



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

01 BP 594 Ouagadougou 01 Tel : (226) 50 30 71 16/17 – 50 30 20 53 Fax : (226) 31 27 24 Email : www.2ie-edu.org

THEME : CARACTERISATION DES BETONS RENFORCES A L'AIDE DES FIBRES VEGETALES

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : GENIE CIVIL

Présenté et soutenu publiquement le [...] juin 2011 par :

ABDOULAYE Souleymane Adoum

Travaux dirigés par :

Pr. Jean Hugues THOMASSIN, Professeur associé à 2iE, UTR-ISM

Dr. Raffaele VINAI, Enseignant Chercheur, chef UTR-ISM

Dr. David TOGUYENI, Enseignant Chercheur à l'Université de Ouagadougou

Promotion [2010/2011]

DEDICACE

A ma mère KOUBRA Idriss

A mon père SOULEYMANE Adoum Yourane

A mon oncle MOULY MAHAMAT Brahim Yourane

A toute ma famille

A mes frères et sœurs

A mes amis

Je dédie ce mémoire

REMERCIEMENT

Le présent travail a été réalisé au Laboratoire de Génie Civil de 2iE et au Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement de l'Université de Ouagadougou.

Qu'il soit permis d'exprimer à travers ces lignes, toute notre reconnaissance et notre profonde gratitude à toutes les personnes de bonne volonté, qui de près ou de loin, de façon directe ou indirecte ont contribué à la réussite de ce travail. Particulièrement nos encadrateurs :

- M. Jean-Hughes THOMASSIN, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son encouragement tout au long de ce travail. Je tiens également le remercier pour la lecture, les nombreuses remarques et corrections concernant ce manuscrit ;
- M. Raffaele VINAI, pour m'avoir suivi tout au long de ce travail, je tiens à souligner sa disponibilité, ses idées, ses expériences et sa confiance qu'il m'a accordée ;
- M. David TAGUYENI, pour m'avoir élaboré le protocole expérimental et m'accueilli chaleureusement au sein de Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement pour les essais thermiques ;

Nous remercions également :

- M. Ismaila GUEYE, pour ses enseignements et ses conseils durant mes années passées au l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et d'Environnement;
- L'équipe pédagogique du 2iE pour l'enseignement et leur disponibilité à assurer notre formation professionnelle ;
- M. COULIBALY Ousmane du Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement, pour avoir mis à notre disposition les matériels nécessaires et assistance technique dans nos mesures thermiques ;
- M. Salif KABORE du Laboratoire Génie Civil de 2iE pour son attention et les moyens mis à notre disposition pour la réussite de ce travail ;

Enfin nous remercions :

- Nos parents, frères et sœurs et toute la grande famille YOURANE
- Tous nos amis, et particulièrement Dr. M. A. Bolti, A. A. Limane, M. Samson
- Tous les étudiants du 2iE (2009-2011) pour l'ambiance, l'esprit de paix et d'harmonie qu'ils ont su préserver au sein de l'Institut, et plus particulièrement la deuxième promotion de Master du 2iE.

RESUME

La présente étude porte sur la détermination des propriétés mécaniques et thermiques du béton renforcé à l'aide des fibres d'andropogon. Ces fibres d'andropogon ont été incorporées dans le mélange des constituants du béton à différents pourcentages massiques à savoir 2,5% ; 5% et 10%. C'est pour donner une meilleure appréciation des caractéristiques mécaniques et thermiques de ce matériau que des essais de compression, de flexion et thermiques ont été réalisés sur des éprouvettes et panneaux du béton (référence et fibres) des dimensions respectives $\varnothing 10 \times 20$ cm, $10 \times 10 \times 40$ cm et $3 \times 26 \times 33$ cm pour 7 ; 14 et 28 jours au cure sous l'eau.

Les résultats issus de l'étude mécanique montrent que le béton de fibres a des résistances à la compression à 28 jours ($R_c = 3,29$ MPa pour 2,5%, $R_c = 2,01$ MPa pour 5% et $R_c = 1,67$ MPa pour 10%) faibles par rapport au béton de référence ($R_c = 7,45$ MPa), ce qui confirme que le béton de fibres est moins compact. Quant aux résultats de résistances à la traction par flexion à 28 jours au cure sous l'eau, les bétons des fibres donnent aussi des valeurs ($R_f = 1,46$ MPa pour 2,5% ; $R_f = 1,50$ MPa pour 5% et $R_f = 0,18$ MPa pour 10%) plus faibles que le béton de référence ($R_f = 2,99$ MPa).

Du point de vue thermique, il en ressort que l'échantillon de référence a une conductivité thermique ($\lambda = 1,799$ W/m.°K) très proche de béton plein ($\lambda = 1,75$ W/m.°K), alors que les conductivités thermiques de deux autres échantillons diminuent avec l'augmentation des fibres ($\lambda = 1,731$ W/m.°K pour 2,5% et $\lambda = 1,469$ W/m.°K pour 5%). Ceci s'explique par le fait que les fibres incorporées engendrent dans le matériau une porosité et une baisse de masse volumique. Les fibres améliorent donc le pouvoir caractéristique thermique du matériau.

Mots clés :

-
- 1- Fibres d'andropogon
 - 2- Béton des fibres
 - 3- Compression
 - 4- Traction par flexion
 - 5- Conductivité

ABSTRACT

The present study is about the determination of the mechanical and physical properties of the concrete reinforced with the help of andropogon fibers. Andropogon fibers have been incorporated in the mixture of the constituent of the concrete at different mass percentages such as 2.5%, 5% and 10%. It is to give a better appreciation of the mechanical and thermal characteristics of this material that compression, bending and thermal tests have been realized on test-tubes and panels of the concrete (reference and fibers) on the following respective measurements Ø10x20cm, 10x 10x40 cm and 3x26x33cm for 7, 14 and 28 days to the cleans under water.

The results got from the mechanical survey show that the concrete of fibers has weak resistances to the compression of 28 days ($R_c=3,29\text{MPa}$ for 2,5%, $R_c=2,01\text{MPa}$ for 5% and $1,67\text{MPa}$ for 10%) comparing to the concrete reference ($R_c=7,45\text{MPa}$), what confirms that the concrete of fibers is less compact. From the results of resistances to traction by bending at 28 days to the cleans under water, the concrete of fibers also gives values ($R_f = 3,29\text{MPa}$ for 2,5%, $R_f = 2,01\text{MPa}$ for 5% and $R_f = 1,67\text{MPa}$ for 10%) weaker that the concrete reference ($R_f = 7,45\text{MPa}$).

From the thermal view point, it is been said that the sample of reference has a thermal conductivity ($\lambda=1,799\text{ W/m.}^\circ\text{K}$) very close to the full concrete ($\lambda=1,75\text{W/m.}^\circ\text{K}$), whereas the thermal conductivities of the two other samples decrease with the increase of fibers ($\lambda=1,731\text{W/m.}^\circ\text{K}$ for 2,5% and $\lambda=1,469\text{W/m.}^\circ\text{K}$ for 5%). It explains by the fact that the incorporated fibers generate porosity in the material and a decrease of volumic mass. Therefore, fibers improve the thermal characteristic power of the material.

Key words:

-
- 1- Fibers of andropogon
 - 2- Concrete of fibers
 - 3- Compression
 - 4- Traction by bending
 - 5- Conductivity

SOMMAIRE

DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENT	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ABREVIATIONS	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES PHOTO	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : PROBLEMATIQUE GENERALE	2
I.1. PRESENTATION DE CADRE D'ETUDE	2
I.2. PROBLEMATIQUE	2
I.3. OBJECTIF GENERAL D'ETUDE.....	3
I.3.1. OBJECTIF GLOBAL	3
I.3.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES.....	3
I.4. METHEDOLOGIE D'ETUDE	3
PREMIERE PARTIE : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	5
CHAPITRE II: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	6
II.1. MATERIAUX RENFORCES PAR DES FIBRES VEGETALES.....	6
II.2. MATRICE CIMENTAIRE ET FIBRES VEGETALES.....	8
II.2.1. PROPRIETES MECANIQUES DU COMPOSITE COURANT.	8
II.2.2. PROPRIETES THERMIQUES DU COMPOSITE.....	9
II.3. CIMENT ET SES MECANISMES D'HYDRATATION	10
II.3.1. DEFINITION DE CIMENT	10
II.3.2. COMPOSITION DU CIMENT PORTLAND	11
II.3.3. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL (CPA).....	11

Conclusion partielle :	12
CHAPITRE III: CONSTITUTANTS DU BETON ET SA FORMULATION	13
III.1. DEFINITION DU BETON.....	13
III.2. LES ELEMENTS DE CONSTITUTION DU BETON.....	13
III.2.1. CIMENT	13
III.2.2. GRANULATS.....	13
III.2.3. EAU	15
III.3. CARACTERISATION DES GRANULATS	15
III.2.1. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES GRANULATS.....	15
III.2.2. CARACTERISATION PHYSIQUE DES GRANULATS	16
III.4. FORMULATION DE BETON PAR LA METHODE DE DREUX-GORISE	19
Conclusion partielle:	20
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS & METHODES	21
CHAPITRE IV : MATERIELS ET MATHODES D'ETUDES	22
IV.1. PRESENTATION DES METHODES	22
IV.1.1. CHOIX DES MATERIAUX.....	22
IV.1.2. COMPOSITION DE MELANGE.....	22
IV.1.3. MALAXAGE A LA BETONNIERE.....	22
IV.1.4. CONFECTION DES EPROUVETTES ET DES PANNEAUX	23
IV.2. REALISATION DES ESSAIS POUR LES CARACTERISATIONS.....	27
IV.2.1. CARACTERISATIONS MECANQUES DES EPROUVETTES EN COMPRESSION ET EN FLEXION	27
IV.2.2. CARACTERISATION THERMIQUE DES PANNEAUX	29
IV.2.3. DEFINITION DES PARAMETRES THERMO-PHYSIQUES.....	29
IV.2.4. METHODE DE PLAN CHAUD	31
IV.2.5. DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	32
IV.2.6. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES	33
Conclusion partielle:	33
TROISIEME PARTIE : RESULTATS & INTERPRETATION.....	34

CHAPITRE V: RESULTATS ET DISCUSSIONS DES ESSAIS DE CARACTERISATION	35
V.1. ESSAIS DE COMPRESSION	35
V.2. ESSAIS DE TRACTION PAR FLEXION	37
V.3. ESSAIS THERMIQUES	39
V.3.1. INTERPRETATION DES COURBES DE LA TEMPERATURES $T_i(t)$	39
V.3.2. TRACE DES COURBES $T_0(t) - T_0 = f\sqrt{(t)}$	40
V.3.3. RESULTATS DES PARAMETRES THERMOPHYSIQUES	40
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	42
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	44
ANNEXES.....	45

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

CDI : Centre de Documentation d'Informatique

GIEC : Groupe International d'Experts sur l'Evolution du Climat

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

CPA : Ciment Portland Artificiel

ONEA : Office National de l'Eau et de l'Assainissement

NF : Norme Française

NE : Norme Européenne

BF : Béton Fibré

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau n°1 : caractéristiques mécaniques de quelques composites.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau n°2: conductivité thermique des quelques essences des fibres et matériaux de construction.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau n°3: composition des phases de clinker.....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau n°4 : Récapitulatif des caractéristiques des granulats</i>	<i>18</i>
<i>Tableau n°5 : composition de mélange à réaliser</i>	<i>22</i>
<i>Tableau n°7 : composition massique des éléments de béton fibré et témoin des éprouvettes 10x10x40cm.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau n°8 : composition massique des éléments de béton fibré et témoin des panneaux 3x26x33cm</i>	<i>26</i>
<i>Tableau n°9 : Résultats des essais de compression</i>	<i>35</i>
<i>Tableau n°10 : Résultats des essais de compression.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>Tableau n°11: Analyse granulométrique sur le sable</i>	<i>50</i>
<i>Tableau n°12: Analyse granulométrique sur le gravier</i>	<i>50</i>
<i>Tableau n°13 : Essai de propreté des graviers.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau n°14: Essai d'équivalent de sable</i>	<i>51</i>
<i>Tableau n°15 : Poids spécifique γ_s au pycnomètre à air</i>	<i>51</i>
<i>Tableau n°16 : Quantitatif des matériaux d'essais.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau n°17 : Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton de référence.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau n°18 : Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton à 2,5% des fibres</i>	<i>58</i>
<i>Tableau n°19: Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton à 5% des fibres.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau n°20 : Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton à 10% des fibres</i>	<i>59</i>
<i>Tableau n°21: Détail de calculs de résistance à la compression R_C du béton de référence</i>	<i>55</i>
<i>Tableau n°22 : Détail de calculs de résistance à la compression R_C du béton à 2,5% des fibres</i>	<i>56</i>
<i>Tableau n°23 : Détail de calculs de résistance à la compression R_C du béton à 5% des fibres</i>	<i>56</i>
<i>Tableau n°24 : Détail de calculs de résistance à la compression R_C du béton à 10% des fibres.....</i>	<i>57</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure n°1 : représentation schématique de l'hydratation du ciment.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure n°2 : courbes granulométrique de sable 0/5 et gravier 5/20.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure n°3 : détermination de la masse volumique du granulat.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure n°4 : conduction dans une couche élémentaire du matériau.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure n°5 : Schéma de montage de la méthode du plan chaud avec deux échantillons.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure n°6 : résistance à la compression des bétons en fonction d'âges.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure n°7 : résistance à la traction par flexion des bétons en fonction d'âges.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure n°8 : allure des courbes de la température $T_i(t)$.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure n°9 : courbe expérimentale $T_0(t)-T_0(0)$ en fonction de $\sqrt{t}$ des échantillons 0% et 5% des fibres.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure n°10 : abaque d'évaluation approximative de dosage en ciment.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure n°11 : étude de la composition granulaire de béton de référence $D=20\text{mm}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure n°12 : courbe expérimentale $T_0(t)-T_0(0)$ en fonction de $\sqrt{t}$ de l'échantillon à 0% des fibres.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure n°13 : courbe expérimentale $T_0(t)-T_0(0)$ en fonction de $\sqrt{t}$ de l'échantillon à 2,5% des fibres.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure n°14 : courbe expérimentale $T_0(t)-T_0(0)$ en fonction de $\sqrt{t}$ de l'échantillon à 5% des fibres.....</i>	<i>61</i>

LISTE DES PHOTO

<i>Photo n°1 : pycnomètre à air.....</i>	<i>18</i>
<i>Photo n°3 : confection des éprouvettes $\varnothing 10 \times 20 \text{ cm}$.....</i>	<i>24</i>
<i>Photo n°2 : conservation des éprouvettes $\varnothing 10 \times 20 \text{ cm}$</i>	<i>24</i>
<i>Photo n°4 : moule prismatique en bois des dimensions $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$.....</i>	<i>25</i>
<i>Photo n°5 : confection des éprouvettes $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$.....</i>	<i>25</i>
<i>Photo n°6 : confection des panneaux $3 \times 26 \times 33 \text{ cm}$.....</i>	<i>26</i>
<i>Photo n°7 : portique d'essai universel didactique.....</i>	<i>27</i>
<i>Photo n° : dispositif des mesures de températures.....</i>	<i>32</i>
<i>Photo n° 9 : dispositif des essais de compression en béton fibré.....</i>	<i>55</i>
<i>Photo n°8 : dispositif des essais de traction par flexion d'une éprouvette en béton fibré.....</i>	<i>57</i>

INTRODUCTION

Au cours de ces dernières années, l'utilisation des fibres naturelles dans le béton ou mortier a suscité un certain engouement, notamment dans le secteur de bâtiment.

En effet ces matériaux ont fait l'objet de nombreuses études par des chercheurs [1]. Ces études ont révélées que les matériaux avec les fibres végétales et la matrice cimentaire s'inscrivent parfaitement dans la démarche de développement durable, que ce soit pour valoriser les ressources naturelles renouvelables ou pour réduire l'impact environnemental dans les émissions des gaz à effet de serre par la production du ciment.

Dans le cas du présent projet de fin d'étude, il a été utilisé les fibres d'andropogon dans le renfort. Ces fibres ont été retenues pour raisons de disponibilité et à même temps pour valoriser les ressources renouvelables et locales.

Le thème de la présente étude portant sur la « **Caractérisation des bétons renforcés à l'aides des fibres végétales** » a pour objectif de réaliser des éprouvettes et des panneaux faits avec ces matériaux afin de déterminer leurs caractéristiques mécaniques et thermiques. La connaissance des propriétés mécaniques et thermiques de ces matériaux a des avantages économiques et environnementaux pour son utilisation dans le domaine de génie civil.

Ce rapport s'articule autour de cinq chapitres:

- ✓ **Le premier chapitre** dégage les problématiques, les objectifs et émet la méthodologie d'étude ;
- ✓ **Le deuxième chapitre** est consacré à la recherche bibliographique sur la thématique béton des fibres ;
- ✓ **Le troisième chapitre** donne un aperçu détaillé sur les principaux constituants de béton et sa formulation ;
- ✓ **Le quatrième chapitre**, désigné par matériels & méthodes décrit les matériels utilisés, les différentes compositions du constituant des bétons formulés sur la base de protocole expérimental et les méthodes d'analyse de la caractérisation des échantillons ;
- ✓ **Le cinquième chapitre** est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats issus des essais de caractérisation mécanique et thermique des bétons (témoin et fibré) afin de les discuter et d'en comparer avec ceux des travaux similaires.

Le document se terminera par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats et des perspectives à envisager pour des études complémentaires.

CHAPITRE I : PROBLEMATIQUE GENERALE

I.1. PRESENTATION DU CADRE D'ETUDE

Dans le cadre de développement durable, les plupart des pays en voie développement du continent africain et notamment le Burkina Faso à travers les grandes écoles et l'université du pays ont pris l'initiative de rechercher des nouveaux matériaux de construction renforcés à l'aide des fibres végétales qui répondent au souci de développement social et économique.

Le renforcement des matériaux de construction, en l'occurrence les bétons ou les mortiers, par des fibres est une technique de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leur résistance à la traction et à la fissuration.

Ce présent projet vise à déterminer les propriétés mécaniques et thermiques de béton renforcé à l'aide de fibres d'andropogon.

I.2. PROBLEMATIQUE

Les études statistiques faites par (GIEC, 2007) ont montrée que le secteur de construction, en particulier l'habitat est compté parmi les secteurs qui consomment plus d'énergie, la grande partie de cette consommation vient de la fabrication du béton et l'utilisation de l'énergie dans le bâtiment en matière de chauffage et climatisation. Ce cycle d'extraction de la matière première jusqu'à la fabrication du béton de ciment et le maintien d'une ambiance de confort dans une habitation ne vont pas sans émission des gaz à effet de serre. Ces gaz en suspension dans l'air sont les destructeurs de la couche d'ozone et par conséquent cela entraine le changement climatique [1]

La forte demande d'habitation dans les grandes villes subsahariennes et le coût exorbitant de ciment sont donc des préoccupations majeures qui font appel à la science et à la technologie pour vulgariser des matériaux locaux. Le béton renforcé par des fibres végétales en est un exemple. Ces fibres végétales sont soit les résidus de sous produits agro-alimentaire soit des pailles poussées à l'état naturel ont une importance non négligeable pour leur valorisation.

La valorisation des sous produits est devenue une priorité dans la recherche appliquée et touche au domaine du développement durable. L'objectif est de vulgariser des produits agricoles d'une part pour participer rationnellement à une économie de récupération et d'autre part et gagner en autonomie en utilisant des produits locaux ne demandant pas de gros investissements puisqu'ils sont utilisés tels quels et ne nécessitent pas de transformation.

Face à ces multiples préoccupations et le souci de développer et vulgariser les matériaux locaux à savoir le béton des fibres végétales dans le domaine de bâtiment dont l'utilité sont : confort thermique, réduction d'impact environnemental, la valorisation des ressources locales, l'on se pose des questions sur les caractéristiques mécaniques et thermiques de ce matériau.

I.3. OBJECTIFS D'ETUDE

I.3.1. OBJECTIF GLOBAL

L'objectif principal de l'étude est de réaliser un matériau cimentaire composite à l'aide des fibres d'andropogon et faire des essais aux laboratoires afin de déterminer leurs caractéristiques (mécaniques et thermiques).

I.3.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES

La présente étude vise donc à :

- Valoriser les ressources locales dans des pays en voie de développement ;
- Développer les matériaux composites à matrice cimentaire et les technologies prenant en compte l'impact sur l'environnement ;
- Formuler des bétons de référence ;
- Formuler des bétons renforcés à l'aide des fibres d'andropogon ;
- Réaliser des échantillons (éprouvette) des dimensions Ø10x20 cm à l'aide de béton de référence et fibres pour déterminer les caractéristiques mécaniques à différentes âges du matériau ;
- Réaliser des échantillons (éprouvettes) des dimensions 10x10x40cm à l'aide de béton et référence et renforcé avec des fibres d'andropogon pour déterminer les caractéristiques mécaniques à différentes âges du matériau ;
- Confectionner également des panneaux des dimensions 26x33x3cm à l'aide de deux matériaux (béton de référence et fibré) pour faire des essais de détermination des caractéristiques thermiques du matériau.

I.4. METHODOLOGIE D'ETUDE

Afin de pouvoir atteindre les objectifs visés, la méthodologie d'étude est divisée en trois parties :

- La première partie, consacrée à la recherche bibliographique sur des travaux antérieurs fait l'état de l'art des travaux portant sur le béton renforcé à l'aide des fibres végétales. La

recherche consiste à exploiter les documents disponibles et collecter toutes les informations et données favorables à la compréhension de thème et à la réalisation de ce travail. Le centre de documentation d'informatique de 2iE, les fichiers fournis par le Directeur de Mémoire et les sites à l'internet ont été consultés pour la recherche bibliographique.

En outre, cette partie donne un aperçu sur le ciment et ses mécanismes d'hydratation, ensuite les éléments de la constitution de béton et définir la formulation de béton par la méthode de DREUX-Gorise pour pouvoir comparer avec la formulation définie dans le protocole expérimental.

- La deuxième partie présente les différentes techniques expérimentales utilisées, les moyens d'essai développés spécifiquement lors de ce travail tout en prenant en compte tous les paramètres du protocole expérimental. Cette partie désignée par « matériels & méthodes » vise l'étude de la caractérisation mécanique et thermique des deux bétons (témoin et fibré) par des essais réalisés sur des éprouvettes.

Pour la caractérisation mécanique du matériau, les différents essais seront effectués au Laboratoire de Génie Civil de 2iE et l'étude des propriétés thermophysiques seront faites au Laboratoire Physique et de Chimie de l'Environnement de l'Université de Ouagadougou.

- La troisième partie, consacrée à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats sur des essais réalisés au laboratoire.
- Enfin la dernière partie a concerné la rédaction du rapport.

PREMIERE PARTIE :

RECHERCHES

BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE II: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. MATERIAUX RENFORCES PAR DES FIBRES VEGETALES

Les matériaux renforcés par des fibres végétales sont des matériaux composites qui entrent dans la définition d'éco-matériaux, il faut rappeler que l'éco-matériau est un élément de construction à caractère renouvelable, d'origine naturelle, issu éventuellement d'un processus de transformation ou de fabrication non polluant et économe en énergie. Il doit respecter les critères techniques de performance fonctionnelle, de qualité architecturale, de durabilité, de sécurité, de résistance au feu et à la chaleur dont l'exploitation ne génère aucun impact autant sur la santé humaine et que sur l'environnement y compris pendant la phase d'élimination.

Un composite fibré est donc un matériau composite constitué d'un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles. Les fibres sont noyées dans une matrice cimentaire qui assure la tenue mécanique. Les composites fibrés ont des propriétés mécaniques souvent assez faibles en particuliers les résistances à la compression. Les fibres jouent les rôles de renfort tandis que la matrice cimentaire assure la cohésion du composite et le transfert des efforts aux fibres.

Le renforcement de matériau de construction par des fibres naturelles fut très tôt utilisé dans l'histoire. Les blocs de terres crues renforcés par de la paille ou l'incorporation de crin de cheval aux mortiers en sont des exemples remontant à plusieurs milliers d'années [1]. Pourtant l'utilisation technologique des composites renforcés par des fibres végétales dans le bâtiment est relativement récente. Depuis les années 60, l'industrie des fibres est dominée par les fibres synthétiques (polyester, polyamide, ...) au détriment des fibres naturelles. Ces dernières regroupent les fibres animales (laine, alpaga, angora, ...) et les fibres végétales (coton, lin, chanvre, ...). La FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) souhaite sensibiliser les consommateurs à la qualité des fibres naturelles végétales, ce qui permettrait d'accroître les revenus des paysans. Elle souhaite également promouvoir des mesures améliorant l'efficacité et la pérennité de la production. En Europe, les fibres végétales connaissent un regain d'intérêt depuis une dizaine d'années. Le contexte économique (recherche de réduction des coûts des matières) et environnemental (réduction des impacts des produits industriels sur l'environnement) a permis l'émergence de nouveaux débouchés pour ces fibres : transport (automobile et nautisme), construction (isolation, aménagement...), agroalimentaire (emballage), agriculture (paillage, feutres pour culture hors

sol). Les secteurs plus traditionnels comme le textile et la papeterie sont ainsi relégués au second plan.

L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie France) a d'ailleurs fait de l'utilisation des fibres végétales dans le secteur industriel un axe important de son travail, et soutient la recherche et le développement dans ce domaine.

Depuis les années 70, de nombreuses fibres naturelles ont été testées comme renfort de composite. On peut citer notamment les fibres de sisal, de jute, de bagasse (résidu fibreux de la canne à sucre), du coir (fibre extraite de l'enveloppe filamenteuse de la noix de coco), de bambou, de bois, de lin, ou encore de chanvre etc.

Un rapport de l'American Concrete Institute [2] classe les fibres naturelles en deux catégories aux propriétés bien distinctes : les fibres transformées (Processed Natural Fibres) et les fibres brutes (Unprocessed Natural Fibres). Pour chacune de ces catégories, les méthodes de mises en œuvre, les types de produits finis et leurs niveaux de performances diffèrent.

a. Les fibres transformées

Les fibres naturelles transformées ont été utilisées en substitution d'une partie de l'amiante dans des produits commerciaux depuis le milieu des années 60. Depuis les années 80, en raison de l'interdiction de l'amiante dans la plupart des pays pour des motifs sanitaires, elles sont utilisées comme seul renfort dans l'industrie du fibrociment.

b. Les fibres brutes

Les fibres brutes sont, par opposition aux fibres traitées, obtenues à faible coût et en consommant peu d'énergie par le biais d'une main d'œuvre et de savoirs-faires disponibles localement [3]. Une grande variété de fibres végétales peut être utilisée en fonction des ressources disponibles dans chaque région.

L'utilisation de béton renforcé par des fibres végétales brutes est jusqu'à présent limitée pour des applications structurales. En revanche, des applications prometteuses sont envisagées sous forme de plaques ou de panneaux, en couverture intérieure ou extérieure sur une structure porteuse pour la réalisation de logements préfabriqués à bas prix.

Dans plusieurs pays d'Afrique, les bétons de fibres végétales sont également utilisés depuis les années 80 pour la réalisation de plaques ondulées de toiture, de canalisations, de réservoirs ou encore de silos [3].

II.2. MATRICE CIMENTAIRE ET FIBRES VÉGÉTALES

Depuis l'antiquité, les fibres naturelles ont été utilisées comme renfort dans diverses applications (habitation, poteries...). Cependant, c'est seulement ces vingt dernières années qu'elles suscitent un engouement dans le secteur des composites à base cimentaire, que ce soit dans le domaine du bâtiment ou en science des matériaux [5].

II.2.1. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU COMPOSITE COURANT.

Les fibres végétales comme le sisal, le jute, le lin, le chanvre ou encore le bambou, et les fibres de bois ont été utilisées comme renforts des matrices cimentaires dans les pays en voie de développement, dans le secteur du bâtiment. La résistance en flexion de ces matrices fragiles, telles les mortiers ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée) [6]-[7]. Les études publiées sur ces composites portent essentiellement sur leur comportement mécanique. D'une manière générale, les auteurs expriment le taux de renforcement en masse et non en volume. Andonian et al. [7] ont étudié les propriétés mécaniques de composites renforcés par des fibres de cellulose, en fonction de leur fraction massique. Leurs résultats indiquent une amélioration de la résistance en flexion avec l'augmentation de la teneur en fibres. Ils observent ainsi une résistance maximale en flexion trois points de 26,8 MPa pour une teneur massique en fibres de 6%. Pour des fractions massiques légèrement supérieures (8 à 10%), aucune évolution de la résistance en flexion n'est observée. Le module d'Young quant à lui diminue avec l'augmentation du taux de fibres. Savastona et al [6] ont utilisé du sisal, des copeaux de bananier, ou encore de l'eucalyptus afin de renforcer un composite à matrice cimentaire. Les essais mécaniques indiquent une performance optimale pour une fraction massique d'environ 12%, avec une résistance en flexion d'environ 20 MPa et une énergie à rupture de 1,0 à 1,5 kJ/m². Ils observent également une chute du module de flexion pour tous les mélanges. Par exemple, pour les composites renforcés par l'eucalyptus, ce module varie de 23,5 GPa pour une pâte de ciment environ 8,3 GPa pour une teneur massique de 12% en eucalyptus (comportement évalué à 28 jours). Agarwal [8] a étudié l'effet de la teneur en fibres de bagasse sur les propriétés de composites à base cimentaire. Il observe alors qu'il existe une teneur en fibres optimale. En effet, la résistance en flexion de ces matériaux évolue d'environ 4,5 MPa pour le ciment seul à 9 MPa pour un composite contenant 16% en masse de fibres. Au-delà de cette teneur en fibres, la résistance à la flexion chute. Une diminution de

la maniabilité des pâtes avec une hausse de la teneur en fibres dans les mélanges, que l'auteur attribue à une augmentation de l'absorption en eau par ces derniers est également observée. Blankenhorn et al. [9] ont travaillé sur des composites contenant des fibres de papier recycle, de feuillus ainsi que de résineux. La résistance à la flexion est plus élevée que pour le ciment pur. Le composite avec les fibres de feuillus donne les meilleurs résultats de résistance à la flexion. Cela s'explique par le fait que ces fibres sont plus longues que les autres. Ces résultats sont confirmés par d'autres études : les ciments renforcés par des fibres courtes développent de plus faibles résistances que ceux renforcés par des fibres longues [10]. Cependant, avec l'adjonction de fibres, la résistance à la compression du composite diminue par rapport au ciment pur. Abbani Seid et al. [14] ont étudié l'effet des fibres de palmier dattier sur les propriétés mécaniques des bétons renforcés par ces fibres, à savoir la résistance à la flexion dans différents milieux hygrométriques, et ont constaté que la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres et de leurs longueurs. Ceci est dû principalement à l'adhérence matrice - fibres et à la possibilité de stopper la propagation des fissures par les fibres.

Le tableau suivant résume les caractéristiques mécaniques de quelques composites cimentaires renforcés avec des fibres végétales.

Tableau n°1 : caractéristiques mécaniques des quelques composites

Auteurs	Années	Type des fibres	Teneur en fibres (mas.% ou vol.%)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Observations
Andonian, B.Cotterll	1979	cellulose	6	-	26,80	
A. Said,	1982	Palmier dattier	0,0 - 0,50	-	1,59–2,24	
A.Bourzam	2009	Alfa	0,5 – 3,00	25 -40	6,25–7,00	
J.Savastona	2000	sisal	0,5 – 15	-	5.25 - 20	

II.2.2. PROPRIETES THERMIQUES DU COMPOSITE

Nous entendons par isolation thermique, c'est la propriété d'un matériau, qui par sa composition ou sa nature, ralentit le transfert de l'énergie calorifique. La détermination des propriétés thermiques des matériaux composites pourrait être d'une grande utilité pour l'évaluation de leur efficacité dans l'isolation thermique des bâtiments.

La conductivité thermique (λ) est l'une des propriétés thermiques la plus recherchée pour les matériaux de construction. Elle est définie par le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

La diffusivité (α) exprimée en (m^2/s) caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de α est faible, la chaleur met de temps à traverser le matériau. Ainsi, le pouvoir isolant du matériau dépend non seulement de la valeur de λ mais également de la vitesse de transfert thermique. D'autres paramètres thermiques se déduisent de tout ce qui précède à savoir la résistance thermique R qui est fonction de la conductivité thermique et de l'épaisseur du matériau. Le tableau n°2 donne quelques chiffres indicatifs de la conductivité thermique des matériaux de construction.

Tableau n°2: conductivité thermique des quelques essences des fibres et matériaux de construction.

Nom du matériau	λ (W/m.°C.)	Nom du matériau	λ (W/m.°C.)
polyuréthane	0,025	vermiculite exfolié	0,05 à 0,07
polystyrène extrudé	0,03	chanvre en vrac	0,05 à 0,07
Laine de verre	0,034 à 0,056	brique de chanvre	0,12
Laine de lin	0,035 à 0,038	brique monomur	0,11 à 0,18
Ouate de cellulose	0,035 à 0,040	bois	0,12 à 0,23
Laine de roche	0,038 à 0,047	béton cellulaire	0,16 à 0,24
Laine de roche	0,04	blocs de terre comprimée	1,05
Polystyrène expansé	0,04	brique de terre crue	1,1
Perlite exfoliée	0,05	brique de terre cuite	1,15
Laine de coco	0,05	béton plein	1,75
liège expansé	0,05	pierre lourde	2,1 à 3,5
panneaux de fibre de bois	0,05	acier	52

Source : [16]

II.3. CIMENT ET SES MECANISMES D'HYDRATATION

II.3.1. DEFINITION DU CIMENT

Le ciment Portland est défini comme un liant hydraulique fabriqué à partir d'une pierre calcaire et d'une source de silice et d'alumine telle que l'argile ou la marne. A l'ensemble

broyé et cuit en ajoutant une légère quantité de gypse (sulfate de calcium). Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant progressivement à l'air ou dans l'eau.

II.3.2. COMPOSITION DU CIMENT PORTLAND

Le Ciment Portland Artificiel (CPA) se compose principalement de clinker. Ce dernier est obtenu à partir d'un mélange de calcaire et d'argile (respectivement 80% et 20% en masse) calciné à 1450°C. Les granules de clinker de couleur grise foncée dont la taille varie de 5 à 40mm de diamètre, sont finement broyés avec addition de sulfate de calcium hydraté appelé gypse (3 à 5% en masse) pour régulariser la prise. Un ciment est composé en général de quatre (4) phases principales (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF). Ces phases sont rarement pures, elles contiennent des impuretés en faibles teneurs dans leurs réseaux cristallins. Le clinker contient aussi des éléments mineurs (Na_2O , K_2O , MgO , CaO libre, TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 et Cr_2O_3).

Tableau n°3: composition des phases de clinker

Désignation des minéraux purs	Formules	Abréviation cimentière	Dénomination	Pourcentage massique (%)
Silicate tricalcique	$3CaO, SiO_2$	C_3S	Alite	55 à 70
Silicate bicalcique	$2CaO, SiO_2$	C_2S	Bélitre	10 à 25
Aluminate tricalcique	$3CaO, Al_2O_3$	C_3A	Aluminate tricalcique ou Céliste	0,5 à 13
Alumino-ferrite de calcium	$2CaO, xAl_2O_3, (1-x)Fe_2O_3$	$C_4A_xF_{1-x}$ $0 < x < 0.7$	Alumino-ferrite	1 à 15

Source : [13]

II.3.3. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL (CPA)

Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation comprenant (dans l'ordre) les réactions d'adsorption, de dissolution, de solvation, de précipitation, de cristallisation, de germination, de migration et de diffusion. Ce mécanisme doit être considéré dans toute sa complexité, en tenant compte des différentes interactions mutuelles de ses différentes réactions.

L'hydratation du CPA correspond à une suite de réaction chimique entre les différents éléments du clinker, le gypse et l'eau. Celles-ci s'effectuent suivant un processus de dissolution précipitation très complexe [12]-[13] qui veut être schématisé sur la figure n°1.

L'hydratation du CPA est un phénomène complexe faisant intervenir divers processus (mécanisme d'hydratation) qui ont été élucidés dès la fin du 19^e siècle par Henri Le Chatelier (1887). Il a notamment décrit trois (3) étapes relatives à la prise du ciment :

- ✓ L'adsorption physique et chimique de l'eau par les grains de ciment ;
- ✓ La dissolution ou solvatation, correspondant à un changement d'état du solide ionique (ciment) en présence de solvant (eau) ;
- ✓ La cristallisation, qui débute par la germination et se poursuit par la croissance de cristaux.

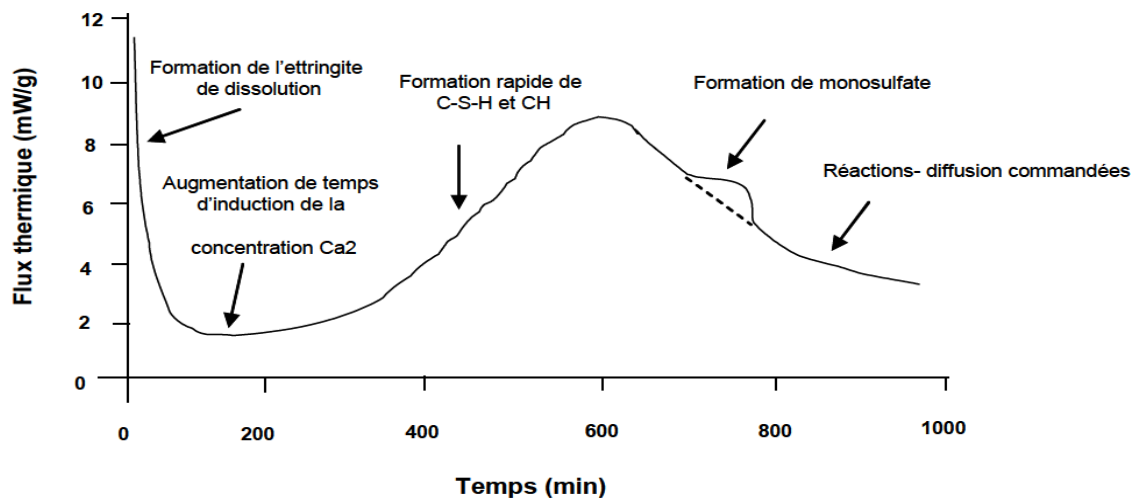


Figure n°1 : Représentation schématique de l'hydratation du ciment, source : [12]

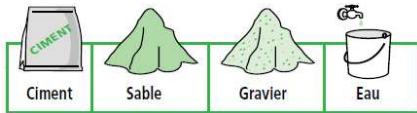
Conclusion partielle :

Ce chapitre consacré à la synthèse bibliographique a permis de présenter un bref historique de fibres végétales utilisées comme renfort dans les différents composites (l'argile mélangés à des pailles ou des crins de cheval, mortier renforcé par les fibres de sisal...)

Nous nous sommes intéressés surtout aux caractéristiques mécaniques et thermiques des composites cimentaires renforcées par les fibres végétales. Cette étude bibliographique menée sur ces composites montrent qu'il y a une forte dispersion des propriétés physiques et surtout mécaniques.

La synthèse de conductivité faites sur quelques matériaux montre que l'utilisation des composites des fibres végétales a des impacts limités, tant en termes d'émissions de CO₂ qu'en termes de consommation énergétique.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée au ciment et ses mécanismes d'hydratation dont plusieurs phénomènes se produisent parmi lesquels on distingue l'induction, la période dite de dormante, la prise et le durcissement.



CHAPITRE III: CONSTITUTANTS DU BETON ET SA FORMULATION

III.1. DEFINITION DU BETON

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux dont du diamètre maximal $D < 63 \text{ mm}$ et le liant est un ciment, généralement un ciment Portland. Les différents granulats forment le squelette granulaire du béton. Le ciment, l'eau et éventuellement les adjuvants forment **la pâte liante** qui est l'élément unique et actif du béton enrobant les granulats. Son objectif est de remplir les vides existants entre les grains. Elle joue le rôle de lubrifiant et de colle.

III.2. LES ELEMENTS DE CONSTITUTION DU BETON

III.2.1. CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique, capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangé avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissement progressivement dans le temps. Ses principaux constituants et ses mécanismes d'hydratation sont largement décrits dans le chapitre 2.

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon leur composition conformément à la norme européenne EN 197-1, il s'agit de :

- ✚ CEM I Ciment Portland Artificiel
- ✚ CEM II Ciment Portland composé
- ✚ CEM III Ciment de haut fourneau
- ✚ CEM IV Ciment pouzzolanique
- ✚ CEM V Ciment composé.

Le ciment utilisé dans le cas de notre travail est un CPA-CEM I 45 (de la marque Diamond Ciment)

III.2.2. GRANULATS

Les granulats sont des matériaux : matériaux inertes, sables, gravillons et les cailloux qui entrent dans la composition du béton. Ces matériaux sont appelés aussi « agrégats ». Ils constituent le squelette résistant du béton. Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m^3 et léger si elle est inférieure à 2 t/m^3 .

Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration.

a. Sables

Le sable est un matériau granuleux qui provient de la désintégration naturelle des roches préexistantes. Les sables peuvent être obtenus directement à partir de dragage ou extraction de rivière ou sablière ou comme résidu de concassage des cailloux et gravillons. Les grains de sable ont des diamètres compris entre 0 à 5mm.

Le sable utilisé dans la confection du béton doit être sain, siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du béton en œuvre. Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable (norme NF P 18-598). La valeur de l'équivalent de sable (mesurée à vue à l'aide d'un piston) doit être comprise entre 70 et 80.

b. Graviers

Les graviers sont constitués d'un ensemble des graves des dimensions 0/D ($D \geq 6.3 \text{ mm}$) et des gravillons des dimensions d/D ($d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 63\text{mm}$). Ils proviennent soit de concassages (gravillons concassés), soit directement des rivières ou sablière (graviers roulés). Les qualités primordiales d'un gravier sont : sa résistance à l'écrasement, sa stabilité et son adhérence avec la pâte de ciment.

Les graviers alluvionnaires couramment appelés graviers roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion, sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

Les graviers concassés sont des granulats de carrière obtenus par abattage et concassage des roches massives, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les graviers concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité de la coloration, degré de concassage... La sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.

III.2.3. EAU

L'eau utilisée dans le béton permet à l'hydratation du ciment et facilite aussi la mise en œuvre du béton dans le coffrage. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par la norme NF P 18-303 de 1941). L'eau potable de l'ONEA (Office National de l'Eau et de l'Assainissement) convient évidemment comme l'eau de gâchage. La quantité d'eau à incorporer varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 200 L/m³ de béton. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ses performances: résistance mécanique à la compression, durabilité.

III.3. CARACTERISATION DES GRANULATS

Les caractéristiques intéressant un granulat varient en fonction de l'usage auquel ce granulat est destiné, mais aussi de l'origine et de la nature de ce granulat.

Dans le cas de notre travail, nous nous intéressons à la caractérisation géométrique et physique du granulat.

III.2.1. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES GRANULATS

Le granulat est d'abord caractérisé par sa granularité, qui est la distribution dimensionnelle des grains, exprimée en pourcentage de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La mesure de la granularité se nomme granulométrie. Elle consiste donc à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser les refus sur chaque tamis. Les ouvertures carrées des tamis sont normalisées et s'échelonnent de 0.08mm à 80mm. La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant les tamis successifs. La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

- Les limites d et D du granulat ;
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins ;
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

Vue que les moules utilisés sont des faibles dimensions (voir les dimensions des moules dans la parties du chapitre matériels et méthodes), il a été utilisé des graviers 5/20 et des sables 0/5, disponible en place sur le site de Kamboisin, conformément à la norme p 18-553 (sept 1990).

Pour caractériser ces granulats, nous avons fait l'essai de l'analyse granulométrique (NF P18-540) qui est le procédé par lequel on détermine la proportion des différents constituants solides d'un matériau. Les courbes correspondant à ces granulats est présentée sur la figure n°2, sur laquelle a été portée les courbes granulométriques des sables 0/5 et graviers 5/20

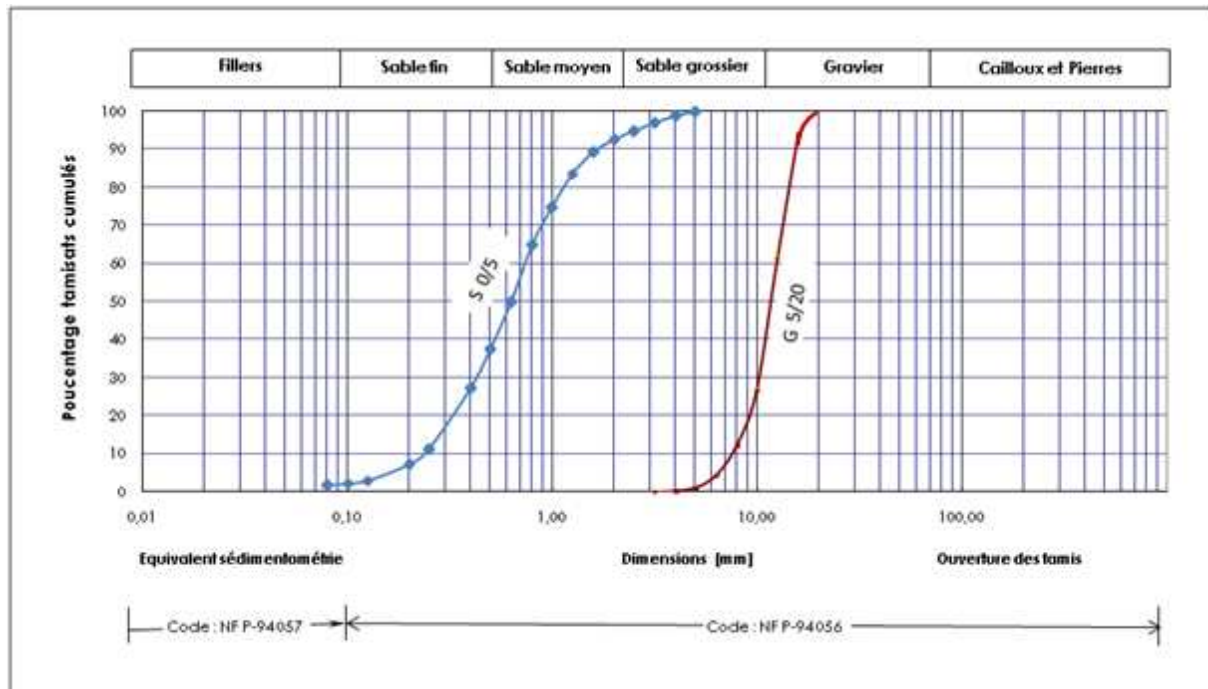


Figure n°2 : courbes granulométrique de sable 0/5 et gravier 5/20

III.2.2. CARACTERISATION PHYSIQUE DES GRANULATS

a. Masse volumique en vrac

La masse volumique en vrac encore appelée masse volumique apparente est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle se mesure conformément à un mode opératoire précis (norme NF P 18 554). Cette masse volumique est comprise entre 1400kg/m^3 et 1600kg/m^3 pour les granulats roulés silico-calcaires. Mais la masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée : de 2500 à 2600kg/m^3 .

Dans le cas de notre travail, nous avons prélevé une certaine quantité de gravier et de sable et nous avons pesé initialement et après passage à l'étuve, nous les avons versées dans une éprouvette graduée contenant un volume d'eau (figure n° 3). Le granulat de masse M_s occupera le contenant et augmente le niveau de l'eau rapport à l'état initial, la différence des niveaux de l'eau détermine le volume du granulat. Donc la masse volumique du granulat est le rapport la masse du granulat par la différence du volume.

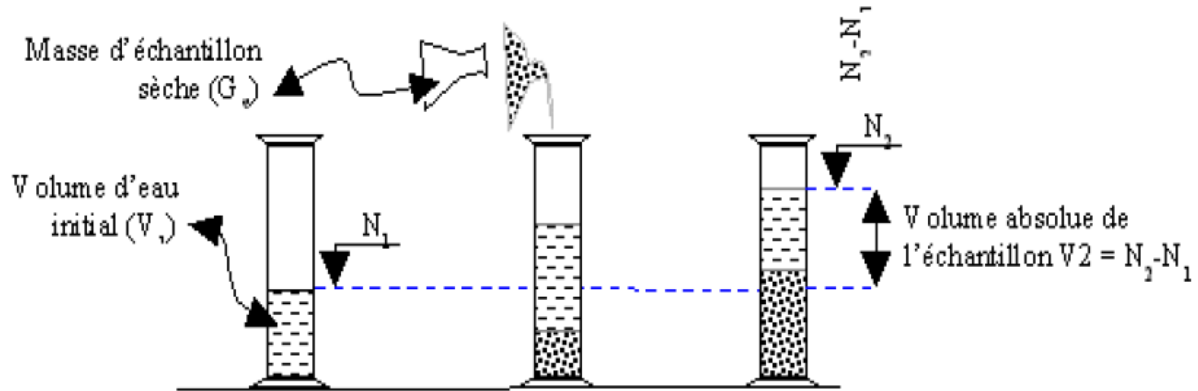


Figure n°3 : détermination de la masse volumique du granulat

La masse volumique absolue est définie par : $\gamma_s = \frac{M_s}{N_2 - N_1}$, après calcul, on trouve $\gamma_s = 2526 \text{ kg/m}^3$

b. Propreté des granulats

La propreté est caractérisée par la teneur en particules fines ($< 0.50 \text{ mm}$) essentiellement argileuses ou d'origine végétale ou organique dont la valeur acceptable P mesurée conformément à la norme NF P 18-591.

Un échantillon de gravier d'une certaine masse a été prélevé pour l'essai de propreté conformément à cette norme. L'échantillon a été lavé puis mis à l'étuve jusqu'à 24 heures, ensuite il a été pesé et tamisé au tamis de 0.5 mm .

Le résultat pour l'échantillon considéré a donné une propreté de 0.2% acceptable pour la réalisation d'un béton ordinaire. (Voir ANNEXE III)

Dans le cas des sables, le degré de propreté est fourni par l'essai appelé « équivalent de sable à piston » (norme NF P 18-597) qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable $0/2$. Le résultat de l'essai donne des valeurs largement supérieures à 65 ce qui confirme l'acceptation de ce sable dans la réalisation du béton. (Voir ANNEXE III).

c. Poids spécifique au pycnomètre à air

Le poids spécifique ou poids volumique des grains solide noté (γ_s) est le rapport de poids W_s des grains solides par le volume V_s des grains solides contenus dans l'échantillon.

La difficulté pour la détermination de γ_s réside dans la détermination de V_s pour un poids W_s donné.



Photo n°1 : pycnomètre à air

L'appareil pycnomètre à air (ci-contre) permet de déterminer ce volume V_s . Après l'exécution de l'essai sur un échantillon de poids W_s contenu dans la cuve de l'appareil, l'étalonnage du pycnomètre à air nous donne, pour une pression de départ de 23,0mWs (1bars= 10mWs), la valeur du volume V_{lu} du matériau présent dans la cuve par la relation suivante :

$$V_{lu} = \left(\frac{\bar{P}' - 4,4174}{\bar{P}' - 1} \right) \cdot 1214,7465 \text{ avec :}$$

- ✓ $\bar{P}'$: Pression moyenne lue, exprimée en mWs,
- ✓ V_{lu} : volume du matériau dans la cuve en cm^3 ,
- ✓ 1214,7465 : volume total de 2 cuves en cm^3 ,
- ✓ 4,4174 : pression en mWs, obtenue en partant de 23,0000mWs dans le cas d'une cuve sans matériau.

Le poids spécifique du matériau est alors : $\gamma_s = \frac{W_s}{V_{lu} - V_{eau}}$, avec V_{eau} : volume d'eau distillé ajouté au matériau. Le résultat de calcul pour la détermination de poids spécifique des granulats (gravier et sable) est représenté en ANNEXE III.

Les caractéristiques essentielles pour le choix d'un granulat à béton décrites ci- haut donnent de renseignement sur : le type de granulat, la résistance requise, la texture du granulat, les dimensions et les formes des éléments etc., avant la formulation du béton

Le squelette granulaire (sable et gravier) intervient aussi dans la résistance finale du béton de plusieurs manières :

- Par les qualités mécaniques des granulats
- Par la capacité d'adhérence de ces granulats avec la pate liante
- Par les dimensions et formes du granulat
- Par la porosité qui est fonction de la pâte liante
- Par la propreté du granulat.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géométriques et physiques des sables et graviers qui ont été déterminés à partir des essais d'identification du granulat à savoir l'analyse granulométriques, propreté de gravier, Equivalent de sable à piston et essai au pycnomètre à air.

Tableau n°4 : Récapitulatif des caractéristiques des granulats

Caractéristiques des granulats	Sables	Graviers	Observations
Classe granulaire	0/5	5/20	
Coefficient d'uniformité C_u	3.00	1.56	Granulométrie de sable est étalée Granulométrie de gravier est uniforme
Coefficient de courbure C_c	0.99	1.00	
Module de finesse M_f	2.40	-	Sable est bon pour la confection de béton
Densités spécifiques (g/cm^3)	2.54	2.62	
Propreté de gravier	-	0.20%	Valeur acceptable pour la réalisation de béton courant
Equivalent de sable (ESP)	81	-	
Poids spécifiques (kN/m^3)	26.2	27.9	

III.4. FORMULATION DU BETON PAR LA METHODE DE DREUX-GORISE

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau. Plusieurs méthodes sont proposées pour la formulation de béton (DREUX-Gorisse, ABRAMS, BOLOMEY...)

Nous allons utiliser la méthode dite « DREUX-Gorise » pour déterminer les proportions en masse de chaque constituant de béton. L'utilisation de cette méthode nécessite certaines données de base suivantes :

- ✚ la résistance caractéristique escomptée du béton à 28 jours;
- ✚ l'affaissement A au cône d'Abrams ;
- ✚ le diamètre maximal des granulats $D_{\max}$.

Les choix de ces données sont justifiés par rapport à l'essai d'étude, ainsi nous avons choisi les valeurs suivantes :

- la résistance caractéristique nominale est $\sigma_{c28} = 25 \text{ MPa}$, en admettant un coefficient de variation, la résistance moyenne est $f_c = \sigma_{c28} + 15\% \times \sigma_{c28} = 28.75 \text{ MPa}$,
- $A = 6 \text{ cm}$ (elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône, cette valeur correspond à un béton plastique à une vibration courante)
- $D_{\max} = 20 \text{ mm}$ (diamètre maximal du gravier visible sur la courbe granulométrique du gravier).

- Le ciment utilisé est le CPA 45 de la marque Diamond Ciment, résistance vraie moyenne à 28 jours est $f_{CE}=45\text{MPa}$

Après le calcul détaillé (voir ANNEXE I), nous avons obtenu, pour 1m^3 de béton de référence, la composition suivante :

Sable688kg

Gravier.....1158kg

Ciment.....350kg

Eau.....197kg

La composition formulée dans le protocole expérimental, pour 1m^3 de béton, est comme suit :

Sable1050kg

Gravier.....1365kg

Ciment.....350kg

Eau.....175kg

Comparativement, ces deux formulations ne sont pas très différentes pour la quantité de gâchage, mais il se trouve que les éléments granulaires sont importants dans la composition de protocole expérimental que dans la formulation déterminée par la méthode de Dreux-Gorise. En faisant le rapport en masse du gravier et sable (G/S), nous remarquons que le 1^{er} est environ 1,70 et le 2^e est 1,3, ce qui confirme que le béton formulé par le protocole expérimental a trop de sable.

Conclusion partielle:

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux constituants de béton en particulier les granulats où nous avons décrit en détail leur qualité pour la formulation d'un béton courant. Les caractéristiques géométriques et physiques étudiées dans ce chapitre permettent d'apprécier la sélection des granulats.

L'étude de la formulation de béton par la méthode de Dreux-Gorise donne un résultat comparativement, en termes de granulats, différent de la proportion calculée dans le protocole expérimental.

Pour nos essais d'expérimentation nous allons utiliser les formulations calculées sur la base de protocole expérimental (voir annexe IV), dans le chapitre suivant, sont confectionnées les éprouvettes et des panneaux à base de bétons constitués des proportions en masse définies par le protocole expérimental.

DEUXIEME PARTIE :

MATERIELS &

METHODES

CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES D'ETUDE

Cette partie décrit les méthodes, les techniques et les matériels utilisés pour la réalisation de l'étude. Elle s'articule en plusieurs étapes consécutives depuis la préparation des échantillons, le conditionnement des échantillons jusqu'à la réalisation des essais de caractérisation.

IV.1. PRESENTATION DES METHODES

IV.1.1. CHOIX DES MATERIAUX

Le choix des bétons est fonction des caractéristiques des matériaux, l'intérêt du choix de ces matériaux est de chercher à réaliser un béton des fibres cimentaires en comparaison avec les caractéristiques du béton normal de référence réalisé et testé également. C'est dans cette optique qu'il a été utilisé les fibres de l'andropogon dans le béton. Il faut aussi noter que les fibres végétales dans le béton sont des produits d'innovation en plus d'être écologique et économique. Les autres éléments de béton utilisés sont donc le ciment portland CEM I 45 (de la marque *Diamond Cement*), le gravier 5/20, le sable fin à moyen 0/5 et l'eau potable. Les granulats concassés 5/20 et de sable alluvionnaires 0/5 ont été utilisé dans le mélange conformément à la norme NF EN 12620.

IV.1.2. COMPOSITION DU MELANGE

Les mélanges à réaliser pour les essais sont résumés dans le tableau n°5 ci-dessous. Ils sont préparés et mélangés conformément au protocole de la norme NF 18-404.

Tableau n°5 : composition de mélange à réaliser

Mélanges	Matériaux				
	Ciment (kg)	Graviers (kg)	Sables (kg)	Eau (L)	Fibres (kg)
M1	54,438	212,309	163,315	27,219	-
M2	58,042	226,363	174,126	29,021	10,157

IV.1.3. MALAXAGE A LA BETONNIERE

L'utilisation d'une bétonnière électrique offre des avantages par rapport à la réalisation manuelle du béton. Ces avantages sont le gain de temps et l'obtention d'un mélange plus homogène de béton. La bétonnière électrique de 50L a été utilisée pour le malaxage du béton. Le mélange des agrégats, de ciment et de l'eau pour le malaxage à la bétonnière a été fait

conformément à la norme NF P18-461 qui donne l'ordre de versement dans la cuve les matériaux constituant le béton. Il a été versé le gravier en premier, ensuite le sable, le ciment et enfin l'eau et les additions diverses.

Dans tous les mélanges, il a été utilisé des agrégats secs, ces derniers absorbent une très grande quantité d'eau de gâchage de l'ordre de 20 à 30 L/m³ et rendant le béton trop sec.

Pour avoir une bonne propriété de béton à l'état frais (plasticité) et durci (caractéristique évolutive dans le temps), nous avons défini, après mesure de l'affaissement au cône d'Abrams, les pourcentages d'absorption de l'eau par des granulats par rapport au volume de dosage en eau. Ces granulats absorbent 30 % à 40% de l'eau de gâchage pour le béton de référence et environ 60% à 80% pour le béton de fibres. En ajoutant ces pourcentages d'eau au volume de dosage d'eau, nous avons obtenu un béton plastique de 6±2cm de l'affaissement. Il faut noter que l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams (slump-test) a été réalisé conformément à la norme NF P 18-451. Les principes essentiels consistent à remplir de béton dans un moule en tôle tronconique (D=20cm, d=10cm, h=30cm) ; le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige d'acier prismatique de 30cm de longueur, à raison de 25 coups par couche ; le moule est ensuite soulevé avec précaution et l'affaissement est mesuré à l'aide de la graduation de la règle attachée sur le portique.

IV.1.4. CONFECTION DES EPROUVETTES ET DES PANNEAUX

Les éprouvettes et les panneaux des différents essais sont confectionnés pour les essais de caractérisation des bétons fibres comparés au béton de référence. Les dimensions des moules des éprouvettes sont définies selon la norme NF P18-400. Les moules plus fréquemment utilisés pour les mesures de la résistance du béton sont les moules cylindriques. Leurs dimensions sont choisies en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton. Les moules utilisés dans la confection de nos éprouvettes et panneaux sont :

-  Moule cylindrique Ø10x20cm
-  Moule prismatique 10x10x40cm
-  Moule de panneau rectangulaire 3x26x33cm

Les éprouvettes sont réalisées conformément au dosage du protocole expérimental, pour chacune des sections, deux types des échantillons sont fabriqués à savoir les échantillons de béton de référence et béton fibré.

a. Eprouvettes cylindriques Ø10x20cm

La réalisation des éprouvettes a été faite par plusieurs phases des gâchées en différents jours, cela s'explique par le nombre insuffisant des éprouvettes Ø10x20cm. Neuf éprouvettes sont fabriquées pour le béton de référence et pour chaque dosage des fibres (2.5%, 5% et 10%). Lors de la confection des éprouvettes, le béton est mis en place dans les moules par coulage et vibration. Le coulage se fait en deux temps. Les moules sont remplis aux trois quarts et ils sont soumis à une vibration jusqu'à l'apparition d'un léger ressuage. Ensuite les moules sont remplis totalement et vibrés pendant environ 20 secondes. Ce serrage normal de béton se fait conformément à la norme NF P18-422.

Pour le mélange de gâchage, le tableau n°6 illustre le dosage des constituants du béton de référence, béton des fibres et le nombre des éprouvettes Ø10x20cm fabriquées pour l'essai de compression. Le détail de calcul est représenté en ANNEXE IV.

Tableau n°6 : composition massique des éléments de béton fibré et témoin des éprouvettes Ø10x20cm

Eprouvettes Ø10x20cm	Nombre des éprouvettes Ø10x20cm	Dosage des constituants de béton				
		Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravier (kg)	Eau (l)	Fibres (kg)
Référence	9	4.95	14.84	19.29	3.71	-
Fibrée dosé 2.5%	9	4.95	14.84	19.29	4.16	0.12
Fibrée dosé 5%	9	4.95	14.84	19.29	4.64	0.25
Fibrée dosé 10%	9	4.95	14.84	19.29	5.57	0.50



Photo n°2 : confection des éprouvettes Ø10x20cm



Photo n°3 : conservation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été démoulées après 24h et sont conservées dans l'eau à la température de 22 ± 2 °C. Les photos n° 1 et 2 ci-dessus montrent le mode de confection et conservation des éprouvettes.

b. Eprouvettes prismatiques 10x10x20cm

Pour la fabrication des éprouvettes prismatiques 10x10x40cm, nous avons utilisé des moules en bois fabriqués par un menuisier en place. Nous disposons au total neuf 9 moules ce qui permettra de fabriquer 9 éprouvettes prismatiques par jours. Mais la bétonnière électrique que nous utilisons pour le malaxage de béton est incapable de malaxer une grande quantité des gâchées, ce qui nous a amené à confectionner nos éprouvettes en deux gâchées. Le dosage de la composition de béton a été déterminé sur la base de protocole expérimental qui définit les proportions d'intrants de béton. Le tableau ci-dessous résume les quantitatifs massiques de constituants de béton.

Tableau n°7 : composition massique des éléments de béton fibré et témoin des éprouvettes 10x10x40cm

Eprouvettes 10x10x20 cm	Nombre des éprouvettes 10x10x20 cm	Dosage des constituants de béton				
		Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravier (kg)	Eau (l)	Fibres (kg)
Référence	9	12.6	37.8	49.14	9.45	-
Fibrée dosé 2.5%	9	12.6	37.8	49.14	11.47	0.32
Fibrée dosé 5%	9	12.6	37.8	49.14	13.42	0.63
Fibrée dosé 10%	9	12.6	37.8	49.14	17.39	1.26

Le béton, homogénéisé à l'aide de la bétonnière, est versé dans une brouette pour être mis en œuvre dans les moules.

Les éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm sont confectionnées dans le laboratoire sur une large bâche plastique comme le montre la photo n° 5. Les moules sont lavés préalablement pour ne pas absorber l'eau de béton.



Photo n°4: moule prismatique en bois des dimensions 10x10x40cm



Photo n°5 : confection des éprouvettes 10x10x20 cm

Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans une ambiance à 20 ± 2 °C de température pour une hygrométrie suffisante. Après démoulage, elles sont conservées dans l'eau jusqu'au moment de la réalisation des essais. Ces derniers se font à 7 jours, 14 jours et à 28 jours.

c. Panneaux rectangulaire 3x26x33 cm

Comme pour les éprouvettes cylindriques et prismatiques, les panneaux rectangulaires sont fabriqués avec de béton de référence de 0% des fibres et béton dosé respectivement à 2.5%, 5% et 10% des fibres. Il a été fait des gâchées pour chaque dosage ce qui permet de fabriquer deux panneaux par gâchage. Ces panneaux sont fabriqués dans le laboratoire où l'hygrométrie est estimée à $50\% \pm 5\%$, les panneaux pourront conserver leur humidité jusqu'à leur démoulage. Après 24 heures, ils sont mis dans l'eau à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à 28^e jour avant d'être enlevés pour l'essai thermique. La confection des panneaux est faite avec des moules en bois comme le montre la photo n°6 ci-dessus. Le tableau n°8 donne la composition du béton d'expériences.

Tableau n°8 : composition massique des éléments de béton fibré et témoin des panneaux 3x26x33cm

Eprouvettes 3x26x33 cm	Nombre des éprouvettes 3x26x33 cm	Dosage des constituants de béton				
		Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravier (kg)	Eau (l)	Fibres (kg)
Référence	2	1.80	5.40	7.03	1.35	-
Fibrée dosé 2.5%	2	1.80	5.40	7.03	1.42	0.05
Fibrée dosé 5%	2	1.80	5.40	7.03	1.47	0.09
Fibrée dosé 10%	2	1.80	5.40	7.03	1.59	0.18



Photo n°6 : confection des panneaux 3x26x33 cm

IV.2. REALISATION DES ESSAIS POUR LES CARACTERISATIONS

L'étude de la caractérisation mécanique a pour but de déterminer la performance mécanique des matériaux et celle de la caractérisation thermique définit le pouvoir isolant des matériaux à être isoler thermiquement, ce pouvoir d'isolation est caractérisé par un coefficient de conductivité thermique (λ). Ainsi dans cette sous partie, une attention particulière est donnée à la caractérisation mécanique et thermique de deux bétons et les résultats de tests réalisés feront l'objet d'interprétation pour leurs caractérisations.

IV.2.1. CARACTERISATIONS MECANQUES DES EPROUVETTES EN COMPRESSION ET EN FLEXION

La caractérisation mécanique des éprouvettes a pour objet de faire des essais de compression et flexion simple en 3 points sur les échantillons des formes cylindriques et prismatiques afin de déterminer les résistances en compression et en traction par flexion.



Photo n°7: portique d'essai universel didactique

Ces essais sont faits à l'aide de portique d'essai universel didactique, machine représentée ci-contre, il est muni d'un vérin hydraulique d'une capacité de 160 KN qui peut être utilisé en compression, en flexion ou en traction. Les essais sont effectués sur les éprouvettes cylindriques Ø10x20cm et prismatiques 10x10x40cm après 7^e, 14^e et 28^e

Jours de conservations dans l'eau à la température environ 30 °C en cette période de chaleur. Les éprouvettes sont rompues respectivement en compression pour Ø10x20cm et en traction par flexion pour 10x10x40cm.

Les résistances des bétons dépendent de nombreux facteurs :

- ✚ Nature et dosage de ciment;
- ✚ Rapport E/C (dans notre cas E/C = 0,5) ;
- ✚ Qualité des agrégats et leur proportion ;
- ✚ Homogénéité lors de malaxage (consistance) ;
- ✚ Protection contre la dessiccation.

a. Résistance à la compression

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique normalisées et d'éclatement 2 (10x20 cm ; norme NF P 18-406). Ces éprouvettes sont conservées dans le laboratoire sans être déplacées pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans un bac à eau jusqu'à réalisation des essais au 7^e, 14^e et 28^e jours.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée sa surface latérale par de soufre conformément à la norme NF P 18 416, doit être centrée sur le portique d'essai universel didactique dont l'axe de l'éprouvette doit être confondu avec l'axe de vérin hydraulique. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture F_c enregistrée au cours de l'essai et la section transversale de l'éprouvette S . La résistance à la compression est calculée selon la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \text{ (I)} \quad \text{avec } S = \pi \times \varnothing^2 / 4$$

Dans la relation ci-dessus R_c est directement obtenue en Mpa si F_c est exprimée en méganewton (MN) et S en m^2

Connaissant la charge maximale de rupture, nous avons calculé la résistance R_c de chacune des éprouvettes cylindriques, à savoir les éprouvettes de béton de référence et de fibres, les résultats de calculs sont représentés en annexe.

b. Résistance à la flexion

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions 10 x 10 x 40 cm et d'éclatement 4 ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la traction par flexion. L'essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$ (10 x 10 x 40 cm).

La mesure de la charge totale F_f est effectuée à l'aide d'un appareillage équipé d'un dispositif de flexion par trois points. La contrainte de rupture en traction par flexion correspondante sur la fibre inférieure se calcule comme suit :

$$R_f = \frac{3F_f.l}{2bh^2} \text{ (II)}$$

Avec F_f (N) la charge maximale, l (mm) la portée libre, b (mm) la largeur et h (mm) la hauteur du prisme et R_f en MPa.

Les résultats d'essai sont exprimés comme la moyenne arithmétique de trois valeurs de la résistance à la flexion.

IV.2.2. CARACTERISATION THERMIQUE DES PANNEAUX

L'étude de la caractérisation thermique a pour objet la détermination des propriétés thermo-physiques des matériaux. Plusieurs paramètres thermiques sont définis pour chaque type de matériau. Dans notre cas présent, nous avons confectionné des panneaux en bétons de référence et en béton mélangés avec des fibres d'andropogon pour la détermination des paramètres thermiques suivants :

- ✚ L'effusivité ;
- ✚ La conductivité
- ✚ La diffusivité
- ✚ La capacité thermique

Il faut aussi noter que les panneaux dosés à 10% des fibres sont cassés dans le bac à cure sous l'eau après les avoir plongés. Il n'y a que les panneaux de béton 0%, 2,5% et 5% des fibres ont été caractérisés.

IV.2.3. DEFINITION DES PARAMETRES THERMO-PHYSIQUES

a. Effusivité thermique (E)

L'effusivité thermique E des matériaux, parfois dénommée "chaleur subjective", représente la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe. Plus le coefficient E est faible moins le matériau peut absorber une densité de flux.

b. conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique est le flux de chaleur, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces. Elle s'exprime en W/m.K ou W/m.°C. Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant. Elle peut être obtenue, en régime stationnaire, par la détermination de gradient de température (le gradient de température est la variation de température par unité de longueur $\frac{dT}{dx}$, lorsqu'on se déplace dans la direction de propagation de la chaleur).

La densité de flux thermique traversant la couche (Figure n°4), d'après la loi de FOURIER, est proportionnelle au gradient de température. Elle est définie par :

$$\phi = \lambda \frac{dT}{dx} \quad (III)$$

λ est le coefficient de la proportionnalité appelé : la conductivité thermique du milieu

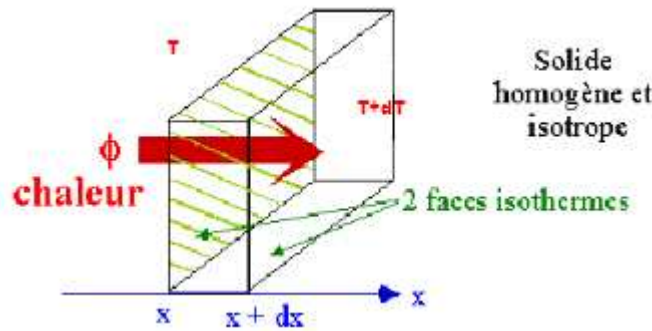


Figure n°4 : conduction dans une couche élémentaire du matériau

En considérant notre panneau d'épaisseur (e), de conductivité λ traversé par un flux de chaleur chauffant les deux faces extrêmes dont les températures sont T1 pour la face chaude de l'échantillon et T2 pour la face froide de l'échantillon, l'équation de la propagation de chaleur dans un milieu isotrope dont les caractéristiques thermo-physiques sont constantes est :

$$\lambda \Delta T + q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (IV)$$

En régime stationnaire $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

Pas de génération ou de consommation de la chaleur à l'intérieur du système ($q=0$)

L'équation (IV) devient : $\lambda \Delta T = 0$ avec $\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ (Equation de Laplace)

En supposant que le transfert est unidirectionnel, nous avons : $\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$, en intégrant deux fois nous obtenons : $T(x) = Ax + B$ avec A et B sont des constantes déterminées par les conditions aux limites, on déduit alors : $T(x) = -\frac{(T1-T2)}{e}x + T1$

La densité de flux de chaleur traversant la surface S du panneau produit par une source de générateur puissance P s'en déduit par :

$$\phi = \frac{P}{S} = \lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{T1 - T2}{e}$$

Si la chaleur se propage dans le panneau par l'intermédiaire d'une plaque chauffante de résistance R la conductivité de panneau est:

$$\lambda = \frac{RI^2 \times e}{2 \times S \times (T_1 - T_2)} \quad (V)$$

c. Diffusivité thermique (a)

La diffusivité thermique (a) exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température. C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle s'exprime en m^2/s . Plus la valeur de la diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face d'un panneau et le moment où elle atteindra l'autre face est important.

En considérant que la température est fonction de temps, les paramètres thermiques sont indépendants de la température et il n'y a aucune source interne de chaleur, l'équation (IV)

s'écrit : $\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C} \Delta T$, donc $a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}$ (Equation de Poisson)

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (VI) \quad (\text{Diffusivité thermique})$$

d. capacité thermique (ρC)

La capacité thermique d'un matériau représente sa capacité à stocker de la chaleur. Elle s'exprime en $Wh/m^3.K$. Plus la capacité thermique est élevée, plus le matériau pourra stocker une quantité de chaleur importante.

IV.2.4. METHODE DU PLAN CHAUD

C'est la méthode de caractérisation thermique d'un matériau permettant de déterminer l'effusivité thermique de ce matériau à l'aide d'un système d'excitation de type planaire (plan résistif) et d'un capteur de température (thermocouple). Elle consiste à placer une résistance chauffante plane de faible épaisseur entre deux échantillons du matériau à caractériser. On applique un échelon de flux de chaleur constant à la résistance chauffante et on relève l'évolution de la température $T_0(t)$ au centre de cette même résistance dans ou sur laquelle a été placé un thermocouple. On relève également la température $T_2(t)$ de la face non chauffée de l'échantillon sur laquelle on aura fixé un thermocouple. Puisque les dimensions transversales de la résistance sont grandes devant l'épaisseur de l'échantillon, on peut considérer que le transfert de chaleur reste unidirectionnel au centre de la résistance.

La formulation du système à l'aide du formalisme des quadripôles pour un milieu semi-infini d'après [17] permet d'estimer la différence de température entre $T_0(t)$ et T_0 par :

$$T_0(t) - T_0 \approx \frac{\varphi_0}{2} \left[R_c - \frac{mc}{2(ES)^2} \right] + \frac{\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}} t \quad (\text{VII})$$

Avec, φ_0 : Puissance dissipée dans la résistance chauffante

R : Résistance de la résistance chauffante

c : Capacité calorifique thermocouple + résistance chauffante

m : Masse thermocouple + résistance chauffante

E : Effusivité thermique du matériau à caractériser et S : Surface de la résistance chauffante

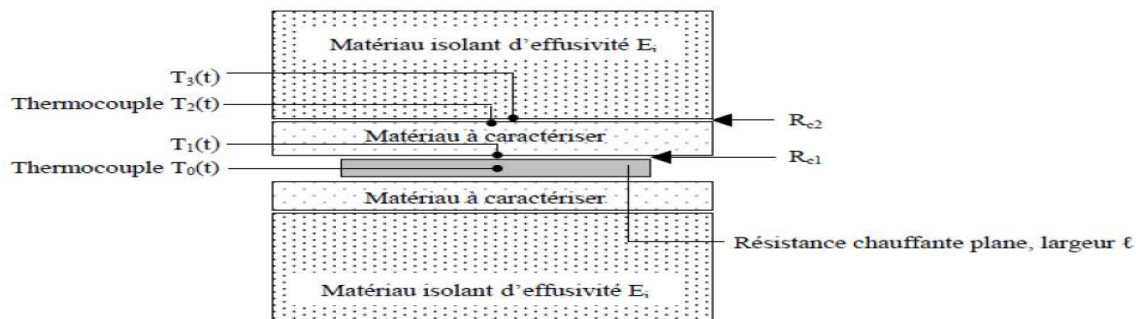


Figure n°5 : Schéma de montage de la méthode du plan chaud avec deux échantillons

IV.2.5. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'expérimentation a été effectuée au Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement de l'Université de Ouagadougou (LPCE). Le dispositif des mesures de température est constitué d'un caisson en bois dans lequel est placée la plaque chauffante reliée à un alternostat par l'intermédiaire de fils de connexion, qui à son tour reliée à un rhéostat et à un ampèremètre le tout forme un montage en série.

Les thermocouples sont reliés à l'ordinateur par l'intermédiaire d'un système d'acquisition. Les photos ci-dessous montrent les différents matériels des mesures de température.



Photo n°8 : Dispositifs des mesures de température

IV.2.6. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

a. Acquisition des données

Un courant d'intensité fixée à 0,2A traverse la plaque chauffante de résistance $R=120\Omega$ qui se chauffe et diffuse le flux de la chaleur aux faces proches des échantillons. Les thermocouples dont les extrémités sont reliées au centre de la plaque chauffante, aux deux faces de l'échantillon et au système d'acquisition des données, mesurent les températures $T_0(t)$, $T_1(t)$ et $T_2(t)$. Le système d'acquisition envoie les données à l'ordinateur qui seront enregistrées dans un programme TESTPOINT après avoir lancé et mis en marche. Les données des températures sont enregistrées en fichier d'extension (.dat). L'acquisition des données se fait en deux phases : la première la phase est transitoire qui dure environs 20 minutes et la deuxième phase est appelée stationnaire qui s'étend sur une période environ à 1heure.

Traitement des données

A l'acquisition des données de température sur les fichiers formats Txt, elles sont envoyées sur Excel pour être traitées.

Le traitement consiste à :

- ✓ dans le premier cas, tracer la courbe $T_0(t)-T_0$ en fonction de $\sqrt{t}$ pour la phase transitoire. Ce tracé est donc une droite d'équation **(VII)** et de pente $\frac{\varphi}{ES\sqrt{\pi}}$ dont la détermination permet de calculer l'effusivité thermique E. Il suffit donc de déterminer la pente α par régression linéaire sur un intervalle de temps adapté (tel que le coefficient de régression soit supérieur à 0,98) et l'on en déduit : $E = \frac{\varphi}{\alpha S\sqrt{\pi}}$;
- ✓ dans le deuxième cas, déterminer la moyenne des écarts de température entre les faces chaude et froide de l'échantillon en phase stationnaire. La moyenne de ces écarts permet de calculer la conductivité thermique de l'échantillon.

Conclusion partielle: dans ce chapitre de matériels et matériaux, il a été mis en exergue les matériels nécessaires à la réalisation des échantillons. Les procédés de fabrication des échantillons sont brièvement développés.

Quant à l'essai thermique, nous avons défini les paramètres principaux caractérisant nos panneaux et leur méthode de caractérisation. Les mesures de températures par méthode du plan chaud et leur traitement ont été faits en vue de déterminer les courbes expérimentales pour l'estimation de l'Effusivité et la conductivité.

TROISIEME PARTIE :

RESULTATS &

INTERPRETATION

CHAPITRE V: RESULTATS ET DISCUSSIONS DES ESSAIS DE CARACTERISATION

V.1. ESSAIS DE COMPRESSION

Les résistances à la compression R_c (MPa) et les masses volumiques (γ) des bétons (de référence et fibres) testés à différents âges sont présentées comme suit :

Tableau n°9 : Résultats des essais de résistance à la compression

Echantillons	7 jours		14 jours		28 jours	
	R_c (MPa)	γ (kg/m ³)	R_c (MPa)	γ (kg/m ³)	R_c (MPa)	γ (kg/m ³)
BR à 0%	4,76	2267,52	6,36	2273,89	7,09	2229,30
	3,84	2280,25	7,33	2273,89	7,79	2216,56
	3,62	2382,17	6,96	2382,17	7,47	2299,36
	4,07	2309,98	6,88	2309,98	7,45	2248,41
BF à 2,5%	2,50	2292,99	2,81	2159,24	3,26	2171,97
	2,51	2292,99	3,06	2146,50	3,41	2114,65
	2,55	2292,99	2,99	2101,91	3,20	2063,69
	2,5	2292,99	2,95	2135,88	3,29	2116,77
BF à 5%	1,41	2133,76	1,77	2165,61	2,04	2140,13
	1,39	2152,87	1,81	2165,61	2,03	2121,02
	1,17	2197,45	1,85	2063,69	1,95	2127,39
	1,32	2161,36	1,81	2131,63	2,01	2129,51
BF à 10%	1,08	2044,59	1,41	2057,32	1,67	2101,27
	0,90	1961,78	1,30	2025,48	1,71	2143,31
	1,13	2063,69	1,48	2063,69	1,64	2175,80
	1,04	2023,35	1,40	2048,83	1,67	2140,13

La figure représentée ci-dessous illustre l'évolution des résistances à la compression des deux bétons à savoir le béton de référence et béton des fibres.

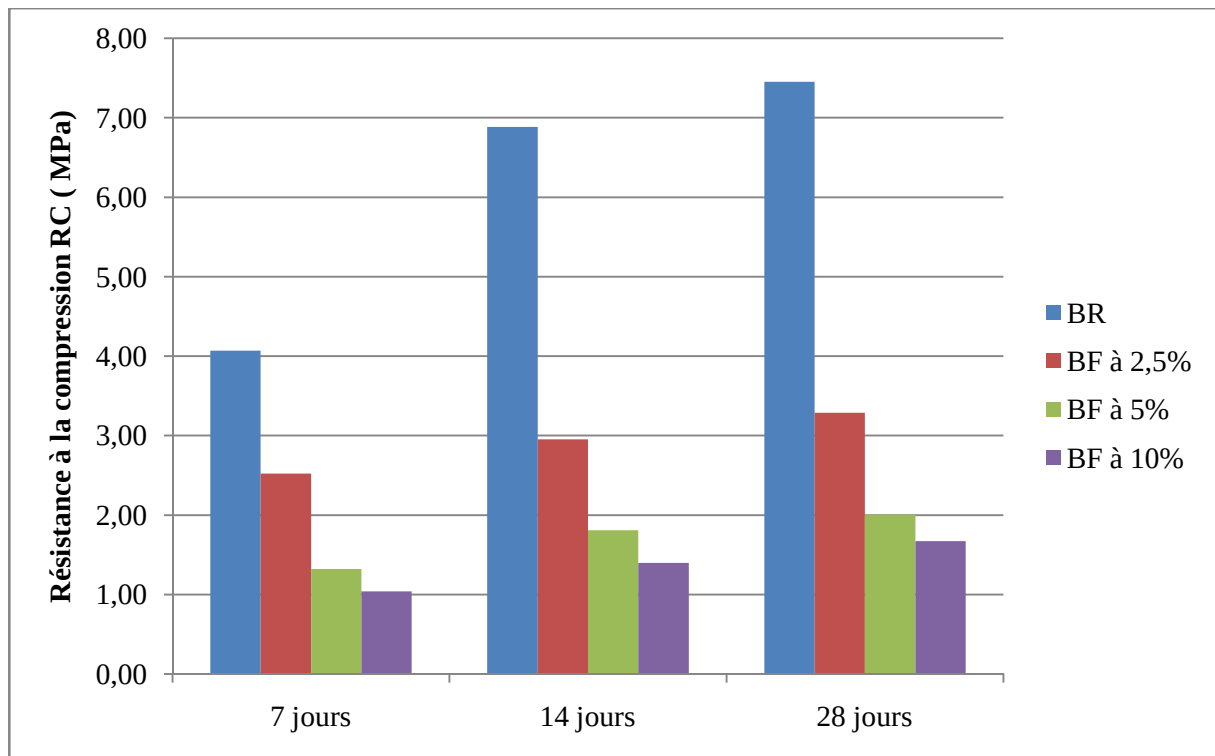


Figure n°6 : Résistance à la compression des bétons en fonction d'âges

La résistance à la compression telle qu'elle est définie dans un essai à l'écrasement sur des éprouvettes cylindriques est sensiblement la même que celle du béton fibre. Toutefois, l'on n'observe qu'un éclatement très limité du béton avec apparition des fissures et gonflement de la surface de révolution du cylindrique dans le cas de béton fibré. Par contre la rupture se produit brutalement par élargissement rapide et sans avertissement d'une fissure pour les mélanges sans fibres.

Les chercheurs sont tous d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration sensible en compression [5]. Ce résultat est en grande partie dû à une mauvaise compacité liée à l'incorporation de fibres dans les bétons.

L'analyse de la figure n°6 ci-dessus permet d'apporter quelques commentaires sur les résistances à la compression:

- ✓ d'abord nous remarquons une augmentation continue de la résistance à la compression pour les différents bétons en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours). Cette augmentation est due à l'hydratation du ciment au cours du temps, ce qui provoque l'évolution de la compacité.
- ✓ Les résistances à la compression de béton de référence sont nettement supérieures par rapport aux bétons mélangés avec des fibres ce qui confirme la littérature de synthèse bibliographique.

- ✓ Les valeurs des charges de la rupture sont un peu disparates pour certains tests des éprouvettes surtout pour le mélange de bétons des fibres; cela se justifie du fait que la mise en œuvre du matériau dans les moules n'a pas été effectuée uniformément.
- ✓ La résistance à la compression des bétons de fibres diminue avec l'augmentation de pourcentage des fibres, la figure n°6 confirme cette constatation.
- ✓ Les valeurs de résistances à la compression de béton de fibres obtenues sont faibles, car les fibres d'andropogon utilisées sont très poussiéreuses, l'humidification dans l'eau pendant 24h est insuffisante ce qui n'a pas favorisé la réaction chimique des constituants du ciment.

V.2. ESSAIS DE TRACTION PAR FLEXION

Le récapitulatif de résultats des résistances à la flexion pour différents âges des bétons est résumé dans le tableau n°10 ci-dessous :

Tableau n°10 : Résultats des essais de la résistance à la traction par flexion

Echantillons	7 jours		14 jours		28 jours	
	R _c (MPa)	γ (kg/m ³)	R _c (MPa)	γ (kg/m ³)	R _c (MPa)	γ (kg/m ³)
BR à 0%	1,37	1897,50	2,32	1897,50	3,04	2455,00
	1,82	1885,00	1,38	1885,00	3,64	2477,50
	1,46	1980,00	2,49	1980,00	2,30	2272,50
	1,55	1920,83	2,06	1920,83	2,99	2401,67
BF à 2,5%	0,52	2262,50	1,10	2135,00	1,62	2257,50
	0,69	2125,00	0,95	2135,00	1,15	2140,00
	0,43	2262,50	1,53	2215,00	1,60	2150,00
	0,55	2216,67	1,20	2161,67	1,46	2182,50
BF à 5%	1,18	2172,50	1,21	2242,50	1,51	2312,50
	1,26	2172,50	1,43	2202,50	1,52	2350,00
	1,10	2327,50	1,41	2224,50	1,47	2265,00
	1,18	2224,17	1,35	2224,17	1,50	2309,17
BF à 10%	0,11	2125,00	0,15	2037,50	0,20	2080,00
	0,11	2175,00	0,16	2112,50	0,19	2112,50
	0,14	2035,00	0,17	2087,50	0,17	2095,00
	0,12	2111,67	0,16	2079,17	0,18	2095,83

L'histogramme ci-dessous présente l'étalement des résistances à la flexion pour les différents dosages des fibres.

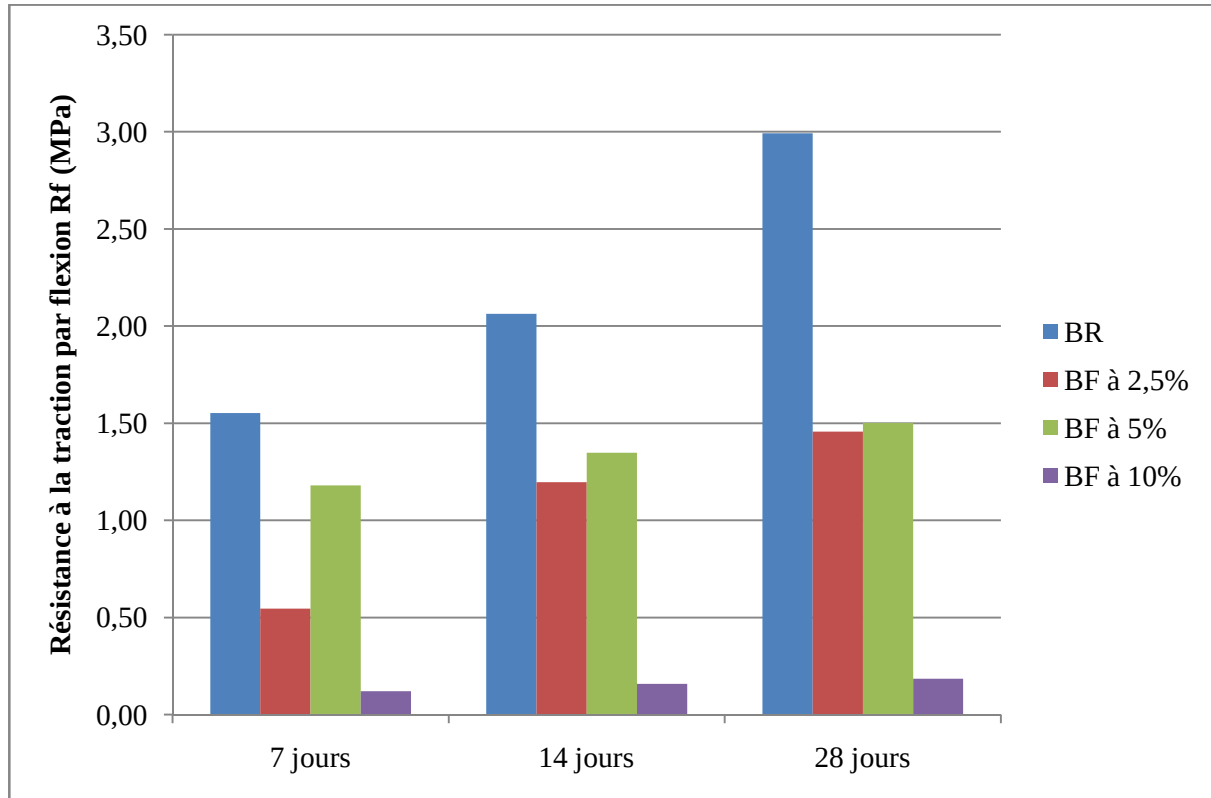


Figure n°7 : Résistance à la traction par flexion des bétons en fonction d'âges

Selon les résultats qui sont présentés dans le tableau n°10 et la figure n°7, il y a nette variation des résistances entre les échantillons. Cependant les résistances à la flexion les plus faibles sont obtenues pour les échantillons dosés à 10% des fibres et par contre celles des échantillons dosés à 0% des fibres sont plus fortes par rapport aux tous les autres ceux-ci s'expliquent par une prise rapide et une bonne compacité de béton de référence. Les éprouvettes des bétons des fibres gardent une quantité non négligeable de l'eau dans leurs pores jusqu'au jour de l'écrasement et les fibres sont restées humides. Cette humidité ne favorise pas aux fibres de jouer leur rôle de frein pour la propagation des fissures et ralentir ainsi le processus de rupture.

Nous constatons que les éprouvettes de béton de fibres dosées 10% ont des résistances à la traction par flexion très faible de 7^e à 28^e jours, cette observation peut s'expliquer par une mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice cimentaires et de même l'absorption de la teneur en eau par des fibres diminue les résistances à la flexion.

On observe également que les mélanges de 2,5% et 5% ont des résistances à la flexion voisines au 28^e jour, ceci peut s'interpréter que l'optimum de la teneur des fibres d'andropogon dans le renfort de béton est compris dans cet intervalle.

Dans tous les cas, la conclusion est que la forme et la dimension des renforts interviennent de façon significative sur le comportement des bétons [14].

Au regard de ces résultats de résistance mécaniques des bétons de référence et des fibres qui ont le même dosage en liant (ciment), la différence des résistances observées ne dépend pas donc du liant seulement mais de tous les constituants.

V.3. ESSAIS THERMIQUES

V.3.1. INTERPRETATION DES COURBES DE LA TEMPERATURES $T_i(t)$

La Figure ci-dessous donne l'allure des courbes des températures $T_i(t)$. Nous constatons qu'au bout d'un certains temps assez long (environ 2h00), l'allure de la courbe $T_1(t)$ et celle de $T_2(t)$ doivent être parallèle. La différence de $T_1(t)$ - $T_2(t)$ va être constante ce qui permettra de déterminer la conductivité thermique.

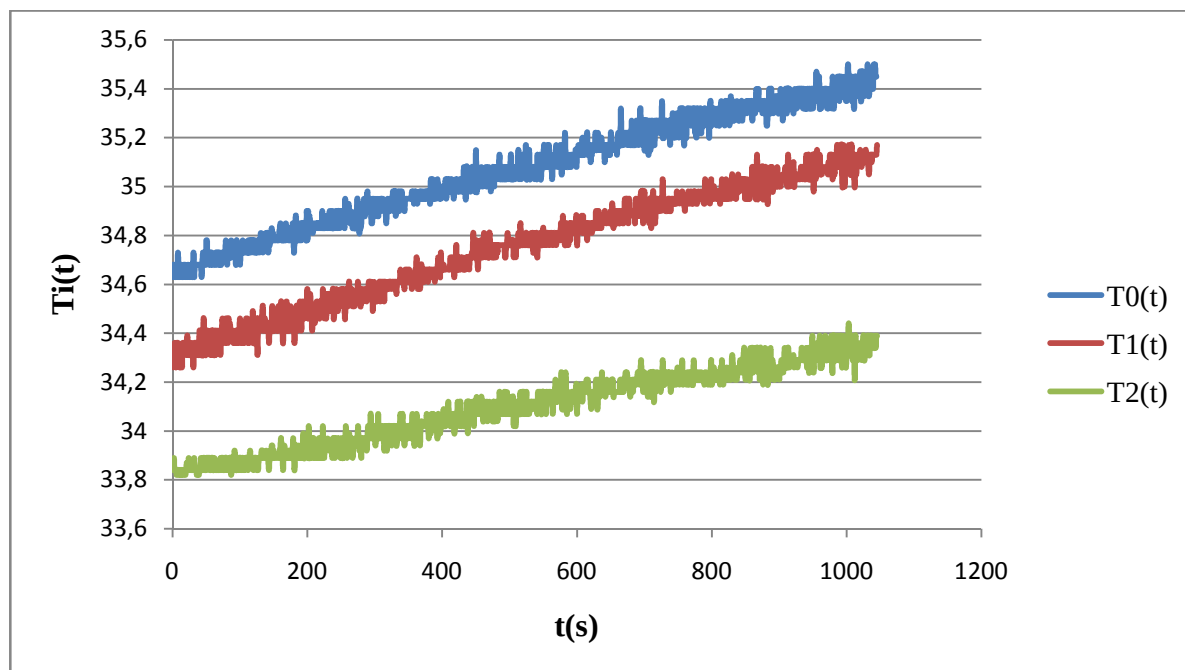


Figure n°8 : Allure des courbes de la température $T_i(t)$

Avec $T_0(t)$: température enregistrée au centre de la plaque chauffante au temps t ;

$T_1(t)$: température enregistrée à l'interface entre la plaque et l'échantillon au temps t ;

$T_2(t)$: température enregistrée à l'interface entre l'échantillon et l'isolant au temps t .

V.3.2. TRACE DES COURBES $T_0(t) - T_0 = (f(\sqrt{t}))$

Les tracés des courbes expérimentales $T_0(t)-T_0$ en fonction de $\sqrt{t}$ avec des droites de tendance linéaire pour les différents échantillons sont représentés comme suit :

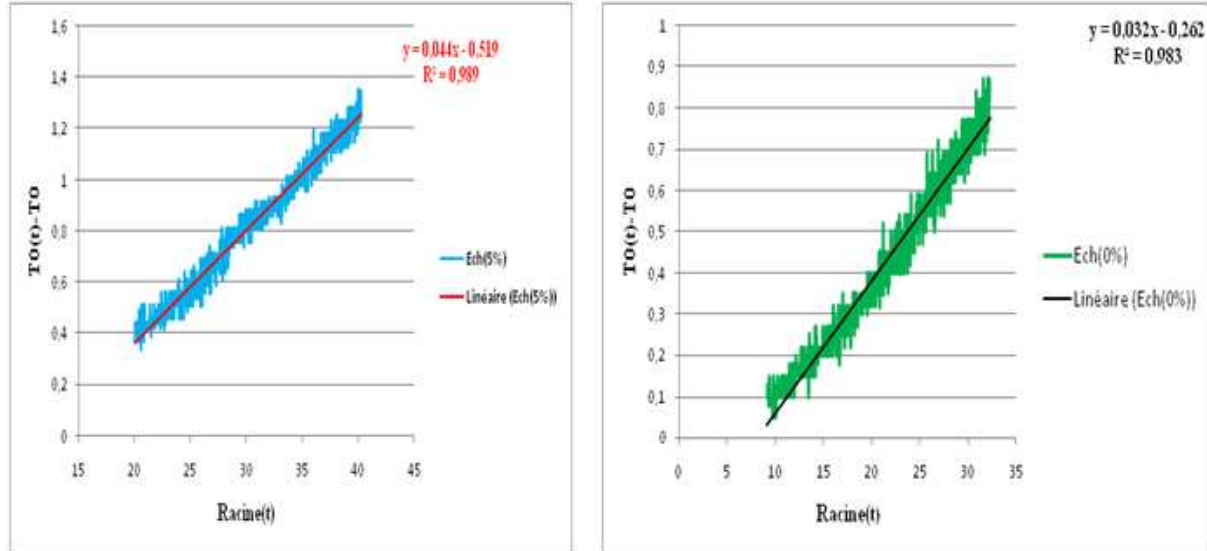


Figure n°9 : Courbe expérimentale $T_0(t) - T_0(0)$ en fonction de $\sqrt{t}$ des échantillons 0%et 5% des fibres

En comparant la pente de l'équation (VII) du haut et celle de la droite de tendance avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,98, nous calculons l'effusivité de notre matériau.

V.3.3. RESULTATS DES PARAMETRES THERMOPHYSIQUES

Les résultats des paramètres thermo-physiques sont obtenus après les mesures expérimentales des températures et sur la base des calculs dont les équations mathématiques sont présentées dans le chapitre IV.

Le résultat du calcul des paramètres thermo-physiques est représenté sur le tableau ci-dessous.

Tableau n°11 : Détermination des paramètres thermo-physiques des échantillons

Caractéristiques thermiques des échantillons	Echantillons à caractériser		
	Ech. à 0% des fibres	Ech. à 2,5% des fibres	Ech. à 5% des fibres
Epaisseur (m)	0,035	0,033	0,036
Surface de la plaque chauffante (m²)	0,0848	0,0848	0,0848
Résistance R de la plaque chauffante (Ω)	120	120	120
Intensité du courant (A)	0,2	0,2	0,2
Puissance (W)	4,8	4,8	4,8

Densité de flux (W/m ²)	28,302	28,302	28,302
Pente a_0 de la droite de tendance linéaire	0,032	0,026	0,044
ΔT (°K)	0,550	0,539	0,693
Masse volumique ρ (kg/m ³)	2412,607	2508,361	2442,485
Conductivité thermique λ (W/m.K)	1,799	1,731	1,469
Capacité calorifique C (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	229,535	347,621	148,211
Capacité thermique ρC (J.m ⁻³ .°C ⁻¹)	5,54.10 ⁵	8,72.10 ⁵	3,59.10 ⁵
Diffusivité thermique a (m ² /s)	3,25.10 ⁻⁶	1,98.10 ⁻⁶	4,095.10 ⁻⁶
Effusivité thermique E (J.m ⁻² .°C ⁻¹ .s ^{-1/2})	988,230	1228,590	725,985
Resistance thermique R (m ² .°K /W)	0,019	0,019	0,024

D'après le résultat que nous avons obtenus ci-dessus dans le tableau n°11, la conductivité de béton de référence (0% des fibres) est $\lambda=1,799\text{W/m.}^\circ\text{K}$. Cette valeur est un peu supérieure à la conductivité de béton plein ($\lambda=1,75\text{W/m.}^\circ\text{K}$) [2] définie dans le tableau n°2 de la partie de synthèse bibliographique. Cet écart de $0,049\text{W/m.}^\circ\text{K}$ peut s'expliquer par les fausses manipulation des mesures ou encore par des erreurs d'arrondis du calcul. Mais la conductivité de béton dosé à 5% est faible par rapport au béton dosé à 2,5%, cela permet d'interpréter que plus les pourcentages de fibres sont élevés plus faible est la conductivité thermique et le pouvoir d'isolation thermique est bon.

Il faut noter également que la définition de la diffusivité confirme les valeurs trouvées pour cet essai. Les diffusivités calculées sont très faibles, donc la propagation de la chaleur dans le temps à travers l'échantillon testé est également lente.

Par contre les capacités thermiques de nos échantillons testés sont grandes, ces importantes valeurs expliquent que le béton peut stocker des quantités de chaleur avant de les rayonner. En général, ce sont les matériaux les plus lourds qui possèdent la plus grande capacité thermique [17], les masses volumiques de nos matériaux les confirment.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Aussi bien en termes de volume qu'en termes de finances, les bétons constituent les matériaux les plus utilisés dans le bâtiment. Essentiellement, les bétons sont confectionnés au départ de gravier, de sable, de ciment et d'eau, mais à part ces quatre composants fondamentaux, les bétons actuels contiennent de plus en plus d'additifs. Ces éléments additifs permettent de modifier les caractéristiques des bétons de telle manière qu'aujourd'hui les bétons sont devenus des nouveaux matériaux composites.

Le cas du béton renforcé à l'aide des fibres végétales, en particulier les fibres d'andropogon, peut être inclus dans cette perspective.

A travers notre étude, nous avons déterminé et analysé les caractéristiques mécaniques et thermiques des bétons et les avons comparés aux travaux similaires.

Les caractéristiques mécaniques des bétons sont testées à partir des éprouvettes cylindriques et prismatiques en se basant sur les essais de résistances à la compression et à la flexion.

Les caractéristiques thermiques de ce matériau sont testées à l'aide des panneaux rectangulaires soumis à des essais thermiques par la méthode de plan chaud.

A l'issue des travaux au laboratoire de Génie Civil de 2iE et au Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement de l'Université de Ouagadougou, il a été retenu que :

- ✓ Le béton de référence est plus résistant à la flexion que le béton mélangé avec de fibres, il en est de même pour la résistance à la compression. Mais le béton des fibres dosé à 5% est plus résistant en flexion que le béton des fibres dosé 10% pour tous les âges de cure sous l'eau.

- ✓ Quant à la résistance à la compression pour béton de fibres à 2,5% est supérieure à celles de 5% et de 10%.

Donc la résistance à la compression de béton de fibres d'andropogon, comme pour tous les bétons de fibres végétales, diminue en fonction de l'augmentation du dosage en fibres car l'incorporation des fibres dans la matrice du béton augmente le volume des vides et diminue la compacité du béton.

- ✓ Pour ce qui concerne les essais thermiques sur les panneaux, la méthode dite du plan chaud a permis d'acquérir d'abord les données des températures afin de tracer la

courbe expérimentale $T_0(t)-T_0$ en fonction $\sqrt{t}$ et d'estimer l'Effusivité puis déterminer les autres paramètres thermo-physiques.

✓ Au regard des valeurs des paramètres thermo-physiques, le béton des fibres a une conductivité thermique inférieure au béton de référence. Cette conductivité trouvée après calcul est inférieure à la conductivité thermique de béton plein **[16]**. Il faut aussi noter que la diffusivité de ces deux matériaux est très faibles.

Au-delà de ce qui précède, et pour faire des études complémentaires sur la caractérisation mécanique et/ou thermique de ce matériau, nous souhaitons vivement que les échantillons fabriqués soient conservés dans un milieu sec fermé jusqu'à l'écrasement ou les sécher à l'étuve pendant 24 heures après avoir sorti de cure sous l'eau pour que les fibres ne perdent pas leurs caractéristiques mécaniques (résistance à la rupture en traction, le module d'élasticité de Young...).

Nous recommandons également une étude de la caractérisation chimique des fibres d'andropogon afin de voir l'adhérence entre fibres et ciment.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. M. Brandt **“Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering”** *Composite Structures, Volume 86 (2008) 3-9*
- [2] ACI 544.1-96 **“State-of-the-art report on fibre reinforced concrete”** Reported by ACI Committee 544
- [3] M.A. Aziz, P. Paramasivam, S.L. Lee **“New Reinforced Concretes 3. Concrete reinforced with natural fibres”** *Surrey University Press, 1984*
- [4] C. Baley **“Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites”** *Techniques de l'Ingénieur. Ref. AM. 5 130*
- [5] S.K. Canovas, **“New economical solutions for improvement of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibres”** *Materials and Structures, 1992, pp. 417-422*
- [6] J.H. Savastano, P.G. Warden et R.S.P. Coutts **“Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites”**, *Cement and Concrete Composites, 2000, pp. 379-384.*
- [7] Andonian, Y.W. Mai et B. Cotterill **“Strength and fracture properties of cellulose fiber reinforced cement composites”**, *Journal of Cement Composites, 1979, pp. 151-158.*
- [8] L.K. Agarwall **“Bagasse-reinforced cement composites”**, *Cement and Concrete Composites, 1995, Vol. 17, pp. 107-112.*
- [9] P.R. Blankenhorn, M.R. Silsbee, B.D. Blankenhorn et M. Dicola **“Temperature and moisture effect on selected properties of wood fiber- cement composites”**, *Vol. 12, pp. 102-105*
- [10] R.S.P. Coutts et Y. Ni **“Autoclaved bamboo pulped fibre reinforced cement”**, *Cement and Concrete Composites, 1995, Vol. 17, pp. 99-106.*
- [11] J. Baron et J.P. Olivier, **“La durabilité des bétons”**, *Collection de l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, 1992, pp. 431-453.*
- [12] I. Jawed, J. Skalny et J.F. Young, **“Structure and performance of cements”**, *Hydratation of Portland Cement Structure and Performance of Cements, 1985, pp. 237-317.*
- [13] G. Seidel, H. Huckuf et J. Stark, **“Technologie des ciments, chaux et plâtres, processus et installations de cuisson ”**, *Paris : septima, 1980.*
- [14] A.Said, K. Abdelouahad, K. Med Mouldi **“Valorisation des fibres végétales de palmier dattier dans le domaine de la construction”**,
- [15] F. Jean, D. Georges **“Nouveau guide du béton et de ses constituants”**.
- [16] Y.Azoumah **“ cours de transfert thermique”**
- [17] Y. Jaennot **“Théorie et pratique de la métrologie thermique”**

ANNEXES

ANNEXE I : FORMULATION DU BETON PAR LA METHODE DE DREUX-GORISE .	46
I.1. Données de base.....	46
I.2. Dosage en ciment, en eau.....	46
I.3. Dosage des granulats.....	47
ANNEXE II : ANALYSE DE COURBES GRANULOMETRIQUES.....	49
II.1. Sable	49
II.2. Gravier	49
ANNEXE III : PROPRIETES PHYSIQUES DES GRANULATS	51
ANNEXE IV : QUANTITATIF DES MATERIAUX D'ESSAIS	52
ANNEXE V : CARACTERISTIQUES MECANQUES	55
V.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION.....	55
V.1.1. Résistance à la compression pour éprouvettes de référence.....	55
V.1.2. Résistance à la compression pour éprouvettes à 2,5% des fibres.....	56
V.1.3. Résistance à la compression pour éprouvettes à 5% des fibres.....	56
V.1.4. Résistance à la compression pour éprouvettes à 10% des fibres.....	57
V.2. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION	57
V.2.1. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes de référence	58
V.2.2. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes à 2,5% des fibres	58
V.2.3. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes à 5% des fibres	59
V.2.4. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes à 10% des fibres	59
ANNEXE VI : CARACTERISATION THERMIQUE	60

ANNEXE I : FORMULATION DU BETON PAR LA METHODE DE DREUX-GORISE

I.1. Données de base

Résistance nominale : $\sigma_{c28} = 25 \text{ MPa}$,

Résistance moyenne : $f_c = \sigma_{c28} + 15\% \times \sigma_{c28} = 28.75 \text{ MPa}$

Affaissement au cône : $A = 6 \text{ cm}$ (vibration courante)

Diamètre maximal de gros granulats $D_{\max} = 20 \text{ mm}$

Classe vraie du ciment à 28 jours : $f_{CE} = 45 \text{ MPa}$

Coefficient granulaire : $G = 0.50$ (fonction de D , qualité des granulats et serrage de béton)

Densité spécifique de sable $\delta_1 = 2.54 \text{ kg/L}$

Densité spécifique de gravier $\delta_2 = 2.62 \text{ kg/L}$

Densité spécifique de ciment $\delta_3 = 3.1 \text{ kg/L}$ (valeur moyenne habituellement admise)

Coefficient de compacité $\gamma = 0.815$

Dosage ciment $C = 350 \text{ kg/m}^3$

I.2. Dosage en ciment, en eau

Nous déterminons le rapport C/E par la formule suivante : $f_c = G f_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$, en faisant application numérique, on aura : $\frac{C}{E} = 1.78$. Il faut souligner que le dosage de ciment est

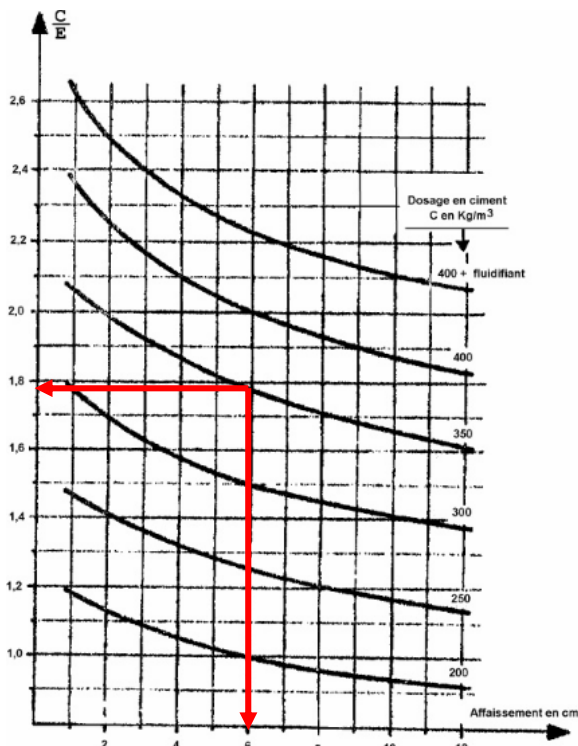


Figure n°10 : Abaque d'évaluation approximative de dosage en ciment

fonction de rapport $\frac{C}{E}$, du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. Ainsi l'abaque ci-contre permet d'évaluer approximativement C en fonction de $\frac{C}{E}$ et de l'ouvrabilité désirée qui est souvent fonction des moyens de serrage du béton.

En projetant l'abscisse 6cm et l'ordonnée 1.78 sur la courbe de dosage en ciment, nous obtenons $C = 350 \text{ kg/m}^3$. Ayant fait le choix du dosage en ciment C , on déduit alors le dosage approximatif en eau $E = \frac{C}{1.78} \approx 197 \text{ kg/m}^3$

I.3. Dosage des granulats

Nous traçons sur le même graphique les courbes granulométriques des différents granulats. Ensuite nous traçons la courbe granulaire de référence OAB : le point 0 étant l'origine, le B (à l'ordonnée 100 %) correspond à la dimension D_{maxi} du plus gros granulat et le point A dit le point de brisure a les coordonnées ainsi définies en abscisse à partir de D_{maxi} :

- Si $D_{maxi} \leq 20 \text{ mm}$, alors l'abscisse $X_A = \frac{D_{maxi}}{2}$
- Si $D_{maxi} > 20 \text{ mm}$, X_A est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D_{max} .

et l'ordonnée (Y_A) est donnée par la formule : $Y = 50 - \sqrt{D} + K$,

avec K un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés. (en particulier la forme du sable).

Le point A a pour coordonnées alors $X_A = \frac{20}{2} = 10 \text{ mm}$ et $Y_A = 50 - \sqrt{20} + 2 = 47.53\%$, où $k=+2$ (gravier concassé, vibration normale et dosage en ciment $C=350 \text{ kgm}^3$).

La **figure n°11** représente la courbe granulométrique des granulats et la courbe granulaire de référence OAB.

La courbe granulaire de référence OAB étant tracée, nous traçons alors les lignes de partage des courbes granulaires en joignant le point à 95 % de la courbe granulaire du 1^{er} granulat, au point de 5 % de la courbe du granulat suivant, nous lisons alors, sur la courbe de référence OAB au point de croisement (intersection) avec la droite de partages de courbes, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats :

Pourcentage de sable.....38%

Pourcentage de gravier.....62%

En adoptant pour le coefficient de compacité la valeur $\gamma=0.825$ (compacité fonction de $D_{maxi}=20 \text{ mm}$, consistance de béton (béton plastique) et du moyen de serrage (vibration normale)), les volumes absolus des constituants solides sont les suivants :

Volume total absolu..... $V_g + V_s + V_c = 1000\gamma = 825 \text{ L}$

Volume absolu du ciment..... $\frac{350}{3.1} \approx 113 \text{ L}$ (3.1 Masse spécifique des grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise)

Volume absolu des granulats..... $V_g + V_s = 1000\gamma - V_c = 712 \text{ L}$

Volume absolu du sable..... $(712) \times 0.38 = 271 \text{ L}$

Volume absolu du gravier..... $(712) \times 0.62 = 442 \text{ L}$

Les densités absolues des granulats sont respectivement : sable : 2.54 et gravier : 2.62

Le dosage en matériaux secs, pour 1m³ de béton, sont donc en kg :

Sable..... 271x2.54= 688kg
Gravier..... 442x2.62= 1158kg
Ciment..... 350kg
Eau totale (approximativement)..... 197kg

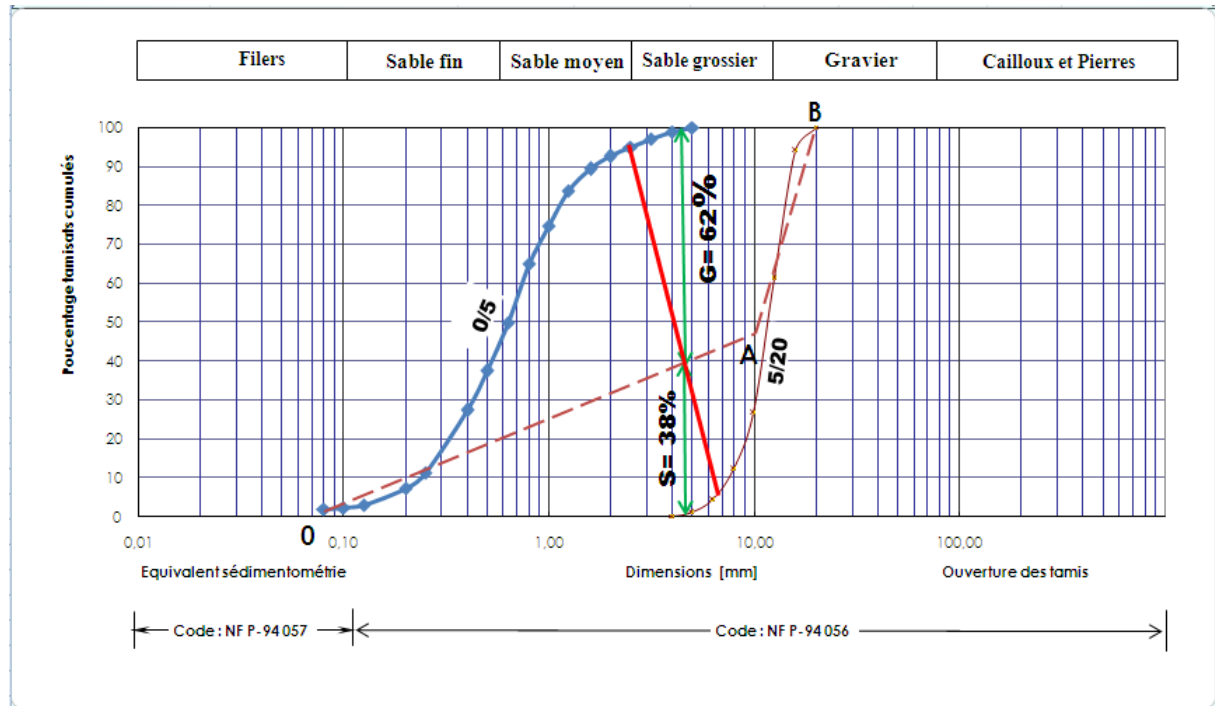


Figure n°.11 : Etude de la composition granulaire de béton de référence D=20mm.

ANNEXE II : ANALYSE DE COURBES GRANULOMETRIQUES

II.1. Sable

- **Module de finesse**

Le module de finesse d'un granulat est égal au $1/100^e$ de la somme des refus cumulés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante :

0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5,00 – 10,00 – 20,00 – 40,00 et 80 mm.

$M_f = (0,1\% + 5,1\% + 16,3\% + 50,1\% + 75,9\% + 92,8\%) / 100 = 2,40$. $M_f = 2,40$, cette valeur est comprise dans l'intervalle 2,2 à 2,8, donc notre sable est bon pour la confection de béton.

- **Coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen**

Le coefficient qui renseignant sur la forme des courbes granulométriques

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,75mm}{0,25mm} = 3 > 2, \text{ la granulométrie de sable est dite étalée}$$

- **Coefficient de courbure**

Il est défini par : $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{(0,43)^2}{0,25 \times 0,75} \approx 1$, le sable est bien gradué, car C_c est comprise entre 1 à 3.

D_{10} , D_{30} , D_{60} représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30% et 60% de tamisât cumulé.

II.2. Gravier

Le coefficient de Hazen est : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{12,5mm}{8,00mm} = 1,56 < 2$, la granulométrie est dite uniforme

$$\text{Le coefficient de courbure est : } C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{(10,0)^2}{8,0 \times 12,5} = 1$$

Tableau n°12: Analyse granulométrique sur le sable

Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
39	6,3		0,0		
38	5	1,2	1,2	0,1%	99,9%
37	4	16,9	18,1	1,2%	98,8%
36	3,15	27,8	45,9	3,1%	96,9%
35	2,5	30,6	76,5	5,1%	94,9%
34	2	35,9	112,4	7,5%	92,5%
33	1,6	47,8	160,2	10,7%	89,3%
32	1,25	84,2	244,4	16,3%	83,7%
31	1	133,8	378,2	25,2%	74,8%
30	0,8	148,5	526,7	35,1%	64,9%
29	0,63	224,1	750,8	50,1%	49,9%
28	0,5	187,8	938,6	62,6%	37,4%
27	0,4	151,4	1 090,0	72,7%	27,3%
26	0,315	47,9	1 137,9	75,9%	24,1%
25	0,25	193,3	1 331,2	88,7%	11,3%
24	0,2	60,3	1 391,5	92,8%	7,2%
23	0,16	0,0	1 391,5	92,8%	
22	0,125	64,2	1 455,7	97,0%	3,0%
21	0,1	10,0	1 465,7	97,7%	2,3%
20	0,08	6,6	1 472,3	98,2%	1,8%
19	0,063	23 g			

Tableau n°13: Analyse granulométrique sur le gravier

Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
47	40		0,0		
46	31,5		0,0		
45	25		0,0		
44	20	1,5	1,5	0,0%	100,0%
43	16	208,2	209,7	6,0%	94,0%
42	12,5	1 144,5	1 354,2	38,7%	61,3%
41	10	1 212,1	2 566,3	73,3%	26,7%
40	8	501,5	3 067,8	87,7%	12,3%
39	6,3	278,2	3 346,0	95,6%	4,4%
38	5	117,5	3 463,5	99,0%	1,0%
37	4	31,1	3 494,6	99,8%	0,2%
36	3,15	5,0	3 499,6	100,0%	0,0%
35	2,5				

ANNEXE III : PROPRIETES PHYSIQUES DES GRANULATS

Tableau n°14 : Essai de propreté des graviers

Prise d'essai n°:		1	2	3	4
Préparation de l'essai	Teneur en eau ω en % $((M_1 - M_{1s})/M_{1s})$	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	Poids d'échantillon humide (M_2)	3 000 g	2 000g	3 000g	2 000g
	Poids sec associé (M_{s2})	2 997g	1 997g	2998g	2997g
Mesures	Poids du refus sec (tamis 0,5 mm)	2 994 g	1 980g	2996g	2993g
	Propreté P (%)	0,20%	0.09%	0.30%	0.15%

Tableau n°15: Essai d'équivalent de sable

Prise d'essai n°:		1	2	3	1	2	3
Mesures	* Hauteur du flocculant h1 (cm)	11,00	10,00	11,20	11,20	11,10	11,30
	* Hauteur à vue h'2 (cm)	9,00	9,00	9,50	8,70	8,80	9,60
	* Hauteur au piston h2 (cm)	8,80	8,50	8,70	8,60	8,50	8,90
	Equivalent de Sable à vue (ESV)	82	90	85	78	79	85
	Equivalent de Sable Piston (ES)	80	85	78	77	77	79
	Température °C (contrôle)	20°	20°	20°	20°	20°	20°
	Moyenne ESV	86			81		
	Moyenne Esp	81			77		

Tableau n°16 : Poids spécifique γ_s au pycnomètre à air

échantillons	Poids sec matériaux mis dans la cuve (g)	Volume d'eau distillé ajouté (cm ³)	Pression finale (P') cuve échantillon + chambres (mWs)				Valeur Vlu (cm ³)	γ_s (KN/m ³)
			1° essai	2° essai	3° essai	$\overline{P'}$ moyenne (mWs)		
Sable	1110,6	366,8	10,10	10,20	10,15	10,15	761 cm ³	26,2 KN/m ³
Gravier	1000,0	360,0	9,45	9,35	9,30	9,37	719 cm ³	27,9 KN/m ³

ANNEXE IV : QUANTITATIF DES MATERIAUX D'ESSAIS

Tableau n°17 : Quantitatif des matériaux d'essais

					Volume par unité des échantillons			m ³	
					Volume panneaux 3x26x33cm:			0,003	
					Volume d'Epr. 10x10x40cm:			0,004	
					Volume d'Epr.Ø10x20cm:			0,002	
N°	DESIGNATION	NOMBRE D’ESSAIS						Unité	Quantité
		jours d'essais (7e, 14e et 28e)	Ecrasement ou test d’épr. / jour d’essais	Nb. d’épr. de réf.	Nb. d’épr. dosé à 2,5%	Nb. d’épr. dosé à 5%	Nb. d’épr. dosé à 10%		
1	Eprouvettes de référence 10x10x40 cm	3	3	9				m3	0,036
2	Eprouvettes 10x10x40 cm dosées à 2,5% des fibres	3	3		9			m3	0,036
3	Eprouvettes 10x10x40 cm dosées à 5% des fibres	3	3			9		m3	0,036
4	Eprouvettes 10x10x40 cm dosées à 10% des fibres	3	3				9	m3	0,036

6	Eprouvettes de référence Ø10x20 cm	3	3	9				m3	0,014
7	Eprouvettes Ø10x20 cm dosées à 2,5% des fibres	3	3		9			m3	0,014
8	Eprouvettes Ø10x20 cm dosées à 5% des fibres	3	3			9		m3	0,014
9	Eprouvettes Ø10x20 cm dosées à 10% des fibres	3	3				9	m3	0,014
10	Eprouvettes de référence 3x26x33 cm	1	2	2				m3	0,005
11	Eprouvettes 3x26x33 cm dosées à 2,5% des fibres	1	2		2			m3	0,005
12	Eprouvettes 3x26x33 cm dosées à 5% des fibres	1	2			2		m3	0,005
13	Eprouvettes 3x26x33 cm dosées à 10% des fibres	1	2				2	m3	0,005
	Total du volume de béton de référence								0,055
	Total du volume de béton fibré								0,166

Détermination en masse des constituants de béton à partir des rapports suivants:

C/S	0,33		
E/C	0,5		
G/S	1,3		
X	0,025	0,05	0,1

Avec C: masse de ciment
E: masse de l'eau
G: masse de gravier
S: masse de sable

X=F/C: fraction massique de fibres

Pour 1m³ de béton dosé à 350kg/m³, nous avons

C(kg/m ³)	350		
S (kg/m ³)	1050		
G(kg/m ³)	1365		
E(l/m ³)	175		
F(kg/m ³)	8,75	17,5	35

respct. 2,5%, 5% et 10%

Pour le béton de référence

C(kg)	19,35
S (kg)	58,04
G(kg)	75,45
E(l)	9,67

Pour le béton fibré

C(kg)	58,04
S (kg)	174,13
G(kg)	226,36
E(l)	29,02
F(kg)	1,45

respct. 2,5%, 5% et 10%

Récapitulatif de la quantité des matériaux

C(kg)	77,39
S (kg)	232,17
G(kg)	301,82
E(l)	38,69
F(kg)	10,16

Environ 11kg des fibres d'andropogon

ANNEXE V : CARACTERISTIQUES MECANQUES

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques et prismatiques à des différents d'âges.

V.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les éprouvettes cylindriques témoins et fibrées sont testées aux essais de compression comme le montre la photo ci-dessous.



Photos n° 9 : Dispositif des essais de compression d'une éprouvette en béton fibré

Après avoir obtenu la valeur maximale de rupture (F_c) des écrasements des éprouvettes, la résistance à la compression (R_c) est calculée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

Les résistances à la compression des éprouvettes sont calculées à 0,05 d'erreurs près, les moyennes de trois valeurs sont retenues comme résistance de béton de référence ou de fibres. Les tableaux suivants donnent les résultats des essais des résistances R_c pour les différents d'âges des éprouvettes.

V.1.1. Résistance à la compression pour éprouvettes de référence

Tableau n°18: Détail de calculs de résistance à la compression R_c du béton de référence

Age (jours)	EPROUVETTES (Ø 10x20cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	ER1	3,56	37,37	4,76	4,07
	ER2	3,58	30,11	3,84	
	ER3	3,74	28,38	3,62	
14	ER4	3,57	49,93	6,36	6,88
	ER5	3,57	57,52	7,33	
	ER6	3,74	54,63	6,96	

28	ER7	3,50	55,69	7,09	7,45
	ER8	3,48	61,14	7,79	
	ER9	3,61	58,66	7,47	

V.1.2. Résistance à la compression pour éprouvettes à 2,5% des fibres

Tableau n°19 : Détail de calculs de résistance à la compression RC du béton à 2,5% des fibres

Age (jours)	EPROUVETTES (Ø 10x20cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	EF1	3,60	19,60	2,50	2,52
	EF2	3,60	19,70	2,51	
	EF3	3,60	20,05	2,55	
14	EF4	3,39	22,08	2,81	2,95
	EF5	3,37	24,01	3,06	
	EF6	3,30	23,45	2,99	
28	EF7	3,41	25,60	3,26	3,29
	EF8	3,32	26,76	3,41	
	EF9	3,24	25,09	3,20	

V.1.3. Résistance à la compression pour éprouvettes à 5% des fibres

Tableau n°20 : Détail de calculs de résistance à la compression RC du béton à 5% des fibres

Age (jours)	EPROUVETTES (Ø 10x20cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	EF1	3,35	11,04	1,41	1,32
	EF2	3,38	10,90	1,39	
	EF3	3,45	9,16	1,17	
14	EF4	3,40	13,89	1,77	1,81
	EF5	3,40	14,19	1,81	
	EF6	3,24	14,51	1,85	

28	EF7	3,36	16,01	2,04	2,01
	EF8	3,33	15,95	2,03	
	EF9	3,34	15,30	1,95	

V.1.4. Résistance à la compression pour éprouvettes à 10% des fibres

Tableau n°21 : Détail de calculs de résistance à la compression RC du béton à 10% des fibres

Age (jours)	EPROUVETTES (Ø 10x20cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	EF1	3,21	8,50	1,08	1,04
	EF2	3,08	7,08	0,90	
	EF3	3,24	8,90	1,13	
14	EF4	3,23	11,05	1,41	1,40
	EF5	3,18	10,23	1,30	
	EF6	3,24	11,65	1,48	
28	EF7	3,30	13,09	1,67	1,67
	EF8	3,37	13,45	1,71	
	EF9	3,42	12,85	1,64	

V.2. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION

Les éprouvettes prismatiques sont testées par flexion comme sur les photos ci-dessous.



Photos n° 10 : Dispositif des essais de traction par flexion d'une éprouvette en béton fibré

Après avoir obtenu la charge à la rupture, valeur lue sur l'écran, la résistance à la traction par flexion est calculée par la formule suivante :

$$R_f = \frac{3F_f \cdot l}{2bh^2}$$

Dans cette formule, $l=300\text{mm}$; $b=100\text{mm}$ et $h=100\text{mm}$, la résistance devient :

$$R_f = 0,00045 \times F_f$$

Si F_f est exprimée en (N) la résistance R_f sera en (MPa)

Les résultats des essais et le calcul des résistances R_f pour différents d'âge sont représentés dans les tableaux suivants :

V.2.1. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes de référence

Tableau n°22 : Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton de référence

Age (jours)	EPROUVETTES (10 x10 x 40 cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	ER1	7,59	3,05	1,37	1,55
	ER2	7,54	4,05	1,82	
	ER3	7,92	3,25	1,46	
14	ER4	7,59	5,15	2,32	2,06
	ER5	7,54	3,07	1,38	
	ER6	7,92	5,53	2,49	
28	ER7	9,82	6,76	3,04	2,99
	ER8	9,91	8,09	3,64	
	ER9	9,09	5,10	2,30	

V.2.2. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes à 2,5% des fibres

Tableau n°23 : Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton à 2,5% des fibres

Age (jours)	EPROUVETTES (10 x10 x 40 cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	EF1	9,05	1,15	0,52	0,55
	EF2	8,5	1,53	0,69	
	EF3	9,05	0,96	0,43	
14	EF4	8,54	1,84	1,10	1,20
	EF5	8,54	1,59	0,95	
	EF6	8,86	2,55	1,53	

28	EF7	9,03	2,70	1,62	1,46
	EF8	8,56	1,92	1,15	
	EF9	8,60	2,66	1,60	

V.2.3. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes à 5% des fibres

Tableau n°24: Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton à 5% des fibres

Age (jours)	EPROUVETTES (10 x10 x 40 cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	EF1	8,69	1,96	1,18	1,18
	EF2	8,69	2,10	1,26	
	EF3	9,31	1,84	1,10	
14	EF4	8,97	2,01	1,21	1,35
	EF5	8,81	2,38	1,43	
	EF6	8,91	2,35	1,41	
28	EF7	9,25	2,52	1,51	1,50
	EF8	9,40	2,54	1,52	
	EF9	9,06	2,54	1,47	

V.2.4. Résistance à la traction par flexion pour éprouvettes à 10% des fibres

Tableau n°25 : Détail de calculs de résistance à la flexion R_f de béton à 10% des fibres

Age (jours)	EPROUVETTES (10 x10 x 40 cm)		Charges de rupture (kN)	Résistance de rupture (MPa)	Résistance moyenne (Mpa)
	Numéro	Masse (kg)			
7	EF1	8,50	0,18	0,11	0,12
	EF2	8,70	0,18	0,11	
	EF3	8,14	0,24	0,14	
14	EF4	8,15	0,25	0,15	0,16
	EF5	8,45	0,26	0,16	
	EF6	8,35	0,28	0,17	
28	EF7	8,32	0,33	0,20	0,18
	EF8	8,45	0,31	0,19	
	EF9	8,38	0,28	0,17	

ANNEXE VI : CARACTERISATION THERMIQUE

Les tracés des courbes expérimentales $T_0(t) - T_0$ en fonction de $\sqrt{t}$ avec des droites de tendance linéaire pour les différents échantillons sont représentés sur les figures suivantes.

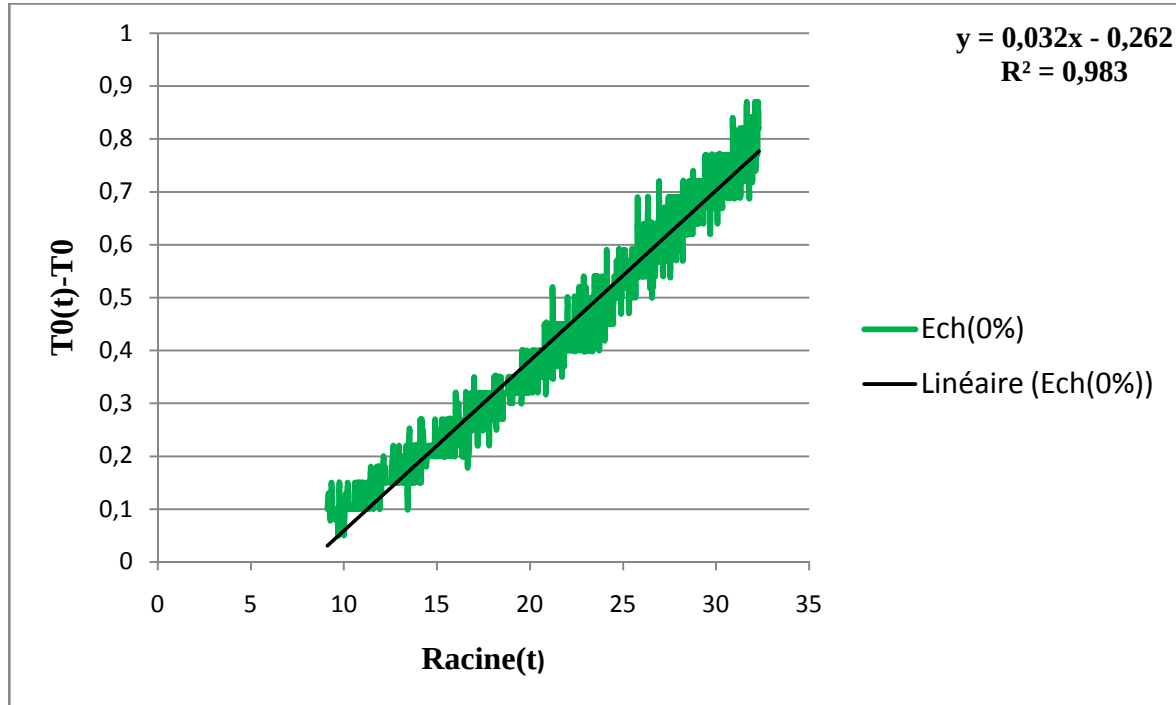


Figure n°12 : Courbe expérimentale $T_0(t) - T_0(0)$ en fonction $\sqrt{t}$ de l'échantillon à 0% des fibres

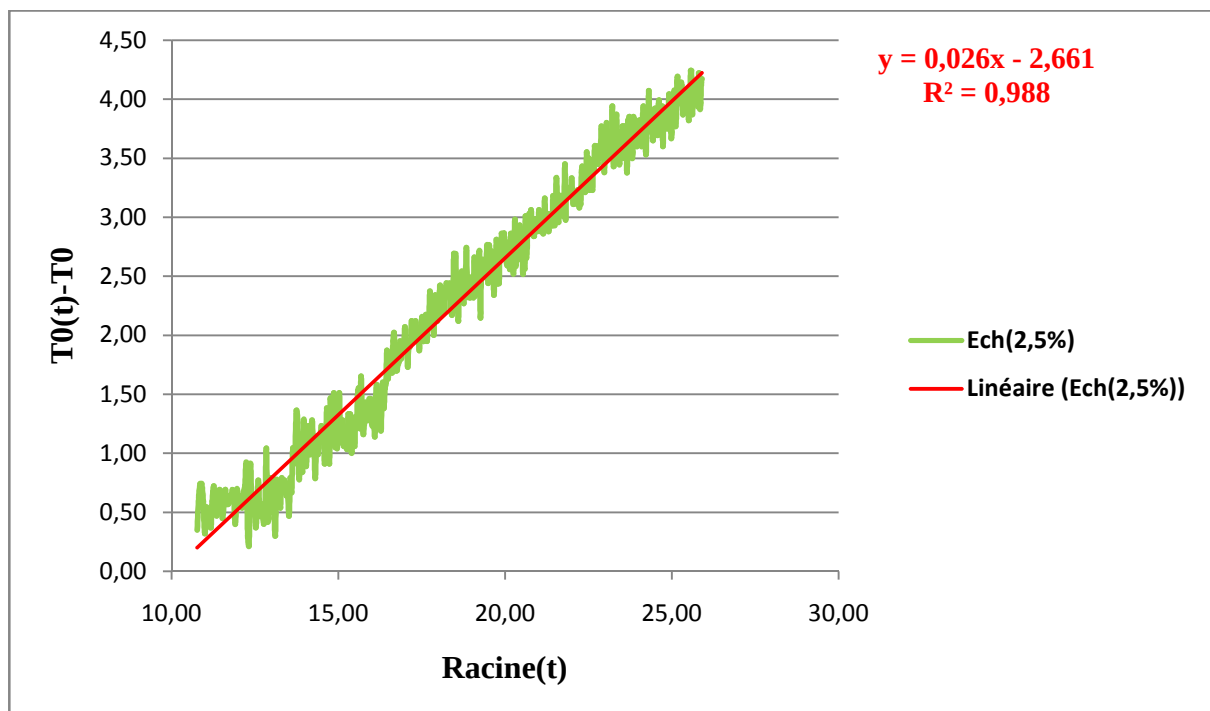


Figure n°13 : Courbe expérimentale $T_0(t) - T_0(0)$ en fonction $\sqrt{t}$ de l'échantillon à 2,5% des fibres

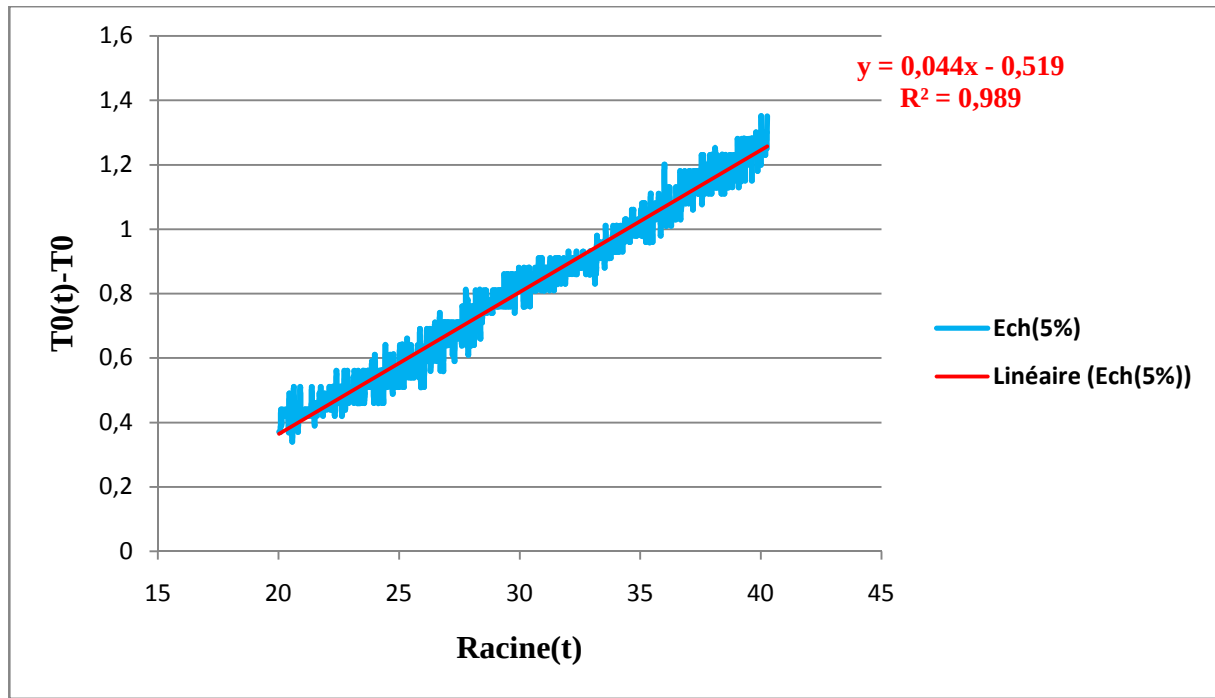


Figure n°14 : Courbe expérimentale $T_0(t) - T_0(0)$ en fonction $\sqrt{t}$ de l'échantillon à 5% des fibres

