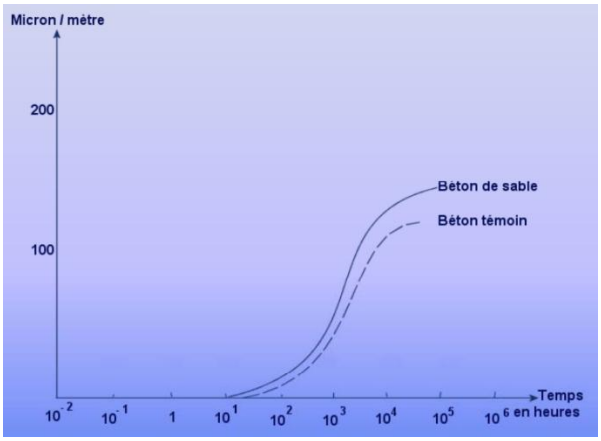


Figure I.9. Retrait d'auto-dessiccation.

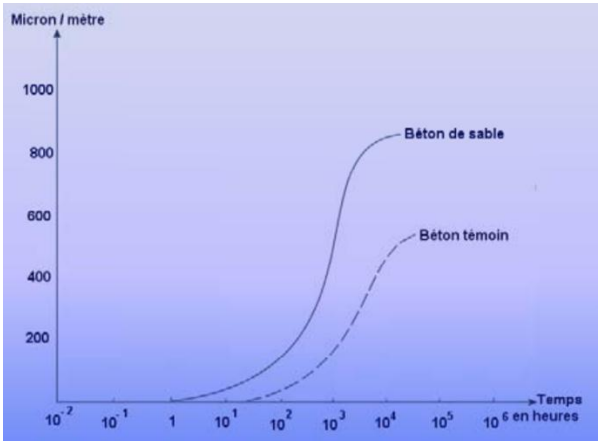


Figure I.10. Retrait total.

5) Durabilité des bétons de sable

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres tels que la porosité, l'organisation géométrique des pores et la perméabilité sont des paramètres physiques du premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcalisation ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur.
La tenue du béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par

un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (milieu urbain, régions montagneuses, milieu marin, ambiances agressives, etc.)

- Perméabilité à l'air et à l'eau ;
- Gel-dégel ;
- Carbonatation ;
- Pénétration des ions de chlorure.

Ces essais de durabilité, dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques exogènes ou internes, sont en général des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives.

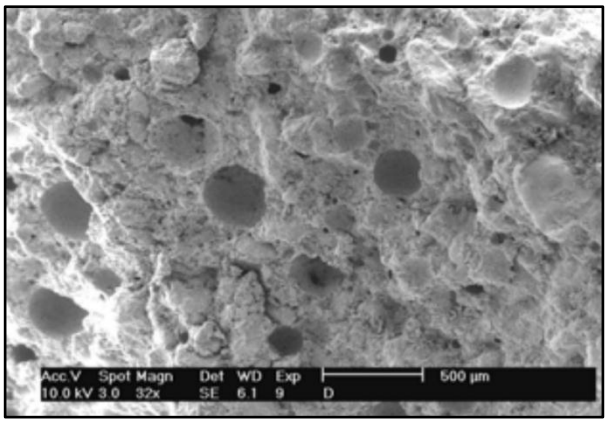
La perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel, quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques. Ils ne sont pas généralisés à toutes les formulations de béton de sable mais plutôt à des bétons de sable correctement formulés. C'est-à-dire pour lesquels il y a eu optimisation des dosages en fines d'addition et en ciment. Dans ces conditions le comportement est très satisfaisant et même excellent [2].

6) Microstructure et fissuration

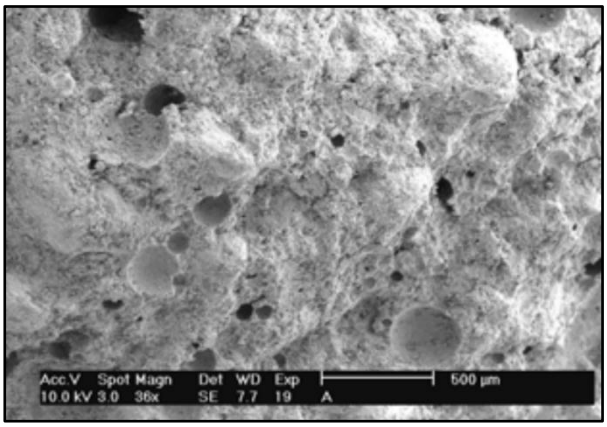
La microstructure du béton de sable comme étant une structure continue, la pâte de ciment est d'apparence amorphe, si l'on se réfère aux observations au M.E.B (Microscope électronique à Balayage), et présente un aspect compact sans, fissures notables.

Les observations au M.E.B, établissent que l'hydratation s'est développée de façon normale, les granulats sont bien enchevêtrés dans le complexe et la morphologie de l'interface (pate granulat de sable) ou auréole de transition n'a pas de texture particulière identifiable par de la portlandite [24].

La **Figure I.11.** présente l'aspect général de deux types du béton de sable (alluvionnaire et dunaire) réalisé par MEB [5].



Béton de sable dunaire ; G = 32



Béton de sable alluvionnaire ; G = 36

Figure I.11. Aspect général du béton de sable [5].

Dans les deux bétons de sable, dunaire et alluvionnaire, l'aspect général de la matrice montre que le composite relativement homogène et compact en surface.

I.2.8. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire

Le **Tableau I.3.** qui donne comparaison de quelques caractéristiques de béton de sable et béton ordinaire.

Tableau I.3. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.

Béton de sable	**Béton ordinaire**
Composants [2] - Ciment ; - Sable ; - Filler ; - Eau : plus quantité d'eau.	Composants - Ciment ; - Sable ; - Gravier ; - Eau : moins quantité d'eau.
Qualités essentielles - Ouvrabilité moins : le module de finesse de mélange est plus faible. - Résistance faible : due à l'utilisation davantage de quantité d'eau dans la composition du béton de sable pour mouiller toutes les particules fines.	Qualités essentielles - Ouvrabilité plus : le module de finesse de mélange est plus grand. - Résistance forte : due à l'effet de présence de gravier dans la composition des bétons ordinaires.
Méthodes de formulations - Méthode théorique et méthode expérimentale [2] ; - Méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées [23].	Méthodes de formulations [25] * Méthodes basées sur des considérations théoriques ou des essais : - Méthode à granularité continue de Bolomey ; - Méthode de Vallette ; - Méthode de Faury. * Méthodes générales du C.E.S (centre d'essai des structures) : - Evaluation de l'humidité des granulats ; - Utilisation d'abaque (méthode Dreux).
Particularité du béton [2] - Retrait plus que le béton ordinaire ; - Fluage plus faible, voisin de celui d'un béton ordinaire ;	Particularité du béton - Retrait moins que le Béton de sable ; - Fluage voisin de celui d'un béton de sable ;

- Elasticité : module d'élasticité : les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faibles que ceux des bétons classiques.	- Elasticité : les bétons ordinaires ont des modules d'élasticité plus forts que ceux des bétons de sable.
Domaines d'emploi - Bâtiments ; - Fondations ; - Voiries ; - Travaux des réparations ; - La projection des surfaces ; - La réhabilitation de collecteurs d'assainissement ; - Les travaux d'injection ; - Le comblement de cavités.	Domaines d'emploi [25] - Bâtiments ; - Fondations ; - Voiries ; - Aéroports ; - Ouvrages d'art ; - Travaux des réparations ; - Les ponts ; - La préfabrication.

I.2.9. Effet des constituants sur les propriétés d'un béton de sable

Un béton de sable est habituellement composé de sable, de ciment, de fines d'ajout et d'eau. Dans certains cas d'usages, cette composition de base peut inclure d'autres ajouts (adjuvants, gravillon, fibres, etc.). Les particularités d'un béton de sable par rapport au béton traditionnel, notamment sa finesse granulométrique et le dosage élevé en éléments fins, lui assurent des propriétés spécifiques à l'état frais et durci.

1) Effet de sable

Le sable est le principal constituant dans la fabrication de béton de sable. Généralement, l'exigence principale sur l'emploi des sables c'est la propreté. La granularité du sable n'obéit à aucune exigence, donc on peut utiliser des sables de différentes finesses (sables fins ou grossiers) et des sables de différentes formes (sables anguleux ou arrondis). La granulométrie du sable influe sur le besoin en eau du béton de sable et par conséquence sur sa maniabilité, puisque plus le sable est fin, plus la surface des grains augmente [26]. La **Figure I.12.** montre l'influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un béton de sable, où on constate que l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de la maniabilité.

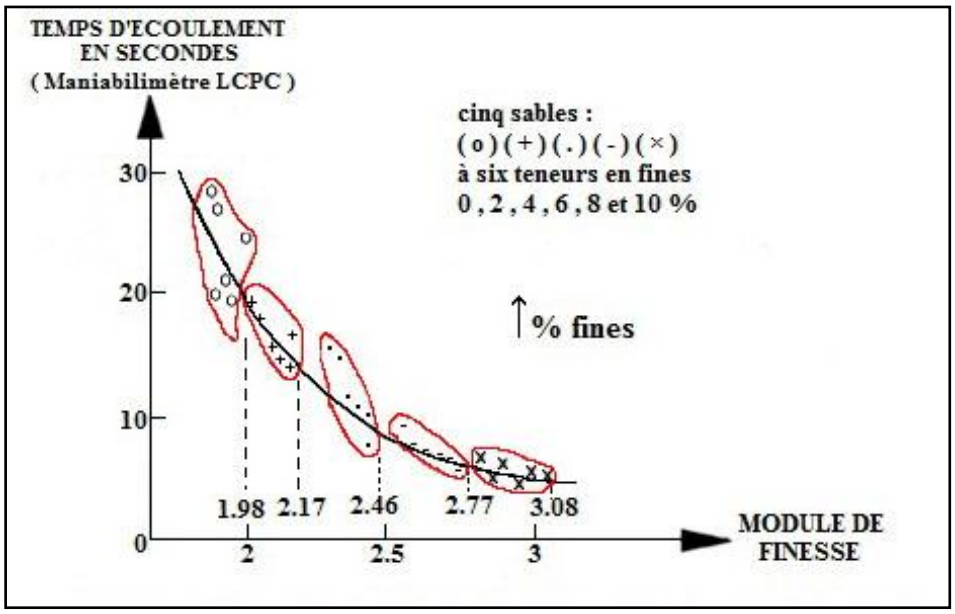


Figure I.12. Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un béton de sable [26].

L'optimisation de la compacité du squelette granulaire du béton de sable est en relation avec la granulométrie du sable utilisé. Les grains fins du sable se logent dans les vides crées par l'empilement des grains grossiers, et par conséquence la compacité du mélange s'améliore. Dans une étude sur la valorisation des sables locaux de la région de Laghouat (sable de dunes et sable alluvionnaire), **M. Bederina et al.** ont montré que l'utilisation de sable de dunes (SD) avec une classe de 0,4/5 mm du sable alluvionnaire (SA), à un rapport SA/SD = 1,7 améliore la compacité du sable mélange (SAD) [27].

2) Effet de fines d'ajout

Un béton de sable se diffère d'un béton traditionnel par sa granulométrie fine. Donc, la porosité dans le cas du béton de sable est élevée et par conséquence le dosage nécessaire du ciment sera très important. L'utilisation du ciment seul n'est pas économique et en plus le béton de sable ne sera finalement qu'un mortier. A cet effet, l'introduction de fines d'ajout est indispensable dans le cas des bétons de sable. L'ajout de fines entraîne une amélioration de la compacité du squelette granulaire et améliore par conséquence la maniabilité du béton de sable [27]. La **Figure I.13.** montre l'effet de fillers calcaires sur la densité des sables SA, SD et sable mélange SAD.

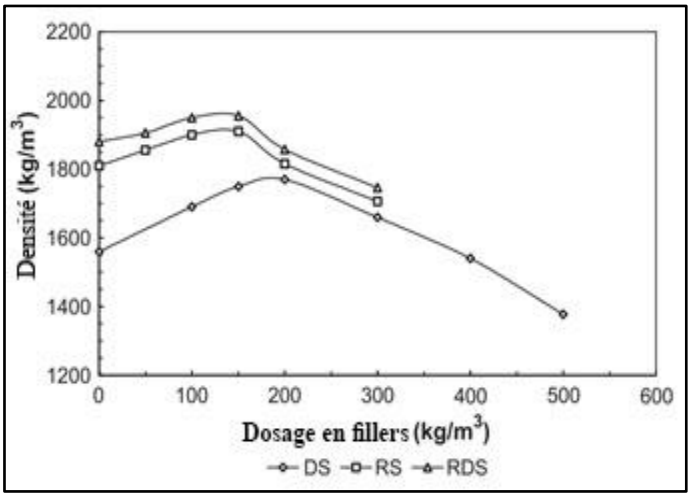
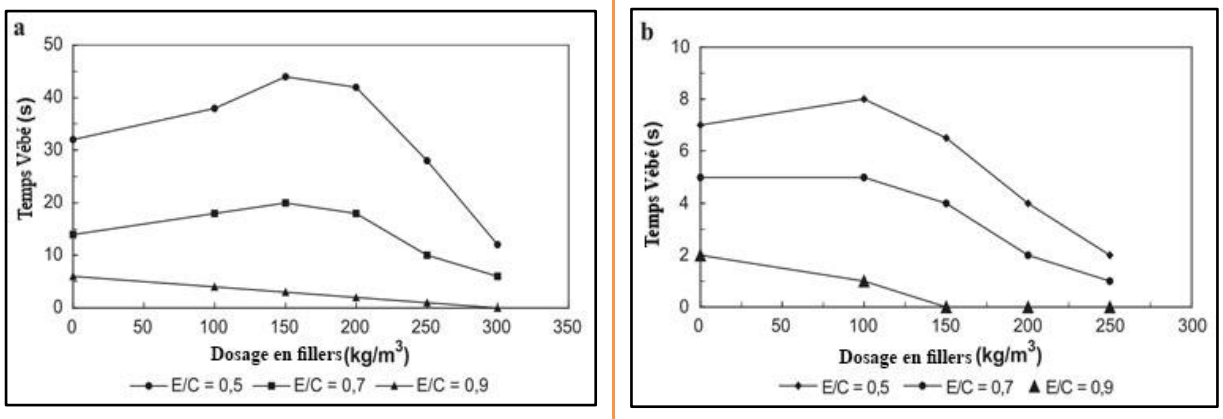


Figure I.13. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables SD, SA et SAD [27].

D'après la **Figure I.13.** on remarque qu'il existe un dosage optimal de fillers calcaires où la compacité est maximale. L'amélioration de la compacité par l'ajout de fillers calcaires devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

La **Figure I.14.** montre la variation de la maniabilité, mesurée par le temps d'écoulement Vébé des bétons de sable à base de SD et SAD en fonction de dosage de fillers calcaires et de différents rapports eau/ciment (E/C). Cette figure montre que le temps d'écoulement Vébé du béton de sable à base de SD est plus important que celui à base de SAD. Elle montre aussi que le temps Vébé des bétons de sable augmente en fonction de la diminution du rapport E/C.



a : cas du SD	b : cas du SAD

Figure I.14. Evolution de la maniabilité Vébé en fonction de dosage des fillers et de rapport E/C [27].

3) Effet du rapport E/C

Le béton de sable est un béton fin, donc il nécessite d'avantage d'eau de gâchage que les bétons traditionnels (généralement des rapports E/C entre 0,6 et 0,7). Comme tout béton traditionnel, le rapport E/C joue un rôle clé dans la détermination des propriétés du béton de sable à l'état frais et durci. On peut constater de la **Figure I.14.** indiquée ci-avant que, à dosage constant en fillers calcaires, la maniabilité du béton de sable s'améliore quand le rapport E/C augmente et pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend du dosage de fillers calcaires [27].

4) Effet des adjuvants

Tous types d'adjuvant utilisés dans les bétons traditionnels peuvent être utilisés avec les bétons de sable. La particularité du béton de sable d'être fin, favorise toutefois l'usage de plastifiants ou de superplastifiants afin d'améliorer sa maniabilité et sa résistance mécanique par la diminution de la quantité d'eau. Compte tenu aussi du dosage élevé en additions, qui elles aussi nécessitent de l'eau et interviennent à l'amélioration de l'homogénéité et la stabilité du béton de sable fluide vis-à-vis de la ségrégation, l'emploi des adjuvants superplastifiants est indispensable.

5) Effet des fibres

Les bétons de sable sont des bétons fins. A cette cause, la fibration des bétons de sable est adoptée dans le but de réduire le retrait à court terme [2].
Sur le plan résistance mécanique **B. Felekoğlu et al.** ont montré dans une étude sur l'effet de l'incorporation des fibres organiques dans les micro-bétons, que l'introduction des fibres polypropylènes (à un dosage de 0.5% volumique) améliore la résistance à la flexion, mesurées sur des éprouvettes (4×4×16) cm^3 [28].
L'inconvénient de l'utilisation des fibres dans les bétons reste toujours l'obtention d'une mauvaise maniabilité, notamment dans le cas des bétons fluides. A l'heure actuelle, ce problème est partiellement résolu par l'utilisation des adjuvants superplastifiants [29].

I.2.10. Conclusion

D'après plusieurs résultats auxquels ont abouti les différentes recherches, nous pouvons dire que les bétons de sable pourront remplacer les bétons classiques dans certains éléments porteurs. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès.
Pour avoir une maniabilité convenable, l'utilisation des adjuvants s'impose alors pour réduire le dosage en eau et augmenter la résistance.
De même il faut veiller à ce que le béton soit le plus compact possible pour qu'il puisse manifester de bonnes performances. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granulaire et allant au plus gros diamètre possible. Pour combler les vides intergranulaires, il faut prévoir des fines de bonne nature, de finesse élevée et avec des dosages convenables.

L'augmentation de la compacité par ajout diminue la maniabilité, d'où la nécessité de trouver un compromis entre la maniabilité et sa compacité.
D'autres essais tels que le retrait, la microstructure, etc. ont été entreprises mais ils n'ont fait pratiquement l'objet que de peu d'études récentes. Les résultats obtenus sont limités à des matériaux bien déterminés et à des compositions bien précises.

I.3. Béton léger

I.3.1. Définition

On regroupe sous le terme béton léger, l'ensemble des bétons dont la densité est inférieure à celle d'un béton ordinaire (égale à environ 2,4). Une telle densité peut être obtenue grâce à la substitution des granulats classiques (sable, gravillon) par des granulats plus légers, souvent artificiels tels que : l'argile expansé, le schiste, la perlite, la vermiculite, le laitier expansé, etc. Ces bétons, qui sont aujourd'hui bien appréhendés au niveau de leur formulation et leur mise en œuvre [30,31], présentent des densités se situant en général dans la fourchette (1,4 - 1,9).

I.3.2. Classification des bétons légers

Deux méthodes permettent de classer les bétons légers : la première est fondée sur la composition des bétons et la seconde sur les utilisations [32].

1) Classification fondée sur la composition et la constitution des bétons légers

- **Classification s'appuyant sur la technique employée pour obtenir des vides dans le béton**

Selon cette méthode, nous distinguons trois grandes familles de bétons légers (**Figure I.15**) :

- **Les bétons caverneux**

Les bétons caverneux sont des bétons constitués d'un squelette de granulats légers ou non ayant sensiblement la même grosseur et d'une pâte de liant assurant l'enrobage et le collage de ces éléments entre eux.
On obtient ainsi des bétons dits caverneux ou semi-caverneux. On les désigne parfois sous le nom de béton à texture ouverte ou alvéolée ou encore béton sans sable ou sans fines.
Avec les granulats courants, la densité peut être de l'ordre de 1,6 à 1,8 t/m^3. On peut descendre au-dessous avec les granulats légers (0,7 à 1 avec de l'argile expansé). Les résistances mécaniques sont très faibles (en compression, on a en général 3< fc_{28} <7 MPa [12]).

Comme les autres bétons légers, les bétons caverneux visent bien sûr à permettre un allégement et une simplification des pièces fabriquées avec une bonne isolation thermique.
Mais, ils ont surtout comme caractéristique essentielle d'être très économiques. La réduction, voir suppression du sable, et aussi la réduction très appréciable de la quantité de ciment permettent une économie importante pouvant atteindre 30 % par rapport à un béton plein.

- **Les bétons cellulaires**

Les bétons cellulaires sont des matériaux constitués d'une pâte de sable et de liant hydraulique dans laquelle on fait naître des petites bulles (Φ = 1mm) soit par réaction chimique (béton gaz), soit par action physique au cours du malaxage (béton mousse). En fait, ce ne sont pas des bétons au sens strict du mot, mais plutôt des mortiers puisqu'ils ne contiennent pas de graviers.
La densité des bétons cellulaires varie, suivant les compositions, de 0,4 à 1,2 t/m^3 et leur conductivité thermique fonction de leur densité est comprise entre 0,16 w/m.°C pour des bétons de masse volumique de 400 kg/m^3 et 0,4 w/m.°C pour une masse volumique de 1200kg/m^3. Les résistances à la compression sont d'environ 0,5 à 0,8 MPa pour des masses volumiques de 400 kg/m^3 et atteignent 4 à 5 MPa pour des masses volumiques de 1200 kg/m^3. Les résistances en traction sont en général de l'ordre de 30 % de celles en compression [12].

- **Les bétons de granulats légers**

Les bétons de granulats légers sont des bétons traditionnels dans lesquels les granulats normaux ont été remplacés par des granulats présentant une structure alvéolée, scoriacée ou cellulaire donc plus légers que les granulats traditionnels. Ces bétons présentent en général des résistances d'autant plus faibles qu'ils sont plus légers, mais cette dernière qualité peut, dans certain cas, être particulièrement intéressante (préfabrication, isolation, gain de poids sur fondation difficiles ou onéreuses, etc.) [12].

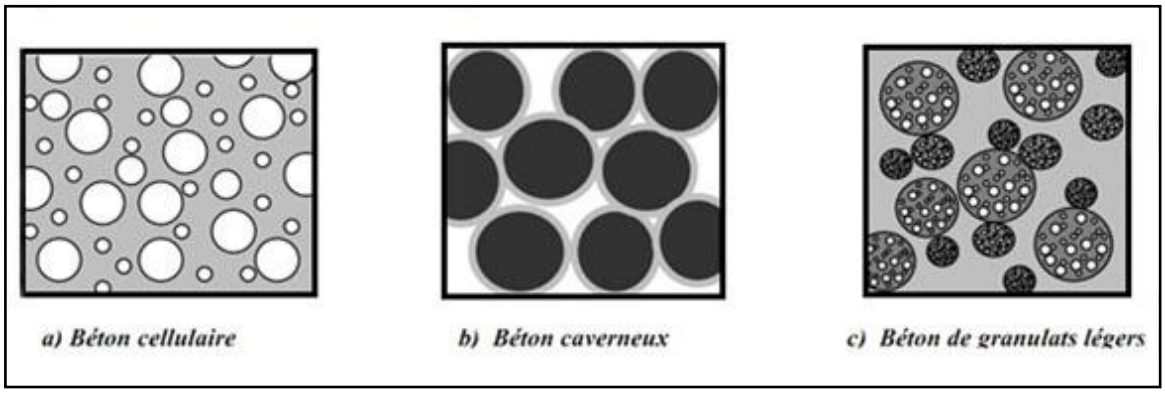


Figure I.15. Représentation schématique des différents types de béton légers.

- **Méthode s'appuyant sur l'origine des granulats**

Dans ce type de bétons, les granulats normaux sont remplacés par des granulats légers, présentant une structure alvéolée ou cellulaire. Le but recherché est la légèreté, mais surtout de bonne résistance mécanique, parmi ces granulats, on trouve :

- Matériaux naturels : Nous retrouvons ici les granulats naturels légers extraits en carrière comme la ponce et la pouzzolane.
- Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique : Nous trouvons ici les argiles, les schistes et les ardoises expansées ainsi que la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.
- Matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial : Il s'agit souvent de déchets industriels de structure expansée. Le mâchefer répond à cette définition.
- Matériaux artificiels obtenus après divers traitements spéciaux : Dans cette catégorie, figure la majorité des grands déchets industriels : le laitier expansé (sous-produit de l'industrie métallurgique), les cendres volantes frittées (sous-produits provenant des centrales thermiques) et les granulats végétaux, sciures et copeaux (sous-produits de l'industrie du bois). Un autre type de matériau est apparu beaucoup plus récemment : il s'agit du verre expansé (transformé en petites perles après broyage et expansion).

2) Classification fondée sur l'utilisation des bétons légers

- **Classification s'appuyant sur les masses volumiques apparentes et sur les utilisations s'y rapportant**

Cette méthode se base sur la classification des bétons légers suivant leurs masses volumiques apparentes, les bétons sont classés en trois grandes catégories :

Les bétons de remplissage

Ces bétons sont de masse volumique apparente faible et comprises entre 300 et 1000 kg/m^3 et ne sont pas porteurs [34]. Ils sont en général de bons isolants thermiques. Leur constitution est d'ailleurs souvent caverneuse ou cellulaire. Leurs contraintes admissibles en compression sont faibles. On les utilise donc principalement pour le remplissage de murs non ou peu porteurs, pour la fabrication de formes de pente de toitures-terrasses et d'éléments manufacturés.

Les bétons porteurs et isolants

Les qualités isolantes de ces bétons sont naturellement inférieures à celles des bétons précédents, mais suffisantes pour assurer le confort thermique sous certaines épaisseurs ; par contre ils présentent des caractéristiques mécaniques nettement supérieures. Leurs masses volumiques apparentes sont comprises entre 1000 et 1400 kg/m^3 [34]. Les bétons classés dans cette catégorie sont généralement des bétons de granulats légers. On les utilise principalement pour la fabrication de pièces préfabriquées (panneaux allèges, etc.).

Les bétons de structure

Les bétons destinés à être armés ou précontraints pour la constitution de structures. La masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m^3 [34] .
Leur isolation thermique est faible, mais leurs résistances mécaniques sont importantes et peuvent être du même ordre que celles des bétons pleins normaux.
Les bétons de structure à base de granulats légers sont définis comme des matériaux ayant, après séchage à l'air à 28 jours d'âge, une résistance à la qualité supérieure à 175 kg/cm^2 environ une densité apparente inférieure à 1850 kg/m^3.

I.3.3. Caractérisation technique des bétons légers

1) Masse volumique apparente

C'est la caractéristique principale d'un béton léger, en raison de son grand effet sur les propriétés mécaniques et thermiques ou même variations dimensionnelles (**Figure I.16.**) [11]. Elle dépend principalement du :

* De la structure (béton plein caverneux, semi caverneux, cellulaire) ;
* De la masse volumique des granulats ;
* Du dosage en ciment et de la quantité d'eau absorbée par les granulats.

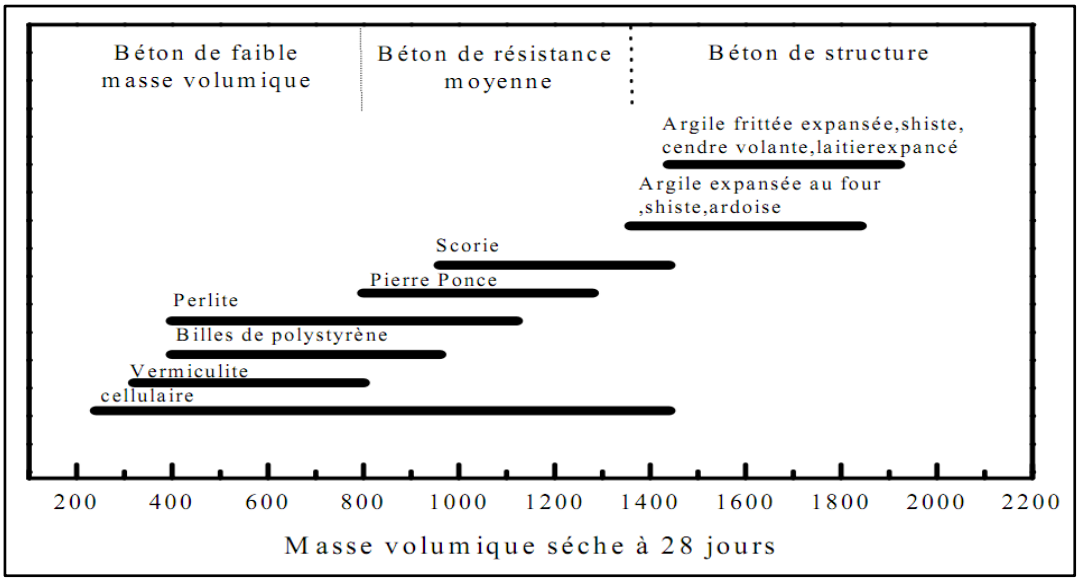


Figure I.16. Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R287 [11].

2) Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un béton léger est d'autant plus élevée que la résistance spécifique des granulats légers utilisés et leur masse volumique sont elles-mêmes plus grandes [35] (**Figure I.17., Figure I.18.** et **Tableau I.4.**).

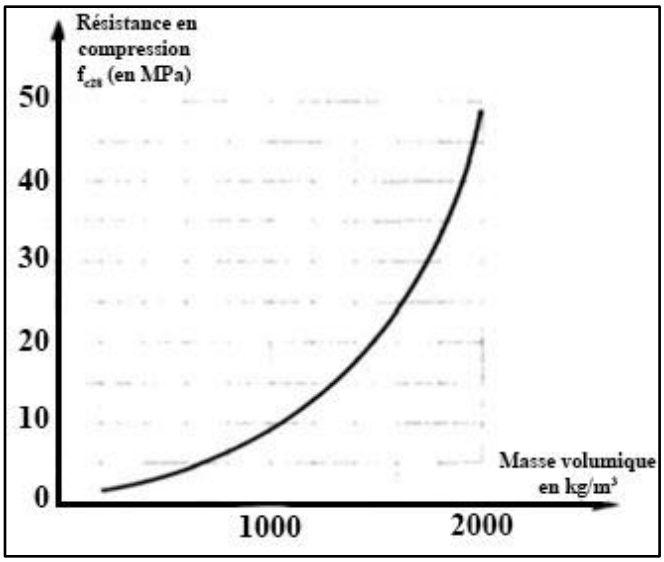


Figure I.17. Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique [12].

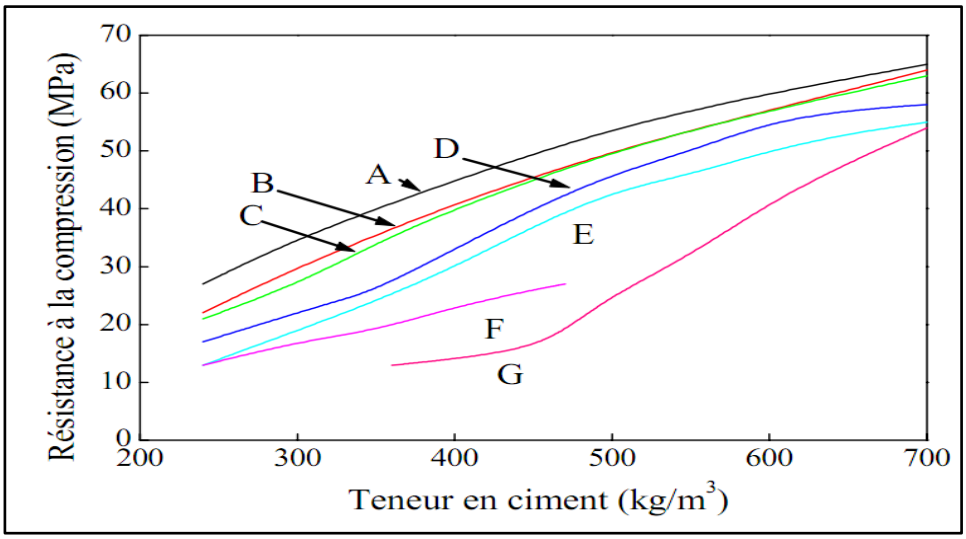


Figure I.18. Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats [11].

Tableau I.4. Désignation des différents types des bétons (Légendes de la **Figure I.18.**).

Graphe	Désignation
A	Cendres volantes frittées et granulats ordinaires
B	Laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire
C	Cendres volantes frittées
D	Schiste fritté
E	Ardoise expansée
F	Argile expansée et sable
G	Laitier expansé

3) Résistance à la traction

D'après BAEL, la résistance à la traction des bétons légers est exprimée par la formule [35] :

$$f_t = 0,5 + 0,05\ f_c \qquad \textbf{(I.5.)}$$

4) Module d'élasticité

Le module d'élasticité des bétons légers est fonction de leurs masses volumiques apparente et leur résistance à la compression [36]:

$$E_b = \delta_b.6000\ \sqrt{\sigma_{jm}} \qquad \textbf{(I.6.)}$$

Avec :

δ_b : masse volumique apparente du béton en t/m^3.
σ_{jm} : résistance à la compression du béton sur cubes en kg/cm^2 à (j) jours.
Le **Tableau I.5.** ci-dessous donne quelques valeurs pour différents types de béton légers.

Tableau I.5. Module d'élasticité de quelques types de bétons légers [36].

Type de béton	**E_b (kg/cm^2)**
Béton de ponce	30 à 70 000
Béton de laitier expansé	40 à 125 000
Béton de laitier expansé + sable	70 à 170 000
Béton d'argile ou schiste expansé	60 à 220 000
Béton de perlite	10 à 30 000
Béton de vermiculite	8 à 17 000
Béton cellulaire autoclavé	17 500
Béton de cendre volante fritté	100 à 220 000

5) Retrait

Le retrait des bétons légers est plus important que les bétons traditionnels car l'eau absorbée par les granulats se trouve progressivement restituée, retardant ainsi la déshydratation du mortier. Le retrait au séchage du béton léger est de 5 à 40 % plus élevé qui celui du béton ordinaire et les bétons confectionnés avec les granulats d'argile, de schiste et laitier expansé sont dans la gamme des plus faible retraits [11]. Le retrait relatif peut être évalué selon le dosage en ciment et en eau et selon le degré de dessiccation [12].

6) Aspect acoustique

L'isolation acoustique obtenue par des parois homogènes en béton léger, est avant tout, une question de poids et d'imperméabilité à l'aire. Certaines parois en bétons pleins de granulats légers, complétées par des enduits étanches, peuvent avoir des performances acoustiques supérieures à celles prévues par la " loi de masse ". Cette amélioration se manifeste pour des épaisseurs supérieures à 15 cm [37].

I.3.4. Durabilité des bétons légers

L'utilisation de granulats légers n'entraine pas d'effet préjudiciable sérieux sur la durabilité, sauf lorsqu'ils sont saturés et soumis à des cycles de gel-dégel, comme nous le verrons plus loin. Parce que le réseau poreux d'un granulat léger est généralement discontinu, la porosité des granulats eux-mêmes ne modifie pas la perméabilité du béton, qui est contrôlée par la perméabilité de la pâte de ciment [38].

I.3.5. Principaux avantages des utilisations de béton léger

Ces types des matériaux sont surtout employés en préfabrication ainsi qu'en raison de certaines de leurs qualités [12] :

- La légèreté : diminution du poids mort, économie de main d'œuvre, économie sur les fondations et structures portantes, réduction des coffrages et étais, manutentions plus faciles en préfabrication.
- Le pouvoir isolant : la même isolation thermique est donnée à 20% près par :
  - 10 cm de béton cellulaire ;
  - 20 cm de béton plein de granulats légers ;
  - 30 cm de béton caverneux ;
  - 60 cm de béton plein classique.
- L'aptitude à se travailler après durcissement : certains bétons légers (bétons cellulaires, bétons de pierre ponce, etc.) peuvent se travailler comme le bois, à la scie, au vilebrequin et supportent le clouage.
- Maniabilité : Pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.

I.3.6. L'inconvénient des utilisations de béton léger

L'inconvénient principal de ces bétons est la faiblesse de leurs résistances mécaniques qui interdit pratiquement leur emploi en béton armé, sauf en ce qui concerne certains bétons de granulats légers suffisamment dosés et bien étudiés avec emploi, de préférence, de sables naturels roulés [12].

I.3.7. Utilisations diverses des bétons légers

Les bétons légers sont utilisés dans les domaines suivants :

- Bloc de maçonnerie ;
- Pistes de sport, cendrées ;
- Couches filtrantes pour stations d'épuration ;
- Chapes ;
- Fours, cheminées ;
- Panneau préfabriqué ;
- Porcheries, étables ;
- Sous-couches de route : protection contre le gel et couche de base dans la construction des routes et des voies ferrées ;
- Les pavés.

I.4. Les fibres végétales

Avant de réaliser des composites à partir des fibres naturelles et de caractériser leurs performances, il faut d'abord s'intéresser à la fibre elle-même, sa microstructure, sa composition chimique, sa stabilité thermique.

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et l'argile étaient mélangées pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges [39, 40].

Les fibres naturelles ont récemment attiré l'attention des scientifiques et ingénieurs en raison des avantages qu'elles fournissent par rapport aux fibres de renforcement classiques comme les fibres de verre. Le développement des composites comportant des fibres naturelles est donc un sujet d'intérêt depuis les vingt dernières années. Ces fibres naturelles sont des fibres à faible coût et à faible densité et elles possèdent des propriétés spécifiques, par exemple elles sont biodégradables et non abrasives [41, 42].

Les fibres peuvent être classées selon leur nature chimique : elles sont soit organiques (à base de carbone et d'hydrogène), soit inorganiques. Dans le domaine des matériaux, les fibres naturelles (fibres de bambou, fibres de sisal, etc.) sont utilisées pour renforcer de nombreux polymères comme le polypropylène (PP) [43, 44], le polyacide lactique (PLA) [45], le polyéthylène (PE) [46], le caoutchouc [47, 48], les résines époxydes [49, 50], etc.

La légèreté et les capacités acoustiques, comme l'isolation phonique, font aussi partie des avantages de l'utilisation de fibres végétales dans le domaine des matériaux.

I.4.1. Classification des fibres végétales

Les fibres végétales se divisent en deux catégories : les fibres de bois et les fibres agricoles.
Les principales catégories de fibres agricoles sont :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute, kénaf, ramie…) [51] ;
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier, etc. [52-54] ;
- Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok, etc. ;
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de noix de coco, etc. [55] ;
- Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille d'orge, de blé, de riz, etc. [56].

I.4.2. Etude de la structure des fibres végétales

Les fibres naturelles sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine [57].
Les proportions de ces constituants varient beaucoup selon les fibres et la cellulose est l'élément constitutif majeur. Chaque fibre se présente sous la forme d'un bio composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant l'élément structurant très rigide qu'est la cellulose [55].

1) La cellulose

La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne régulière composée de maillons de glucose $C_6H_{12}O_6$ (**Figure I.19.**). Le motif de répétition est le dimère cellobiose. Le nombre de motifs de répétition ou le degré de polymérisation varie suivant l'origine de la cellulose. Ce polymère présente un grand intérêt du point de vue industriel puisque de nombreuses fibres (coton, chanvre, jute, lin, etc.) sont composées de cellulose.

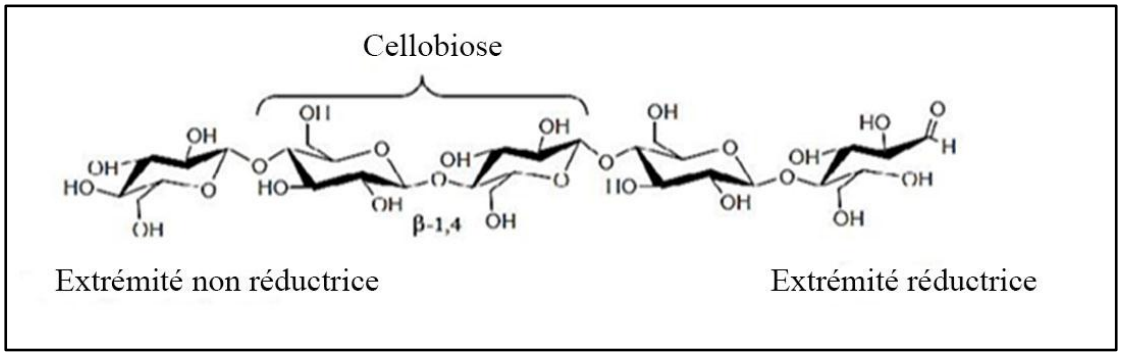


Figure I.19. Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose).

2) Les hémicelluloses

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides. Les hémicelluloses constituent une classe de polymères très variés, solubles dans l'eau et pouvant être extraites de la paroi des cellules végétales par des solutions alcalines. En plus du glucose, les monomères des hémicelluloses peuvent être de la xylose, du mannose, du galactose, du rhamnose, ou de l'arabinose (**Figure I.20.**) [59].

Les hémicelluloses ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300 et leur structure dépend de l'espèce végétale (type cellulaire, localisation dans la paroi ou bien encore âge des tissus) [60, 61].

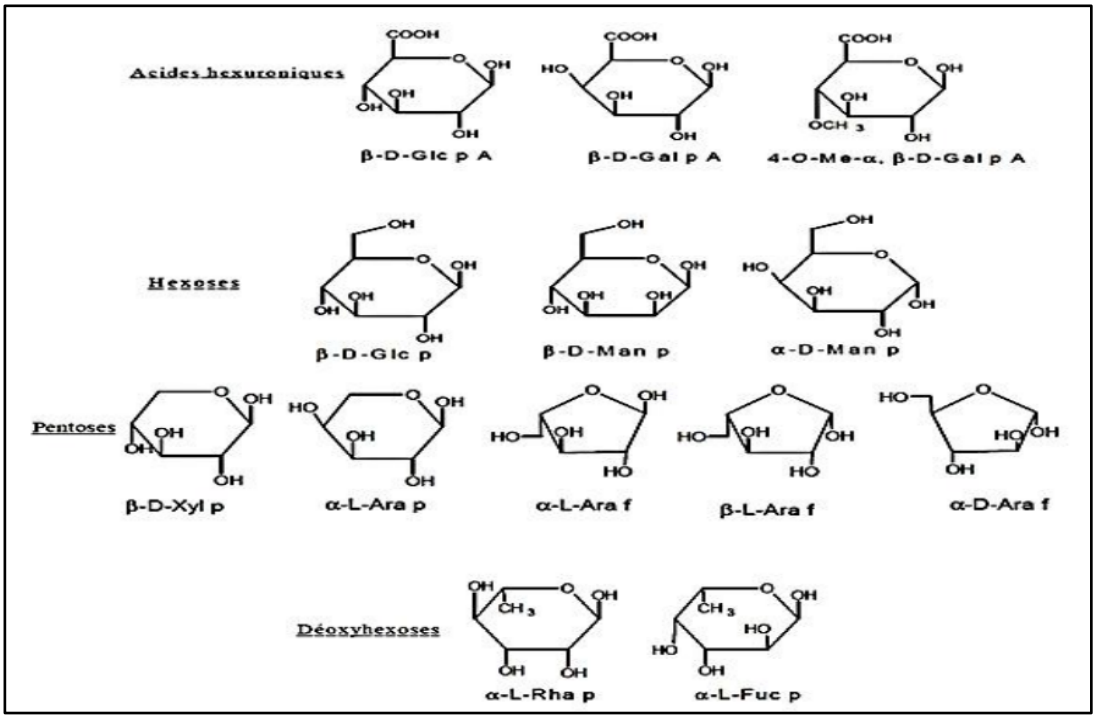


Figure I.20. Principaux glucides constituant les hemicelluloses [49].

3) Les lignines

La lignine contribue à la résistance mécanique des parois cellulaires et soutient la cohésion des fibres dans la partie boisée. En considérant la fibre comme un matériau composite, la lignine représenterait la matrice. Elle sert d'agent complexant pour les minéraux et aide à la conservation de l'humidité dans les plantes. La lignine est responsable de la rigidité et de la dureté des bois et des plantes. Elle est peu sensible à la dégradation biologique, elle crée une barrière morphologique à la pénétration et à la progression des agents pathogènes, et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires.

I.4.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité et sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité.
Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par beaucoup des chercheurs [53-56, 62].

I.5. Généralités sur les propriétés thermiques

I.5.1. Les échanges thermiques

On distingue trois formes d'échanges thermiques :

- **La conduction :** la chaleur se propage à travers les corps, principalement les solides, sans mouvement de matière.
- **La convection :** sous l'effet des différences de température, des masses de matières liquides ou gazeuses se mettent en mouvement et propagent ainsi la chaleur.
- **Le rayonnement :** tout corps chauffé émet spontanément de l'énergie sous forme de radiations électromagnétiques. Inversement, ces radiations peuvent être absorbées et contribuer à chauffer un corps récepteur.

I.5.2. Différentes paramètres thermiques

1) Conductivité thermique

Le processus de conduction de la chaleur s'effectue spontanément des corps les plus chauds vers les plus froids. La relation fondamentale qui décrit ce phénomène de conduction a été proposée par **Joseph Fourier** en 1822.
On considère que le transfert de chaleur s'effectue par conduction pure, dans la matrice solide et le gaz interstitiel immobile, en l'absence de convection naturelle et transfert de chaleur par rayonnement. La densité de flux de chaleur φ ($W.m^{-2}.K^{-1}$) est exprimée par la loi de Fourier :

$$\varphi = - \lambda.gradT \qquad (I.7)$$

où λ est le coefficient de conductibilité thermique ou conductivité thermique. Il traduit l'aptitude d'un matériau à conduire de la chaleur. Par convention, le sens des coordonnées croissantes est pris dans le sens de l'écoulement de la chaleur. Ainsi le gradient de température est de sens inverse à celui du flux de chaleur.

2) Chaleur spécifique volumique

La chaleur spécifique volumique noté (ρc) en ($J.K^{-1}.m^{-3}$) traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner de l'énergie calorifique. Ce stockage d'énergie se manifeste, par exemple, par l'augmentation de la température du matériau. La chaleur spécifique volumique ne dépend que de la température et de la composition du milieu considéré.

3) Diffusivité thermique

Lorsqu'un flux de chaleur, de densité φ ($W.m^{-2}.K^{-1}$) traverse un matériau isotrope et homogène, l'équation de conservation de l'énergie en conduction pure s'écrit :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + div\varphi = 0 \qquad (I.8)$$

Où ρ est la masse volumique du matériau, c la chaleur massique à pression constante. La densité de flux de chaleur **φ** donnée par la relation (**I.6**) et l'équation (**I.7**) devient :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = div(-\lambda grad T) \qquad (I.9)$$

Pour un intervalle de température suffisamment faible, on peut considérer que la conductivité λ est, en général, constante. L'équation précédente s'écrit alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\Delta T}{\partial x^2} \qquad (I.10)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \qquad (I.11)$$

Le coefficient « a » est appelé la diffusivité thermique du matériau. La mesure de la diffusivité et des paramètres ρ et c permet la détermination indirecte de la conductivité thermique.

I.5.3. Différentes techniques de mesure

La mesure de la conductivité thermique des matériaux peut se faire par plusieurs méthodes et différents instruments. Les techniques de mesures peuvent être classées :

1) Selon le mode de chauffage

Selon le mode du chauffage de l'échantillon étudié on distingue :

- Les méthodes électrothermiques : Le chauffage du matériau est obtenu à l'aide d'une résistance électrique ;

- Les méthodes photo thermiques : Le matériau est chauffé par l'absorption des photons ou, plus rarement, par des électrons.

2) Selon le régime de chauffage

Selon le régime du chauffage employé, on distingue 3 grands groupes [63] :

- Les méthodes en régime permanent ;
- Les méthodes en régime quasi établi ;
- Les méthodes en régime variable.

On peut citer quelques méthodes de mesure, à savoir :

Les méthodes en régime permanent

Cette première classe de techniques se caractérise par la mesure simultanée d'un flux de chaleur (constant) traversant l'échantillon et par celle d'une différence de température (fixe) des deux milieux extérieurs. Le modèle et la méthode d'identification sont basés sur un transfert thermique unidirectionnel et stationnaire.
Ainsi si on considère l'échantillon, d'épaisseur e, on peut dans le cas idéal (absence de source interne) déduire la conductivité du matériau ou sa résistance thermique en utilisant les formules suivante [64] :

$$\mathbf{R_T = \frac{T_1 - T_2}{\varphi}} \qquad (\mathbf{I.12})$$

$$\mathbf{R_T = \frac{e}{\lambda S}} \qquad (\mathbf{I.13})$$

$$\mathbf{\lambda = \frac{S\,\varphi}{e\,(T_1 - T_2)}} \qquad (\mathbf{I.14})$$

Avec :
R_T : Résistance thermique du matériau ;
T_1-T_2 : Température ;
φ : Flux thermique ;
e : Epaisseur du matériau ;
λ : Conductivité thermique du matériau ;
S : Surface traversée par le flux.

- ✓ Méthodes : La méthode de la plaque chaude gardée et la méthode du flux radial.

Les méthodes en régime quasi établi

Cette deuxième classe de technique se caractérise par la mesure simultanée d'un flux de chaleur de puissance constante P_0 traversant l'échantillon et d'une température variable avec le temps. La quasi-totalité des modèles font l'hypothèse d'un transfert unidirectionnel (dimensions du milieu supposé grand par rapport à celui de la sonde) et

prennent en compte l'élément chauffant, le milieu (de géométrie plane, cylindrique ou sphérique) et l'interface sonde-milieu. La méthode d'identification qui permet d'atteindre un ou plusieurs paramètres s'effectue aux temps longs, ce qui justifie l'appellation de régime quasi établi. La mesure de la variation de la température se fait soit par un couple thermocinétique (méthode du croisillon), soit par la mesure directe de la résistance électrique de l'élément chauffant).

✓ Méthodes : La méthode du fil chaud et la méthode des sondes.

Les méthodes en régime variable

Le principe général des méthodes en régime variable consiste à déduire directement la diffusivité de la chaleur dans un matériau soumis à une perturbation thermique contrôlée. La détection s'effectue soit par la mesure de :

- l'émission radiative d'équilibre statique du matériau avec un radiomètre ;
- la modification que celle ci provoque sur le gaz qui environne l'échantillon ;
- la température de surface de l'échantillon.

Ces divers phénomènes peuvent être détectés en face avant ou arrière à l'aide de radiomètre infrarouge ou thermocouple et ceci pour des modes d'excitation variés (excitation périodique, impulsionnelle ou aléatoire).

✓ Méthodes :

- La méthode par effet mirage ;
- La photo réflexion ;
- La radiométrie infrarouge ;
- La méthode flash.

I.6. Conclusion

D'après l'étude bibliographique, on peut conclure que :

Les bétons de sable pourraient remplacer les bétons ordinaires dans certains domaines d'applications. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès. Pour avoir une maniabilité convenable, l'utilisation des adjuvants s'impose alors pour réduire le dosage en eau et augmenter la résistance. De même il faut veiller à ce que le béton soit le plus compact possible pour qu'il puisse manifester de bonnes performances. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granulaire et allant au plus gros diamètre possible. Pour combler les vides inter-granulaires, il faut prévoir des fines de bonne nature, de finesse élevée et avec des dosages convenables. L'augmentation de la compacité par ajout diminue la maniabilité, d'où la nécessité de trouver un compromis entre la maniabilité et sa compacité.

Les bétons légers peuvent répondre à pratiquement toutes les applications qui revenaient aux bétons normaux ; ils ont des caractéristiques distinctes comme l'allègement et la bonne isolation thermique et acoustique.

Les composites à fibres naturelles présentent d'immenses possibilités en tant que matériaux de rechange notamment comme des substituts du bois. Ces végétaux représentent un intérêt particulier pour les pays en voie de développement comme l'Algérie vue leur abondance, leur faible coût, l'économie d'énergie et les applications comme les matériaux de substitution.

CHAPITRE II :

Caractéristiques des Matériaux et Techniques Expérimentales Utilisées

II.1. Introduction

Le comportement rhéologique, mécanique, physique et microstructural du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers matériaux. L'emploi judicieux de ses matériaux dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés : physiques et chimiques, et qui permet de faire un choix répondant à leur destination.

Les matériaux étudiés sont des bétons de sable à base de paille d'orge. Ils sont destinés à être utilisés comme des matériaux de construction isolant porteurs.

Nous présenterons dans ce chapitre, en premier lieu, les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés durant ce projet de recherche (sables, ciment, filler calcaire, pouzzolane, chaux hydraulique, superplastifiant et paille d'orge). Ensuite, nous exposons les différents essais expérimentaux utilisés pour caractériser les mélanges à l'état frais et durci.

II.2. Caractérisation des matériaux premiers

II.2.1. Le sable

Le sable (SAD) utilisé dans cette étude est un mélange de deux sables, Le premier est un sable dunaire (SD) provenant de la région Nord de la ville de Laghouat (Oasis Nord) qui présente un diamètre de grain maximum d'environ 0,63 mm; la proportion de grains plus petit que 0,08 mm est au-dessous de 5%. Le deuxième est un sable alluvionnaire (SA) provenant d'oued M'zi (région de Laghouat) et ayant un diamètre maximum de 5 mm.
Les proportions de ce mélange sont préparées selon un rapport massique déterminé en corrigeant la courbe granulométrique du sable alluvionnaire, dans sa partie fine, par ajout de sable de dune. Ce rapport est défini comme suit [27] :

$$\frac{S_A}{S_D} = 1,7 \qquad (II.1.)$$

Où :
SA : fraction massique du sable alluvionnaire dont le diamètre maximum de 5 mm ;
SD : fraction massique du sable de dune dont le diamètre maximum d'environ 0,63 mm.

II.2.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme **NF P 18 560**.
Les résultats de l'analyse granulométrique des deux sables ainsi que leur mélange sont présentés par les courbes granulométriques de la **Figure II.1.**

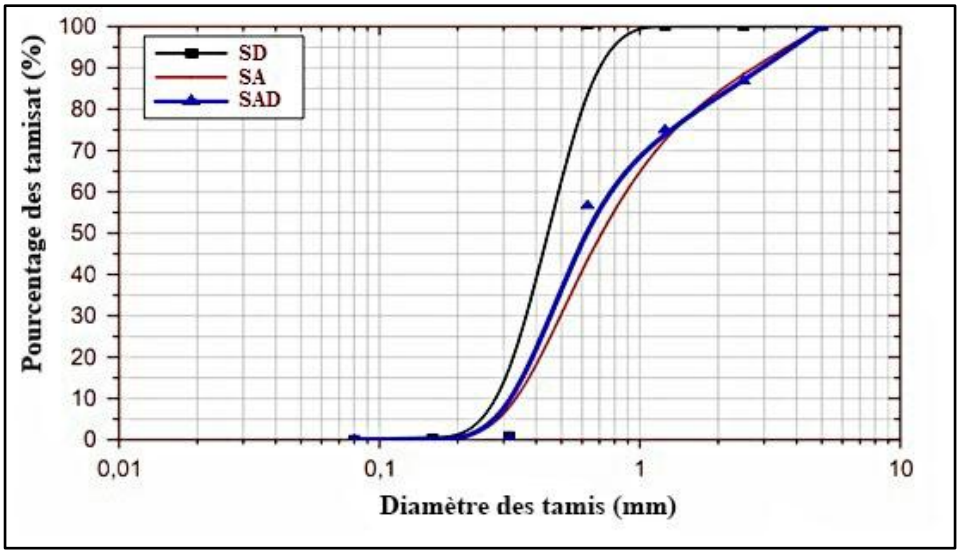


Figure II.1. Courbe granulométrique des sables utilisés.

Les courbes granulométriques des deux sables sont toutes continues et montrent clairement que la granulométrie du sable de dune est serrée et constitué de grains fins, par contre le sable alluvionnaire est un sable relativement grossier et présentant une granulométrie étalée ; la granulométrie du sable alluvionnaire-dunaire parait mieux inscrite dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires.

II.2.1.2. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont comme suit :

1) Masses volumiques

Les masses volumiques des granulats ne constituent pas en soi des indices de la qualité de ceux-ci ni de celle du béton qui les contient, elles sont plutôt nécessaires au calcul du dosage du béton.

- **Masse volumique apparente**

C'est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

$$\gamma = \frac{M}{V} \qquad (II.2.)$$

Où

M : est la masse du matériau ;
V : est le volume total du matériau.

- **Masse volumique absolue**

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \qquad (II.3.)$$

Où

Ms : est la masse du matériau ;
Vs : est le volume total du matériau solide.

2) Module de finesse

Il est défini comme étant la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis de la série 0,16. 0,315. 0,63. 1,25. 3,5 et 5 mm, à noter que plus le module de finesse est élevé plus le sable est grossier.

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus (en \%) sur les tamis } 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 \text{ et } 5}{100} \qquad (II.4.)$$

3) Compacité et porosité

La compacité (C_p) est le rapport du volume de la matière solide au volume total. Elle est définie par :

$$C_p = \frac{V_s}{V} = 1 - p = \frac{\gamma}{\gamma_s} \qquad (II.5.)$$

Où p : est la porosité.

4) Equivalent de sable

Cet essai, référé par la norme **NF P18 598**, est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants :

- la hauteur h1 : sable propre + éléments fins ;
- la hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$\mathbf{ES} = \left(\frac{\mathbf{h2}}{\mathbf{h1}}\right) \times \mathbf{100} \qquad (\mathbf{II.6.})$$

Selon que la hauteur **h2** est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine : $\mathbf{ES_V}$ (équivalent de sable visuel) et $\mathbf{ES_P}$ (équivalent de sable au piston).

II.2.1.3. Synthèse des résultats

Le **Tableau II.1.** regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur les sables utilisés.

Tableau II.1. Caractéristiques physiques des sables SD, SA et SAD.

Caractéristiques	γ (kg/m³)	γ_s (kg/m³)	M_f	C_p	ES_V (%)	ES_P (%)	p (%)	D_{max} (mm)
Sable de dune (SD)	1501	2587	1.98	58	90.7	81.4	0.42	0.63
Sable alluvionnaire (SA)	1552	2425	2.89	64	93.5	82.3	0.36	5
Sable mélange (SAD)	1590	2485	2.81	66	93.2	80.3	0.34	5

Le tableau ci-dessus montre que les trois sables utilisés sont très propres si l'on se réfère aux valeurs de l'équivalent de sable préconisées par la norme **NF P18 598**. Nous constatons aussi que les modules de finesse des deux sables (SA) et (SAD) confirment l'existence de gros grains, rappelons ici que pour un sable à béton traditionnel, ce module est compris entre 2,20 et 2,80 [12] ; mais le sable dunaire a un même module de finesse plus ou moins faible, ce qui montre que le sable dunaire est riche en éléments fins. On remarque que le diamètre maximal est plus petit dans le cas des granulats d'un béton de sable par rapport les granulats d'un béton traditionnel (gravier +sable), d'où le pourcentage des vides est assez élevé, ce qui impose l'utilisation l'ajout des fillers pour éviter un surdosage en ciment et combler les vides [22] ; néanmoins le sable SAD nécessite un dosage en fillers plus faible, car c'est le type de sable le plus dense et le plus compact, ce qui va donner probablement un béton de sable plus résistant.

II.2.1.4. Caractéristiques chimiques

Ces analyses concernent la détermination des proportions de matières organiques, sulfates, sulfures et chlorures contenus dans les sables, ces éléments présents au-delà de certain seuil peuvent être nuisibles aux propriétés du béton étudié.

Les résultats des analyses chimiques des sables alluvionnaire et dunaire sont menées par microscope électronique à balayage à l'I.U.T. d'Amiens en France [6]. Cette analyse, révèle la présence prépondérante de l'espèce SiO_2 (silice), qui se compose d'atomes de Si et O puisque le pourcentage atomique important de Si est important, ce qui montre que ces deux types de sables sont essentiellement de nature siliceuse **(Figures II.2. et Figure II.3.)**. En plus, on note la présence de quelques traces d'espèces calciques et magnésiennes.

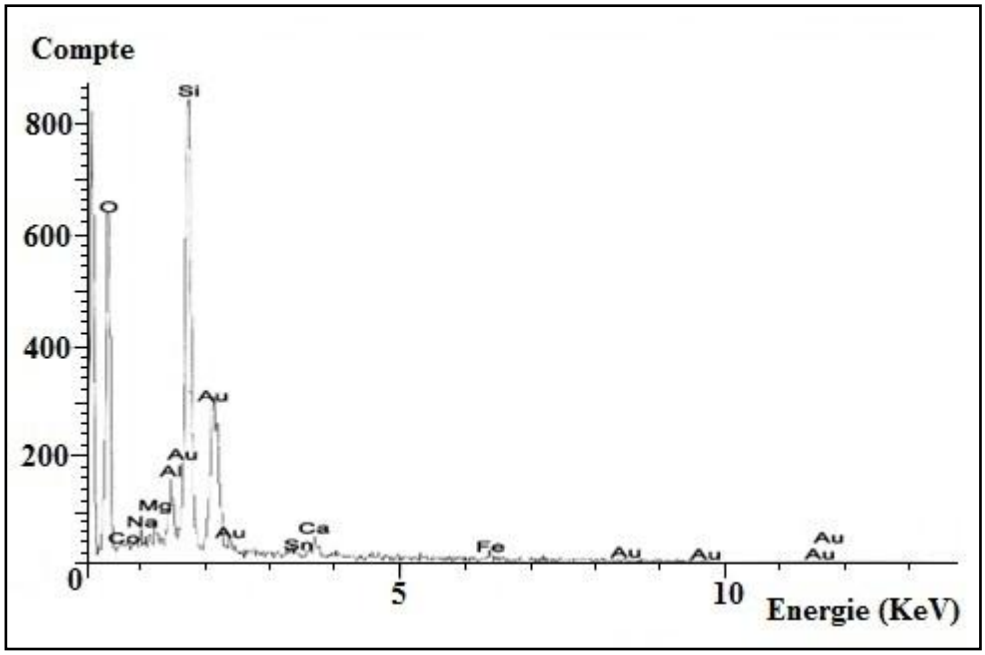


Figure II.2. Analyse chimique du sable alluvionnaire [6].

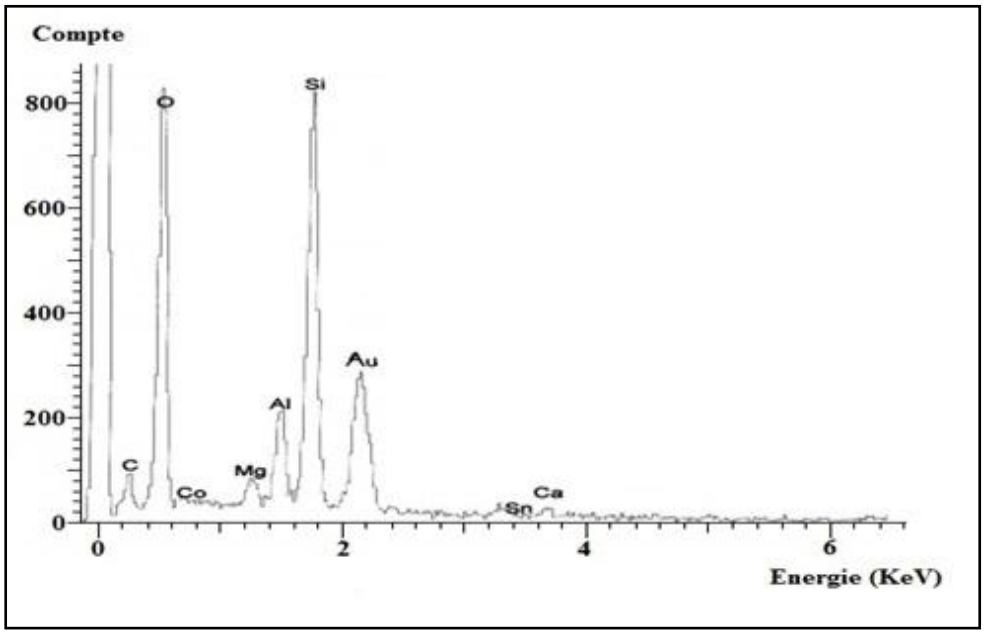


Figure II.3. Analyse chimique du sable de dune [6].

II.2.2. Le ciment

Le type de ciment employé dans l'ensemble des expérimentations est le ciment Portland au calcaire CPJ CEM/II A-L 42,5 R selon la norme **NP EN 197-1**. Le ciment a été fourni par CIMPOR, ciment de Portugal SGPS, S. A. Lisbonne.
Les principales propriétés physiques et caractéristiques chimiques du ciment utilisé sont présentées respectivement dans les **Tableaux II.2., II.3.** Les analyses chimiques sont réalisées au niveau de laboratoire L.T.P.S de Ghardaïa.

Tableau II.2. Propriétés physiques du ciment utilisé.

Masse volumique apparente (kg/m^3)	Densité spécifique (kg/m^3)	Blaine surface spécifique (m^2/kg)
1030	3030	444.9

Tableau II.3. Analyse chimique du ciment utilisé.

Elément	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	Cl	Na_2O	Free CaO	PAF	Ins
Quantité (%)	16.93	62.23	1.03	5.26	2.82	2.89	0.65	0.02	0.04	1.78	7.83	1.61

La **Figure II.4.** représente l'analyse chimique de ciment utilisé par essai de diffractométrie aux rayons X [56].

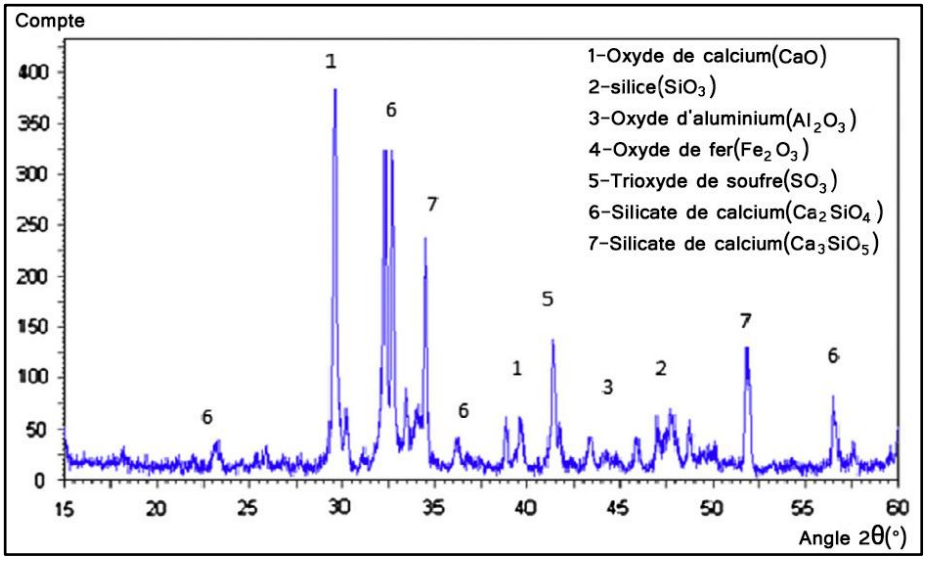


Figure II.4. Analyse de ciment par diffractométrie aux rayons X [56].

On remarque que les éléments (CaO, Ca_2SiO_4, Ca_3SiO_5) se sont trouvés en grand pourcentage dans la composition chimique du ciment par rapport les autres éléments. Tous les résultats obtenus sont dans l'intervalle des pourcentages recommandés pour ce type de ciment (**Tableau II.4.**, **II.5.**) [65].

Tableau II.4. Constituants de ciment CEM II / A-L 42,5R [65].

	Constituant	
Ciment	65% ≤ clinker ≤ 79%	6% ≤ calcaire ≤ 20%

Tableau II.5. Caractérisation chimique de la CEM II / AL 42,5R [65].

Propriétés	**Méthode d'essai**	**Valeur spécifiée**
Sulfates (SO_3)	NP EN 196-2	≤ 4,00%
Chlorures (CI)	NP EN 196-21	≤ 0,10%

Selon le fabricant, le béton à base de ciment de ce type présente les caractéristiques particulières suivantes :

- Le développement rapide de la résistance mécanique ;
- Haute résistance à tous les âges ;
- Grande gamme d'utilisations et un bon comportement, même dans les milieux modérément agressif ;
- Grande ouvrabilité.

II.2.3. Filler calcaire

On utilise le filler pour compléter la courbe granulométrique du sable dans la partie fine et à combler les vides. Les fillers utilisés dans notre étude sont de nature calcaire obtenus par tamisage des restes de concassage (au tamis 80 µm) d'une carrière située à la sortie nord de la ville de Laghouat. Rappelons que ce type de fillers est le plus adapté aux bétons de sable et donne les meilleures performances.
Les principales caractéristiques physiques déterminées pour ces fillers sont montrés dans le **Tableau II.6.** :

Tableau II.6. Propriétés physiques du filler utilisé.

Masse volumique apparente (kg/m^3)	**Densité spécifique (kg/m^3)**	**Blaine surface spécifique (m^2/kg)**
1530	2700	280

- **Diffractométrie aux rayons X**

L'analyse du filler calcaire par l'essai de diffractométrie aux rayons X en niveau l'université LAGHOUAT est représenté dans la **Figure II.5.** [56].

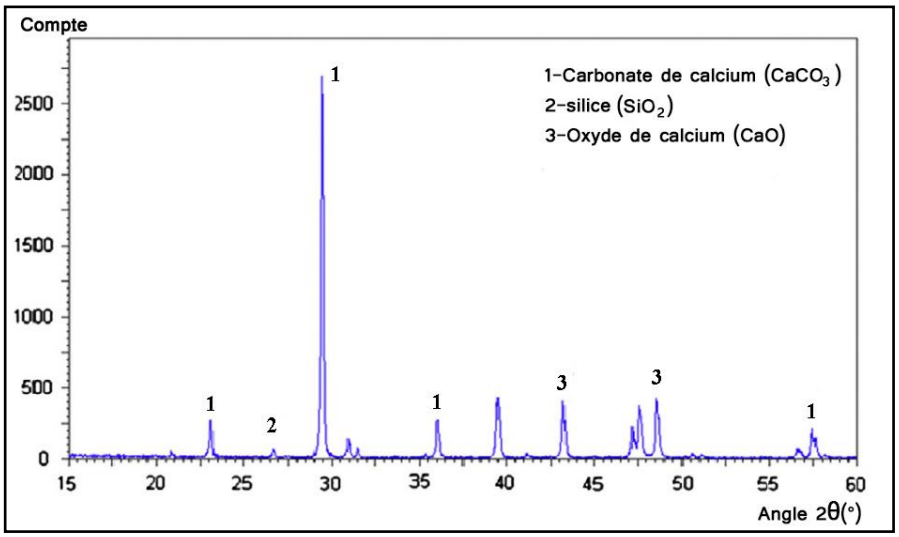


Figure II.5. Analyse de filler calcaire par diffractométrie aux rayons X [56].

D'après les résultats de l'essai diffractométrie aux rayons X, nous constatons la présence de l'espèce $CaCO_3$ (carbonate de calcium) avec un pourcentage important, c'est-à-dire que $CaCO_3$ est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques (SiO_2, CaO) sont très faibles par rapport $CaCO_3$ ce qui confirme que les fillers sont de nature purement calcaire [67].

II.2.4. Les ajouts minéraux

La valorisation des matières et déchets locaux génère un intérêt économique important. Pour donner plus d'importance à l'aspect économique en développant un nouveau béton avec un prix inférieur, une partie de ciment a été remplacé par des additions minérales moins cher.

Ces derniers sont le calcaire, la pouzzolane naturelle et la chaux hydraulique. Leurs propriétés physiques sont résumées dans le **Tableau II.7.**

Le pourcentage utilisé des additions minérales est de 10% (1/3 calcaire, 1/3 pouzzolane naturelle et 1/3 chaux hydraulique). Ces matières sont ajoutées par substitution masse de la teneur en ciment.

Tableau II.7. Les propriétés physiques des additions minérales utilisées.

Propriétés physiques	Le calcaire	La pouzzolane	La chaux
Blaine surface spécifique (m^2/kg)	280	388	650
Densité spécifique (kg/m^3)	2700	2850	2750
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1530	1005	666

II.2.4.1. Le calcaire

L'addition de calcaire est un ajout inerte qui est le même produit utilisé comme fillers calcaire (**Figure II.5.**)

II.2.4.2. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est un ajout actif d'origine volcanique provenant de la région sud de la ville de Beni-Saf en Algérie. Ce dernier est surtout une roche volcanique effusive de la composition feldspath (siliceux). Après broyage, en utilisant la machine Los Angeles, le produit est tamisé à travers un tamis de 80 µm. Par essai de diffractométrie aux rayons X, l'analyse chimique est représentée sur la **Figure II.6.** [56].

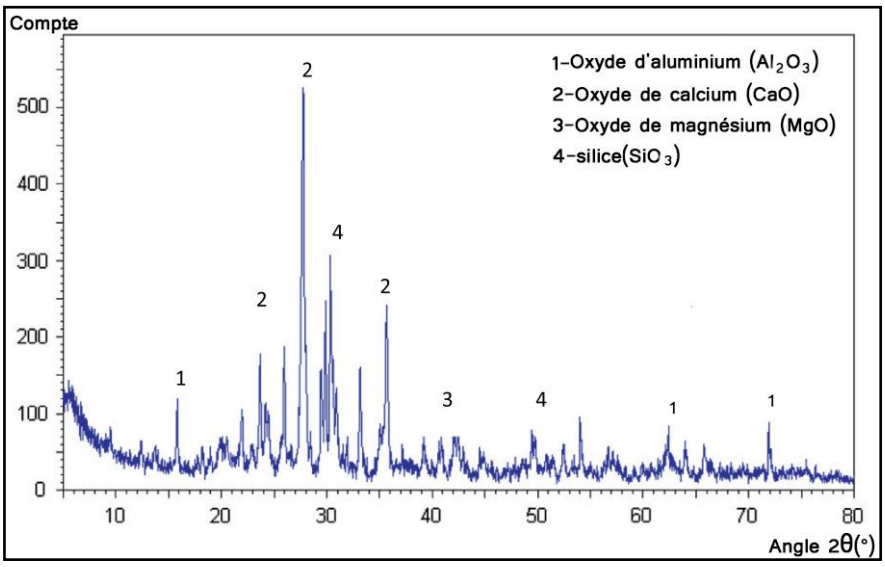


Figure II.6. Analyse de la pouzzolane naturelle par diffractométrie aux rayons X [56].

On remarque que la pouzzolane contient une forte concentration d'éléments de base CaO, et une concentration moins forte pour l'élément SiO_2.

II.2.4.3. La chaux hydraulique

Le troisième ajout utilisé est une chaux hydraulique algérienne (Saïda, société SNMC). Elle est fabriquée avec le procédé à four rotatif. Cette fabrication tient compte des préconisations de la norme **DIN 106** présentés dans le **Tableau II.8.** ci-après :

Tableau II.8. Recommandations de la chaux selon la norme **DIN 106**, [68].

Teneur en Cao actif	CO_2	MgO	Perte à feu	Refus sur tamis	Réactivité T 80
≥ 85 %	≤ 3 %	≤ 1,2 %	≤ 4 %	0,2 mm ≤ 0,7 % 0,09 mm ≤ 10 %	≤ 3 min

Généralement, la chaux est un ajout actif. Bien qu'il soit soluble dans l'eau, il a été soumis à tamisage sur un tamis de 80 µm pour suivre la même procédure utilisée pour la pouzzolane et le calcaire. Par essai de diffractométrie aux rayons X, l'analyse chimique est représentée sur la **Figure II.7.** [56].

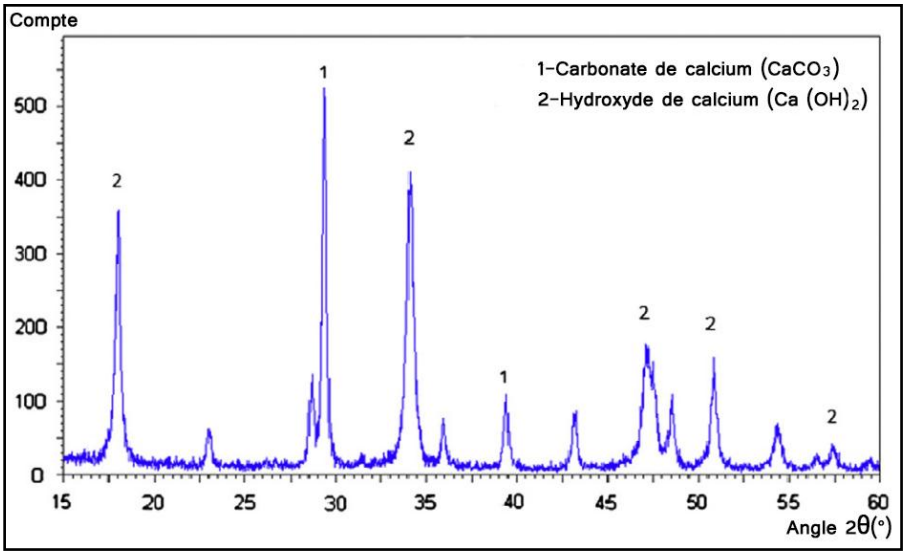


Figure II.7. Analyse de la chaux hydraulique par diffractométrie aux rayons X [56].

La figure ci-dessus montre que la chaux contient une forte concentration d'élément de base CaO, ce qui donne les éléments $CaCO_3$ et $Ca(OH)_2$.

II.2.5. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage pour les bétons de sable, comme tous les bétons ordinaires, doit être potable, dépourvue des sels minéraux. L'eau de gâchage (l'eau de robinet) utilisée dans cette étude provenant du château d'eau de la zone de M'hafir, qui alimente l'université de Laghouat et par conséquent le laboratoire du département de génie civil. L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme **NF P18 303**. Notons que la quantité d'eau est légèrement supérieure à celle utilisée pour le béton traditionnel.

II.2.6. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant algérien du type « MEDAPLAST-SP40 » produit par la société « GRANITEX », Oued Smar (Wilaya d'Alger). C'est une solution liquide se diluant facilement dans l'eau de gâchage et d'une couleur marron, conforme à la norme **EN 934-2**. Le dosage utilisé est 2% du poids de ciment [66]. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. Les caractéristiques de ce superplastifiant sont présentées dans le **Tableau II.9.** [70].

Tableau II.9. Caractéristiques du superplastifiant.

Type	**MEDAPLAST-SP40**
Aspect	Liquide
Couleur	Marron
Densité	1,20 ± 0,01
PH	8,2
Teneur en chlore	<1g/l

II.2.7. La paille d'orge

La paille est la partie de la tige de certaines graminées, dites céréales à paille (blé, orge, avoine, seigle, riz), coupée lors de la moisson. Elle est employée comme matériau de construction depuis des temps immémoriaux.
La paille d'orge utilisée dans notre étude est une récolte locale de l'année 2014 ; ce nouveau produit est introduit dans la matrice de béton de sable, dans le but de profiter de certaines de ses caractéristiques physiques (allègement, isolation thermique, isolation acoustique, etc.).

II.2.7.1. Caractéristiques physiques

1) Densité apparente

La densité apparente de la paille d'orge (d_a) est le rapport entre le matériau sec (le poids P) et son volume apparent (V) ; selon la norme **NF ISO 5017**. Le poids prélevé est évalué par pesée au laboratoire après séchage à 49°C pendant 24 heures en utilisant une balance de précision. La densité apparente est déduite en fonction des deux variables mesurées.

$$\mathbf{d_a = \frac{P}{V}} \qquad \textbf{(II. 7.)}$$

La valeur trouvée est alors 59,8 kg/m^3, dans des conditions pareilles : température de laboratoire T= 20 ± 5°C et humidité relative HR= 50 ± 10%.

2) Capacité d'absorption d'eau

Cette caractéristique permet la connaissance des qualités d'absorption d'eau de mouillage des pailles d'orge autrement dit de leurs avidités en eau.
Le coefficient d'absorption d'eau C_{ab} a été déterminé selon les prescriptions de la norme **NF P18 554** :

$$C_{ab} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \qquad (II.8.)$$

Avec :

M_s : masse des pailles sec (kg) ;
M_h : masse des pailles après immersion (surface sèche) pendant au moins 48 h (kg).
Les conditions de l'essai sont : température de laboratoire T= 20 ± 5°C et humidité relative HR= 50 ± 10%.

Le coefficient d'absorption d'eau, qui est caractérisée par une cinétique lente, est d'environ 3,30.

II.2.7.2. Caractéristiques chimiques

La composition chimique de la paille d'orge est principalement composé de cellulose, hémicelluloses et de la lignine. Leurs propriétés chimiques sont déterminées par la méthode de Van Soest [58] (**Tableau II.10.).**

Tableau II.10. Teneurs en cellulose, hémicelluloses et lignine de paille d'orge [58].

Biomasse lignocellulosique	Cellulose (kg.100 kg^{-1}MS)	Hémicelluloses (kg.100 kg^{-1}MS)	Lignine (kg.100 kg^{-1}MS)
Paille d'orge	40,4 ± 7,8	25,6 ± 5,1	12,7 ± 3,6

II.3. Techniques expérimentales

II.3.1. Malaxage et conservation

Afin de mieux homogénéiser le mélange, ce qui contribue à une bonne qualité du béton et par conséquent le bon contrôle des différentes propriétés du produit fini, le mélange est effectué par un mélangeur de type " CONTROLS ", selon le mode opératoire suivant : Un mélange à sec de ciment et minéraux ajouts pendant 1 min à une vitesse lente, puis le sable et les fillers calcaires sont ajoutés à sec pendant trois autres minutes à une vitesse lente (**Photos n°5** de l'annexe).
Une fois que le mélange est devenu parfaitement homogène, les pailles d'orge sont introduites à l'état saturé, dont la quantité d'eau d'absorption est égale « (la teneur de 15 kg/m^3 de pailles d'orge) × (le coefficient d'absorption d'eau de la paille d'orge) », tout en continuant à mélanger pendant 3 minutes à vitesse lente.
Enfin l'eau de gâchage est ajoutée progressivement au mélange, sans discontinuité, en vue d'assurer l'homogénéisation du mélange pendant 3 minutes à vitesse lente [66].

Après malaxage, le matériau est introduit dans des moules de (4×4×16) cm^3 pour les essais de retrait, absorption d'eau et thermiques, et des moules de (7×7×28) cm^3 pour les essais des propriétés mécaniques et la masse volumique. La mise en place du mélange se fait par coulage de presque la moitié du moule avec une légère vibration et une frappe de 30 coups. Ensuite on continue le coulage de la deuxième moitié du moule avec une vibration de 30 coups. L'excès de béton est enlevé par arasement. Les éprouvettes sont démoulées après 24 h et les échantillons sont conservés jusqu'au jour de l'essai, dans la même salle où les conditions climatiques intérieures de la salle de laboratoire est plus proche des conditions climatiques des chantiers locaux, à savoir la température est (20 °C ± 5°C), tandis que l'humidité relative de (50% ± 10%).

II.3.2. Essai de traction

L'essai de traction de la paille d'orge a été déterminé par un appareil d'essai universel de type « Shimadzu » à une vitesse de 2 mm/min ; selon la norme **ISO 5979** (**Figure II.8.**). La longueur de la paille d'orge utilisé est 12 cm, à raison de quatre pailles dans chacun composition, cet essai est réalisé au laboratoire EPROAD-IMap, UPJV d'Amiens en France.



Figure II.8. Essai de mesure de traction.

II.3.3. Caractérisation du béton frais

- **La maniabilité**

La maniabilité d'un béton est une qualité aussi importante que sa compacité. Le choix d'un moyen de mesure de la maniabilité est la plupart du temps dicté par la particularité du mélange (c'est-à-dire le diamètre maximal des grains).
Pour apprécier cette caractéristique nous avons utilisé le cône d'Abrams pour déterminer la maniabilité du béton de sable.
L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est le plus couramment utilisé et le plus répandu sur les chantiers et les laboratoires du monde entier. L'appareillage est complètement décrit dans la norme **NF P18 451**.

Les principes essentiels de l'essai (**Figure II.9.**) :

- On remplit le cône en béton ;
- Le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige (25 coups pour chaque couche);
- On soulève ensuite le moule avec précaution.

Après démoulage, le béton n'étant plus maintenu, s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton, dans la minute qui suit le démoulage et arrondi au centimètre le plus proche.

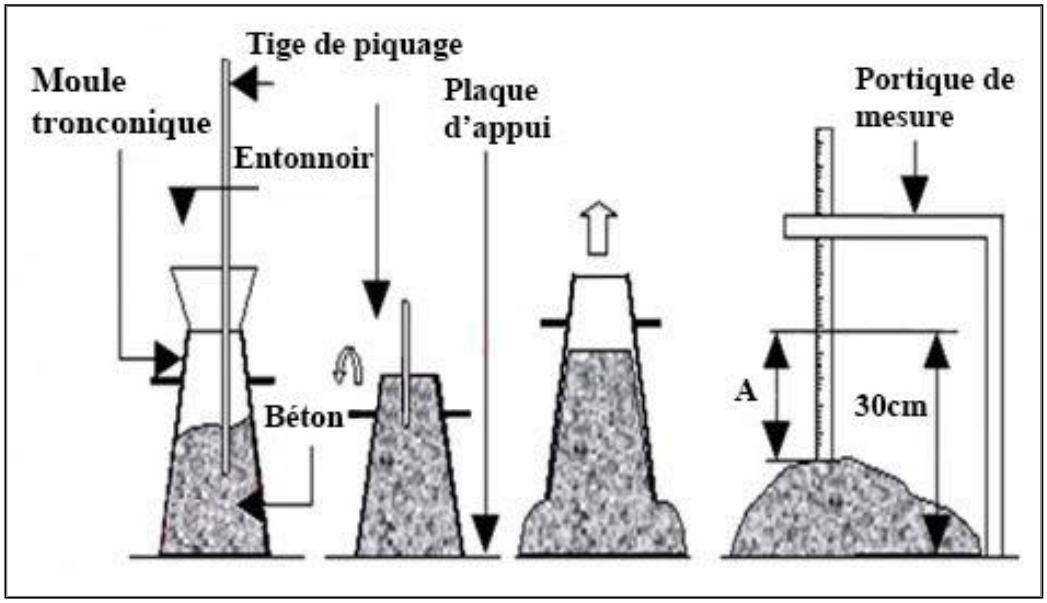


Figure II.9. Dispositif de mesure d'affaissement.

Afin de définir la classe d'affaissement, la norme **NF P18 305** définit les classes d'affaissement indiquées sur le **Tableau II.11.**
Plus l'affaissement est important et plus le béton est mou ou fluide.

Tableau II.11. Classes de consistance du béton [69].

Affaissement (cm)	Classe d'affaissement
1 cm ≤ A ≤ 4 cm	Ferme
5 cm ≤ A ≤ 9 cm	Plastique
10 cm ≤ A ≤ 15 cm	Très Plastique
≥ 16 cm	Fluide

II.3.4. Caractérisation du béton durci

II.3.4.1. Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient **NF EN 12390-7**. Elle est déterminée par pesée de l'échantillon et mesure de son volume.

$$\gamma = \frac{M}{V} \qquad (II.9.)$$

Avec :

γ : la masse volumique, en kilogrammes par mètre cube ;
M : la masse de l'échantillon, en kilogrammes ;
V : le volume de l'échantillon, en mètres cubes.

II.3.4.2. Essai de rupture par flexion

La résistance à la flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7×7×28) cm^3 à raison de trois éprouvettes par composition. Les éprouvettes sont soumises à un essai de flexion trois (3) points selon les normes **NF EN 12390-5**, (**Figure II.10.**), l'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion du type " CONTROLS " ayant une capacité maximale 100 KN, la vitesse de chargement a été réglée à 5 kg par seconde jusqu'à la rupture (**Photos n°2** de l'annexe).
Si F_t est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion, le moment de rupture vaut $F_t.L/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_t = \frac{1.5\ F_t L}{b^3} \qquad (II.20.)$$

Avec :

L : la longueur entre les axes des deux appuis ;
b : la largeur de la section transversale de l'éprouvette.

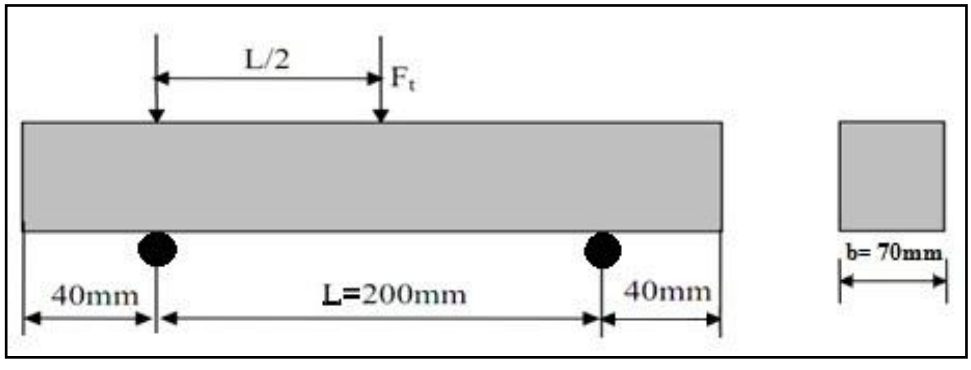


Figure II.10. Schémas de l'essai de flexion.

II.3.4.3. Essai de rupture par compression

Les deux parties de les éprouvettes résultant de l'essai de traction par flexion sont soumises l'une après l'autre à l'essai de résistance à la compression **(Figure II.11.)**. Cet essai a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique du type « CONTROLS » à double quadrant ayant une capacité maximale de 2000 KN, les deux parties ont été centrées entre les deux plateaux sur les faces latérales de moulage. Après la mise en marche de l'appareil, la charge augmente automatiquement à une vitesse constante de 0,5 MPa par seconde, permettant aux plateaux de comprimer l'éprouvette jusqu'à la rupture. L'essai a été réalisé conformément à la norme **NF P18 406** (**Photos n°3** de l'annexe).
La valeur de la résistance à la compression est donnée par :

$$\mathbf{R_c = \frac{F_c}{A}} \qquad (\mathbf{II.21.})$$

Avec :

F_c : La force de compression ;
A : La surface transversale de l'éprouvette.

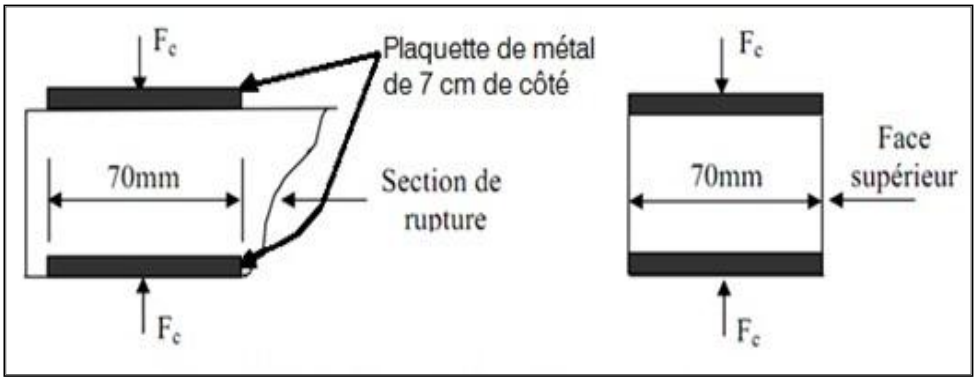


Figure II.11. Schémas de l'essai de compression.

II.3.4.4. Variations dimensionnelles

La mesure de retrait s'effectue sur des éprouvettes (4×4×16) cm^3, équipée de plots métalliques à chaque extrémité conformément à la norme **NF P15 433** (**Photos n°4** de l'annexe). Après démoulage à 24 heures, ces éprouvettes sont placées verticalement dans l'appareil de mesure entre une bille métallique est un comparateur digital, qui permet le suivi de sa longueur (**Figure II.12.**).
On lit au premier jour la valeur l_0 correspondante à la valeur de référence, la mesure suivante effectuée au temps t étant l(t). Le retrait enregistré au temps t est donc :

$$\mathbf{\Delta l(t) = l(t) - l_0} \qquad (\mathbf{II.22.})$$

Le retrait relatif est donc :

$$\boldsymbol{\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0} = \frac{l(t) - l_0}{l_0}} \qquad (\mathbf{II.23.})$$

Δl(t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même bloc de moules. Les éprouvettes ont été conservées à l'air libre et les mesures ont été effectuées dans les conditions ambiantes du laboratoire (une température T= 20°C ± 5°C et une humidité relative HR= 50% ± 10%).

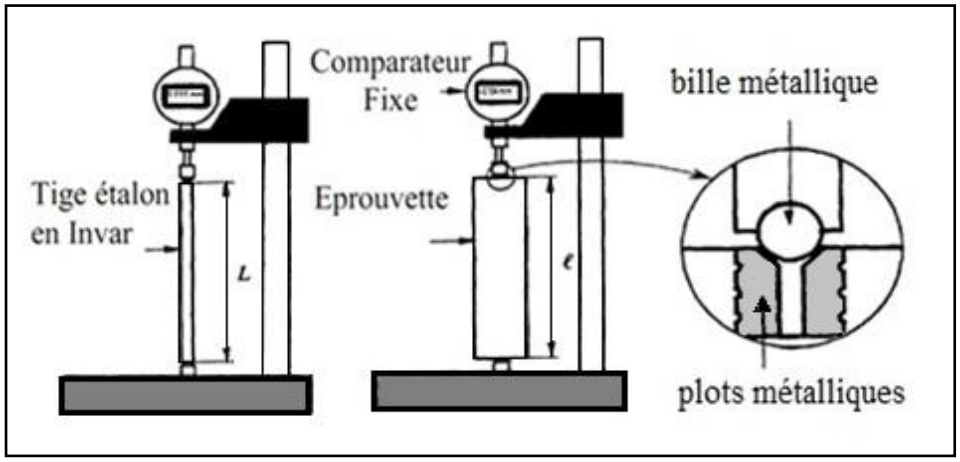


Figure II.12. Dispositif de mesure de retrait.

II.3.4.5. Essai d'absorption d'eau par immersion

L'absorption par immersion consiste à déterminer le poids final après saturation et cela pour calculer le volume des vides (porosité) du béton durci.

Cet essai est effectué selon une méthode simple ; les éprouvettes de béton de sable sont pesées après leur passage à l'étuve à 48°C (48°C pour éviter tout risque de changement dans la structure des pailles d'orge) d'où elles ne sont retirées qu'après stabilisation de leur poids (soit P_S), ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau 20°C± 5°C pendant 24 heures, c'est-à-dire, jusqu'à saturation du matériau, puis retirées et pesées, (soit P_h). Les valeurs sont prises par la moyenne de trois pesées par éprouvettes de chaque composition. La capacité d'absorption est donnée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{A\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100} \qquad (\mathbf{II.24.})$$

II.3.5. Etude macro-structurelle

La structure des bétons étudiés a été effectuée par analyse d'images en utilisant un microscope optique de type « **ZEISS** », des agrandissements élevés jusqu' à 80 (**Figure II.13.**). Les observations au image-microscope ont été effectuées sur de petits surfaces d'échantillons provenant de coupe d'éprouvette (7×7×28) cm^3, l'essai est réalisé au niveau de laboratoire de biologie à l'université de LAGHOUAT.



Figure II.13. Microscope optique « ZEISS ».

Par contre, les sections transversal des pailles traitées soumises à des essais de traction sont évalués par imagerie optique. L'équipement utilisé est lié à un ordinateur qui consiste à observer avec un vidéo microscope « **Controlab** », des grossissements jusqu'à 300 (**Figure II.14.**). Cet essai est réalisé au laboratoire EPROAD-IMap, UPJV d'Amiens en France.

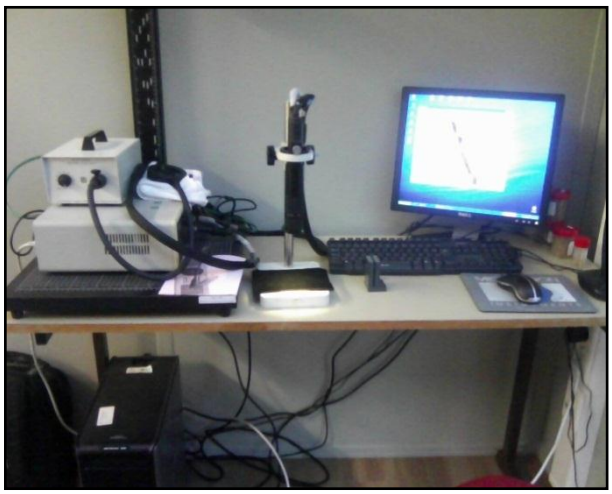


Figure II.14. Microscope électronique « Controlab ».

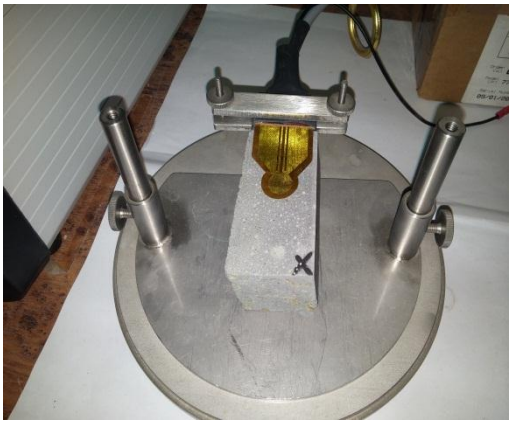
II.3.6. Caractéristiques thermiques

II.3.6.1. Méthode de mesure les paramètres thermiques

De nombreuses méthodes de mesure des caractéristiques thermiques des matériaux s'appuient donc sur la détermination d'un champ de température dans des échantillons de géométrie connue, en imposant des conditions aux limites constantes ou variables avec le temps. Les essais de la caractérisation thermiques dans notre étude sont réalisés à l'aide d'une sonde Hot Disk TPS 500 (TPS: Transient Plane Source) qui est une technique proposée pour des études de transport thermique de matériaux solides [77] et [78]. La méthode est pratique et très rapide car aucune forme particulière n'est requise pour l'échantillon testé et la taille de cet échantillon est relativement limitée. En plus de sa rapidité et de la facilité d'utilisation, le principal avantage de cette technique est la possibilité de la détermination simultanée de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique ainsi que la capacité thermique des échantillons à partir d'un seul enregistrement. Les essais ont été réalisés au laboratoire de Génie civil de l'université de LAGHOUAT.

II.3.6.2. Principe de la méthode « Hot Disk »

La méthode est basée sur l'utilisation d'un capteur plan transitoire dont l'adaptation est l'analyseur de conductivité thermique et diffusivité thermique. La sonde Hot Disk se compose d'un motif conducteur électrique qui se présente sous la forme d'un double spirale en Nickel sérigraphie sur des feuilles minces d'un matériau isolant. Pour effectuer les caractéristiques thermiques, la sonde Hot Disk doit être placée entre deux échantillons. Les mesures ont été faites sur des échantillons de surfaces planes en forme prismatique (4×4×8) cm^3. Le principe de base du système est de fournir au matériau à caractériser une puissance constante pendant un temps défini via la sonde Hot Disk afin de générer une augmentation de température d'un aux plusieurs degrés. C'est également la sonde qui est utilisée pour mesurer l'élévation de température grâce à l'enregistrement de la variation de sa résistance électrique via un pont de Wheastone très précis. La sonde Hot Disk est donc utilisée à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température (**Figure II.15. a, b, c**).



a. Sonde TPS utilisée, système de serrage et le demi-éprouvette de (4x4x16) cm^3.



b. Forme circulaire du capteur TPS.



c. Dispositif expérimental de la technique Hot Disk TPS.

Figure II.15. Procédé de l'essai de la sonde Hot Disk TPS.

II.4. Conclusion

Le mélange de sable alluvionnaire-dunaire est un sable propre, plus dense et plus compact que les deux sables séparés, ce qui va probablement augmenter les performances des bétons étudiées. Les fillers calcaires utilisés sont les mieux adaptés pour remplir les vides inter-granulaires de sable constituant le squelette du béton. La paille d'orge utilisée est hydrophile, et d'une faible masse volumique. Généralement, on peut conclure que les différentes analyses physiques et chimiques menées sur les matériaux premiers nécessaires pour la fabrication des composites étudiés, montrent qu'il n'y a aucun risque qui peut affecter les propriétés des composites.

En deuxième partie de ce chapitre, les techniques expérimentales qui ont été utilisées pour la détermination des différents paramètres étudiés ont été présentées.

CHAPITRE III :

Formulation des Composites et Traitements des Pailles d'Orge

III.1. Introduction

Le matériau de base utilisé dans notre recherche est la « paille d'orge », qui a déjà été étudié sans aucun traitement dans les travaux de **B. Belhadj et al.** pour l'allègement des bétons de sable. La composition optimale du composite ainsi étudié (béton de sable allégé par ajout de la paille d'orge non traitée) est pris comme référence [56, 66].
Dans ce chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée à la formulation du béton de sable à base de la paille non traitée et ses propriétés physico-mécaniques. La deuxième partie est caractérisé à une tentative d'application de différents traitements à la paille d'orge avant son utilisation ; certains traitements sont inspirés de la littérature et d'autres sont proposés. La paille traitée est testé enfin afin de sélectionner celle qui s'adapte bien avec le béton de sable et améliore ses caractéristiques physico-mécaniques.

III.2. Formulation des composites

III.2.1. Composites étudiés

Les composites étudiés dans notre recherche sont des bétons de sables alluvionnaire-dunaires, allégés par ajout de pailles d'orge (**Figure III.1.**).

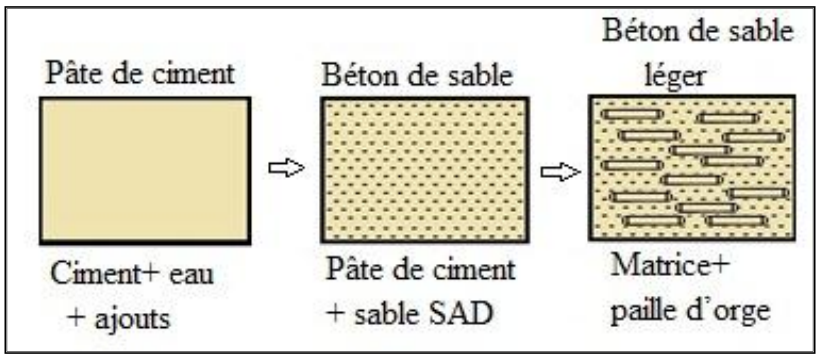


Figure III.1. Elaboration du composite.

Concernant le mélange de pailles (**Figure III.2.),** les proportions de chacun d'entre eux ont été déterminées basant sur une série de tests préliminaires. Il a été constaté que la paille utilisée est constituée de 70% de pailles tubulaires et 30% de pailles cassées et de couvertures [56].



a- Paille tubulaire (3,5 cm)



b- Paille cassée (3,5 cm)

Figure III.2. Aspect général de la paille d'orge.

III.2.2. Optimisation de la matrice

La matrice du composite étudié est constituée de béton de sable. Les travaux précédents de **M. Bederina et al.** [27] qui ont utilisé les mêmes matériaux de base utilisés dans le présent travail, on donne la composition optimale de la matrice (béton de sable sans paille d'orge). Cette composition de base est pris comme référence.
Par ailleurs, la composition optimale de béton de sable avec de matériau lignocellulosique (paille d'orge), est inspirée des travaux précédents réalisés par **B. Belhadj et al.** [66]. Le détail de cette composition est donné dans le **Tableau III.1**.

Tableau III.1. Composition de béton de sable à base de paille d'orge [66].

Matériaux	Sable (SAD) (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	Ajouts minéraux (kg/m^3)	Filler calcaire (kg/m^3)	Paille d'orge (kg/m^3)	Eau de gâchage (l/m^3)	Super-plastifiant* (%)
Béton de sable	1245	315	35	135	15	180	2

(* Le pourcentage de l'adjuvant est calculé, en masse, par rapport à la masse de ciment)

III.2.3. Propriétés physico-mécaniques des bétons de sable à base de pailles d'orge non traitées

Différentes études ont montré l'effet de la longueur des fibres sur le comportement des bétons. D'autre part, il faut aussi veiller à ce que la longueur choisie soit significative vis-à-vis des dimensions de l'éprouvette. C'est pour cette raison que le choix de la longueur de la paille dans notre étude n'a pas été fait au hasard ; En fait, il a été inspiré des travaux de **Belhadj et al. :** les longueurs de paille envisagées sont 3,5 cm pour les moules

prismatiques (7×7×28) cm^3 et 2 cm pour moules prismatiques (4×4×16) cm^3. Le diamètre des pailles d'orge utilisées est compris entre 1 à 4 mm, ainsi que la forme et la couverture de la paille utilisée sont présentées dans la **Figure III.3.** avec une échelle d'agrandissement G= 50 [56].

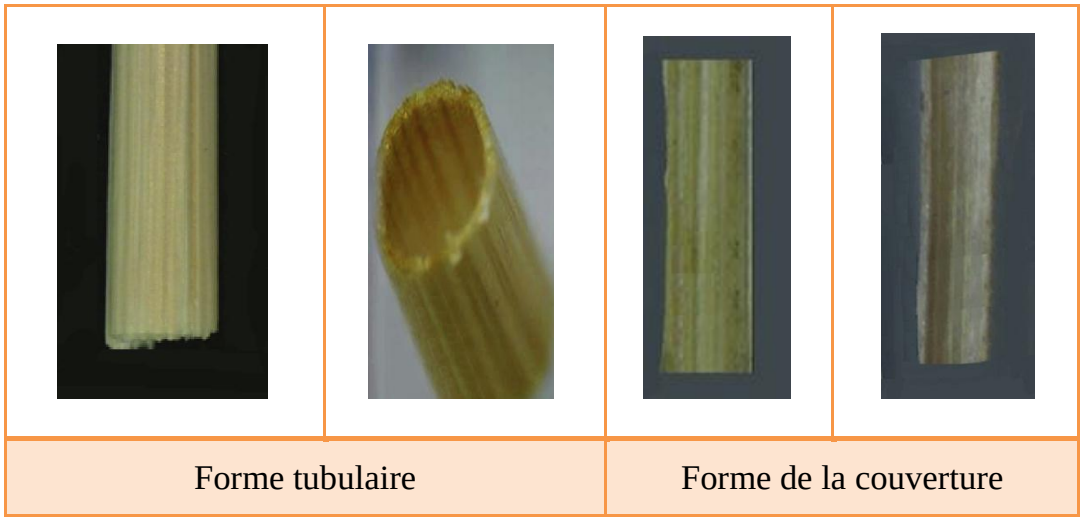


Figure III.3. Aspect général des pailles d'orge utilisées.

La paille d'orge a une forme creuse, on compte de 5 à 6 nœuds sur la plante à maturité, les entre-noeuds représentent une grande proportion de la masse de la paille, on remarque que dans les deux cas de paille (tubulaire, couverture), la nature de la paille est caractérisée par un aspect de surface lisse à l'extérieur, tandis que l'intérieur est moins lisse.

Les résultats des propriétés physico-mécaniques et le retrait de béton de sable à base de paille d'orge non traitée, sont résumés ci-dessous dans le **Tableau III.2.**

Tableau III.2. Les différentes propriétés physico-mécaniques et le retrait de béton de sable pour paille d'orge non traitée [56, 66].

2.a. Les propriétés physiques.

Propriétés	**Affaissement (cm)**	**Masse volumique (kg/m^3)**	**Porosité**
Béton de sable	5	1895,00	10,80

2.b. Les propriétés mécaniques et le retrait.

Propriétés	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	Retrait (mm/m)
Béton de sable	4,00	13,00	0,830

Après les résultats, on peut dire que :

- En raison de paille d'orge, nous constatons que la masse volumique du béton de sable n'est pas élevée et se situe dans le domaine du béton léger.
- Le béton de sable a une bonne maniabilité (la consistance est plastique), avec le taux d'absorption d'eau faible, cela permettrait d'améliorer la durabilité.
- D'autre part, généralement les propriétés mécaniques de béton sont faibles surtout la résistance à la compression par rapport au béton de sable sans paille d'orge, elle est réduite à 38,09% [66].
- Il est à noter que, dans le cas des bétons de bois, la valeur de retrait est considérée comme acceptable si elle est inférieure à1mm/m [72].

III.3. Traitements des pailles d'orge

III.3.1. Présentation des types de traitement

III.3.1.1. Types de traitements choisis d'après la bibliographie

A travers les différentes références bibliographiques récentes et relatives aux composites à base des fibres végétales traitées, on a tiré quelques traitements qui ont donné de bons résultats par rapport aux fibres non traitées, parmi eux on trouve des traitements chimiques, des traitements par enrobage avec un liant et des traitements par imprégnation de certains produits liquides, etc. [5, 71-76, 79].

Dans cette partie d'étude, sept traitements qui ont donné des résultats satisfaisants sur des différentes caractéristiques soit physiques, mécaniques ou thermiques, ont été étudiés. Le détail de ces traitements est donné ci-dessous :

1) Lait de ciment

Ce traitement consiste à enrober superficiellement les pailles d'orge afin de pouvoir les isoler des agents extérieurs. Le ciment utilisé est le même ciment de la composition du béton étudié. On convient de noter que plusieurs auteurs ont pu montrer l'efficacité le genre de traitement [71, 72, 76].

2) Lait de chaux hydraulique

C'est un lait préparé en mélangeant un autre liant qui est la chaux hydraulique avec de l'eau. La quantité d'eau nécessaire pour la préparation du lait a été optimisée après avoir fait plusieurs essais préliminaires. La chaux utilisée est la même chaux de la composition du béton. L'enrobage avec ce type de lait applique, en fait, une mince couche superficielle sur la paille d'orge [71, 76, 75].

3) Lait mélange ciment - chaux

Ce type de lait est la combinaison des deux laits précédents ; d'après les recherches récentes, ce lait a donné de bons résultats. Cette combinaison est sous forme d'ajout inspiré de la norme **NF P15-310** [76].

4) Bitume

Le traitement consiste à enrober les fibres de paille d'orge par du bitume chauffé au préalable [79]. Le bitume, utilisé à l'état liquide, est de classe 400/600 ; il est fabriqué industriellement après distillation de certains pétroles bruts selon la norme **XP T 65-002**. Il est composé d'un mélange d'hydrocarbures et a une couleur noir.

5) Huile de vidange

L'huile utilisée dans ce traitement provient des déchets issus des moteurs de voitures, qui sont classés comme déchets industriels. Il se présente sous forme de liquide avec une couleur noire. Le choix d'utilisation de ce type d'huile entre dans le cadre du recyclage des déchets [71].

6) Huile de lin

Le traitement à l'huile de lin rend les fibres étanches, les pailles d'orge enrobées n'absorbent pratiquement pas d'eau. Ce traitement permet à la pâte de ciment d'y bien adhérer aux fibres [79, 75]. L'huile de lin utilisé dans notre étude est un liquide et a une couleur jaune doré et il est fabriqué par la Société Ets. EL GOUL- BLIDA.

7) Eau chaude

Ce traitement consiste à immerger la paille d'orge dans l'eau bouillante pendant une période de temps, ce traitement a donné un bon résultat en conductivité thermique [75]. L'eau utilisée est la même eau utilisée pour le gâchage du béton étudié.

III.3.1.2. Nouveaux traitements proposés

Sur la base d'un grand nombre traitements employés par différents et à travers leurs conclusions, d'autres idées de nouveaux traitements sont survenues et par conséquent ont été proposées pour le traitement de notre paille d'orge.

Les traitements proposés sont :

1) Lait mélange ciment - pouzzolane

Ce type de traitement inspiré à partir du lait de ciment - chaux, lait précédemment utilisé, consiste à enrober superficiellement les pailles d'orge par un lait obtenu en mélangeant ciment, pouzzolane et eau. Ces derniers sont les mêmes matériaux utilisés dans la composition du béton.

2) Emulsion de bitume

Les émulsions de bitume fabriquées et distribuées par un grand nombre d'entreprises spécialisées dans la technique routière sont des émulsions directes constituées par du bitume émulsifié dans l'eau à l'aide d'un savon. Ce traitement est inspiré de l'utilisation de bitume dans le traitement précédent ; il est basé sur l'enrobage superficiel de paille d'orge. L'émulsion de bitume utilisé se présente à l'état liquide et a une couleur noire à température T= 25°C.

3) Gasoil

Le gasoil est un carburant pour moteur Diesel. Physiquement, c'est un fioul léger et réglementairement, un carburant issu du raffinage du pétrole. Le traitement est effectué par immersion de la paille d'orge dans une solution de gasoil. Le gasoil provient des stations d'essence locales.

4) Vernis

Dans ce traitement on immerge la paille d'orge dans un vernis transparent à l'état liquide plus ou moins visqueux et à base d'une résine synthétique (vernis modernes).
Le vernis utilisé dans notre recherche est de type « VERINEX », fabriqué par l'entreprise nationale des peintures, LAKHDHRIA, BOUIRA.

5) Laque

Le terme laque désigne également les peintures présentant ces caractéristiques et ayant un aspect généralement brillant et dur. La peinture laque peut être utilisée en intérieur comme en extérieur, appliquée sur dans différents matériaux (bois, armature, mur, etc.). Ce traitement est inspiré de l'utilisation de la laque pour l'enrobage des éléments de bois.
La laque utilisé est de type « GLYLAC 2000 », se présente à l'état liquide, mélangé avec diluant synthétique, d'une couleur blanche, de densité d= 1,101± 0,05 et fabriqué par l'entreprise nationale des peintures, LAKHDHRIA, BOUIRA.

6) Vinyle

La peinture vinylique, est une peinture peu employée en finition classique en France. C'est une peinture à l'eau. Le traitement consiste à enrober la paille d'orge par du vinyle blanc mélangé avec de l'eau.
Le vinyle utilisé est fabriqué par la société Zahra peinture. KOUININE, EL OUED.

7) Colle à bois

La colle à bois que nous avons utilisée dans ce traitement, est la colle qui est utilisée par les menuisiers dans l'installation des meubles. Par immersion de la paille d'orge dans la colle à bois, on obtient une couche sur la surface extérieure de la paille.
La colle à bois « PERTACOLLE » utilisée dans cette étude a une couleur blanche, elle est liquide et fabriqué par la société concordal spa. OUED SMAR, ALGER.

III.3.2. Présentation des méthodes des traitements utilisés

Les pailles d'orges traitées, pour tous les traitements, sont conservés dans la même salle et dans des conditions climatiques de température T= 20°C ± 5°C et une humidité relative HR= 50% ± 10%.

III.3.2.1. Lait de ciment

La quantité d'eau nécessaire pour la préparation du lait de ciment a été optimisée après avoir fait plusieurs essais préliminaires ; pour cela nous avons utilisés la méthode de concentration du ciment par un litre d'eau. Cette méthode est inspirée par analogie de préparation de certains traitements chimiques. Le malaxage est fait manuellement pour une durée de 10 minutes.
Pour déterminer le dosage optimum du lait de ciment, on sélectionne expérimentalement l'intervalle correspondant à l'optimum, puis extrait le dosage moyen.
Le dosage optimum du lait de ciment qui donne le meilleur enrobage est égal 1360 g/l (gramme de ciment par un litre d'eau).
La durée du séchage des pailles d'orges traitées est 14 jours, c'est la durée qui permet la stabilisation du durcissement du ciment. Ainsi que cette période nécessaire pour atteindre l'état hydrique correspondant à une teneur en eau constante.

III.3.2.2. Les autres types de lait

La préparation de lait de chaux est la même que celle utilisée pour le lait de ciment. La dose optimale du lait de chaux est égale à 800 g/l (gramme de chaux par un litre d'eau).
D'autre part, la préparation du lait de ciment avec la chaux et le ciment avec la pouzzolane sont basées sur le dosage optimum du lait de ciment, qui est de 1360 g/l. Les pourcentages d'ajouts proposés sont par substitution du dosage en ciment. Ces ajouts sont la chaux hydraulique et la pouzzolane qui doivent avoir un diamètre ≤ 80 µm.

Enfin, les quantités des constituants nécessaires pour la préparation des différents types de laits sont résumées sur le **Tableau III.3.**
La durée de séchage est la même que celle du lait de ciment.

Tableau III.3. Les données de préparations des différents types de laits.

Type de lait	Pourcentage de ciment (%)	Pourcentage d'ajout (%)	Quantité de ciment (g/ l)	Quantité d'ajout (g/ l)
Lait ciment - chaux	85	15	1156	204
Lait ciment-pouzzolane	85	15	1156	204

III.3.2.3. Huile de vidange

La préparation de traitement à l'huile de vidange est manuellement réalisée : on introduit la paille d'orge dans le récipient contenant une quantité d'huile, puis on malaxe le mélange à vitesse lente. Le malaxage est arrêté dès que la surface extérieure de paille d'orge sera parfaitement couverte d'huile.
La durée nécessaire du séchage des pailles d'orges traitées par l'huile de vidange est 20 jours.

III.3.2.4. Huile de lin

Dans ce cas le traitement consiste à immerger la paille d'orge pendant deux minutes dans une solution d'huile de lin, théoriquement 2 minutes est suffisante pour l'arrivée d'huile à tous les parties de la paille d'orge.
Après environ un quart heure, les échantillons sont presque complètement séchés.

III.3.2.5. Bitume

La préparation de ce type de traitement est basé sur l'enrobage des pailles d'orges par du bitume chauffé au préalable à degré 150°C, cette température est utilisée pour le chauffage de bitume avec gravier (Goudron) dans le domaine routier.
L'ensemble est remué manuellement sur une plaque chauffante, les pailles d'orges sont rajoutées progressivement à l'état séparé afin que toutes les pailles soient individuellement enrobées. Le mélange ainsi obtenu est dispersé sur une plaque métallique à l'air ambiant jusqu'à refroidissement.

Après la durée d'environ 10 jours, nous constatons que les pailles d'orges traitées sont devenues séchées.

III.3.2.6. Eau chaude

La préparation de ce traitement est effectuée par chauffage de l'eau, et par le thermomètre, nous mesurons la température jusqu'à 60°C, après cela, on immerge la paille d'orge dans l'eau pendant 10 secondes. La conservation des pailles traitées se fait dans la salle d'essai. La durée du séchage de ces pailles d'orges traitées est d'environ 48 heures.

III.3.2.7. Emulsion de bitume, Gasoil, Vernis, Laque, Vinyle et Colle à bois

La méthode de préparation de ces traitements est la même préparation que celle de l'huile de vidange.
La durée de séchage chacun des traitements à l'émulsion de bitume, gasoil, vernis, laque, vinyle et colle à bois est respectivement 10 jours, 24 heures, 24 heures, 3 jours, 2 jours et 24 heures.

III.3.3. Adhérence entre la paille d'orge et les différents produits du traitement

La connaissance de l'adhérence entre la paille et les différents produits traitement a été analysée par des photos et images agrandies qui permettent de visualiser l'aspect général ainsi que les sections transversales des pailles traitées. L'observation de ces pailles traitées a mis en évidence deux cas différents : des traitements montrant une mauvaise adhérence et d'autres qui adhèrent bien à la surface extérieure de la paille.

Après le traitement, et après le temps nécessaire pour sécher des échantillons traités, on remarque que soit l'adhérence paille-produit est mauvaise comme dans le cas du traitement aux laits, soit l'usage des pailles traitées est difficile comme dans le cas du traitement au bitume.

Dans le premier cas, on a remarqué que certaines parties de la couche de traitement se décollent de la paille (**Figure III.4. a, b, c)**. Dans le second cas, qui est traitée au bitume, bien que les pailles traitées paraissent plus ou moins sèches, on trouve des difficultés à les séparer les unes des autres lors du malaxage (**Figure III.4. d**).

	
a- Ciment	b- Ciment+ la pouzzolane
	
c- Chaux	d- Bitume

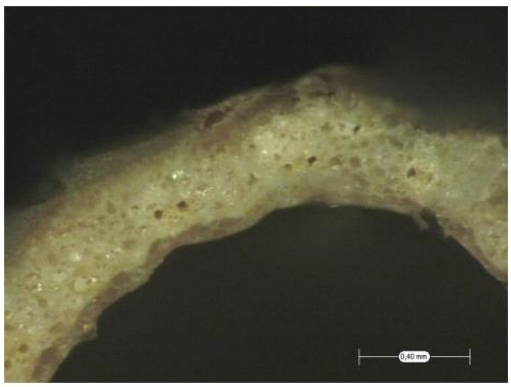
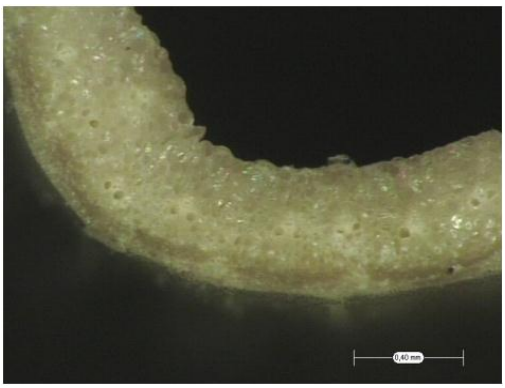
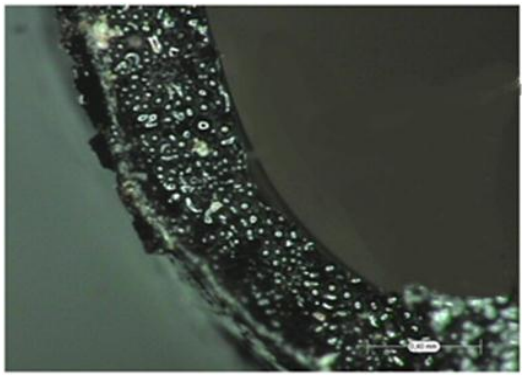
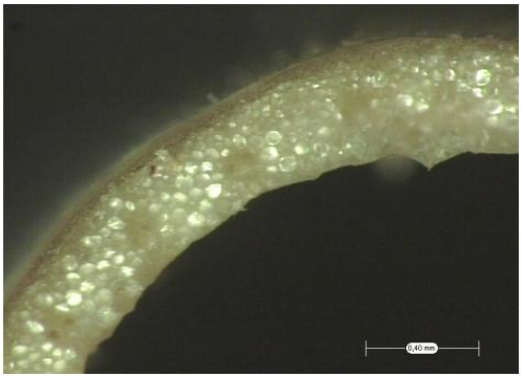
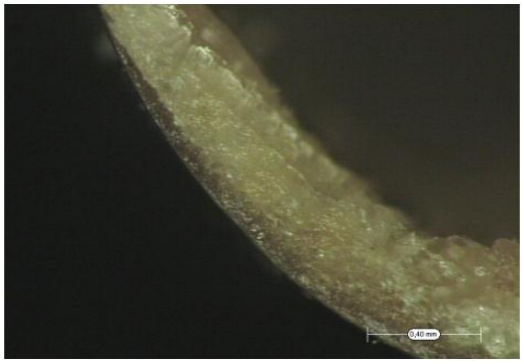
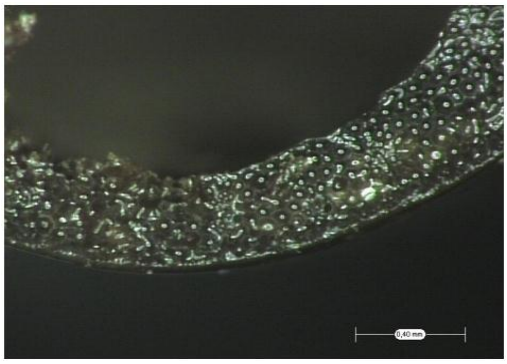
Figure III.4. Aspect général des traitements au lait et au bitume.

D'après les photos on montre que :

D'après la **Figure III.4.**, on remarque que dans le cas des traitements au lait, l'adhérence paille-lait est faible en raison de la nature physiologique de la paille, elle a une surface extérieure très lisse.

D'autre part, pour le traitement au bitume, on remarque que la couche externe de bitume est épaisse et parait superficiellement sèche ; mais aux profondeurs de cette couche le bitume est toujours visqueux, ce qui laisse les pailles ainsi traitées coller les unes sur les autres.

Afin de bien apprécier les autres traitements qui apparaissent mieux au niveau de l'adhérence « paille-traitement » et de comparer leur aspects à l'aspect de la paille non traitée, on a essayé de les visualiser à une certaine échelle à l'aide d'un microscope optique. Les images ainsi obtenues sont montrées dans la **Figure III.5.** avec une échelle d'agrandissement G =175.

	
Paille nature	Paille traitée à l'eau chaude
	
Paille traitée à l'émulsion de bitume	Paille traitée au gasoil
	
Paille traitée à l'huile de lin	Paille traitée à l'huile de vidange

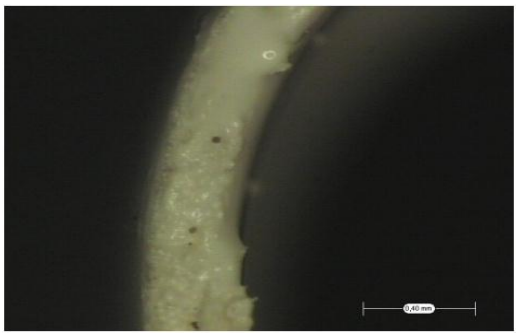
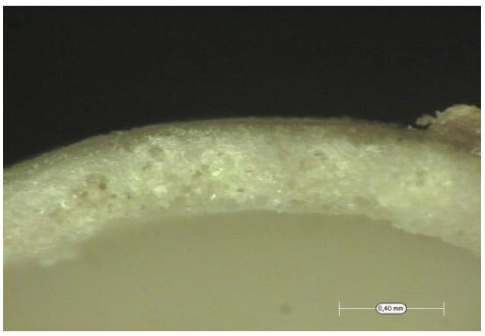
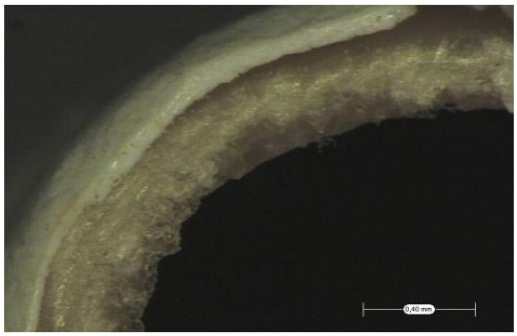
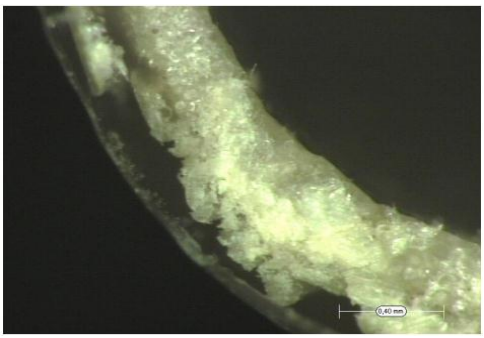
	
Paille traitée à la laque	Paille traitée à la colle de bois
	
Paille traitée à la peinture vinylique	Paille traitée au vernis

Figure III.5. Aspect en coupe transversale de la paille d'orge avec et sans traitement.

A travers les images nous notons que :

Dans tous les cas, quel que soit le type de traitement, le produit de traitement colle bien à la surface extérieure de la paille, sauf pour la peinture vinylique où on note une légère séparation entre le produit et la paille.

D'autre part et en comparaison avec la paille naturelle, on remarque que les traitements par « émulsion de bitume, gasoil, huile de lin et huile de vidange », n'ajoute qu'une mince couche qui n'augmente pas l'épaisseur de la paille.
Par ailleurs, on constate que le traitement par l'eau chaude a conduit à un gonflement de la structure de paille nettement visible par rapport à la paille sans traitement.
Enfin, pour les traitements « laque, colle de bois, peinture vinylique et vernis », malgré l'existence d'une bonne adhérence avec la paille, ils constituent un film qui recouvre complètement la paille conduisant ainsi à une augmente de sa masse.

III.3.4. Influence des traitements sur la variation de masse de la paille d'orge

Il est bon de savoir l'effet du changement de poids de la paille après le traitement et son impact sur l'allègement du béton de sable.
Pour le suivi de ces changements, nous avons mesuré les poids des échantillons par une balance très précise avant et après traitement. Le **Tableau III.4.** montre les variations de masse dans le cas de tous les échantillons.

Tableau III.4. Variation de masse de la paille d'orge.

Nombre de Traitement	Traitement	Masse avant le traitement (g)	Masse après le traitement (g)	Δm (%)
01	Eau chaude	3	3.2	6.67
02	Gasoil	2.7	3.5	29.63
03	Emulsion de bitume	2.8	3.7	32.14
04	Huile de vidange	2.6	3.6	38.46
05	Huile de lin	2.5	3.5	40.00
06	Vernis	2.9	4.2	44.83
07	Colle de bois	2.6	4.3	65.38
08	Laque	2.4	4.9	104.17
09	Chaux	2.7	6.6	144.44
10	Ciment	2.8	7.4	164.29
11	Bitume	2.9	7.8	168.97
12	Ciment + la pouzzolane	2.8	8.8	214.29
13	Ciment + la chaux	2.7	8.8	225.93
14	Peinture vinylique	2.5	9.1	264.00

D'après le **Tableau III.4.,** on peut classer les variations obtenues en deux catégories :

- La première regroupe les augmentations de poids des échantillons de paille qui sont inférieures à 100%, ce qui est représenté par les sept premiers traitements. Dans cette catégorie, on peut constater la plus faible variation est enregistrée dans le cas de l'eau chaude, ce qui tout à fait normal, puisque ce traitement ne conduit pas à la formation d'une couche superficielle. Par contre, les traitements par le vernis et la colle de bois, le pourcentage du poids est un peu élevé et est de 44.83% et 65.38% respectivement.
Cependant, des pourcentages moyens, sont enregistrés pour les traitements des pailles par gasoil, émulsion de bitume, huile de vidange et huile de lin, avec des pourcentages allant de 30 à 40%.
- La deuxième catégorie est composée les sept autres traitements restant où on a enregistré des pourcentages qui dépassent 100%. L'augmentation significative des poids de ces traitements est due à la couche collée sur la surface externe de la paille, comme il a été montré précédemment dans le paragraphe **III.3.3**.

Enfin, on peut noter que c'est la nature et le type de matériau utilisé pour le traitement qui sont derrière l'augmentation de poids des pailles traitées. On note également que les six premiers traitements ne vont pas avoir un impact très significatif sur l'augmentation de la masse du béton de sable.

III.3.5. Essai de traction

Avant de se lancer dans l'analyse des résultats de l'essai de traction sur la paille d'orge **(Figure III.6.)**, nous rappelons que ce test a été effectué seulement pour les cas des traitements qui ont montré une bonne adhérence. Les traitements par les laits et les traitements par le bitume n'ont été prise en considération dans cette étude.

Les résultats des tests de traction sur les pailles d'orges étudiées sont mentionnés sur le **Tableau III.5**.

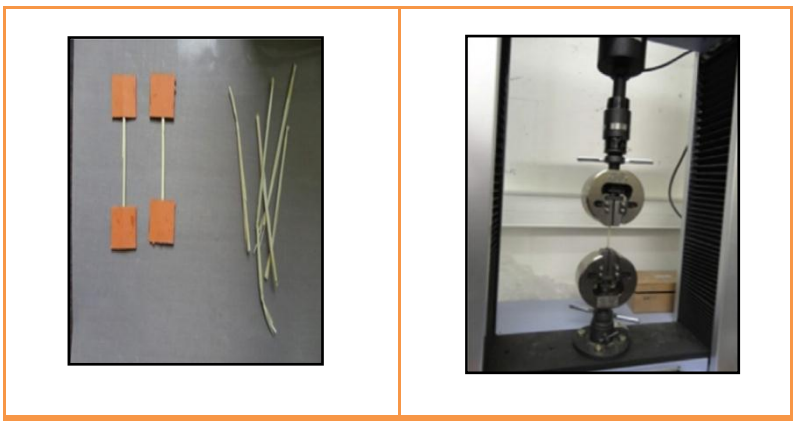


Figure III.6. Dispositif utilisé pour l'essai de traction de la paille d'orge.

Tableau III.5. Synthèse d'essai de traction de la paille avec et sans traitement.

Type de traitement	Module d'élasticité (MPa)	Force maximale (N)	Contrainte maximale (MPa)
Sans traitement	2380.72	64.95	11.54
Eau chaude	2935.18	121.24	27.03
Gasoil	3047.68	109.75	27.79
Emulsion de bitume	2547.84	126.88	25.74
Huile de vidange	2605.14	93.86	19.74
Huile de lin	2390.59	69.43	16.63
Vernis	2728.82	102.75	25.91
Colle de bois	2598.44	106.10	23.44
Laque	2846.41	115.40	29.73
Peinture vinylique	2584.42	94.94	22.98

Notons que les pailles d'orge utilisées sont des récoltes locales (paille non traitée récoltée en 2012 et paille traitée en 2014). D'après les résultats montrés dans le **Tableau III.5.**, on remarque qu'il existe quand même une différence dans la contrainte maximale de la paille traitée et la paille non traitée, ce qui montre l'effet des produits de traitement sur la structure des pailles d'orge. Celle de toutes les pailles traitées sont supérieure à celle de la paille non traitée. En outre, la contrainte maximale dans le cas des traitements de l'eau chaude, du gasoil, de l'émulsion de bitume, du vernis et de la laque sont un peu élevés par rapport à autres traitements.

De façon générale, les contraintes des tous les traitements se trouvent dans l'intervalle entre (22- 30) MPa, à l'exception de l'huile de lin et l'huile de vidange qui ont donné une faible valeur d'environ 16,63 MPa et 19,74 MPa respectivement.

III.3.6. Choix des traitements

Après plusieurs tests menés sur des pailles d'orge traitées par différents traitements, et afin de choisir les traitements les plus appropriées pour la formulation d'un béton de sable léger, nous nous sommes basés sur les critères suivants :

1- Facilité de préparation ;
2- Variation de la masse ;
3- Essai de traction ;
4- Adhérence paille-produit.

Pour ceci, on a essayé de faire une certaine évaluation qui nous permet de prendre les meilleures compromis possible, ce qui montré dans le **Tableau III.6**.

Tableau III.6. Comparaison entre les différents traitements (Evaluation par notation /10).

Traitements	Facilité de préparation (/10)	Variation de la masse (/10)	Essai de traction (/10)	Adhérence paille-produit (/10)	Somme
Eau chaude	8	8	8	7	**31**
Gasoil	8	7	8	8	**31**
Emulsion de bitume	5	7	7	7	26
Huile de vidange	7	7	5	8	**27**
Huile de lin	7	7	5	7	26
Vernis	6	7	7	7	**27**
Colle de bois	7	6	6	6	25
Laque	6	6	8	6	26
Chaux	7	6	-	5	18
Ciment	7	6	-	5	18
Bitume	5	6	-	5	16
Ciment + la pouzzolane	7	5	-	5	17
Ciment + la chaux	7	5	-	5	17
Peinture vinylique	6	5	6	6	23

D'après le **Tableau III.6.** présentant l'évaluation des différents traitements testés, on peut sélectionner pour la suite des travaux de recherche les traitements suivants (**Photos n°1** de l'annexe) :

- Eau chaude ;
- Gasoil ;
- Huile de vidange ;
- et Le vernis.

III.4. Conclusion

La composition optimale du béton de sable allégé par des pailles d'orge non traitées dont la teneur est de 15 kg/m^3, a donné des résultats acceptables avec des propriétés physiques donnant une faible masse volumique et faible absorption d'eau, alors qu'il se définit par la faiblesse des caractéristiques mécaniques et une petite augmentation du retrait.

Afin d'améliorer ces propriétés et d'obtenir les meilleurs résultats, nous avons sélectionné quatre traitements parmi les quatorze traitements étudiées, qui ont montré de bons résultats dans l'essai de traction de la paille, bonnes adhérences « paille-produit de traitement », une grande facilitée dans la préparation et aussi qui n'ont pas beaucoup changé leur masse ; ce qui par conséquent ne modifie pas la masse volumique du composite.

Ces quatre traitements sont appliqués à la paille d'orge puis introduits dans le béton de sable. Ce nouveau composite fera l'objet du dernier chapitre.

CHAPITRE IV :

Caractérisation des Bétons de Sable à Base des Pailles d'Orge Traitées

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est alors d'améliorer les propriétés physico-mécaniques, thermiques et les variations dimensionnelles, en appliquant les quatre traitements sélectionnés précédemment aux pailles d'orge avant de les introduire dans les bétons de sable. Ces quatre traitements ont été choisis à la fin du chapitre précédent, à savoir : les traitements par l'eau chaude, le gasoil, le vernis et l'huile de vidange. La teneur en pailles traitées est prise égale à la même teneur de pailles non traitées (15kg/m^3).

IV.2. Influence des traitements sur la capacité d'absorption des pailles d'orge

Après le séchage complet des échantillons des pailles d'orge traitées, on étude l'impact du traitement sur les coefficients d'absorption d'eau de la paille d'orge, afin d'évaluer les performances des différents types de traitement [71].
La **Figure IV.1.** et le **Tableau IV.1.** présentent l'évolution de l'absorption d'eau des pailles d'orge en fonction des traitements utilisés.

Tableau IV.1. Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau.

Type de traitement	Coefficient d'absorption d'eau
Sans traitement	3,30
L'eau chaude	3,00
Gasoil	2,00
Le vernis	1,25
Huile de vidange	1,00

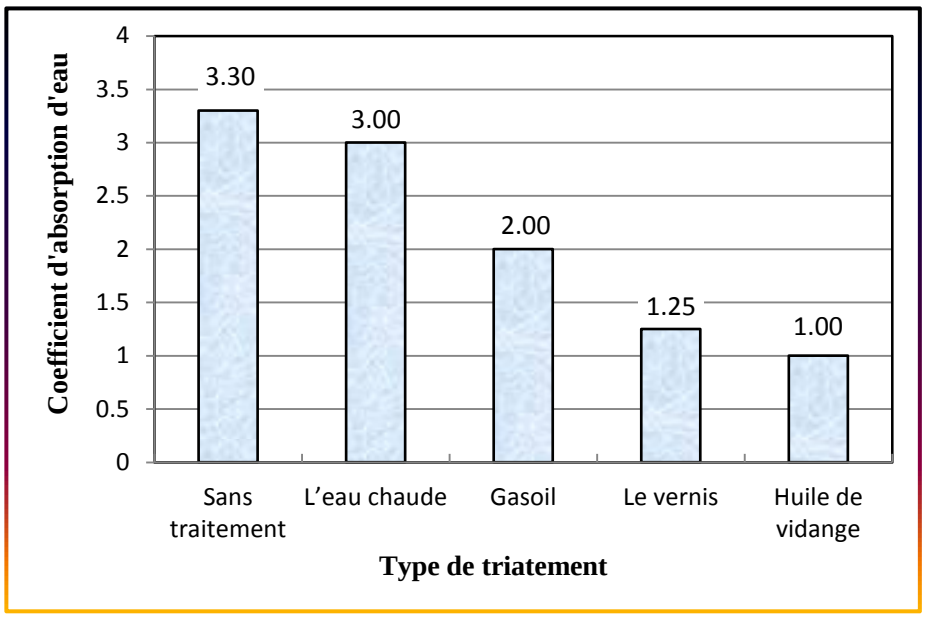


Figure IV.1. Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau.

D'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus :

On peut constater que l'absorption d'eau de la paille traitée diminue selon le type de traitement. Il semble que l'huile de vidange donne le coefficient d'absorption le plus bas, suivi par celui du vernis, puis celui du gasoil et enfin celui de l'eau chaude. Les pourcentages de réduction en comparaison avec le cas de la paille non traitée varient entre 9,09% (cas de l'eau chaude) et 69,70% (cas de l'huile de vidange). Certes le cas de l'eau chaude donne une réduction très faible, mais les cas de gasoil et le vernis donne des résultats aussi acceptables, soit 39,39% et 62,12% respectivement.

Alors, le traitement qui donne le meilleur résultat est bien l'huile de vidange ; celui-ci a réduit le coefficient d'absorption d'environ 70% en comparaison avec à la paille non traitée. Donc le traitement à l'huile de vidange est relativement le plus efficace.

- Dans le cas de traitement à l'eau chaude, la paille conserve une certaine quantité d'eau pendant le traitement. Ceci a conduit peut être au gonflement qui a été remarqué par visualisation au microscope dans le chapitre précédent (**§ III.3.3**).
- Dans le cas de traitement au gasoil, la paille a absorbé une quantité considérable de gasoil pendant le traitement, ce qui a été traduit par du poids de la paille après traitement de 29,63% comme mentionné dans le chapitre précédent (**§ III.3.4**).

On peut dire que les pores des pailles d'orge sont relativement saturés de gasoil, ce qui mène à une faible absorption d'eau.

- Une réduction significative d'absorption d'eau dans le cas de traitement au vernis est due à la couche parfaitement imperméable de vernis placée sur la surface

extérieure de la paille d'orge, rendant celle-ci étanche et par conséquent ne permet pas à la paille d'absorber de l'eau.

- A cause de leurs densités différentes, il est évident que l'huile et l'eau ne se mélangent pas l'un avec l'autre ; c'est exactement ce qui a eu lieu dans le cas de traitement par à l'huile de vidange. En effet, la forte diminution du taux d'absorption d'eau, est due à la nature huileuse de la surface extérieure de la paille qui rend d'absorption d'eau difficile.

IV.3. Caractérisation du béton frais

- **Etude de la maniabilité**

Les résultats obtenus après l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, pour des différents traitements de la paille d'orge, sont présentés dans le **Tableau IV.2.**

Tableau IV.2. La maniabilité des compositions étudiées.

Type de traitement	Affaissement (cm)	Classe d'affaissement
Sans traitement	5	Plastique
L'eau chaude	6	Plastique
Gasoil	6	Plastique
Huile de vidange	6	Plastique
Le vernis	5	Plastique

D'après le tableau, on remarque que la maniabilité des différentes compositions étudiées est presque la même. La consistance est plastique pour tous les cas, ce qui montre que pratiquement les différents traitements étudiés ne présentent pas un effet remarquable sur la maniabilité du béton de sable en comparaison avec le cas sans traitement.

IV.4. Caractérisation du béton durci

IV.4.1. Masse volumique

La masse volumique peut être considérée comme la caractéristique principale des bétons légers. Le traitement des pailles fait certainement varier leurs masses, ce qui rend nécessaire l'étude de l'influence des différents traitements sur la masse volumique du béton de sable. Les valeurs de la masse volumique à 28 jours du béton de sable à base de la paille d'orge, avec et sans traitements, sont mentionnées sur le **Tableau IV.3.** et illustrées par la **Figure IV.2.**

Tableau IV.3. Influence des traitements sur la masse volumique à 28 jours.

Type de traitement	La masse volumique à 28 jours (kg/m^3)
Sans traitement	1895,00
L'eau chaude	1922,01
Gasoil	2036,07
Huile de vidange	2059,51
Le vernis	2076,00

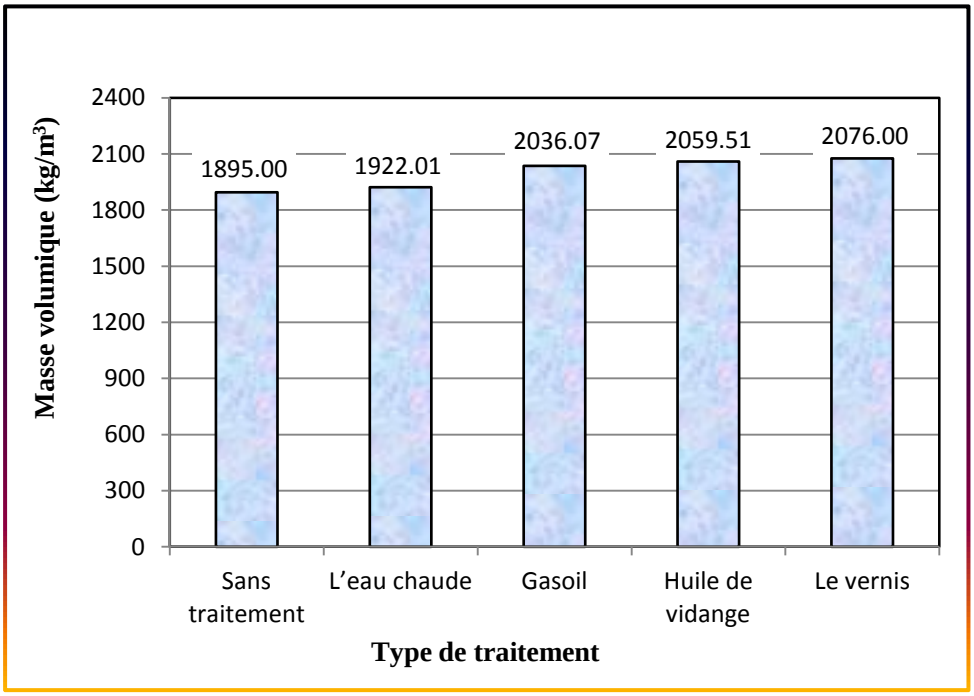


Figure IV.2. Influence des traitements sur la masse volumique à 28 jours.

Il est clair que la masse volumique du béton a augmenté dans tous les cas de traitements par rapport au cas de la paille non traitée. Les taux d'augmentation enregistrés varient de 1,42% (cas de l'eau chaude) à 9,55% (cas du vernis).

Le traitement au vernis confère donc au composite étudié une masse volumique un peu plus importante que celle obtenue par les autres traitements.

Cependant, les pourcentages d'augmentation dans le cas des composites traités au gasoil et à l'huile de vidange étaient de 7,44% et 8,68% respectivement, par rapport au béton de pailles non traitées.

La principale raison de l'augmentation des masses volumiques des bétons confectionnés avec des pailles d'orge traitées est bien la nature des produits de traitements.

Selon la norme **NF EN 206-1**, la masse volumique de béton léger est supérieure ou égale à 800 kg/m³ mais inférieure ou égale à 2000 kg/m³. Dans notre cas, nous constatons que qu'avec tous les traitements utilisés la masse volumique du béton de sable restent toujours dans la gamme des bétons légers.

IV.4.2. Absorption d'eau par immersion

L'ensemble de résultats d'absorption d'eau par immersion à 28 jours des différentes compositions étudiées sont mentionnés sur le **Tableau IV.4.** et illustrés par la **Figure IV.3.**

Tableau IV.4. Absorption d'eau par immersion à 28 jours.

Type de traitement	La porosité accessible à l'eau à 28 jours(%)
Sans traitement	10,80
L'eau chaude	09,05
Gasoil	08,61
Huile de vidange	07,02
Le vernis	06,51

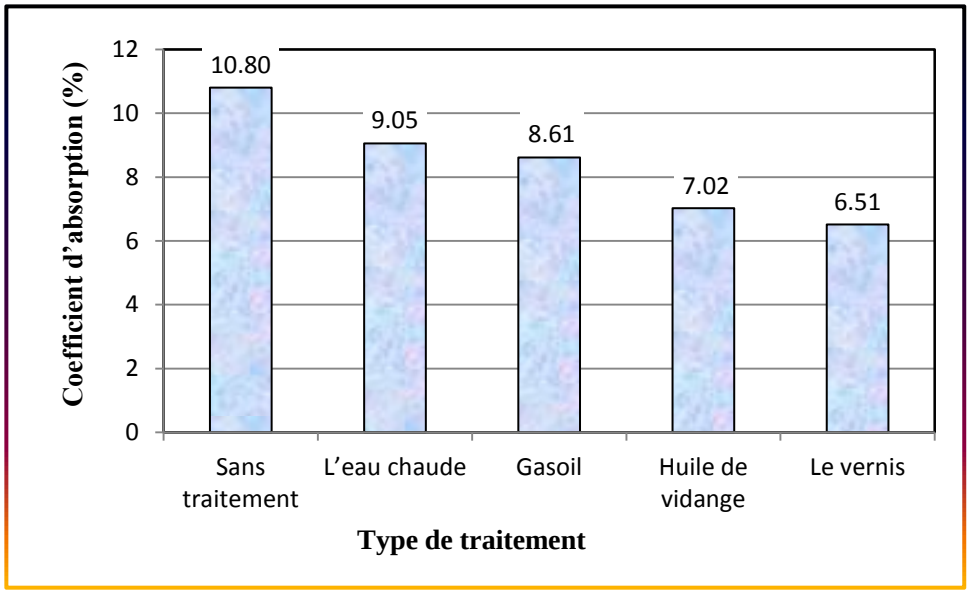


Figure IV.3. Absorption d'eau par immersion à 28 jours.

D'après les résultats obtenus, on constate une diminution de la porosité pour les toutes compositions à base de pailles traitées par rapport à la composition à base de pailles non traitées. Cette réduction peut être expliquée par la quantité de pailles traitées parce qu'il existe une différence entre la masse de la paille non traitée et traitée.

Elle est due également à la nature du type de traitement qui réduit la porosité ouverte des pailles d'orge, comme cela a été déjà signalé surtout dans les traitements à l'huile de vidange et le vernis où la surface des pailles se trouve complètement enveloppée par l'huile et le vernis.

Ceci a été confirmé par les valeurs de la capacité d'absorption d'eau des pailles dans le titre précédent (**§ IV.2.**)

IV.4.3. Relation entre la masse volumique et la porosité

Si nous essayons d'examiner l'évolution de ces deux paramètres avec un pourcentage constant de la teneur en paille (15kg/m^3), nous apercevons tout de suite qu'ils évoluent d'une manière inversée : l'augmentation de la porosité accessible à l'eau dans le composite diminue sa masse volumique, ce qui est montré par le **Figure IV.4.**

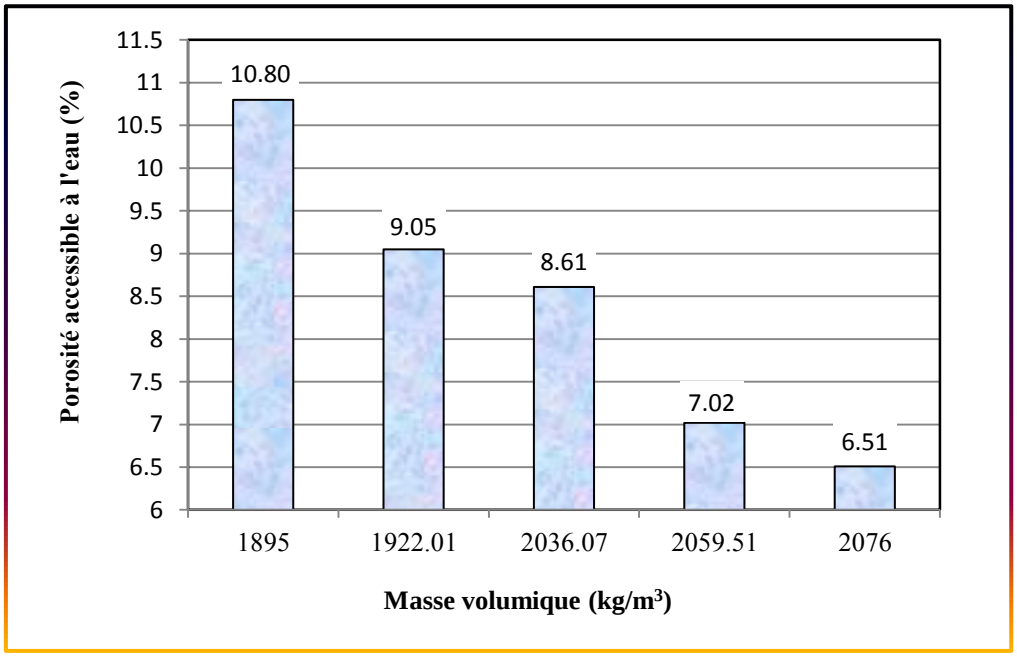


Figure IV.4. La relation entre la porosité et la masse volumique.

IV.4.4. Etude des propriétés mécaniques

IV.4.4.1. Résistance à la flexion

Le **Tableau IV.5.** et la **Figure IV.5.** présentent les valeurs de la résistance à la flexion à 28 jours des différentes compositions étudiées en fonction du type de traitement appliqué.

Tableau IV.5. Influence des traitements sur la résistance à la flexion à 28 jours.

Type de traitement	La résistance à la flexion à 28 jours (MPa)
Sans traitement	4,00
L'eau chaude	5,21
Gasoil	4,45
Huile de vidange	4,74
Le vernis	4,51

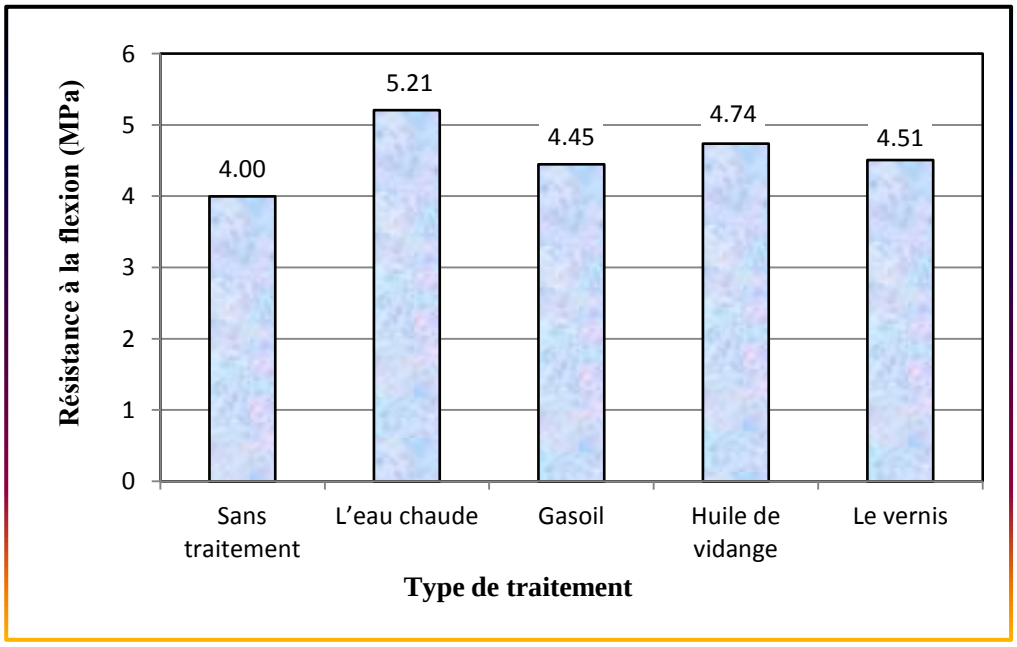


Figure IV.5. Influence des traitements sur la résistance à la flexion à 28 jours.

On constate d'après les résultats que tous les traitements des pailles ont amélioré la valeur de la résistance à la flexion du composite par rapport au béton confectionné avec des pailles non traitées, où le pourcentage d'augmentation est de plus de 30%.

Il apparaît clairement que le traitement à l'eau chaude est meilleur comparé aux autres traitements.

La paille traitée par le gasoil a donné le meilleur résultat dans l'essai de traction, mais dans le béton, ce traitement se trouve en dernière position par rapport aux autres traitements. Ceci indique qu'il y a peut être un manque de compatibilité entre la paille traitée et la matrice.

Pour les autres traitements, la raison de l'obtention des bons résultats est peut être qu'il existe une bonne compatibilité entre le produit de traitement utilisé et le liant de la matrice ce qui rend la microstructure de la matrice plus compacte et donc plus résistante.

IV.4.4.2. Résistance à la compression

Le **Tableau IV.6.** et la **Figure IV.6.** présentent la résistance à la compression à 28 jours des différentes compositions étudiées en fonction des types de traitement.

Tableau IV.6. Influence des traitements sur la résistance à la compression à 28 jours.

Type de traitement	La résistance à la compression à 28 jours (MPa)
Sans traitement	13,00
L'eau chaude	20,55
Gasoil	19,48
Huile de vidange	21,60
Le vernis	20,78

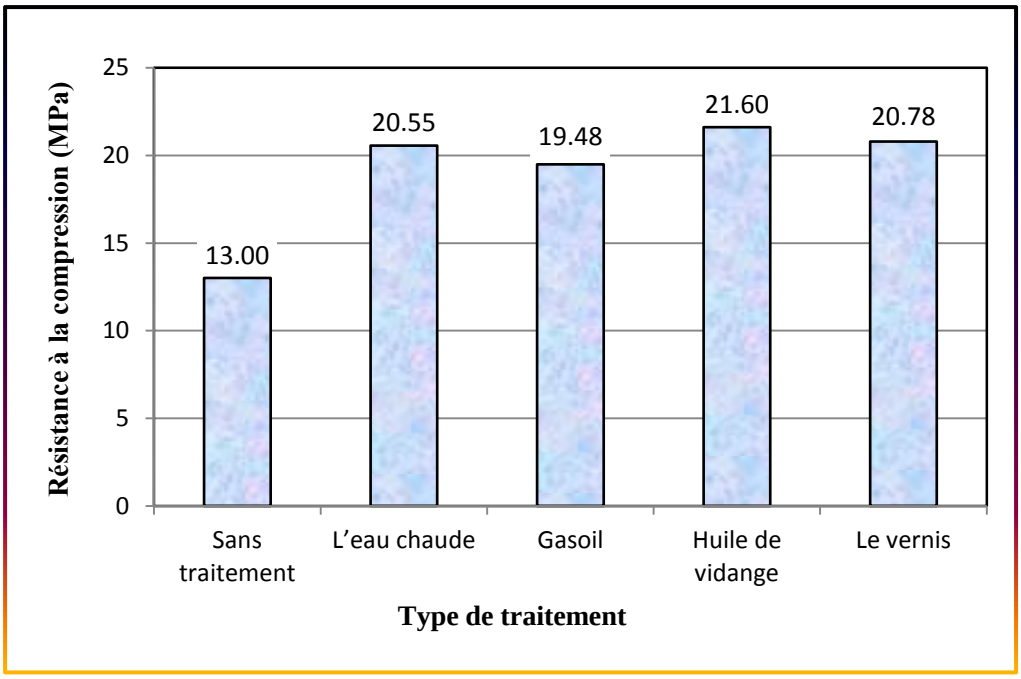


Figure IV.6. Influence des traitements sur la résistance à la compression à 28 jours.

D'après ces résultats, on constate que les valeurs de la résistance à la compression de toutes les compositions sont comprises entre 13 et 21,60 MPa.

Par rapport à la paille non traitée**,** on remarque aussi que tous les traitements utilisés ont conduit a une augmentation très significative des valeurs de la résistance à la compression des composites étudiés. Selon le type de traitement, ces augmentations varient entre 49,85% et 66,15%.

En comparant les différents traitements employés, il semble que les pailles traitées par l'huile de vidange ont donné la résistance à la compression la plus élevée ; soit une amélioration d'environ 66,15% par rapport au béton avec pailles non traités. Il faut noter que même en flexion, ce type de traitement a été classé en deuxième position.

Comme pour la résistance à la flexion, le béton à base de pailles traitées par le gasoil vient en dernière position en présentant la plus faible valeur de résistance à la compression par rapport aux autres traitements, soit une réduction d'environ 16,30% par rapport au béton à base de pailles traitées à l'huile de vidange.

En général, les bons résultats obtenus dans la résistance à la compression grâce aux différents traitements envisagés sont dus à la bonne compatibilité du produit de traitement avec la paille d'orge et à la bonne aptitude à coller sur la surface extérieure de la paille d'où la bonne adhérence entre les composites " paille - matrice ".

IV.5. Variations dimensionnelles

Les variations dimensionnelles ont été analysées par le suivi du retrait des composites étudiés dans le temps. Les valeurs de retrait ainsi obtenus sont données dans le **Tableau IV.7.** et illustrées par la **Figure IV.7.**

Tableau IV.7. Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiées.

Type de traitement		Sans traitement	L'eau chaude	Gasoil	Huile de vidange	Le vernis
		Retrait mm/m				
Age en jours	3	0.214	0.083	0.085	0.633	0.123
	7	0.524	0.140	0.235	0.719	0.233
	14	0.789	0.621	0.429	1.060	0.288
	21	0.810	0.710	0.610	1.290	0.490
	28	0.830	0.715	0.641	1.392	0.623
	60	0.830	0.719	0.662	1.400	0.675
	90	0.830	0.722	0.666	1.409	0.691
	180	0.830	0.722	0.666	1.409	0.691

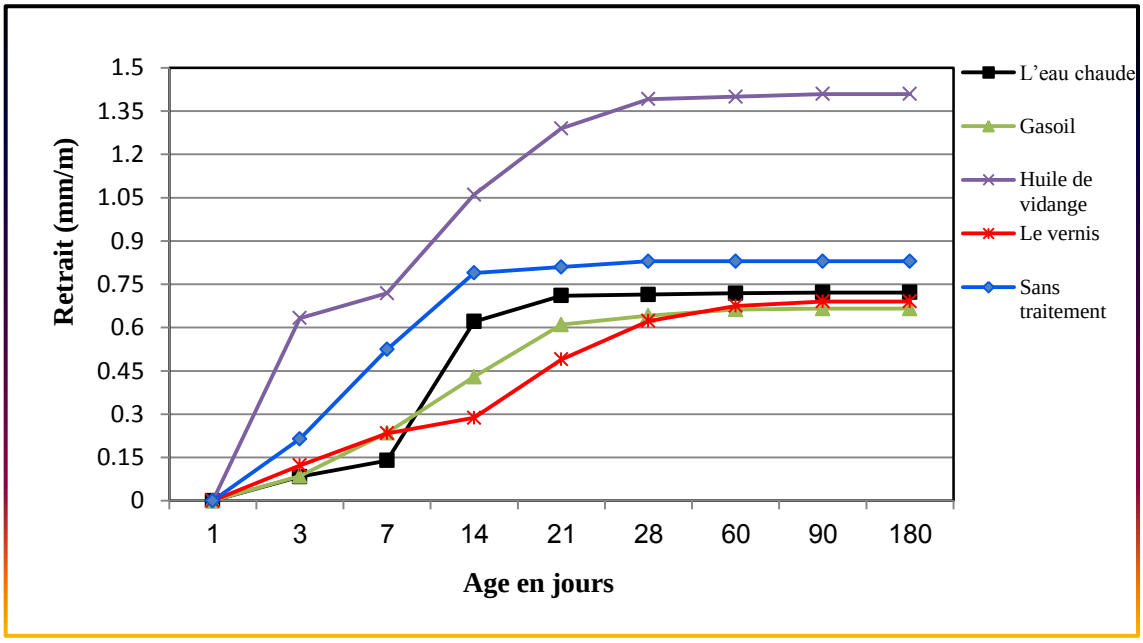


Figure IV.7. Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiées.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

On constate que tous les traitements utilisés ont marqué leur influence sur le retrait des composites étudiés.

L'examen des résultats expérimentaux montre que, dans l'ensemble, la réduction du retrait du composite est plus importante dans le cas de traitement au gasoil, où le pourcentage de retrait a diminué de 20,90% par rapport à la paille non traitée.

Bien que le traitement à l'huile de vidange, dans le cas des copeaux de bois, a donné les meilleurs résultats concernant le retrait dans les travaux de **M. Gotteicha** [71] en réduisant considérablement les variations dimensionnelles du béton de sable, dans notre cas, ce traitement a donné la plus grande valeur, où le pourcentage d'augmentation par rapport à la paille non traitée est de 67,34%.

Cela est dû à la nature lisse et huileuse de la surface extérieure de la paille qui conduit à une diminution importante dans le frottement entre la paille et la matrice et à la facilité de glissement du béton sur la paille. En fait ceci diminue l'adhérence entre la paille et la matrice, surtout avant le durcissement, ce qui est traduit par l'augmentation significative dans les 21 premiers jours.

On remarque dans les 7 premiers jours le retrait évolue avec une cinétique lente pour toutes les compositions, à l'exception du traitement à l'huile de vidange où nous notons une augmentation rapide de la valeur du retrait.

Ensuite et jusqu'à 21 jours, on constate une augmentation de retrait relativement pour toutes les compositions.

Au-delà de 21 jours, presque toutes les compositions tendent à se stabiliser avec une légère augmentation, à l'exception du traitement par le vernis, qui continue avec la même cinétique jusqu'au début du deuxième mois où il commence va tendre vers la stabilité.

IV.6. Caractéristiques thermiques

La connaissance du comportement thermique des composites « béton de sable-paille traitée et non traitée », nécessite la détermination des différents paramètres thermiques : conductivité, diffusivité et chaleur massique. Rappelons que les impératifs qui ont conduit au choix de la méthode expérimentale employée chapitre .II (**§ II.3.6.**) sont doubles : d'une part, la technique « Hot Disk TPS 500 » est relativement simple d'utilisation et présente une précision satisfaisante et, d'autre part, il a été confirmé qu'elle ne perturbe pas la distribution de l'humidité dans les milieux poreux étudiés.

IV.6.1. Conductivité thermique

Les valeurs moyennes des conductivités thermiques obtenues avec la méthode TPS, sont mentionnées dans le **Tableau IV.8.** et illustrées par la **Figure IV.8.**

Tableau IV.8. La conductivité thermique des compositions étudiées.

Type de traitement	Conductivité thermique (W/mK)
Sans traitement	1,32
L'eau chaude	1,15
Gasoil	1,25
Huile de vidange	0,75
Le vernis	1,18

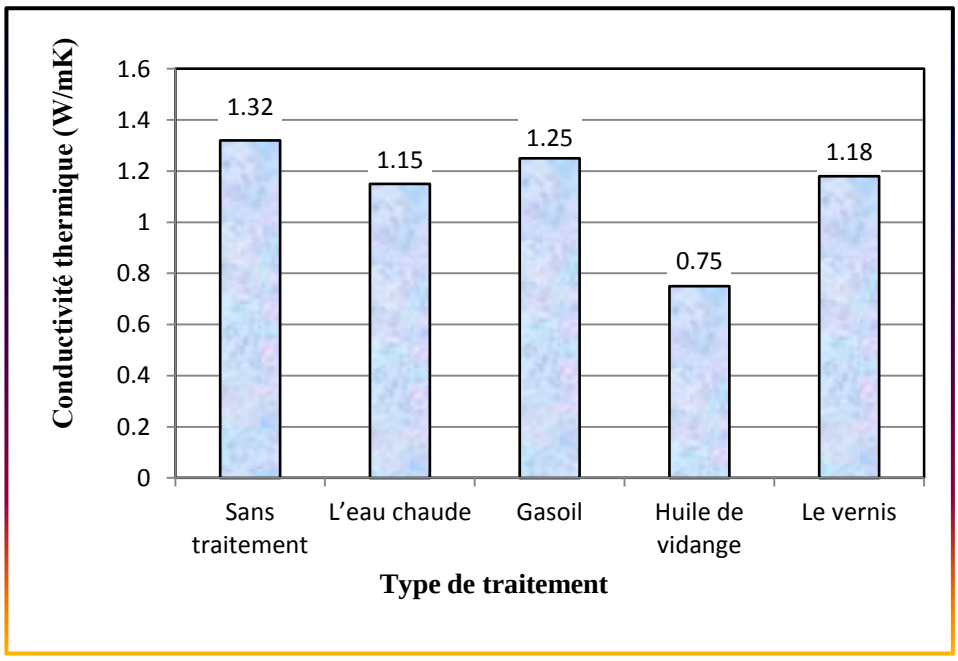


Figure IV.8. La conductivité thermique des compositions étudiées.

D'après les résultats obtenus, on constate une diminution de la valeur de la conductivité thermique dans les compositions des pailles traitées par rapport à la paille non traitée, le pourcentage de réduction est variable entre 5,30% à 43,18%.

Le traitement de la paille à l'huile de vidange a donné la plus forte diminution de la valeur de la conductivité thermique, alors que le traitement par le gasoil n'a amélioré la valeur de la conductivité thermique par rapport au cas de la paille non traitée que de 5,30%.

D'autre part, et en ce qui concerne la paille traitée par du vernis et l'eau chaude, on a enregistré des valeurs plus ou moins moyennes soient des réductions d'environ 10,61% et 12,89%, respectivement, par rapport au cas de la paille non traitée.

D'une façon générale, on peut dire que les valeurs des conductivités thermiques sont un peu élevées en comparaison avec leurs masses volumiques, cela est dû au fait que les essais thermiques ont été réalisés sur des échantillons qui n'ont pas subi un séchage préalable, c.-à-d. dans les conditions climatiques du laboratoire d'essai (température et l'humidité).

IV.6.2. Diffusivité thermique

Les diffusivités thermiques des bétons de sables à base des pailles avec et sans traitements sont présentées dans le **Tableau IV.9.** et la **Figure IV.9.**

Tableau IV.9. La diffusivité thermique des compositions étudiées.

Type de traitement	Diffusivité thermique (m^2/s)×10^{-6}
Sans traitement	0,451
L'eau chaude	0,320
Gasoil	0,366
Huile de vidange	0,310
Le vernis	0,429

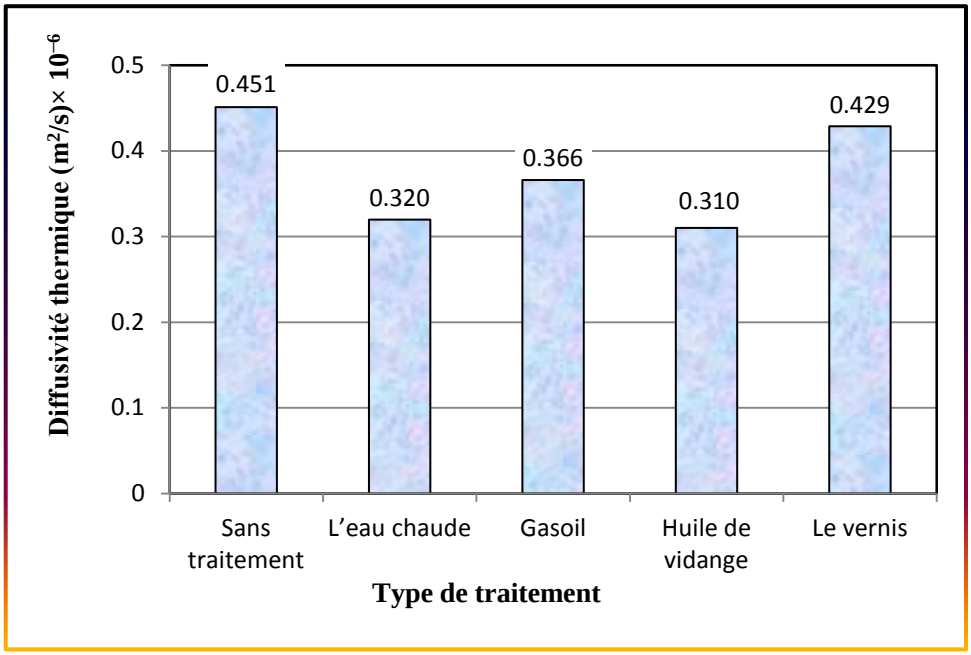


Figure IV.9. La diffusivité thermique des compositions étudiées.

D'abord, il faut signaler que tous les traitements ont donné des diffusivités thermiques inférieures à celle donné dans le cas de la paille non traitées.

Par ailleurs, on remarque que la diffusivité thermique évolue selon une corrélation directe avec la conductivité thermique ; elle augmente d'une façon parallèle avec la conductivité thermique, sauf pour le traitement par vernis ; bien que celui-ci ait donné un résultat moindre par rapport au traitement au gasoil dans la conductivité thermique : nous avons trouvé plus de celui-ci dans la diffusivité thermique avec un pourcentage de 17,21%.

Il est aussi à noter que la composition du béton de paille traitée à l'huile de vidange a donné la plus faible valeur par rapport aux autres traitements. Par rapport à la paille non traitée, elle a donné des résultats plus faibles de 31,26%.

IV.6.3. Chaleur spécifique massique

Les valeurs des chaleurs spécifiques massiques des bétons de sables à base des pailles avec et sans traitements sont présentées dans le **Tableau IV.10.** et la **Figure IV.10.**

A noter que la chaleur spécifique massique du matériau est déterminée, par calcul, en tenant compte de la chaleur spécifique volumique et la masse volumique du béton.

Tableau IV.10. La chaleur spécifique massique des compositions étudiées.

Type de traitement	Chaleur spécifique massique (J/kg.K)
Sans traitement	1560,25
L'eau chaude	1880,84
Gasoil	1685,60
Huile de vidange	1175,01
Le vernis	1330,44

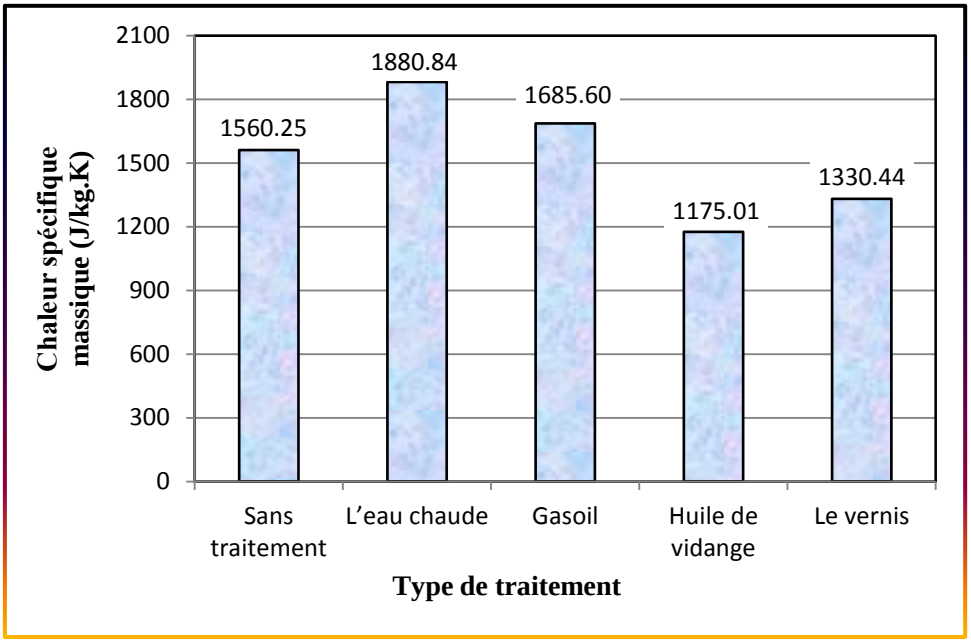


Figure IV.10. La chaleur spécifique massique des compositions étudiées.

Contrairement à ce que nous avons observé dans la diffusivité thermique, nous notons une augmentation de la chaleur spécifique dans toutes les compositions avec des pailles traitées par rapport à la paille non traitée ; le pourcentage d'augmentation dépasse parfois les 20%, sauf pour le traitement au vernis et l'huile de vidange, dont les chaleurs spécifiques ont diminué respectivement de 14,73% et 24,69%.

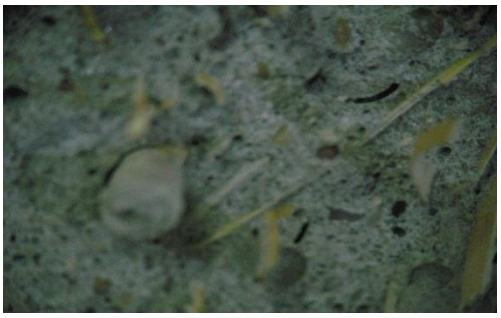
IV.7. Etude macro-structurelle

Afin d'avoir une idée sur la microstructure des composites étudiés et de voir de près de la liaison matrice - paille, des images ont été prises par microscope optique avec une échelle agrandie. La **Figure IV.11.** montre l'aspect général des différentes compositions étudiées.

A noter que ces visualisations ont été réalisées sur des éprouvettes résultant de l'essai de flexion.




Sans traitement (G = 20)




Paille traitée au gasoil (G = 10) | Paille traitée à l'eau chaude (G = 10)




Paille traitée à l'huile de vidange (G = 20) | Paille traitée au vernis (G = 10)

Figure IV.11. Aspect général des bétons de sable à base de pailles d'orge avec et sans traitement.

D'après l'aspect général, on remarque la présence d'une bonne adhérence entre « la paille et la matrice », et le composite parait plus ou moins homogène dans toutes les compositions que ce soit avec des pailles traitées ou sans traitement.

Le phénomène d'adhérence est plus remarquable surtout en cas du béton à base de paille traitée à l'huile de vidange où on note la présence d'une grande cohésion, ce qui explique les bons résultats obtenus pour les propriétés mécaniques; nous notons également des

traces de la paille de forme tubulaire (obtenues suit à l'arrachement de la paille du béton lors de la flexion) sur la surface du béton, ce qui conduit à une diminution des propriétés mécaniques.

On note également la petite proportion de pores dans la matrice à cause de la petite quantité de paille d'orge ajoutée au béton de sable (15kg/m^3).

On remarque la présence du béton dans la paille tubulaire avec toutes les compositions à l'exception du traitement par le vernis où on note un vide dans la paille tubulaire, ce vide est dû au vernis qui a rempli la paille de deux côtés et n'a pas laisse le béton y pénétrer.

D'autre part, nous notons aussi que l'orientation de la paille dans le béton a été faite de façon aléatoire, en raison de la vibration pendant le coulage du béton dans les moules. Une autre orientation bien choisie pourrait peut-être donner une meilleure amélioration.

IV.8. Conclusion

Après l'étude de l'influence des différents traitements effectués sur les pailles d'orge, nous pouvons conclure:

- Le traitement par l'huile de vidange a donné des résultats mieux dans la résistance à la compression et les propriétés thermiques, cependant, des résultats acceptables pour la réduction de la porosité et la résistance à la flexion ; par contre, il a agit négativement sur la stabilité dimensionnelle qui se manifeste par une augmentation du retrait et aussi de la masse volumique du béton.
- Le traitement par le gasoil est le plus efficace en ce qui concerne la réduction du retrait. Néanmoins, cet avantage ne se retrouve pas dans les autres propriétés.
- Le traitement par l'eau chaude a apporté une bonne amélioration de la résistance à la flexion, il a donné également des résultats acceptables dans les caractéristiques thermiques. Et même la masse volumique n'a pas augmenté beaucoup par rapport à la composition avec paille non traitée.
- Enfin, le traitement par le vernis a réussi à améliorer la plupart des caractéristiques étudiées dans notre recherche, mais à des taux plus bas que les autres traitements.

Généralement, tous les traitements des pailles d'orge ont donné une amélioration positive sur toutes les caractéristiques étudiées, à l'exception de la masse volumique du composite et le retrait important pour le traitement de l'huile de vidange. Peut-être un plus grand pourcentage de paille traitée pourrait donner une amélioration meilleure.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail étudie l'exploitation des matériaux locaux et la réutilisation des divers déchets. Il a pour objectif la recherche d'un béton de sable capable de supporter les charges d'une structure et de donner par la suite une bonne isolation thermique.

Les matériaux étudiés sont des matériaux locaux, des déchets et des matériaux artificiels. Les premiers comprennent le sable de dune, le sable alluvionnaire et la paille d'orge, et les déchets sont des fillers calcaires et la pouzzolane naturelle, tandis que les matériaux artificiels sont le ciment et la chaux hydraulique.

L'étude bibliographique a montré que le béton de sable utilisé dans plusieurs domaines de construction, en raison d'élévation du coût des matériaux traditionnels, raréfaction des gros granulats, la facilité d'utilisation du béton de sable, ainsi que la tendance à l'exploitation des matériaux locaux.

Malgré la diminution de la résistance mécanique du béton léger, il a des caractéristiques distinctes comme l'allègement et la bonne isolation thermique et acoustique. Ces caractéristiques lui ont permis de remplacer le béton ordinaire dans beaucoup de domaines de la construction ; il a également des effets directs sur la masse volumique qui influe directement sur la notion de confort et entraîne des implications économiques, telle que la réduction de la consommation énergétique des locaux.

Par ailleurs, les composites à fibres naturelles présentent d'immenses possibilités en tant que matériaux de rechange notamment comme des substituts de bois. Ces végétaux représentent un intérêt particulier pour les pays en développement comme l'Algérie vue leur abondance, leur faible coût, l'économie d'énergie et les applications comme les matériaux de substitution.

Ce travail est une continuation des travaux antérieurs, qui ont été menés sur le même béton de sable à base de paille d'orge sans traitement. A travers l'étude expérimentale on peut détecter les points suivants :

La caractérisation des matériaux utilisés a montré que le mélange de sable alluvionnaire-dunaire est un sable propre, plus dense, plus compact que les deux sables séparés et d'une granulométrie continue. Les fillers calcaires et les ajouts minéraux utilisés sont les mieux adaptés pour remplir les vides inter-granulaires de sable constituant le squelette du béton. La paille d'orge utilisée est hydrophile, d'une masse volumique apparente de 59,8 kg/m^3, et d'un coefficient d'absorption d'eau égale à 3,30.

L'utilisation de la paille d'orge en tant que matériau local dans la matrice de ciment encourage l'utilisation d'autres matériaux locaux trouvés en abondance dans notre pays.

L'allègement du béton de sable par la paille d'orge non traitée a monté que :

- L'ajout de la quantité de 15 kg/m^3 de paille d'orge au béton de sable a donné une faiblesse de masse volumique de 1895 kg/m^3, cette valeur lui a classé dans le domaine de béton léger.
- L'examen des propriétés mécaniques a montré que la résistance à la compression est considérée comme relativement faible et elle est d'environ 13 MPa.
- En comparaison avec plusieurs autres compositions de béton de sable, la valeur du retrait est un peu élevée de 0.830 mm/m.
- En ce qui concerne les propriétés thermiques, toutes les valeurs sont considérées comme un peu élevées en se référant à sa masse volumique, en particulier la conductivité thermique de 1,32 W/mK.

Afin d'améliorer les propriétés étudiées du béton de sable étudié, différents traitements ont été choisis et appliqués à la paille d'orge avant son incorporation dans le béton. A partir des résultats ainsi obtenus, on a pu conclure les points suivants:

- Les pailles d'orge traitées ont donné une amélioration sensible de résistance à la traction dans tous les cas de traitement par rapport à la paille non traitée.
- L'adhérence entre « la paille d'orge et les produits des traitements » a été généralement bonne pour les traitements par de l'eau chaude, le gasoil, l'émulsion de bitume, l'huile de vidange, l'huile de lin et le vernis, tandis que l'adhérence était faible dans le reste des traitements, en particulier dans le cas des traitements à enrobage au lait.
- La variation de la masse de la paille d'orge après les traitements, a eu une influence sur la masse volumique du béton. Les traitements par l'eau chaude, le gasoil, l'émulsion de bitume, l'huile de vidange, l'huile de lin et le vernis ne changent pas beaucoup de poids de la paille après le traitement, mais dans la suite des traitements, on a enregistré des augmentations de poids plus ou moins remarquables selon la nature du traitement utilisé.
- La facilité de la préparation des traitements a un rôle très important, en particulier lorsque la quantité de la paille d'orge est grande, comme le cas d'un chantier. Dans notre cas, les traitements par l'eau chaude, le gasoil, l'huile de vidange, l'huile de lin, les laits d'enrobage et la colle de bois semblent permettre une préparation plus facile par rapport aux autres traitements.

A travers de ces critères, on a tout ce qui est suffisant pour la sélection des traitements appropriés ; ceux qui ont été sélectionnés pour la suite de l'étude sont : l'eau chaude, le gasoil, l'huile de vidange et le vernis.

A partir de l'étude de l'influence de quatre traitements sélectionnés sur diverses caractéristiques du béton de sable étudiées, on peut conclure que :

- Les propriétés mécaniques du composite ont montré que la paille d'orge traitée par l'huile de vidange et par l'eau chaude ont donné une amélioration remarquable par rapport à la paille d'orge non traitée et les autres traitements. L'huile de vidange a donné le meilleur résultat dans la résistance à la compression et l'eau chaude a donné le meilleur résultat dans la résistance à la flexion.
- En raison des types de traitements utilisés, les masses volumiques des compositions ont augmenté d'un certain pourcentage par rapport à la paille d'orge non traitée. Cette augmentation de la masse volumique est accompagnée d'une diminution de la porosité.
- L'étude des variations dimensionnelles des compositions a montré que le traitement de la paille par le gasoil a donné une réduction notable par rapport aux autres, mais le traitement par l'huile de vidange a présenté une valeur plus élevée.
- L'étude macro-structurelle est effectuée par la technique d'image, cette technique a montré que les pailles d'orge, dans tous les cas de traitement, sont bien réparties avec une bonne adhérence paille-matrice. Dans l'ensemble, l'homogénéité apparaît relativement bonne dans tous les composites.
- La conductivité thermique est une propriété importante pour connaître les isolations thermiques de matériaux. L'étude de cette propriété a montré qu'il y avait une bonne amélioration dans tous les cas de traitements par rapport à la paille non traitée, surtout dans le cas de traitement par de l'huile de vidange qui a donné une diminution qui dépasse 50% par rapport au cas "sans traitement".
- En examinant les résultats mécaniques et thermiques, il paraît que le meilleur traitement employé est bien celui de "l'huile de vidange", néanmoins, ce type de traitement augmente le retrait du matériau constituant ainsi un inconvénient puisque le retrait enregistré dans ce cas a dépassé la valeur limite qui est égale à 1 mm/m. Cependant, si on implique le retrait dans la comparaison de l'effet des différents traitements, on peut conclure que les traitements par « l'eau chaude et le gasoil » constituent les meilleurs compromis.

Les résultats trouvés pour d'application de différents nouveaux traitements sur la paille d'orge en vue de l'incorporer dans le béton de sable sont très encourageants et ouvrent des perspectives de recherches d'utilisation de ces produits de traitements sur d'autres fibres.

À la fin de cette étude, on peut dire qu'il y a des possibilités pouvant améliorer davantage les propriétés du béton de sable à base de paille d'orge, à savoir :

- L'augmentation de la quantité de paille d'orge traitée, en particulier en termes d'amélioration de la masse volumique du béton.
- L'ajout d'autres fibres à la paille d'orge, comme " fibre d'Alfa ".
- Jouer sur l'orientation de la paille d'orge à l'intérieur de la matrice.
- Utilisation d'autres types de traitements qui n'ont pas été étudiées dans le présent travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **CNERIB, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment (Déc. 1992)** : " Bétons de sable ". Rapport de recherches, Tipaza, Algérie.

[2] **Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1994)** : " Béton de sable, caractéristiques et pratique d'utilisation ". Projet « SABLOCRETE ».

[3] **D. Achoura (2005)** : " Contribution à l'étude de la formulation et de la caractérisation des béton de sable à base de laitiers de hauts fourneaux d'EL-HADJAR ". Thèse de doctorat, Université de Annaba, Algérie.

[4] **A. Benaissa (nov. 1992)** : " Déformations différées d'un béton de sable ". Thèse de doctorat, Université de bordeaux, France.

[5] **M. Bederina (2007)** : " Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois ". Thèse de doctorat, UAT de Laghouat, Algérie.

[6] **M. Bederina (2000)** : " Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sable ". Mémoire de magistère, UAT de Laghouat, Algérie.

[7] **Z. Boudaoud** : " Etude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaâda ". Mémoire de magistère, Université Med Boudiaf de M'sila, Algérie.

[8] **M. ELHACHEM (Fér. 1990) : "** Etude de l'influence de la fibre de fonte sur le fluage et le retrait du béton ". Thèse de doctorat, de l'E.C.P.

[9] **R.N. SWAMY, H.M. BAHIA (1985) : "** The effectiveness of steel fiber as shear reinforcement ". USA. Concr. Inst. Des. Const. Vol 7, N° :3.

[10] **TH. VALADE (Déc. 1987) : "** Comportement des bétons armés de fibres métalliques ". Mémoire de recherche développement. ENS de CACHAN.

[11] **M. Adam. Neville (2000)** : " Propriétés des bétons ". Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris, France.

[12] **G. Dreux, J. Festa (1998)** : " Nouveau guide du béton et de ses constitutions ". Editions Eyrolles, Huitième éditions, Paris, France.

[13] **G. Gluais, J.P. Bru (1993)** : " Confortement d'une digue en enrochements par injection de béton de sable ". Bulletin de liaison, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris, N° : 183- NIT 3697, pp. 91-95.

[14] **Rapport de Laboratoire Central des Ponts et Chaussés (Déc. 1979)** : " Les pieux forés ". Recueil des règles de l'art.

[15] **T. Bouziani (2013)** : " Formulation et caractérisation d'un béton de sable fibré auto-plaçant ". Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, Algérie.

[16] **T. Bouziani, A. Benmounah, M. Lamara, M. Bederina (Mai. 2009)** : " Formulation d'un béton sec : Application à la préfabrication de blocs de construction ". 1er Colloque National sur l'Aménagement du Territoire : Les Villes des Hautes Plaines, Enjeux et Défis, Université Ziane Achour de Djelfa, le 05 et 06 Mai, Algérie.

[17] **T. Bouziani, M. Lamara, M. Bederina (Mar. 2011)** : " Valorisation de sable des dunes dans la préfabrication des blocs de béton ". 1er Séminaire National de Génie Civil sur les Matériaux et Protection de l'Environnement, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, le 14 et 15 Mars, Algérie.

[18] **G. Coquillat (Jui. 1992)** : " Béton de sable à haute performance ". Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du BTP (CEBTP), Rapport de recherche. Bordeaux, France.

[19] **A. Benaissa, A. Kamen, A. Chouicha, S. Malab (2008)** : " Panneau 3D au béton de sable ". Matériaux et Structures, Vol 41, pp. 1377-1391.

[20] **J. Ambroise (Mar. 1993)** : " Bétons de sable fluides : propriétés mécaniques et physiques ". Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, France.

[21] **J. Ambroise, J. Pera, M. Sari (Sep. 1993)** : " L'adjuvantation des bétons de sable ". Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, France.

[22] **J.J. Chauvin, G. Grimaldi (Sep. 1988)** : " Les bétons de sable ". Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°157, pp. 9-15.

[23] **G. Chauvillard, O. Bassuyaux (Sep-Oct. 1996)** : " Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance Fixées ". Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N° 205.

[24] **A. Benaissa, P. Morlier, C. Viguier (1993)** : " Microstructure du béton de sable ". Cement and concrete research, Vol 23, pp. 663-674.

[25] **Technologie du bâtiment - Gros œuvre** : " Ouvrage en béton armé ". Les éditions des Foucher.

[26] **A. Lootvoet (Mai. 1984)** : " Angularité et maniabilité des sables à béton ". Symposium International sur les granulats, Nice, France.

[27] **M. Bederina, M.M. Khenfer, R.M. Dheilly, M. Quéneudec (2005)** : " Reuse of local sand : effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes ". Cement and Concrete Research, N° 35, pp. 1172-1179.

[28] **B. Felekoğlu, K. Tosun, B. Baradan (2009)** : " Effects of fiber type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites ". Cement and Concrete Research, N° 39, pp.1023-1032.

[29] B. Felekoğlu, S. Türkel, Y. Altuntas (2007) : " Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars ". Cement and Concrete Composites, N° 29, pp. 391-396.

[30] M. Arnould, M. Virlogeux (1986) : " Granulats et bétons légers ". Bilan de 10 ans de recherche. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

[31] F. Larrard (1995) : " Une approche de la formulation des bétons légers de structure". Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, France.

[32] P. Cormon (1973) : " Bétons légers d'aujourd'hui ". Editions Eyrolles, Paris, France.

[33] AFNOR : " Bétons- Bétons de sable ". Projet P 18-500.

[34] Document Technique Réglementaire (1997) : " D.T.R C 3-2 ", Algérie.

[35] Béton Armé : " Règles BAEL, Bétons de granulats légers artificiels ". Par Jean PERCHAT.

[36] Rilem (1970) : " Commission des bétons légers, Terminologie et définition ". Matériaux et construction, N°13, pp. 60-69.

[37] A. Steopoe (1970) : " La durabilité du béton ". Eyrolles, Paris, France.

[38] M.H. Zhang, O.E. Gjorv (Sep- Oct. 1991) : " Permeability of high-strength lightweight concrete ". ACI Materials Journal, Vol 88, N^{o} 5, pp. 463-469.

[39] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne (2007) : " Short natural-fiber reinforced polyethylene and natural rubber composites : Effect of silane coupling agents and fibers loading ". Composites Science and Technology, Vol 67, pp. 1627-1639.

[40] Suganti Ramarad (Jun. 2008) : " Preparation and properties of kenaf bast fiber filled (plasticized) poly (lactic acid) composites ". Mémoire de Master, Université de Nottingham, Malaysia.

[41] D. Nabi Saheb, J.P. Jog (1999) : " Natural fiber polymer composites ". A Review Advances in Polymer Technology, Vol 18, N^{o}4, pp. 351-363.

[42] Xue Li, Lope G. Tabil, Satyanarayan Panigrahi (2007) : " Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites ". A Review J. Polymer Environ, Vol 15, pp. 25-33.

[43] Nguyen Huy Tung, Hiroshi Yamamoto, Takashi Matsuoka, Toru Fujii (2004) : " Effect of surface treatment on interfacial strength between bamboo fiber and PP resin". JSME International Journal, Series A, Vol 47, N^{o}4, pp. 561-565.

[44] M.B. Fernanda Coutinho, H.S. Thais Costa (1999) : " Performance of polypropylene-wood fiber composites ". Polymer Testing, Vol 18, pp. 581-587.

[45] Ryoko Tokoro, Duc Minh Vu, Kazuya Okubo, Tatsuya Tanaka, Toru Fujii, Takayasu Fujiura (2008) : " How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers ". J. Mater Science, Vol 43, pp. 775-787.

[46] **X. Colom, F. Carrasco, P. Pagès, J. Canavate (2003)** : " Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites ". Composites Science and Technology, Vol 63, pp. 161-169.

[47] **Maria Alice Martins, Ines Joekes (2003)** : " Tire rubber-sisal composites: Effect of mercerization and acetylation on reinforcement ". Journal of Applied Polymer Science, Vol 89, pp. 2507-2515.

[48] **Maya Jacob, Sabu Thomas, K.T. Varughese (2004)** : " Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites ". Composites Science and Technology, Vol 64, pp. 955-965.

[49] **Doan Thi Thu Loan (2006)** : " Investigation on jute fibers and their composites based on polypropylene and epoxy matrices ". Thèse de doctorat, Université de Dresden. Allemagne.

[50] **Min Zhi Rong, Ming Qiu Zhang, Yuan Liu, Gui Cheng Yang, Han Min Zeng (2001)** : " The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites ". Composites Science and Technology, Vol 61, pp. 1437-1447.

[51] **R.S.P. COUTTS (1983)** : " Flax fibers as a reinforcement in cement mortar ". The international journal of cement composites and lightweight concrete, Vol 5, N°4, pp. 257-262.

[52] **R.H.S. Swamy, B.M. Ahuja, S. Krishnamoorthy (Fév. 1984)** : " Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo, fibers ". The international journal of cement composite and light weight concrete, Vol 5, N°1.

[53] **L. Nilson (1975)** : " Reinforced concrete with sisal and other vegetable fiber ". Swedish Council for Building Research, document D14.

[54] **T.S.R. Ayyar, P.K. Mirihagalla (1976)** : " Elephant grass fibers and reinforcing fiber ". Magazine of Concrete Research, Vol 28, pp. 162-167.

[55] **A.K. Bledzki, J. Gassan (1999)** : " Composites reinforced with cellulose based fibers ". Elsevier, Progress in polymer science, Vol 24, pp. 221-274.

[56] **B. Belhadj, M. Bederina, N. Montrelay, J. Houessou, M. Quéneudec (2014)** : " Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete ". Construction and Building Materials, Vol 66, pp. 247-258.

[57] **P. Jodin (1994)** : " Le Bois, Matériau d'Ingénierie ". Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, Nancy, France.

[58] **Godin, François Ghysel, Richard Agneessens, Thomas Schmit, Sébastien Gofflot, Stéphane Lamaudière, Georges Sinnaeve, Jean- Pierre Goffart, Patrick A. Gerin, Didier Stilmant, Jérôme Delcarte (2010)** : " Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération ". Biotechnol. Agron. Soc. Environ, Vol 14(S2), pp. 549-560.

[59] Gilberto Siqueira, Julien Bras, Alain Dufresne (2010) : " Cellulosic bionanocomposites ". A Review of Preparation, Properties and Applications, Polymers, Vol 2, pp. 728-765.

[60] R.M. Rowell, R.A. Young, J.K. Rowell (1997) : " Paper and composites from agro-based resources ". Ed R.M. Rowell, Lewis publishers, Boca Raton, USA.

[61] A.K. Mazumdar (1955) : " A note on the hemicelluloses of some bast fibers ". Journal of Scientific and Industrial Research, Vol 14, pp. 542-544.

[62] F.R.D. Tolëdo, K. Scrivener, G.L. England, K. Ghavami (2000) : " Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites ". Elsevier, Cement and concrete composite, Vol 22, pp. 127-143.

[63] A. Degiovanni : " Conductivité et diffusivité thermique des solides ". Techniques de l'ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, Fiche N° R 2850.

[64] Ahmed Salim Brahim Djelloul (2008) : " Radiométrie photo-thermique sous excitation aléatoire : application à la mesure de propriétés thermo-physiques ". Thèse de doctorat, Université de Reims, France.

[65] Fiche technique (2014) : " Manuel de la construction CIMPOR ". Portugal.

[66] B. Belhadj, M. Bederina, Z. Makhloufi, A. Goullieux, M. Quéneudec (2015) : " Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment ". Energy and Buildings, Vol 87, pp. 166-175.

[67] M.M. Benmalek (juin. 1993) : " Contribution à l'étude de béton de sable dunaire pour éléments de structures ". Thèse de magistère, ENP, Algérie.

[68] H. Khelafi (2000) : " Contribution à l'étude expérimentale de la brique silico-calcaire". 1er Séminaire National, Mécanique des géomatériaux et structures. Guelma, Algérie.

[69] R. Dupain, R. Lanchan, J.C. Saint-Arroman (1995) : " Granulats, sols, ciment et bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par mes essais de laboratoire ". Edition Casteilla.

[70] Notice Technique (2008) : " MEDAPLAST-SP40 ". Granitex, pp. 93.

[71] M. Gotteicha (2005) : " Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités ". Thèse de Magister, Université Amar thelidji de Laghouat, Algérie.

[72] A. Ledhem (1997) : " Contribution à l'étude d'un béton de bois. Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois ". Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, France.

[73] Marius Eustafievici, Ovidiu Muntean, Marcela Muntean (Mar. 2002) : " Influence of the waste characteristics and its chemical treatment on the composites properties ". NOCMAT/3- Vietnam, International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies, N° 12-13, pp. 107-112, Hanoi, Vietnam.

[74] L. Jennifer , Pehanich, P.R. Blankenhom, M.R. Silsbee (2004) : " Wood fibber surface treatment level effects on select mechanical properties of wood fiber-cement composite ". Cement and concrete research, Vol 34, pp. 59-65.

[75] A. Ledhem, K. Al-rim, M. Queneudec (1996) : " Etude des paramètres de fabrication d'un composite argile-ciment-bois ". Materials and Structures, Vol 29, pp. 514-518.

[76] B. Belhadj (2007) : " Amélioration des propriétés thermo-physiques des bétons de sables allégés par des copeaux de bois en milieux arides : Cas de la ville de laghouat ". Thèse de Magister, Université Amar thelidji de Laghouat, Algérie.

[77] M. Gustavsson, E. Karawacki, S.E. Gustafsson (1994) : " Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat of thin samples from transient measurements with hot-disk sensors ". Review of Scientific Instruments, Vol 65, pp. 3856-3859.

[78] S.E. Gustafsson (1991) : " Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials ". Review of Scientific Instruments, Vol 62, pp. 797-804.

[79] M. Mouloud (2007) : " Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie ". Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algérie.

ANNEXE

	
a- Paille traitée à l'huile de vidange (cassée 3,5 cm)	b- Paille traitée à l'huile de vidange (tubulaire 3,5cm)
	
c- Paille traitée au gasoil (cassée 3,5cm)	d- Paille traitée au gasoil (tubulaire 3,5cm)
	
e- Paille traitée au vernis (cassée 2 cm)	f- Paille traitée au vernis (tubulaire 3,5 cm)

	
g- Paille traitée à l'eau chaude (cassée 3,5cm)	h- Paille traitée à l'eau chaude (tubulaire 3,5 cm)

Photos n° 1. Pailles traitées avec de quatre traitements sélectionnés.







Photos n° 2. Essai de flexion (03 points).







Photos n° 3. Essai de compression (presse hydraulique).



Photos n° 4. Dispositif de mesure de retrait.



Photos n° 5. Le malaxeur utilisé dans notre étude.