

**REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE**

*Union – Discipline – Travail*

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**



**Institut National Polytechnique**



**Ecole Doctorale Polytechnique  
Félix HOUPHOUËT-BOIGNY  
de Yamoussoukro**

**THÈSE**

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-  
BOIGNY**

**Mention : Génie Civil**

**Spécialité Matériaux et Structures**

**Thème :**

**OPTIMISATION DES PROPRIETES DES  
MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE  
BIOMASSE VEGETALE POUR  
L'ECOCONSTRUCTION**

**ZONGO Pagnagdé Lucien**

Soutenu publiquement le 14 Février 2020 devant le jury d'examen composé de :

M. YAO Kouassi Benjamin	Professeur Titulaire, INP-HB, Côte d'Ivoire	Président du jury
M. KONIN Athanas	Maître de Conférences, INP-HB, Côte d'Ivoire	Directeur de thèse
M. EMERUWA Edjikémé	Professeur Titulaire, UFHB, Côte d'Ivoire	Rapporteur
M. MESSAN Adamah	Maître de Conférences, 2IE, Burkina Faso	Rapporteur
M. KOUAKOU Conan Honoré	Maître de conférences, UFHB, Côte d'Ivoire	Examineur

## **Dédicaces**

**A MA FAMILLE**

## Remerciements

En préambule à cette thèse, je tiens à remercier respectivement tous ceux qui m'ont aidé, soutenu et encouragé pour la réalisation de ce modeste travail. Il s'agit de :

Athanas KONIN, Maître de conférences des Universités qui en tant que Directeur de thèse, a toujours été à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de la thèse.

Une pensée spéciale à l'endroit de Monsieur Ouattara Massa, responsable de la cellule matériaux et structure du Laboratoire National de Bâtiment et de Travaux Public (LNBTP) Burkina pour toute l'aide apportée au cours de ce travail.

Docteur Ouédraogo Mahamane, je n'essaierai pas de faire une liste de tout ce que vous avez fait pour moi, je finirai par m'y perdre tant elle est longue. Simplement merci.

Une pensée spéciale à l'endroit du Docteur Kouassi Paulin Maxime YAO, Conseiller du Directeur Générale du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) de Côte D'Ivoire pour toute l'aide apportée au cours de ce travail.

Docteur Bohi Zondjé Poanguy Bernardin, Enseignant à l'INP-HB, merci pour vos multiples conseils et votre entière disponibilité à mon égard.

Adamah MESSAN, maitre de conférences CAMES, Directeur du laboratoire Eco-Matériaux de Construction de 2ie, merci pour vos conseils, et la disponibilité pour les corrections et suggestions apportés afin de parfaire le document.

Messieurs Kouassi Pierre, Belhadj Fathi, Ouattara Ouinteni, Porgo Idrissa, merci pour votre assistance.

Je remercie aussi tous les enseignants de l'INP-HB et de l'EDP, qui m'ont transmis les connaissances et inculqué les valeurs nécessaires pour mériter ce grade.

## Table des matières

DEDICACES.....	II
REMERCIEMENTS .....	III
TABLE DES MATIERES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
LISTE DES FIGURES .....	X
LISTE DES PHOTOS .....	XVII
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	XVIII
RESUME.....	XIX
ABSTRACT .....	XX
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE I : REVUE DE LA LITTERATURE.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTERATURE .....	2
1.1 INTRODUCTION .....	2
1.2 NOTIONS ET DEFINITIONS .....	3
1.2.1. LES BETONS LEGRS .....	3
1.2.2 LES DIFFERENTES METHODES DE MESURE DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES .....	15
1.2.2.1 Les méthodes de mesure en régime permanent .....	15
1.2.2.2 Les méthodes en régime variable .....	18
1.3 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES COMPOSITES DE BIOMASSE VÉGÉTALE–CIMENT.....	28
1.4 CONCLUSION .....	38
PARTIE II : MATERIEL ET METHODES .....	39
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES.....	40
2.1 INTRODUCTION .....	40
2.2 CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS DES COMPOSITES .....	40
2.2.1 ETUDE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES FIBRES DE RÔNIER ET DES BALLES DE RIZ ....	40
2.2.1.1 Etablissement des compositions granulaires des particules de balles de riz et des fibres de rônier .....	41
2.2.1.2 Analyse granulométrique.....	42
2.2.1.3 Mesure de la masse volumique apparente .....	42
2.2.1.4 Mesure de la masse volumique absolue .....	42
2.2.1.5 Mesure du taux d’humidité.....	43
2.2.1.6 Mesure d’absorption d’eau.....	43
2.2.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUE ET MECANIQUE DU CIMENT UTILISE .....	44
2.2.3 CARACTERISTIQUES DE L’EAU DE GACHAGE.....	44

---

2.3	ETUDE DE LA COMPATIBILITE ENTRE LES GRANULATS VEGETAUX ET LE CIMENT.....	44
2.4	FORMULATION DES COMPOSITES.....	47
2.4.1	LE DOSAGE EN CIMENT.....	48
2.5	MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES.....	48
2.5.1	PREPARATION DES BALLE DE RIZ.....	48
2.5.2	MALAXAGE.....	48
2.5.3	MISE EN ŒUVRE DES EPROUVETTES.....	49
2.5.4	CONSERVATION DES EPROUVETTES.....	49
2.6	MESURE DE LA CONSISTANCE DU MORTIER FRAIS.....	49
2.7	ESSAIS DE CARACTERISATION PHYSIQUE, MECANIQUE ET THERMIQUE DES COMPOSITES.....	51
2.7.1	ESSAIS PHYSIQUES.....	51
2.7.1.1	Mesure de la masse volumique.....	51
2.7.1.2	Mesure du taux d'absorption d'eau des composites.....	51
2.7.1.3	Mesure de la perte de masse des composites.....	52
2.7.2	ESSAIS MECANIQUES.....	52
2.7.2.1	Dispositif expérimental.....	53
2.7.2.2	Détermination de la résistance en traction par flexion.....	53
2.7.2.3	Détermination de la résistance en compression.....	54
2.7.3	MODELE MATHEMATIQUE OU ANALYSE STATISTIQUE.....	55
2.7.4	ESSAIS THERMIQUES.....	57
2.7.4.1	Dispositif expérimental.....	57
2.8	MICROSTRUCTURE DES COMPOSITES.....	59
2.9	TRAITEMENT DES RESULTATS DES DIFFERENTS ESSAIS.....	60
2.10	CONCLUSION.....	60
	PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....	61
	CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DE LA MATIERE PREMIERE.....	62
3.1	INTRODUCTION.....	62
3.2	CIMENT.....	62
3.3	BALLE DE RIZ ET FIBRE DE RÔNIER.....	63
3.3.1	GRANULOMÉTRIE.....	63
3.3.2	MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET ABSOLUE ET TAUX D'HUMIDITÉ DES MATIÈRES PREMIÈRES.....	64
3.3.3	MESURE DE L' ABSORPTION.....	66
3.4	EAU DE GÂCHAGE.....	67
3.5	CONCLUSION.....	69
	PARTIE IV : INFLUENCE DU RAPPORT EAU/CIMENT SUR LES BETONS DE FIBRES.....	70
	CHAPITRE 4 : INFLUENCE DU RAPPORT EAU/CIMENT SUR LES BETONS DE FIBRES.....	71
4.1	INTRODUCTION.....	71

---

4.2 DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU DE GACHAGE .....	72
4.3 CONCLUSION.....	75
PARTIE V : INTERPRETATION DES RESULTATS CONCERNANT LES COMPOSITES .....	76
CHAPITRE 5 : INTERPRETATION DES RESULTATS CONCERNANT LES COMPOSITES .....	77
5.1 INTRODUCTION .....	77
5.2 FORMULATION DES COMPOSITES : EXPRESSION DE LA MASSE DES GRANULATS EN FONCTION DES MASSES DE LIANT ET D'EAU .....	77
5.3 ETUDE DE LA COMPATIBILITE.....	81
5.4 PRESENTATION GENERALE DES RESULTATS PHYSIQUES, MECANIQUES ET THERMIQUES .....	83
5.4.1 MICROSTRUCTURE DES COMPOSITES .....	83
5.4.2 PROPRIETES PHYSIQUES DES COMPOSITES .....	86
5.4.3 PROPRIETES MECANIQUES DES COMPOSITES .....	89
5.4.4 FORMULATIONS OPTIMALES.....	92
5.4.5 PROPRIETES THERMIQUES DES COMPOSITES .....	94
5.5 ETUDE DES PROPRIETES PHYSIQUES DES COMPOSITES.....	97
5.5.1 LA MASSE VOLUMIQUE.....	97
5.5.1.1 Influence du rapport E/C sur la masse volumique.....	97
5.5.1.2 Evolution de la masse des composites : étude de la désorption .....	100
5.5.2 L'ABSORPTION D'EAU .....	102
5.5.2.1 La cinétique d'absorption d'eau des composites.....	102
5.5.2.2 Influence du rapport E/C sur le taux d'absorption d'eau .....	107
5.5.3 COMPARAISON DES RESULTATS PHYSIQUES DES DEUX COMPOSITES.....	110
5.6 ETUDE DES PROPRIETES MECANIQUES DES COMPOSITES.....	112
5.6.1 ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE .....	112
5.6.1.1 Comportement mécanique en flexion.....	112
5.6.1.2 Comportement mécanique en compression.....	115
5.6.2 INFLUENCE DU DOSAGE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES.....	117
5.6.3 EVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES DANS LE TEMPS .....	121
5.6.4 COMPARAISON DES RESISTANCES MECANIQUES DES DEUX COMPOSITES .....	123
5.6.5 MODELES MATHEMATIQUES DES RESISTANCES MECANIQUES OU ANALYSES STATISTIQUES	126
5.7 ETUDE DES PROPRIETES THERMIQUES.....	129
5.7.1 L'EFFUSIVITE THERMIQUE.....	130
5.7.1.1 Influence du dosage et de la composition granulaire sur l'effusivité thermique.....	130
5.7.1.2 Influence de la masse volumique sur l'effusivité thermique.....	132
5.7.2 LA CONDUCTIVITE THERMIQUE .....	133
5.7.2.1 Influence du dosage et de la composition granulaire sur la conductivité thermique.....	134
5.7.2.2 Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique.....	136

---

5.7.3 LA DIFFUSIVITE THERMIQUE.....	137
5.7.3.1 Influence du dosage et de la composition granulaire sur la diffusivité thermique .....	138
5.7.3.2 Influence de la masse volumique sur la diffusivité thermique .....	139
5.7.4 COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES THERMIQUES DES DEUX COMPOSITES .....	141
5.8 CONCLUSION.....	145
CONCLUSION GENERALE .....	147
BIBLIOGRAPHIE .....	A
ANNEXES .....	I
ANNEXES POUR LES COMPOSITES FIBRES DE RONIER-CIMENT .....	II
ANNEXE I : DONNEES DES ESSAIS PHYSIQUES SUR LE COMPOSITE .....	III
ANNEXE I.1 : RECAPITULATIF DES DONNEES ENREGISTREES.....	III
ANNEXE I.2 : DONNEES POUR LA CINETIQUE D'ABSORPTION DU COMPOSITE .....	VI
ANNEXE II : DONNEES DES ESSAIS DE TRACTION PAR FLEXION ET DE COMPRESSION .....	VII
ANNEXE II.1 : TABLEAU RECAPITULATIF DES DONNEES .....	VII
ANNEXE III : OUTILS MATHEMATIQUES .....	X
ANNEXE III.1 : CALCUL DES AIRES PAR LA METHODE DES TRAPEZES COMPOSES .....	X
ANNEXE IV : CHAMP THERMIQUE DANS LES EPROUVETTES .....	XII
ANNEXE V : DONNEES DES ESSAIS PHYSIQUES SUR LES COMPOSITES .....	XIX
ANNEXE V.1 : RECAPITULATIF DES DONNEES ENREGISTREES .....	XIX
ANNEXE VI : DONNEES DES ESSAIS DE TRACTION PAR FLEXION ET DE COMPRESSION.....	XXII
ANNEXE VI.1 : TABLEAU RECAPITULATIF DES DONNEES .....	XXIII
ANNEXE VII : CHAMP THERMIQUE DANS LES EPROUVETTES.....	XXV

## Liste des tableaux

Tableau 1.1: Applications des bétons fibrés (Chergui, 2010) .....	14
Tableau 1.2 : Compatibilité entre le bois et le ciment suivant les valeurs du coefficient de Hachmi ...	36
Tableau 1.3 : Paramètres influençant les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites.....	37
Tableau 1.4 : Caractéristiques thermiques du Plexiglas testé.....	59
Tableau 3 - 1 : Caractéristiques physiques du ciment (LNBTP).....	62
Tableau 3 - 2 : Caractéristiques mécaniques du ciment (LNBTP).....	62
Tableau 3 - 3 : Proportions utilisées pour la composition des mélanges.....	63
Tableau 3 – 4 : Différentes caractéristiques physiques des matières premières.....	65
Tableau 3 - 5 : Caractéristiques de l'eau de gâchage (ONEA).....	68
Tableau 4 - 1 : Point des rapports E/C expérimentés pour les composites fibres de rônier Ciment.....	73
Tableau 4 - 2 : Point des rapports E/C expérimentés pour les composites de balles de riz.....	74
Tableau 5-1 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites fibres de rônier-ciment dosés à 400kg/m <sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes .....	78
Tableau 5-2 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites fibres de rônier-ciment dosés à 450kg/m <sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes .....	79
Tableau 5-3 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites fibres de rônier-ciment dosés à 500kg/m <sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes .....	79
Tableau 5-4 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites balles de riz-ciment dosés à 400kg/m <sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes.....	80
Tableau 5-5 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites balles de riz-ciment dosés à 450kg/m <sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes.....	80
Tableau 5-6 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites balles de riz-ciment dosés à 500kg/m <sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes.....	81
Tableau 5-7 : Caractéristiques de l'hydratation des mélanges .....	83



---

Tableau 5-8 : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 400 kg/m <sup>3</sup> .....	86
Tableau 5-9 : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 450 kg/m <sup>3</sup> .....	86
Tableau 5-10 : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 500 kg/m <sup>3</sup> .....	87
Tableau 5-11 : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 400 kg/m <sup>3</sup> .....	87
Tableau 5-12 : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 450 kg/m <sup>3</sup> .....	88
Tableau 5-13 : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 500 kg/m <sup>3</sup> .....	88
Tableau 5-14 : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 400 kg/m <sup>3</sup> .....	89
Tableau 5-15 : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 450 kg/m <sup>3</sup> .....	89
Tableau 5-16 : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 500 kg/m <sup>3</sup> .....	90
Tableau 5-17 : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 400 kg/m <sup>3</sup> .....	90
Tableau 5-18 : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 450 kg/m <sup>3</sup> .....	91
Tableau 5-19 : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 500 kg/m <sup>3</sup> .....	91
Tableau 5-20 : Résistances en compression priorisées des composites fibres de rônier – ciment. ....	92
Tableau 5-21: Résistances en traction priorisées des composites fibres de rônier–ciment. ....	92
Tableau 5-22 : Résistances en compression priorisées des composites balles de riz–ciment. ....	93
Tableau 5-23 : Résistances en traction priorisées des composites balles de riz–ciment. ....	93
Tableau 5-24 : Récapitulatif des résultats thermiques pour les composites fibres de rônier-ciment.....	95
Tableau 5-25 : Récapitulatif des résultats thermiques pour les composites balles de riz-ciment.....	96
Tableau 5-26 : Résistances mécaniques à 14 et à 28 jours .....	122
Tableau 5-27 : Résistances mécaniques à 14 et à 28 jours .....	122

---

## Liste des figures

Figure 1-1 : Quelques granulats légers naturels (Ke, 2008).....	5
Figure 1-2 : Quelques granulats légers artificiels (Ke, 2008).....	6
Figure 1-3: Vue agrandie des vides dans le béton cellulaire (Cox et <i>al.</i> , 2005).....	7
Figure 1-4: Différents types de bétons légers (Short A., Kinnenburgh M., 1968) .....	8
Figure 1-5: Rôle des fibres dans le béton (Chergui, 2010).....	11
Figure 1-6 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée .....	15
Figure 1-7 : Coupe du dispositif des ‘ boîtes ‘ .....	17
Figure 1-8 : Vue d’une sonde de type fil chaud .....	18
Figure 1-9 : Schéma du montage de la méthode du fil chaud .....	19
Figure 1-10 : Schéma de principe de montage du ruban chaud.....	19
Figure 1-11: Comparaison des 3 modèles appliqués à une sonde de .....	20
type "ruban chaud" (Solomon-Ayeh, 1994). .....	20
Figure 1 -12 : Modèle de Jannot et Meukam.....	21
Figure 1-13 : Thermogramme issu du modèle de Jannot et Meukam. ....	21
Figure 1-14 : Champ de température unidirectionnel au centre de la sonde. ....	22
Figure 1-15 : Champ de température bidirectionnel au centre de la sonde. ....	22
Figure 1- 16 : Schéma du montage de la méthode du plan chaud .....	24
Figure 1 -17 : Schématisation d’un plan chaud et notation .....	25
Figure 1-18: Schéma du dispositif général de la méthode du plan chaud asymétrique.....	27
Figure 1-19 : Schéma du dispositif général de la méthode de plan chaud symétrique.....	27
Figure 1-20 : Schéma de principe de la méthode flash.....	28

---

Figure 1- 21 : Comportement mécanique d'un matériau composite fibré (Sedan, 2007) .....	31
Figure 2-1 : Aspect des fibres de rônier .....	41
Figure 2-2 : Aspect des balles de riz .....	41
Figure 2-3 : Dispositif de mesure de la chaleur d'hydratation du ciment .....	45
Figure 2-6 : Organigramme du processus de validation des résistances en traction .....	54
Figure 2-7 : Organigramme du processus de validation des résistances en compression .....	55
Figure 2-9 : Champ thermique dans le Plexiglas : conductivité thermique.....	58
Figure 2-10 : Champ thermique dans le Plexiglas : effusivité thermique .....	59
Figure 3.1 : Courbes granulométriques des mélanges fin et grossier des granulats. ....	64
Figure 3.2 : Cinétique d'absorption du mélange fin et grossier de balles de riz .....	66
Figure 3.3 : Cinétique d'absorption du mélange fin et grossier de fibres de rônier .....	66
Figure 5-1 : Courbes d'hydratation du ciment dans le témoin et en présence des fibres de rônier et des balles de riz.....	81
Figure 5-2: Microstructure des composites balles de riz-ciment pour un mélange fin, un dosage 400 kg/m <sup>3</sup> et un E/C=0,3 .....	83
Figure 5-3: Microstructure des composites balles de riz-ciment pour un mélange grossier, un dosage 400 kg/m <sup>3</sup> et un E/C=0,4 .....	84
Figure 5-4 : Microstructure des composites fibres de rônier-ciment pour un mélange fin, un dosage 400 kg/m <sup>3</sup> et un E/C=0,6 .....	84
Figure 5-5: Microstructure des composites fibres de rônier-ciment pour un mélange grossier, un dosage 400 kg/m <sup>3</sup> et un E/C=0,5 .....	84
Figure 5-6 : Variation de la masse volumique en fonction du rapport E/C, et du dosage pour les deux compositions granulaires.....	98
Figure 5-7 : Variation de la masse volumique en fonction du rapport E/C, et du dosage pour les deux compositions granulaires.....	99
Figure 5-8 : Courbes cinétique de perte de masse des éprouvettes des composites balles.....	101
de riz – ciment .....	101

---

Figure 5-9 : Courbes cinétique de perte de masse des éprouvettes des composites fibres .....	101
de rônier - ciment .....	101
Figure 5-10 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes de composite.....	103
pour le dosage $D_1$ .....	103
Figure 5-11 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite.....	103
pour le dosage $D_2$ .....	103
Figure 5-12 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite.....	104
pour le dosage $D_3$ .....	104
Figure 5-13 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite.....	104
pour le dosage $D_1$ .....	104
Figure 5-14 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite.....	105
pour le dosage $D_2$ .....	105
Figure 5-15 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite.....	105
pour le dosage $D_3$ .....	105
Figure 5-16: Variation du taux d'absorption à 24 heures en fonction du rapport E/C .....	108
pour les dosages $D_1$ , $D_2$ , et $D_3$ .....	108
Figure 5-17 : Variation du taux d'absorption à 24 heures en fonction du rapport E/C pour les dosages $D_1$ , $D_2$ , et $D_3$ .....	109
Figure 5-18 : Masse volumique en fonction du dosage pour le.....	110
mélange fin des deux composites.....	110
Figure 5-19 : Masse volumique en fonction du dosage pour le mélange grossier des deux composites. .....	111
Figure 5-20 : Taux d'absorption en fonction du dosage pour le mélange fin des deux composites....	111
Figure 5-21 : Taux d'absorption en fonction du dosage pour le mélange grossier des deux composites. .....	112

---

Figure 5-22 : Courbe de comportement typique en flexion des composites fibres de rônier- ciment. ....	113
Figure 5-23 : Courbe de comportement typique en flexion des composites balles de riz-ciment .....	113
Figure 5-24 : Rupture brusque de la pâte de ciment pur en flexion .....	114
Figure 5-25 : Fissuration contrôlée dans le composite ciment-fibres.....	115
de rônier à la rupture .....	115
Figure 5-26 : Courbe contrainte-déformation du composite ciment-fibres .....	116
de rônier en compression.....	116
Figure 5-27 : Courbe contrainte-déformation des composites balles de .....	116
riz-ciment en compression.....	116
Figure 5-28 : Résistances mécaniques optimales des composites de fibres de rônier- .....	117
ciment en compression avec la résistance en traction associée en fonction .....	117
du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin.....	117
Figure 5-29 : Résistances mécaniques optimales des composites de fibres de rônier- .....	118
ciment en compression avec la résistance en traction associée en fonction .....	118
du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier.....	118
Figure 5-30 : Résistances mécaniques optimales des composites de balles de riz-ciment.....	118
en compression avec la résistance en traction associée en fonction du.....	118
rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin.....	118
Figure 5-31 : Résistances mécaniques optimales des composites de balles de riz-ciment en compression avec la résistance en traction associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier. ....	119
Figure 5-32 : Résistances mécaniques optimales du composite de fibres de rônier-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin.....	119
Figure 5-33 : Résistances mécaniques optimales des composites de fibres de rônier-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier.....	120

---

Figure 5-34 : Résistances mécaniques optimales des composites balles de riz-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin.....	120
Figure 5-35 : Résistances mécaniques optimales des composites balles de riz-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier.....	121
Figure 5-36 : Résistances en compression optimales en fonction du dosage pour le mélange fin des deux composites.....	123
Figure 5-37: Résistances en compression optimales en fonction du dosage pour le mélange grossier des deux composites.....	124
Figure 5-38 : Résistances en traction optimales en fonction du dosage pour le mélange fin des deux composites.....	125
Figure 5-39 : Résistances en traction optimales en fonction du dosage pour.....	125
le mélange grossier des deux composites.....	125
Figure 5-40 : Résistance en traction en fonction de E/C des composites.....	127
balles de riz-ciment .....	127
Figure 5-41: Résistance en compression en fonction de E/C des composites.....	127
balles de riz-ciment .....	127
Figure 5-42 : Résistance en traction en fonction de E/C des composites.....	128
fibres de rônier-ciment .....	128
Figure 5-43: Résistance en compression en fonction de E/C des composites.....	129
fibres de rônier-ciment .....	129
Figure 5-44 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage pour les deux .....	130
compositions granulaires des composites fibres de rônier-ciment .....	130
Figure 5-45 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage pour .....	131
les deux compositions granulaires des composites balles de riz-ciment .....	131
Figure 5-46 : Variation de l'effusivité thermique des composites fibres de rônier-ciment en fonction de la masse volumique .....	132

---

Figure 5-47 : Variation de l'effusivité thermique des composites balles de riz-ciment en fonction de la masse volumique .....	133
Figure 5-48 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage pour les deux .....	134
compositions granulaires des composites fibres de rônier-ciment. ....	134
Figure 5-49 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites balles de riz-ciment .....	134
Figure 5-50 : Variation de la conductivité thermique des composites fibres de rônier-ciment en fonction de la masse volumique .....	136
Figure 5-51 : Variation de la conductivité thermique des composites balles de riz-ciment en fonction de la masse volumique .....	137
Figure 5-52 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage pour les deux .....	138
compositions granulaires des composites fibres de rônier-ciment. ....	138
Figure 5-53 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites balles de riz-ciment. ....	138
Figure 5-54 : Variation de la diffusivité thermique des composites fibres de rônier-ciment en fonction de la masse volumique .....	139
Figure 5-55 : Variation de la diffusivité thermique des composites balles de riz-ciment en .....	140
fonction de la masse volumique .....	140
Figure 5-56 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage des deux .....	141
composites pour le mélange fin.....	141
Figure 5-57 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage des deux .....	142
composites pour le mélange grossier.....	142
Figure 5-58 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage des deux .....	142
composites pour le mélange fin.....	142
Figure 5-59 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage des deux .....	143
composites pour le mélange grossier.....	143
Figure 5-60 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage des .....	143

---

deux composites pour le mélange fin .....	143
Figure 5-61 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage des .....	144
deux composites pour le mélange grossier .....	144



## Liste des photos

Photo 2-4 : Enregistreur de température de marque Testo 177-T4.....	45
Photo 2-5 : Dispositif pour la réalisation des essais de flexion trois points et de compression .....	53
Photo 2-8 : Dispositif expérimental de la méthode du ruban chaud.....	57
Photo 2-4 : Microscope binoculaire CX22 (Olympus).....	60
Photo 4-1 : Aspect des composites fibres de rônier – ciment selon le dosage en eau .....	72
Photo 4-2: Aspect des composites balles de riz – ciment selon le dosage en eau .....	72

---

## Liste des Sigles et Abréviations

<b>ACCP</b>	: Association Canadienne du Ciment Portland
<b>AFNORD</b>	: Association française de normalisation
<b>CCRB</b>	: Communauté de Communes Rurales du Beauvaisis
<b>CIM BURKINA</b>	: Ciment du Burkina
<b>CNUED</b>	: Conférence des Nations Unie sur l'Environnement et le Développement
<b>FAO</b>	: Food & Agriculture Organisation
<b>FRD</b>	: Fibre Recherche Développement
<b>GES</b>	: Gaz à Effet de Serre
<b>ISO</b>	: International Organization for Standardization
<b>IQEGES</b>	: Inventaire Québécois des Emissions de Gaz à Effet de Serre
<b>LNBTP</b>	: Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics
<b>MAEP</b>	: Mécanisme africain d'évaluation par les pairs
<b>MF</b>	: Mélange Fin
<b>MG</b>	: Mélange grossier
<b>MPa</b>	: mégapascal
<b>NF</b>	: Norme Française
<b>ONEA</b>	: Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement
<b>ONU</b>	: Organisation des Nations Unies
<b>PSRSA</b>	: Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole
<b>SNDR</b>	: Stratégie Nationale de Développement de la Riziculture
<b>TDS</b>	: Total Dissolved Solids

---

## Résumé

La présente étude s'intègre dans une problématique générale de développement de matériaux de construction innovants à impact environnemental réduit. Dans ce cadre, il a été proposé d'étudier des composites cimentaires renforcés par de la biomasse végétale à savoir les fibres de *borassus aethopium mart* (rônier) et les balles de riz.

A cet effet, des études de compatibilité de la pâte de ciment avec les biomasses, de comportement physique, mécanique et thermique des gâchées formulées ont été réalisées pour deux compositions granulaires. L'étude de compatibilité a révélé que les biomasses végétales bien que n'ayant pas subi un traitement préalable sont compatibles avec le ciment CEMII/B 32.5 N. Les essais de caractérisation ont porté sur les propriétés physiques (la masse volumique apparente et l'absorption), les propriétés mécaniques (les résistances en traction par flexion trois points et la résistance en compression) et sur les propriétés thermiques (l'effusivité, la conductivité et la diffusivité). Les résultats obtenus montrent que les composites confectionnés peuvent être classés dans la catégorie des bétons légers ; présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques. Une étude comparative des deux matériaux formulés a révélé que le béton de fibres de rônier est meilleur en termes de performances mécaniques ; et que le béton de balles de riz présente les meilleures propriétés thermiques. Par ailleurs, l'ajout de sable aux fibres de rônier permet l'utilisation des composites fibres de rônier-ciment dans la fabrication de tuiles pour la réalisation des toitures. Quant aux composites balles de riz-ciment, ils peuvent servir à la fabrication de parpaings ou d'entre vous pour la réalisation des cloisons et des dalles à corps creux.

**Mots clés :** bétons légers, composite, biomasse végétale, rônier, balles de riz, compatibilité, propriétés physique, mécanique et thermique.

## Abstract

This study is part of a general problem of developing innovative building materials with a reduced environmental impact. In this context, we proposed to study cementitious composites reinforced with plant biomass, namely borassus aethopium mart (rônier) fibres and rice husks.

To this end, studies on the compatibility of cement paste with biomasses and the physical, mechanical and thermal behaviour of the formulated batches were carried out for two granular compositions. The compatibility study revealed that the plant biomass, although not pre-treated, is compatible with CEMII/B 32.5 N cement. Characterization tests focused on physical properties (bulk density and absorption), mechanical properties (three-point bending tensile strength and compressive strength) and thermal properties (effusivity, conductivity and diffusivity). The results obtained show that the composites produced can be classified in the category of lightweight concrete; they have very good mechanical and thermal characteristics. A comparative study of the two formulated materials revealed that rônier fibre concrete is better in terms of mechanical performance; and that rice bale concrete has the best thermal properties. In addition, the addition of sand to the rônier fibres allows the use of rônier-cement fibre composites in the manufacture of roof tiles. Rice cement bale composites can be used to make cinder blocks or to make hollow body partitions and slabs.

**Keywords:** lightweight concrete, composite, plant biomass, palmyra, rice husks, compatibility, physical, mechanical and thermal properties.

---

# Introduction générale

## Introduction générale

Le protocole de Kyoto vise à réduire les émissions de six gaz à effet de serre : dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones (ONU, 1997). En s'inscrivant dans cette logique, les chercheurs du domaine des sciences des matériaux doivent concevoir des matériaux de construction répondant non seulement aux critères de résistances mécaniques, de durabilité mais aussi contribuant à la réduction des gaz à effet de serre et à l'utilisation de déchets biodégradables ou recyclés.

C'est pour cela que la mise au point de matériaux nouveaux trouve sa pertinence dans le domaine de la construction.

Ainsi, la conception de matériaux composites à base de biomasses végétales doit permettre le respect de ces critères en termes de performances mécaniques, thermiques et de durabilité.

Dans la présente thèse, les fibres de rônier et les balles de riz ont été utilisées comme charges dans la matrice cimentaire pour mettre au point des composites biomasses végétales-ciment.

Ce choix se justifie par le fait que :

➤ Le rônier dont le nom scientifique est *borassus aethiopum mart* est une plante ligneuse « monocotylédone » classée plante prioritaire en Afrique sub-saharienne par des experts de la FAO (FAO, 2004). C'est une ressource renouvelable qui produit du bois de service imputrescible et résistant aux termites avec un faible taux d'absorption d'eau des fibres. Il est utilisé souvent sous forme de latte pour réaliser les maisons à usage d'habitation par les populations. Selon une étude expérimentale de comportement mécanique réalisée dans la perspective de l'utiliser comme armature végétale dans le béton, le *borassus aethiopum mart* possède une contrainte de rupture et un module d'élasticité élevés proches de ceux de l'acier avec un taux de retrait longitudinal nul (Gbaguidi et al., 2010).

➤ Le riz dont le nom scientifique est *Oryza sativa* est une culture bien connue à travers le monde. C'est la deuxième céréale cultivée (149.000.000 ha) et la troisième produite (380.000.000 tonnes), consommée et exportée dans le monde après le blé et le maïs. Cependant, en Afrique, le riz vient après le mil, lesorgho et le maïs (MAEP, 2010). Malgré la production nationale qui a triplé au cours des dix dernières années grâce aux efforts de nos gouvernements à travers le Programme d'Urgence et d'Appui à la Sécurité Alimentaire, la Recherche et Développement, les besoins en consommation ne sont couverts qu'à hauteur de 47 %. Dans le souci d'assurer la

sécurité alimentaire, le gouvernement a opté pour la diversification agricole en inscrivant la filière riz dans les priorités de son Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole (PSRSA) (MAEP, 2009). C'est pourquoi, l'objectif global de la SNDR est d'accroître la production rizicole au moins à 385 000 tonnes de riz blanc par an à partir de 2015.

De plus, l'installation de l'usine de décorticage dans nos villes et campagnes témoigne de la volonté d'industrialiser ce produit vivrier. Comme toute croissance, la production du riz s'accompagne de pollution de l'environnement. Son décorticage génère beaucoup de déchets, évalués à plus de 30 à 40 % de balles de riz (CCRB, 2010) qui sont imputrescibles et hygroscopiques. Par ailleurs les balles de riz de par sa composition chimique sont constituées de cellulose, en cendre et en particulier en silice (teneur en  $\text{SiO}_2$  évaluée à 20 %).

Le terme béton léger se définit comme, l'ensemble des bétons dont la densité est inférieure à celle d'un béton ordinaire (égale à environ 2,4). Une telle densité peut être obtenue grâce à la substitution des granulats classiques (sable, gravillon) par des granulats plus légers, souvent artificiels tels que : l'argile expansée, le schiste, la perlite, la vermiculite, le laitier expansé, etc. Ces bétons qui sont aujourd'hui bien appréhendés au niveau de leur formulation et de leur mise en œuvre, présentent des densités se situant en général dans la fourchette de 1,4 à 1,9. Cette gamme de densité peut être également obtenue si des inclusions légères telles que les balles de riz et les fibres de rônier sont utilisées. Grâce à l'emploi des matrices cimentaires, les bétons de balles de riz et fibres de rônier peuvent avoir des résistances de 5 MPa à 20 MPa pour des rapports Ciment/biomasse compris entre 2 et 8. Bien que des études de l'utilisation des fibres végétales soient réalisées, il demeure cependant que : les rapports optimaux Eau/Ciment ne sont pas étudiés, l'utilisation des fibres comme granulats pour la confection du béton et du mortier apparaît comme une solution écologique mais pas économique en se référant à la recommandation de Tamba (2001), puisqu'il a recommandé le rapport Ciment/Balles de riz égal à 3 correspondant à un dosage de 1 172 kg de ciment par mètre cube de béton pour les ouvrages de constructions.

Pour atteindre ces objectifs, il faut étudier pour les bétons de balles de riz – ciment et les bétons fibres de rônier - ciment, les propriétés physiques (densité, taux d'absorption etc...) et mécaniques (résistances à la traction et à la compression) et thermiques en faisant varier les rapports des différents constituants.

Aussi, le problème de formulation est très complexe, car il dépend des propriétés des matériaux utilisés (taux d'absorption, masse volumique, le taux d'humidité et granulométrie des balles de riz et fibres de rônier, caractéristiques physique et mécanique du ciment, etc.).

Ce document comporte trois (03) parties subdivisées en chapitres.

La première partie de cette thèse porte sur des généralités sur les composites cimentaires à base de granulats d'origine minérale et végétale, ensuite la synthèse des travaux de composites de biomasses végétales-ciment et une présentation des différentes méthodes de caractérisation thermique des matériaux.

La deuxième partie est dédiée à l'étude de compatibilité entre les granulats végétaux et le ciment et à l'étude de la formulation des bétons de balles de riz – ciment et fibres de rônier – ciment, pour identifier les proportions de chacun des constituants des bétons de balles de riz et fibres de rônier dont les propriétés mécaniques, physiques, thermiques et de mise en œuvre permettent leur utilisation pour la réalisation des éléments entrant dans la construction.

Dans la troisième partie, les résultats et l'intérêt technico-économique de l'utilisation des bétons de balles de riz et de fibres de rônier - ciment dans la préfabrication des parpaings, panneaux, et entrevous des planchers à corps creux des bâtiments sont présentés.

Enfin, la conclusion générale reprend les principaux résultats, et des perspectives ouvertes par le présent travail.



# **Partie I : Revue de la Littérature**

## Chapitre 1 : REVUE DE LA LITTERATURE

### 1.1 Introduction

Nous assistons depuis quelques dizaines d'années à une prise de conscience de la part des pouvoirs publics, des acteurs économiques et de la société civile, des conséquences défavorables des activités humaines sur l'environnement et de la nécessité de réduire, de manière urgente, ces impacts. C'est pourquoi, aujourd'hui, à l'échelle internationale, dans les domaines de l'industrie, de l'énergie, des transports, de la construction etc. les incitations et les contraintes sont de plus en plus fortes pour intégrer les projets à une démarche de développement durable. La définition la plus répandue du développement durable est celle édictée en 1987 dans le rapport Brundtland (**BRU, 1987**) selon laquelle « le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Or, aujourd'hui, la capacité des générations futures à subvenir à leurs besoins est menacée. Nous nous trouvons dans une situation critique à plusieurs titres, les plus parlants étant peut-être : - la menace d'un réchauffement climatique, identifiée aujourd'hui, par la majorité des scientifiques, comme une conséquence du rejet en quantité importante de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> etc.) par les activités humaines ; - la raréfaction des ressources naturelles, dont certaines apparaissent pourtant à l'heure actuelle indispensables au fonctionnement de nos sociétés (pétrole, gaz etc.). Cette prise de conscience au niveau international a conduit à l'organisation en juin 1992 de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (**CNUED, 1992**) à Rio puis, à l'adoption, 5 ans plus tard, du protocole de Kyoto par les représentants de 160 pays. 38 pays industrialisés se sont ainsi engagés à réduire globalement entre 2008 et 2012 leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 5.2% par rapport au niveau de 1990.

Mais quel est l'impact du secteur du bâtiment sur les consommations énergétiques ou l'émission de GES ? Il est majeur. En France, le secteur de la construction est responsable de 43 % des consommations d'énergie, bien plus que les transports (31 %) ou l'industrie (20 %). Il génère 25 % des émissions de GES totales, contre 28 % pour les transports et 21 % pour l'industrie. De plus, sa part s'est fortement accrue ces dernières années : entre 1996 et 2004, les émissions de CO<sub>2</sub> liées au résidentiel et au tertiaire ont augmenté de 23.3 % tandis que dans le même temps celles de l'industrie ont diminué de 21.6 % (**IQEGES, 2018**).

Depuis très longtemps, le béton est réalisé à partir des composants que sont le ciment, l'eau et les granulats. La pâte de ciment issue du mélange de l'eau et du ciment constitue la matrice du matériau. Son rôle est d'assurer la cohésion de l'ensemble. Les granulats quant à eux forment l'ossature du matériau ; ils assurent sa résistance mécanique. Par ailleurs, la valorisation des biomasses végétales passe par la mise en place de nouveaux types de matériaux tels que les bétons de fibres végétales, les panneaux de particules végétales utilisables dans les procédés de construction de bâtiment et des infrastructures de Génie civil. Dans ce chapitre des notions et définitions sur les bétons légers en général et les matériaux composites à base de biomasses végétales en particulier sont données, puis il sera présenté les propriétés thermiques d'un matériau avec les différentes méthodes de détermination de ces propriétés et enfin une analyse des travaux de recherche réalisés dans ce domaine sera faite.

## **1.2 Notions et définitions**

### **1.2.1. Les bétons légers**

Le qualificatif « léger » est attribué aux bétons obtenus par incorporation d'air (**Ke, 2008**). De ce fait, la densité de ces bétons est relativement faible par rapport à la densité du béton classique. Les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique apparente est inférieure à **1800 kg/m<sup>3</sup>**. En fait, la majorité de ces bétons ont une masse volumique apparente faible comprise entre **1300 et 1800 kg/m<sup>3</sup>**, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre **2200 et 2600 kg/m<sup>3</sup>** (**Contant, 2000**).

En général, on distingue les bétons légers confectionnés à partir de granulats légers naturels, de ceux confectionnés à partir de granulats légers artificiels. L'apparition du béton léger confectionné à partir de granulats légers artificiels date des années vingt, soit depuis la mise au point par S.J. Hayde du premier procédé de cuisson de l'argile à partir d'un four rotatif (**Contant, 2000**). Bien que l'utilisation des bétons légers ait débuté au siècle dernier, ce n'est qu'à partir des années cinquante qu'ils ont connu un essor véritable (**Contant, 2000**). Il existe cependant d'autres critères de classification des bétons légers.

## ➤ Différents types de bétons légers

Les bétons légers sont répartis en deux grands groupes selon la nature de l'ouvrage ou le rôle auquel ils sont destinés. Les deux grandes familles ainsi distinguées sont les *bétons structuraux* et les *bétons architecturaux*.

### • Béton léger structural

L'Association Canadienne du Ciment Portland (**ACCP**) définit le béton léger structural comme un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 15 MPa et dont la masse volumique est inférieure à 1850 kg/m<sup>3</sup> (**Contant, 2000**). Le béton léger structural est destiné à la fabrication d'éléments dont les propriétés sont limitées par des contraintes spécifiques. Ainsi, lorsque la capacité portante d'un sol ne permet pas d'y ériger une structure conventionnelle, l'utilisation de béton léger pour les différentes parties de structure du bâtiment permet d'obtenir un gain considérable en légèreté sans toutefois modifier de façon significative le gabarit du bâtiment.

### • Béton léger architectural

Par opposition au béton léger structural, le béton léger architectural est essentiellement utilisé pour le remplissage et la mise en œuvre de panneaux non résistants. L'ACCP le définit comme un béton ayant une résistance à la compression comprise entre 0,7 et 7 MPa et une masse volumique comprise entre 240 et 1440 kg/m<sup>3</sup> (**Contant, 2000**). Contrairement aux différentes méthodes traditionnelles de formulation qui se basent sur la résistance à la compression, la conception et la mise en œuvre d'un béton léger architectural vise une légèreté optimale. Pour ce faire, trois techniques principales sont utilisées afin d'obtenir des masses volumiques aussi faibles :

*Par utilisation de granulats légers* : l'allègement du béton est dû à la faible densité des granulats qui y sont utilisés. Le terme "granulat léger" désigne une gamme d'agrégats ayant une densité spécifique considérablement inférieure à celles du sable et du gravier, tous deux utilisés simultanément pour presque tous les bétons (**Expanded shale clay and slay institute, 2001**). Cependant, la densité limite permettant de définir un granulat léger varie selon les codes et normes en vigueur dans différents pays. Aux Etats-Unis, la densité sèche des granulats légers est limitée à **1120 kg/m<sup>3</sup>** alors qu'en Pologne, elle est fixée à **1800 kg/m<sup>3</sup>**

(EuroLightCon, 1998). Les premiers granulats légers pour le béton sont des granulats naturels issus des roches volcaniques, comme la pierre ponce (Ke, 2008). Aujourd'hui, plusieurs autres granulats sont utilisés dans différents pays du monde selon leur disponibilité. La figure 1-1. ci-dessous présente différents granulats légers couramment utilisés.



*Pierre ponce*



*coque de noix de palme*



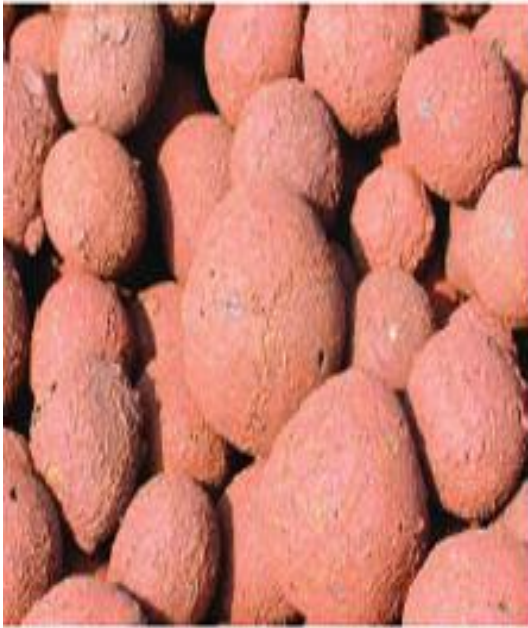
*Diatomite*



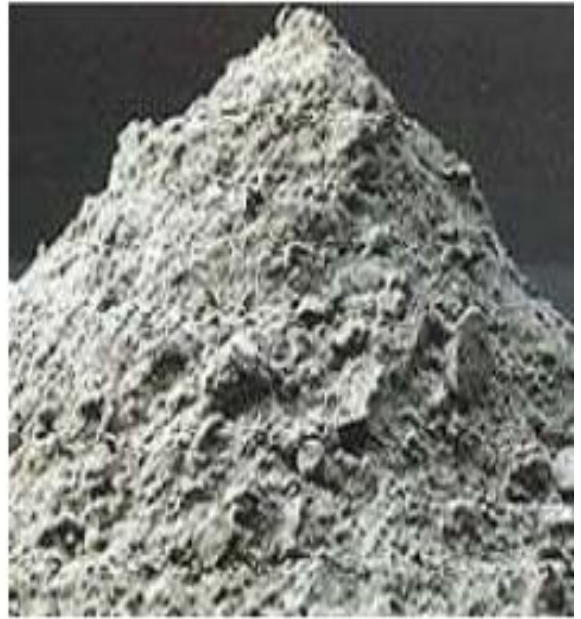
*Laitier volcanique*

**Figure 1-1 : Quelques granulats légers naturels (Ke, 2008)**

L'industrialisation des bétons de granulats légers a conduit à la création de nouveaux produits qui incorporés dans le béton lui offre une légèreté plus grande. Au nombre de ces granulats artificiels, les plus en vue sont le schiste expansé, les billes de polystyrène, les cendres volantes ou encore des scories. La figure 1-2. présente l'argile expansée et les cendres volantes entassées.



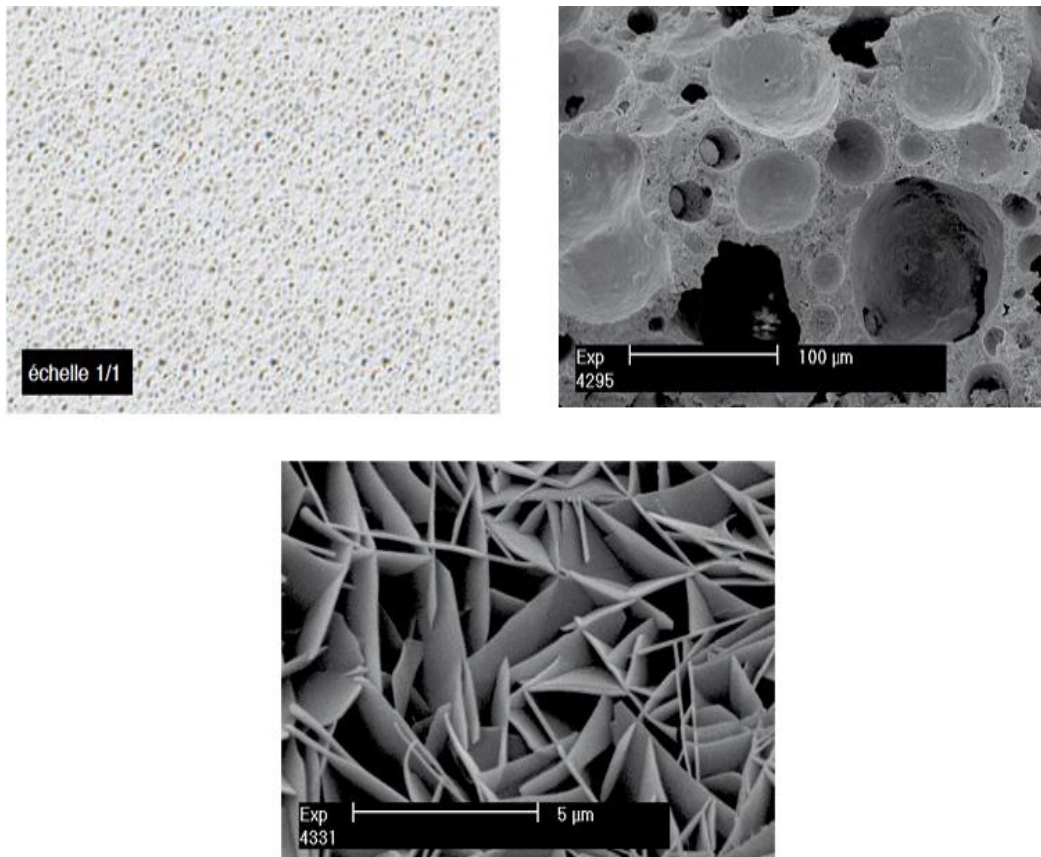
Argile expansée



Cendres volantes

**Figure 1-2 : Quelques granulats légers artificiels (Ke, 2008)**

***Par incorporation d'air dans le béton :*** Ce procédé consiste à ajouter à un mélange de sable, de chaux et de ciment une petite quantité de poudre d'aluminium. L'adjonction de la poudre d'aluminium a pour effet de libérer de l'hydrogène qui fait lever la pâte et donne naissance à des myriades de cellules gorgées d'hydrogène, rapidement chassé sous la pression de l'air ambiant. Le béton ainsi confectionné est appelé *béton cellulaire* (Cox et al., 2005). Sur la figure 1-3 ci-dessous, sont représentées les vues aux microscopes à différentes échelles d'un échantillon de béton cellulaire. Il y retrouve effectivement les vides d'air ou cellules créées par le dégagement d'hydrogène. Les cellules ont des tailles variées et peuvent atteindre jusqu'à 80 % du volume total du béton.



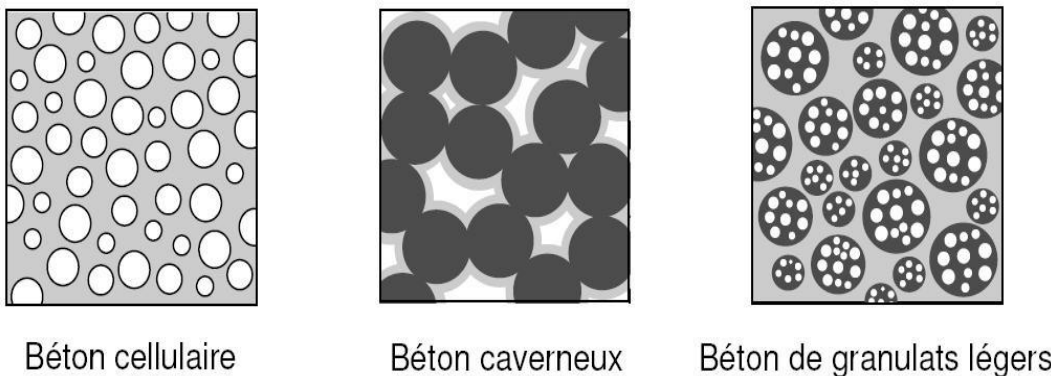
**Figure 1-3: Vue agrandie des vides dans le béton cellulaire (Cox et al., 2005)**

Il est extrêmement important que les cellules soient petites, sphériques et réparties de façon très homogène dans la masse. Les grandes cellules affaiblissent la résistance car le transfert des contraintes se réalise au travers des parois des cellules. Plus grandes elles sont, plus grande est la concentration des contraintes dans les parois. Ceci contrairement à ce qui se passe dans un béton ordinaire où le transfert des efforts se fait au travers des granulats, et le ciment servant de liant entre les agrégats. En adaptant minutieusement la recette de fabrication, il est possible de modifier le diamètre et le nombre de cellules (toujours fermées) et adapter la masse volumique de sorte qu'elle puisse varier de **350 à 650 kg/m<sup>3</sup>**.

***Par suppression de fines*** : Il s'agit ici de supprimer la totalité ou une partie des granulats fins; le béton produit alors une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment. Cette substitution des granulats fins par les vides crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores) responsables de la diminution de la masse volumique (Neville, 1981). Le béton ainsi confectionné est appelé *béton caverneux*

(ou poreux). Ce procédé permet d'obtenir des masses volumiques de l'ordre de **1600 à 1800 kg/m<sup>3</sup>** avec des résistances à la compression de 3 à 7 MPa à 28 jours, et ce, même en utilisant des granulats usuels (**Dreux, 1990**). Lorsqu'on ajoute aux granulats grossiers une petite quantité de fines, on parle de béton semi-caverneux.

Le béton cellulaire, le béton caverneux et le béton de granulats légers ne sont pas des classes disjointes de bétons légers. En effet, des bétons caverneux peuvent être produits à l'aide de granulats ultra-légers. Rappelons que l'objectif final visé est la baisse de la densité du matériau obtenu. La différence, ainsi que l'indique la figure 1-4 ci-dessous se situe uniquement au niveau de la position des vides d'air (en blanc sur la figure) dans le béton.



**Figure 1-4: Différents types de bétons légers (Short A., Kinnenburgh M., 1968)**

- **Applications des bétons légers : Etat des lieux**

Les bétons légers sont utilisés pour la construction et la fabrication d'éléments de toutes sortes. Ils servent aussi bien à la construction de grands ouvrages d'art qu'à l'érection d'immeubles de grande hauteur. Dans le bâtiment les applications des bétons légers sont liées à deux points essentiels :

*La légèreté des structures* : c'est la raison fondamentale qui justifie l'intérêt porté aux bétons légers. Aussi, l'un des défauts majeurs du béton conventionnel est son poids élevé. Alors que le béton traditionnel conduit à la réalisation de structures massives et peu élancées, de par ses propriétés mécaniques et un rapport résistance/masse volumique beaucoup plus faible que celui d'autres matériaux, les bétons légers, de résistance parfois comparable à celle des bétons classiques, peuvent permettre une plus grande souplesse dans la conception des ouvrages et induisent plusieurs économies. Les bétons légers sont utilisés dans des ouvrages comme les immeubles de grande hauteur, les ponts à grande portée ou encore les plates-formes offshore; par exemple, en 1971, le gratte-ciel One Shell Plaza est construit à Houston.



Avec ses 50 étages et une hauteur de 218 m, il est «le bâtiment en béton de granulats légers le plus haut du monde » (**Ke, 2008**). En 2007, un pont en béton de granulats légers, le New Benicia-Martinez Bridge est achevé en Californie. D'une longueur totale de 2,7 km, il possède 22 travées, dont la portée atteint 201 m. La réduction du poids propre permet, entre autres, de diminuer les sections des éléments porteurs, de réduire la quantité d'acier d'armatures et les dimensions des fondations. Une meilleure adéquation du dimensionnement des ouvrages aux contraintes des zones fortement urbanisées permet ainsi d'optimiser l'utilisation de l'espace souterrain.

**L'isolation** : les bétons légers, du fait des vides qu'ils contiennent sont des meilleurs isolants thermiques comparativement au béton ordinaire. En effet, le réseau poreux du béton léger permet d'y stocker de l'air qui est un bon isolant thermique et acoustique (**Nguyen, 2010**). Ces paramètres revêtent plus d'importance à nos jours où la conception est de plus en plus tournée vers la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment.

Malgré les avantages qu'elle est susceptible de procurer, l'utilisation à grande échelle du béton léger n'est pas encore une réalité dans l'industrie de la construction. Elle ne s'étend qu'à quelques marchés de niche ciblés. Cette expansion timide est due au fait que les bétons légers ne répondent pas à un besoin clairement exprimé de la part des consommateurs et des professionnels du secteur (**Sofred, 2011**). Aussi, Il est à noter que pour l'utilisation d'un béton à granulats légers (granulats expansés) le prix des granulats est plus élevé, donc le prix par mètre cube de béton léger est plus élevé que celui des bétons ordinaires (**Blackburn., 2006**). L'intérêt porté aux bétons légers ne pourrait connaître un véritable essor que si des textes réglementaires incitatifs, un prix compétitif ou un push d'un acteur majeur contribue à imposer leur usage pour la mise en œuvre des différents ouvrages.

Les priorités étant tournées vers la sauvegarde de l'environnement, les recherches sont focalisées sur les matériaux verts répondant aux besoins de légèreté déjà exprimés. D'où l'idée de l'élaboration d'un nouveau type de matériau à base de fibres végétales exploitables pour la fabrication d'éléments de construction de toutes sortes. Il en est résulté l'ouverture d'un vaste domaine de recherche liant à la fois les notions de construction durable et d'efficacité des structures.

- **Bétons de fibres**

- ❖ **Définition**

Un composite fibré est un matériau constitué d'un ensemble de fibres résistantes noyées dans une matrice dont les propriétés mécaniques sont nettement plus faibles. Les fibres jouent le rôle de renfort tandis que la matrice assure la cohésion du composite et le transfert des efforts aux fibres (**Magniont., 2010**). A la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton et permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les bétons fibrés font l'objet de méthodes spécifiques de dimensionnement pour des applications structurelles (dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, etc.). Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées (**CIMBETON, 2006**).

- ❖ **Rôles des fibres dans le béton**

Le béton renforcé de fibres est un matériau composite dont les propriétés sont fonction des caractéristiques des fibres, de la qualité de la matrice cimentaire et des autres composants éventuels (autres granulats, fluidifiants, etc.). L'ajout de fibres est destiné à assurer la pérennité de l'ouvrage en s'opposant à l'apparition, la propagation et l'élargissement des fissures dans le béton. En effet, le béton ordinaire est connu pour sa résistance quasi nulle à la traction : la fissuration y est souvent très préjudiciable à la stabilité de la structure et il n'existe aucune maîtrise de l'évolution de ce phénomène dans le matériau. Par contre la présence des fibres a tendance à assurer une couture des micro- fissures apparaissant dans le béton ainsi que l'indique la figure 1-5.

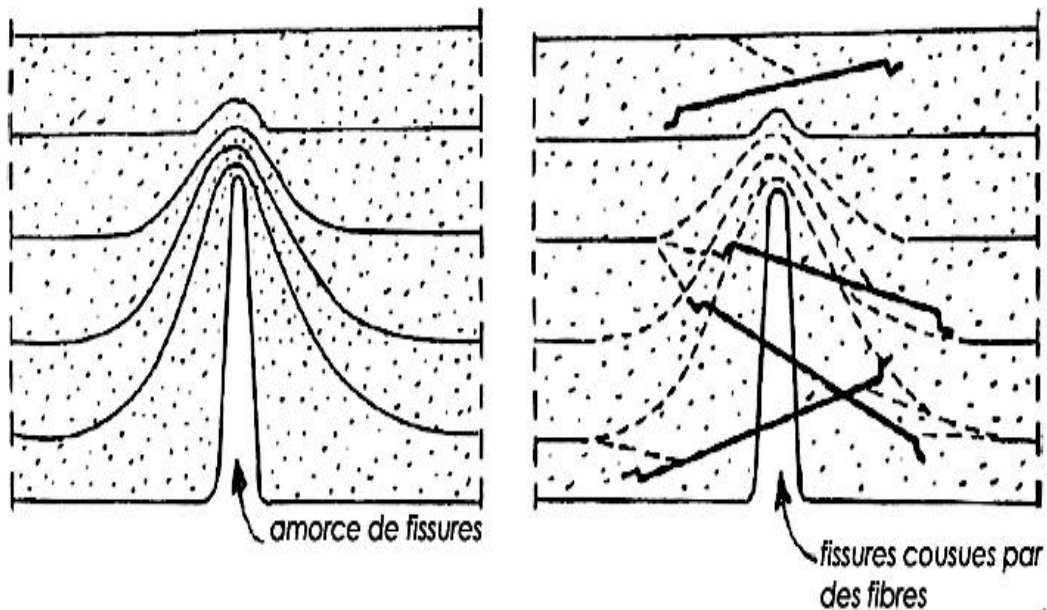


Figure 1-5: Rôle des fibres dans le béton (Chergui, 2010)

### ❖ Atouts du béton fibré

Cette fonction des fibres dans le béton confère aux bétons fibrés des caractéristiques intrinsèques représentant des atouts non négligeables. Au nombre de ces caractéristiques, il y'a :

**La maîtrise de la fissuration :** avec l'action des fibres, la rupture même si elle est atteinte, n'est plus brutale. On peut donc déterminer des moments de fissuration ou de rupture permettant l'approche de dimensionnement des ouvrages en maîtrisant les risques de fissuration et de rupture (Nardjes, 2005).

**Un renforcement multidirectionnel et homogène :** sous l'effet de la répartition homogène des fibres, le béton fibré présente, sauf dans certains cas exceptionnels, les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions (Nardjes, 2005; CIMBETON, 2006). Ce qui est loin d'être le cas du béton armé ordinaire où les armatures ne travaillent que dans une direction privilégiée et dans une zone bien précise (souvent la fibre inférieure en flexion simple).

**Une facilité et rapidité de mise en œuvre :** contrairement au béton armé, la mise en œuvre des bétons fibrés ne nécessite pas une pose préalable de ferrailage coûteuse en ressources humaines et de temps (Nardjes, 2005). Elle ne fait appel à aucune technique particulière et peut se réaliser par coulage, pompage, moulage ou projection.

---

***Un remplacement partiel ou total des armatures passives :*** avec des dispositions adéquates, les bétons de fibres peuvent présenter des résistances très élevées rendant de ce fait inutiles l'incorporation de barres d'acier dans le matériau. Cet avantage est très important puisqu'il peut influencer considérablement le coût des constructions.

Selon les fibres utilisées, ces fonctions se traduisent par une amélioration significative des propriétés du béton relatives à :

- la cohésion du béton frais;
- la déformabilité avant rupture;
- la résistance à la traction par flexion;
- la ductilité et la résistance post fissuration;
- la résistance aux chocs;
- la résistance à la fatigue;
- la résistance à l'usure;
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges;
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures;
- la tenue au feu;
- la résistance à l'abrasion.

### ❖ **Différents types de fibres**

Les fibres sont regroupées en plusieurs catégories selon le procédé d'obtention (naturelle ou artificielle) et la nature minérale ou organique de leur origine.

***Les fibres naturelles d'origine végétale :*** Les fibres végétales produites dans le monde proviennent principalement de quatre parties des plantes : la tige (chanvre, lin, jute), les feuilles (sisal, abaca), les graines (coton, kapok) et les fruits (coco) (**FRD, 2012**). La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres de cellulose sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme un additif au ciment d'amiante et non pas comme un renfort. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices organiques et aussi des matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces et d'autres types d'éléments (**Chergui, 2010**).

***Les fibres naturelles d'origine minérale :*** Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ...etc.) et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications

traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation et l'ignifugation, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes. De plus, ces fibres ne conviennent pas pour les mortiers et les bétons à cause de leur longueur trop faible et de la quantité d'eau importante exigée. Elles ne sont donc utilisées qu'avec de la pâte pure (Nardjes, 2005).

*Les fibres artificielles d'origine minérale* : Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

*Les fibres synthétiques d'origine organique* : Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, polyester ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle.

#### ❖ **Domaines d'application des bétons fibrés**

Les performances optimales des bétons fibrés ne sont atteintes que lorsqu'on choisit le bon type, la longueur adéquate et le dosage convenable de fibres.

Le tableau 1.1 ci-dessous résume les conditions d'utilisation de certaines fibres bien connues.

Tableau 1.1: Applications des bétons fibrés (**Chergui, 2010**)

<b>Applications</b>	<b>Intérêt apporté par l'adjonction des fibres</b>
Canalisation et coque minces faiblement sollicitées.	- Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges. Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations.
Dallage, chaussées en béton, dallages manufacturés, et tous éléments structurés et tous éléments structuraux soumis à la flexion.	- diminution de 40 % de l'ouverture de fissures, - augmentation de la rigidité après fissuration, - augmentation de la résistance au cisaillement, - augmentation de la résistance à l'usure.
Éléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations...etc.).	- amélioration de la charge ultime, - pas de rupture catastrophique.
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles exemple: piste d'aéroport.	- l'énergie absorbée est plus importante, - la durée de choc est augmentée, - la loi de comportement du matériau est fortement modifiée.
Réparation des revêtements routiers, tablier de ponts.	- amélioration de la résistance aux chocs, - amélioration de la déformation.
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux hautes températures.	- remplacement avec succès du revêtement réfractaire, diminution le coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, les tunnels, les galeries souterrains.	- évite le travail de fixation du grillage ordinairement employé, diminution du coût de réparation des stabilisations des parois rocheuses et les talus.
Fabrication des pieux, revêtement ignifuges isolants (construction navale). Panneaux de revêtement de façade....etc.	- augmentation de la résistance aux chocs, - augmentation de la résistance à l'usure, - augmentation de la durabilité de revêtement.

## 1.2.2 Les différentes méthodes de mesure des propriétés thermo-physiques

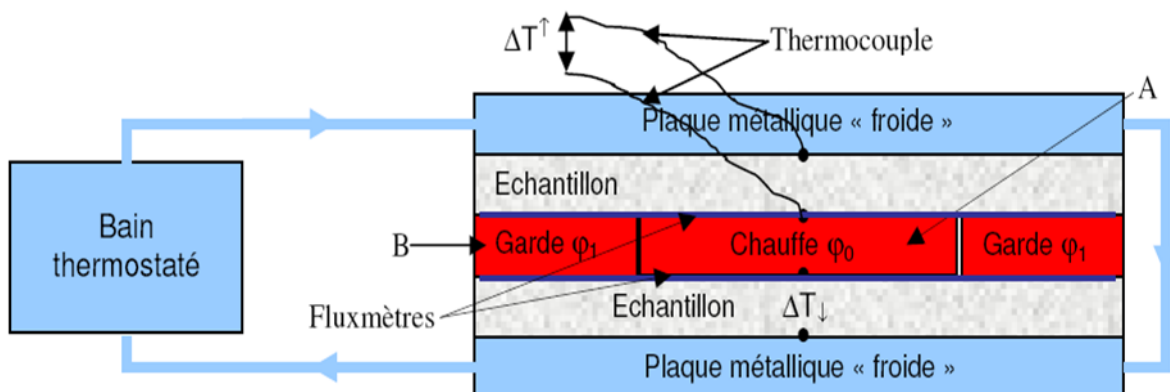
Selon **Degiovanni**, la classification la plus naturelle consiste à considérer deux grands groupes: les méthodes en régime permanent et celles en régime variable (**Degiovanni, 1999**).

### 1.2.2.1 Les méthodes de mesure en régime permanent

Ces méthodes nécessitent un long temps de manipulation et la variation de l'humidité au cours du temps entraîne ainsi des résultats entachés d'erreurs. Cependant parmi celles-ci, la méthode de Lee donne des résultats satisfaisants, mais elle exige plus de temps surtout pour des matériaux à faible conductivité thermique (**Meukam, 2004**). Les mesures statiques supposent l'utilisation des équations de Fourier dans l'état stationnaire. Il est nécessaire de déterminer la densité de flux de chaleur et le gradient de température le long de la normale à l'échantillon. Le régime permanent permet d'obtenir des mesures d'une grande précision mais le temps qu'il faut pour atteindre l'équilibre peut constituer un long processus si la conductivité est très faible.

- **Méthode de la plaque chaude gardée**

L'objectif est de mesurer la conductivité thermique de chaque échantillon en reproduisant les conditions de transfert de chaleur 1D entre deux plans parallèles et isothermes (**Vivancos. et al., 2009**). Son schéma de principe est représenté sur la figure 1-6. :



**Figure 1-6 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée**

Les plaques extérieures en matériau très conducteur (cuivre, aluminium) sont maintenues à température constante par circulation d'un fluide issu d'un bain thermostaté. Une plaque

chauffante délivre une puissance de chauffe  $\varphi_0$  uniforme et constante qui est transmise aux plaques extérieures à travers les échantillons dont on veut mesurer la conductivité thermique. On s'assure du transfert 1D dans la zone centrale de mesure en entourant la zone chauffée par un anneau de garde auquel on fournit un flux  $\varphi_1$  tel que la température de l'anneau soit égale à la température de la plaque chauffante. On s'assure ainsi également que tout le flux passe à travers l'échantillon. Le flux  $\varphi_1$  est supérieur au flux pour compenser les pertes latérales convectives. L'anneau de garde et la plaque chauffante sont séparés par une mince couche d'air.

Des thermocouples sont placés sur les deux faces des échantillons pour en mesurer les écarts de température.  $\Delta T_f$  et  $\Delta T_j$ .

La conductivité thermique s'en déduit par :

$$\lambda = \frac{e \varphi_0}{S (\Delta T_f + \Delta T_j)} \quad (1.1)$$

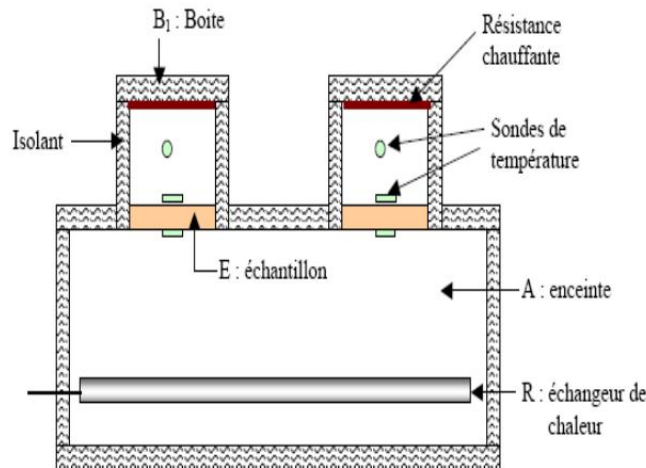
où  $S$  est la surface de la plaque chauffante.

Cette méthode n'est applicable qu'aux isolants pour lesquels on peut négliger les résistances de contact par rapport à la résistance du matériau. Elle permet par ailleurs, d'obtenir des écarts de température entre les deux faces relativement importants donc mesurables avec une bonne précision. On peut utiliser de la graisse conductrice pour diminuer les résistances de contact entre les échantillons et les plaques. Cette méthode est difficilement applicable à haute température et le résultat peut être biaisé par les pertes latérales si la surface de l'échantillon est insuffisante par rapport à l'épaisseur. Elle a fait l'objet d'une normalisation **ISO 8302 :1991, NF EN 1946-2**.



## • Méthodes des boîtes

Le principe de cette méthode, mise au point par le Laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'Université Claude Bernard de Lyon, est schématisé sur la figure 1-7.



**Figure 1-7 : Coupe du dispositif des "boîtes"**

Le volume A est maintenu à une température plus basse que les deux boîtes grâce à un échangeur basse température R relié à un cryostat. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E. En régime permanent, les mesures du flux de chaleur émis par C et des températures sur les faces supérieure et inférieure de E permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon.

Le système de chauffage est maintenu pendant une certaine durée. On observe l'évolution des températures  $T_C$  et  $T_F$  des faces chaude et froide de l'échantillon.

Lorsque ces températures se stabilisent (variation de l'ordre du 1/10e de degré en une heure), on considère que l'on a atteint le régime permanent. Ceci intervient généralement 4 à 7 heures après le montage de l'échantillon, si le système de refroidissement n'a pas été arrêté après l'essai précédent. A ce moment, le bilan énergétique du "local boîte" permet de considérer les trois flux suivant l'effet Joule produit par l'élément chauffant C :

$$\Phi_J = \frac{V^2}{R} \quad (1.2)$$

Les déperditions thermiques à travers la boîte B :

$$\Phi_d = C_1(T_B - T_{am}) \quad (1.3)$$

Et le flux conductif à travers l'échantillon :

$$\Phi_c = \frac{\lambda_e S}{e} (T_c - T_F) \quad (1.4)$$

Le flux  $\Phi_j$  compensant les déperditions et la conduction ( $\Phi_j = \Phi_d + \Phi_c$ ), les équations

(9), (10) et (11) conduisent à la conductivité thermique sous la forme :

$$\lambda = \frac{e}{S(T_c - T_F)} \left[ \frac{V^2}{R} - C_1(T_B - T_A) \right] \quad (1.5)$$

### 2.7.1.1 1.2.2.2 Les méthodes en régime variable

Ces méthodes sont le plus souvent utilisées pour des matériaux biologiques qui sont généralement hétérogènes et ont un taux d'humidité élevé. La méthode du fil chaud (figure 1-9) est l'une des méthodes à état transitoire la plus utilisée. La méthode transitoire suppose l'équation différentielle complète de l'écoulement de chaleur établie par Carslaw et Jagger (**Carslaw, et Jaeger, 1959**). La méthode dynamique ne donne pas en général une grande précision.

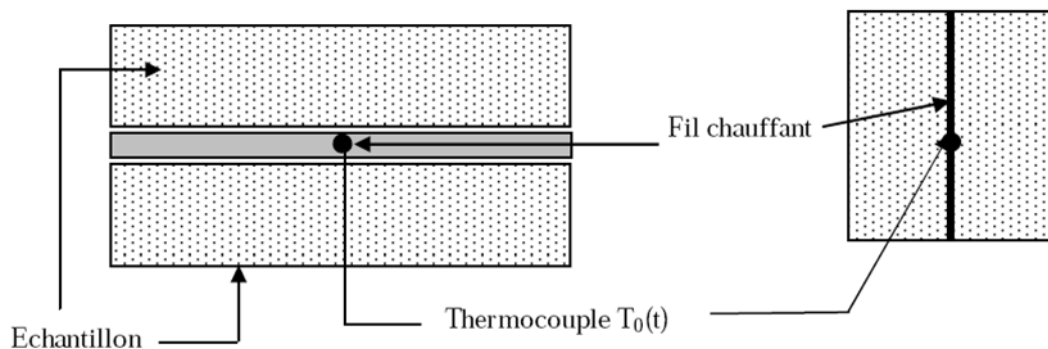
Ci-dessous présenter quelques méthodes de mesure de la conductivité thermique dont les principes sont rapidement exposés. Egalement, se basant sur les travaux de Jannot (**Jannot, 2003**), est présenté les méthodes de mesure des propriétés thermiques par le fil chaud, le ruban chaud (figure 1-8) et le plan chaud.

- **Méthode du fil chaud**



**Figure 1-8 : Vue d'une sonde de type fil chaud**

Un flux de chaleur constant  $\varphi$  (avec  $\varphi = 0$  si  $t < t_0$  et  $\varphi = \varphi_0$  si  $t > t_0$ ) est appliqué au fil chauffant. Un thermocouple permis de relever l'évolution au cours du temps de la température  $T_0(t)$  de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces c'est-à-dire lorsque l'hypothèse du milieu infini est valide, il est supposé que le transfert dans l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. Une méthode d'estimation judicieusement choisie de façon à minimiser l'écart entre les courbes théorique et expérimentale a aussi permis d'évaluer la conductivité thermique  $\lambda$ , la capacitance thermique  $(mc)_s$  de l'ensemble sonde + résistance chauffante et la résistance de contact  $R_c$  à l'interface sonde /échantillon.

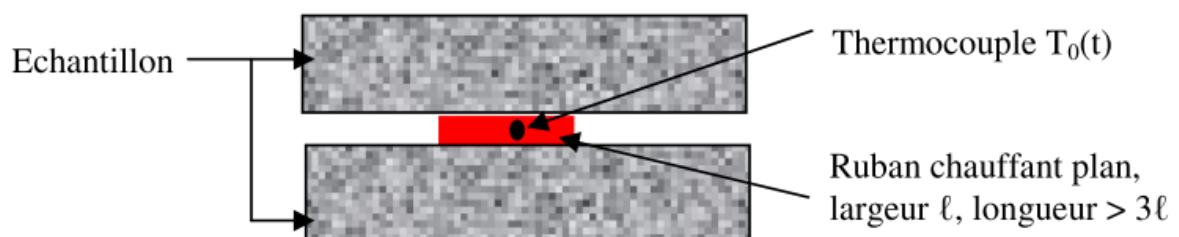


**Figure 1-9 : Schéma du montage de la méthode du fil chaud**

### • Méthode du ruban chaud

C'est une technique qui a pour but de mesurer la conductivité et l'effusivité thermique d'un matériau en régime transitoire.

La méthode du ruban chaud est un dispositif dans lequel une résistance électrique de forme rectangulaire est insérée entre deux échantillons identiques du matériau à caractériser (montage symétrique) figure 1-10.



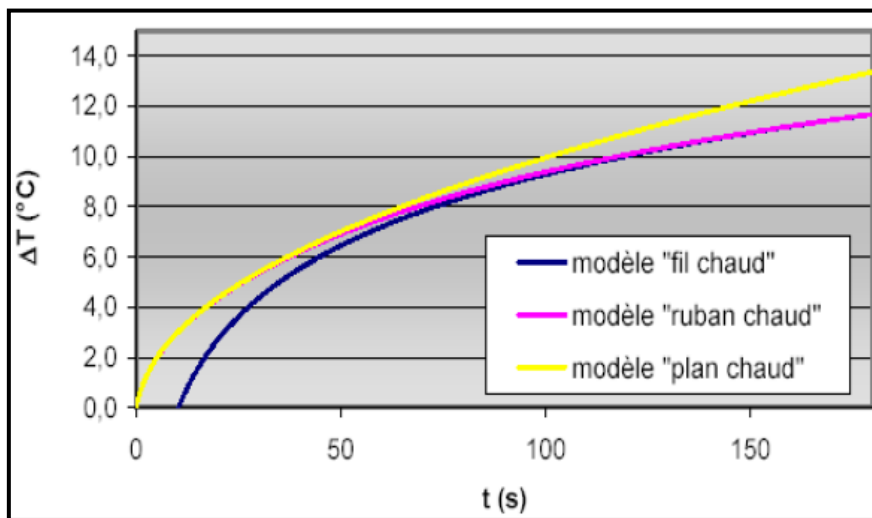
**Figure 1-10 : Schéma de principe de montage du ruban chaud.**

Une présentation simplifiée de la méthode du ruban chaud pourrait être la suivante:

- Exploiter aux temps courts un comportement de type plan chaud au centre de la sonde, lié à un flux de chaleur perpendiculaire au ruban;
- Exploiter aux temps longs un comportement de type fil chaud quand le flux devient assimilable à un flux radial.

La figure 1-11 fait apparaître très clairement les similitudes de comportement entre le ruban et les deux autres sondes en début et en fin d'expérience.

Le ruban chaud se présentera donc sous la même forme que le plan chaud, seules ses dimensions vont différer.



**Figure 1-11: Comparaison des 3 modèles appliqués à une sonde de type "ruban chaud" (Solomon-Ayeh, 1994).**

Différentes configurations ont été utilisées avec ce dispositif. Il y a le dispositif de Gustafsson, le dispositif de Ladevie et celui de Jannot et Meukam. C'est le dispositif de Jannot et Meukam qui sera étudié en détail car c'est ce dernier qui a été adopté dans la caractérisation thermique de nos éprouvettes.

#### ❖ Dispositif de Jannot et Meukam

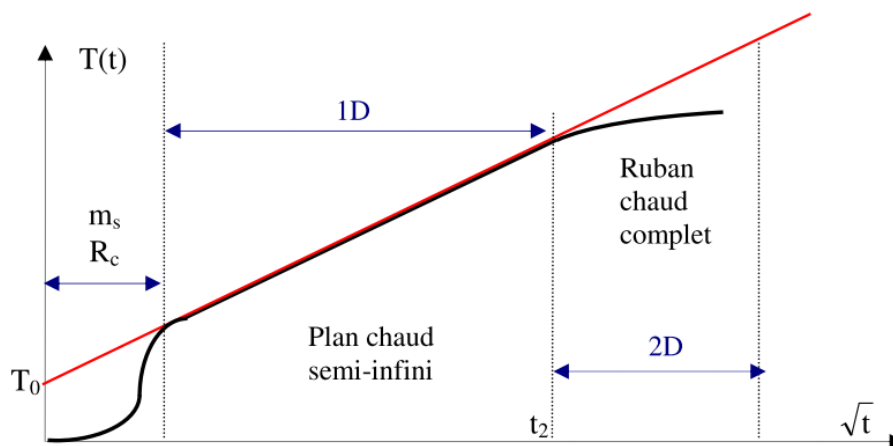
C'est une méthode analogue à celle de Gustafsson développée avec une mesure de la température au centre du ruban plutôt que la température moyenne dans le cas de Gustafsson (Jannot, Meukam, 2004), (figure 1-12). L'intérêt est de pouvoir considérer le transfert

purement 2D tout le temps que les perturbations liées aux transferts de chaleur latéraux n'ont pas atteint le centre de l'échantillon (et donc du ruban).



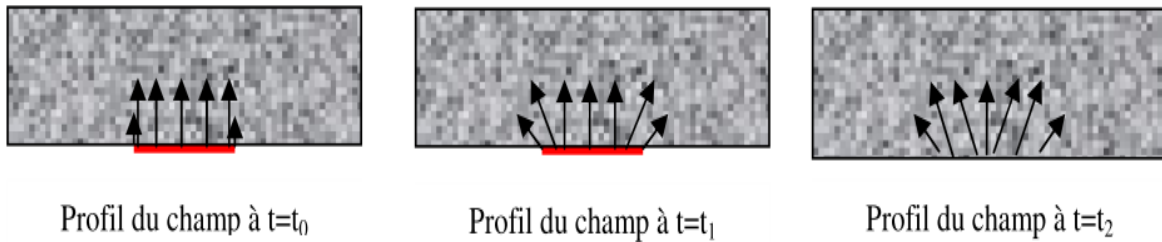
**Figure 1 -12 : Modèle de Jannot et Meukam**

Dans ce dispositif, la température est mesurée au centre de la sonde placée entre deux échantillons suffisamment épais pour que le milieu puisse être considéré comme semi-infini. Les différentes exploitations sont basées sur le thermogramme représenté par la figure 1-13.



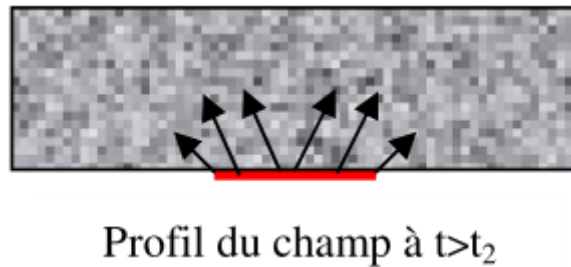
**Figure 1-13 : Thermogramme issu du modèle de Jannot et Meukam.**

Lorsque le flux est envoyé, la chaleur se propage à travers l'échantillon suivant des profils de température schématisés, (figure 1-13). A l'instant  $t = t_0$ , le champ de température est de type 1D sur presque toute la largeur du ruban. Au bout d'un temps ultérieur  $t_1$ , la perturbation sur les bords s'intensifie mais n'a toujours pas atteint le centre ou point de mesure. Enfin, arrivera à autre instant  $t_2$  critique au-delà duquel le champ au centre de la sonde ne sera plus unidirectionnel. Pendant toute cette phase où la perturbation n'a pas atteint le centre, le modèle peut être assimilé à celui d'un plan chaud semi-infini. Ceci a permis de calculer la valeur de l'effusivité en exploitant une partie linéaire du thermogramme, tronçon qui vérifie  $T(t) = k_1 t + k_2$ .



**Figure 1-14 : Champ de température unidirectionnel au centre de la sonde.**

Une fois que le temps  $t_2$  est dépassé, le champ devient bidirectionnel (figure 1-15)



**Figure 1-15 : Champ de température bidirectionnel au centre de la sonde.**

Il est constaté à partir de ce moment une croissance monotone de la température tendant vers une évolution de type fil chaud. En exploitant le graphe  $T(t) = f(\ln(t))$  au-delà de  $t_3 > t_2$ ,

une estimation de la conductivité thermique,  $\lambda$  peut être obtenu. Au-delà d'un certain temps limite ( $t_{lim}$ ), l'effet 3D retardé jusqu'ici apparaît et le modèle 2D n'est plus exploitable. Il serait intéressant de connaître le temps pendant lequel le modèle 2D reste valable et le temps  $t_3$  à partir duquel le modèle du fil chaud conduit à une estimation acceptable de la conductivité  $\lambda$ .

Globalement quelle que soit la configuration utilisée, l'estimation de l'effusivité thermique et de la conductivité thermique se fera comme suit :

#### ❖ Effusivité thermique

Pendant le temps  $t_1$  où le transfert de chaleur au centre du ruban chaud reste unidirectionnel, la température au centre du ruban évolue comme celle d'un plan chaud, soit dans l'espace de Laplace :

$$\theta_s(0,0,p) = \frac{\Phi_0 S}{p} \frac{1 + R_c E S \sqrt{p}}{m_s c_s P + [R_c m_s c_s P + 1] E S \sqrt{p}} \quad (1.6)$$

Et par conversion aux temps longs, il y'aura:

$$T_s(0,0,t) = 2\Phi_0 \left[ R_c - \frac{(mc)_s}{(ES)^2} \right] + \frac{2\Phi_0}{ES\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (1.7)$$

Une première valeur approchée de l'effusivité thermique E est estimable à partir de la pente  $\alpha$  de la droite expérimentale  $T_s(0,0,t) = f(\sqrt{t})$  déterminée par régression linéaire entre les temps  $t_0$  (choisi tel que la sensibilité de  $T_s$  à  $(mc)_s$  se soit stabilisé) et  $t_1$ .

### ❖ Conductivité thermique

La température d'un ruban chaud de grande longueur tend asymptotiquement vers celle d'un fil chaud (Jannot, et al, 2009). En négligeant l'effet de l'inertie de la sonde, la température du fil chaud s'écrit dans l'espace de Laplace comme suit:

$$\theta_s(p) = \frac{\Phi_0}{p} \left[ R_c + \frac{k_0(qr_0)_s}{2\pi\lambda L q r_0 k_1(qr_0)} \right] \quad (1.8)$$

Aux temps longs, il est possible de linéariser  $T_s(t)$  sous la forme suivante :

$$T_s(t) = \frac{\Phi_0}{4\pi\lambda L_{hw}} \ln(t) + C_{st} \quad (1.9)$$

Où  $L_{hw}$  est la longueur du ruban et  $C_{st}$  une constante.

Une première valeur approchée  $\lambda_m$  de  $\lambda$  à partir de la pente peut être estimé a :

$\beta = \frac{\Phi_0}{4\pi\lambda L_{hw}}$  de la courbe expérimentale  $T_s(0,0,t) = f[\ln(t)]$  déterminée par régression

linéaire entre  $t_1$  et  $t_2$ . Ensuite le modèle complet 2D pour obtenir une valeur plus précise est utilisée.

En conclusion, la méthode du ruban chaud utilisant des sondes de faible coût est une technique simple et très utilisée pour caractériser des matériaux ayant une conductivité assez élevée.

## • Méthode du plan chaud

Un échelon de flux de chaleur constant est appliqué ( $\varphi = 0$  si  $t < t_0$  et  $\varphi = \varphi_0$  si  $t > t_0$ ) à la résistance chauffante et l'évolution de la température est relevé  $T_s(t)$  au centre de cette même

résistance dans ou sur laquelle a été placé un thermocouple. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide (temps pendant lequel  $T_s(t)$  n'a pas varié), il est considéré que le transfert au -centre

de l'échantillon est unidirectionnel. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. Une méthode d'estimation de paramètres est appliqué pour calculer les valeurs de :

- L'effusivité thermique  $E = \sqrt{\lambda \rho c}$ , la capacité thermique  $(mc)_s$  de l'ensemble sonde + résistance chauffante.
- La résistance de contact  $R_c$  à l'interface sonde/échantillon

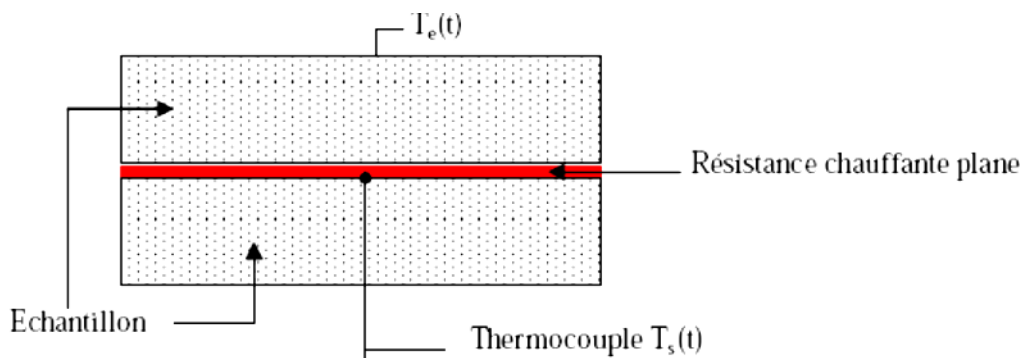


Figure 1- 16 : Schéma du montage de la méthode du plan chaud

## ❖ Modélisation du plan chaud semi-infini

Considérons le dispositif du plan chaud où une résistance électrique de faible épaisseur, de masse  $ms$ , de capacité calorifique  $Cs$ , soumise à une densité de flux de chaleur  $f$  et de température supposée uniforme  $T_s$  est placée entre deux échantillons du matériau à caractériser (figure 1-17.) :

L'équation de la chaleur s'écrit dans l'échantillon :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.10)$$



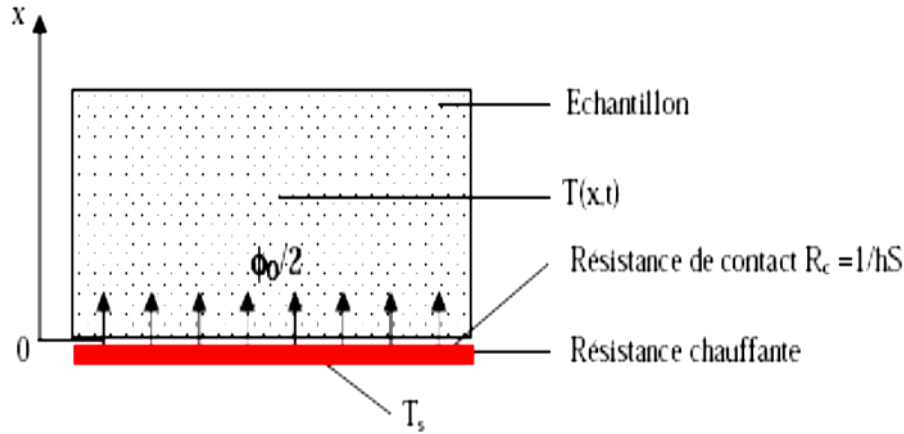


Figure 1 -17 : Schématisation d'un plan chaud et notation

Avec les conditions aux limites :

$$\begin{cases} \mathbf{T(x, 0) = T_s(0) = T_i} & \text{(a)} \\ \mathbf{T(\infty, t) = T_i} & \text{(b)} \\ \mathbf{h[T_s(t) - T(0, t)] = -\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}} & \text{(c)} \\ \mathbf{\frac{\phi_0 S}{2} = m_s c_s \frac{dT_s}{dt} + hS[T_s(t) - T(0, t)]} & \text{(d)} \end{cases} \quad (1.11)$$

La relation (18c) traduit la conservation du flux de chaleur au niveau de la surface du milieu semi-infini et la relation (18d) traduit la conservation du flux de chaleur au niveau de la résistance électrique.

Le changement de variable suivant est effectué :  $\bar{T} = T - T_i$

La transformée de Laplace de la température  $T_s$  de la résistance chauffante s'écrit :

$$\theta_s(p) = \frac{\phi_0 S}{2p} \frac{1 + R_c E S \sqrt{p}}{\frac{m_s c_s}{2} p + [R_c \frac{m_s c_s}{2} p + 1] E S \sqrt{p}} \quad (1.12)$$

→  $\theta_s$  : Transformée de Laplace de la température  $T_s$  de la résistance chauffante

→  $R_c$  : Résistance de contact à l'interface résistance chauffante/échantillon

→  $m_s$  : Masse thermocouple + résistance chauffante

→  $c_s$  : Capacité calorifique thermocouple + résistance chauffante

→  $E$  : Effusivité thermique de l'échantillon

→  $P$  : Variable de Laplace

→  $S$  : Surface de la résistance chauffante

→  $\phi_0$  : Densité de flux dissipée dans la résistance chauffante

Les paramètres inconnus à déterminer expérimentalement sont :

- l'effusivité  $E$  de l'échantillon;
- la résistance thermique de contact  $R_c$  entre la sonde et l'échantillon;
- la capacité thermique  $(mc)_s$  de la sonde.

#### ❖ Réalisation pratique de mesure

La méthode de type plan chaud peut être mise en œuvre de manière extrêmement simple en utilisant une résistance chauffante plate (rectangulaire ou circulaire) de surface suffisante (au moins 25 cm<sup>2</sup>). On « scotche » au centre de cette résistance un thermocouple réalisé en fils fins (diamètre < 0,2 mm) : les deux fils séparés du thermocouple sont posés sur la résistance à une distance d'environ 5mm puis recouverts d'un film adhésif en aluminium qui assurera à la fois un bon contact entre le thermocouple et la résistance, le contact électrique entre les deux fils du thermocouple (dit dans ce cas à contacts séparés) et une homogénéisation de la température au voisinage du thermocouple.

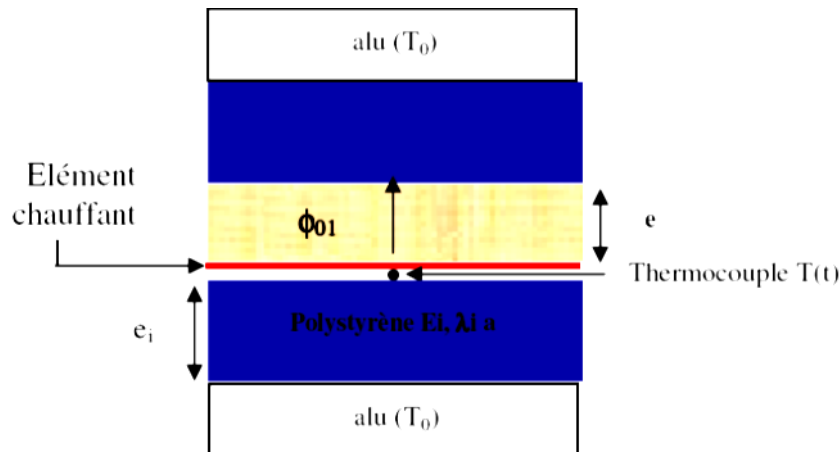
Ce montage relativement « rustique » permet d'évaluer avec une bonne précision la valeur de l'effusivité thermique  $E$ . La principale source d'incertitude est la valeur de la densité de flux de chaleur  $\phi_o$ , la mesure de la puissance électrique est précise, mais il faut utiliser une

surface de chauffe suffisante pour diminuer l'incertitude sur  $S$ .

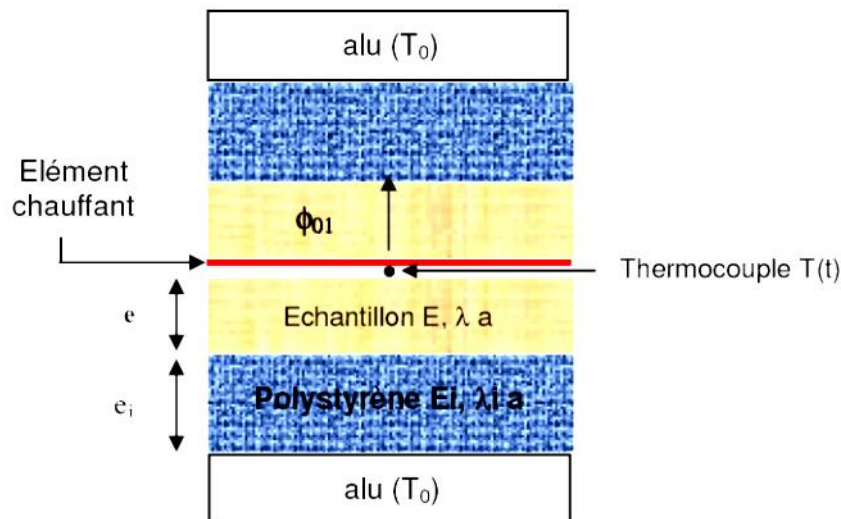
La mise en œuvre de la méthode nécessite en outre une alimentation stabilisée et un dispositif d'enregistrement de la tension délivrée aux bornes du thermocouple. Un enregistrement d'une durée de 60 secondes après le début du chauffage permet d'obtenir une bonne précision sur l'effusivité thermique  $E$ .

Les méthodes de type plan chaud présentent deux montages :

- Le montage asymétrique (figure 1-18)
- Le montage symétrique (figure 1-19)



**Figure 1-18: Schéma du dispositif général de la méthode du plan chaud asymétrique**

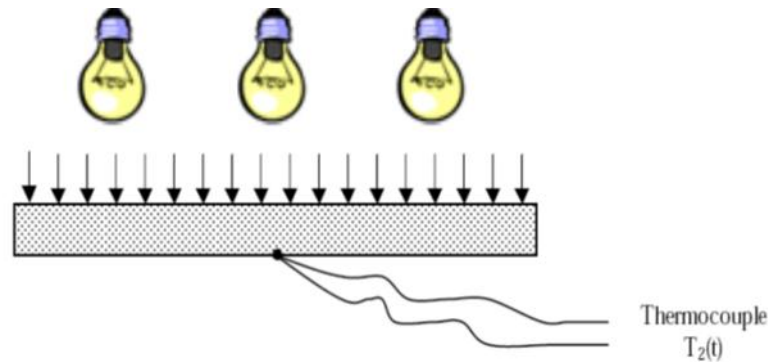


**Figure 1-19 : Schéma du dispositif général de la méthode de plan chaud symétrique**

Le montage symétrique présente pour certains matériaux deux inconvénients :

- Si les matériaux sont durs, la présence de thermocouple entre la sonde chauffante et la surface du matériau va imposer une distance minimale (égale au diamètre des fils) entre les deux et peut provoquer une résistance de contact assez importante et asymétrique.
- Pour certains cas particuliers, il peut être difficile de réaliser deux échantillons de propriétés et d'état de surface identiques, c'est en particulier le cas des matériaux de construction.

- **Méthode flash**



**Figure 1-20 : Schéma de principe de la méthode flash**

Cette méthode a été utilisée ces dernières années pour caractériser de nombreux matériaux (Assael, *et al.*, 2008); (Tang, *et al.*, 2008); (Wilson, 2008). Il est cependant noté que cette méthode n'est pas théoriquement applicable aux matériaux ayant une faible densité (Coquard, *et al.*, 2006).

Cette méthode permet d'estimer la diffusivité thermique des solides. Son schéma de principe est décrit sur la figure 1-20. Cependant, il est à noter que sur l'une des faces d'un échantillon à faces parallèles est envoyé un flux lumineux de forte puissance pendant un temps très court. Un thermocouple en contact avec la face arrière permet d'enregistrer l'élévation de sa température à partir du moment où la face avant a reçu le flash. Une modélisation des transferts de chaleur dans l'échantillon a permis à plusieurs auteurs de proposer des méthodes d'estimation de la diffusivité thermique à partir du thermogramme expérimental. La simplicité de certaines de ces méthodes a rendu la méthode flash très populaire; un certain nombre de précautions expérimentales doivent toutefois être respectées pour atteindre une bonne précision.

### **1.3 Synthèse bibliographique sur les composites de biomasse végétale–ciment**

Diverses études ont été réalisées par des chercheurs du domaine des « matériaux » sur les composites cimentaires utilisant des biomasses végétales comme granulats :

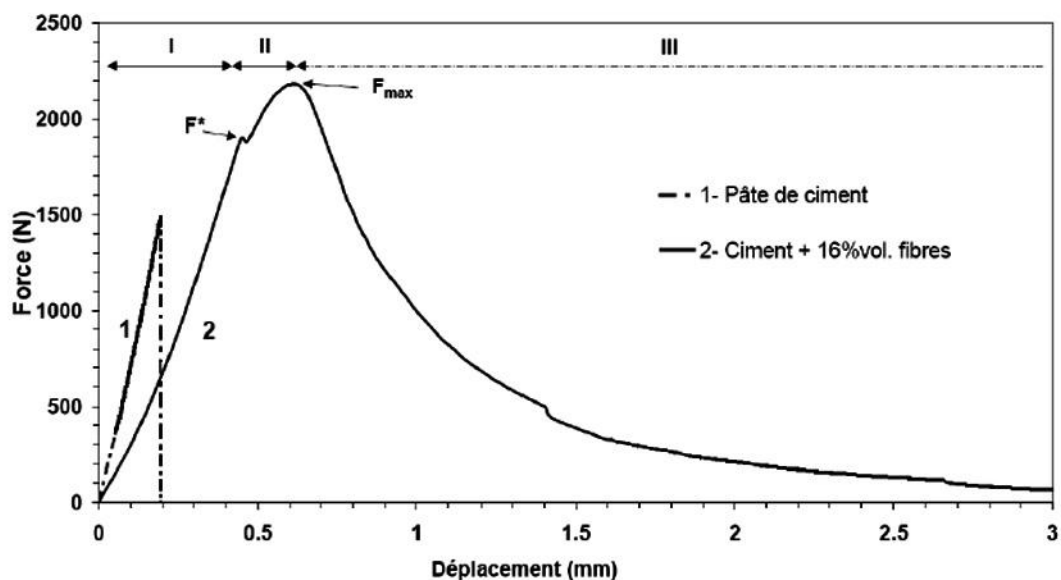
**Tamba (2001)**, a étudié la formulation et les caractéristiques des bétons légers à base des déchets cellulosiques notamment les balles de riz et les copeaux de bois. Il a examiné le comportement de plusieurs bétons obtenus à base de ces granulats afin de ressortir une

composition satisfaisante en matière de comportement physique et mécanique. De son étude, il ressort que les balles de riz et les copeaux de bois sont hygroscopiques d'où la nécessité d'un pré mouillage. Les bétons de déchets cellulósiques n'obéissent pas aux règles de formulations existantes : leur formulation doit se faire expérimentalement. Les bétons obtenus avec ces matériaux sont légers. Les bétons de balles de riz résistent mieux à la compression que ceux de copeaux de bois, phénomène qui est inversé dans le cas de la traction. Pour obtenir un béton porteur (résistance à la compression supérieure à 10 MPa) avec les balles de riz, un rapport Ciment/biomasses égal à 3 est recommandé par l'auteur. L'effet de fibres permet d'améliorer la résistance à la flexion. Cet effet est nettement plus marqué avec les copeaux de bois, fibres plus longues et plus résistantes. L'auteur a également montré que l'ajout de sable de dune à ces bétons permet d'augmenter leur résistance. Mais dans ses travaux, **Tamba** n'a pas fait cas du dosage en eau. Or la résistance des bétons est inversement proportionnelle à la quantité d'eau de gâchage.

**Jauberthie et al., 2006**, ont montré que la cendre des balles de riz produit au Sénégal ont des effets pouzzolaniques et ces balles de riz peuvent servir à produire du béton léger. En effet, l'analyse des balles de riz calcinées au rayon X a révélé la présence de quartz dont l'origine peut être attribuée à la contamination et/ou à la recristallisation des silicates pendant la calcination. Ils ont également étudié les propriétés des mélanges ciment - balles de riz selon les conditions de cure et de conservation. Ils ont pour cela fabriqué des échantillons de mortier de balles de riz qui ont été conservés dans une salle climatisée soit à la température ambiante et à 50 % d'humidité relative, soit à une température de 20 °C et à 95 % d'humidité relative. Ceci a permis d'étudier l'effet pouzzolanique et la durabilité de l'effet des fibres cellulósiques sous différentes conditions hygrométriques. Les échantillons fabriqués ont été soumis à une analyse par rayon X et au microscope électronique. Il ressort de cette étude que la résistance à la compression des mortiers de balles de riz augmente avec l'humidité contrairement à la résistance à la traction. Ils ont également montré que l'ajout de sable de dune augmente la densité et la résistance à la compression et réduit la résistance à la flexion des bétons de balles de riz et que l'ajout de sulfate d'aluminium quant à lui provoque le phénomène contraire. Le granulats utilisé par **Nguyen, et al (Nguyen, et al., 2008)** pour confectionner leurs éprouvettes est de la chènevotte pure. Il est obtenu par défibrage total et broyage de la tige du chanvre. Selon leur étude la masse volumique de la chènevotte est de **103 kg/m<sup>3</sup>** et peut absorber jusqu'à 406 % de sa masse en eau après 48 h d'immersion dans l'eau. Dans leur formulation ce sont les rapports massiques Liant/Granulat (L/G) suivi du rapport Eau/Liant (E/L) qui ont été utilisés. Ils ont soumis les

éprouvettes aux essais de caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques. Des prélèvements d'échantillons dans les éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm et de hauteur 200 mm selon le type d'essai ont été effectués. Ainsi, un gradient de densité est identifié dans l'éprouvette cylindrique et est de moins de 2 % sur la partie supérieure et non négligeable sur la partie inférieure, 8 à 22 %. Sous l'effet de compactage Nguyen et al ont montré que les particules de chènevotte présentent une orientation préférentielle dans le plan horizontal, perpendiculaire au sens du compactage. Les mesures confirment une différence significative entre la conductivité thermique verticale ( $\lambda_v$ ) et celle horizontale ( $\lambda_h$ ) (anisotropie de la conductivité thermique). Dans tous les cas, la conductivité thermique  $\lambda_h$  est toujours supérieure à la conductivité thermique  $\lambda_v$ . On observe généralement que le rapport  $\lambda_v / \lambda_h$  est environ égale à 2/3. Les valeurs des conductivités thermiques des éprouvettes étudiées varient de 0.09 à 0.18  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Ils ont conclu que la conductivité thermique augmente quasi linéairement avec la masse volumique du matériau ce qui confirme les travaux de (Cerezo, 2005).

Les études réalisées sur les matériaux à base de fibres végétales montrent une modification du comportement mécanique du composite. Alors que la matrice cimentaire pure présente un comportement linéaire fragile, le composite conserve son intégrité même au-delà de la charge maximale. Ce phénomène est mis en évidence par des études menées par Sedan sur le béton de chanvre (Sedan, 2007). La figure 1-21 ci-dessous illustre ce phénomène à travers une comparaison des comportements d'une pâte de ciment pure et d'un composite ciment-fibres de chanvre soumis tous deux à un essai de flexion trois points.



---

**Figure 1- 21 : Comportement mécanique d'un matériau composite fibré (Sedan, 2007)**

L'auteur distingue trois phases dans le comportement du composite fibré :

- **phase I** : comportement quasi-linéaire proche de celui de la pâte de ciment seule, dans cette phase les efforts sont majoritairement repris par la matrice;
- **phase II** : à partir de  $F^*$ , apparition de la première fissure de la matrice, puis reprise de la charge par les fibres, qui, d'après l'auteur, limitent la propagation de la fissure par un effet de pontage  $F^*$ ;
- **phase III** : au-delà de  $F_{max}$ , diminution contrôlée de la charge contrairement à la pâte de ciment seule qui casse brutalement. L'auteur associe cette phase à une rupture progressive des interfaces fibres/matrice suivie d'un déchaussement des fibres  $F_{max}$ .

Le passage d'une matrice fragile à un composite ductile est souligné pratiquement par tous les auteurs. Mais il ne va pas forcément de pair avec l'amélioration des résistances à la flexion, à la traction ou à la compression : celles-ci dépendent de plusieurs paramètres notamment le dosage et la longueur des fibres.

Les études de **Kriker et al.** mettent en évidence une diminution de la résistance en compression avec l'augmentation du dosage en fibres et de la longueur des fibres (**Kriker et al., 2005**). La résistance d'un mortier renforcé par 2 % en volume de fibres de palmier dattier de longueur 15 mm représente 90 % de celle du mortier non renforcé alors que celle d'un mortier renforcé par 3 % de fibres de 60 mm de longueur ne représente plus qu'environ 55 % de celle du béton seul. L'auteur attribue cette diminution à l'augmentation du nombre de défauts et à la non-uniformité de la répartition des fibres.

Contrairement à ce constat, les études de **Ismail et Bin-Hashim (, 2008)** sur l'impact de la longueur et du dosage des fibres de palmier démontrent que les résistances à la compression, à la flexion et à la traction augmentent avec le diamètre des fibres. Les fibres utilisées pour ces travaux sont issues des usines de transformations des noix de palme et le ciment est de type portland. Ces résultats apparemment contradictoires ne font que confirmer la variabilité du comportement des composites de fibres végétales en fonction de l'essence d'origine ou de la nature des fibres utilisées.

**Mannan et Ganapathy (2009)** ont montré l'inadéquation des méthodes de formulation des bétons conventionnels à la formulation des bétons de coques de noix de palme. Les résistances des bétons obtenus en utilisant ces méthodes sont nettement inférieures aux résistances attendues : pour une résistance projetée égale à 28 MPa à 28 jours, la résistance

obtenue n'atteint pas 15 MPa. En faisant varier les rapports Sable/Ciment, Coques/Ciment et Eau /Ciment, ils ont montré que la résistance à la compression à 28 jours d'âge de ces bétons peuvent atteindre 24 MPa. L'utilisation d'adjuvants tels que le chlorure de calcium permet d'améliorer cette résistance et d'atteindre 29 MPa. Ils ont également montré qu'il était possible d'obtenir des bétons de structure avec les bétons de coques de noix de palme. En effet, en ajoutant aux coques de noix de palme, du sable de rivière et du ciment dans des proportions définies expérimentalement, ils ont montré que les résistances obtenues dépassent les 20 MPa à 28 jours d'âge. Les bétons ainsi obtenus sont légers et peuvent être utilisés dans les zones où les noix de palme abondent comme la Malaisie. Les coques de noix utilisées ont été pré traitées avant leur emploi parce qu'ils contiennent de la poussière et de l'huile. Ce pré traitement a consisté en un lavage des coques avec de l'eau.

**Okafor (2001)** a également admis l'utilisation des coques de noix de palme comme granulat léger dans la confection du béton.

**Stahl et al., (2012)** admettent l'utilisation des copeaux de bois comme granulat dans la confection de maçonneries qui peuvent être utilisées comme mur d'intérieur. Parmi les bétons de biomasses, on distingue aussi les composites ciment-bois. Les composites ciment – bois sont des produits manufacturés à partir de bois ou de particules ou fibres, auxquels sont ajoutés des agents de liaison et des additifs pendant la fabrication. Les liants utilisés sont soit des colles, généralement des urée-formols ou des phénols-formols, soit des liants minéraux tels que le ciment ou le plâtre.

Les composites à base de bois sont classés en deux groupes : les panneaux bois – ciment et les bétons de bois. Les panneaux bois – ciment sont obtenus par pressage du mélange. Les dimensions des particules utilisées pour la fabrication des panneaux sont de 10 à 30 mm pour la longueur et de 0,2 à 0,3 mm pour l'épaisseur. Le mélange ciment – bois pressé à une valeur d'environ 2,4 MPa pendant 2 à 3 minutes est maintenu sous pression pendant 6 à 8 heures dans une chambre chaude à 70 – 80 °C. Le panneau est alors démoulé et stocké pour le séchage.

**Bahloul et al. (2009)** , démontrent aussi que l'augmentation du dosage en fibres d'alpha dans une matrice cimentaire baisse les résistances du matériau en compression. Selon ces auteurs, ce phénomène serait dû à l'augmentation des vides suite à l'ajout des fibres, lesquels vides auraient pour effet de réduire la compacité du matériau **Bahloul et al., (2009)**. Leurs études ont porté par ailleurs sur le comportement mécanique des mortiers renforcés avec les fibres dans différents milieux de cure. Ils concluent à cet effet que la conservation à l'air ambiant



donne des résistances meilleures à celles obtenues sur les éprouvettes conservées dans l'eau douce. Ce constat serait dû à l'effet de mouillage de l'eau sur les fibres végétales, conduisant à la perte de leur résistance mécanique.

**Tamba et al. (2007)** ont aussi étudié le comportement d'un composite ciment-copeaux de bois suivant le mode de conservation. Ils ont abouti à la même conclusion que la cure en salle sèche donne de meilleurs résultats que la conservation en salle humide (**Tamba. et al., 2007**). En observant l'évolution des caractéristiques mécaniques suite aux variations du rapport pondéral Ciment/Copeaux de bois, ils recommandent le rapport Ciment/Bois = 3 offrant une résistance de 4,3 MPa en flexion contre 12 MPa en compression.

Des études menées par **Scida et al. (2011)** sur la corrélation entre vieillissement hydrique et propriétés mécaniques, il ressort que la diffusion de l'eau dans le composite entraîne une baisse du module élastique et simultanément, une augmentation de la déformation (**Scida et al., 2011**).

S'agissant des composites de fibres d'*Ampelodesma Mauritanica* à base de matrice cimentaire, **Merzoud et al., (2008)**, ont étudié l'effet de la variation en eau sur les résistances mécaniques (**Merzoud et al., 2008**). En maintenant le rapport diss/ciment = 5, ils ont fait varier dans une fourchette de 0,55 à 0,9 le rapport massique Eau/Ciment. Les résistances en flexion et en traction enregistrées pour les différentes formulations montrent une variation en cloche et il a fait remarquer aussi que la résistance en flexion et en compression ne sont pas éloignées l'une de l'autre et on note un rapport de 1,29 ce qui n'est pas le cas des bétons ordinaires qui donnent par contre un rapport de près de 10 entre la compression et la flexion.

**Abdullah et al, (2011)** ont observé l'évolution de quelques caractéristiques physiques du mortier renforcé de fibres de coco en fonction de la quantité de fibres présente dans le mélange (**Abdullah et al., 2011**). Les résultats révèlent que les fibres contribuent à la baisse de la densité du matériau final. Cette conclusion s'explique par le fait que la masse volumique des fibres est moins importante que celle des autres granulats. Il en est de même pour l'absorption d'eau par le matériau; plus il y a de fibres, plus la capacité hydrique est élevée.

**Djoudi et al, (2009)** aboutissent aux mêmes conclusions en se servant de fibres de palmier dattier dont la quantité est variée dans le plâtre. Ils expliquent la baisse de la densité par une augmentation du volume des vides suite à l'incorporation des fibres. Quant à l'absorption, les auteurs estiment que son augmentation est due au caractère hydrophile des fibres (**Djoudi et al, 2009**).

Dans ce même contexte, **Taoukil et al, (2011)** ont suivi l'évolution de la masse volumique et de l'absorption sur des bétons allégés de copeaux de bois et de sciure de bois (**Taoukil et al.,**

2011). Ils en arrivent à établir que pour l'un ou l'autre des allègements utilisés, l'augmentation de la fraction de fibres fait chuter les densités et favorise la capacité de captation et de fixation de l'eau par le composite.

**Arnaud et Boyeux (2001)**. ont réalisé différents essais sur des échantillons de béton de chanvre afin d'en déterminer les performances techniques. Leurs travaux ont porté notamment sur l'absorption acoustique et le comportement hygrothermique du matériau (**Arnaud, Boyeux, 2001**). Des résultats obtenus, il apparaît que le béton de chanvre a un coefficient d'absorption acoustique supérieur à 0,5 pour toutes les fréquences du domaine de l'audible. D'autre part, ils estiment le niveau de la conductivité thermique variant entre 0,064 et 0,09 W/ (m.K); ce qui fait du béton de chanvre un bon isolant thermique. Cependant, ils relèvent que la forte sensibilité du matériau à l'humidité agit négativement sur cette propriété d'isolation thermique en provoquant une augmentation pouvant aller jusqu'à 30 % de la conductivité thermique.

**Bédérina et al, (2015)** ont montré que l'ajout de copeaux de bois allège considérablement le béton de sable dunaire et augmente son pouvoir isolant. Selon la quantité de bois, il est possible d'avoir des résistances mécaniques intéressantes; il est possible d'avoir, donc, toutes les catégories de bétons légers.

Enfin, il faut noter qu'une tentative de traitement des copeaux de bois par enrobage au ciment leurs a permis de résoudre le problème de retrait et d'absorption d'eau, tout en augmentant considérablement la résistance mécanique et sans trop affecter les gains obtenus en pouvoir isolant et en allègement. La structure est plus compacte et l'adhérence est meilleure.

**Mougel et al, (1995)** ont montré que dans le matériau durci, la matrice ciment et le bois sont tous deux poreux et hygroscopiques. L'eau fait partie intégrante du matériau et peut se retrouver sous plusieurs formes : eau libre et eau absorbée. Les teneurs en eau libre et en eau absorbée varient en fonction de l'humidité de l'environnement, ce qui entraîne des phénomènes de retrait/gonflement de l'ordre de 3 à 5 mm/m (**Mougel et al., 1995**). L'ampleur de ces variations dépend de la structure des composites bois/ciment. Elles restent toutefois très inférieures aux variations subies par le bois seul ou en association avec une résine (panneaux de particules, contre-plaqué ...) mais ne répondent pas toujours à certaines exigences.

La plupart des études envisagées pour réduire l'instabilité dimensionnelle des composites bois/ciment sont basées sur le traitement des particules de bois. Ces procédés emploient des solutions minérales (silicate de sodium, acide phosphorique, chlorure de calcium) pour minéraliser le bois. La cristallisation de ces sels dans le bois limite en effet la

libération des extractibles et améliore à la fois la stabilité dimensionnelle des particules de bois et l'adhésion entre le bois et la matrice de ciment.

Certains auteurs comme par exemple (**Mougel et al., 1995**) ont également montré que l'incorporation de sable pouvait réduire le nombre de microfissures engendrées lors du retrait, tout en améliorant les performances mécaniques des composites. En fait, l'incorporation de granulats possédant un module d'élasticité supérieur à celui de la pâte de ciment, limite la propagation des microfissures et améliore la stabilité dimensionnelle (**Neville, 1981**).

Les méthodes calorimétriques sont les techniques les plus utilisées pour évaluer la compatibilité d'un bois avec le ciment. Une première technique consiste à évaluer le flux de chaleur libéré au cours de l'hydratation du composite (**Hachmi et al., 1990**). Des équations ont été proposées pour classer les bois par ordre de compatibilité. Pour exemple, tel que rapporté par (**Tchéhouali, 2002**) :

- (**Sandermann et al, 1964**) ont proposé une classification basée sur la valeur maximale de température  $T_2$  du mélange bois-ciment

$T_2 \geq 60^\circ\text{C}$	: compatibilité
$50^\circ\text{C} \leq T_2 \leq 60^\circ\text{C}$	: compatibilité sous certaines conditions
$T_2 < 50^\circ\text{C}$	: incompatibilité

Aussi il ressort que dans le but d'améliorer la méthode de classification des espèces de bois de point de vue compatibilité ciment-bois, (**Hachmi et al., 1990**) ont réalisé des études dans lesquelles ils ont mis au point et comparé trois méthodes de classification basées toujours sur le principe de mesure de la chaleur d'hydratation d'un mélange ciment-bois à l'aide d'un calorimètre. Dans la première méthode ils calculent le taux de température pondérale maximale, la deuxième méthode s'intéresse au rapport du taux de chaleur maximale et la troisième évalue le rapport des aires. C'est cette dernière méthode qui est basée sur le calcul d'un coefficient  $C_A$  qui est le rapport de l'aire sous la courbe d'hydratation du mélange eau-ciment-bois sur l'aire sous la courbe d'hydratation du mélange eau-ciment.

Ainsi la classification établie par **Hachmi** est dans le tableau 1.2

**Tableau 1.2 : Compatibilité entre le bois et le ciment suivant les valeurs du coefficient de Hachmi**

Valeurs de $C_A$	Qualification du bois
$C_A > 68 \%$	Compatible
$68 \% > C_A > 28 \%$	Modérément compatible
$C_A < 28 \%$	Incompatible

Plusieurs travaux ont montré que le comportement du ciment en présence du bois varie largement avec l'essence (**Hachmi et al., 1990**) et le type de bois à l'intérieur de l'arbre, l'aubier étant généralement plus compatible que le cœur (**Semple et al., 2000**), (**Hachmi et al., 1990**).

L'inhibition de l'hydratation du ciment par le bois a été communément attribuée aux substances extractibles du bois qui se solubilisent dans le milieu cimentaire (**Semple et al., 2004**). Une autre approche consiste à éliminer les substances responsables des problèmes d'inhibition en trempant par exemple le bois dans l'eau ou dans une solution d'hydroxyde de sodium (**Pereira et al., 2006**). Des accélérateurs de prise comme le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) ou le sulfate d'aluminium ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) peuvent également être incorporés à la pâte de ciment pour accroître sa vitesse de durcissement.

En somme, les analyses faites autour des travaux des chercheurs sur les matériaux composites biomasse végétale-ciment ont montré que les caractéristiques physique, mécanique et thermique des composites biomasses végétale-ciment dépendent de plusieurs paramètres qui sont récapitulés dans le tableau 1.3 ci-après :

**Tableau 1.3 :** Paramètres influençant les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites.

<b>Facteurs</b>	<b>Variables</b>
<b>Types de fibres</b>	Noix de coco, sisal, bagasse, bambou, jute chanvre, Diss, gousse de mil etc...
<b>Géométrie des fibres</b>	Longueur, diamètre, section, morphologie (boucles, crochets...)
<b>Morphologie des fibres</b>	Mono filamenteuse, faisceaux, frisotis, nœuds.
<b>Surface des fibres</b>	Rugosité, présence d'agents de surface
<b>Propriétés de la matrice</b>	Type de ciment, nature et taille des granulats, adjuvants
<b>Formulation du composite</b>	Rapport E/L, dosage en fibres
<b>Méthode de malaxage</b>	Type de malaxeur, séquence d'introduction des constituants, temps et vitesse de malaxage.
<b>Méthode de mise en œuvre</b>	Vibration conventionnelle, égouttage sous vide, extrusion, projection.
<b>Méthode de moulage</b>	Pression de moulage
<b>Cure</b>	Température, humidité

## 1.4 CONCLUSION

Un béton léger est un matériau composite de masse volumique inférieure à **2000kg/m<sup>3</sup>**. Il peut être obtenu de plusieurs façons notamment par l'emploi de granulats légers de nature et d'origine végétale tels que les balles de riz et les fibres de rônier. Dans les pays en développement, la tendance est à la valorisation des sous-produits agricoles comme granulats dans le béton. Tous les auteurs s'accordent sur le fait qu'il est possible de faire du béton léger avec de la biomasse végétale et que les méthodes de formulation développées pour le béton ordinaire ne s'appliquent pas aux bétons de biomasse végétale. Ils conviennent aussi que les bétons légers à base de biomasse végétale ont de bonnes performances dans l'isolation thermique.

Parmi les différentes méthodes de détermination des propriétés thermiques, celle du ruban chaud est la mieux adaptée pour les matériaux composites avec le model développé par **Jannot et Meukam, 2003**.

Ainsi, l'objectif de ce travail est d'approfondir les connaissances sur le comportement de ciment composé à base de balles de riz et les fibres de rônier.

Aussi, il sera non seulement question de caractériser les bétons de balles de riz – ciment et les bétons de fibres de rônier – ciment, mais également de rechercher une application de ces derniers dans le génie civil notamment dans le bâtiment.

## **Partie II : Matériel et Méthodes**

## Chapitre 2 : MATERIEL ET METHODES

### 2.1 Introduction

La confection d'un matériau nécessite une matière première et une méthodologie de confection bien définie. Ainsi, ce chapitre permettra de présenter différentes techniques utilisées pour la caractérisation de la matière première et des matériaux confectionnés qui font l'objet de cette étude. Dans la première partie nous présenterons les différentes matières premières (fibres de rônier et balles de riz) qui entrent dans la composition des échantillons à étudier et leurs méthodes de caractérisations. De plus, la qualité du matériau est fonction de son mode de réalisation et des propriétés intrinsèques de la matière première.

Et, la deuxième partie sera consacrée à la détermination des caractéristiques aussi bien physique, mécanique que thermique des différents matériaux,

### 2.2 Caractéristiques des constituants des composites

#### 2.2.1 Etude des caractéristiques physiques des fibres de rônier et des balles de riz

→ **Les fibres de rônier** utilisées pour les travaux sont obtenues à partir de la transformation directe du stipe (tronc du rônier provenant du Sud du Burkina Faso) en fibres. Celles exploitées dans cette étude sont toutes issues d'un même arbre. Le processus permettant d'obtenir les fibres à partir de l'arbre peut être subdivisé en trois étapes :

- ***L'abattage de l'arbre et le débitage du stipe*** : ces deux opérations relativement simples ne nécessitent pas une main d'œuvre particulièrement qualifiée, ni un équipement spécial. L'abattage de l'arbre peut être réalisé par une équipe de deux personnes équipées de tronçonneuse ou de haches. Le tronc d'arbre ainsi obtenu est découpé par tronçonnage en vue d'éliminer la partie supérieure du stipe qui ne présente aucune valeur commerciale. Le stipe est alors fendu et débité sur quartier afin d'obtenir plusieurs lattes.
- ***L'extraction du bois dur*** : cette opération consiste à enlever la partie molle de façon à conserver uniquement la couronne extérieure. Elle s'effectue à l'aide d'une scie mécanique et a pour résultat l'obtention d'un demi-anneau fait de la partie imputrescible et dure du bois.



- **Le broyage** : le broyage est la dernière étape pour l'obtention des fibres (figure 2-1). La couronne extérieure obtenue après l'enlèvement de la moelle passe au rabot mécanique. A chaque passage du rabot, la lame décape une fine couche de couronne rejetée non sous forme de copeaux mais d'amas de fibres.



**Figure 2-1 : Aspect des fibres de rônier**

- **Les balles de riz** : Les balles de riz utilisées (figure 2-2) proviennent de la rizerie de Bagré Pôle située à l'Est du Burkina Faso.



**Figure 2-2 : Aspect des balles de riz**

### **2.7.1.2 2.2.1.1 Etablissement des compositions granulaires des particules de balles de riz et des fibres de rônier**

Les fibres de rônier et les particules de balles de riz ainsi obtenues sont séchées à l'air libre sous un abri pendant 48 heures et sont ensuite séparées par tamisage à l'aide des tamis d'ouvertures 5 – 2,5 – 1,25 – 0,63 et 0,315 mm. Elles n'ont subi aucun traitement particulier. Les refus sur chaque tamis sont recueillis séparément dans des sacs.

Pour le rônier, contrairement aux refus dont la longueur n'excède pas 0,5 cm, les refus sur le tamis d'ouverture 5 mm présentent un aspect fibreux prononcé avec une longueur allant de 1 à 5 cm. Cette étude à portée sur les fibres courtes dont les dimensions, pouvant être assimilées à celles du sable, les prédisposent à la possibilité d'une utilisation comme granulats pour la confection de mortier de fibres végétales. L'intérêt est donc porté sur quatre classes granulaires représentant les plages de variation de la grosseur des fibres courtes ([0,315 ; 0,63]; [0,63 ; 1,25]; [1,25 ; 2,50] et [2,5 ; 5]).

A partir de ces quatre classes, une reconstitution de deux types de mélanges (fin désigné par MF et grossier par MG de modules de finesse respectifs 2,17 et 3,00) utilisés pour la confection des éprouvettes.

### **2.7.1.3      2.2.1.2 Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique est réalisée conformément à la norme « **NF EN ISO 17892-4** », elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm et supérieure à 0,08 mm à l'exclusion des fillers. Le matériau doit être séché à l'étuve jusqu'à masse constante avec une température maximale de 105°C.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon par rapport à leur dimension en utilisant une série de tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 et 80 mm), emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et la séparation dimensionnelle des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisât cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique

### **2.7.1.4      2.2.1.3 Mesure de la masse volumique apparente**

Cet essai a pour but de déterminer le poids par unité de volume d'un matériau non tassé. La masse volumique apparente se calcule avec la formule :

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{Masse d'agrégat}}{\text{Masse d'eau}} \quad (2.1)$$

### **2.2.1.4 Mesure de la masse volumique absolue**

L'essai a pour but de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple une composition de bétons est élaborée. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton

dont les caractéristiques sont imposées. Le principe consiste à observer l'élévation du niveau d'eau dans une éprouvette suite à l'introduction du matériau.

La masse volumique absolue  $\rho_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Il ne faut pas confondre  $\rho_s$  avec la masse volumique apparente  $\rho$  qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

### 2.2.1.5 Mesure du taux d'humidité

Le taux d'humidité est la quantité d'eau contenue dans une unité de masse de matériau. Le but de cet essai est de déterminer la masse d'eau contenue dans une unité de masse de granulats à utiliser.

Le taux d'humidité H est alors donné par la relation :

$$H\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2.2)$$

Avec  $m_1$  la masse de du granulat et  $m_2$  la masse de l'échantillon à l'état sec.

### 2.2.1.6 Mesure d'absorption d'eau

Une des caractéristiques importantes des granulats légers est leur capacité d'absorption d'eau. Lorsqu'on confectionne un béton avec ces granulats, une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée du fait de leur importante porosité.

L'essai d'absorption sur un matériau permet de suivre l'évolution de sa capacité à absorber l'eau en fonction du temps.

Le taux d'absorption après un temps t est donné par la relation :

$$\text{Absorption (\%)} = \frac{m_t - m_0}{m} \times 100 \quad (2.3)$$

$m_t$  est la masse du matériau après un séjour de temps t dans l'eau.  
 $m$  est la masse du matériau.

## 2.2.2 Caractéristiques physique et mécanique du ciment utilisé

Le ciment utilisé est de type CEMII/B 32.5 N provenant de la cimenterie CIM BURKINA. La connaissance des caractéristiques du ciment utilisé s'avère importante pour pouvoir bien caractériser les composites.

## 2.2.3 Caractéristiques de l'eau de gâchage

L'eau de gâchage est un constituant indispensable à la confection des mortiers et bétons à base de liants hydrauliques parce que nécessaire à l'hydratation du ciment et à l'ouvrabilité de ces derniers. Elle doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis, etc.) car, elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. Cependant le respect du rapport Eau/ciment (E/C) ne suffit pas pour garantir au béton, une meilleure performance des caractéristiques recherchées. En effet, la qualité de l'eau y participe aussi.

La norme **XP P 18 – 303** a fixé de limite admissible de certains paramètres (organoleptique, physico-chimique, organique, minéral et métallique) de l'eau de gâchage pour béton. En effet, elle considère comme eau de gâchage pour béton, les eaux qui satisfont aux normes de potabilité. Le plus courant, pour des raisons économiques, il urge de réaliser un forage à proximité pour la confection des parpaings, bétons, etc.

Ainsi, les essais ont été réalisés avec l'eau du réseau d'alimentation de l'ONEA de la ville de Ouagadougou.

## 2.3 Etude de la compatibilité entre les granulats végétaux et le ciment

Le problème de la comptabilité est souvent évoqué lorsqu'il s'agit des composites alliant le ciment avec un matériau pouvant contenir des substances organiques. Dans le cadre de cette étude, la méthode de la calorimétrie isotherme est utilisée pour évaluer la compatibilité entre les particules de balles de riz, les fibres de rônier et le ciment. Elle consiste à suivre la vitesse d'hydratation du ciment à travers la quantité de chaleur dégagée au cours de la réaction.

Le matériel de l'étude se résume essentiellement à un dispositif de mesure de la chaleur d'hydratation schématisé comme le montre la figure 2-3. Il est constitué de :

- un calorimètre fait d'une grande enceinte adiabatique à trois compartiments de 25 x 45 x 35 cm<sup>3</sup>;
- trois enceintes adiabatiques (thermos), placées dans chacun des compartiments, permettant la prise de trois mesures simultanées;
- trois petits récipients (bocaux) en plastique;
- trois thermocouples de type K, plongés dans les échantillons et connectés à un dispositif d'acquisition de données qui permet de prendre simultanément plusieurs mesures de températures à l'intérieur du calorimètre;
- une balance de précision pesant au gramme près;
- un enregistreur de température de marque Testo 177-T4 (photo 2.1) à quatre sorties.

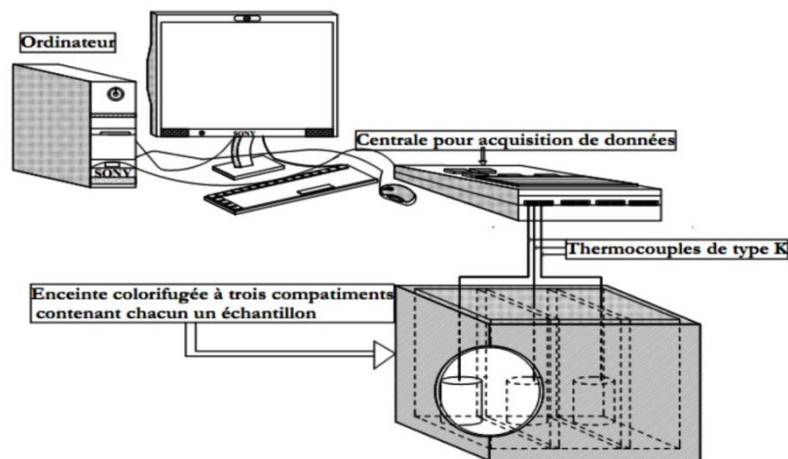


Figure 2-3 : Dispositif de mesure de la chaleur d'hydratation du ciment



Photo 2-4 : Enregistreur de température de marque Testo 177-T4

- **Préparation des échantillons d'essai**

---

☛ Composition du mélange témoin :

❖ 200 g de ciment;

❖ 80 ml d'eau.

☛ Composition du mélange avec les balles de riz :

❖ 200 g de ciment;

❖ 90 ml d'eau;

❖ 15 g de balles de riz.

### → Manipulation

☛ Peser les matériaux et les introduire dans un sachet plastique;

☛ Rendre homogène le mélange;

☛ Plonger le thermocouple au cœur du mélange fait dans le sachet plastique, dans un bocal couvert qui hermétiquement enfermé dans un thermos pour éviter l'échange de chaleur avec l'extérieur;

☛ Enfermer hermétiquement le thermos et l'introduire dans l'un des quatre compartiments du calorimètre;

☛ Enregistrer les températures durant toute la période d'essai  
(24heures au moins).

L'enregistreur est programmé pour prendre les températures toutes les 15 minutes. Les données enregistrées sont traitées à l'aide du logiciel Excel. Les principales caractéristiques d'hydratation obtenues à la suite de l'essai sont : la température maximale ( $T_{\max}$ ) atteinte au cours de l'hydratation, le temps ( $t_m$ ) mis pour atteindre cette température maximale, la vitesse d'hydratation ou cinétique ( $R$ ) de montée de température, donnée par l'équation (2.4), l'aire ( $A$ ) sous la courbe d'hydratation et le degré de compatibilité ( $C_A$ ) déterminé à partir de l'équation (2.5). L'aire permet d'estimer la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment d'un mélange (ciment-eau) donné sur une période de 24 heures considérée suffisamment longue pour tenir compte de tous les phénomènes d'hydratation.

Cette aire sous la courbe d'évolution de la température en fonction du temps, est évaluée par la méthode des trapèzes.

$$R(^{\circ}\text{C} / \text{h}) = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{t_m} \quad (2.4)$$

$$C_A = \frac{A}{A_t} \times 100 \quad (2.5)$$

Avec  $A$  et  $A_t$  les aires respectives sous les courbes temps-chaleur dans le composite et dans le témoin. De cette équation (2.5), l'échelle de comparaison suivante est proposée (**Hachmi et al., 1990**)

- **Matériau incompatible** :  $C_A < 28\%$  ;
- **Matériau moyennement compatible** :  $28\% < C_A < 68\%$  ;
- **Matériau compatible** :  $C_A > 68\%$ .

## 2.4 Formulation des composites

La formulation des gâchées a consisté :

- à fixer le dosage en ciment;
- ensuite à choisir les rapports eau de gâchage sur dosage en ciment adapté selon l'ouvrabilité du mélange frais par un essai de maniabilité des composites.
- enfin à déterminer la masse de granulats végétaux à utiliser pour confectionner  $1 \text{ m}^3$  de gâchée.

Trois cas de dosages sont utilisés dans le présent travail. Il s'agit de  $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $450 \text{ kg/m}^3$  et  $500 \text{ kg/m}^3$ .

La méthode utilisée pour définir les masses des granulats à mettre en œuvre en fonction du dosage en ciment et en eau, est basée sur l'expression du volume absolu du mélange frais et des masses volumiques absolues des éléments constitutifs du composite.

Le volume absolu du mélange frais des différents constituants du composite est donné par l'expression suivante :

$$V_{\text{abs mel}} = V_{\text{abs ciment}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{abs granulats}} \quad (2.6)$$

Où,  $V_{\text{abs mel}}$ ,  $V_{\text{abs ciment}}$ ,  $V_{\text{eau}}$  et  $V_{\text{abs granulats}}$  sont respectivement les volumes absolus du mélange frais, du ciment, de l'eau et des granulats utilisés.

## 2.4.1 Le dosage en ciment

Le dosage en ciment est la quantité (massique) de ciment contenu dans  $1 \text{ m}^3$  de béton frais. Dans le cas de cette étude les éprouvettes sont réalisées suivant les rapports C/R (quantité de ciment/ quantité de biomasse) obtenus après avoir utilisé une formulation dans laquelle les dosages  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  sont respectivement les quantités de 400 kg, 450 kg et 500 kg de ciment dans un mètre cube de béton frais.

Pour la suite il sera procéder à une nomenclature des éprouvettes qui tiendra compte des symboles  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$ . Ces symboles voudront signifier que les éprouvettes sont obtenues en considérant des rapports C/R provenant respectivement de l'introduction de  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  dans l'équation (3.4) de la formulation.

## 2.5 Mise en œuvre des composites

### 2.5.1 Préparation des balles de riz

Les balles de riz préalablement pesées sont d'abord pré-mouillées pendant une durée de 4 heures. Elles sont ensuite égouttées sur un tamis afin de les débarrasser du surplus d'eau. Ainsi, est-il question éviter que l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment ne soit absorbée par ce matériau, et que le ciment ne soit pas drainé au fond de l'éprouvette même si un surplus d'eau sur l'eau de gâchage était prévu.

### 2.5.2 Malaxage

L'étape du malaxage est assez importante et a pour but, lorsqu'elle est bien réussie d'assurer une bonne homogénéité des mélanges.

La procédure de malaxage ainsi que les différentes étapes sont les suivantes :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; mettre le malaxeur en marche à vitesse lente;
- Après 30 secondes de malaxage, introduire régulièrement les balles de riz déjà égouttées ou les fibres de rônier pendant 30 secondes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30 s supplémentaires ;
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci ;
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 30 s.



### **2.5.3 Mise en œuvre des éprouvettes**

Pour la confection des éprouvettes, des moules métalliques de dimensions **4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>** pour les essais mécaniques, essai de conductivité thermique (méthode de la plaque chaude gardée) et **10 x 10x3 cm<sup>3</sup>** pour les essais thermiques (méthode du ruban chaud) ont été utilisés. L'intérieur des moules est d'abord enduit d'une couche d'huile pour faciliter le démoulage après durcissement du mortier.

Concernant les essais thermiques, un découpage des éprouvettes est fait sur des dimensions **5 x 3.5 x 3 cm<sup>3</sup>** des éprouvettes de **10 x 10 x 3 cm<sup>3</sup>** pour répondre aux dimensions des éprouvettes de la méthode du ruban chaud utilisée. Ensuite, il est à noter que les essais thermiques ont été réalisés sur des éprouvettes issues uniquement des formulations optimales.

Un béton léger présentant un risque de ségrégation plus important que le béton classique, les granulats légers risquent en effet de remonter à la surface si une vibration trop importante est réalisée. Pour éviter ce problème, le moulage est effectué en deux couches compactées régulièrement à l'aide d'une tige métallique ; après quoi le moule est arasé et entreposé dans le laboratoire pendant 24 heures.

### **2.5.4 Conservation des éprouvettes**

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et entreposées à l'air ambiant du laboratoire pendant 14 ou 28 jours avant écrasement. Pour les essais thermiques, les éprouvettes qui ne sont pas soumises immédiatement aux essais sont enroulées dans du papier aluminium afin d'éviter l'influence extérieur sur les caractéristiques physiques définies.

## **2.6 Mesure de la consistance du mortier frais**

C'est un essai qui se déroule lors de la confection des éprouvettes. Il a pour but d'apprécier la fluidité ou la maniabilité du mortier à l'état frais. Ce paramètre est fonction du rapport E/C choisi et influe par la suite sur les propriétés physique, mécanique et thermique des composites.

## Matériels

- Table à secousses ;
- Moule tronconique sans fond ;
- Hausse ;
- Une dame pour le compactage.

## Mode opératoire

- Nettoyer et humidifier au moyen d'un linge humide la plaque de verre et l'intérieur du moule;
- centrer le moule muni de sa hausse sur table de manière telle que la base du moule coïncide avec le cercle gravé sur le support horizontal;
- remplir le moule de mortier en deux couches au moyen de la truelle tout en maintenant à la main le moule dans sa position centrale;
- damer chaque 10 fois avec la dame en répartissant les enfoncements uniformément sur la surface du mortier;
- ajouter un peu de mortier après le damage de la deuxième couche.
- enlever la hausse et araser le moule à la truelle sans exercer de pression sur le mortier;
- démouler 10 à 15 secondes plus tard en soulevant le moule avec précaution, lentement, à la verticale et sans secousses, en 15 secondes environ;
- en 15 secondes, donner 15 chocs.
- mesurer deux diamètres perpendiculaires  $d_1$  et  $d_2$  de la galette de mortier.

Soit  $d_r$  le diamètre final de la galette :

$$d_r = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.7)$$

Si la différence entre  $d_1$  et  $d_2$  est supérieure à 20mm, l'essai doit être recommencé

Si  $d_i$  est désigné comme le diamètre à la base du moule. Le pourcentage d'étalement est donné par :

$$E\% = 100 \times \frac{d_r - d_i}{d_i} \quad (2.8)$$

## 2.7 Essais de caractérisation physique, mécanique et thermique des composites

Plusieurs essais de caractérisation physique, mécaniques et thermique ont été réalisés sur les matériaux utilisés. Ces essais de caractérisation sont effectués suivant, objectifs visés et de la norme suivant laquelle l'essai a été conduit

### 2.7.1 Essais physiques

#### 2.7.1.1 Mesure de la masse volumique (NF EN 1097-6)

L'essai permet de connaître la masse volumique des éprouvettes à différentes dates d'écrasement.

#### Matériels

- balance électronique;
- un bocal + couvercle;
- une étuve.

#### Mode opératoire

- Mettre l'éprouvette à l'étuve jusqu'à masse constante; soit  $m_s$  cette masse;
- Remplir le bocal d'eau et peser avec le couvercle; soit  $m_1$ ;
- Mettre l'éprouvette dans le bocal, le remplir d'eau et peser; soit  $m_2$  la masse de l'ensemble avec le couvercle;

La masse volumique de l'éprouvette d'essai est ainsi calculée par la formule ci-dessous.

$$\rho = \frac{m_s}{m_2 - m_1} \quad (2.9)$$

#### 2.7.1.2 Mesure du taux d'absorption d'eau des composites (NF P 18 – 555)

L'essai consiste à suivre le gain de poids de l'éprouvette suivant le temps.

#### Matériels

- une balance;
- un bac à eau.

## Mode opératoire

- Mettre les éprouvettes à l'étuve à une température de 105°C jusqu'à poids constant puis pesées, soit  $m_0$ ;
- Immerger les éprouvettes dans l'eau;
- à différents âges, sortir les éprouvettes, les nettoyer et les peser, soit  $m_i$ .

Le taux d'absorption est donné par l'expression :

$$\text{Taux d'absorption(\%)} = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (2.10)$$

### 2.7.1.3 Mesure de la perte de masse des composites (NF EN 1097-6)

Cet essai consiste à suivre l'évolution de la perte de masse due à l'évaporation d'eau du composite suivant le temps.

#### Matériel

- Une balance

#### Mode opératoire

La masse des différentes éprouvettes est régulièrement mesurée afin de suivre son évolution dans le temps.

Soient  $m_0$ , la masse initiale et  $m_T$  la masse mesurée à l'instant  $t$ . La perte de masse est donnée par :

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_T}{m_0} \quad (2.11)$$

### 2.7.2 Essais mécaniques

Les essais mécaniques selon la norme (EN 196-1) ont pour but de connaître les résistances à la traction et à la compression du mortier qui seront mesurées en laboratoire sur des éprouvettes. Ils sont effectués sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Les éprouvettes sont chargées en compression et en flexion à l'aide d'une presse jusqu'à la rupture. La force provoquant la rupture dans chaque cas est exploitée pour déterminer les résistances mécaniques du mortier.

### 2.7.2.1 Dispositif expérimental

- Une presse hydraulique de 15 Tonnes;
- Un comparateur de déplacement permettant de lire les déformations de l'éprouvette;
- Un dispositif d'acquisition numérique permettant de lire les charges appliquées.

Au jour prévu, les éprouvettes sont rompues en flexion. Les demi - prismes obtenus sont rompus en compression. Le comparateur, placé de manière adéquate, permet de relever pour les charges appliquées les déformations correspondantes.



**Photo 2-5 : Dispositif pour la réalisation des essais de flexion trois points et de compression**

### 2.7.2.2 Détermination de la résistance en traction par flexion

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $\frac{F_f \times L}{4}$  et

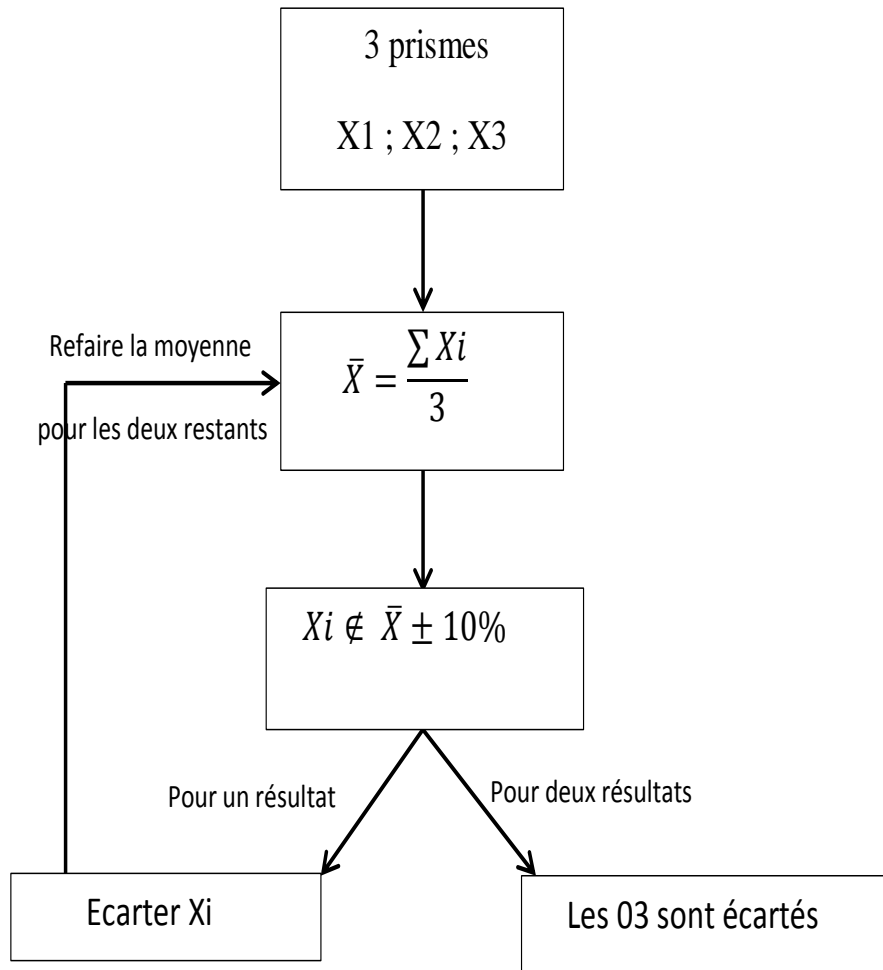
la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1,5F_f \times L}{b^3} \quad (2.12)$$

$b$  étant le côté de la section et  $L$  la longueur de l'éprouvette.

Les essais de traction par flexion sont réalisés sur 3 prismes; la moyenne des résultats obtenus est faite sur chacun des prismes. Si l'un des trois résultats diffère de  $\pm 10\%$  de la moyenne, ce résultat est écarté et la moyenne des deux restants est refaite.

Si deux résultats diffèrent de  $\pm 10\%$  de la moyenne, les trois résultats sont tous écartés (figure 2-4).



**Figure 2-6 : Organigramme du processus de validation des résistances en traction**

### 2.7.2.3 Détermination de la résistance en compression

Si  $F_c$  est la charge de rupture en compression, la contrainte de rupture vaut :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (2.13)$$

Les essais de compression sont réalisés sur 6 demi-prismes. La moyenne des résultats obtenus sur chacun des prismes est la résistance à la compression. Si l'un des 6 résultats diffère de  $\pm 10\%$  de la moyenne, il est écarté et la moyenne est calculée à partir des 5 restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de  $\pm 10\%$  de la nouvelle moyenne, toute la série des 6

mesures est écartée. Auquel cas il convient de rechercher les raisons de cette dispersion : malaxage, mis en place, conservation ?

Lorsque la résistance est satisfaisante, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du matériau à l'âge considéré (figure 2-5).

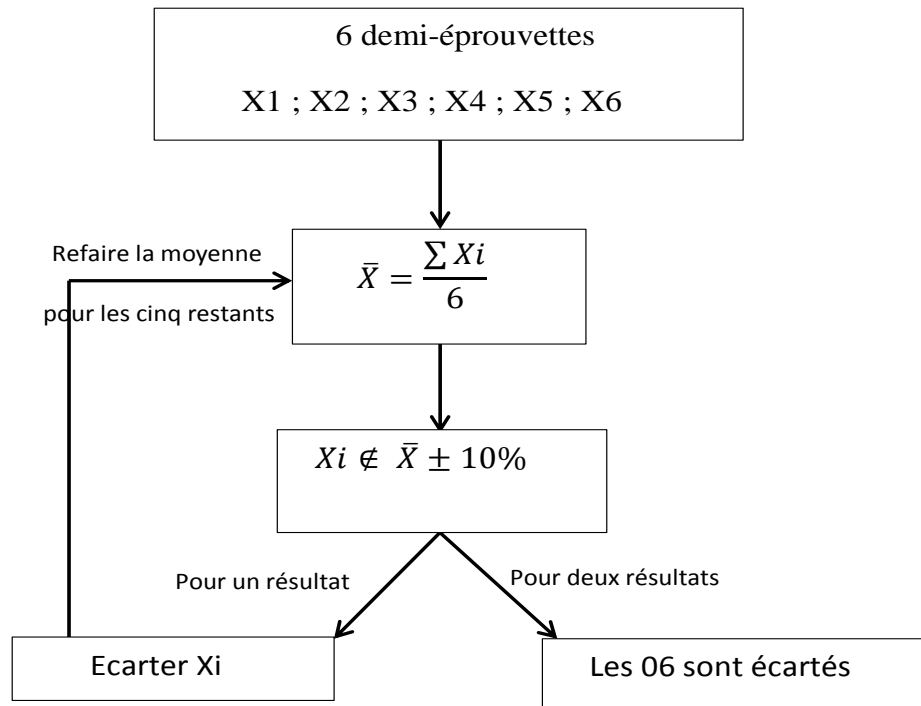


Figure 2-7 : Organigramme du processus de validation des résistances en compression

### 2.7.3 Modèle mathématique ou Analyse Statistique

A partir des mesures expérimentales réalisées, la loi de comportement des résistances mécaniques est obtenue par ajustement non linéaire à l'aide d'une fonction polynôme

$$\mathbf{p}_a(\mathbf{x}) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \mathbf{x} + \dots + \mathbf{a}_n \mathbf{x}^n \quad (2.14)$$

Il revient donc à minimiser la fonction :

$$\mathbf{E}(\mathbf{a}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{p}_a(\boldsymbol{\alpha})\|^2 \quad (2.15)$$

Avec :

$$\begin{cases} \mathbf{y} = (y_0, y_1, \dots, y_k)^T \\ \boldsymbol{\alpha} = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k)^T \\ \mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_n)^T \end{cases} \quad (2.16)$$

$\boldsymbol{\alpha}$  et  $\mathbf{y}$  représentent respectivement la consistance E/C et les résistances mécaniques.

Sous forme matricielle,  $E(\alpha)$  donne

$$E(\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n) = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{p}_a(\alpha) + [\mathbf{p}_a(\alpha)]^T \mathbf{p}_a(\alpha) \quad (2.17)$$

En dérivant cette expression par rapport à toutes les composantes du vecteur  $\mathbf{a}$  et en annulant toutes les dérivées partielles de  $E$ , ce qui donne les conditions du premier ordre vérifiées pour toutes les estimations du vecteur  $\mathbf{a}$  qui correspond à un extrémum intérieur de  $E$ .

L'on obtient conditions du premier ordre :

$$-2\mathbf{X}^T(\mathbf{a})\mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T(\mathbf{a})\mathbf{p}_a(\alpha) = \mathbf{0} \quad (2.18)$$

$X(\mathbf{a})$  est la matrice définie par :

$$X_{ij}(\mathbf{a}) = \frac{\partial p_a(\alpha_i)}{\partial a_j} \quad (2.19)$$

Pour un meilleur ajustement, il faut un nombre de mesures  $k$  important, tout en veillant à leur fiabilité. Pour cette dernière, il est répété 6 fois la même mesure. Pour des raisons de bonne maniabilité,  $k = 3$ .

L'on remarque que  $n + 1 = k$ , ce qui conduit à une interpolation polynomiale. De ce fait, toute solution du système (2.18) est un minimum global de  $E$ .

Les courbes de lissage des résistances mécaniques suivant le dosage en ciment pour les composites étudiés sont présentées sur les figures 3-38 à 3-41. Elles traduisent la variation de la résistance en compression et en traction par flexion des composites en fonction du rapport eau/ciment (E/C) avec pour paramètre le dosage  $D_i$ .

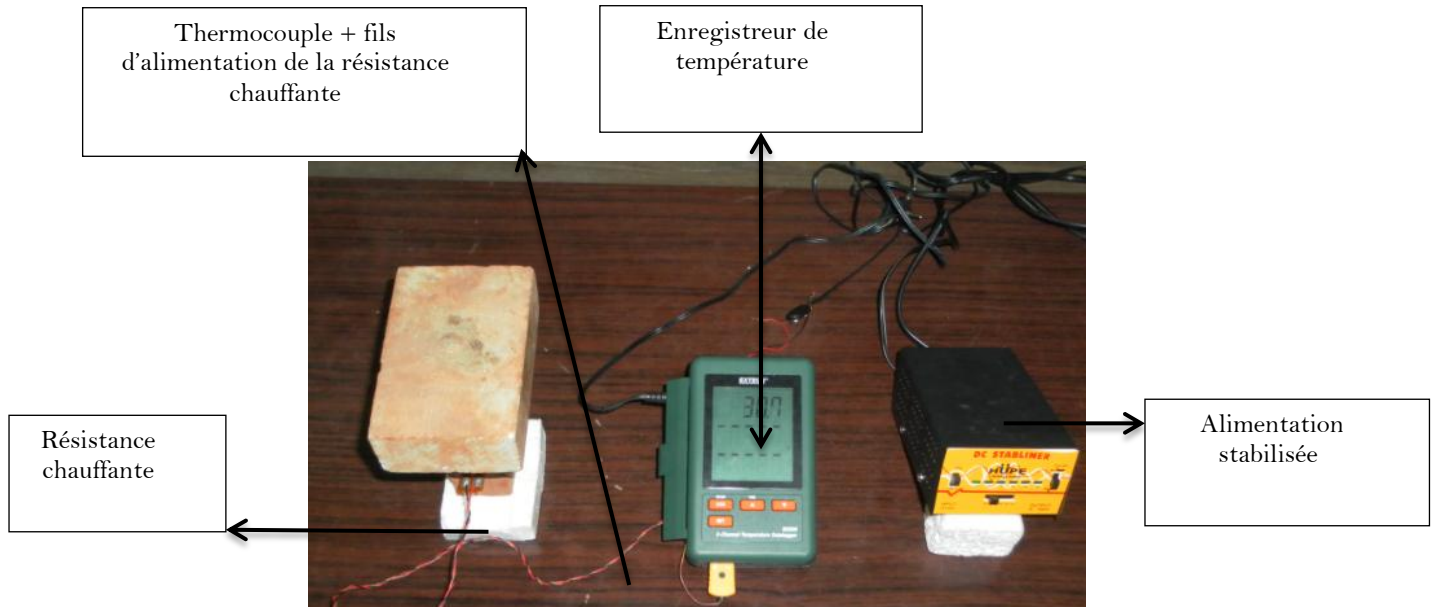


## 2.7.4 Essais thermiques

### 2.7.4.1 Dispositif expérimental

- **Méthode du ruban chaud**

Le dispositif utilisé pour les caractéristiques thermiques est représenté sur la photo 2.5.



**Photo 2-8 : Dispositif expérimental de la méthode du ruban chaud**

→ **Réalisation pratique de la mesure**

Cette mesure peut être mise en œuvre de par la manière Ruban chaud en utilisant une méthode chauffante plate rectangulaire de longueur au moins égale à 3 fois la largeur. Au centre de cette résistance est fixé un thermocouple réalisé en fils fins (diamètre < 0,1 mm). Une largeur de 1,2 cm est suffisante pour les matériaux peu diffusifs (plastiques, bois), une largeur de l'ordre de 2,5 cm est nécessaire pour les matériaux plus diffusifs (pierre, grès...). La plus petite dimension de l'échantillon doit être supérieure à 1,5 fois la largeur totale du ruban. La méthode conduit à des dimensions de sonde et d'échantillons trop importantes pour les matériaux les plus diffusifs (métaux) pour elle est mal adaptée.

Un étalonnage de la sonde est nécessaire à partir d'un matériau de propriétés thermiques connues sur lequel il est fait plusieurs essais. La surface utile  $S$  de la sonde est celle qui permet de retrouver la valeur connue de l'effusivité. La largeur  $l$  de la sonde est ensuite déterminée : c'est celle qui permet de retrouver la valeur connue de la conductivité.

La mise en œuvre de la méthode nécessite en outre une alimentation stabilisée et un dispositif d'enregistrement de la tension délivrée aux bornes du thermocouple. Un enregistrement sur 180 secondes après le début du chauffage permet d'obtenir une bonne précision. Un pas de temps de 5 s pour l'enregistrement de la température donne des résultats satisfaisants.

### → Validation du dispositif expérimental

Afin de valider notre dispositif, il est utilisé à la place des matériaux de caractéristiques thermiques inconnues des échantillons de Plexiglas de mêmes dimensions que nos éprouvettes d'essais ayant pour masse volumique  $1180 \text{ kg/m}^3$ , conductivité thermique  $\lambda = 0,184 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et d'effusivité thermique comprise entre 540 et 581  $\text{W.s}^{0,5}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  (Vianou A *et al.*, 1991).

Les champs thermiques dans le Plexiglas pour la détermination de la conductivité thermique et de l'effusivité thermique (tableau 2.10) sont représentés par les figures 2-6 et 2-7

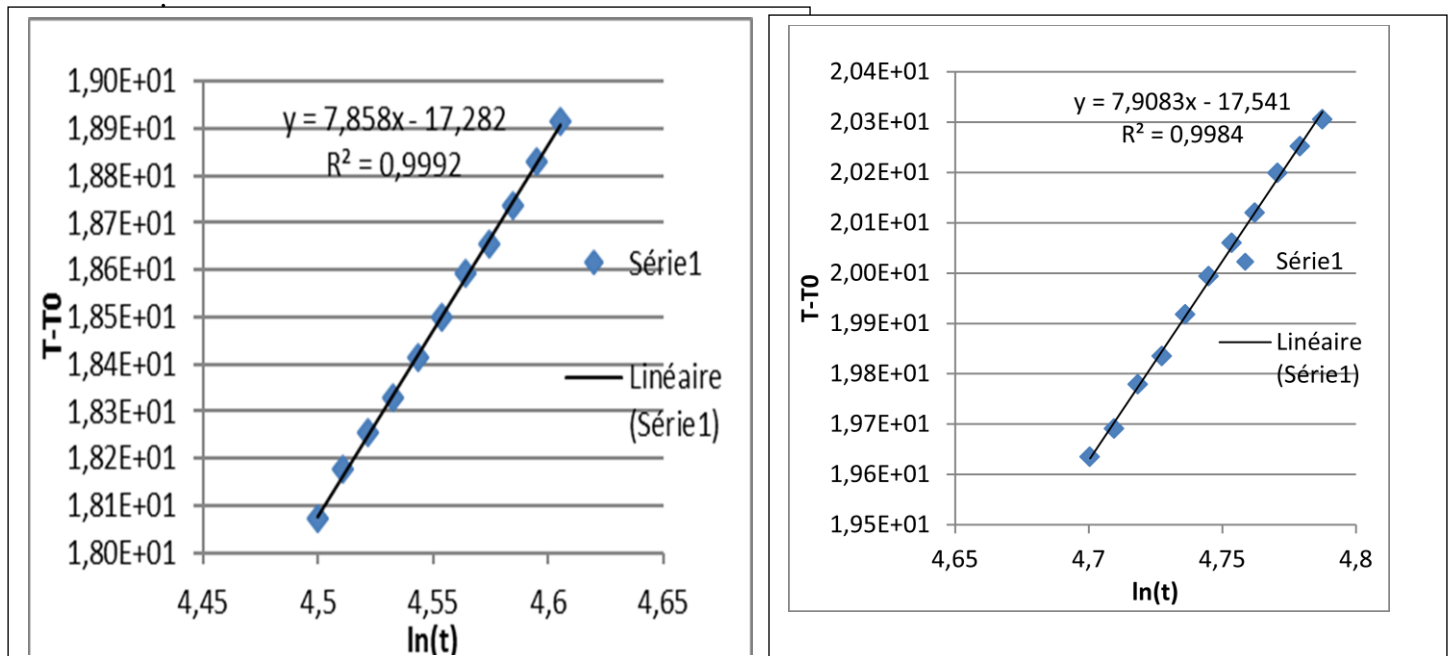


Figure 2-9 : Champ thermique dans le Plexiglas : conductivité thermique

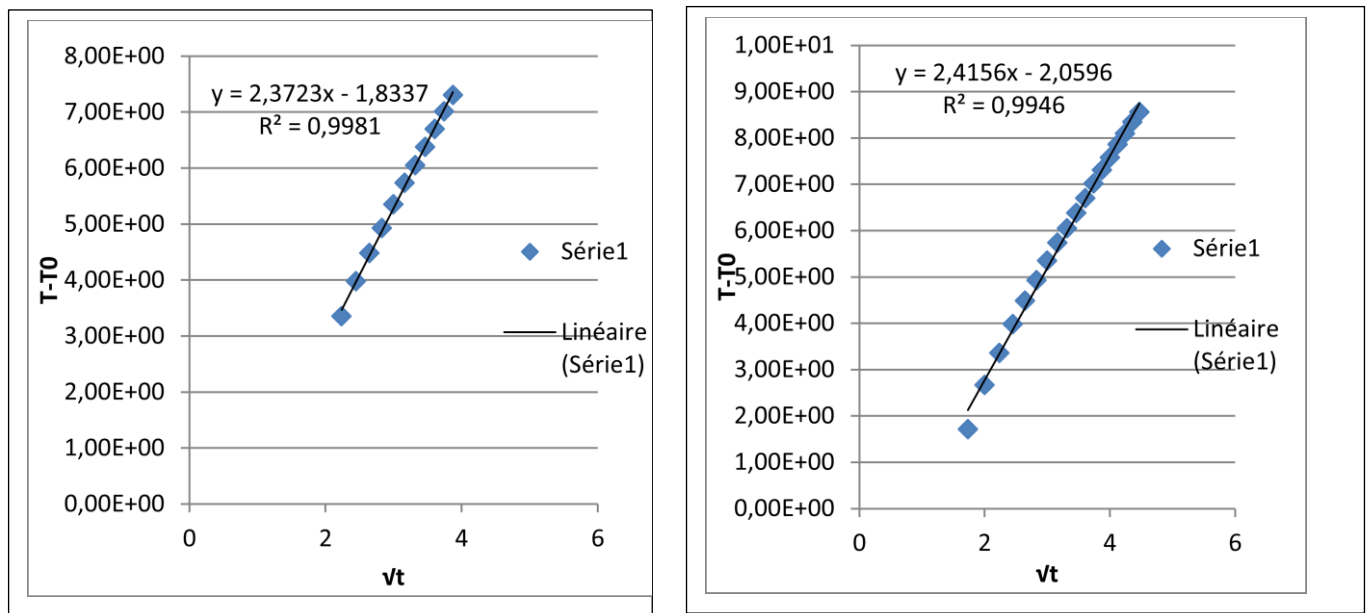


Figure 2-10 : Champ thermique dans le Plexiglas : effusivité thermique

Tableau 1.4 : Caractéristiques thermiques du Plexiglas testé.

	Essais sur le Plexiglas	
$\lambda$ (conductivité thermique) ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	0,185	<b><math>0,1845 \pm 0,005</math></b>
	0,184	
$E$ (effusivité thermique) ( $W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	579,98	<b><math>574,78 \pm 5,2</math></b>
	569,58	

Au regard des résultats obtenus le constat est que les valeurs de la conductivité thermique et de l'effusivité du Plexiglas mesurées sont conformes à celles de la littérature.

## 2.8 Microstructure des composites

Le dispositif qui a permis d'observer la microstructure de nos composites est présenté sur la photo 2.6

Cet instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise sa puissance optique) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain.

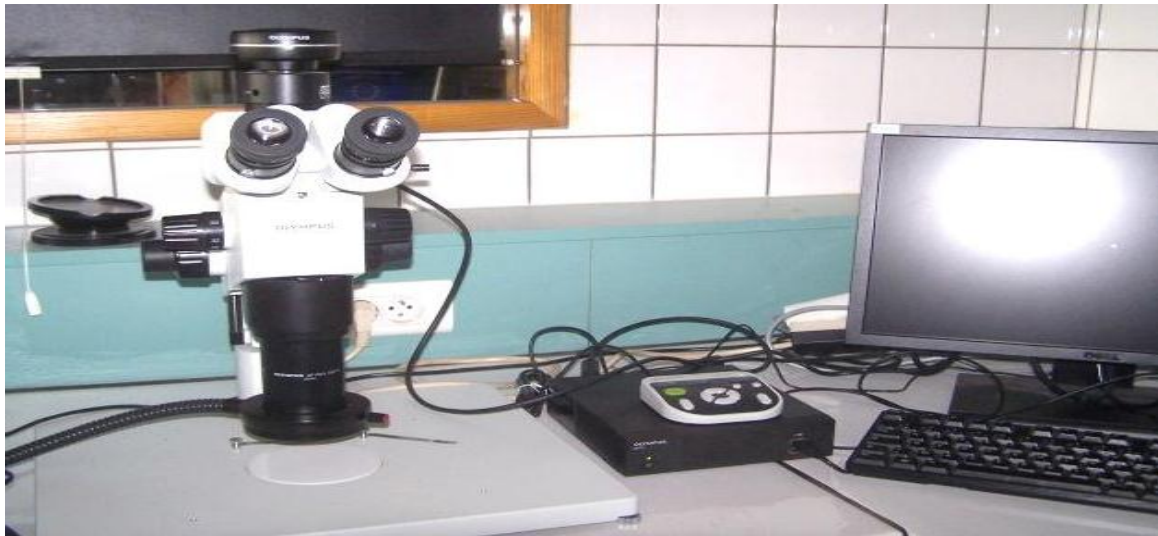


Photo 2-4 : Microscope binoculaire CX22 (Olympus)

## 2.9 Traitement des résultats des différents essais

Le traitement et l'analyse des résultats sont faits à l'aide du logiciel Excel de Microsoft office et de Math CAD.

Le logiciel Excel de Microsoft a été utilisé pour enregistrer les données, faire les calculs et les analyses.

Le logiciel Math CAD est utilisé pour faire le lissage des résultats par une interpolation polynomiale. L'interpolation est faite sur les caractéristiques mécaniques des composites en fonction du rapport E/C utilisé lors de la formulation. Les différentes équations obtenues sont traduites sous forme de courbe  $R(x)$  avec la variable  $x$  qui représente le rapport E/C. Ces courbes sont construites en traction par flexion  $RT(x)$  et en compression  $RC(x)$  selon les paramètres  $D_i$  (dosage) et le rapport C/R. Leurs exploitations comme abaque résident en la projection de la résistance du composite en fonction du dosage en eau.

## 2.10 Conclusion

La maîtrise d'un matériau passe par la connaissance de ses propriétés physiques, mécaniques et thermiques. C'est ainsi qu'il est procédé dans un premier temps à l'étude de compatibilité des biomasses végétales avec le ciment CEMII / B 32.5 tout en précisant les matériels et la méthode utilisée, ensuite la méthode de formulation qui est basée sur le principe des volumes absolus est précisée après avoir énuméré les matériels et méthodes pour les caractéristiques physiques des constituants des composites; puis il est question de s'intéresser aux caractéristiques mécaniques des composites et en fin à la méthode du ruban chaud développée par Jannot et Meukam pour les caractéristiques thermiques de nos composites.

## **Partie III : Résultats et discussion**

## Chapitre 3 : CARACTERISATION DE LA MATIERE PREMIERE

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons, présenter et discuter les résultats obtenus à la suite de la caractérisation de la matière première afin de mettre en évidence les propriétés essentielles et utiles qui ont motivé leur utilisation dans cette étude.

### 3.2 Ciment

Les propriétés physiques et mécaniques du ciment utilisé sont indiquées dans les tableaux 3-1 et 3-2. Il s'agit d'un ciment de fabrication locale, sa surface spécifique est de 3155 cm<sup>2</sup>/g pour une densité de 3,01. Il répond à la norme Burkinabé NBF 02-013-2009.

Les tableaux ci-dessous présentent donc les caractéristiques physiques et mécaniques de ce ciment.

Tableau 3 - 1 : Caractéristiques physiques du ciment (LNBTP)

Densité apparente	1,073
Masse volumique	3,01
Début de prise	3h05
Fin de prise	4h39
Surface spécifique (Blaine)	3155
Expansion	1,50
Refus sur tamis 0.08	10,92
Refus sur tamis 0.16	0.80

Tableau 3 - 2 : Caractéristiques mécaniques du ciment (LNBTP)

Nombre de jours	Résistance à la compression (MPa)
2 jours	13,2
7 jours	24,2
28 jours	33,0

### 3.3 Balle de riz et fibre de rônier

Ces matières végétales utilisées comme granulats ont été soumises à différentes analyses physiques dont les résultats sont présentés dans le paragraphe ci-dessous.

#### 3.3.1 Granulométrie

L'essai d'analyse granulométrique a été fait sur les compositions granulaires obtenues à partir des mélanges de refus des tamis utilisés conformément au tableau 3-3.

Pour la suite du document selon les proportions des différentes particules considérées les expressions « mélange fin » et « mélange grossier » seront utilisées (Tableau 3-3).

Tableau 3 - 3 : Proportions utilisées pour la composition des mélanges

Granulats	Balle de riz		Fibre de rônier	
	Mélange fin (MF)	Mélange grossier (MG)	Mélange fin (MF)	Mélange grossier (MG)
Diamètres des particules/fibres				
[2,5 ; 5[	16,67 %	40 %	16,67 %	40 %
[1,25 ; 2,5[	16,67 %	30 %	16,67 %	30 %
[0,63 ; 1,25[	33,33 %	20 %	33,33 %	20 %
[0,315 ; 0,63[	33,33 %	10 %	33,33 %	10 %
<b>Module de finesse</b>	2,17	3,00	2,17	3,00

A travers ce tableau, nous constatons avec la variation des diamètres par ordre décroissant pour les deux types de mélange (fin et grossier) respectivement de Balle de riz et fibre de rônier des modules de finesse identique. Ainsi, pour la balle de riz comme pour la fibre de rônier, nous avons 2,17 pour les mélanges fin et 3 pour les mélanges grossiers. Ces résultats sont identiques en termes de granularité à celui du fuseau proposé pour la granularité des sables.

- 1,8 à 2,2 sables trop fin
- 2,2 à 2,8 sables préférentiel
- 2,2 à 3,2 sables grossier

A la suite de cette observation, nos matières premières s'inscrivent dans la gamme des éléments fins et grossiers. Ce qui pourrait provoquer comme conséquence pour les mélanges fins un béton maniable et moins résistant. Pour les mélanges grossiers un béton moins maniable mais résistant.

Les résultats des différentes analyses granulométriques effectués sur nos échantillons sont illustrés par la figure 3.1.

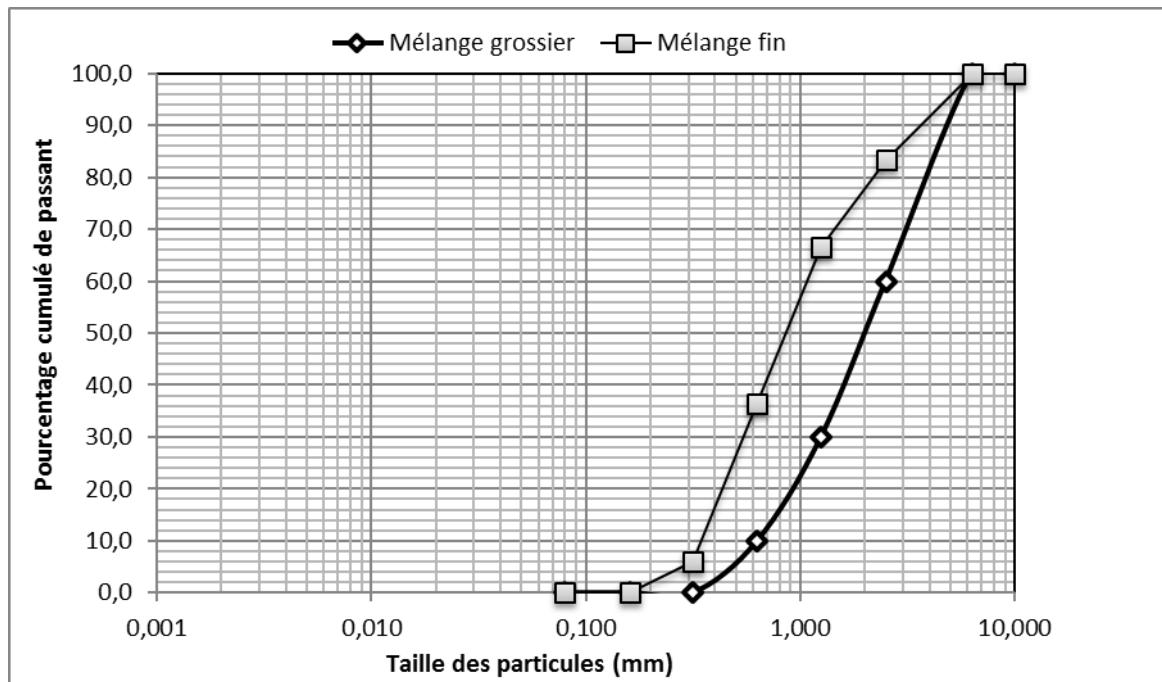


Figure 3.1 : Courbes granulométriques des mélanges fin et grossier des granulats.

D'après ces différentes courbes, le mélange fin et le mélange grossier sont respectivement de classe 0/4 et 0/5. Le diamètre de 50 % des grains de ces différents mélanges sont respectivement de 0,9 mm et 2 mm.

### 3.3.2 Masse volumique apparente et absolue et taux d'humidité des matières premières

Les résultats des différentes propriétés physiques déterminées sur les mélanges de fibres de rônier et de balles de riz sont résumés dans le tableau ci-dessous.



Tableau 3 – 4 : Différentes caractéristiques physiques des matières premières

	<b>Matières premières</b>			
	<b>Balle de riz</b>		<b>Fibre de rônier</b>	
	<b>Mélange fin</b>	<b>Mélange grossier</b>	<b>Mélange fin</b>	<b>Mélange grossier</b>
<b>Masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,203	0,169	0,260	0,180
<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,749	0,658	0,687	0,771
<b>Taux d'humidité (%)</b>	6,85%	8,04%	12,76%	12,96%

Le tableau montre une différence nette entre les valeurs des masses volumiques et des taux d'humidité des balles de riz et des fibres de rônier ainsi qu'entre les mélanges fins et grossiers. D'une façon générale, les masses volumiques (apparente et absolue) des mélanges fins des composites à base de balles de riz sont supérieures à celles des mélanges grossiers. Alors que dans le cas des composites à base de fibres de rônier, les mélanges grossiers ont des masses volumiques supérieures à celles des mélanges fins. Ces résultats ont été observé aussi par **(Benoit, 2011)** sur différents fibres.

Pour ce qui concerne le taux d'humidité, les mélanges grossiers ont des taux plus élevés quelque soit le type de biomasse. Ces résultats sont en accord avec ceux de **(Benoit, 2011)**.

### 3.3.3 Mesure de l'absorption

Les taux d'absorption obtenus sur les échantillons sont présentés sur les figures 3-2 et 3-3.

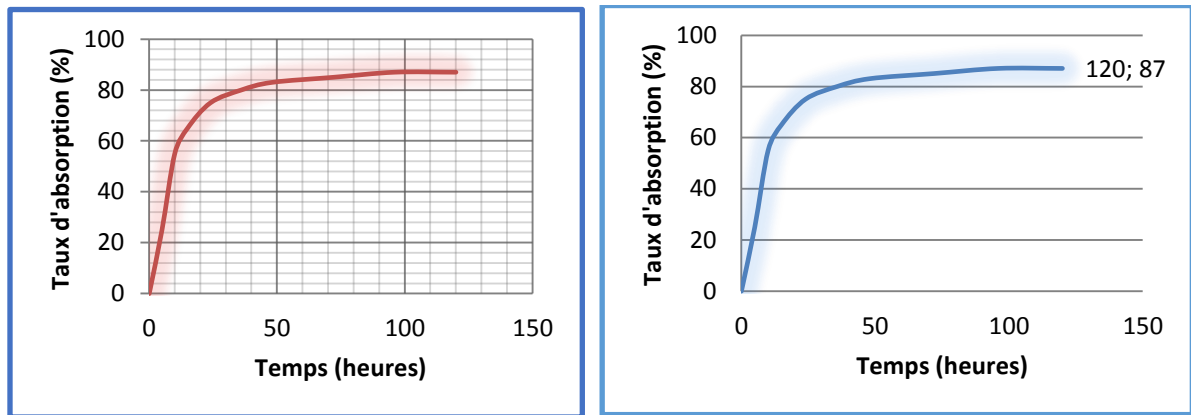


Figure 3.2 : Cinétique d'absorption du mélange fin et grossier de balles de riz

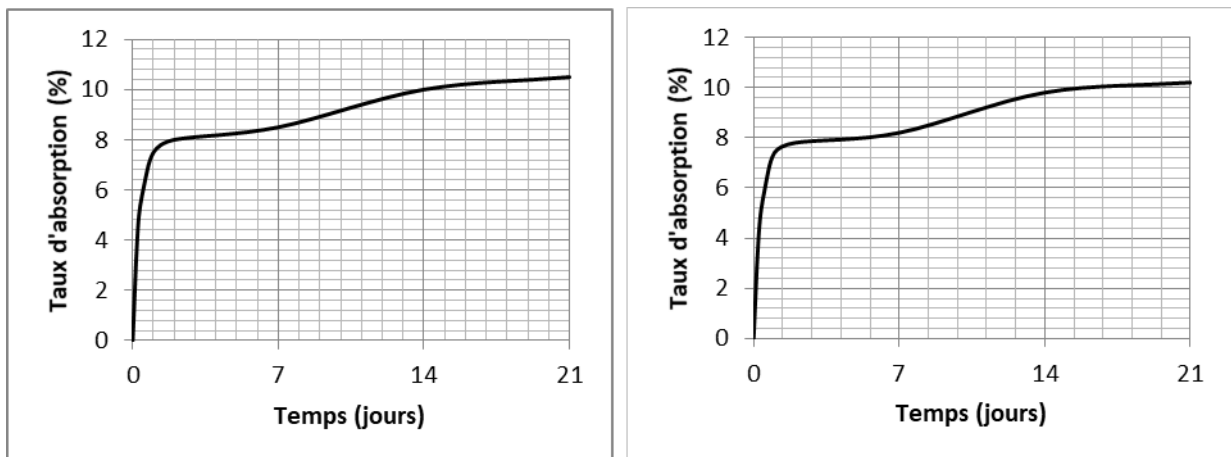


Figure 3.3 : Cinétique d'absorption du mélange fin et grossier de fibres de rônier

De l'analyse des courbes cinétique d'absorption, il est constaté que les balles de riz, contrairement aux fibres de rônier ont un pouvoir absorbant considérable. Leur taux d'absorption est environ de 80 % après 48 heures pour le mélange fin et de 63,5 % toujours après 48 heures pour le mélange grossier alors que celui des fibres de rônier est de 10,50 % à 21 jours pour le mélange fin et 10,20 % pour le mélange grossier à 21 jours. Aussi, les mélanges fins absorbent plus que les mélanges grossiers. Cette grande absorption des fibres végétales a été mise en évidence par (Morgan, 2015) lors de ses travaux sur l'utilisation de la

fibres de chanvre dans le béton. La grande absorption du mélange fin est liée à leur surface spécifique plus grande, selon la littérature scientifique plus un élément est fin plus sa surface spécifique est grande et a besoin d'une grande quantité d'eau pour mouiller cette surface. Cependant, une grande quantité d'eau dans un matériau cimentaire réduit ces performances mécaniques. Pour **Tuan, (2018)** la grande absorption des fibres végétales pourra entraîner des variations volumiques des fibres dans le mélange et engendrer des modifications de l'interface fibres/matrice

Ainsi, la capacité d'absorption en eau est un facteur très important dont il faut tenir compte lors de la formulation des composites de biomasse - ciment. Le fonctionnement du ciment peut en effet être profondément altéré, entraînant des désordres graves tels que : mauvaise prise, dessiccation. En effet, **Sedan et al., (2007)** expliquent la modification de la prise par la présence de pectine dans les fibres de chanvre qui est à la base du retard observé dans le béton de chanvre.

Cet inconvénient peut être réduit en humidifiant les balles de riz avant mélange avec le ciment. En se basant sur la courbe cinétique d'absorption d'eau des balles de riz (figures 3.2), après une durée d'immersion de 4 heures, plus de 90 % de l'absorption d'eau totale est déjà atteinte. De plus, il est remarqué, qu'après ce temps d'humidification, la vitesse d'absorption varie faiblement. L'humidifier les balles de riz préalablement pesées pendant au moins 4 heures et de les égoutter ensuite sur un tamis de manière à ne plus avoir de gouttes d'eau qui pourra influencer le rapport E/C.

Les fibres de rônier n'ont subi aucun traitement avant malaxage avec le ciment car leur taux d'absorption d'eau est relativement faible.

### 3.4 Eau de gâchage

Les essais ont été réalisés selon les normes AFNOR en vigueur de juillet 2015 sur l'eau sur cette eau destinée à la consommation sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 - 5 : Caractéristiques de l'eau de gâchage (ONEA)

Paramètres	Unités	Précision	Valeurs	Méthodes d'analyse
Température	°C	± 0,1	28,8	Electrochimique NF T 90-106 avec l'oxymètre Oxi 730 WTW inolab
Oxygène dissous	mg/L	± 0,1	3,6	
Potentiel d'Hydrogène (pH)	-	± 0,01	4,79	Electrochimique (NFT 90-008) avec le pH 3110 SET 3 (WTW)
Potentiel redox (eH)	Mv	± 0,1	125,2	
Conductivité	µs/cm	± 1	463	Electrochimique NF EN 27888 avec le conductimètre pH/EC/TDS waterproof Family
Sels Totaux dissous (TDS)	mg/L	± 1	231	
Turbidité	NTU	± 0,01	0,11	Néphélométrique NF T 90-033 grâce au turbidimètre TURBIQUANT 110 IR MERCK
Matières en suspension (MES)	mg/L	± 0,1	0,0	Par filtration EN 872
Carbone organique Total (COT)	mg/L	± 0,1	13,5	Spectrophotométrique par l'emploi de kits
Ammonium	mg/L	± 0,1	0,0	
Chlorure	mg/L	± 0,01	1,08	
Magnésium	mg/L	± 0,1	24,3	
Sulfate	mg/L	± 0,1	9,3	

L'échantillon a un pH acide mais conforme à la norme en vigueur concernant l'eau de gâchage pour le béton. Cette valeur exprime aussi la présence du dioxyde de carbone qui caractérise les eaux de forage.

La valeur des Matières en Suspension (MES) exprime la faible présence de particules solides; hypothèse confirmée par la turbidité enregistrée. De plus, l'échantillon est faiblement chargé en matière organique conformément à sa concentration en Carbone Organique Total (COT). Par ailleurs, la faible conductivité de l'échantillon témoigne les faibles teneurs enregistrés en ions chlorures.

Toutefois la norme **NF EN 1008** pour l'eau de gâchage du béton stipule qu'en contrôle préliminaire, il faut s'assurer que l'eau soit claire et inodore, exempte de matières organiques, son pH doit être  $\geq 4$  et elle ne doit pas former de mousse persistante après agitation.

En somme, sous réserve d'étude de la résistance à 28 jours, l'échantillon pourrait servir d'eau de gâchage pour béton.

### **3.5 Conclusion**

En conclusion sur la caractérisation des matières végétales utilisées pour la confection des bétons de fibres, il ressort que ces fibres étudiées présentent des caractéristiques qui en font des matières premières pouvant entrer dans la formulation d'un béton. Toutes ces caractéristiques sont résumées dans les paragraphes ci-dessus. En effet, la détermination du coefficient d'absorption renseigne sur la grande absorption d'eau des balles de riz par rapport aux fibres de rônier qui est préjudiciable pour le béton. Les balles de riz préalablement traitées et les fibres de rôniers non traités, serviront de renfort à la matrice minérale. Quant au stabilisant, il n'est rien d'autre que le ciment de fabrication locale et couramment utilisé dans les activités de construction Burkina Faso. Les études antérieures sur des échantillons de fibres végétales ont montré qu'elles peuvent être stabilisées au ciment. Ces matières premières seront combinées pour réaliser du béton fibrés pour la construction.

**Partie IV : Influence du rapport eau/ciment sur les bétons de fibres**

## **Chapitre 4 : INFLUENCE DU RAPPORT EAU/CIMENT SUR LES BETONS DE FIBRES**

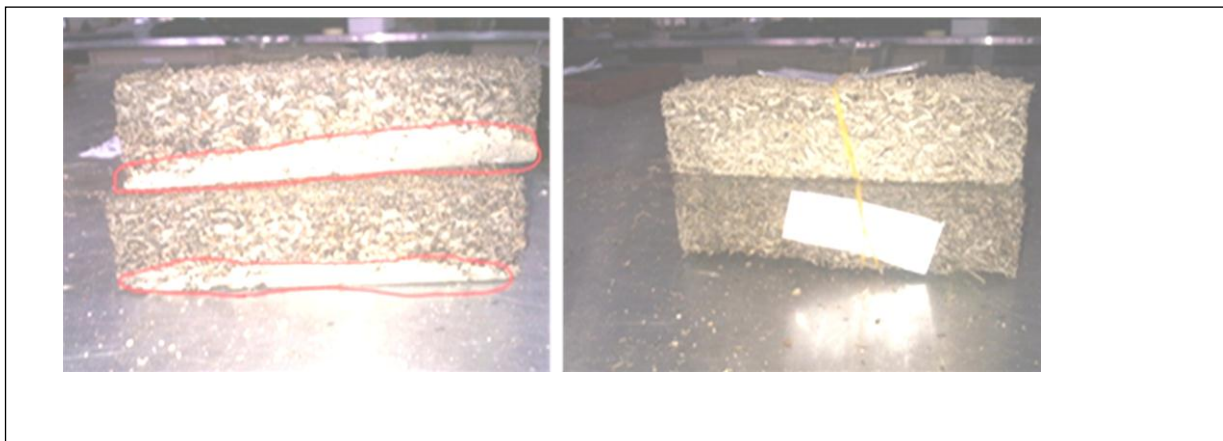
### **4.1 Introduction**

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles, mais pouvant se combiner. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. La matière ajoutée, souvent sous forme de fibre, est appelée le renfort, tandis que la matière présente en plus grande quantité et qui assure la cohésion dans la structure est appelé la matrice. Les renforts les plus utilisés sont les fibres de verre et de carbone, bien que les fibres naturelles gagnent en popularité (**Robert, 2005**). En termes d'influence sur le matériau, la maîtrise de la quantité d'eau est très importante pour sa cohésion et sa maniabilité. Ces molécules d'eau qui s'infiltreront dans la chaîne cellulosique vont les écarter et provoquer le gonflement de la fibre (**Harrache, 2015**). Ainsi, la recherche d'un rapport eau/ciment convenable s'avère nécessaire pour la fabrication d'un matériau composite durable.

Pour estimer comparativement les propriétés mécaniques de ce composite, nous étudierons dans cette partie la détermination de la teneur en eau de gâchage et du volume optimal de pâte à compacter, la détermination des paramètres de confection des bétons de matières végétales (balle de riz et fibre de rônier) ainsi que l'influence de l'eau sur la confection (l'élaboration) de ces bétons.

## 4.2 Détermination de la teneur en eau de gâchage

Pour justifier la quantité d'eau de gâchage, nous avons réalisé des séries d'échantillons de béton chacune avec des teneurs en eau de gâchage différentes. Les résultats de cette étude sont visibles sur les photos ci-dessous. Ces photos illustrent les aspects des composites avec un dosage en eau acceptable (photos 4.1.b et 4.2.b) et un mauvais dosage en eau (photo 4.1.a et 4.2.a).



**a- Mauvais**

**b- Acceptable**

Photo 4-1 : Aspect des composites fibres de rômier – ciment selon le dosage en eau



**a. Mauvais**

**b. Acceptable**

Photo 4-2: Aspect des composites balles de riz – ciment selon le dosage en eau

Les tableaux 4-1 et 4-2 présentent le point des différents rapports E/C expérimentés avant que ne soient retenus définitivement ceux qui sont utilisés pour la confection des éprouvettes destinées aux essais physique , mécanique et thermique sur les composites.



Tableau 4 - 1 : Point des rapports E/C expérimentés pour les composites fibres de rônier Ciment

Type d'éprouvette	Rapport E/C	Étalement (cm)	Ouvrabilité
<b>MF-D1</b>	1,0	14,2	Fluide
	0,8	11,5	laisse de dépôt
	0,7	10,7	Bon
	0,6	10,3	Bon
	0,5	10,2	Bon
	0,4	-	peu maniable
<b>MG-D1</b>	1,0	13,9	Fluide
	0,8	11,3	laisse de dépôt
	0,7	10,37	Bon
	0,6	10,05	Bon
	0,5	9,95	Bon
	0,4	-	peu maniable
	0,3	-	peu maniable
<b>MF-D2</b>	0,7	15,8	Fluide
	0,6	14,7	Fluide
	0,5	12,55	Bon
	0,4	10,0	Bon
	0,3	-	peu maniable
<b>MG-D2</b>	0,7	15,75	Fluide
	0,6	14,6	Fluide
	0,5	12,85	Bon
	0,4	10,05	Bon
	0,3	-	peu maniable
<b>MF-D3</b>	0,5	15,8	Fluide
	0,4	10,5	Bon
	0,3	-	peu maniable
<b>MG-D3</b>	0,5	15,75	Fluide
	0,4	11,55	acceptable
	0,3	10,35	bon

A l'observation du tableau, le constat général est que l'ouvrabilité baisse avec l'augmentation de la proportion de fibres dans le mélange. Cette baisse est aussi observable sur le rapport E/C. Pour les MF-D1 et MG-D1 le E/C se trouve dans l'intervalle [0,5-0,7]. Ce rapport est réduit pour MF-D2 et MG-D2 qui est de [0,4-0,5] et encore plus réduit pour MF-D3 et MG-D3. La chute de la maniabilité ou ouvrabilité a été mis en évidence par (PAGE, 2015). avec l'utilisation de fibre de lin.

Tableau 4 - 2 : Point des rapports E/C expérimentés pour les composites de balles de riz

Type d'éprouvette	Rapport E/C	Etallement (cm)	Remarque
<b>MF-D1</b>	0,55	15,50	Fluide
	0,45	13,45	Fluide
	0,40	11,40	Bon
	0,35	10,30	Bon
	0,30	10,32	Bon
	0,25	-	Peu maniable
<b>MG-D1</b>	0,55	12,20	Fluide
	0,45	11,70	Fluide
	0,40	10,20	Bon
	0,35	10,15	Bon
	0,30	10,11	Bon
	0,25	-	Peu maniable
<b>MF-D2</b>	0,40	15,1	Fluide
	0,35	12,05	Bon
	0,30	11,80	Bon
	0,20	11,50	Bon
	0,15	-	Peu maniable
<b>MG-D2</b>	0,50	12,50	Fluide
	0,45	10,50	Bon
	0,40	10,30	Bon
	0,35	10,30	Bon
	0,20	9,95	Peu maniable
<b>MF-D3</b>	0,35	13,45	Fluide
	0,30	11,90	Bon
	0,25	11,60	Bon
	0,20	10,90	Bon
	0,15	10,10	Bon
<b>MG-D3</b>	0,45	14,50	Fluide
	0,40	10,7	Bon
	0,35	10,65	Bon
	0,25	10,30	Bon
	0,20	-	Peu maniable

Dans l'ensemble le constat est le même que pour les fibres de rôniers que pour les balles de riz. Cependant, pour les balles de riz les rapports E/C sont faibles par rapport aux fibres de rônier. Cela s'explique par le traitement subir par les balles de riz avant son incorporation dans la matrice.

### **4.3 Conclusion**

Nous retenons de cette étude que l'augmentation de la quantité fibre provoque une chute considérable de l'ouvrabilité. De plus, cette étude montre que pour avoir une bonne ouvrabilité il faut un minimum de trois (3) rapport E/C pour les balles de riz quel que soit le mélange. Et, pour les fibres de rônier ce nombre baisse également avec l'augmentation des fibres dans le mélange. Il y'a respectivement trois (3) rapport pour les MF-D1 et MG-D1 et deux (2) pour les MF-D2 et MG-D2 et enfin un (1) seul rapport pour les MF-D3 et MG-D3. Ces rapports seront donc retenus pour la suite de nos travaux.

**Partie V : Interprétation des résultats concernant les composites**

## Chapitre 5 : INTERPRETATION DES RESULTATS CONCERNANT LES COMPOSITES

### 5.1 Introduction

La compatibilité des matériaux utilisés avec le ciment est d'une importance capitale. Il est aussi nécessaire de connaître les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites avant toutes recommandations. Dans cette partie du document, il sera question de présenter les différents résultats tout en mettant en exergue, les différents paramètres susceptible de les influencer. Ensuite des modèles mathématiques permettant d'optimiser selon le composite sa résistance en traction par flexion et en compression centrée en fonction du paramètre E/C seront proposés.

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus suite aux essais réalisés sur les fibres de rônier et les balles de riz (renforts) ainsi que sur le mortier de fibres de rônier et des balles de riz (composites).

### 5.2 Formulation des composites : Expression de la masse des granulats en fonction des masses de liant et d'eau

La méthode utilisé pour établir l'expression de la masse des granulats en fonction du dosage en ciment et en eau à mettre en œuvre, est basée sur l'expression du volume absolu des composites et des masses volumiques absolues des éléments constitutifs du composite.

Le volume absolu du mélange des différents constituants du composite est donné par l'expression suivante :

$$V_{\text{abs mel}} = V_{\text{abs ciment}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{abs granulats}} \quad (3.0)$$

Pour 1 m<sup>3</sup> de mélange désignons par:

- $D_i$ , le dosage  $i$  en masse du ciment,
- $E/D_i = k_e$ , le rapport massique eau/ciment,
- $\rho_{br}$ , le poids spécifique de la composition granulaire considérée, (3.1)
- $\rho_e$ , la masse volumique de l'eau,
- $\rho_c$ , le poids spécifique du ciment.
- $R$ , la masse du renfort,

Et exprimons les différentes composantes de la formule (3.0) en fonction de leur masse volumique absolue :

$$V_{\text{abs ciment}} = \frac{Di}{\rho_c}, V_{\text{abs eau}} = \frac{k_e Di}{\rho_e} \text{ et } V_{\text{abs granulats}} = \frac{R}{\rho_{br}} \quad (3.2)$$

En remplaçant (3.1) dans (3.0) et en considérant que,  $V_{\text{abs mel}} = 1\text{m}^3$  l'on obtient :

$$\frac{Di}{\rho_c} + \frac{k_e Di}{\rho_e} + \frac{R}{\rho_{br}} = 1 \quad (3.3)$$

En déduction de la relation (3.3), l'expression générale de la masse des granulats :

$$R = \frac{1 - \left( \frac{Di}{\rho_c} + \frac{k_e Di}{\rho_e} \right)}{\frac{1}{\rho_{br}}}$$

$$R = \rho_{br} \cdot \left( 1 - \frac{Di}{\rho_c} - \frac{k_e \cdot Di}{\rho_e} \right) \quad (3.4)$$

Connaissant les masses granulats, il est possible de calculer les différentes proportions des constituants entrant dans la formulation des composites. Les tableaux 5-1 à 5-6 regroupent pour l'ensemble des formulations étudiées les différentes valeurs des paramètres d'étude et la nomenclature des composites :

→ **Cas des composites fibres de rônier-ciment**

Tableau 5-1 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites fibres de rônier-ciment dosés à 400kg/m<sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes

<b>Compositions granulaires</b>	<b>C/R</b>	<b>E/C</b>	<b>Nomenclature</b>
<b>Mélange fin</b>	2,2	0,50	MF-D1-E0,5
		0,60	MF-D1-E0,6
		0,70	MF-D1-E0,7
<b>Mélange grossier</b>	1,9	0,50	MG-D1-E0,5
		0,60	MG-D1-E0,6
		0,70	MG-D1-E0,7

Tableau 5-2 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites fibres de rônier-ciment dosés à 450kg/m<sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes

<b>Compositions granulaires</b>	<b>C/R</b>	<b>E/C</b>	<b>Nomenclature</b>
<b>Mélange fin</b>	3,6	0,40	MF-D2-E0,40
		0,45	MF-D2-E0,45
		0,50	MF-D2-E0,50
<b>Mélange grossier</b>	3,2	0,40	MG-D2-E0,40
		0,45	MG-D2-E0,45
		0,50	MG-D2-E0,50

Tableau 5-3 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites fibres de rônier-ciment dosés à 500kg/m<sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes

<b>Compositions granulaires</b>	<b>C/R</b>	<b>E/C</b>	<b>Nomenclature</b>
<b>Mélange fin</b>	4,4	0,35	MF-D3-E0,35
		0,40	MF-D3-E0,40
		0,45	MF-D3-E0,45
<b>Mélange grossier</b>	4,0	0,30	MG-D3-E0,30
		0,35	MG-D3-E0,35
		0,40	MG-D3-E0,40

→ Cas des composites balles de riz – ciment

Tableau 5-4 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites balles de riz-ciment dosés à 400kg/m<sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes

<b>Compositions granulaires</b>	<b>C/R</b>	<b>E/C</b>	<b>Nomenclature</b>
<b>Mélange fin</b>	2,0	0,30	MF-D1-E0,30
		0,35	MF-D1-E0,35
		0,40	MF-D1-E0,40
<b>Mélange grossier</b>	2,2	0,35	MG-D1-E0,35
		0,40	MG-D1-E0,40
		0,45	MG-D1-E0,45

Tableau 5-5 : Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites balles de riz-ciment dosés à 450kg/m<sup>3</sup> de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes

<b>Compositions granulaires</b>	<b>C/R</b>	<b>E/C</b>	<b>Nomenclature</b>
<b>Mélange fin</b>	3,3	0,20	MF-D2-E0,20
		0,30	MF-D2-E0,30
		0,35	MF-D2-E0,35
<b>Mélange grossier</b>	3,8	0,35	MG-D2-E0,35
		0,40	MG-D2-E0,40
		0,45	MG-D2-E0,45



**Tableau 5-6 :** Valeurs des paramètres de formulation retenus pour les composites balles de riz-ciment dosés à  $500\text{kg/m}^3$  de ciment et la nomenclature des éprouvettes correspondantes

Compositions granulaires	C/R	E/C	Dénomination
Mélange fin	4,1	0,15	MF-D3-E0,15
		0,20	MF-D3-E0,20
		0,30	MF-D3-E0,30
Mélange grossier	4,6	0,25	MG-D3-E0,25
		0,30	MG-D3-E0,30
		0,40	MG-D3-E0,40

### 5.3 Etude de la compatibilité

La figure 5-1 ci-dessous présente les courbes d'hydratation de la pâte pure de ciment ainsi que celle du mélange où ont été ajoutées les balles de riz et les fibres de rônier. La quantité de chaleur produite lors de l'hydratation du ciment d'un mélange équivaut à l'aire sous la courbe d'hydratation de ce mélange.

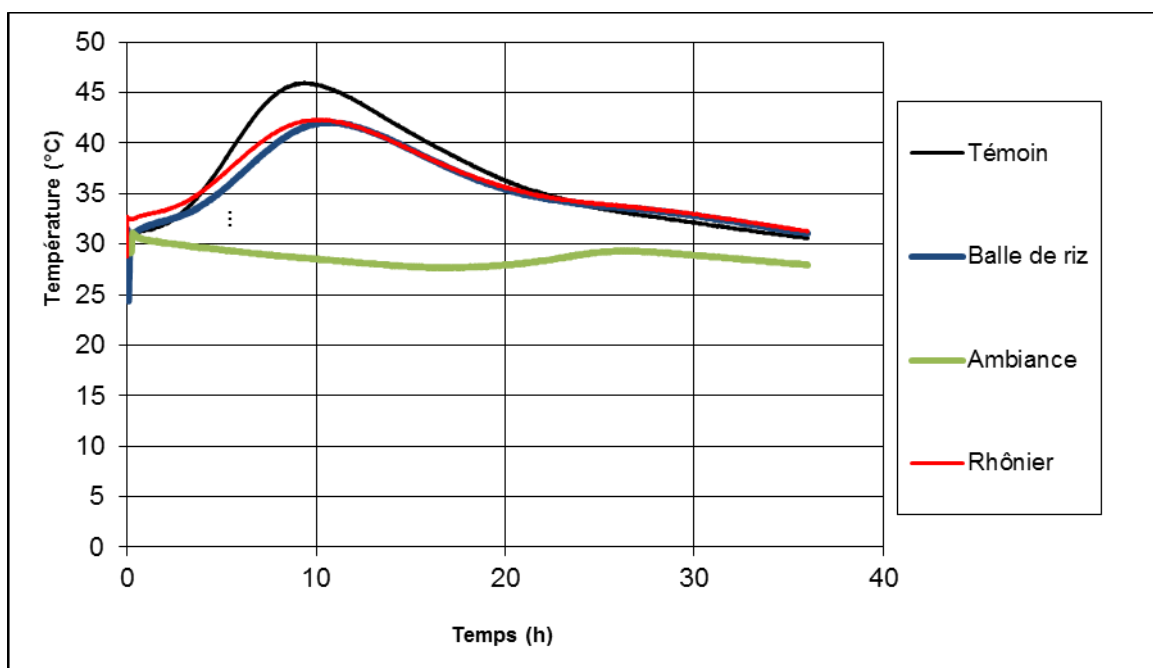


Figure 5-1 : Courbes d'hydratation du ciment dans le témoin et en présence des fibres de rônier et des balles de riz

Une analyse des courbes d'hydratation permet d'identifier trois zones délimitées.

Dans la première zone, qui part de zéro à cinq heures, la vitesse d'hydratation du ciment dans le mélange contenant les fibres ou les balles de riz est plus élevée que celle du témoin.

Dans la seconde zone comprise entre cinq heures et vingt-trois heures, la vitesse d'hydratation du témoin est supérieure à celle des bétons fibres. Enfin la troisième zone qui part de vingt-trois heures à trente-six heures, la tendance est identique au 1er cas.

Ces variations, loin de créer une controverse quant à l'influence de la biomasse sur l'hydratation du ciment, ne fait que confirmer l'inhibition décrite par Hachmi (**Hachmi et al., 1990**).

La vitesse élevée observée dans la première zone peut être attribuée à la quantité d'eau du mélange ciment-fibres supérieure à celle du témoin et aussi à la température du milieu. En effet, le supplément d'eau favorise les réactions d'hydratation des phases du ciment avant qu'elles ne soient freinées par les constituants chimiques des fibres de rônier ou des balles de riz. Cette zone informe en outre sur le temps nécessaire pour déclencher l'extraction des substances inhibitrices de la biomasse dans la matrice cimentaire.

Dans la seconde zone, les deux courbes d'hydratation évoluent de la même manière et l'effet inhibiteur de la présence de la biomasse est clairement révélé. En outre, la quantité de chaleur dégagée atteint son pic à une durée 10 heures au niveau du mélange témoin et du mélange fibres de rônier-ciment et de 10,28 heures au niveau du mélange balles de riz-ciment.

La légère augmentation de la cinétique d'hydratation du ciment dans les mélanges de fibres de rônier et des balles de riz au niveau de la troisième zone traduit une plus grande présence des phases n'ayant pas réagi dans les deux premières zones.

Cette évolution des courbes confirme donc que le mélange témoin a été mieux hydraté que ceux incluant les fibres de rônier et les balles de riz.

Bien que les fibres de rônier et les balles de riz réduisent le degré d'hydratation du ciment (réduction de la température maximale), elles ne semblent avoir aucun effet considérable sur le temps nécessaire pour atteindre la température maximale. Le tableau ci-dessous rassemble les différentes caractéristiques de l'hydratation du ciment dans les trois mélanges : la température maximale  $T_m$  le temps  $t_m$  mis pour atteindre cette température, l'énergie d'hydratation  $A$ , et le coefficient d'hydratation  $CA$ .

Le tableau 5.7 ci-dessous présente les coefficients d'hydratation des composites formulés.

**Tableau 5-7 :** Caractéristiques de l'hydratation des mélanges

Type de mélange	T <sub>m</sub> (°C)	t <sub>m</sub> (heures)	A (kCal)	CA(%)
Témoin (Ciment + eau)	46,0	9,38	0,245	100
Ciment + eau + fibres de rônier	42,4	9,80	0,218	89,11
Ciment + eau + balles de riz	42,1	10,28	0,201	82,04

De l'analyse du tableau et considérant les échelles de comparaison développées par **Hachmi (Hachmi et al., 1990)**, il ressort que les balles de riz et les fibres de rônier sont compatibles avec le ciment, car les CA sont supérieures à 68 %.

## 5.4 Présentation générale des résultats physiques, mécaniques et thermiques

### 5.4.1 Microstructure des composites

#### → Cas des composites balles de riz-ciment

Les figures (L) désignent la vue microscopique en plan et les figures (T) la vue microscopique latérale des différents composites.

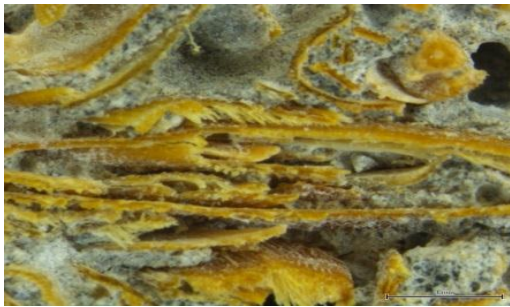


(L)



(T)

Figure 5-2: Microstructure des composites balles de riz-ciment pour un mélange fin, un dosage 400 kg/m<sup>3</sup> et un E/C=0,3



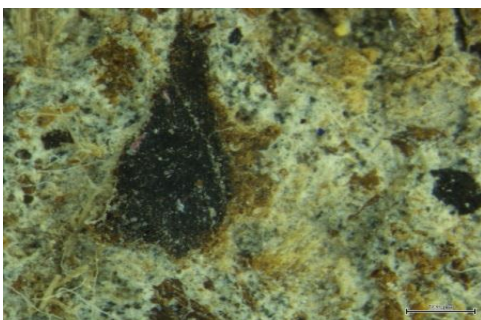
(L)



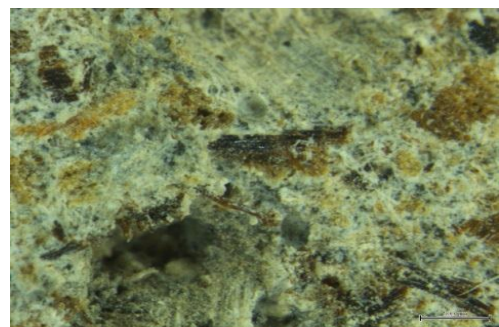
(T)

Figure 5-3: Microstructure des composites balles de riz-ciment pour un mélange grossier, un dosage  $400 \text{ kg/m}^3$  et un  $E/C=0,4$

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment



(L)



(T)

Figure 5-4 : Microstructure des composites fibres de rônier-ciment pour un mélange fin, un dosage  $400 \text{ kg/m}^3$  et un  $E/C=0,6$



(L)



(T)

Figure 5-5: Microstructure des composites fibres de rônier-ciment pour un mélange grossier, un dosage  $400 \text{ kg/m}^3$  et un  $E/C=0,5$

Deux parties essentielles sont généralement remarquées : une zone de couleur blanche qui représente ici dans les deux composites le liant (matrice cimentaire) et une deuxième de couleur jaune (renfort balle de riz) pour les composites de balles de riz-ciment et de couleur noire (renfort fibres de rônier) pour les composites fibres de rônier-ciment.

Les figures (L) montrent clairement que les balles de riz ont été broyées confirmant ainsi la composition granulaire de nos matériaux. Ces figures montrent aussi que le mélange du liant avec le renfort n'est pas très homogène car des concentrations de couleur sont constatées à certains endroits ce qui favorise des zones de faiblesse dans les composites.

Quant aux figures (T) l'on peut observer une dominance de couleur blanche ce qui signifie la forte présence de liant dans les parois latérales des composites. Ce phénomène se justifie par le fait que le liant lors du moulage est drainé par l'eau vers les parois ce qui amène à optimiser le rapport E/C et à ne pas procéder à une vibration lors de la mise en œuvre des éprouvettes afin d'éviter au mieux ce phénomène. Cette remarque est faite beaucoup plus sur les composites balles de riz-ciment.

## 5.4.2 Propriétés physiques des composites

### → Composite balles de riz–ciment

**Tableau 5-8** : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 400 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résultats physiques		
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Taux d'humidité (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
Mélange fin	2,0	0,30	MF-D1-E0,30	14,13	1,08	42,00
		0,35	MF-D1-E0,35	13,88	1,08	47,00
		0,40	MF-D1-E0,40	14,36	1,04	52,00
Mélange grossier	2,2	0,35	MG-D1-E0,35	14,05	1,17	48,00
		0,40	MG-D1-E0,40	11,72	1,27	43,00
		0,45	MG-D1-E0,45	13,04	1,13	49,00

**Tableau 5-9** : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 450 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résultats physiques		
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Taux d'humidité (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
Mélange fin	3,3	0,20	MF-D2-E0,20	13,18	1,27	31,00
		0,30	MF-D2-E0,30	12,51	1,31	30,00
		0,35	MF-D2-E0,35	12,34	1,21	32,00
Mélange grossier	3,8	0,35	MG-D2-E0,35	12,96	1,27	49,00
		0,40	MG-D2-E0,40	13,23	1,29	42,00
		0,45	MG-D2-E0,45	14,19	1,15	51,00

**Tableau 5-10** : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 500 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résultats physiques		
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Taux d'humidité (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
Mélange fin	4,1	0,15	MF-D3-E0,15	11,00	1,49	22,00
		0,20	MF-D3-E0,20	12,34	1,58	22,00
		0,30	MF-D3-E0,20	13,85	1,36	30,00
Mélange grossier	4,6	0,25	MG-D3-E0,25	14,57	1,45	32,00
		0,35	MG-D3-E0,35	12,75	1,32	32,00
		0,40	MG-D3-E0,40	12,66	1,23	38,00

## → Cas des composites fibres de rônier–ciment

**Tableau 5-11** : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 400 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résultats physiques		
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Taux d'humidité (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
Mélange fin	2,1	0,50	MF-D1-E0,5	12,75	1,18	42,00
		0,60	MF-D1-E0,6	13,34	1,08	42,00
		0,70	MF-D1-E0,7	13,44	0,98	45,00
Mélange grossier	1,9	0,50	MG-D1-E0,5	17,69	1,19	39,00
		0,60	MG-D1-E0,6	9,81	1,06	42,00
		0,70	MG-D1-E0,7	29,90	1,03	58,00

**Tableau 5-12** : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 450 kg/m<sup>3</sup>

Données de base			Résultats physiques			
Granulométries	Rapport	Rapport	Nomenclature	Taux	Masse	Absorption
	C/R	E/C		d'humidité	volumique	
				(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
Mélange fin	3,6	0,40	MF-D2-E0,40	11,65	1,42	15,00
		0,45	MF-D2-E0,45	11,15	1,41	26,00
		0,50	MF-D2-E0,50	12,70	1,11	34,00
Mélange grossier	3,2	0,40	MG-D2-E0,40	6,25	1,38	26,00
		0,45	MG-D2-E0,45	16,60	1,31	27,00
		0,50	MG-D2-E0,50	11,50	1,26	31,00

**Tableau 5-13** : Synthèse des caractéristiques physiques pour les composites dosés à 500 kg/m<sup>3</sup>

Données de base			Résultats physiques			
Granulométries	Rapport	Rapport	Nomenclature	Taux	Masse	Absorption
	C/R	E/C		d'humidité	volumique	
				(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
Mélange fin	4,4	0,35	MF-D3-E0,35	10,72	1,42	22,00
		0,40	MF-D3-E0,40	11,58	1,38	24,00
		0,45	MF-D3-E0,45	11,22	1,29	27,00
Mélange grossier	4,0	0,30	MG-D3-E0,30	10,54	1,47	20,00
		0,35	MG-D3-E0,35	11,52	1,44	24,00
		0,40	MG-D3-E0,40	11,70	1,38	25,00



### 5.4.3 Propriétés mécaniques des composites

#### → Cas des composites balles de riz–ciment

**Tableau 5-14** : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 400 kg/m<sup>3</sup>

Granulométries	Données de base			Résistances mécaniques (MPa)	
	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Résistances en traction	Résistances en compression
Mélange fin	2,0	0,30	MF-D1-E0,30	4,87 ± 0,38	5,68 ± 0,16
		0,35	MF-D1-E0,35	4,00 ± 0,22	5,13 ± 0,16
		0,40	MF-D1-E0,40	4,13 ± 0,53	4,94 ± 0,36
Mélange grossier	2,2	0,35	MG-D1-E0,35	2,38 ± 0,22	1,93 ± 0,12
		0,40	MG-D1-E0,40	3,63 ± 0,22	3,83 ± 0,14
		0,45	MG-D1-E0,45	1,75 ± 0,22	1,48 ± 0,14

De façon générale, les résistances mécaniques baissent avec l'augmentation du rapport E/C. Cette chute de résistance serait liée pour **Tuan, (2018)** par la grande absorption d'eau des fibres qui engendre des modifications de l'interface fibres/matrice. Cette zone de contact serait donc une zone de faiblesse pouvant réduire la capacité des composites à supporter des contraintes. Ce constat est observé pour tous les tableaux ci-dessous.

**Tableau 5-15** : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 450 kg/m<sup>3</sup>

Granulométries	Données de base			Résistances mécaniques (MPa)	
	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Résistances en traction	Résistances en compression
Mélange fin	3,3	0,20	MF-D2-E0,20	7,38 ± 0,65	10,29 ± 0,21
		0,30	MF-D2-E0,30	8,00 ± 0,22	10,11 ± 0,77
		0,35	MF-D2-E0,35	7,88 ± 0,57	9,77 ± 0,84
Mélange grossier	3,8	0,35	MG-D2-E0,35	6,75 ± 0,65	7,16 ± 0,47
		0,40	MG-D2-E0,40	7,50 ± 0,65	8,11 ± 0,53
		0,45	MG-D2-E0,45	6,63 ± 0,87	6,69 ± 0,27

**Tableau 5-16** : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 500 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résistances mécaniques (MPa)	
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Résistances en traction	Résistances en compression
Mélange fin	4,1	0,15	MF-D3-E0,15	9,00 ± 0,00	13,15 ± 1,42
		0,20	MF-D3-E0,20	10,25 ± 0,94	15,00 ± 1,16
		0,30	MF-D3-E0,20	7,69 ± 0,27	10,99 ± 0,67
Mélange grossier	4,6	0,25	MG-D3-E0,25	12,25 ± 0,57	15,63 ± 1,02
		0,35	MG-D3-E0,35	8,25 ± 0,00	9,21 ± 0,39
		0,40	MG-D3-E0,40	6,50 ± 0,57	7,73 ± 0,48

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment

**Tableau 5-17** : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 400 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résistances mécaniques (MPa)	
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Résistances en traction	Résistances en compression
Mélange fin	2,1	0,50	MF-D1-E0,5	4,63±0,22	6,18±0,72
		0,60	MF-D1-E0,6	5,50±0,43	6,84±0,34
		0,70	MF-D1-E0,7	4,00±0,22	4,82±0,30
Mélange grossier	1,9	0,50	MG-D1-E0,5	5,75±0,43	9,16±0,61
		0,60	MG-D1-E0,6	4,88±0,58	6,81±0,45
		0,70	MG-D1-E0,7	3,13±0,22	5,40±0,68

**Tableau 5-18** : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 450 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résistances mécaniques (MPa)	
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Résistances en traction	Résistances en compression
Mélange fin	3,6	0,40	MF-D2-E0,40	7,75±0,57	10,01±0,39
		0,45	MF-D2-E0,45	6,50±0,43	9,70±0,48
		0,50	MF-D2-E0,50	3,63±0,57	13,45±1,03
Mélange grossier	3,2	0,40	MG-D2-E0,40	6,75±0,38	11,97±0,28
		0,45	MG-D2-E0,45	6,19±0,80	12,08±0,32
		0,50	MG-D2-E0,50	4,63±0,57	9,08±0,44

**Tableau 5-19** : Synthèse des caractéristiques mécaniques pour les composites dosés à 500 kg/m<sup>3</sup>

Données de base				Résistances mécaniques (MPa)	
Granulométries	Rapport C/R	Rapport E/C	Nomenclature	Résistances en traction	Résistances en compression
Mélange fin	4,4	0,35	MF-D3-E0,35	7,63±0,22	15,52±0,72
		0,40	MF-D3-E0,40	6,50±0,43	14,09±0,34
		0,45	MF-D3-E0,45	5,50±0,22	12,23±0,30
Mélange grossier	4,0	0,30	MG-D3-E0,30	8,38±0,43	14,43±0,61
		0,35	MG-D3-E0,35	7,75±0,57	16,26±0,45
		0,40	MG-D3-E0,40	7,25±0,22	15,13±0,68

### 5.4.4 Formulations optimales

Les tableaux 5-20 à 5-23 présentent le récapitulatif des caractéristiques physiques et mécaniques des formulations optimales obtenues en priorisant les résistances en compression d'une part et les résistances en traction par flexion d'autre part.

→ **Cas des composites fibres de rônier-ciment**

**Tableau 5-20 :** Résistances en compression priorisées des composites fibres de rônier – ciment.

Composition granulaire	Dosage	E/C	Nomenclature	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Taux d'absorption(%)	Traction (MPa)	Compression (MPa)
Mélange fin	D <sub>1</sub>	0,60	MF-D1-E0,60	1,08	42,00	5,50±0,43	6,84±0,34
	D <sub>2</sub>	0,40	MF-D2-E0,40	1,42	14,00	7,75±0,57	10,01±0,39
	D <sub>3</sub>	0,35	MF-D3-E0,35	1,42	22,00	7,63±0,22	15,52±0,72
Mélange grossier	D <sub>1</sub>	0,50	MG-D1-E0,50	1,19	39,00	5,75±0,43	9,16±0,61
	D <sub>2</sub>	0,40	MG-D2-E0,40	1,38	25,00	6,75±0,38	11,97±0,28
	D <sub>3</sub>	0,35	MG-D3-E0,35	1,47	20,00	7,75±0,57	16,26±0,45

**Tableau 5-21:** Résistances en traction priorisées des composites fibres de rônier–ciment.

Composition granulaire	Dosage	E/C	Nomenclature	Masse Volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Taux d'absorption(%)	Traction (MPa)	Compression (MPa)
Mélange fin	D <sub>1</sub>	0,60	MF-D1-E0,60	1,08	42,00	5,50±0,43	6,84±0,34
	D <sub>2</sub>	0,40	MF-D2-E0,40	1,42	15,00	7,75±0,57	10,01±0,39
	D <sub>3</sub>	0,35	MF-D3-E0,35	1,42	22,00	7,63±0,22	15,52±0,72
Mélange grossier	D <sub>1</sub>	0,50	MG-D1-E0,50	1,19	39,00	5,75±0,43	9,16±0,61
	D <sub>2</sub>	0,40	MG-D2-E0,40	1,38	26,00	6,75±0,38	11,97±0,28
	D <sub>3</sub>	0,30	MG-D3-E0,30	1,47	20,00	8,38±0,43	14,43±0,61

→ **Cas des composites balles de riz-ciment**

**Tableau 5-22 : Résistances en compression priorisées des composites balles de riz-ciment.**

Composition granulaire	Dosage	E/C	Nomenclature	Masse Volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Taux d'absorption(%)	Traction par (MPa)	Compression (MPa)
Mélange fin	D <sub>1</sub>	0,30	MF-D1-E0,30	1,08	42,00	4,89±0,38	5,68±0,16
	D <sub>2</sub>	0,20	MF-D2-E0,20	1,27	31,00	7,38±0,65	10,29±0,21
	D <sub>3</sub>	0,20	MF-D3-E0,20	1,58	22,00	10,25±0,94	15,00±1,16
Mélange grossier	D <sub>1</sub>	0,40	MG-D1-E0,40	1,27	43,00	3,63±0,22	3,83±0,14
	D <sub>2</sub>	0,40	MG-D2-E0,40	1,29	42,00	7,50±0,65	8,11±0,53
	D <sub>3</sub>	0,25	MG-D3-E0,25	1,45	32,00	12,25±0,57	15,63±1,02

**Tableau 5-23 : Résistances en traction priorisées des composites balles de riz-ciment.**

Composition granulaire	Dosage	E/C	Nomenclature	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Taux d'absorption(%)	Traction (MPa)	Compression (MPa)
Mélange fin	D <sub>1</sub>	0,30	MF-D1-E0,30	1,08	42,00	4,89±0,38	5,68±0,16
	D <sub>2</sub>	0,30	MF-D2-E0,30	1,31	30,00	8,00±0,22	10,11±0,77
	D <sub>3</sub>	0,20	MF-D3-E0,20	1,58	22,00	10,25±0,94	15,00±1,16
Mélange grossier	D <sub>1</sub>	0,40	MG-D1-E0,40	1,27	43,00	3,63±0,22	3,83±0,14
	D <sub>2</sub>	0,40	MG-D2-E0,40	1,29	42,00	7,50±0,65	8,11±0,53
	D <sub>3</sub>	0,25	MG-D3-E0,25	1,45	32,00	12,25±0,57	15,63±1,02

### **5.4.5 Propriétés thermiques des composites**

Une fois les formulations optimales déterminées, des éprouvettes de dimensions 5x3.5x3 cm<sup>3</sup> ont été confectionnées en vue de la caractérisation thermique des deux composites. Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux 5-24 et 5-25.

**Tableau 5-24 : Récapitulatif des résultats thermiques pour les composites fibres de rônier-ciment**

→ **Cas des composites fibres de rônier-ciment**

Composition granulaire	Dosage	C/R	E/C	Nomenclature	Effusivité thermique (E)		Conductivité thermique ( $\lambda$ )		Diffusivité thermique ( $a \times 10^{-7}$ )	
					$W. s^{0,5}. m^{-2}. K^{-1}$		$W. m^{-1}. K^{-1}$		$m^2. s^{-1}$	
Mélange fin	D <sub>1</sub>	2,1	0,60	MF-D1-E0,60	795,77	<b>700,65±63,41</b>	0,237	<b>0,270±0,022</b>	0,887	<b>1,59±0,467</b>
					675,61		0,275		1,66	
					630,56		0,297		2,22	
	D <sub>2</sub>	3,6	0,40	MF-D2-E0,40	805,44	<b>832,09±31,12</b>	0,325	<b>0,340±0,010</b>	1,63	<b>1,67±0,075</b>
					878,77		0,352		1,60	
					812,06		0,343		1,78	
	D <sub>3</sub>	4,4	0,35	MF-D3-E0,35	854,40	<b>867,80±8,94</b>	0,386	<b>0,393±0,007</b>	2,04	<b>2,06±0,068</b>
					871,37		0,405		2,16	
					877,65		0,390		1,97	
Mélange grossier	D <sub>1</sub>	1,9	0,50	MG-D1-E0,50	745,42	<b>755,38±8,45</b>	0,30	<b>0,283±0,010</b>	1,62	<b>1,42±0,136</b>
					768,06		0,272		1,25	
					752,67		0,279		1,37	
	D <sub>2</sub>	3,2	0,40	MG-D2-E0,40	743,60	<b>748,40±9,60</b>	0,373	<b>0,340±0,021</b>	2,52	<b>2,09±0,286</b>
					760,41		0,318		1,75	
					741,20		0,331		1,99	
D <sub>3</sub>	4,0	0,35	MG-D3-E0,35	819,57	<b>811,24±5,55</b>	0,426	<b>0,415±0,007</b>	2,70	<b>2,62±0,073</b>	
				810,06		0,406		2,51		
				804,10		0,414		2,65		

**Tableau 5-25 : Récapitulatif des résultats thermiques pour les composites balles de riz-ciment**

→ Cas des composites balles de riz-ciment

Composition granulaire	Dosage	C/R	E/C	Nomenclature	Effusivité thermique (E) $W.s^{0,5}.m^{-2}.K^{-1}$	Conductivité thermique ( $\lambda$ ) $W.m^{-1}.K^{-1}$	Diffusivité thermique ( $a \times 10^{-7}$ ) $m^2.s^{-1}$		
Mélange fin	D <sub>1</sub>	2,0	0,30	MF-D1-E0,30	681,10	<b>0,233</b>	1,17		
					<b>622,11±36,32</b>			<b>0,236±0,003</b>	<b>1,35±0,152</b>
					592,62				
	667,60	0,240	1,29						
	D <sub>2</sub>	3,3	0,30	MF-D2-E0,30	744,97	<b>0,271</b>	1,20		
					<b>751,74±24,20</b>			<b>0,273±0,002</b>	<b>1,32±0,082</b>
782,20					0,276				
728,06	0,272	1,40							
D <sub>3</sub>	4,1	0,20	MF-D3-E0,20	727,44	<b>0,367</b>	1,74			
				<b>796,09±55,12</b>			<b>0,354±0,013</b>	<b>2,00±0,172</b>	
				878,77					0,335
782,06	0,362	2,14							
Mélange grossier	D <sub>1</sub>	2,2	0,40	MG-D1-E0,40	575,41	<b>0,225</b>	1,53		
					<b>571,80±13,20</b>			<b>0,226±0,002</b>	<b>1,57±0,0521</b>
					552				
	588,01	0,230	1,53						
	D <sub>2</sub>	3,8	0,40	MG-D2-E0,40	712,01	<b>0,221</b>	0,842		
					<b>729,90±21,21</b>			<b>0,226±0,011</b>	<b>0,965±0,0118</b>
761,72					0,215				
715,97	0,242	1,14							
D <sub>3</sub>	4,6	0,25	MG-D3-E0,25	752,92	<b>0,294</b>	1,52			
				<b>737,34±22,04</b>			<b>0,288±0,010</b>	<b>1,54±0,161</b>	
				754,82					0,273
704,28	0,297	1,78							



## 5.5 Etude des propriétés physiques des composites

Les propriétés physiques étudiées sur les composites sont la masse volumique, l'absorption d'eau.

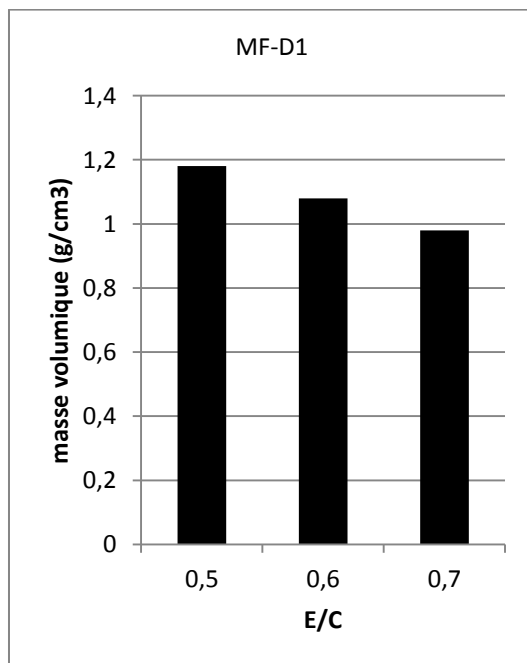
### 5.5.1 La masse volumique

Les mesures de masse volumique sont effectuées sur toutes les éprouvettes issues de toutes les formulations confectionnées. Théoriquement, la masse volumique varie avec les paramètres d'étude.

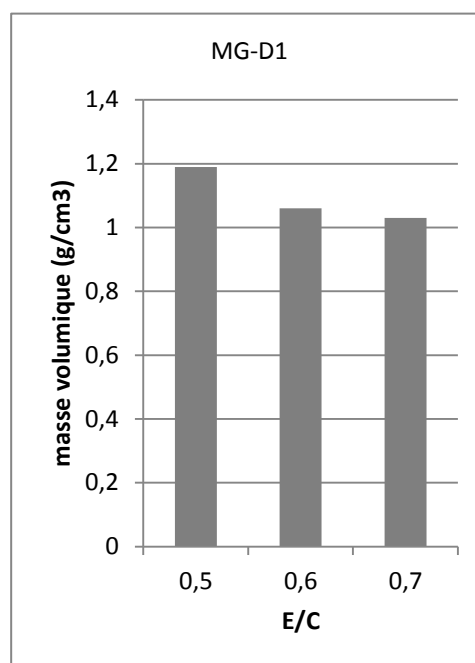
#### 5.5.1.1 Influence du rapport E/C sur la masse volumique

L'évolution des masses volumiques en fonction du rapport E/C est suivie sur tous les types de dosages en liant et les deux compositions granulaires effectuées. Les figures ci-dessous illustrent les variations observées.

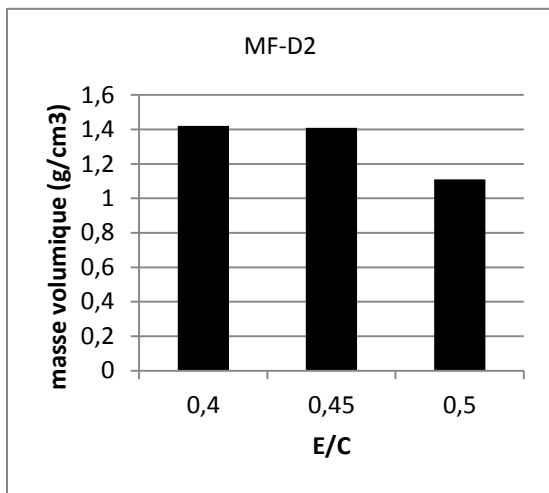
→ Cas des composites fibres de rônier-ciment



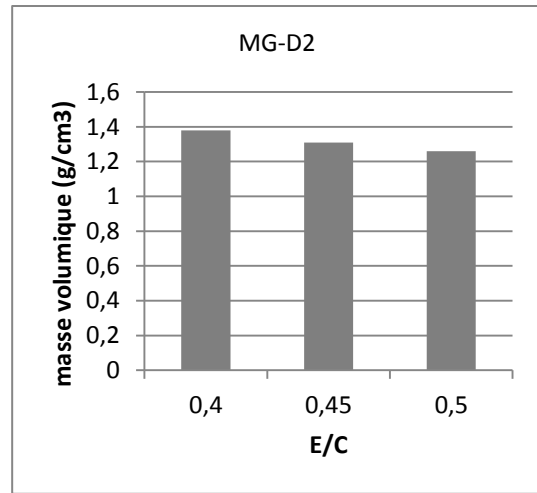
(a)



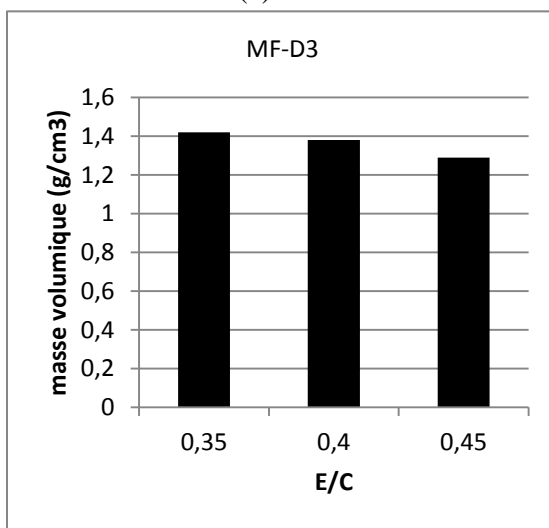
(b)



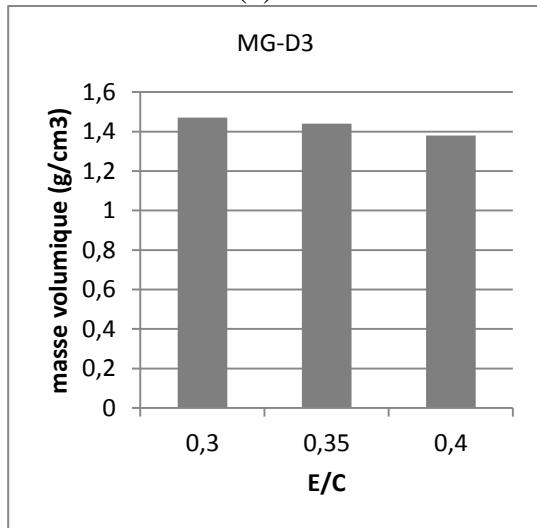
(c)



(d)



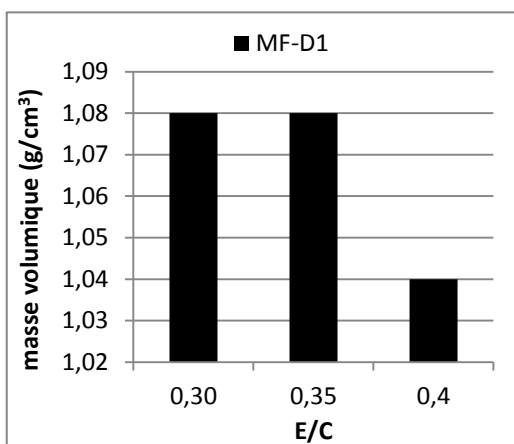
(e)



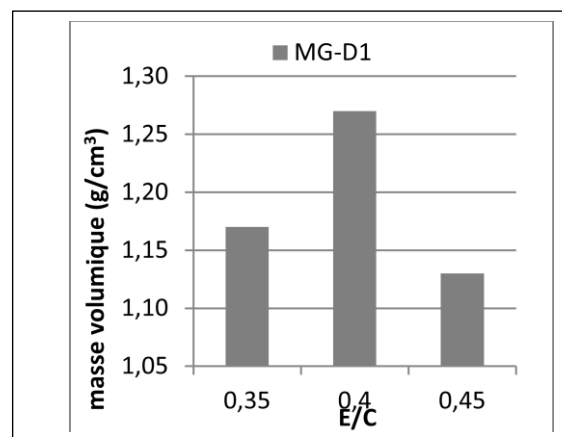
(f)

**Figure 5-6 : Variation de la masse volumique en fonction du rapport E/C, et du dosage pour les deux compositions granulaires**

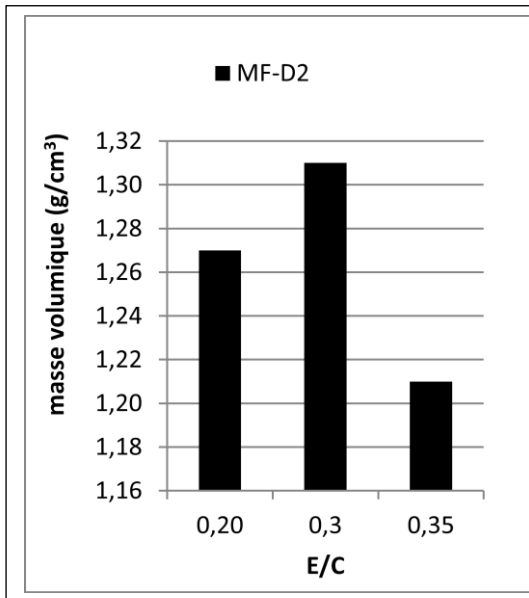
→ Cas des composites balles de riz-ciment



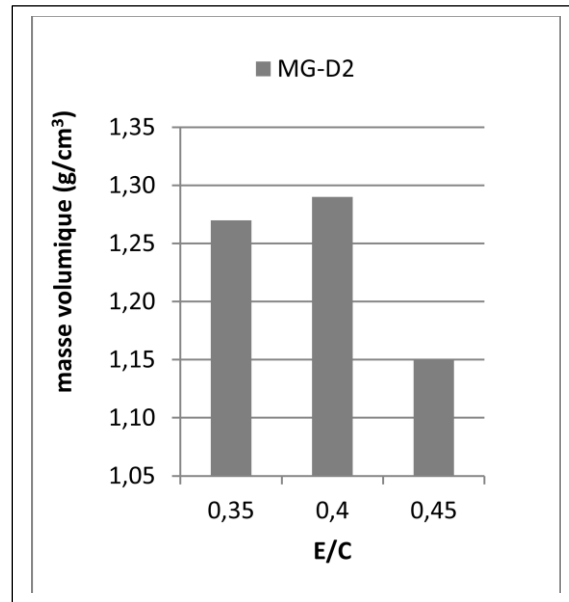
(a)



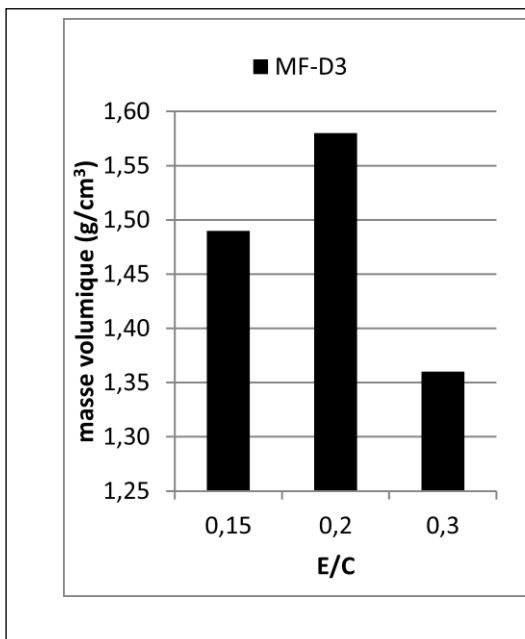
(b)



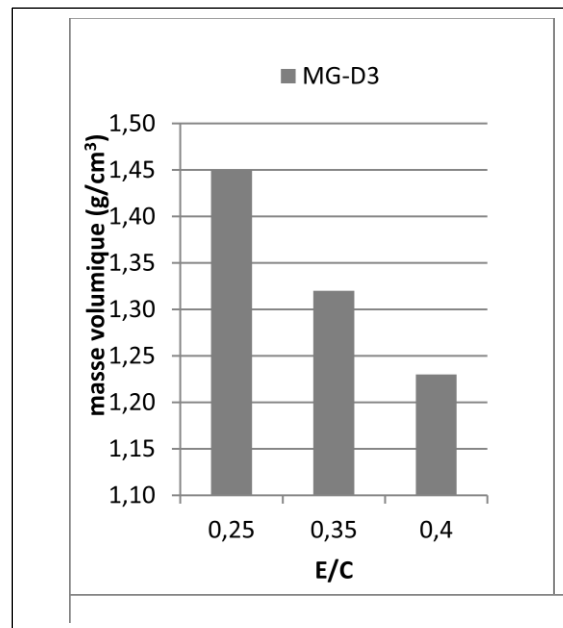
(c)



(d)



(e)



(f)

**Figure 5-7 : Variation de la masse volumique en fonction du rapport E/C, et du dosage pour les deux compositions granulaires**

Les figures 5-6 et 5-7 montrent différentes variations de la masse volumique en fonction du rapport E/C. Une première analyse de ces figures, a permis de les classer en deux catégories: la première catégorie regroupant les figures pour lesquelles les masses volumiques décroissent avec une augmentation du rapport E/C et la seconde catégorie regroupant les figures présentant une variation en élevée.

Cette diversité de l'évolution de la densité des composites en présence de l'eau n'est pas le résultat d'une action directe de l'eau sur les différents constituants; elle s'explique plutôt par l'effet de l'eau sur la consistance du mélange à l'état frais. En effet, l'augmentation de la quantité d'eau tend à rendre le mélange plus fluide, réduisant la compacité optimale lors de la mise en œuvre des éprouvettes. Par conséquent, la densité du matériau final tend à baisser. De même, un manque d'eau a pour conséquence de réduire la compacité du mélange. En effet, il est remarqué qu'en dessous d'une certaine valeur, la maniabilité est faible et la répartition des fibres de rônier ou des granulats de balles de riz dans la matrice n'est plus homogène : par endroit, un amas de biomasse empêchant un compactage optimal du mélange pour la mise en œuvre est observé.

### 5.5.1.2 Evolution de la masse des composites : étude de la désorption

Afin d'observer le phénomène de désorption dans les composites, la masse des éprouvettes a été régulièrement suivie pendant 14 jours de conservation à l'air du laboratoire. A chaque masse  $m(t)$ , la perte de masse correspondante est donnée par :

$$\Delta m = \frac{m(0) - m(t)}{m(0)} \quad (3.5)$$

→  $m(0)$  est la masse initiale de l'éprouvette;

→  $m(t)$  est la masse de l'éprouvette à un instant  $t$ .

Les figures 4-8 et 3-9 présentent l'évolution de la perte de masse dans le temps pour quelques formulations des deux composites.

→ Cas du composite balles de riz - ciment

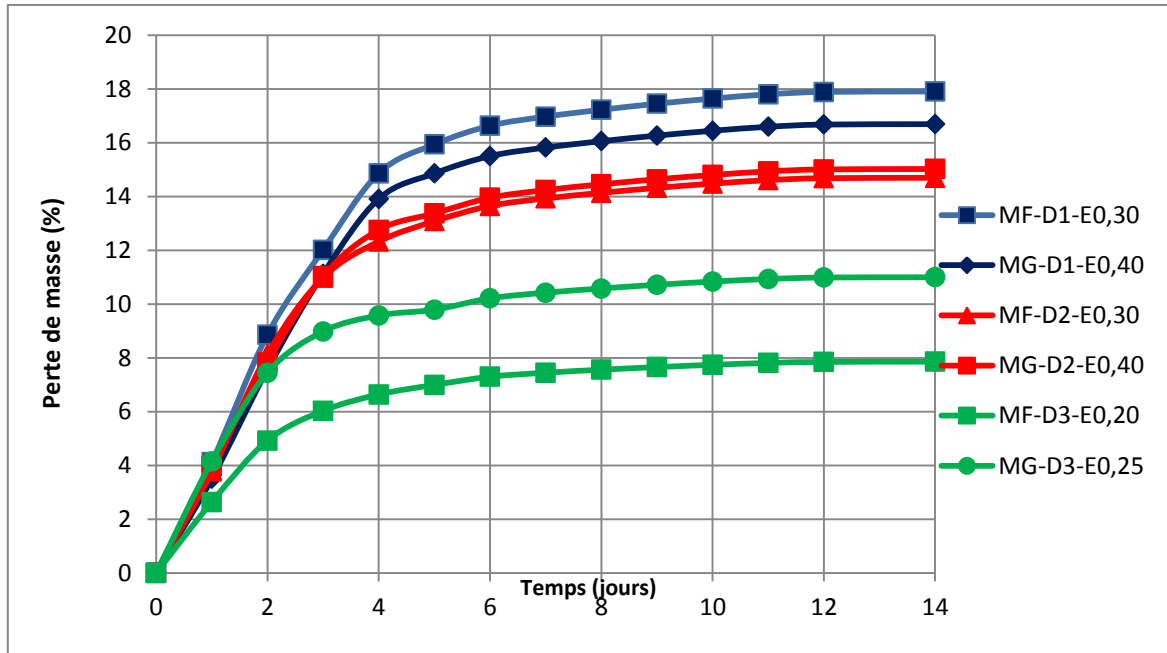


Figure 5-8 : Courbes cinétique de perte de masse des éprouvettes des composites balles de riz - ciment

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment

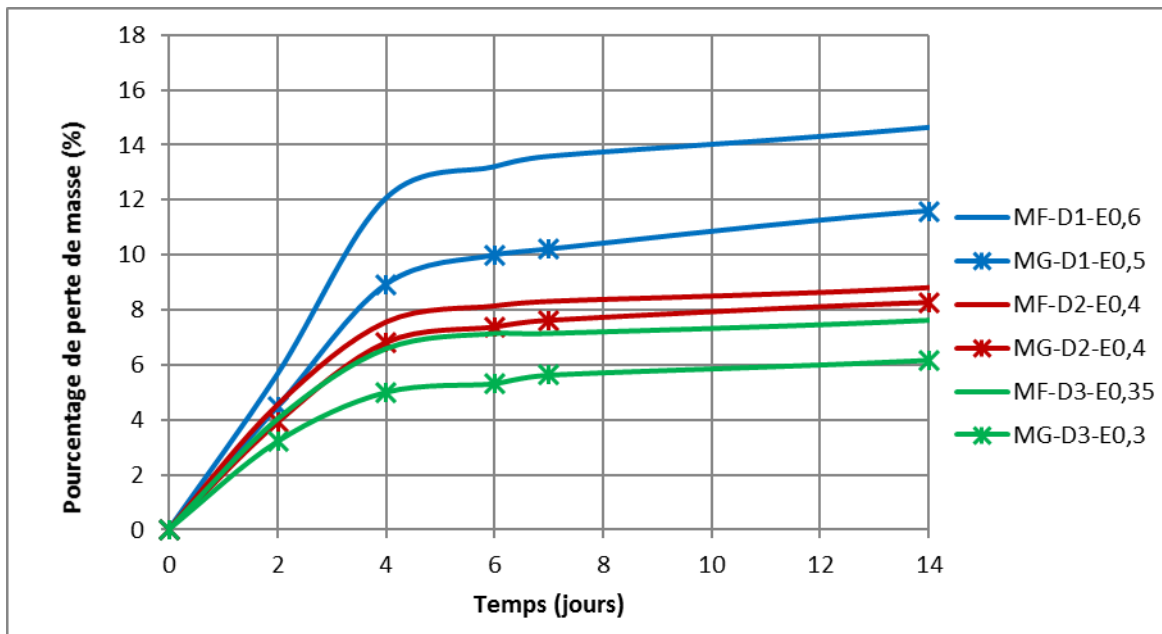


Figure 5-9 : Courbes cinétique de perte de masse des éprouvettes des composites fibres de rônier - ciment

Les courbes de perte de masse ainsi tracées prouvent que la cinétique de perte de masse ne dépend essentiellement que de la quantité d'eau ayant servi à la confection des éprouvettes. Aussi, quel que soit le rapport E/C considéré, la cinétique de désorption des composites se présente de la même manière. Dans les quatre premiers jours après le démoulage, la vitesse de désorption est élevée : l'eau en excès s'évapore rapidement. Ensuite dans une seconde phase s'étendant de quatre à quatorze jours après le démoulage, la perte de masse continue toujours, mais à une vitesse de plus en plus faible jusqu'à la stabilisation.

Globalement, les variations de masse constatées évoluent de 7 % à 17 % de la masse initiale des éprouvettes pour les deux composites; ces valeurs inférieures à la variation de 10 à 33 % enregistrée sur les bétons de chanvre (Nguyen., 2010) s'expliquent par le faible pouvoir d'absorption des fibres de rônier et des balles de riz pré-mouillées.

## **5.5.2 L'absorption d'eau**

De même que la densité, le comportement hygroscopique des composites réalisés à partir des différentes formulations est suivi. L'absorption d'eau est une propriété importante du matériau, dépendante elle aussi des paramètres de formulation.

### **5.5.2.1 La cinétique d'absorption d'eau des composites**

La courbe cinétique d'absorption montre la variation du taux d'absorption d'eau du composite suivant le temps. Elle renseigne aussi sur la vitesse d'absorption d'eau du composite. Avec les différentes mesures prises, les courbes cinétiques d'absorption ont été tracées.

Pour une meilleure lisibilité, chaque graphique ne présente que les données relevées sur les composites correspondants à un dosage en ciment à la fois.

→ Cas des composites balles de riz-ciment

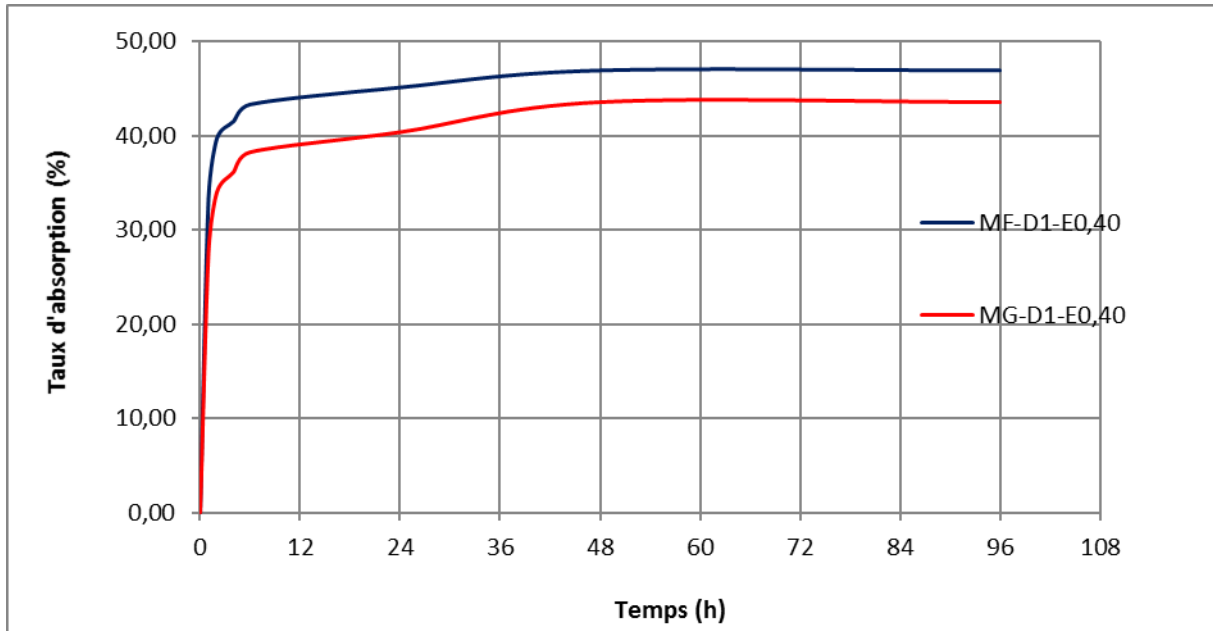


Figure 5-10 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes de composite pour le dosage D<sub>1</sub>

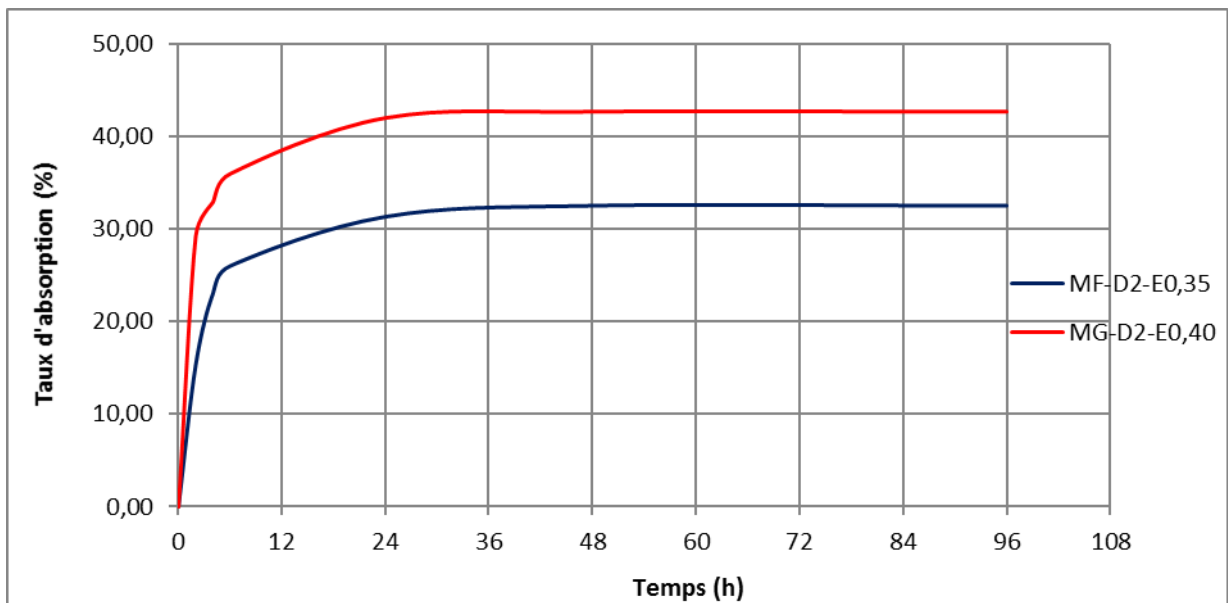
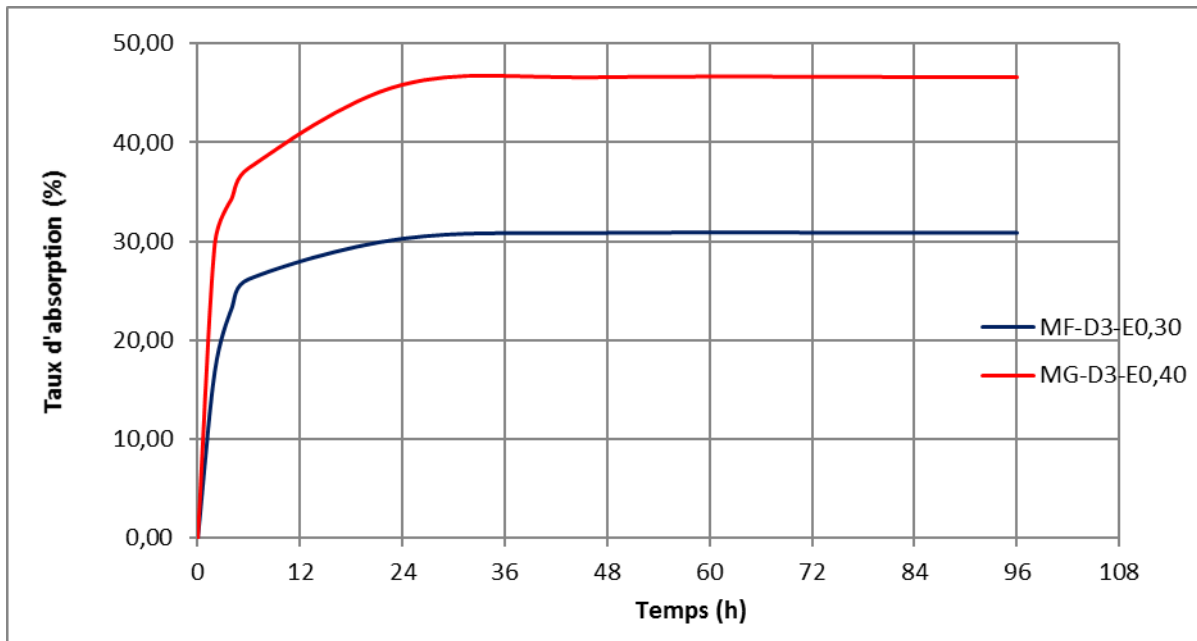
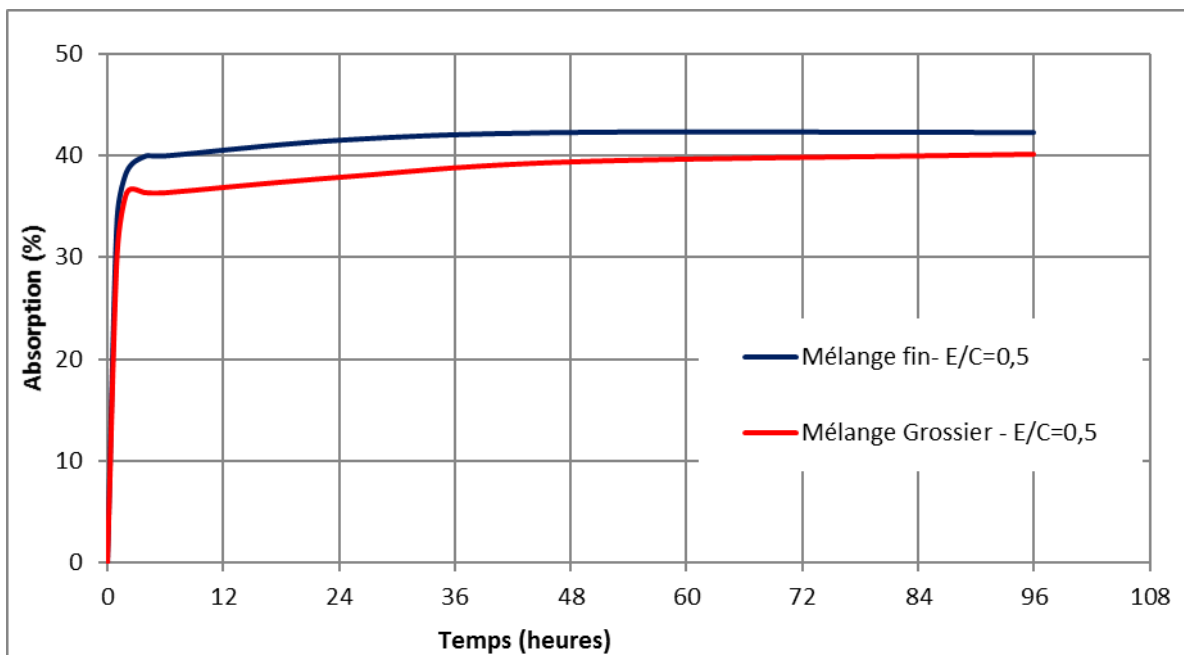


Figure 5-11 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite pour le dosage D<sub>2</sub>



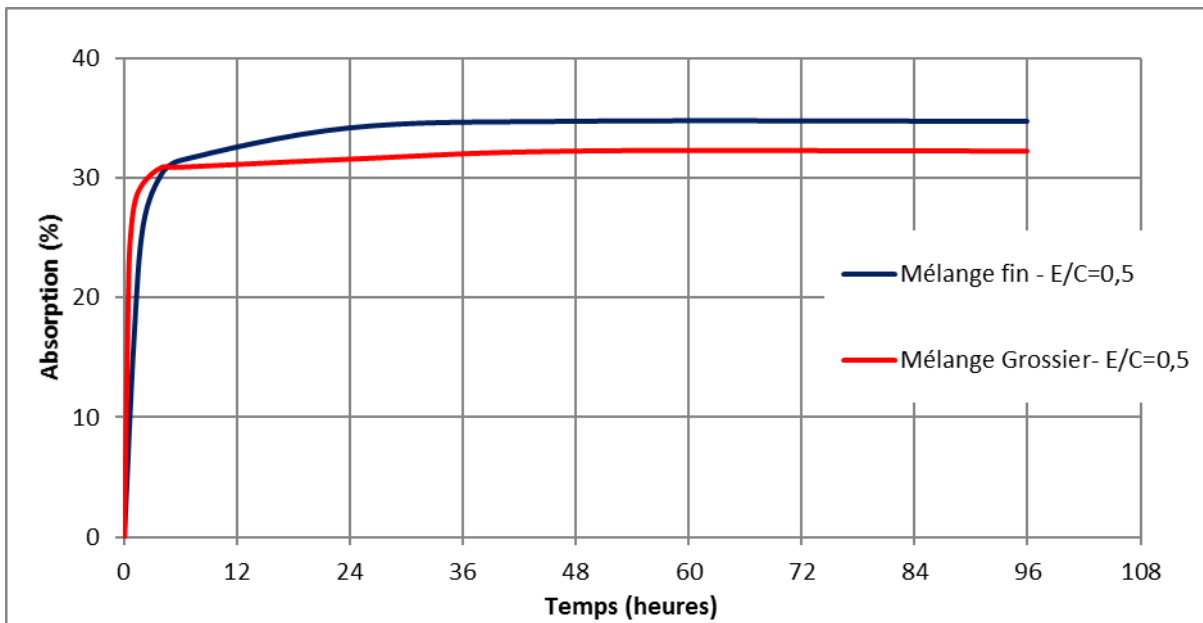
**Figure 5-12 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite pour le dosage D<sub>3</sub>**

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment

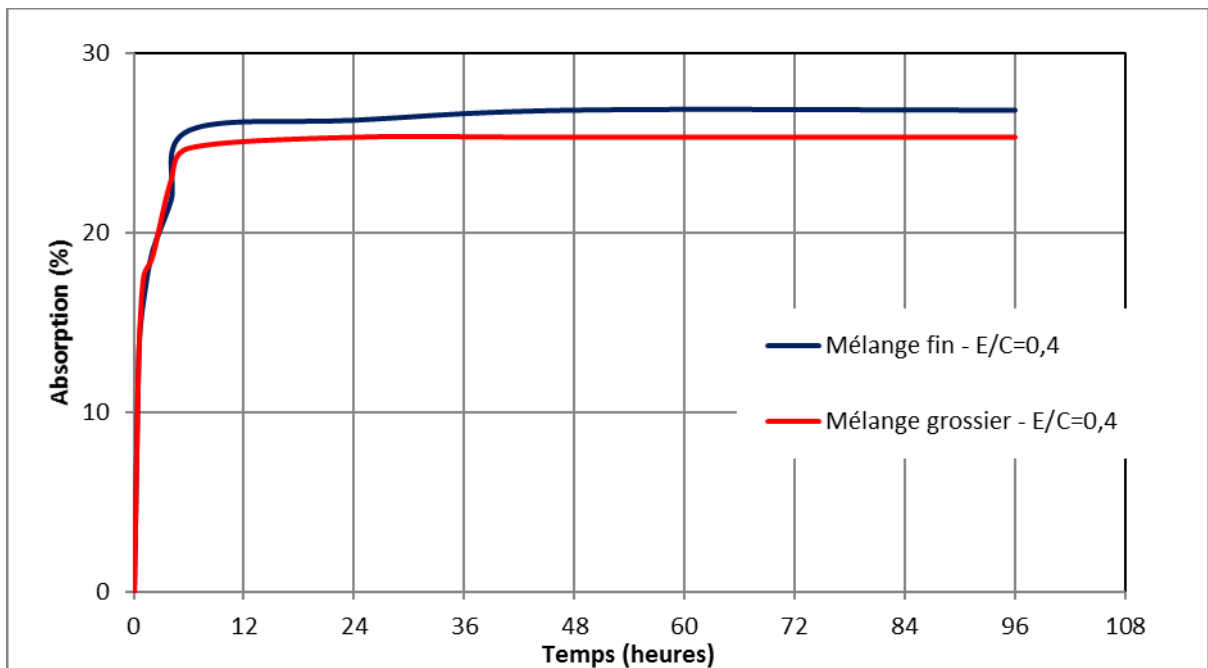


**Figure 5-13 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite pour le dosage D<sub>1</sub>**





**Figure 5-14 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite pour le dosage D<sub>2</sub>**



**Figure 5-15 : Cinétique d'absorption d'eau des éprouvettes du composite pour le dosage D<sub>3</sub>**

Les courbes présentent des allures identiques. Il en découle que les composites fibres de rônier-ciment et balles de riz-ciment, indépendamment des ratios utilisés pour leur formulation captent l'eau de la même manière lorsqu'ils sont en présence d'un milieu humide. L'évolution du taux d'absorption dans le temps permet d'identifier trois zones caractéristiques des propriétés hydrophiles des matériaux.

La première zone s'étend sur les quatre premières heures après la mise à l'eau pour le composite de balles de riz et les six premières heures après la mise à l'eau pour le composite de fibres de rônier. Le taux d'absorption augmente très rapidement et atteint plus de 83 % de l'absorption totale et les courbes se superposent au départ l'une à l'autre. La cinétique d'absorption qui y est observée ne peut donc être attribuée aux éléments entrant dans la formulation. Rappelons en un premier lieu que les éprouvettes avant leur immersion sont séchées à l'étuve à une température de 105°C; le retrait de l'eau au cours du séchage a forcément causé des poches de vides et des microfissures s'ajoutant à ceux déjà laissés par le phénomène de la désorption. L'absorption assimilée observée donc dans cette zone à une occupation des vides par l'eau. Cette hypothèse est par ailleurs confirmée par les remontées de bulles d'air qui s'observent les premières heures après immersion des éprouvettes. L'étendue de cette zone constitue un bon indicateur de comparaison de la porosité des différentes formulations; il suffit de considérer que les mélanges les plus poreux (réseau de vides plus étendus et plus connectés) atteignent plus rapidement leur absorption maximale dans cette zone que les mélanges les moins poreux.

La seconde zone quant à elle s'étend des six premières heures (pour les composites fibres de rônier-ciment) ou des quatre premières heures (pour le composite balles de riz-ciment) jusqu'aux vingt-quatre suivantes. La vitesse d'absorption diminue énormément, mais ne s'annule pas cependant. L'activité hydrophile des composites est activée dans cette zone à la capacité d'absorption des granulats (biomasse). Aussi, le taux d'absorption atteint au bout de cette phase est largement représentatif de l'absorption à saturation du composite (environ 93 à 99 % du taux d'absorption totale). Pour la suite des analyses, il sera nécessaire d'exploiter les valeurs obtenues sur l'absorption après 24 heures d'immersion.

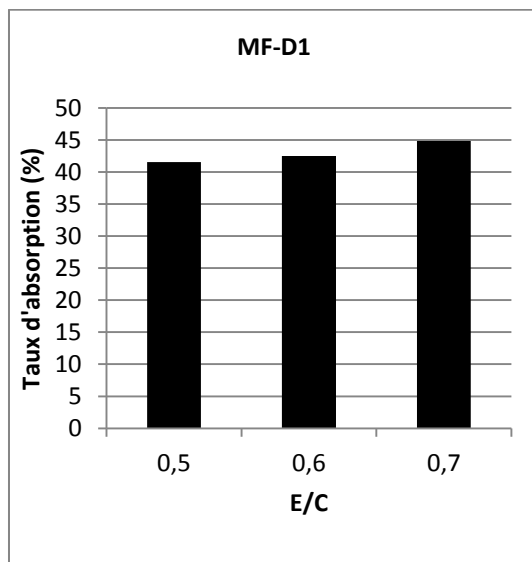
La troisième zone, presque horizontale, est caractérisée par une stabilisation de l'absorption d'eau. Dans cette phase, les échanges entre le milieu de conservation et le composite sont amoindris. L'absorption au bout de cette phase constitue le pouvoir hydrique du matériau.

Observées simultanément, les courbes de cinétique d'absorption, bien que présentant les mêmes allures, fournissent des grandeurs différentes du taux d'absorption des composites. Les paramètres de formulation ont donc un impact sur les caractéristiques hydriques des matériaux.

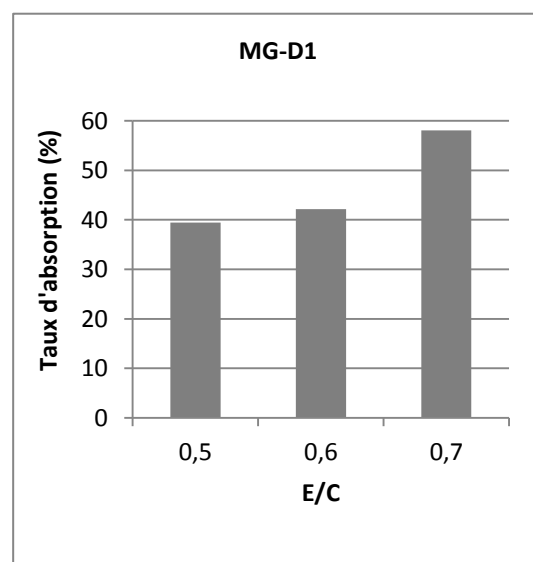
### 5.5.2.2 Influence du rapport E/C sur le taux d'absorption d'eau

L'influence du rapport E/C sur le taux d'absorption après 24 heures a été observée sur toutes les formulations. Les capacités d'absorption indiquées dans les tableaux récapitulatifs, ont permis de construire les graphiques suivants :

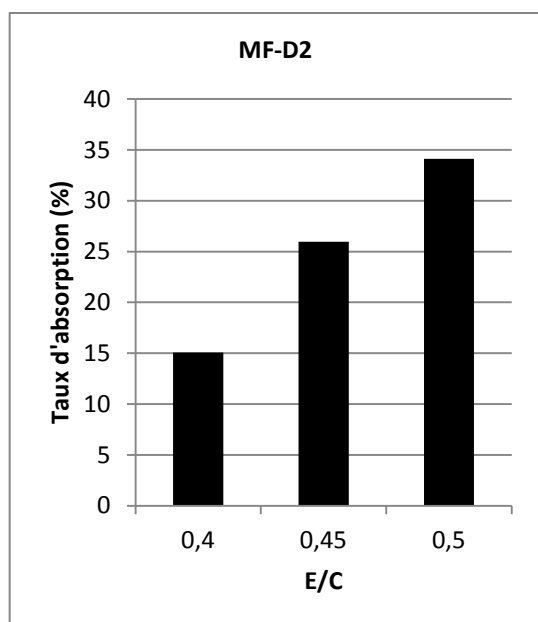
→ Cas des composites fibres de rônier-ciment



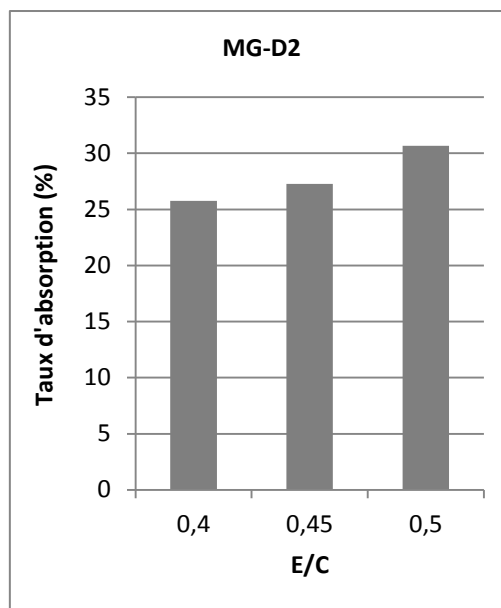
(a)



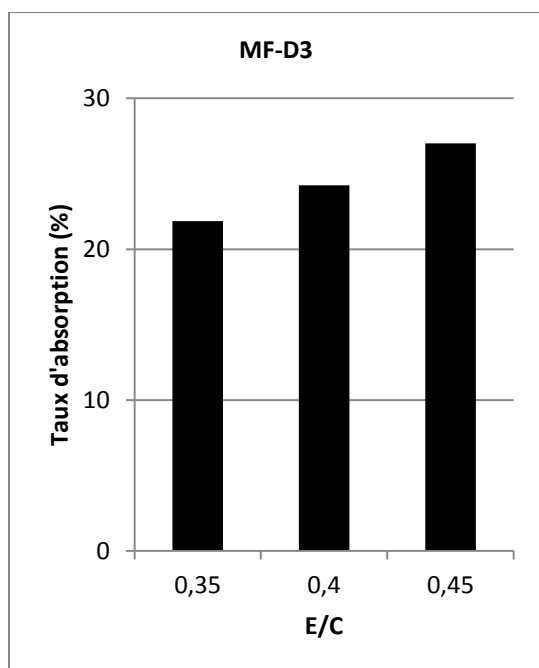
(b)



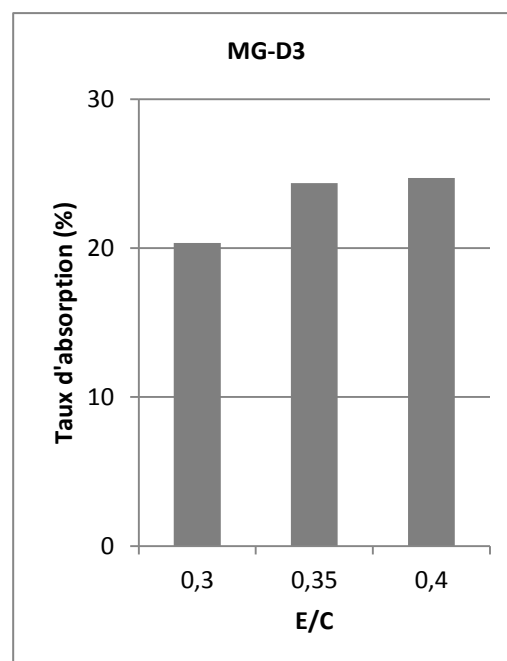
(c)



(d)



(e)



(f)

**Figure 5-16: Variation du taux d'absorption à 24 heures en fonction du rapport E/C pour les dosages D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, et D<sub>3</sub>**

→ Cas des composites balles de riz-ciment

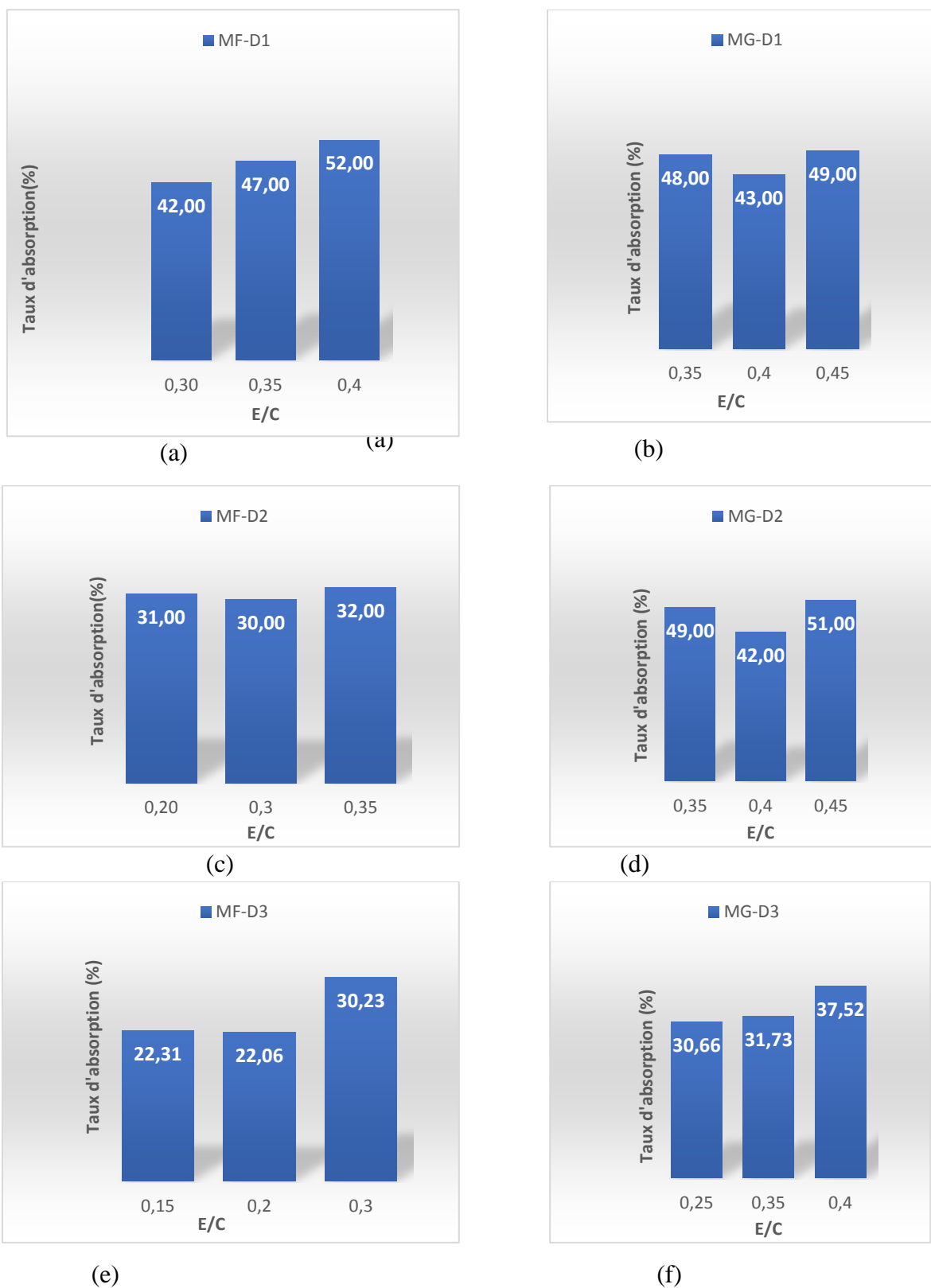


Figure 5-17 : Variation du taux d'absorption à 24 heures en fonction du rapport E/C pour les dosages D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, et D<sub>3</sub>

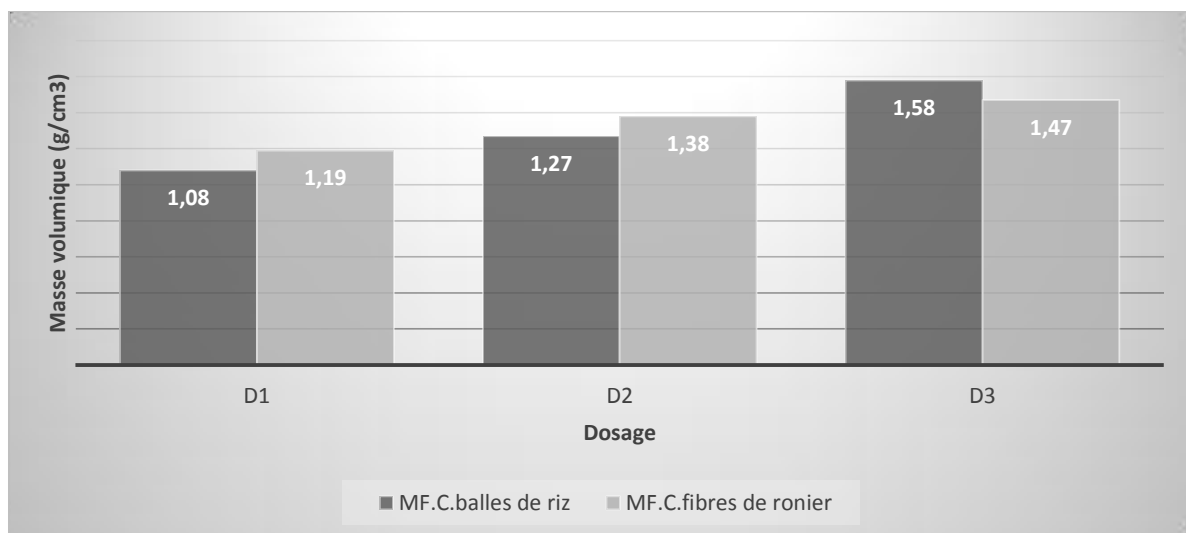
Les histogrammes de la figure 5-16, l'absorption est une fonction croissante de la quantité d'eau ayant servi à la confection des éprouvettes tandis que celles de la figure 5-17 ne présentent pas la même forme. Il existe un rapport E/C correspondant à un taux d'absorption minimal. Les deux autres rapports correspondent à une teneur en eau soit en excès soit en manque dans le mélange.

Ces observations viennent à nouveau illustrer le rôle joué par le retrait de l'eau de gâchage dans la formation des vides d'air dans le composite. En effet, d'après l'analyse de la cinétique d'absorption, les vides dans le matériau seraient la principale source des taux d'absorption enregistrés sur le composite. Dans la même logique, il est évident que, le pouvoir hydrique des éprouvettes confectionnées à partir des plus forts rapports Eau/Ciment soit supérieur à celui des éprouvettes dont la formulation intègre des rapports plus faibles, le retrait d'une plus grande quantité d'eau créant plus de poches de vides.

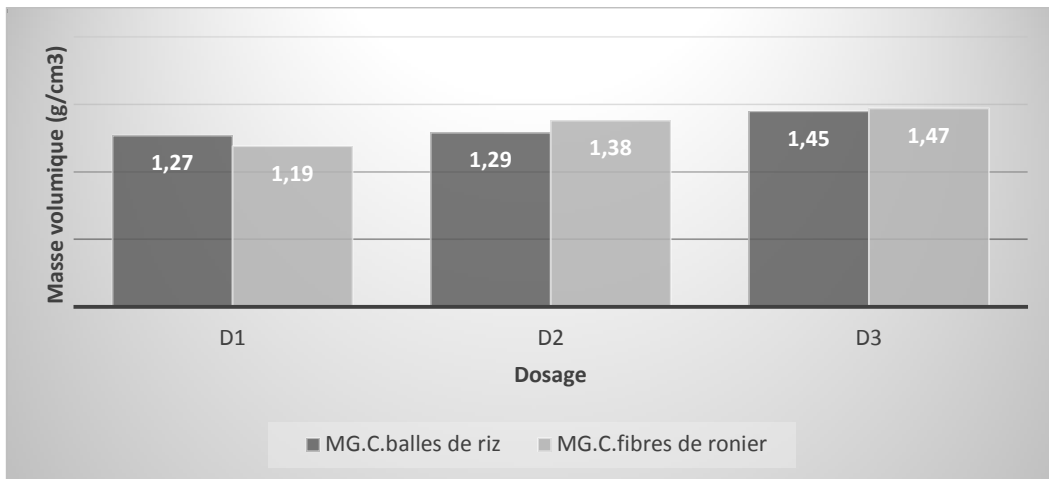
### 5.5.3 Comparaison des résultats physiques des deux composites

Dans ce paragraphe, une comparaison des deux composites est effectuée en considérant les résultats physiques issus des formulations optimales déterminées.

#### → Masses volumiques



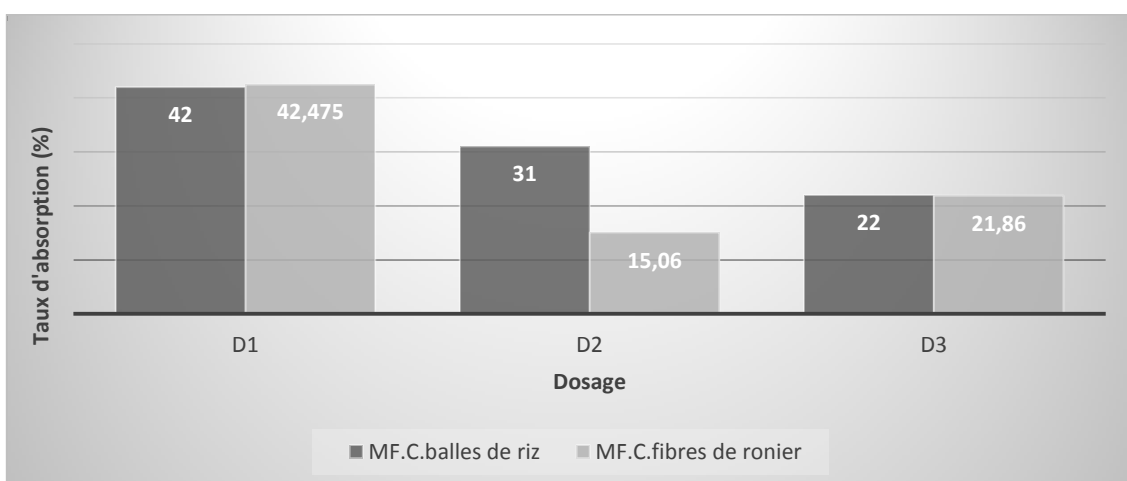
**Figure 5-18 : Masse volumique en fonction du dosage pour le mélange fin des deux composites.**



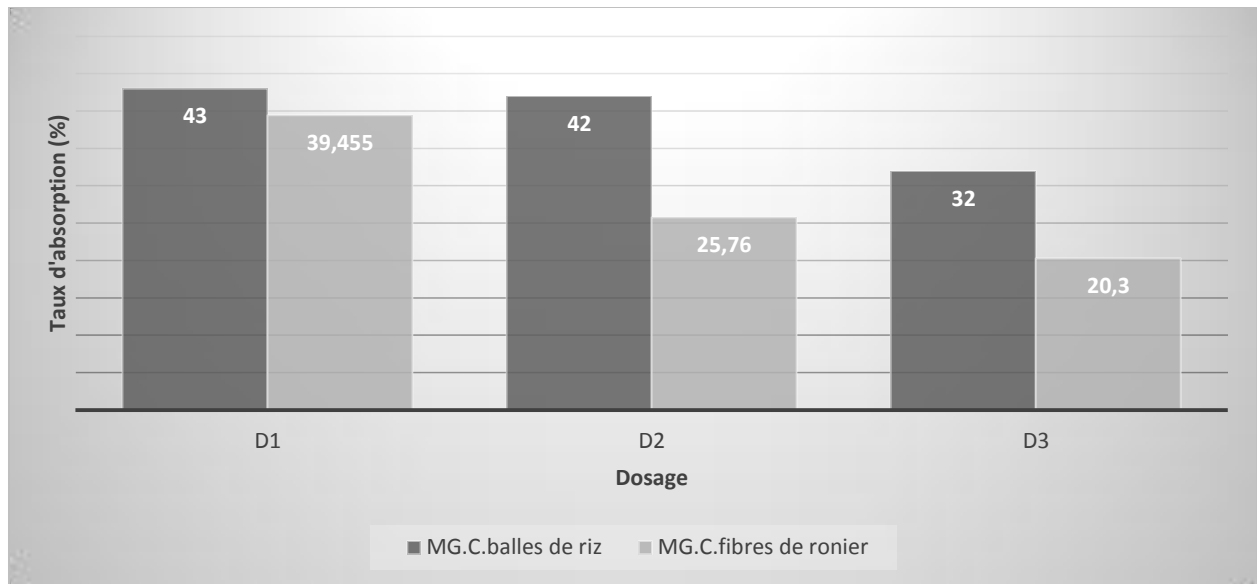
**Figure 5-19 : Masse volumique en fonction du dosage pour le mélange grossier des deux composites.**

En général, en considérant le mélange fin des granulats des biomasses, les composites fibres de rônier-ciment est plus dense que le composite balles de riz-ciment. Tandis que lorsque les granulats utilisés pour la confection des éprouvettes proviennent du mélange grossier, les composites balles de riz-ciment présente une densité légèrement importante que les composites fibres de rônier-ciment. Ces constatations s’expliquent aisément par la teneur en ciment entrant dans la réalisation des différentes gâchées. En effet, d’après les résultats issus de la formulation des composites, le mélange fin est considéré, si les rapports C/R trouvés pour les composites fibres de rônier-ciment sont élevés par rapport à ceux du composite balles de riz-ciment. Tandis que pour le mélange grossier, c’est le contraire.

→ **Capacité d’absorption d’eau**



**Figure 5-20 : Taux d’absorption en fonction du dosage pour le mélange fin des deux composites**



**Figure 5-21 : Taux d’absorption en fonction du dosage pour le mélange grossier des deux composites.**

Après analyse des figures 5-20 et 5-21, l’on peut retenir que les composites balles de riz-ciment ont un pouvoir hydrophile plus important que les composites fibres de rônier-ciment. Cela s’explique par le fait que la capacité d’absorption d’un composite dépend fondamentalement de celle de ses composants, ce qui confirme à nouveau le caractère très hygroscopique des balles de riz.

## 5.6 Etude des propriétés mécaniques des composites

Dans ce paragraphe, l’attention est portée sur le comportement des composites sous chargement d’une part et l’évolution des résistances en fonction des différents paramètres de formulation. Les éprouvettes sont toutes sollicitées en flexion trois points et en compression.

### 5.6.1 Etude du comportement mécanique

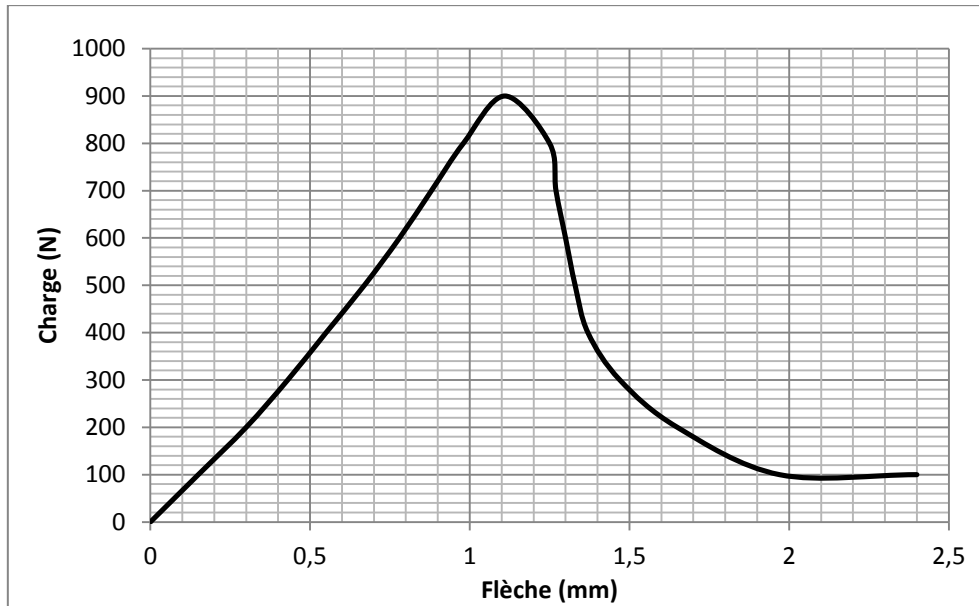
Les comportements mécaniques du composite en flexion trois points et en compression sont étudiés séparément.

#### 5.6.1.1 Comportement mécanique en flexion

Observer le comportement mécanique du composite revient à suivre sa déformation sous différentes charges. Les figures 5-22 et 5-23 ci-dessous présentent l’évolution des charges appliquées en fonction du déplacement enregistré au droit de la traverse au centre de l’éprouvette sollicitée en flexion trois points.

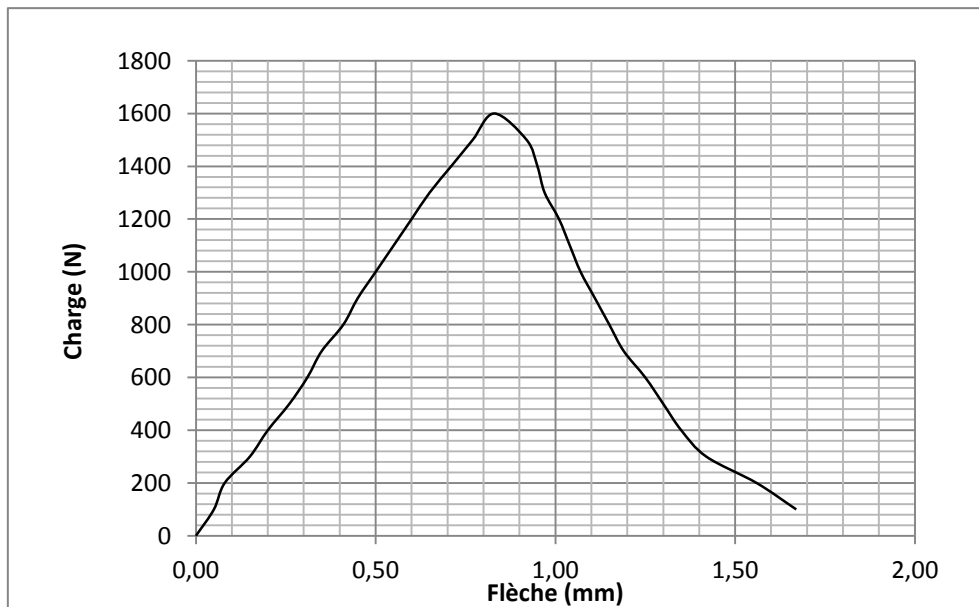


→ Cas des composites fibres de rônier-ciment



**Figure 5-22 : Courbe de comportement typique en flexion des composites fibres de rônier- ciment**

→ Cas des composites balles de riz-ciment



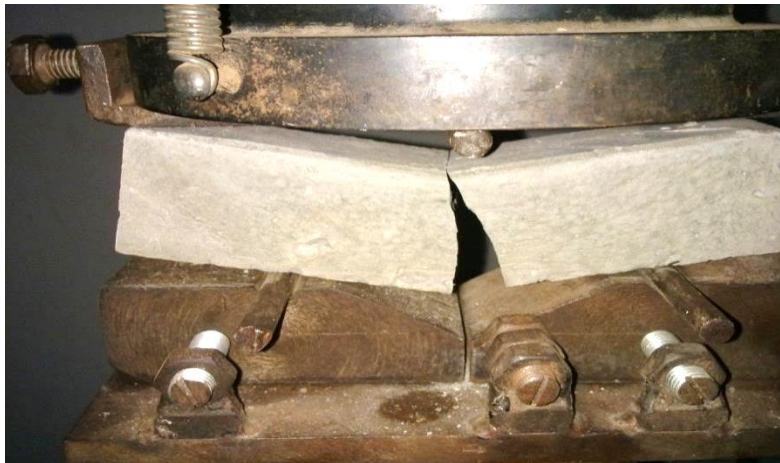
**Figure 5-23 : Courbe de comportement typique en flexion des composites balles de riz-ciment**

Cette courbe ne s'identifie pas exactement à celle décrivant les trois phases du comportement en flexion du composite ciment/fibres de chanvre à 28 jours d'âge de Sedan

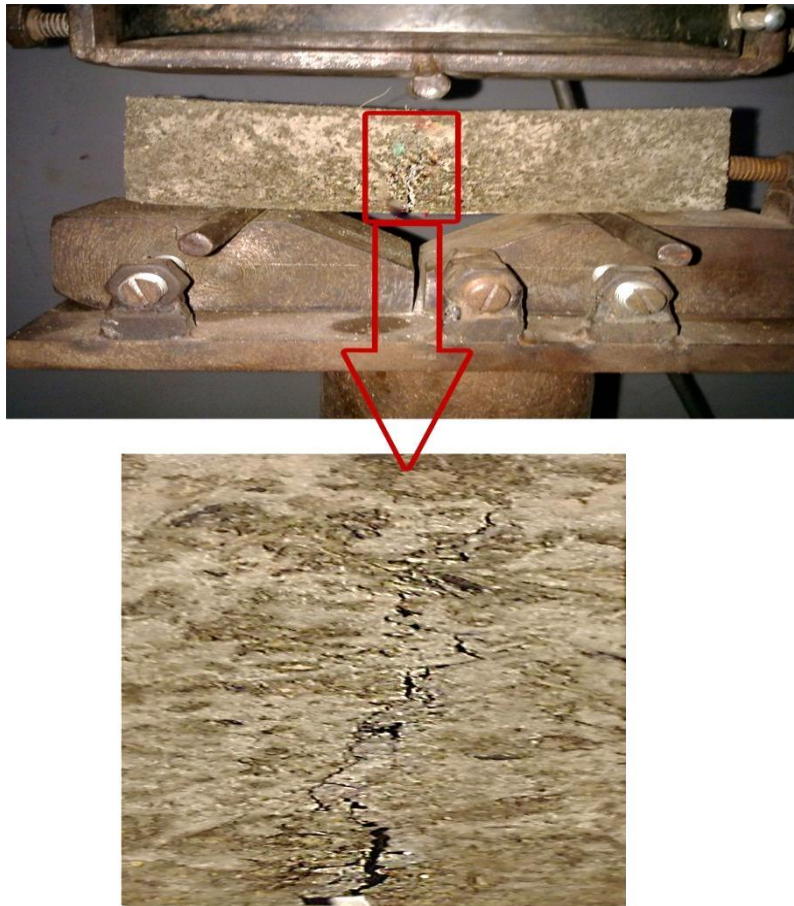
(Sedan, 2007). Le comportement présenté par les composites fibres de rônier-ciment et balles de riz-ciment peut être subdivisé en deux phases.

La première phase, caractérisée par une variation quasi-linéaire, précède le pic de la courbe. Dans cette phase, les efforts appliqués au composite sont repris par la matrice avant d'être transmis aux fibres de rônier ou aux balles de riz. Cette reprise de charge traduit par ailleurs une bonne adhésion à l'interface ciment– biomasse.

La seconde phase, post-pic, est caractérisée par une chute contrôlée et progressive de la charge alors que la flèche continue d'augmenter. Cette zone illustre le gain de ductilité du composite par rapport à la matrice pure. En effet, la comparaison des modes de rupture de la pâte de ciment et du composite sollicités en flexion montre une différence totale, ainsi que l'indique les figures 5-24 et 5-25 ci-dessous. Contrairement à la matrice pure, la fissuration dans les composites est ralentie par la présence des fibres de rônier/balles de riz.



**Figure 5-24 : Rupture brusque de la pâte de ciment pur en flexion**



**Figure 5-25 : Fissuration contrôlée dans le composite ciment-fibres de rônier à la rupture**

### **5.6.1.2 Comportement mécanique en compression**

Le comportement du composite sollicité en compression est similaire à celui du béton classique; cependant les déformations enregistrées sont plus élevées. Les figures 4-26 et 4-27 ci-dessous présentent l'évolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation relative.

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment

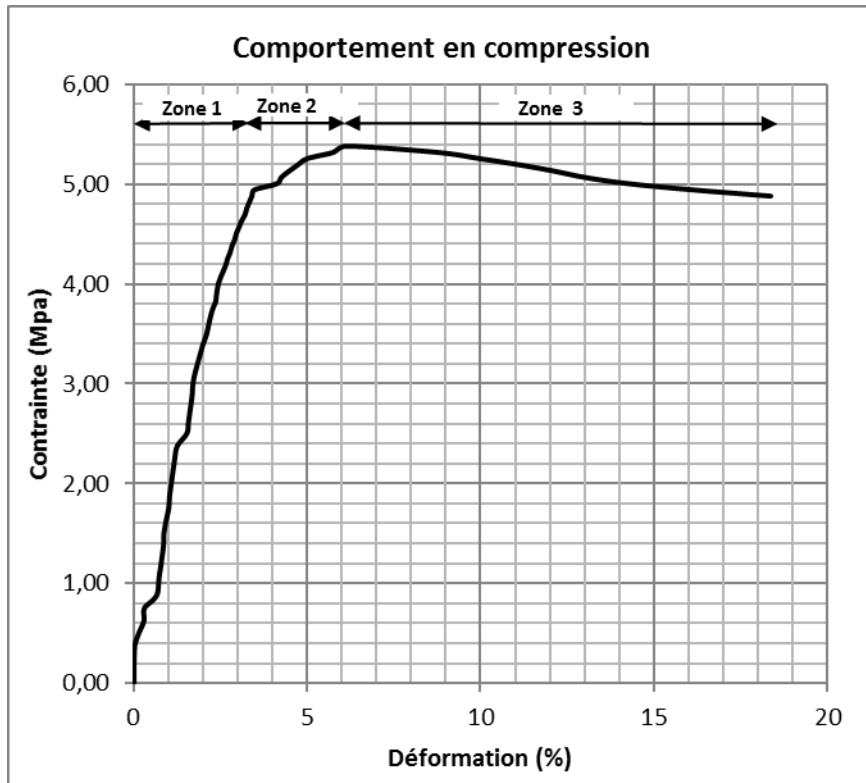


Figure 5-26 : Courbe contrainte-déformation du composite ciment-fibres de rônier en compression

→ Cas des composites balles de riz-ciment

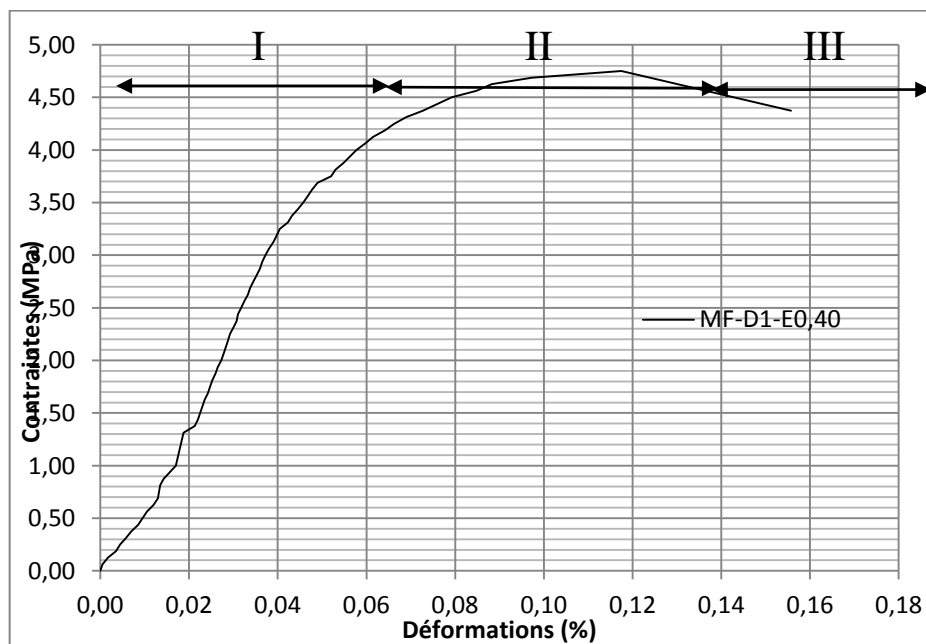


Figure 5-27 : Courbe contrainte-déformation des composites balles de riz-ciment en compression

Les courbes ainsi obtenues (Figures 5-26 et 5-27) peuvent être subdivisées en trois zones représentant les différentes phases caractéristiques du comportement des composites en compression.

La première zone présente une variation presque linéaire de la contrainte en fonction de la déformation. Les déformations enregistrées dans cette zone sont faibles, elles sont souvent provoquées par un surplus de chargement des biomasses dans la matrice; elle peut être assimilée à la phase linéaire du comportement du composite. Son étendue dépend de la qualité de la matrice cimentaire.

Dans la seconde zone, une augmentation brusque de la déformation annonçant le début de rupture du matériau.

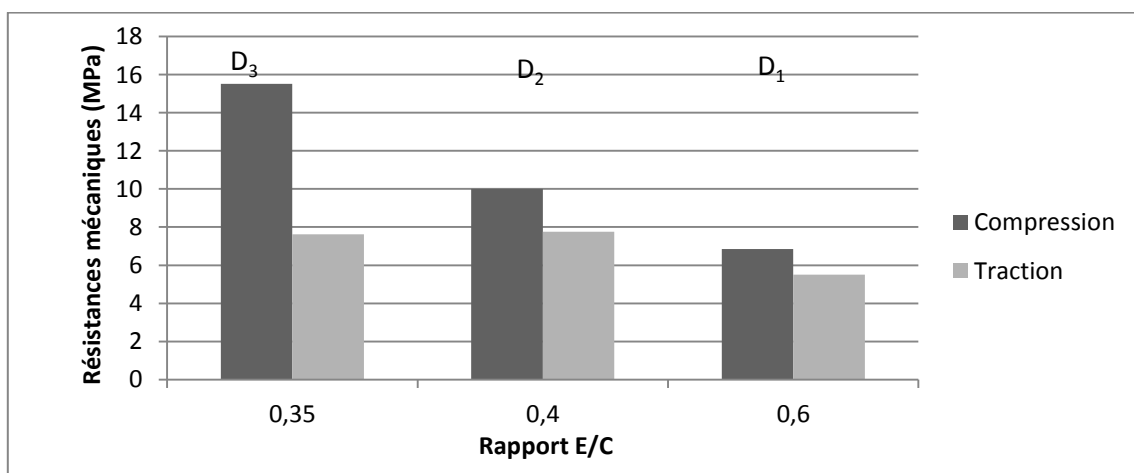
La dernière zone est caractérisée par une déformabilité très élevée du composite. Après la rupture du matériau, les charges ont pour effet de chasser les vides présents dans le matériau : il se comporte dès lors comme un amas de particules.

### 5.6.2 Influence du dosage sur les résistances mécaniques

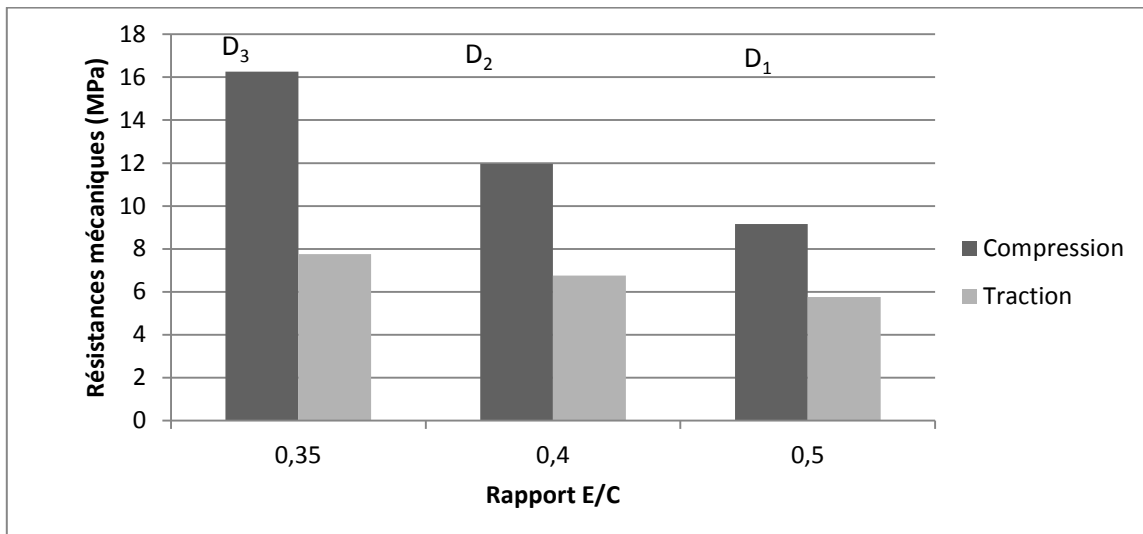
Sur les formulations optimales, l'influence du dosage sur les résistances mécaniques a aussi été observée.

#### → Résistances en compression priorisées par rapport aux résistances en traction

##### → Cas des composites fibres de rônier-ciment

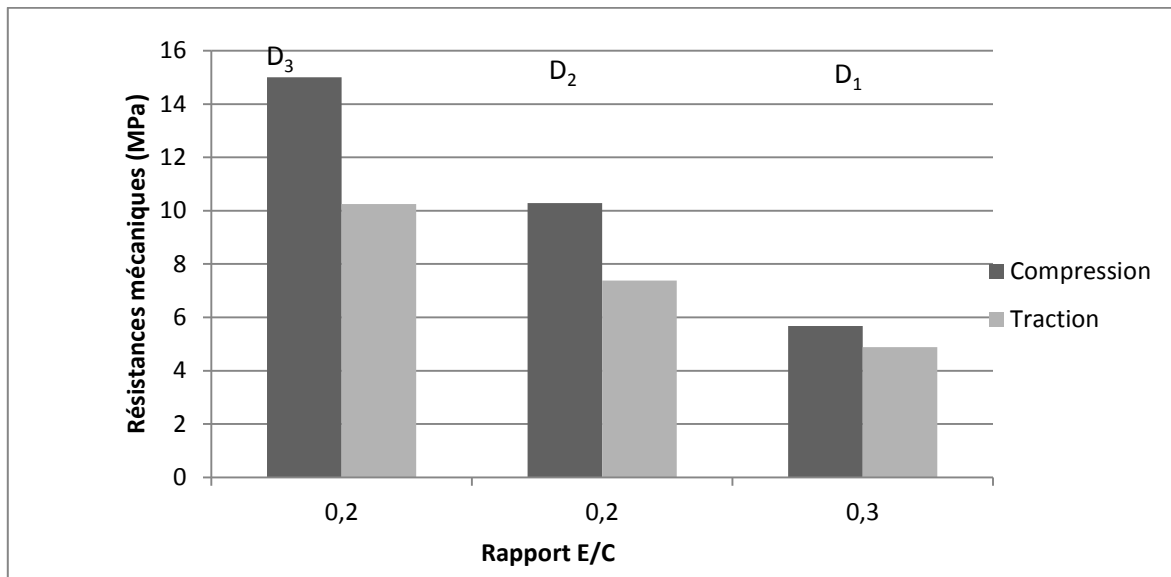


**Figure 5-28 : Résistances mécaniques optimales des composites de fibres de rônier-ciment en compression avec la résistance en traction associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin**

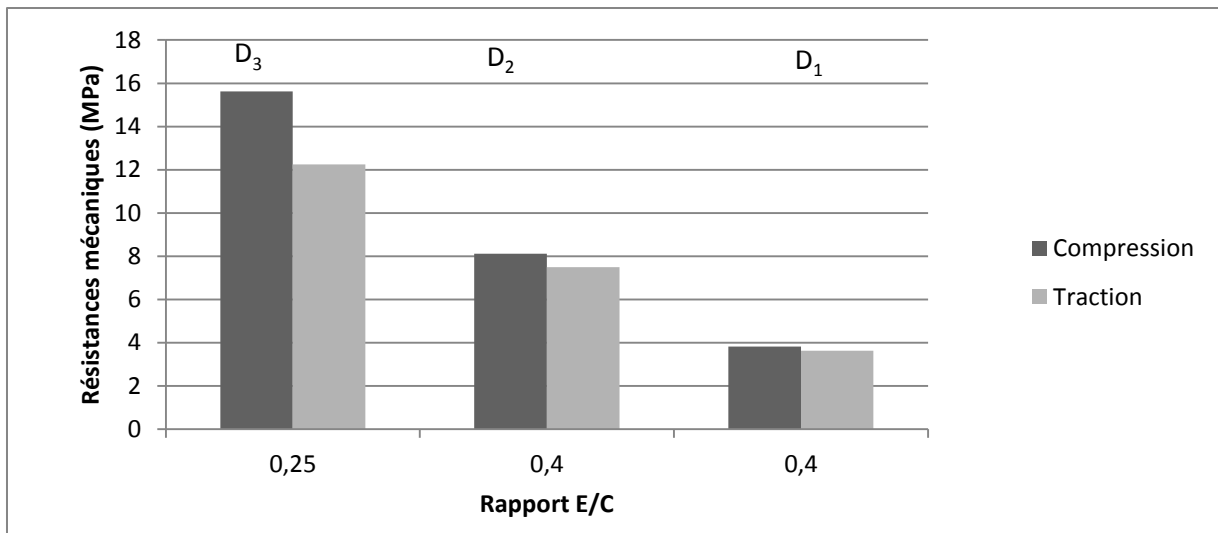


**Figure 5-29 : Résistances mécaniques optimales des composites de fibres de rônier-ciment en compression avec la résistance en traction associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier**

→ **Cas des composites balles de riz-ciment**



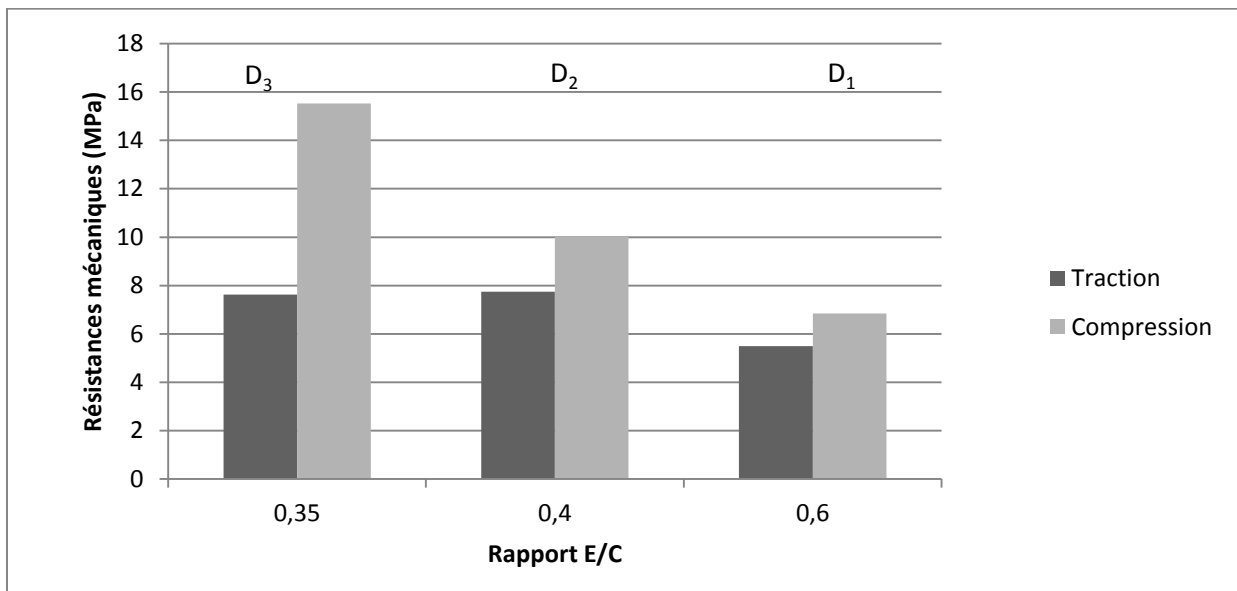
**Figure 5-30 : Résistances mécaniques optimales des composites de balles de riz-ciment en compression avec la résistance en traction associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin.**



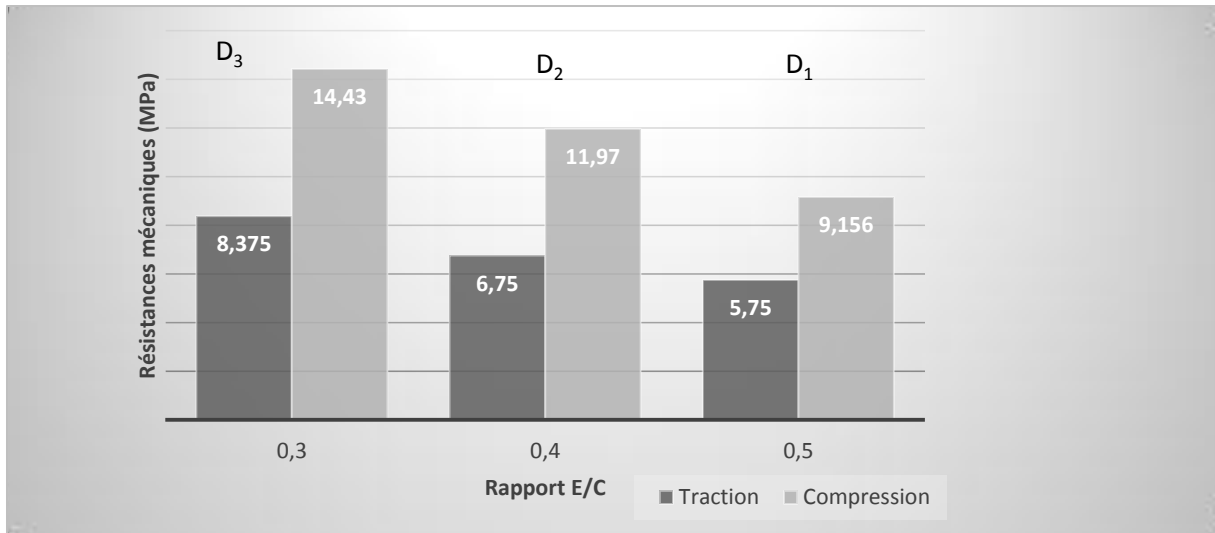
**Figure 5-31 : Résistances mécaniques optimales des composites de balles de riz-ciment en compression avec la résistance en traction associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier.**

- Résistances en traction priorisées par rapport aux résistances en compression

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment

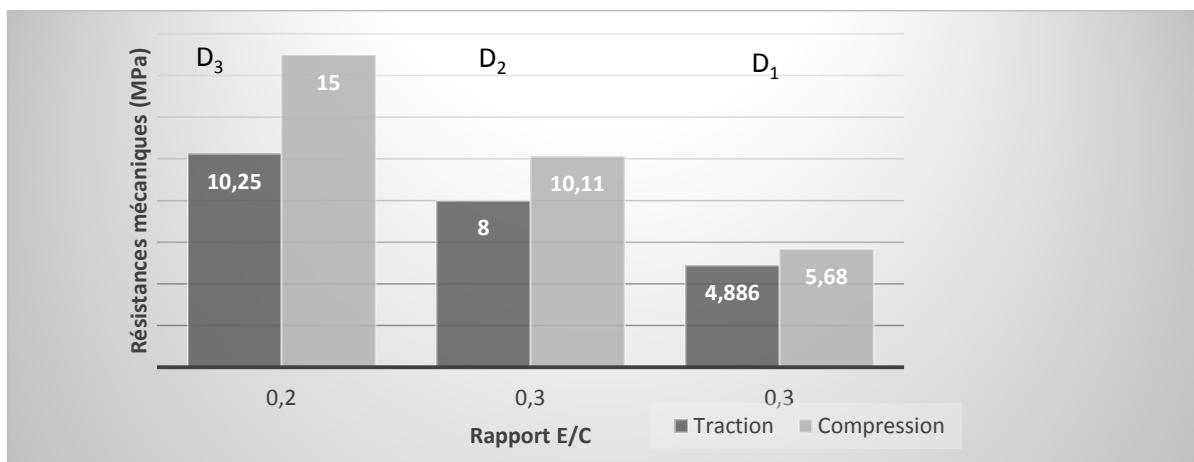


**Figure 5-32 : Résistances mécaniques optimales du composite de fibres de rônier-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin.**



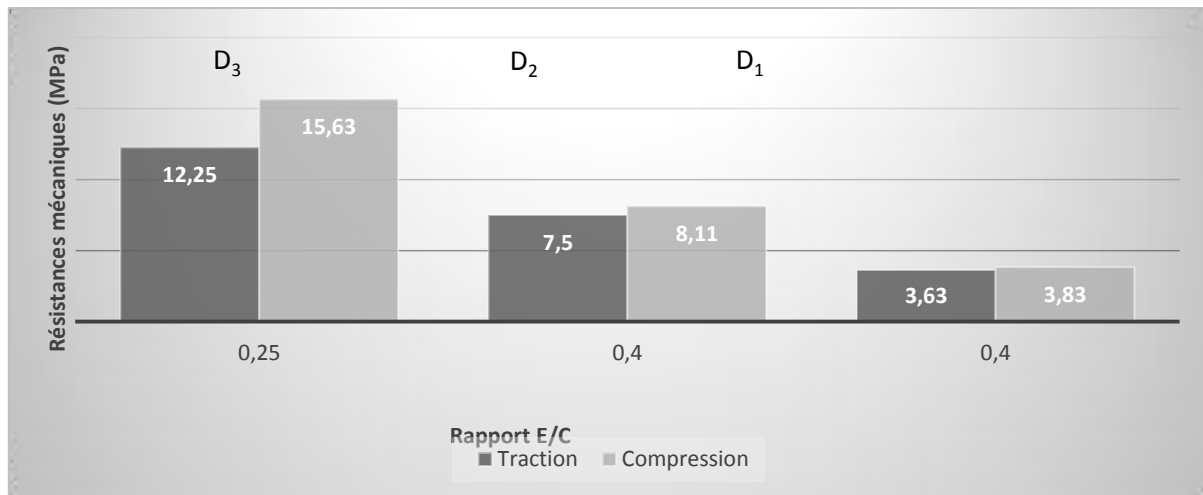
**Figure 5-33 : Résistances mécaniques optimales des composites de fibres de rônier-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier.**

→ Cas des composites balles de riz-ciment



**Figure 5-34 : Résistances mécaniques optimales des composites balles de riz-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange fin.**





**Figure 5-35 : Résistances mécaniques optimales des composites balles de riz-ciment en traction avec la résistance en compression associée en fonction du rapport E/C optimal et du dosage pour un mélange grossier.**

Après analyse des figures 5-28 à 5-35, l'on observe que d'emblée l'effet du rapport E/C sur les résistances mécaniques optimales.

En effet l'augmentation du dosage a permis d'enregistrer une nette amélioration en ce qui concerne les résistances en compression optimales et parfois une légère diminution des résistances en traction correspondantes (figure 5-28).

Ensuite, lorsque les résistances en traction sont priorisées, la même amélioration est observée quant aux résistances en compression et parfois une diminution des résistances en traction lorsque le dosage en ciment augmente (figure 5-32). Ce dernier constat s'explique par le fait que l'augmentation du dosage en ciment du mélange implique une baisse des quantités de fibres de rônier, alors que ces dernières ont pour rôle principal de renforcer le composite soumis à la flexion.

### 5.6.3 Evolution des résistances mécaniques dans le temps

Pour observer l'effet de l'âge des composites sur leurs performances mécaniques, les éprouvettes sont écrasées à 14 jours afin de comparer leurs résistances à celles des éprouvettes à 28 jours.

→ **Cas des composites balles de riz-ciment****Tableau 5-26** : Résistances mécaniques à 14 et à 28 jours

Identification de l'éprouvette	Résistance à la traction (Mpa)			Résistance à la compression (Mpa)		
	14 jours	28 jours	Croissance (%)	14 jours	28 jours	Croissance (%)
MF-D1-E0,30	2,88	4,88	69,44	3,94	5,68	44,16
MG-D1-E0,40	3,13	3,63	15,97	3,69	3,83	3,79
MF-D2-E0,30	4,31	8,00	85,61	5,09	10,11	98,62
MG-D2-E0,40	3,00	7,50	150	4,55	8,11	78,24
MF-D3-E0,20	6,75	10,25	51,85	14,84	15,00	1,07
MG-D3-E0,25	9,00	12,25	36,11	13,40	15,63	16,64

→ **Cas des composites fibres de rônier-ciment****Tableau 5-27** : Résistances mécaniques à 14 et à 28 jours

Identification de l'éprouvette	Résistance à la traction (Mpa)			Résistance à la compression (Mpa)		
	14 jours	28 jours	Croissance (%)	14 jours	28 jours	Croissance (%)
MF-D1-E0,60	3,63	5,50	51,72	6,05	6,84	13,06
MG-D1-E0,50	4,50	5,75	27,78	6,40	9,16	43,13
MF-D2-E0,40	5,50	7,75	40,91	8,34	10,01	20,02
MG-D2-E0,40	6,50	6,75	3,85	9,94	11,97	20,42
MF-D3-E0,35	6,63	7,63	15,17	13,29	15,52	16,79
MG-D3-E0,30	8,00	8,38	4,75	12,31	14,43	17,22

Les résistances enregistrées 14 jours sont toutes inférieures à celles obtenues après 28 jours (Tableau 5-26 et Tableau 5-27). L'effet inhibiteur des biomasses végétales n'est donc pas

assez importante pour inverser l'évolution normale des résistances mécaniques dans le temps. Cependant, l'accroissement des résistances dans le temps n'est pas standard. Il varie considérablement d'une formulation à une autre, le simple changement de la quantité d'eau utilisée est susceptible de faire passer le taux d'accroissement de 13% à 43 % pour les composites de fibres de rônier-ciment et de 15 % à 69 % pour les composites de balles de riz-ciment. De façon générale, il ressort que l'amélioration des résistances mécaniques observée avec un écart élevé, est imputable à la reproductibilité des essais. En effet, la confection des éprouvettes étant une opération manuelle, le malaxage et le moulage ne peuvent être effectués de manière identique d'une gâchée à une autre. Rappelons que les éprouvettes sont conservées à l'air libre au laboratoire, ce qui implique des conditions peu maîtrisées et non reproductibles; de ce fait, les éprouvettes ne sont pas forcément soumises à la même ambiance : rien ne laisse supposer l'existence d'une corrélation absolue entre les caractéristiques mécaniques à 14 jours et celles à 28 jours.

#### 5.6.4 Comparaison des résistances mécaniques des deux composites

→ Résistances en compression optimales

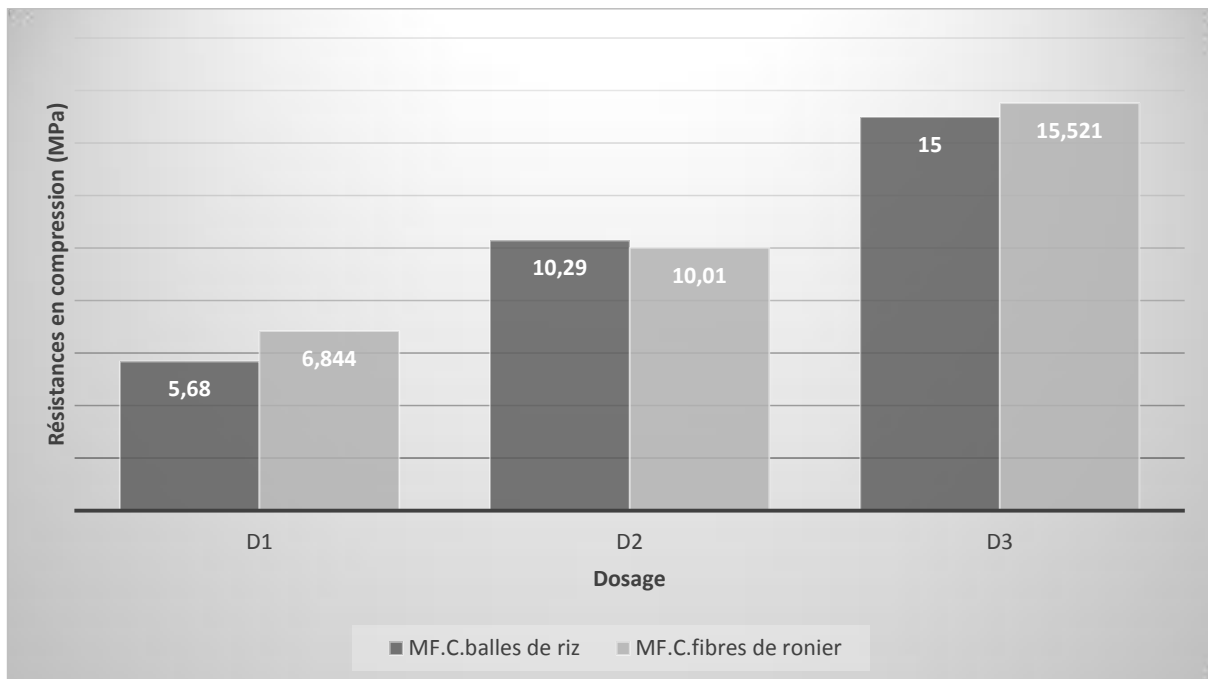
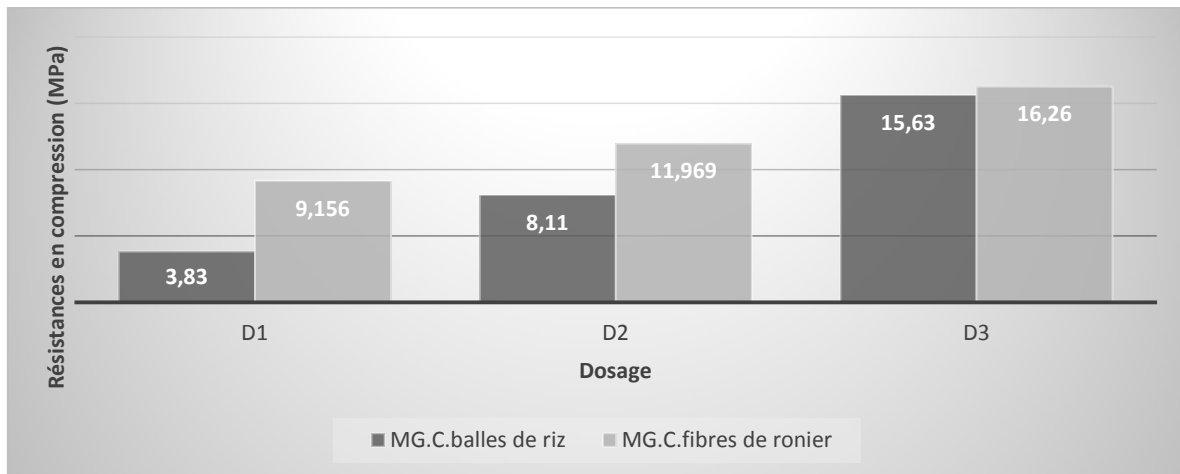


Figure 5-36 : Résistances en compression optimales en fonction du dosage pour le mélange fin des deux composites.

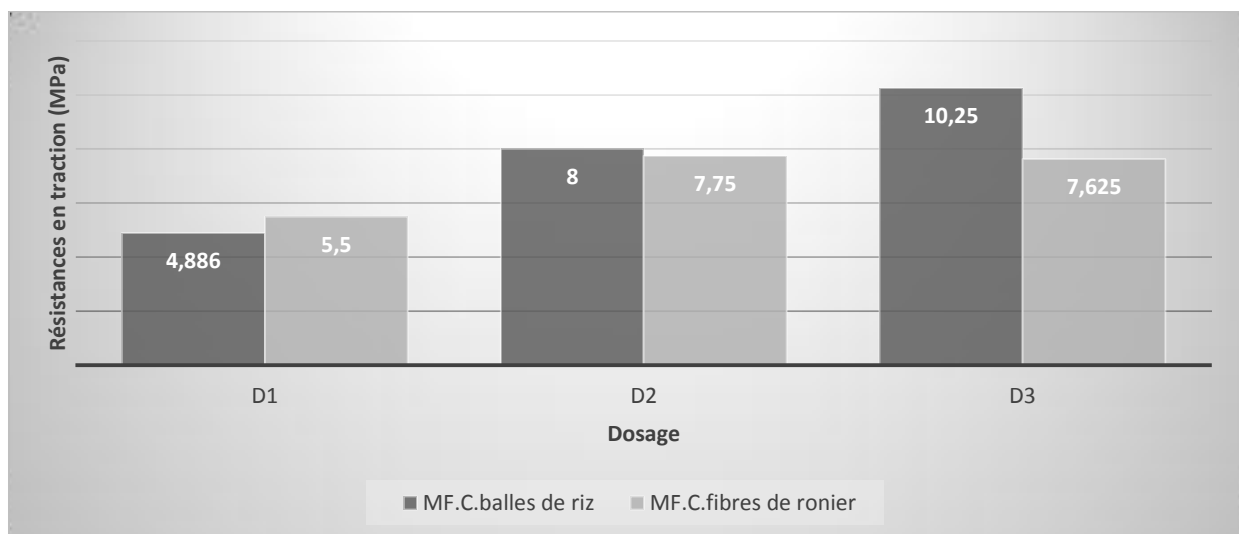


**Figure 5-37: Résistances en compression optimales en fonction du dosage pour le mélange grossier des deux composites.**

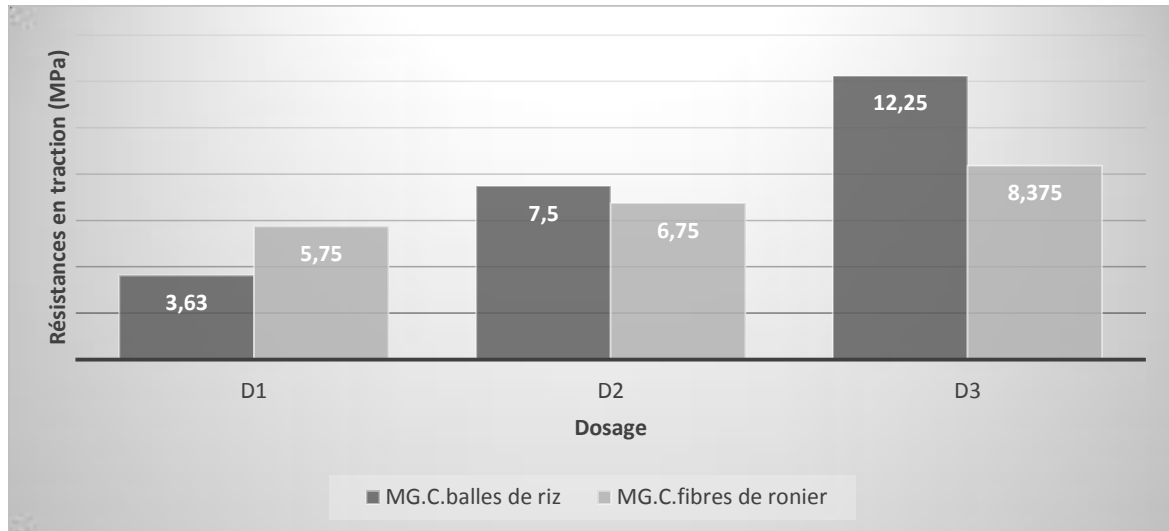
Après analyse des deux figures 5-36 et 5-37 ci-dessus, il est remarqué que les résistances en compression enregistrées sur les composites fibres de rônier-ciment sont toujours supérieures à celles enregistrées sur le composite de balles de riz-ciment, à l'exception du dosage D<sub>2</sub> du mélange fin (figure 5-36) pour lequel la résistance obtenue pour le composite de fibres de rônier-ciment est légèrement inférieure à celle obtenue sur le composite de balles de riz-ciment.

En général, comparativement aux composites balles de riz-ciment, les composites fibres de rônier-ciment résistent mieux en compression.

→ **Résistances en traction optimales**



**Figure 5-38 : Résistances en traction optimales en fonction du dosage pour le mélange fin des deux composites.**



**Figure 5-39 : Résistances en traction optimales en fonction du dosage pour le mélange grossier des deux composites.**

En observant bien les figures 5-38 et 5-39, il apparaît que pour le dosage D<sub>1</sub>, la résistance enregistrée en traction sur des éprouvettes des composites fibres de rônier-ciment est supérieure à celle enregistrée sur les éprouvettes du composite balles de riz-ciment tandis que pour les dosages D<sub>2</sub> et D<sub>3</sub>, les résistances supérieures sont obtenues sur le composite balles de riz-ciment.

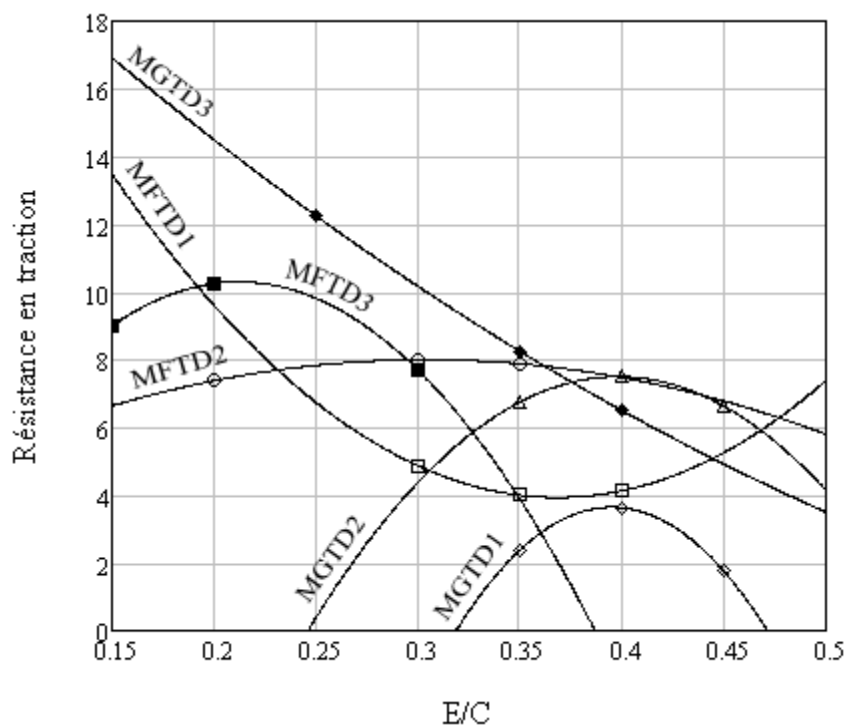
Les rapports de la résistance en compression sur les résistances en traction sont de 1,27 pour le composite balles de riz-ciment et de 1,72 pour les composites fibres de *borassus aethiopum mart*-ciment ce qui montre que ces composites ont des résistances en traction importantes, ce qui n'est pas le cas des bétons ordinaires qui donnent par contre un rapport de près de 10 entre la compression et la flexion. Ce même constat a été fait par **Merzoud. et al** (**Merzoud. et al., 2008**), mais remarquons que les résistances mécaniques de nos composites sont nettement supérieures aux résistances mécaniques étudiées sur les composites de Diss-ciment par **Merzoud. et al** bien que les rapports Diss/ciment = 5 sont supérieurs à ceux utilisés dans le cas de notre étude.

En conclusion, les composites balles de riz-ciment résistent mieux en traction que les composites fibres de rônier-ciment pour des dosages en ciment élevés. Par contre, pour des dosages faibles en ciment, sont recommandées les composites fibres de rônier-ciment.

### 5.6.5 Modèles mathématiques des résistances mécaniques ou Analyses Statistiques

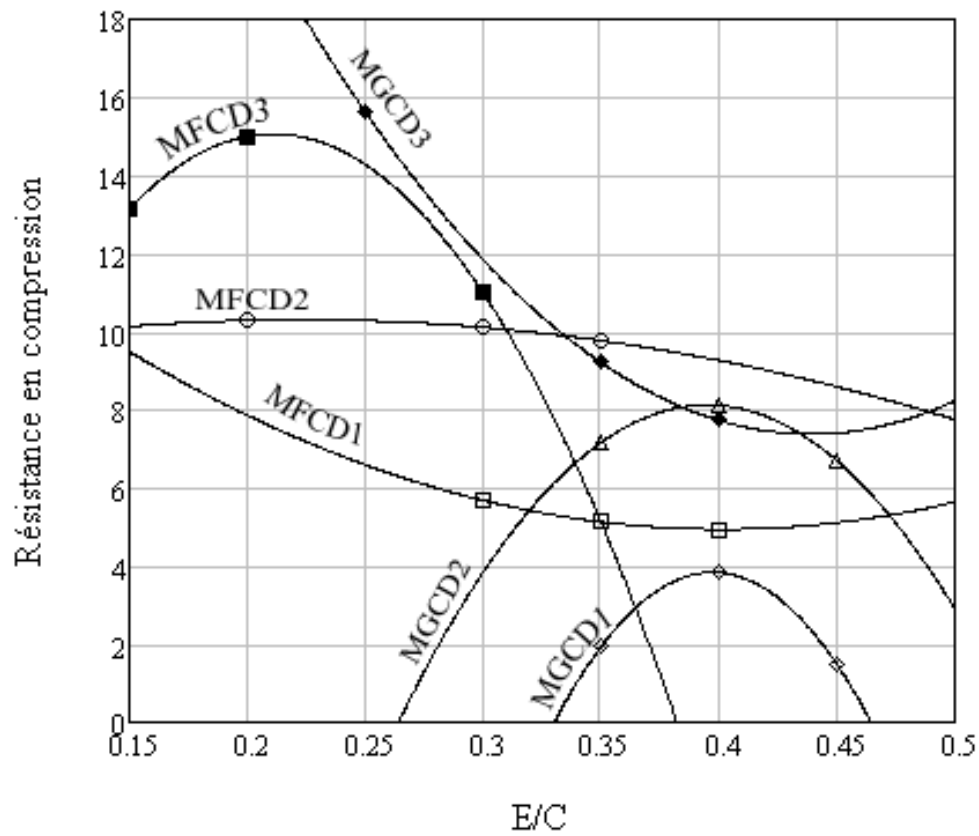
Les courbes de la figure 5-40 à 5-43 ainsi présentées qui traduisent la variation de la résistance en compression et en traction par flexion en fonction du rapport eau/ciment (E/C) avec pour paramètre le dosage  $D_i$ .

MFTD1	: $y = 31,09 - 147,4x + 200x^2$
MGTD1	: $y = -94,01 + 494,5x - 626x^2$
MFTD2	: $y = 2,7 + 34,87x - 57,33x^2$
MGTD2	: $y = -43,86 + 258x - 324x^2$
MFTD3	: $y = -4,87 + 143,07x - 337,33x^2$
MGTD3	: $y = 25,17 - 60x + 33,33x^2$



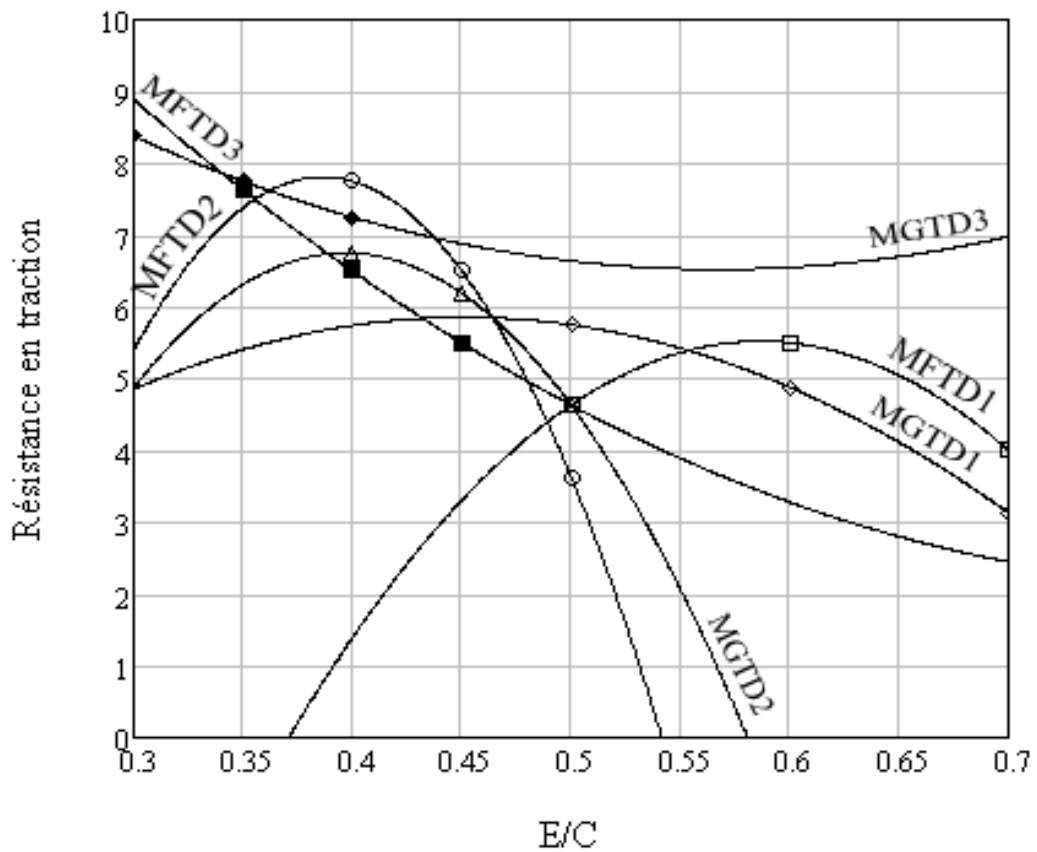
**Figure 5-40 : Résistance en traction en fonction de E/C des composites balles de riz-ciment**

MFCD1	: $y = 16,54 - 57,8x + 72x^2$
MGCD1	: $y = -130,37 + 675,5x - 850x^2$
MFCD2	: $y = 8,65 + 14,87x - 33,33x^2$
MGCD2	: $y = -65,85 + 374,5x - 474x^2$
MFCD3	: $y = -7,82 + 216,9x - 514x^2$
MGCD3	: $y = 51,86 - 202,6x + 230,67x^2$



**Figure 5-41: Résistance en compression en fonction de E/C des composites balles de riz-ciment**

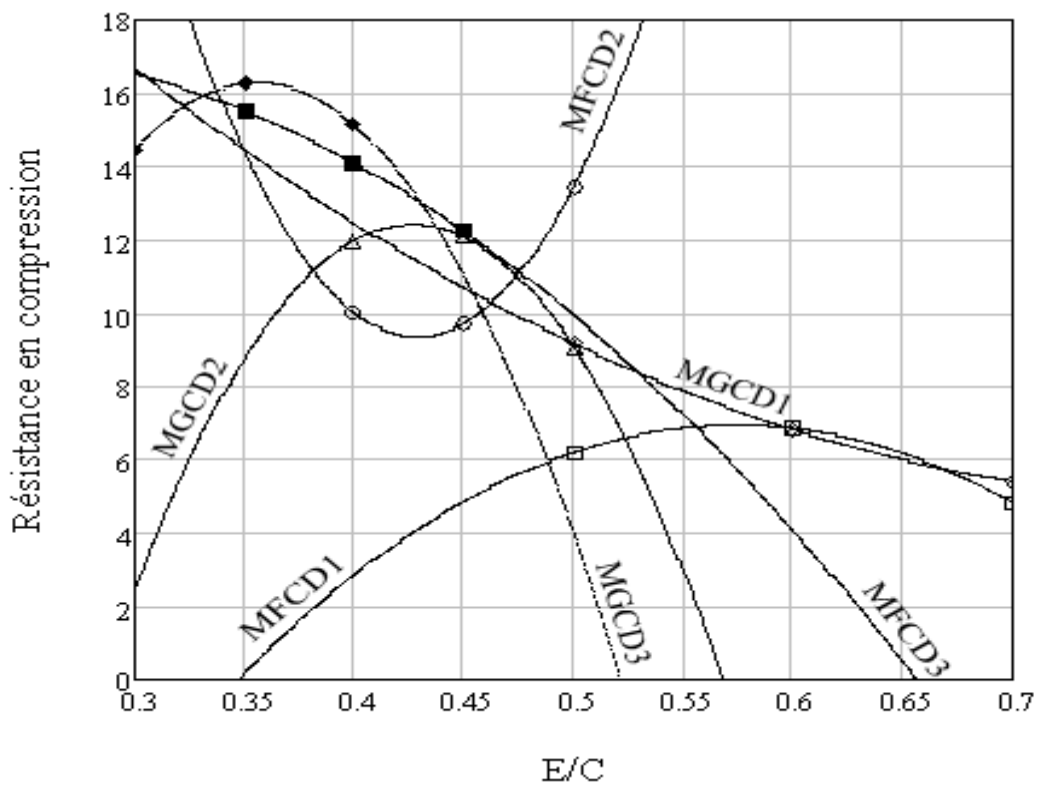
MFTD1	: $y = -35,27 + 139,05x - 118,5x^2$
MGTD1	: $y = -3,1 + 39,7x - 44x^2$
MFTD2	: $y = -40,57 + 250,4x - 324x^2$
MGTD2	: $y = -24,77 + 158,8x - 200x^2$
MFTD3	: $y = 19,18 - 42,1x + 26x^2$
MGTD3	: $y = 14,89 - 29,5x + 26x^2$



**Figure 5-42 : Résistance en traction en fonction de E/C des composites fibres de rônier-ciment**



$$\begin{aligned} \text{MFCD1} & : y = -37,32 + 154x - 134x^2 \\ \text{MGCD1} & : y = 35,01 - 75,2x + 47x^2 \\ \text{MFCD2} & : y = 158,65 - 696,4x + 812x^2 \\ \text{MGCD2} & : y = -100,87 + 530,9x - 622x^2 \\ \text{MFCD3} & : y = 13,49 + 35,9x - 86x^2 \\ \text{MGCD3} & : y = -58,71 + 421,4x - 592x^2 \end{aligned}$$



**Figure 5-43: Résistance en compression en fonction de E/C des composites fibres de rônier-ciment**

### 5.7 Etude des propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existant dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de trois paramètres usuels : l'effusivité E, la conductivité thermique  $\lambda$  et la

diffusivité  $\alpha$ . Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants et de la microstructure du matériau.

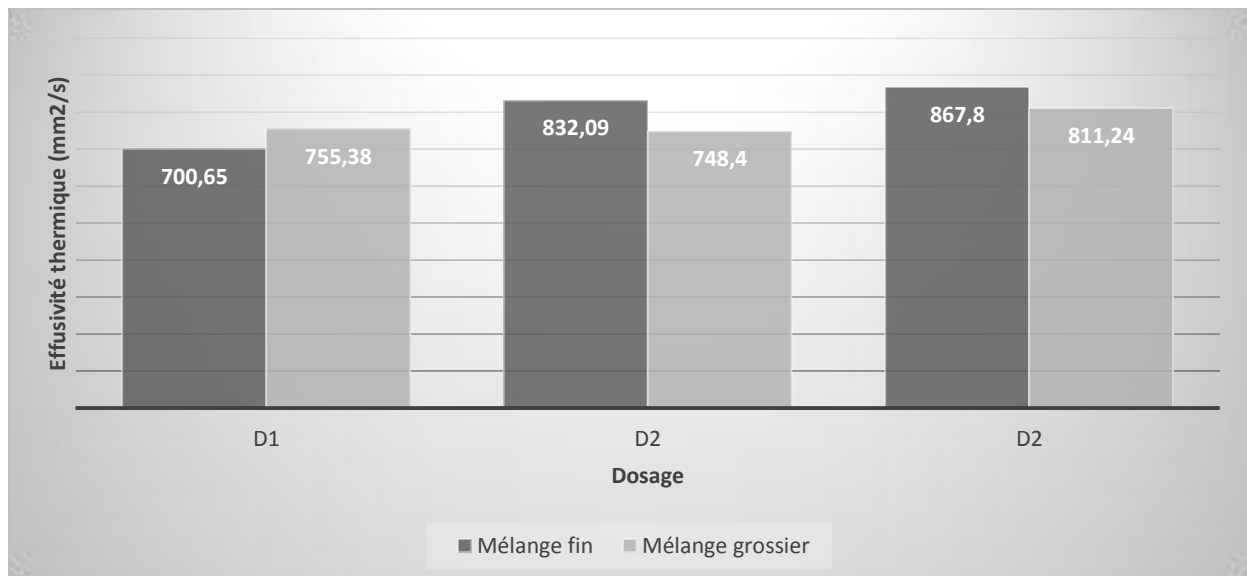
Ce paragraphe s'intéressera à l'influence des paramètres comme le dosage en ciment, la composition granulaire, la masse volumique et le taux d'absorption sur ces propriétés thermiques.

### 5.7.1 L'effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle caractérise la sensation de chaud ou de froid que donne un matériau. Si la valeur d'effusivité est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface. A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur.

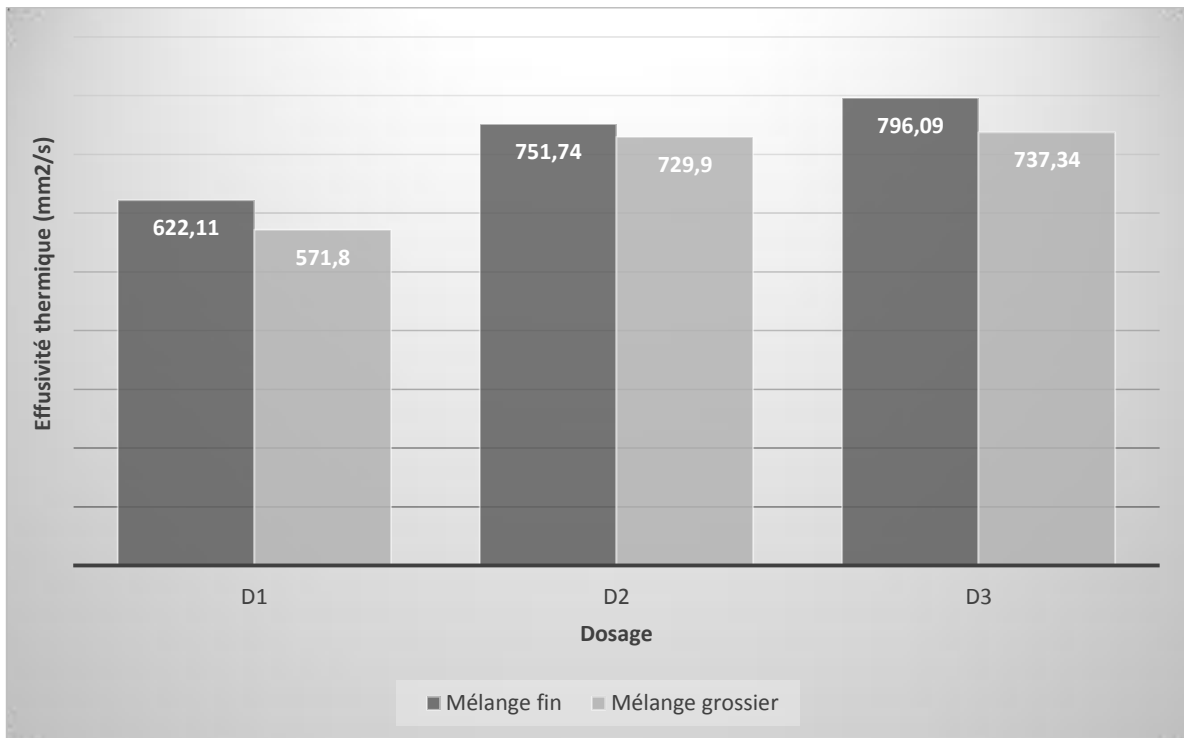
#### 5.7.1.1 Influence du dosage et de la composition granulaire sur l'effusivité thermique

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment



**Figure 5-44 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites fibres de rônier-ciment**

## → Cas des composites balles de riz-ciment



**Figure 5-45 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites balles de riz-ciment**

Les figures 5-44 et 5-45 présentent les variations de l'effusivité thermique en fonction du dosage et de la composition granulaire pour les deux composites. D'après ces figures, si l'attention est portée uniquement sur l'effet du dosage en liant, une augmentation de l'effusivité est remarquée lorsque le dosage en ciment augmente dans les deux types de mélange. Comme énoncé plus haut les caractéristiques thermiques d'un matériau dont l'effusivité, dépendent uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

D'après le paragraphe concernant les caractéristiques physiques, il découle que le taux d'absorption des composites diminue lorsque le dosage en liant augmente. Ce qui peut aussi s'interpréter par le fait qu'une augmentation du dosage en ciment diminue la porosité des matériaux, en d'autres termes le volume d'air. Or l'air immobile possède une faible effusivité thermique (Cerezo V., 2005). Ainsi le fait de diminuer les pores dans le matériau fait accroître l'effusivité thermique de ce matériau.

En ce qui concerne la composition granulaire, les composites confectionnés avec le mélange fin des deux matériaux ont une effusivité plus élevée que ceux confectionnés avec le mélange

grossier à l'exception du dosage D<sub>1</sub> des composites fibres de rônier-ciment où l'effusivité du mélange grossier est plus importante que celle du mélange fin. Ce qui signifie que le composite

confectionné avec les granulats issus du mélange fin absorberait rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer considérablement en surface. Cette conclusion est d'ailleurs avantageuse puis que le but visé est l'utilisation des composites comme matériau de construction.

### 5.7.1.2 Influence de la masse volumique sur l'effusivité thermique

Dans le cas de cette étude, il est aussi observé l'effet de la masse volumique sur l'effusivité thermique. Les variations obtenues pour les deux composites sont illustrées sur les figures 5-46 et 5-47.

#### → Cas des composites fibres de rônier-ciment

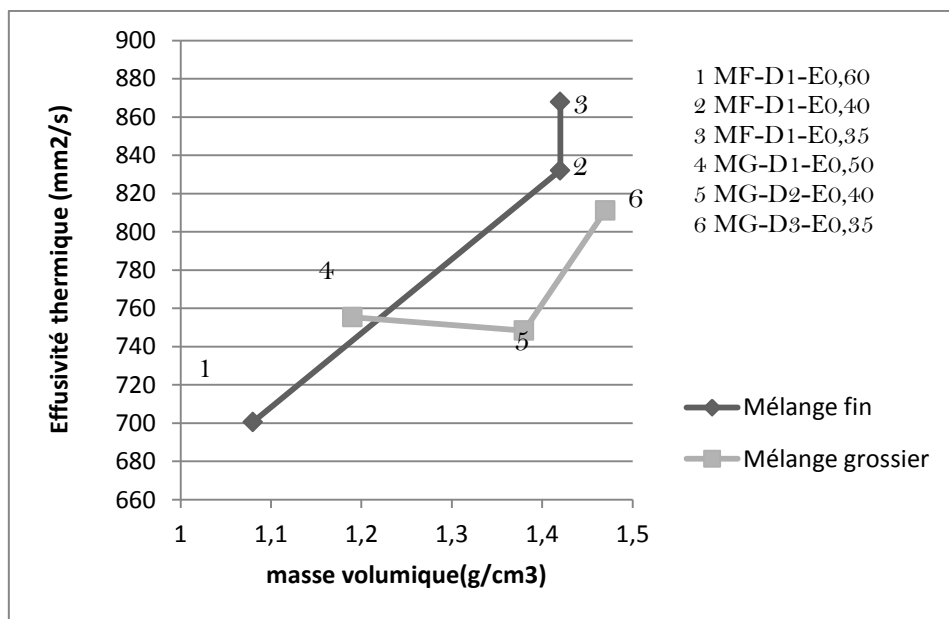
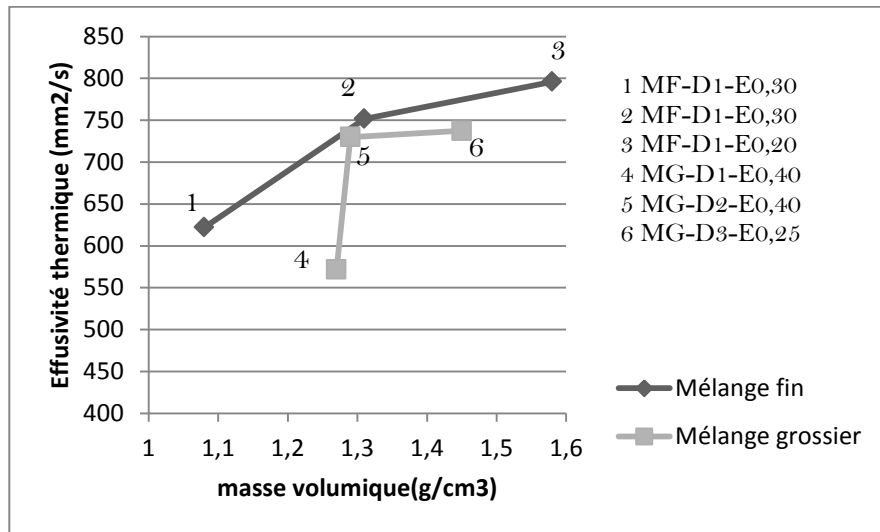


Figure 5-46 : Variation de l'effusivité thermique des composites fibres de rônier-ciment en fonction de la masse volumique

## → Cas des composites balles de riz-ciment



**Figure 5-47 : Variation de l'effusivité thermique des composites balles de riz-ciment en fonction de la masse volumique**

En observant les figures 5-46 et 5-47, il est remarqué que l'effusivité thermique augmente avec la masse volumique; fait normal puisque d'après l'expression qui donne l'effusivité thermique, cette dernière est une fonction croissante de la masse volumique. Ce qui montre que les essais thermiques effectués sont en adéquation avec la théorie.

### 5.7.2 La conductivité thermique

Pour une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques des composites étudiés, le régime variable la conductivité thermique est mesuré, quantité de chaleur qui passe dans le corps en présence d'un gradient de température. Pour un matériau donné, l'intervalle de variation de la conductivité est assez large et dépend de plusieurs facteurs, dont la température, la porosité, de la granulométrie, le dosage, la masse volumique et la teneur en eau. La connaissance de cette propriété est surtout utile pour le calcul de la résistance thermique des éléments de construction.

La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température. La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant.

Plus la valeur de la conductivité thermique est faible et plus le matériau est isolant, plus la conductivité thermique est grande, plus le matériau est conducteur.

### 5.7.2.1 Influence du dosage et de la composition granulaire sur la conductivité thermique

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment

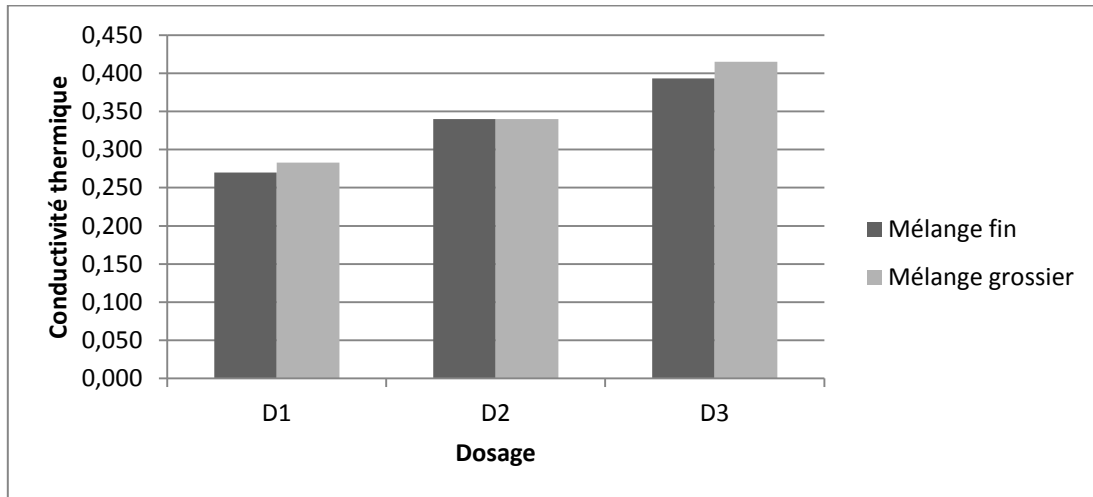


Figure 5-48 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites fibres de rônier-ciment.

→ Cas des composites balles de riz-ciment

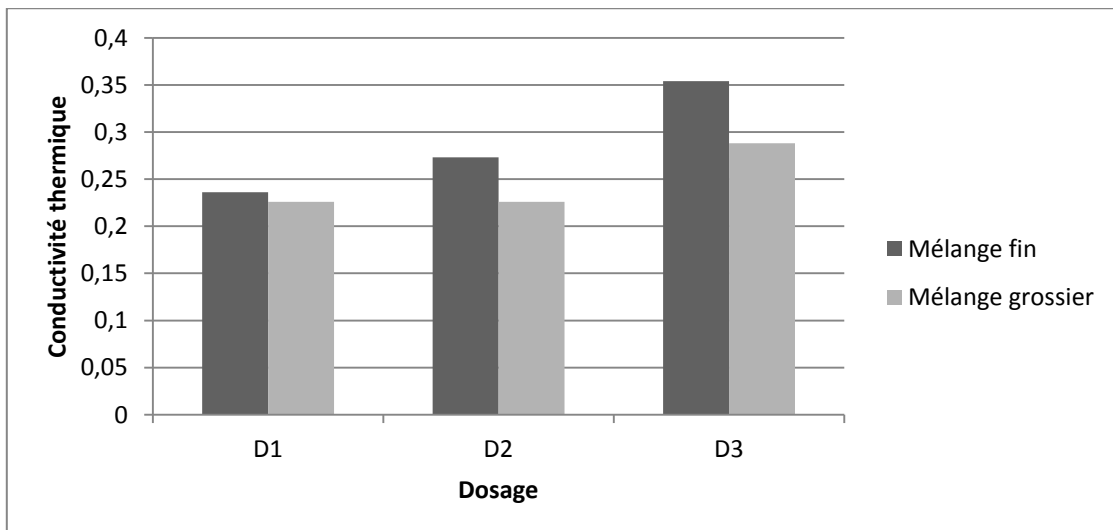


Figure 5-49 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites balles de riz-ciment

Les effets du dosage en liant et de la granulométrie sont aussi observés sur la conductivité thermique des éprouvettes réalisées (figures 5-48 et 5-49). L'analyse a montré qu'en considérant uniquement l'influence du dosage en ciment, la conductivité thermique augmente lorsque le dosage en ciment dans le mélange augmente. Cela peut se justifier de deux manières : la première est liée à la diminution du volume des vides occupés par de l'air dans les éprouvettes causée par l'augmentation du dosage en ciment. Or, il s'avère que l'air est le constituant le plus isolant (donnant la conductivité thermique la plus faible). Ensuite, puisque la conductivité est une grandeur intrinsèque des matériaux qui dépend aussi des constituants. Donc l'augmentation du dosage en ciment qui engendre l'augmentation de la conductivité thermique serait due à l'augmentation du ratios de ciment dans le mélange qui est le constituant le plus conducteur. Ce constat a été fait par Tai-Thu Nguyen (**Nguyen., 2010**), Cerezo (**Cerezo., 2005**), Meukam (**Meukam., 2004**) et Doko V. (**Doko., 2011**) dans leurs travaux respectifs sur le béton de chanvre, de la latérite ajoutée à du ciment et sur le béton balles de riz.

Quant à l'effet de la granulométrie, les résultats obtenus montrent que pour les composites balles de riz-ciment, les valeurs de conductivité diminuent considérablement lorsqu'on passe du mélange fin au mélange grossier. Tandis que pour les composites fibres de rônier-ciment, les résultats obtenus semblent confirmer que les éprouvettes confectionnées avec le mélange grossier sont légèrement plus conducteur que celles confectionnées avec le mélange fin.

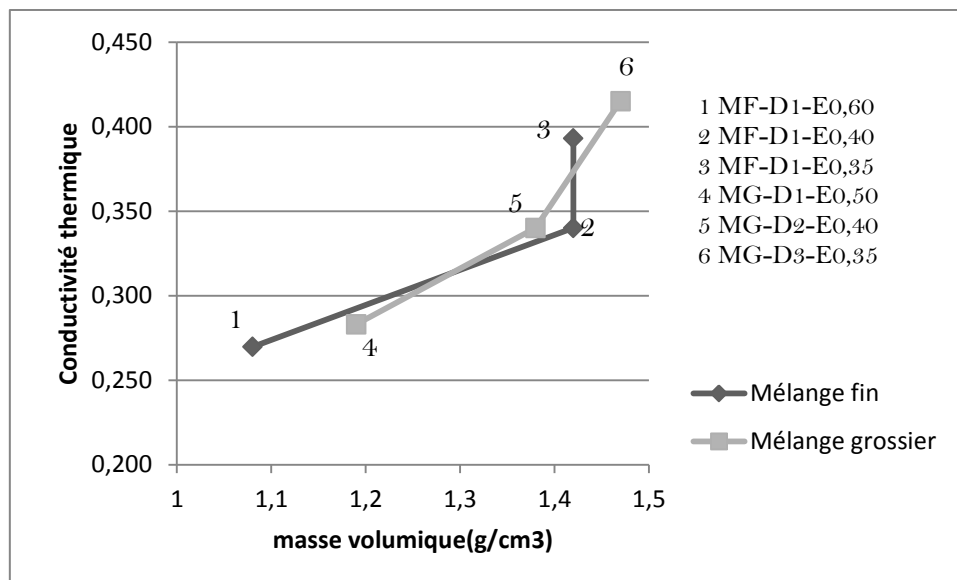
Comme noté plus haut que la conductivité thermique est une fonction décroissante de la porosité du matériau. En considérant les composites balles de riz-ciment, les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique des éprouvettes confectionnées avec le mélange fin est plus élevée que celle des éprouvettes du mélange grossier. Ce qui signifie que ces dernières sont plus poreuses que les premières. Par contre pour les composites fibres de rônier-ciment, il est aussi évident que les éprouvettes dont les granulats utilisés sont issus du mélange grossier présentent une porosité moins importante que celles réalisées avec les granulats provenant du mélange fin. Ces conclusions viennent à nouveau confirmer les variations obtenues pour l'étude de l'absorption des composites et même de l'absorption des granulats de biomasse végétale.

En terme de performance thermique nos matériaux étudiés sont meilleurs comparativement aux matériaux de latérite+sciure de bois étudié par Meukam (**Meukam., 2004**) dont la plus faible conductivité thermique est de 0,5 W/mK avec une teneur en eau de 5,2 % et aussi meilleurs par rapport aux résultats issus du béton de balles de riz de Doko V. et al (**Doko., et al 2012**) qui ont utilisé pour la conductivité thermique la méthode de la plaque chaude gardée et une méthode expérimentale pour la détermination des rapports C/R.

### 5.7.2.2 Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique

Il semblerait logique que la conductivité thermique des composites augmente avec la masse volumique, puisque l'augmentation de ce dernier est liée à une augmentation du volume du liant, qui est le plus conducteur dans le matériau. Il est à noter que la conductivité thermique du ciment est beaucoup plus importante que celle des biomasses végétales en étude. Les résultats obtenus semblent confirmer cette hypothèse (figures 5-50 et 5-51). Il est nettement remarqué que la conductivité thermique varie proportionnellement avec la masse volumique pour les deux composites.

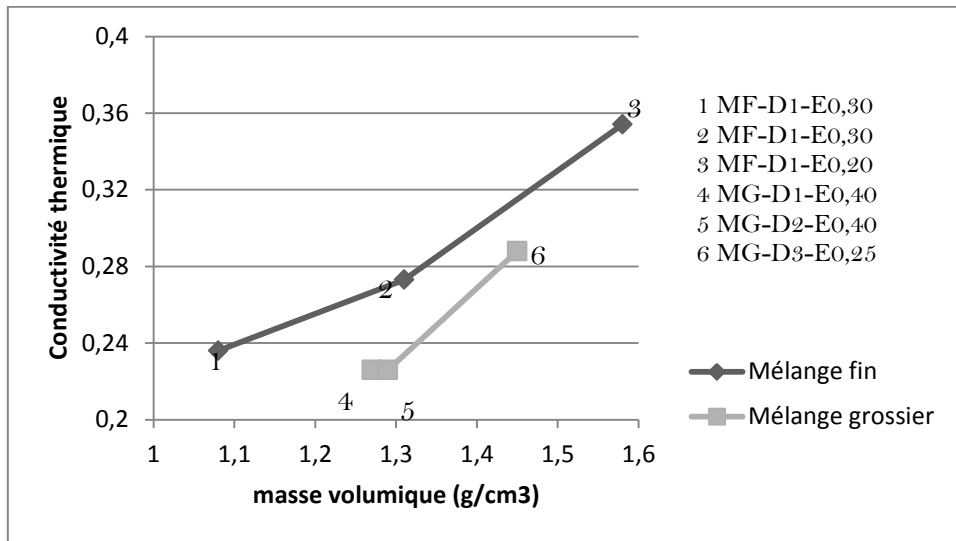
#### → Cas des composites fibres de rônier-ciment



**Figure 5-50 : Variation de la conductivité thermique des composites fibres de rônier-ciment en fonction de la masse volumique**



→ Cas des composites balles de riz-ciment



**Figure 5-51 : Variation de la conductivité thermique des composites balles de riz-ciment en fonction de la masse volumique**

### 5.7.3 La diffusivité thermique

La diffusivité thermique est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un matériau. Plus la valeur de 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 est arrivée sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important. En d'autres termes, elle caractérise la rapidité de pénétration de la chaleur dans le matériau. Ce paramètre varie en fonction de plusieurs facteurs qui sont entre autres, le dosage en ciment, la composition granulaire qui fait intervenir la porosité et la masse volumique.

### 5.7.3.1 Influence du dosage et de la composition granulaire sur la diffusivité thermique

→ Cas des composites fibres de rônier-ciment

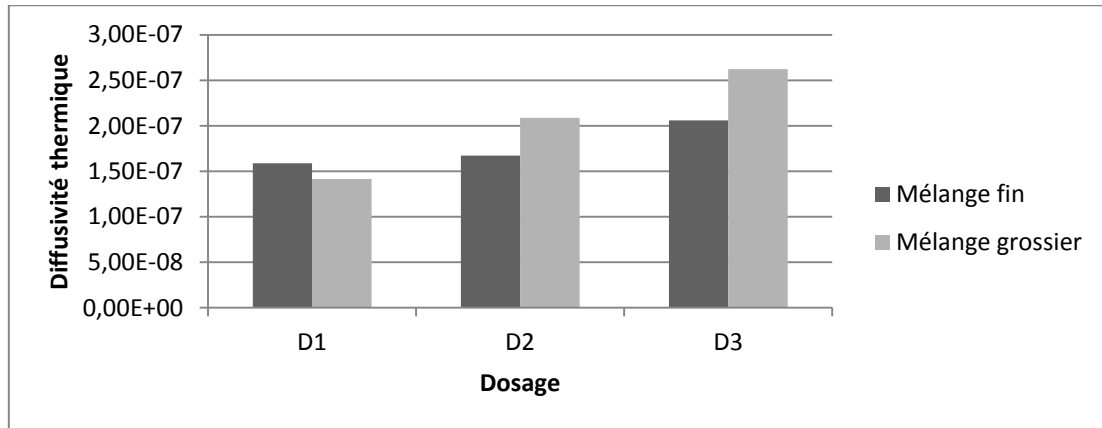


Figure 5-52 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites fibres de rônier-ciment.

→ Cas des composites balles de riz-ciment

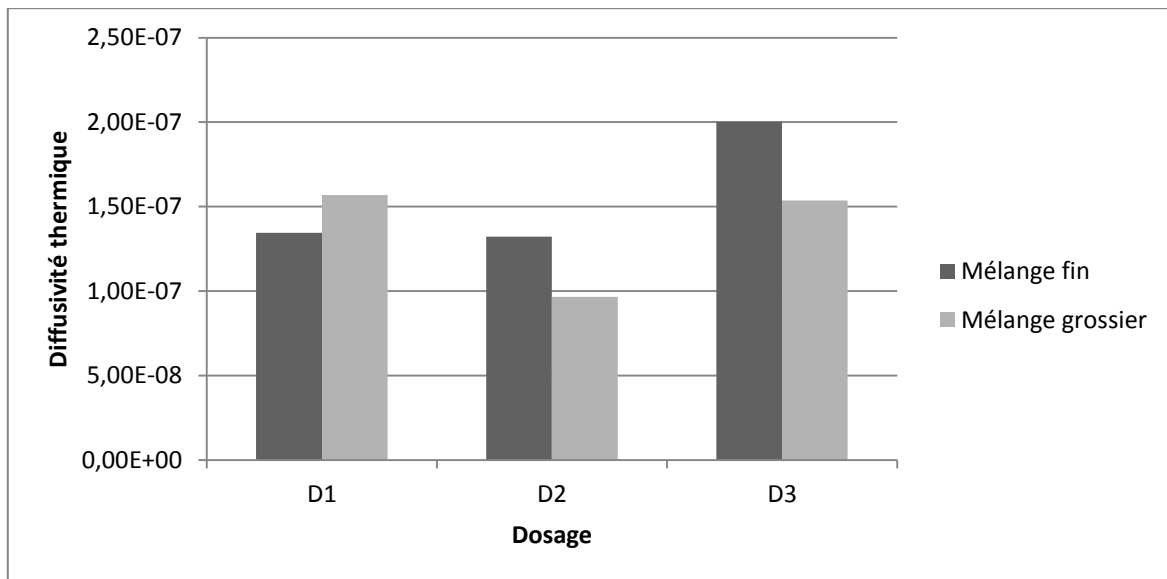


Figure 5-53 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage pour les deux compositions granulaires des composites balles de riz-ciment.

Les figures 5-52 et 5-53 montrent les variations du dosage en ciment et de la composition granulaire sur la diffusivité thermique pour les deux composites. Après analyse de ces figures, l'on observe en général, une augmentation de la valeur de la diffusivité thermique lorsque le dosage en ciment dans le mélange augmente. Plus particulièrement, pour le composite balles de riz-ciment, les éprouvettes dont la formulation inclue un mélange fin, les valeurs de la

diffusivité thermique obtenues sont pratiquement les mêmes pour les dosages  $D_1$  et  $D_2$ , tandis que celle obtenue pour le dosage  $D_3$  est largement supérieure à ces deux derniers. Alors que pour le mélange grossier, on constate que la valeur obtenue en considérant le dosage  $D_2$  est trop inférieure à celles obtenues pour les dosages  $D_1$  et  $D_3$  qui sont pratiquement les mêmes. En considérant, l'influence de la composition granulaire, le constat fait est contraire pour les deux composites. Pour les composites fibres de rônier-ciment, les éprouvettes dont la formulation inclue un dosage  $D_2$  ou  $D_3$ , diffusent plus de chaleur lorsqu'elles sont confectionnées avec une composition granulaire correspondant au mélange grossier. Contrairement au dosage  $D_1$  c'est le mélange fin qui emporte sur le mélange grossier.

Pour les composites balles de riz-ciment, les éprouvettes confectionnées avec le mélange grossier diffuse plus de chaleur que celles réalisées avec le mélange fin lorsque la formulation intègre le dosage  $D_1$ . Dans le cas des dosages  $D_2$  et  $D_3$ , c'est plutôt les valeurs obtenues sur les éprouvettes réalisées avec le mélange fin qui sont plus importantes que celles dont la formulation intègre le mélange grossier de balles de riz.

### 5.7.3.2 Influence de la masse volumique sur la diffusivité thermique

Par analogie aux variations des autres facteurs par rapport à la masse volumique, il semblerait logique que la diffusivité thermique augmente avec la masse volumique. Mais les résultats obtenus semblent ne pas confirmer la grosse influence de la diffusivité thermique en fonction de la masse volumique (figures 5-54 et 5-55).

#### → Cas des composites fibres de rônier-ciment

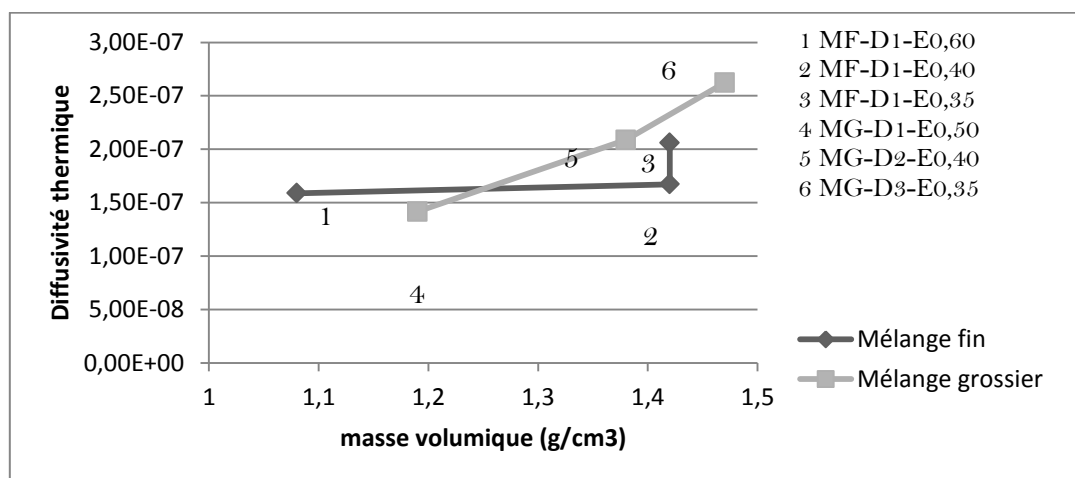
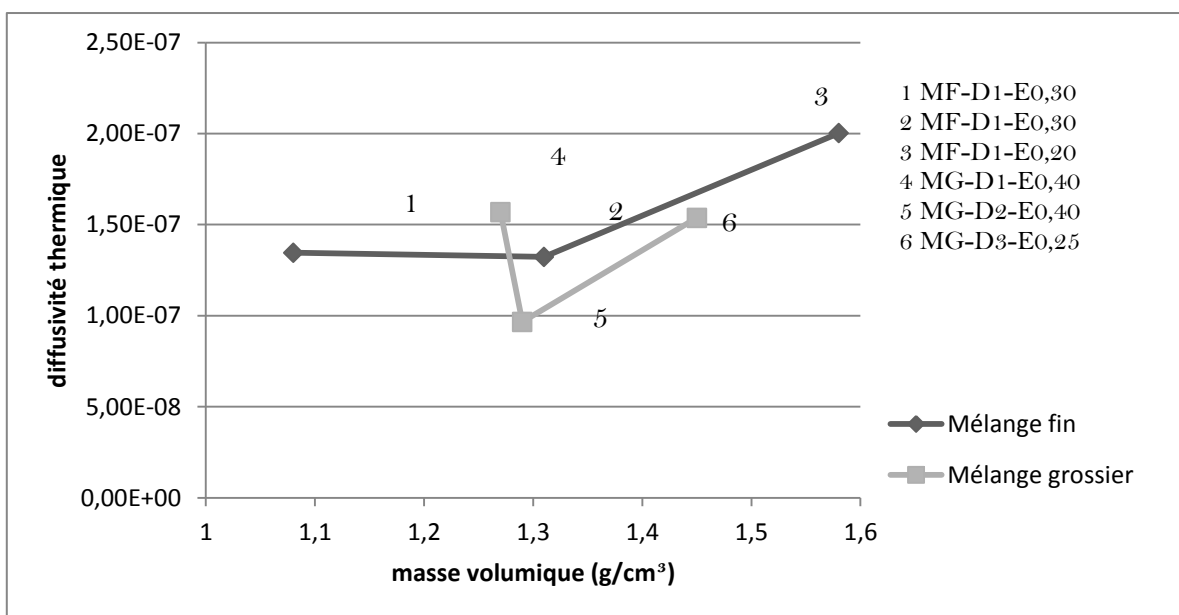


Figure 5-54 : Variation de la diffusivité thermique des composites fibres de rônier-ciment en fonction de la masse volumique

Pour le mélange grossier, la variation observée est claire. Il apparaît que la diffusivité augmente avec la masse volumique. Alors que pour le mélange fin, lorsque la masse volumique passe de 1,08 à 1,42 g/cm<sup>3</sup>, la diffusivité quant à elle varie de  $1,59 \times 10^{-7}$  à  $1,67 \times 10^{-7}$  m/s. Il est remarqué que la variation n'est pas assez importante. En faisant la corrélation entre masse volumique et résistances mécaniques, globalement, l'augmentation de la masse volumique engendre des gains de résistances mécaniques qui sont nettement plus important au regard de l'augmentation de la diffusivité thermique du matériau; cette constatation est très importante, elle souligne l'intérêt de l'augmentation de la masse volumique sur les performances globales du matériau utilisé comme matériau de construction.

→ Cas des composites balles de riz-ciment



**Figure 5-55 : Variation de la diffusivité thermique des composites balles de riz-ciment en fonction de la masse volumique**

La figure 5-55 présente cette même variation mais dans ce cas pour le composite balles de riz-ciment. Les résultats obtenus pour ce composite viennent à nouveau confirmer que l'augmentation de la masse volumique n'engendre pas un gain important sur la diffusivité thermique du matériau.

### 5.7.4 Comparaison des caractéristiques thermiques des deux composites

Après l'étude des caractéristiques thermiques en fonction des différents paramètres d'influence pour chaque composite, il s'avère important de comparer les deux matériaux afin de voir d'une part lequel présente de bonnes performances thermiques et d'autre part faire une corrélation avec la conclusion obtenue concernant les performances mécaniques dans l'objectif de pouvoir recommander le matériau qui présente des caractéristiques physique, mécanique et thermique meilleures.

→ Selon l'effusivité thermique

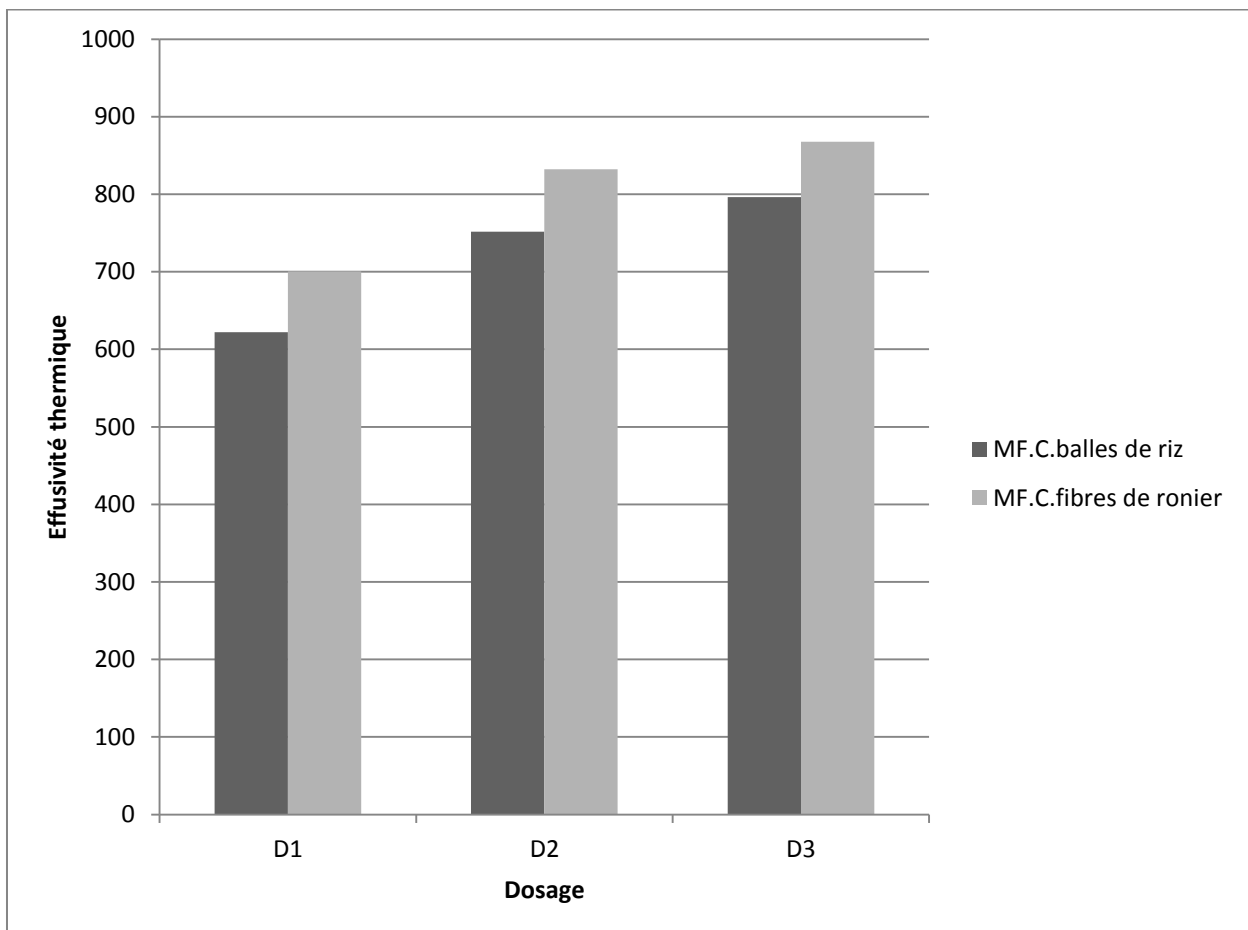
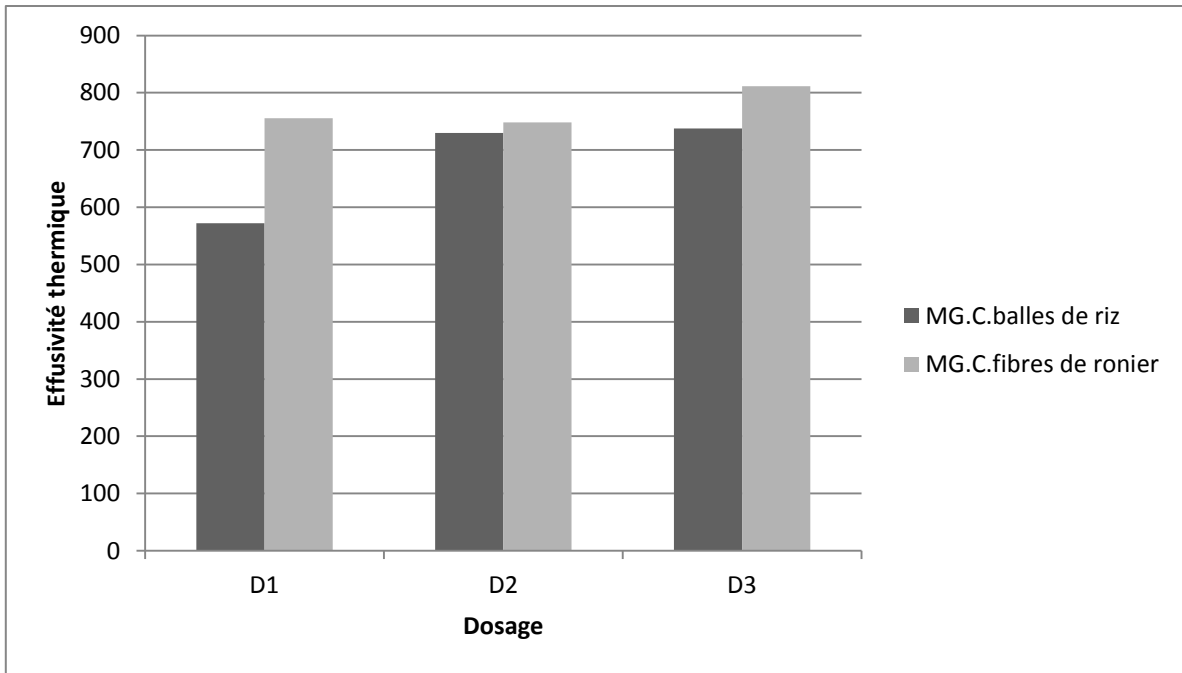
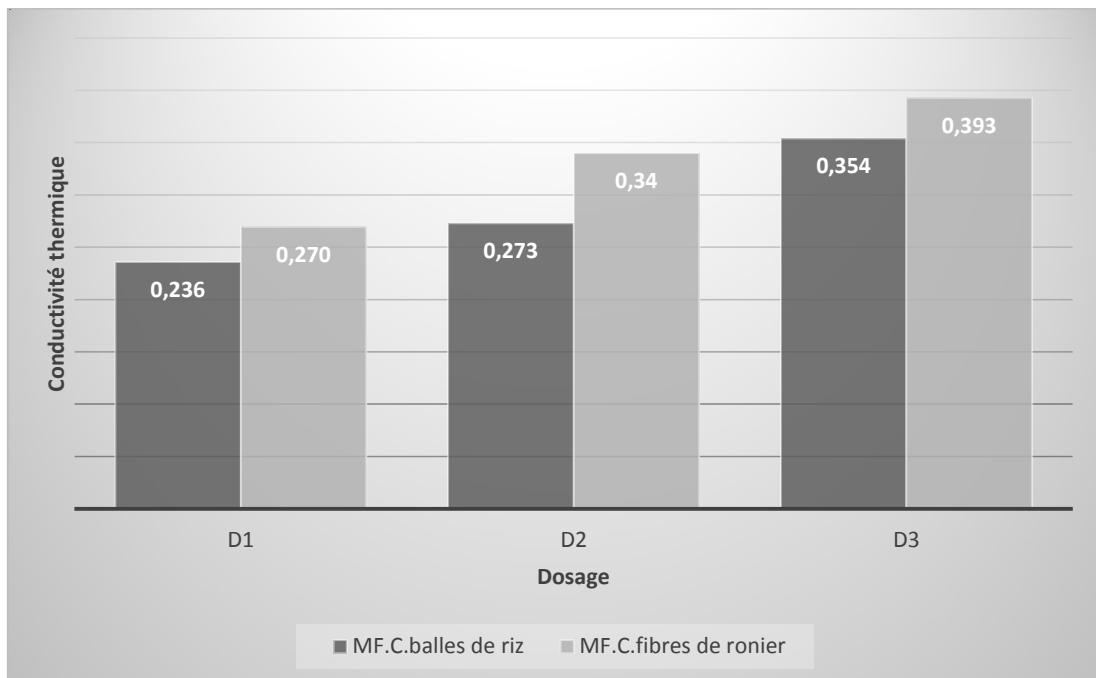


Figure 5-56 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage des deux composites pour le mélange fin

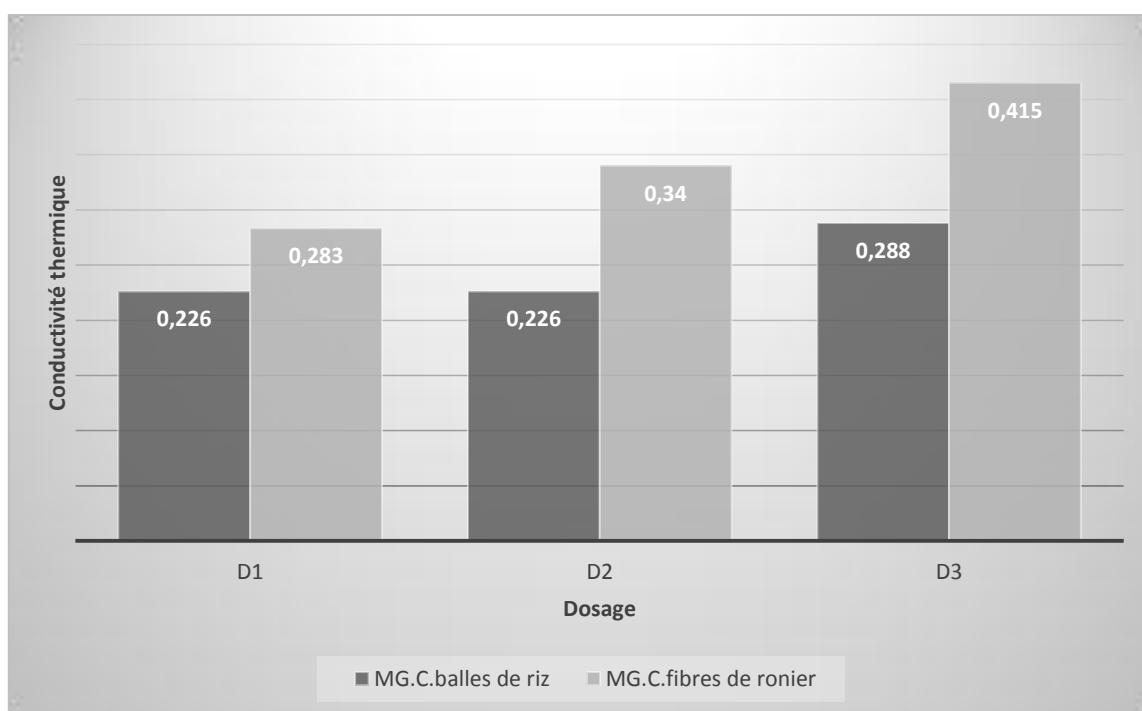


**Figure 5-57 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage des deux composites pour le mélange grossier**

→ Selon la conductivité thermique

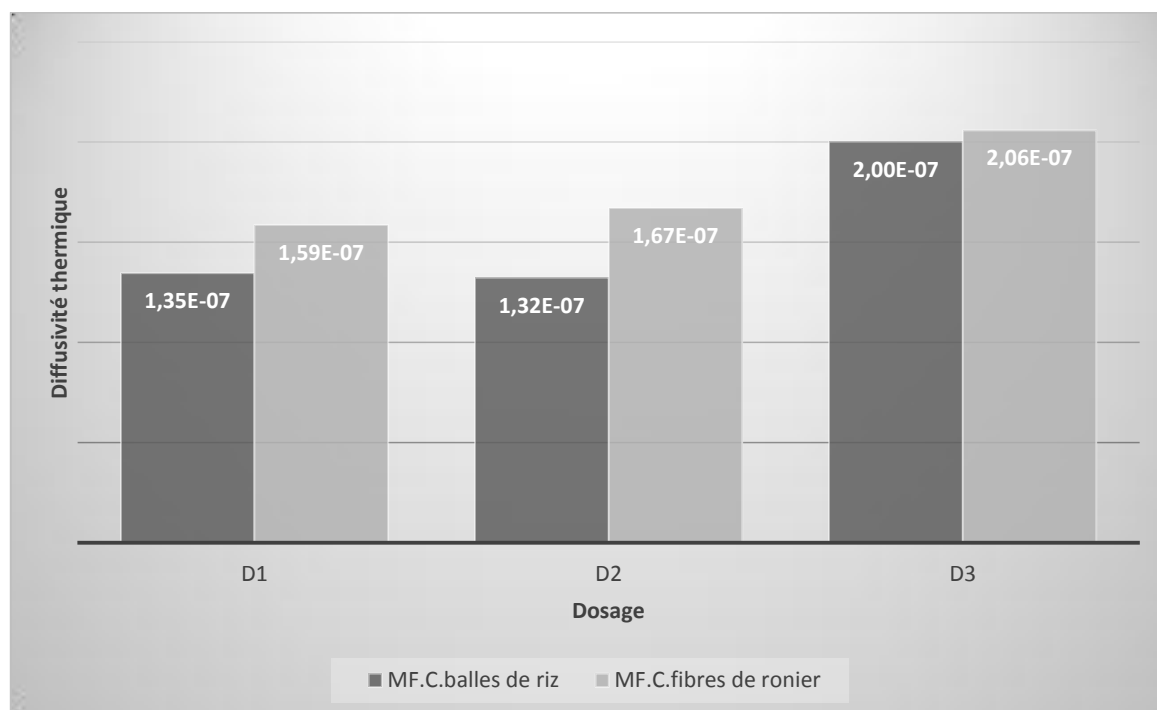


**Figure 5-58 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage des deux composites pour le mélange fin**

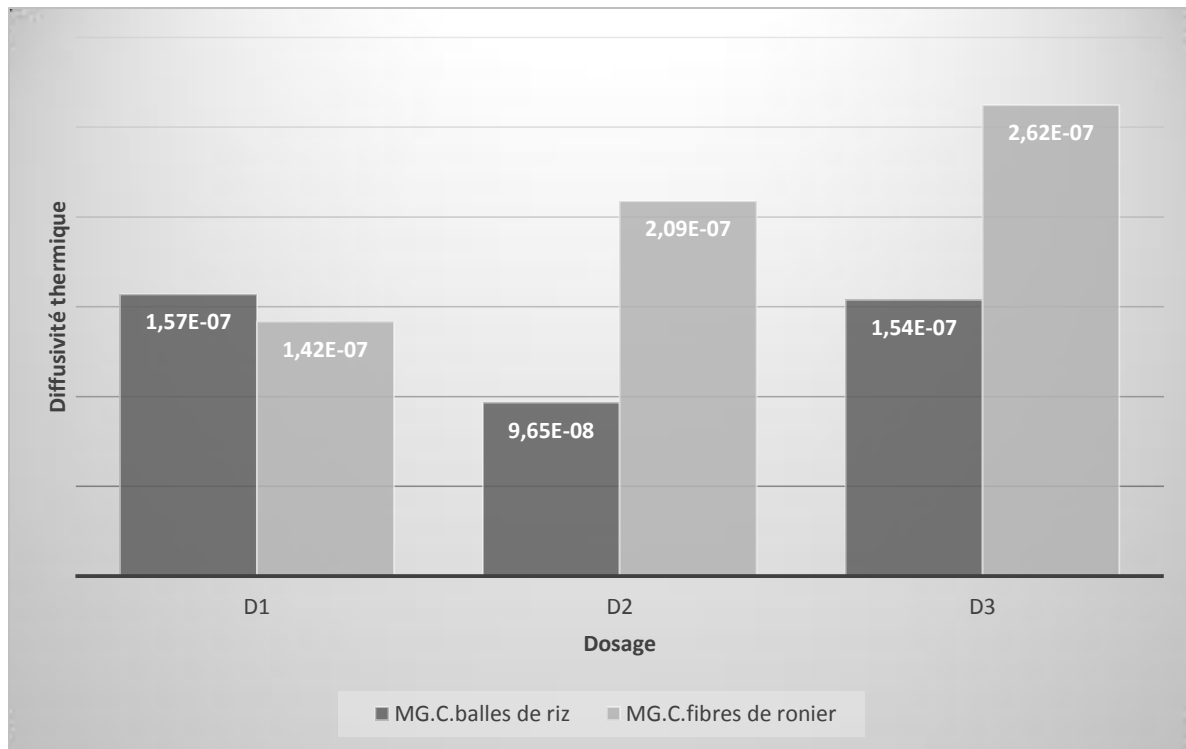


**Figure 5-59 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage des deux composites pour le mélange grossier**

→ Selon la diffusivité thermique



**Figure 5-60 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage des deux composites pour le mélange fin**



**Figure 5-61 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage des deux composites pour le mélange grossier**

La comparaison des variations des différents paramètres pour les deux composites montre que toutes les valeurs obtenues pour les composites balles de riz-ciment sont en général inférieures à celles mesurées sur les composites fibres de rônier-ciment (figures 5-56 à 5-61).

En effet, que l'effusivité thermique des composites fibres de rônier-ciment est plus élevée que celle des composites balles de riz-ciment. Physiquement, cela signifie que le composite de fibres de rônier présente une plus importante capacité de stockage de chaleur que le composite de balles de riz.

De plus, la conductivité thermique quant à elle, plus élevée pour le composite de fibres de rônier-ciment traduit que ce dernier est moins isolant que le composite de balles de riz.

Cependant, la diffusivité thermique du composite de balles de riz est plus faible que celle du composite de fibres de rônier, cela favorise alors le composite balles de riz-ciment quant à la capacité d'amortir la diffusion de la chaleur en tant que matériau de construction.



## 5.8 Conclusion

La prise en compte de l'impact environnemental des constructions conduit à s'interroger et à proposer des matériaux alternatifs de construction. Dans ce cadre il est approprié de caractériser les composites résultants du mélange d'une matrice cimentaire avec des fibres végétales de *borassus aethiopum mart* et les balles de riz. Dans un premier temps, il a été prouvé que les fibres non traitées sont compatibles avec le ciment utilisé. Les résultats obtenus ont permis d'établir l'existence de valeurs optimales pour la quantité de liant et la quantité d'eau correspondant aux meilleures résistances mécaniques. Il ressort de cette étude que les composites fibres de *borassus aethiopum mart*-ciment présente des caractéristiques physique et mécanique qui sont meilleures comparativement à celles des composites balles de riz-ciment. Phénomène inverse pour les caractéristiques thermiques puis que les meilleurs performances thermiques se retrouvent avec les composites de balles de riz-ciment. Bien que les capacités d'absorption des matériaux soient importantes, la légèreté constatée d'une part et leurs caractéristiques mécaniques et thermiques d'autres parts sont des atouts ouvrant de nombreuses perspectives quant aux applications possibles des composites. Les composites ainsi formulés peuvent être utilisés pour la fabrication des tuiles et la réalisation des cloisons.

---

## **Conclusion et perspectives**

## CONCLUSION GENERALE

Les travaux menés dans cette étude s'inscrivent dans la problématique de valoriser les sédiments en présentant un bilan écologique avantageux. De nombreux projets ont permis de mettre en place et de valider l'utilisation des sédiments dans diverses filières de valorisation. Cependant leurs utilisations nécessitent souvent des traitements coûteux et avec un fort impact environnemental. Une réutilisation en tant que matière première des sédiments dans la fabrication d'un béton légers permettrait de simplifier de manière considérable l'impact environnemental tout en appliquant un traitement pour inerte les polluants présents dans les sédiments.

Rappelons que l'objet de cette mémoire est la formulation et la caractérisation des bétons légers. En effet, il a été conclu qu'ils se caractérisent essentiellement par leurs faible masse volumique, adaptable aux exigences, ces bétons normalement réalisés par trois manières, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de la partie fine du granulat. Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

Nous nous proposons, ici, de dresser le bilan des contributions apportées sur les deux parties concernant la revue bibliographique et la partie expérimentales.

La première partie est consacrée à la revue bibliographique qui nous a permis de bien préciser le contexte scientifique et technique pour le béton léger.

Dans un premier temps, la compatibilité des biomasses en étude avec le ciment CMII B32.5 est prouvée bien que celles-ci n'ont subi aucun traitement. Aussi, les paramètres susceptibles de déterminer l'état des propriétés physiques, mécaniques et thermiques des matériaux sont recensés. Différentes granulométries, divers ratios Eau/Ciment et plusieurs taux de particules de balles de riz et de fibre de rônier ont été étudiés en vue de sélectionner les conditions conduisant au composite ayant les meilleures propriétés.

Les résultats obtenus ont permis d'établir l'existence de valeurs optimales pour le taux de particules et la quantité d'eau correspondant aux meilleures résistances mécaniques. Aussi, est-il établi que la granulométrie des particules a un fort impact sur les

caractéristiques du composite; les essais réalisés dans ce sens révèlent que pour le composite balles de riz-ciment, les résistances enregistrées sur les éprouvettes diminuent lorsque la taille des particules augmente. Pour les composites fibres de rônier-ciment, les résistances augmentent avec la taille des fibres.

Quant aux propriétés physiques, toutes les éprouvettes réalisées ont des densités inférieures à  $2000 \text{ kg/m}^3$  permettant de classer les matériaux mis au point dans la catégorie des bétons légers. Bien que les capacités d'absorption des matériaux soient importantes, la légèreté constatée est un atout ouvrant de nombreuses perspectives quant aux applications possibles de ces composites.

Les propriétés thermiques sont influencées par le dosage en ciment, la taille des granulats de biomasse végétale. En général, l'effusivité, la conductivité thermique et la diffusivité varient tous proportionnellement avec le dosage en ciment dans le mélange. L'effet de la taille des granulats n'est pas quant à lui uniforme sur ces caractéristiques thermiques.

En considérant seulement pour critères de comparaison, les propriétés physico-mécaniques, les composites fibres de rônier-ciment répondent mieux que les composites balles de riz-ciment. Mais, lorsque les performances thermiques sont recherchées, le matériau le plus recommandable est le béton de balles de riz.

Notre étude est en parfaite symbiose sur le plan Socio - Economique avec les politiques nationales du Burkina Faso en matière de développement de l'agriculture et spécifiquement la Stratégie Nationale de Développement de la Riziculture (SNDR). Elle s'accorde avec son objectif spécifique n° 2 ayant trait à la fourniture du marché en riz de façon qualitative et quantitative et s'intègre dans l'axe 3 de la valorisation de la production rizicole, où elle pourrait contribuer à la mise en œuvre de cette stratégie.

Ce travail de thèse orienté vers les éléments préfabriqués a permis d'approfondir les connaissances sur les bétons de biomasse végétale (que sont les fibres de rônier et les balles issus du décorticage du riz). Ces matériaux possèdent encore probablement de grandes possibilités d'amélioration en vue de leur utilisation pour la construction.

## **Perspectives**

Les bétons légers à base de biomasses végétales posent de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés mécaniques, thermique et acoustique, Les recherches sur les composites peuvent se poursuivre sur plusieurs niveaux :

- Étude des paramètres rhéologiques fondamentaux, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique et leur relation avec les autres paramètres de la maniabilité.
- Étude des caractéristiques acoustique des composites.
- Etude du vieillissement des composites.
- Etude de l'influence des biomasses sur l'hydratation du ciment peut être approfondie à l'échelle microscopique. Ceci passe forcément par leur caractérisation chimique.

---

## Bibliographie

- ☞ Abdullah A., Jamaludin S., Noor M. & Hussim K., 2011. *Composite Cement Reinforced Coconut Fiber: Physical and Mechanical Properties and Fracture Behavior*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(5), pp.1228-40.
- ☞ Adjovi E., Gbaguidi V., Gbaguidi G., 2010. *Composition à base des déchets des industries de bois et de polystyrène expansé d'emballage: Etude d'une possibilité d'application*. Vol.11, cames-série A.
- ☞ Alberto M., Mougele E., Zoulalian L., 2000. *Compatibility of some tropical hardwood species with Portland cement using isothermal calorimetry*. Forest Products Journal, 9(50).
- ☞ Arnaud L., Boyeux B., 2001. *La chenevotte comme nouveau granulat écologique et performant pour une utilisation dans le bâtiment*. Académie d'agriculture de France.
- ☞ Assael M.J., Antoniadis K.D., Tzetzis D., 2008. *The use of transient hot-wire for measurement of the thermal conductivity of an epoxy-resin reinforced with glass fibers and/or carbon multi-walled nanotubes*. Composites Science and Technology 68 pp. 3178-3183.
- ☞ Benoit RINGUETTE, 2008. *Matériaux Composites a base de Fibre de Chanvre*. Département de Génie Chimique Faculté de Science et Genie Université Laval Quebec. 4-5 p.
- ☞ Bahloul O., Bourzham A., Bahloul A., 2009. *Utilisation des fibres végétales dans le renforcement des mortiers de ciment (cas de l'alpha)*. In SBEIDICO-1st International
- ☞ Carslaw H., Jaeger J., 1959. *Conduction of heat in solids*. Oxford, university press.
- ☞ CCRB-BENIN (Conseil de Concertation des Riziculteurs du Bénin), 2010. *La riziculture dans le pays*. Rapport.

- 
- ☞ Cerezo V., 2005. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon.
- ☞ Chergui N., 2010. *Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux*. Thèse de magister. Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou.
- ☞ CIMBETON, 2006. *Les bétons: formulation, fabrication et mise en oeuvre Tome 2*. Fiche technique. Paris: Amprincipe Paris.
- ☞ Contant M., 2000. *Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux*. Maîtrise de l'Ecole de Technologie Supérieure (Université de Québec).
- ☞ Coquard R., Baillis D., Quenard D., 2006. *Experimental and theoretical study of hot-wire method applied to low-density thermals insulators*. International Journal of Heat and Mass Transfer 48 pp. 4511-4524.
- ☞ Cox J., 2005. *Le béton cellulaire, matériau d'avenir*. Bruxelles: Ed. Jacques Sizaire.

- 
- ☞ Degiovanni A., 1999. *Transmission de l'énergie thermique*. Techniques de l'Ingénieur, BE 8 200.
- ☞ Djoudi A., Khenfer M., Bali A., 2009. *Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier*. In First International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. Oran (Algérie).
- ☞ DO THI, V.V., 2011. *Matériaux composites fibres naturelles/polymères biodégradables ou non*. Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble et Université des Sciences de Hochiminh Ville.
- ☞ Doko V. , Hougan A. , Adjovi E . , Ayite D., Bedja K ., 2012. *Bétons légers à base de balles de riz: étude de la conductivité thermique*. Actes du Colloque Internationale Francophone d'Energétique et Mécanique, (CIFEM) Ouagadougou (Burkina Faso). pp. 304-309
- ☞ Dreux G., 1990. *Nouveau guide du béton*. Paris, France: Eyrolles.
- ☞ Dupain R., 2004. *Granulats, sols, ciments et bétons: caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire*. Casteilla.
- ☞ Escadeillas G., 2006. *Les éco-matériaux dans la construction: enjeux et perspectives*. Toulouse, 2006. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton.
- ☞ EuroLightCon, 1998. *Definitions and international consensus report*. Document BE96-3942/R1.
- ☞ Expanded shale clay and shale institute, 2001. *Lightweight concrete: history, applications, economics*.
- ☞ FAO, Food Agriculture Organization, (rapport 2004).
- ☞ FRD, 2012. *Fibres et renforts végétaux*. Troyes.



- 
- ☞ Gbaguidi V., Gbaguidi G., Gibigaye M., Adjovi E., Sinsin B., Amadji T., 2010. *Détermination expérimentale des principales caractéristiques physiques et mécaniques du bois de rônier (borassus aethiopum mart) d'origine béninoise.* , J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), série E, 12(2) : 1-9.
- ☞ Giflard P., 1967. *Le palmier rônier, Borassus Aethiopum mart.* Revue Bois et forêts des tropiques, (116), pp.3-13.
- ☞ Govin A., 2004. *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment - Modification de l'hydratation du ciment par le bois.* Thèse de doctorat. Université Jean Monnet de Saint Etienne.
- ☞ Gustafsson S., 1987. *Transient hot-strip techniques for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity.* The Rigaku Journal, Vol. 4 N° ½.
- ☞ Gustafsson S., 1990. *Transient plane source technics for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements for of solids materials.* Rev. Sci. Instrum., vol. 62, n°3, pp. 797-804.
- ☞ Gustafsson S., Karawachi E., Aslam Chohan M., 1886. *Thermal transport studies of electrically conducting materials using the transcient hot-strip technique.* J. Phys. D. Appl. Vol. 19, pp. 727-735.
- ☞ Gustafsson S., Karawachi E., Nazim Khan M., 1979. *Transcient hot strip method for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids.* J. Phys. D. Appl. Vol. 12.
- ☞ Hachmi M., Moslemi A., Campbell G., 1990. *A new technique to classify the compatibility of wood with cement.* Wood science technology, 24, pp.345-354.
- ☞ Ismail M., Bin Hashim H., 2008. *Palm oil fiber concrete.* In The 3rd ACF International Conference. University Technology, Malaisie.

- 
- ☞ Jannot Y, Rémy B, Degiovanni A., 2009. *Measurement of thermal conductivity and thermal resistance with a Tiny Hot Plate*. High Temperatures High Pressures; 39(1): 11- 31.
- ☞ Jannot Y., Meukam P., 2004. *Simplified estimation method for determining the thermal effusivity and the thermal conductivity using a low cost hot strip*, Meas. Sci. Technol. 15 pp. 1932- 1938.
- ☞ Jauberthie R., Tamba S., Rendell F., Ciss K., Lanos C., 2002. *The use of cellulose waste in lightweight concrete : Improvement or properties by admixtures*. Scotland,United Kingdom: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee.
- ☞ KE Y., 2008. *Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation*. Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise.
- ☞ Krapez J., 2004. *Mesure de l'effusivité thermique*. *Techniques de l'Ingénieur*, R 2 957.
- ☞ Kriker A., Debicki G., Khenfer M. & Chabannet M., 2005. *Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate*. Science direct, (27), pp.554-564.
- ☞ MAEP (Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche), 2010. *Stratégie Nationale pour le Développement de la Riziculture au Bénin (SNDR)*. Rapport.
- ☞ MAEP (Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche), 2009. *Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole (PSRSA, 2009-2015)*.
- ☞ Magniont C., 2010. *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse.
- ☞ Mahmoud T., 2005. *Etude de matériaux minéraux renforcés par des fibres organiques en vue de leur utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts*. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

- 
- ☞ Merzoud M., Habita M., Gouasmia A., 2009. *Influence d'un traitement hydrothermique sur les caractéristiques physico-mécaniques de composites cimentaires à base de diss*. In SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. Oran – Algérie. ENSET
- ☞ Merzoud M., Rejdel B., Habita M., 2008. *Elaboration et caractérisation d'un matériau composite cimentaire à base de diss « Ampelodesma Mauritanica »*. Journal des Sciences de l'ingénieur, (9), pp.86-94.
- ☞ Meukam P., 2004 , *Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique des bâtiments*. Thèse de Doctorat, Université Cergy-Pantoise.
- ☞ Morgan C. (2015). *Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agro bétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'écoconstruction*, Thèse de Doctorat, l'Université de Montpellier, France, 214p.

- 
- ☞ Moslemi A., Lim Y., 1984. *Compatibility of southern hardwoods with portland cement*. Forest Products Journal, 7(32).
- ☞ Nardjes C., 2005. *Matrice cimentaire renforcée de fibres: valorisation des sous - produits (polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois)*. Thèse de magister. Université Mentouri Constantine.
- ☞ Neville M., 1981. *Properties of concrete*. London: Pitman Publishing inc.
- ☞ Nguyen T.T., 2010. *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*. Thèse de doctorat. Université de Bretagne - Sud.
- ☞ Nguyen T.-T., Picandet V., Amziane S., Baley C., 2008. *Optimisation de l'usage du béton de chanvre dans la conception d'un éco-matériau pour le génie civil*, Revue des composites et des matériaux avancés, Vol. 18/12, pp 227-232.
- ☞ (ONU) Organisation des Nations unies 1997. *Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*
- ☞ PAGE J., BOUTOUIL M., KHADRAOUI F., GOMINA M. 2015. *Etude des propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres de lin*, Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015 Mines Douai, France, pp 1-10.
- ☞ Reading T., 1985. *Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces*. Concrete International.
- ☞ Robert, R. F. 2005. *Bast and other plant fibres*. Cambridge, Angleterre : Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute.

- 
- ☞ Sandermann W., Kohler R., 1964. *Studies on mineral-bonded wood materials. IV. A short test of aptitudes of woods for cement bonded materials.* Hoolzforschung, (53), pp.104-108.
- ☞ Scida D., Assarar M., Ayad M., Pollâne C., 2011. *Effet de l'humidité sur le comportement mécanique des composites à fibres de lin.* In JNC. Poitiers (France).
- ☞ Sedan D., 2007. *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite.* Thèse de doctorat. Université de Limoges.
- ☞ SEDAN D., PAGNOUX C., SMITH A., CHOTARD T. 2007. *Propriétés mécaniques de matériaux enchevêtrés à base de fibre de chanvre et matrice cimentaire.* 8ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, France, 7p.

- 
- ☞ Short A., Kinnenburgh M., 1968. *Lightweight concrete*. London: C.R Books.
- ☞ Sofred consultants, 2011. *Marchés et attentes dans le domaine des agromatériaux à base de fibres naturelles*. Groupe Adit.
- ☞ Solomon-Ayeh A., 1994. *Studies of strengths of stabilized laterite blocks and rendering mortars*. Building Research and Information Volume 22 Number 3.
- ☞ Tamba S., 2001. *Bétons légers à base des déchets cellulosiques*. Thèse de doctorat. Rennes-France: INSA de Rennes
- ☞ Tamba S., Voumbo L., Wereme A., Gaye S., Sissoko G., 2007. *Durabilité des bétons légers à base de copeaux de bois*. Vol. 7, pp.67-72.
- ☞ Tang A., Cui Y., Le T., 2008. *A study on the thermal conductivity of compacted bentonites*. Applied Clay Science, vol. 41, pp. 181-189.
- ☞ Taoukil D., El Bouardi A., Ajzoul T., Ezbakhe H., 2011. *Caractérisation mécanique et hydrique d'un béton allégé avec les résidus de bois*. Revue internationale d'héliotechnique, n° 43, pp.1-7.
- ☞ Trouy-Triboulot M., Triboulot, 2001. *Matériau bois, structure et caractéristiques*. Techniques de l'ingénieur, traité de Construction.
- ☞ TUAN A. P. (2018). *Formulation et caractérisation d'un composite terre-fbres végétales : la bauge*, thèse de Doctorat, Normandie Université, France, 178p.

- ☞ Vianou A., Girardey A., 1991. *Diffusivité thermique des matériaux de construction, mesure par la méthode du régime régulier*. Revue générale de thermique 3, rue Henri-Heine, 75016 Paris n° 352: pp 233-239.
- ☞ Vivancos J., Soto J., Perez I., Ros-Lis J., Martinez-Manez R., 2009. *A new model based on experimental results for the thermal characterization of bricks*. Building and Environnement, vol. 44, pp. 1047-1052.
- ☞ Wilson N., 2008. *Advances of the hot wire technique*. Journal of the European Ceramic Society, vol. 28, pp. 15-20.

# ANNEXES



---

## **Annexes pour les composites fibres de rônier-ciment**

**Annexe I : Données des essais physiques sur le composite**

## Annexe I.1 : Récapitulatif des données enregistrées

<b>DOSAGE 400 kg/m<sup>3</sup></b>															
<b>DONNEES DE BASE</b>		<b>PESEES</b>							<b>Taux d'humidité</b>		<b>Masse volumique sèche</b>		<b>Absorption (%)</b>		
<b>Nomenclature</b>	<b>Masse avant étuvage (g)</b>		<b>Masse après étuvage (g)</b>		<b>Masse bocal+eau (g)</b>	<b>Masse bocal+épr+eau (g)</b>	<b>Masse après 24h d'immersion (g)</b>			<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
	MF-D1-E0,5	149	149	130	130	1322	1342	1342	184	184	12,75	12,75	1,18	1,18	41,54
MF-D1-E0,6	151	156	132	134	1322	1330	1334	187	192	12,58	14,10	1,06	1,10	41,67	43,28
MF-D1-E0,7	132	136	114	118	1322	1316	1324	165	171	13,64	13,24	0,95	1,02	44,74	44,92
MG-D1-E0,5	160	151	132	124	1322	1340	1344	184	173	17,50	17,88	1,16	1,22	39,39	39,52
MG-D1-E0,6	143	155	138	130	1322	1328	1330	196	185	3,50	16,13	1,05	1,07	42,03	42,31
MG-D1-E0,7	212	164	124	134	1322	1320	1332	205	202	41,51	18,29	0,98	1,08	65,32	50,75

<b>DOSAGE 450 kg/m<sup>3</sup></b>																
<b>DONNEES DE BASE</b>		<b>PESEES</b>								<b>Taux d'humidité</b>		<b>Masse volumique sèche</b>		<b>Absorption (%)</b>		
<b>Nomenclature</b>	<b>Masse avant étuvage (g)</b>		<b>Masse après étuvage (g)</b>		<b>Masse bocal+eau (g)</b>		<b>Masse bocal+épr+eau (g)</b>		<b>Masse après 24h d'immersion (g)</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
	MF-D2-E0,40	186	183	164	162	1322	1374	1366	182	193	11,83	11,48	1,46	1,37	10,98	19,14
MF-D2-E0,45	194	183	173	162	1320	1371	1367	218	204	10,82	11,48	1,42	1,41	26,01	25,93	
MF-D2-E0,50	212	164	184	144	1322	1344	1332	247	193	13,21	12,20	1,14	1,07	34,24	34,03	
MG-D2-E0,40	191	194	176	185	1320	1365	1375	221	233	7,85	4,64	1,34	1,42	25,57	25,95	
MG-D2-E0,45	199	210	168	173	1320	1358	1363	215	219	15,58	17,62	1,29	1,33	27,98	26,59	
MG-D2-E0,50	168	171	149	151	1320	1349	1352	196	196	11,31	11,70	1,24	1,27	31,54	29,80	

<b>DOSAGE 500 kg/m<sup>3</sup></b>															
<b>DONNEES DE BASE</b>		<b>PESEES</b>							<b>Taux d'humidité</b>		<b>Masse volumique sèche</b>		<b>Absorption (%)</b>		
<b>Nomenclature</b>	<b>Masse avant étuvage (g)</b>		<b>Masse après étuvage (g)</b>		<b>Masse bocal+eau (g)</b>	<b>Masse bocal+épr+eau (g)</b>	<b>Masse après 24h d'immersion (g)</b>			<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
	MF-D3-E0,35	183	217	164	193	1320	1370	1376	200	235	10,38	11,06	1,44	1,41	21,95
MF-D3-E0,40	203	203	179	180	1320	1371	1368	223	223	11,82	11,33	1,40	1,36	24,58	23,89
MF-D3-E0,45	227	177	203	156	1320	1365	1355	258	198	10,57	11,86	1,28	1,29	27,09	26,92
MG-D3-E0,30	189	162	169	145	1320	1370	1369	204	174	10,58	10,49	1,42	1,51	20,71	20,00
MG-D3-E0,35	195	204	173	180	1349	1402	1404	216	223	11,28	11,76	1,44	1,44	24,86	23,89
MG-D3-E0,40	189	196	166	174	1320	1365	1368	208	216	12,17	11,22	1,37	1,38	25,30	24,14

## Annexe I.2 : Données pour la cinétique d'absorption du composite

Identification de l'éprouvette: MF-D1-E0,5		
Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)
0	130	0,00
1	174	33,85
2	180	38,46
4	182	40,00
6	182	40,00
24	184	41,54
48	185	42,31
96	185	42,31
Masse sèche : 130g		

Identification de l'éprouvette: MF-D2-E0,5		
Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)
0	184	0,00
1	214	16,30
2	232	26,09
4	240	30,43
6	242	31,52
24	247	34,24
48	248	34,78
96	248	34,78
Masse sèche : 184g		

Identification de l'éprouvette: MF-D3-E0,4		
Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)
0,0	179	0,00
0,5	203	13,41
1,0	208	16,20
2,0	213	18,99
4,0	218	21,79
6,0	225	25,70
24,0	226	26,26
48,0	227	26,82
96,0	227	26,82
Masse sèche : 179g		

**Annexe II : Données des essais de traction par flexion et de compression****Annexe II.1 : Tableau récapitulatif des données**

<b>Dosage 400 kg/m<sup>3</sup></b>										
Nomenclature	Charge	Charge	Résistances		Résistances		Traction			
	flexion	compression	traction	compression	flexion	compression	par	Ecart-	Compression	Ecart-
	(N)	(N)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	Flexion	type	(Mpa)	type
							(Mpa)			
MF-D1-E0,5	1200	9700	10200	4,500	6,063	6,375				
	1300	10100	9700	4,875	6,313	6,063	4,625	0,217	6,179	0,320
	1200	7500	8900	4,500	4,688	5,563				
MF-D1-E0,6	1400	11900	10300	5,250	7,438	6,438				
	1600	10100	11500	6,000	6,313	7,188	5,500	0,433	6,844	0,433
	1400	11100	10800	5,250	6,938	6,750				
MF-D1-E0,7	1000	7800	7600	3,750	4,875	4,750				
	1100	7700	7800	4,125	4,813	4,875	4,000	0,217	4,823	0,047
	1100	7700	7700	4,125	4,813	4,813				
MG-D1-E0,5	1500	14100	14500	5,625	8,813	9,063				
	1500	14700	14800	5,625	9,188	9,250	5,750	0,217	9,156	0,197
	1600	14800	15000	6,000	9,250	9,375				
MG-D1-E0,6	1400	10100	10700	5,250	6,313	6,688				
	1400	11300	11700	5,250	7,063	7,313	4,875	0,650	6,813	0,351
	1100	10600	11000	4,125	6,625	6,875				
MG-D1-E0,7	800	8600	8700	3,000	5,375	5,438				
	700	8900	8400	2,625	5,563	5,250	3,125	0,573	5,396	0,129
	1000	8400	8800	3,750	5,250	5,500				

<b>DOSAGE 450 kg/m<sup>3</sup></b>										
<b>Nomenclature</b>	<b>Charge flexion (N)</b>	<b>Charge compression (N)</b>	<b>Résistances flexion (Mpa)</b>	<b>Résistances compression (Mpa)</b>	<b>Flexion (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Compression (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>		
MF-D2-E0,4	2200	16000	15800	8,250	10,000	9,875	7,750	0,573	10,010	0,390
	2100	16100	16300	7,875	10,063	10,188				
	1900	15000	16900	7,125	9,375	10,563				
MF-D2-E0,45	1800	16300	15500	6,750	10,188	9,688	6,500	0,433	9,698	0,480
	1600	15400	15800	6,000	9,625	9,875				
	1800	14100	16000	6,750	8,813	10,000				
MF-D2-E0,5	800	23200	21500	3,000	14,500	13,438	3,625	0,573	13,448	1,027
	1100	21000	22000	4,125	13,125	13,750				
	1000	18600	22800	3,750	11,625	14,250				
MG-D2-E0,4	1900	18700	19000	7,125	11,688	11,875	6,750	0,375	11,969	0,276
	1700	19500	19600	6,375	12,188	12,250				
	1800	18600	19500	6,750	11,625	12,188				
MG-D2-E0,45	1800	18900	20000	6,750	11,813	12,500	6,188	0,795	12,083	0,315
	1500	19600	19400	5,625	12,250	12,125				
	1200	18600	19500	4,500	11,625	12,188				
MG-D2-E0,5	1200	14700	14900	4,500	9,188	9,313	4,625	0,573	9,075	0,443
	1100	15100	12800	4,125	9,438	8,000				
	1400	13300	14600	5,250	8,313	9,125				

<b>DOSAGE 500 kg/m<sup>3</sup></b>										
<b>Nomenclature</b>	<b>Charge flexion (N)</b>	<b>Charge compression (N)</b>	<b>Résistances flexion (Mpa)</b>	<b>Résistances compression (Mpa)</b>	<b>Flexion (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Compression (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>		
MF-D3-E0,35	2100	26900	24500	7,875	16,813	15,313	7,625	0,217	15,521	0,721
	2000	24400	24800	7,500	15,250	15,500				
	2000	23400	25000	7,500	14,625	15,625				
MF-D3-E0,40	1600	22600	22400	6,000	14,125	14,000	6,500	0,433	14,094	0,337
	1800	23500	22000	6,750	14,688	13,750				
	1800	22100	22700	6,750	13,813	14,188				
MF-D3-E0,45	1400	19200	20000	5,250	12,000	12,500	5,500	0,217	12,229	0,298
	1500	20100	19400	5,625	12,563	12,125				
	1500	18900	19800	5,625	11,813	12,375				
MG-D3-E0,30	2300	23400	23600	8,625	14,625	14,750	8,375	0,433	14,427	0,609
	2100	23500	21100	7,875	14,688	13,188				
	2300	23400	23500	8,625	14,625	14,688				
MG-D3-E0,35	1900	25900	26000	7,125	16,188	16,250	7,750	0,573	16,260	0,453
	2100	26900	25400	7,875	16,813	15,875				
	2200	25100	26800	8,250	15,688	16,750				
MG-D3-E0,40	1900	23300	24800	7,125	14,563	15,500	7,250	0,217	15,125	0,680
	2000	24900	23500	7,500	15,563	14,688				
	1900	25600	23100	7,125	16,000	14,438				
Témoïn	1500	52000	55000	5,625	32,500	34,375	5,250	0,530	32,458	1,448
	1600	54000	49000	6,000	33,750	30,625				
	1300	51800	49800	4,875	32,375	31,125				



---

## Annexe III : Outils mathématiques

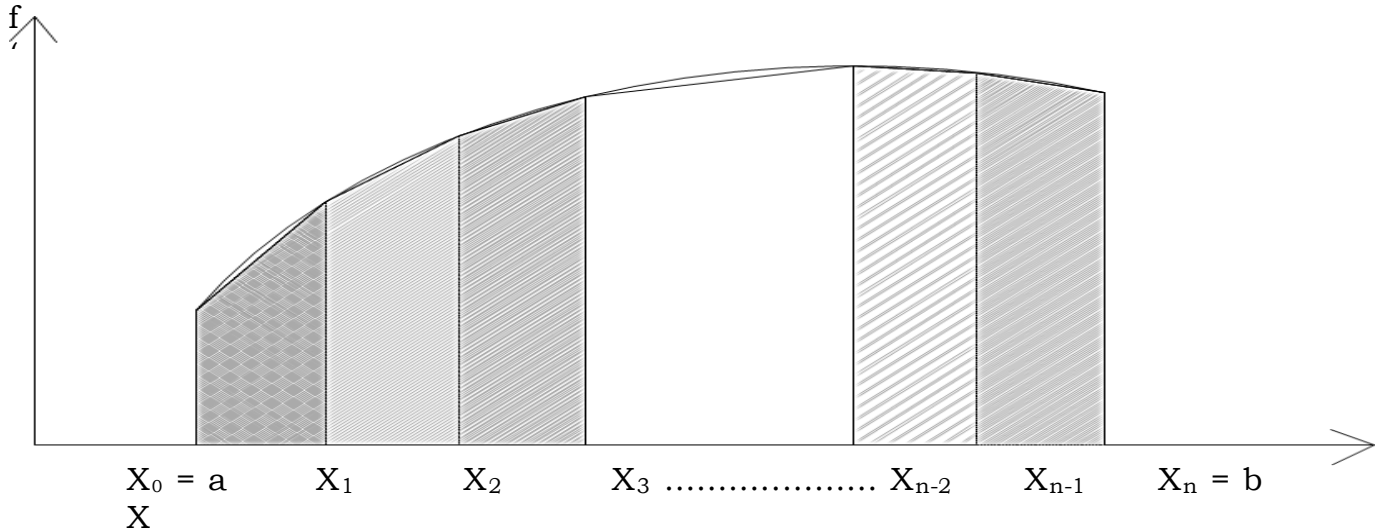
### Annexe III.1 : Calcul des aires par la méthode des trapèzes composés

#### Présentation du problème

En recherche, il est très courant de s'intéresser à l'évolution d'un paramètre donné en fonction d'un autre. On peut évoquer à titre d'exemple le suivi de la variation dans le temps de la résistance à la compression d'un béton. Pour ce faire, un programme expérimental est généralement initié au terme duquel une série de données est acquérir  $(x_i, y_i)$  avec  $i = 1 \dots N$ . Chaque couple de donnée  $(x_i, y_i)$  représente en fait un point dans un système de coordonnées cartésiennes d'axes  $ox$  et  $oy$ . Le paramètre  $y = f(x)$  étudié n'est connu qu'aux points  $x_i$  de la série. Il n'est donc disposé d'aucune information sur la valeur prise par la quantité  $y$  en un point  $x$  compris entre deux quelconques des données  $x_i$  de la série. Dès lors, trois principaux problèmes pourraient se poser. Le premier consiste en la recherche de l'expression analytique d'une fonction  $f(x)$  dont la courbe représentative dans un système d'axe  $(Ox, Oy)$  passe par l'ensemble des  $N$  points de la série de données. Le deuxième consiste en la recherche de l'image d'un point  $x \in [x_1 ; x_N]$  par les dérivées d'ordre  $k$  de la fonction  $f$  c'est-à-dire  $f^{(k)}$ , l'expression explicite de  $f$  n'étant pas connue. Le troisième type de problème est semblable au second. Il consiste en la recherche de la quantité  $A$  définie par  $\int_{x_1}^{x_N} f(X)dX$ , la fonction  $f$  n'étant connue qu'aux points  $x_i$ . La résolution de ce dernier type de problème fait appel à des techniques dites méthodes d'intégration numérique. Ces méthodes donnent une approximation  $A^*$  de la quantité exacte  $A$  recherchée. Le degré de précision de la valeur approchée  $A^*$  dépend de la méthode utilisée. Il existe plusieurs méthodes d'intégration numérique. Citons à titre d'exemple la méthode des trapèzes, les méthodes de Simpson, la méthode de Romberg, les quadratures de Gauss. Ici, que la méthode des trapèzes pour sa simplicité et sa précision sera présentée.

**Calcul de l'aire sous la courbe par la méthode des trapèzes**

Soit f une fonction continue en tout point d'un intervalle [a, b] et dont la courbe représentative est donnée sur le graphe ci-dessous.



*Décomposition de l'aire par la méthode des trapèzes*

Il est proposé de chercher une valeur approchée de l'intégrale de la fonction f, prise entre a et b. Pour cela, l'intervalle [a, b] est décomposé en n sous intervalles de longueur  $h = \frac{b - a}{n}$ . Les différents points engendrés sont notés  $x_i$ , pour  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ . En joignant les points d'intersection des droites d'équation  $x = x_i$  avec la courbe représentative de la fonction f, il est délimité sous la courbe des trapèzes tels que hachurés sur la figure ci-dessus. En sommant les aires des n trapèzes ainsi définis, une valeur approchée de l'intégrale recherchée qui n'est rien d'autre que l'aire du domaine délimité par la courbe représentative de la fonction f, l'axe (o x) et les droites d'équations  $x = a$  et  $x = b$  est obtenue. Ceci se traduit par les expressions qui suivent :

$$\int_a^b f(x)dx = \sum_{i=0}^{n-1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)dx \approx \sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1}))$$

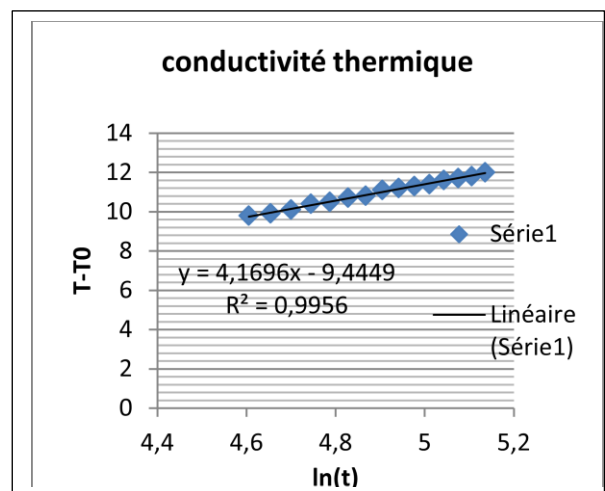
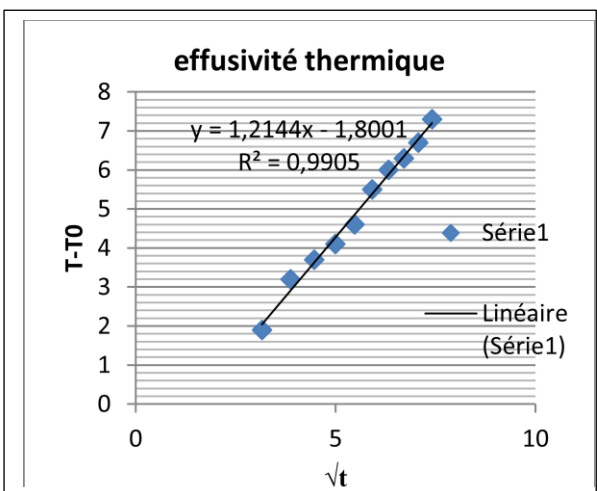
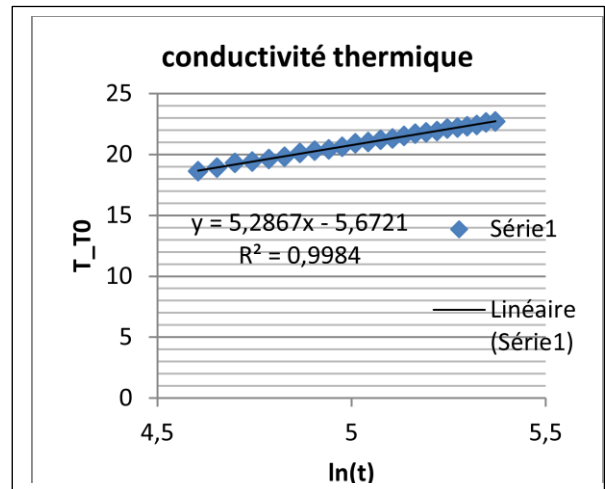
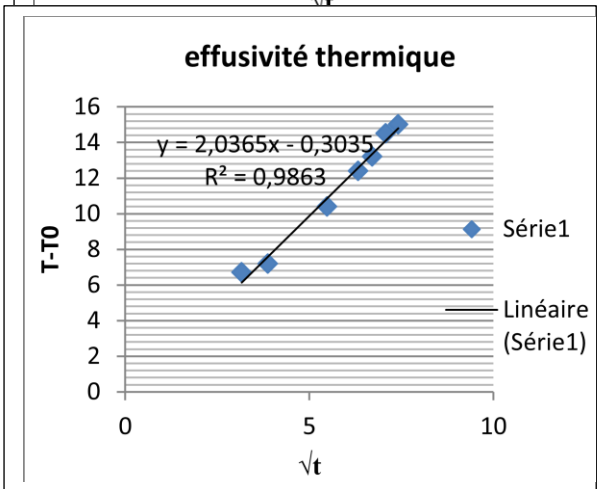
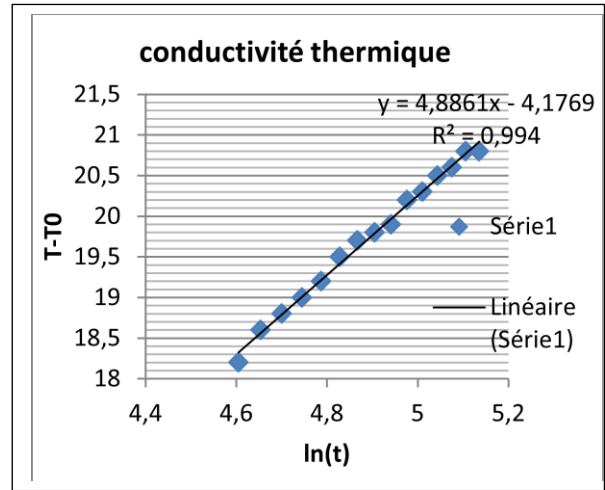
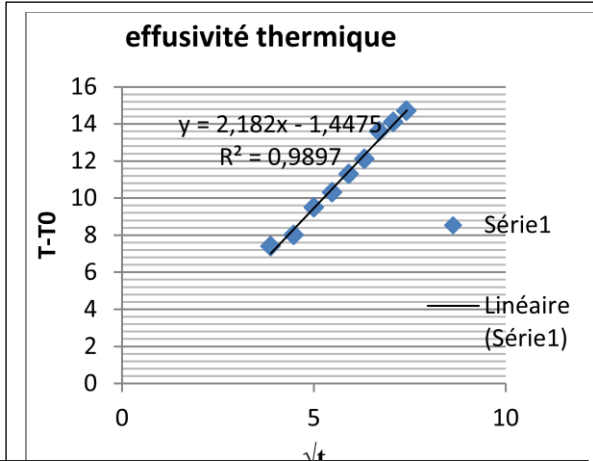
Toute transformation faite, la relation suivante est conclue :

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} (f(x_0) + 2[f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{n-1})] + f(x_n))$$

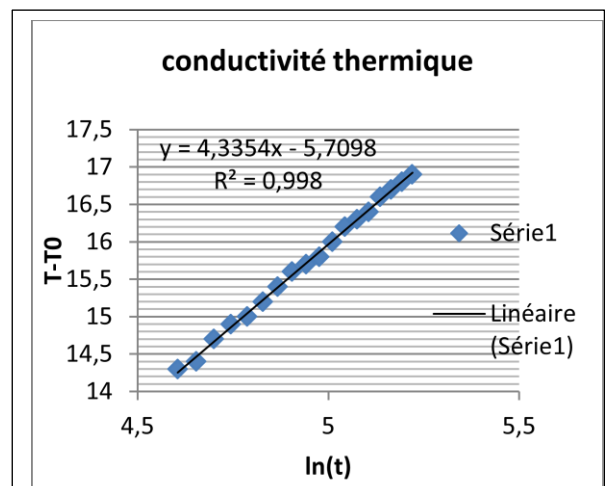
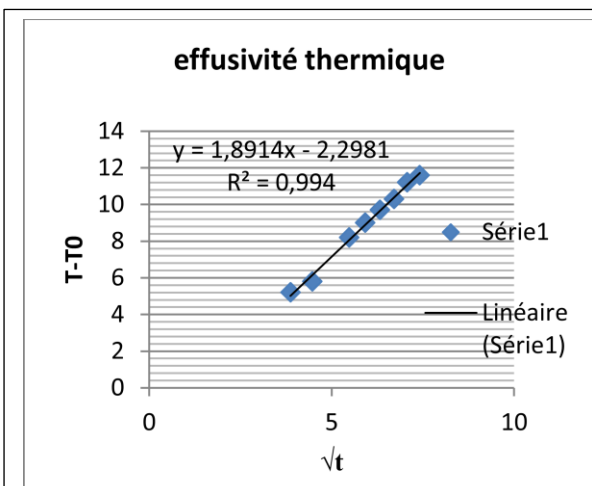
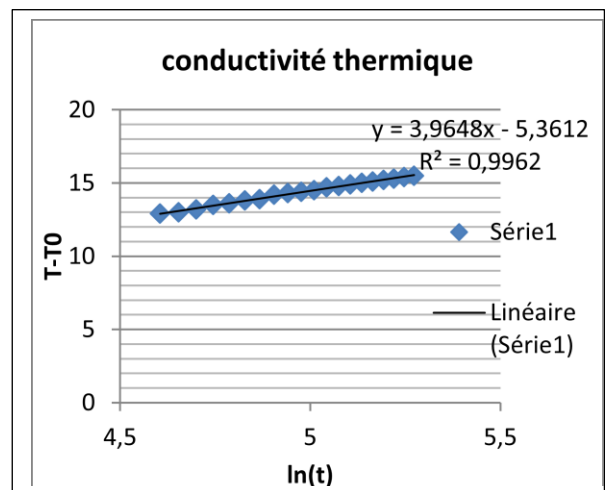
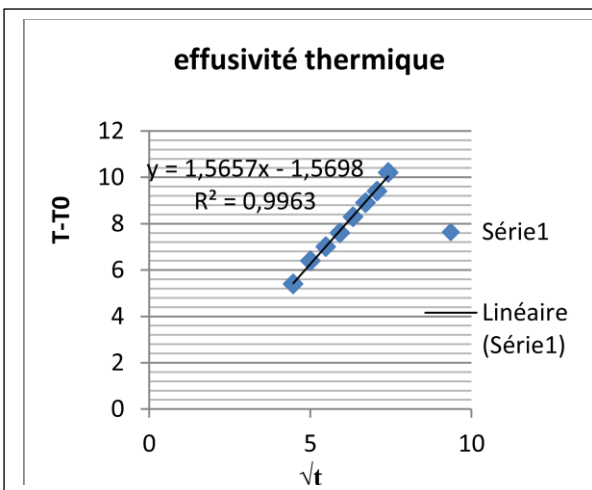
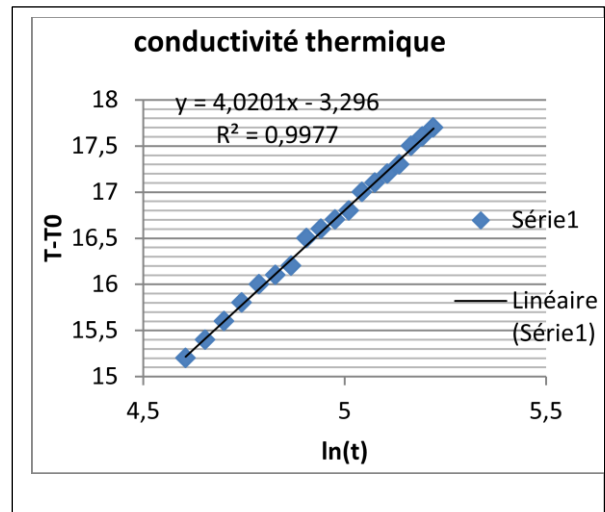
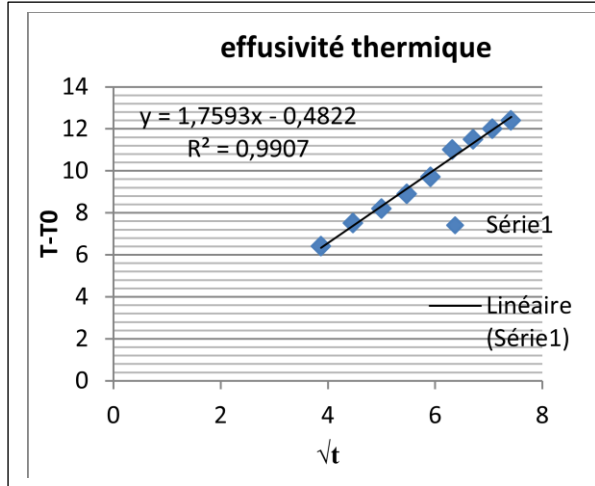
Cette dernière relation est connue sous le nom de **formule des trapèzes**.

**Annexe IV : Champ thermique dans les éprouvettes**

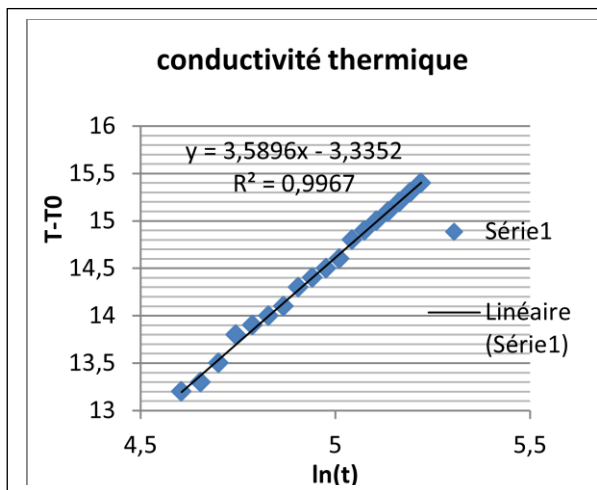
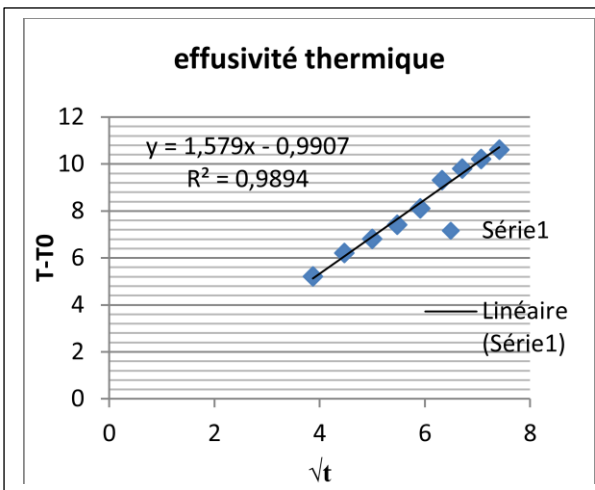
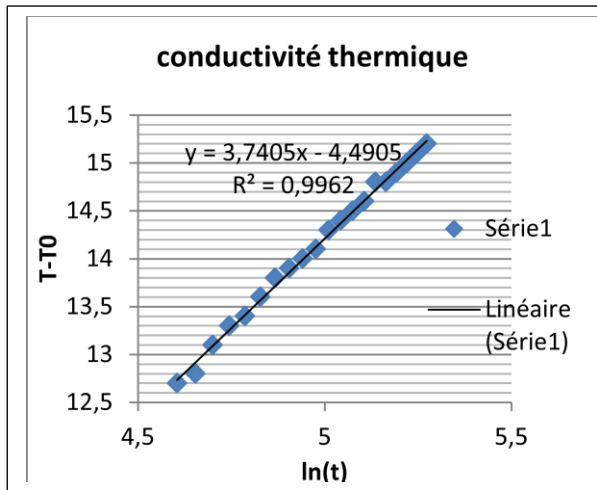
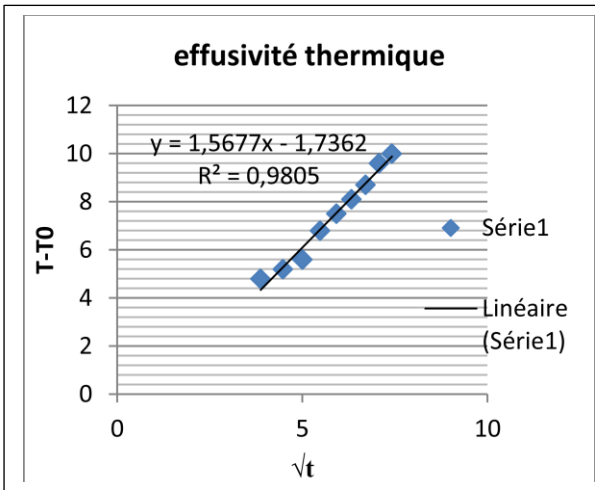
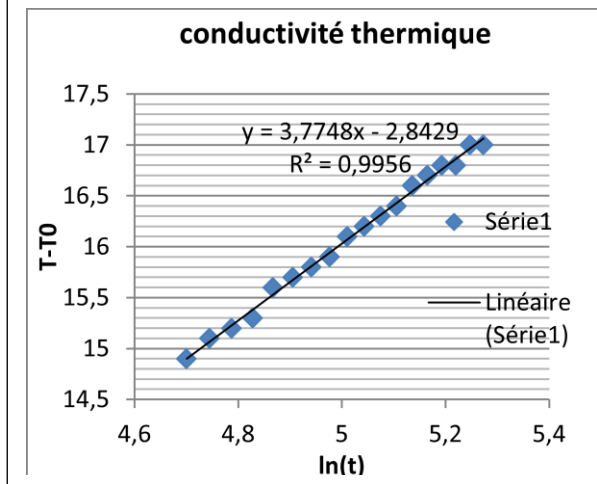
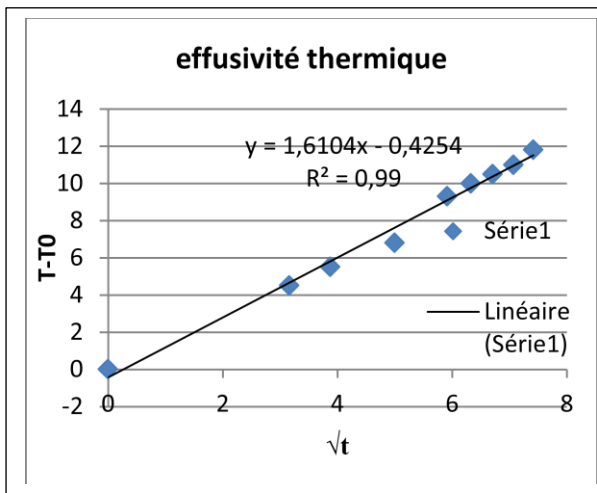
MF-400



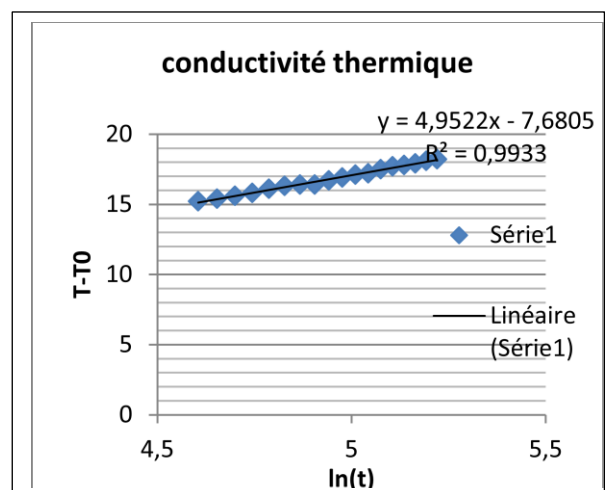
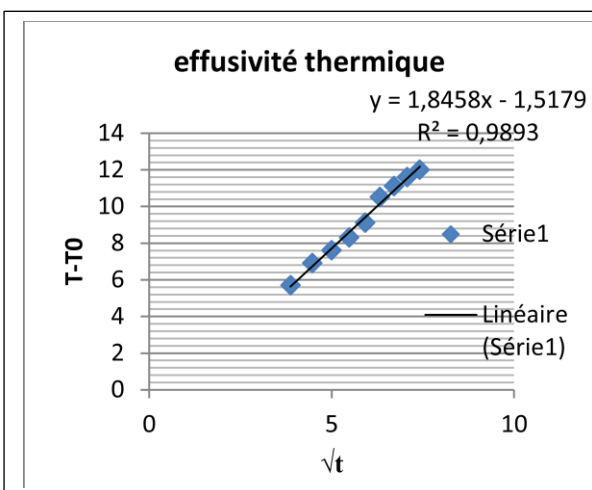
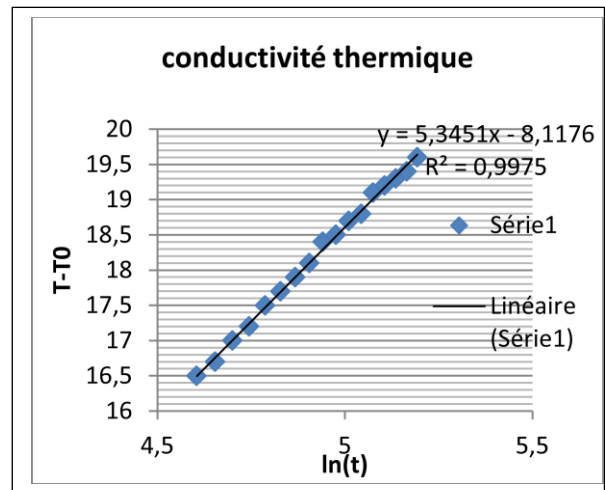
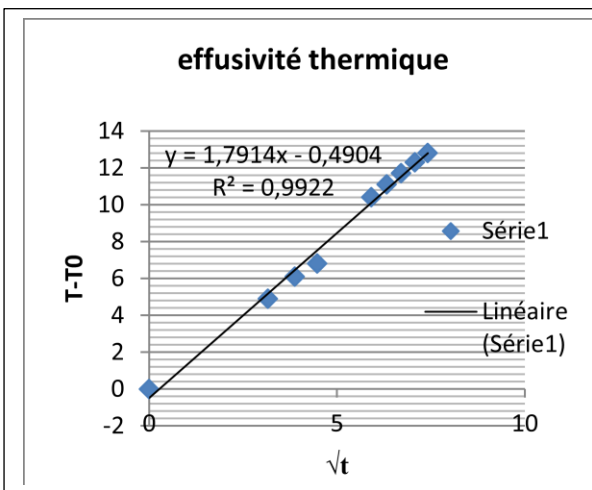
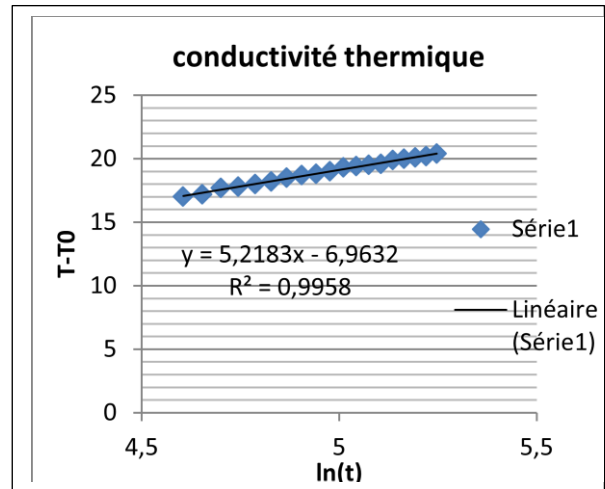
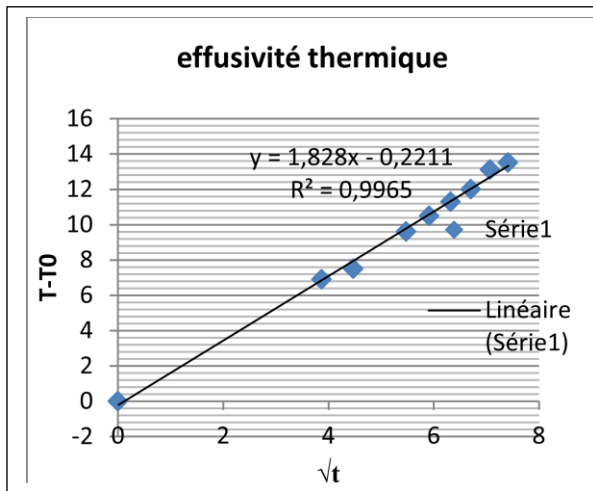
MF-450



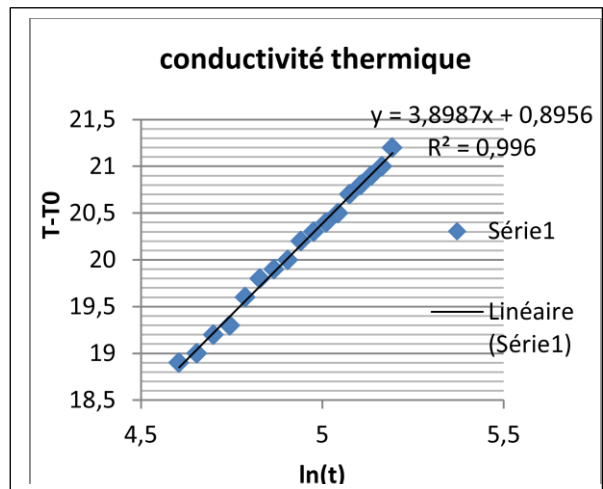
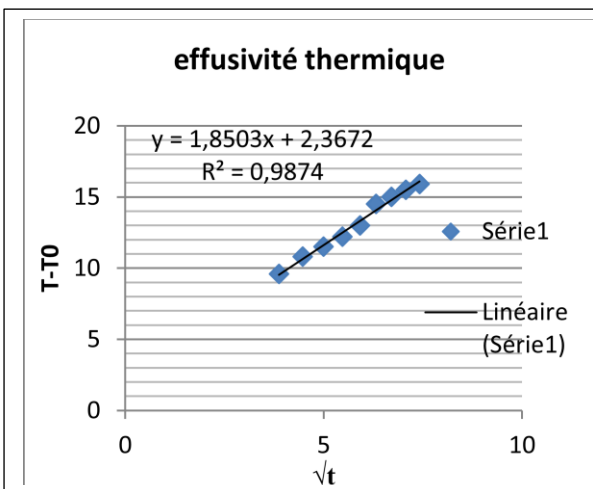
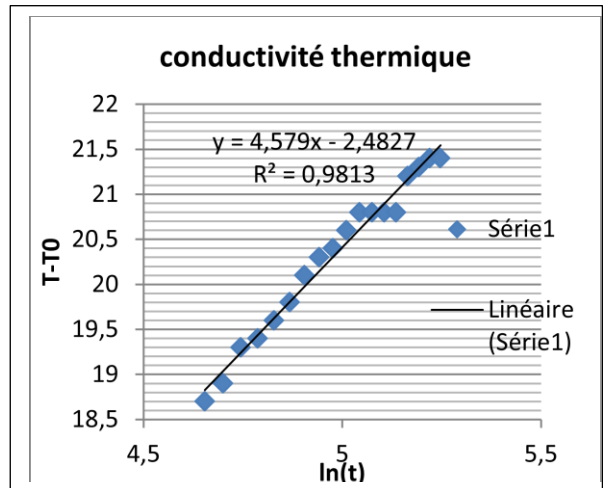
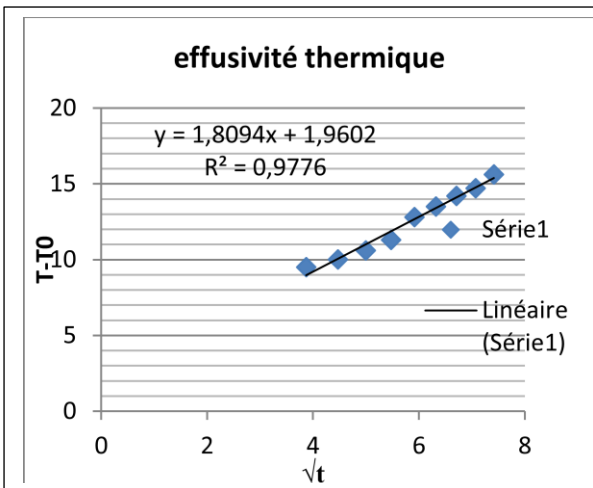
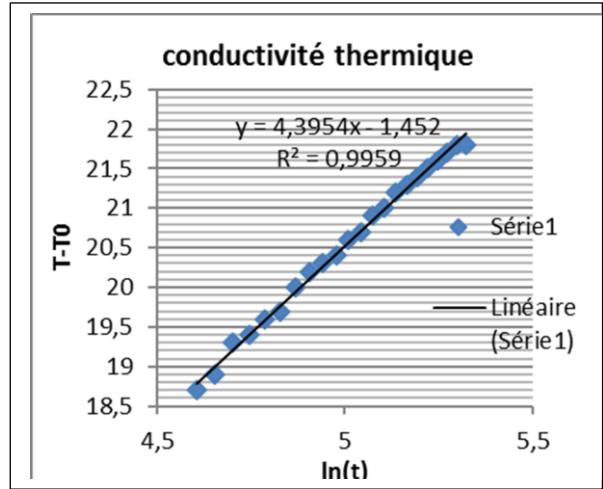
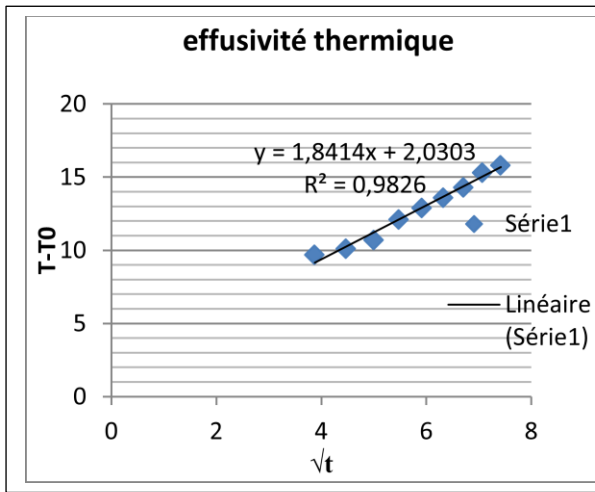
**MF-500**



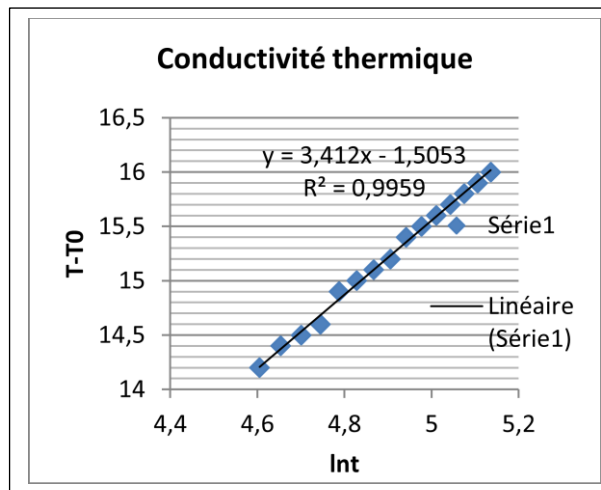
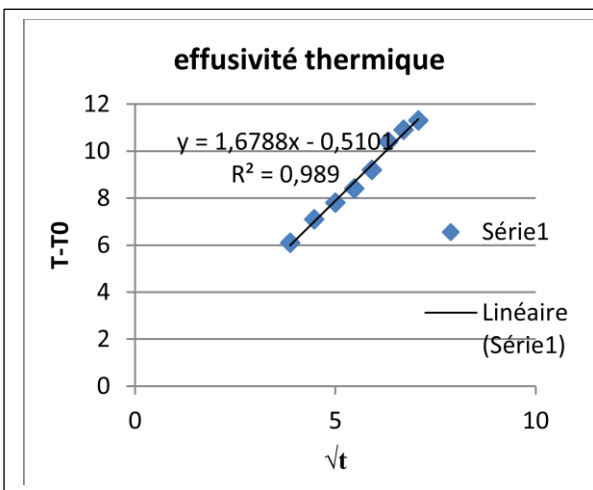
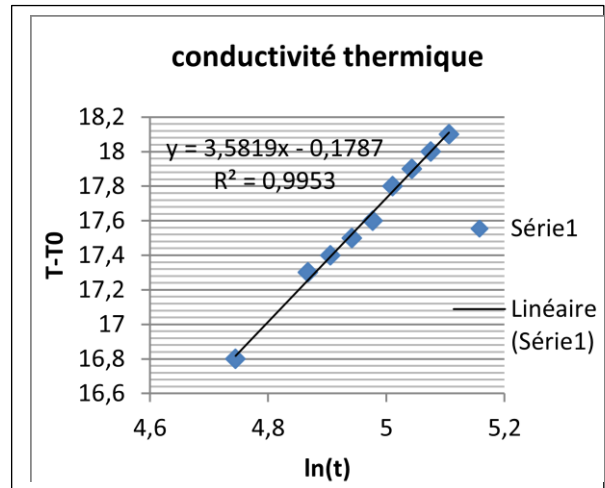
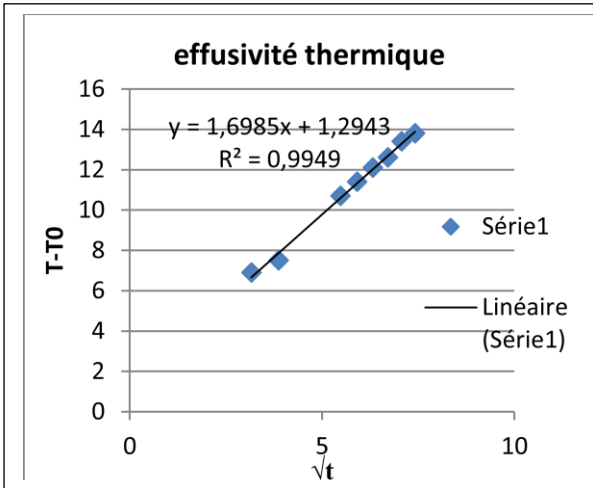
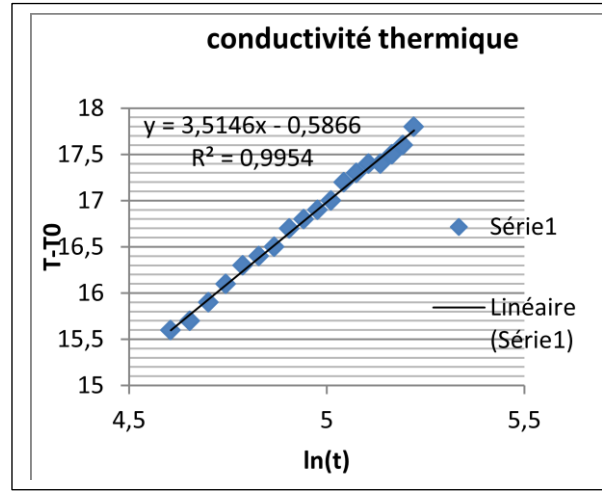
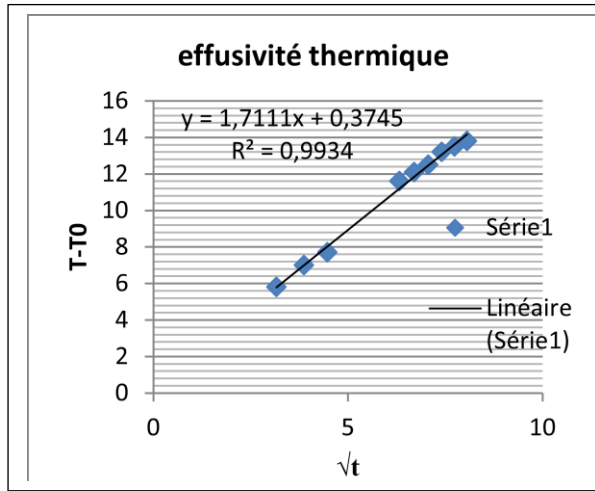
MG-400



MG-450



MG-500





---

**Annexes pour les composites  
fibres de rônier-ciment**

**Annexe V : Données des essais physiques sur les composites**

## Annexe V.1 : Récapitulatif des données enregistrées

<b>DOSAGE 450 kg/m<sup>3</sup></b>															
<b>DONNEES DE BASE</b>	<b>PESEES</b>								<b>Taux d'humidité</b>		<b>Masse volumique sèche</b>		<b>Absorption (%)</b>		
	<b>Nomenclature</b>	<b>Masse avant étuvage (g)</b>		<b>Masse après étuvage (g)</b>		<b>Masse bocal+eau (g)</b>	<b>Masse bocal+épr+eau (g)</b>		<b>Masse après 24h d'immersion (g)</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>
MF-D2-E0,20	190,00	191,00	166,00	168,00	1320,00	1352,00	1358,00	219,00	222,00	13,632	12,739	1,25	1,29	30,000	32,041
MF-D2-E0,30	178,00	190,00	155,00	167,00	1320,00	1362,00	1362,00	202,00	216,00	12,921	12,105	1,30	1,32	30,323	29,341
MF-D2-E0,35	195,00	169,00	169,00	147,00	1320,00	1357,00	1338,00	222,00	191,00	13,333	13,018	1,28	1,14	31,001	29,932
MG-D2-E0,35	144,00	165,00	125,00	144,00	1320,00	1346,00	1352,00	170,00	196,00	13,194	12,727	1,26	1,29	48,500	49,500
MG-D2-E0,40	179,00	169,00	156,00	146,00	1320,00	1345,00	1340,00	228,00	226,00	12,849	13,609	1,27	1,31	41,354	42,795
MG-D2-E0,45	192,00	145,00	164,00	125,00	1320,00	1340,00	1333,00	175,00	222,00	14,583	13,793	1,16	1,14	49,670	52,330
CG1-D2-E0,40	144,00	129,00	126,00	115,00	1320,00	1336,00	1343,00	172,00	155,00	12,500	10,853	1,21	1,25	36,508	35,600
CG2-D2-E0,21	180,00	188,00	158,00	168,00	1320,00	1340,00	1377,00	198,00	219,00	12,222	10,638	1,14	1,53	25,316	30,750
CG3-D2-E0,15	190,00	209,00	170,00	187,00	1320,00	1385,00	1387,00	206,00	226,00	10,526	10,526	1,62	1,56	21,239	20,856
CG3-DI- E0,35	160,00	185,00	138,00	159,00	1320,00	1350,00	1379,00	181,00	192,00	13,750	14,054	1,28	1,59	30,410	32,610

<b>DOSAGE 500 kg/m<sup>3</sup></b>															
<b>DONNEES DE BASE</b>		<b>PESEES</b>								<b>Taux d'humidité</b>		<b>Masse volumique sèche</b>		<b>Absorption (%)</b>	
<b>Nomenclature</b>	<b>Masse avant étuvage (g)</b>		<b>Masse après étuvage (g)</b>		<b>Masse bocal+eau (g)</b>	<b>Masse bocal+épr+eau (g)</b>		<b>Masse après 24h d'immersion (g)</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
MF-D3-E0,15	197,00	203,00	175,00	181,00	1320,00	1384,00	1386,00	216,00	219,00	11,168	10,837	1,48	1,50	23,229	20,994
MF-D3-E0,20	214,00	232,00	187,00	204,00	1320,00	1380,00	1388,00	229,00	249,00	12,617	12,069	1,66	1,50	22,063	22,059
MF-D3-E0,20	168,00	200,00	145,00	172,00	1320,00	1353,00	1351,00	191,00	224,00	13,690	14,000	1,29	1,22	64,828	30,233
MG-D3-E0,25	168,00	200,00	145,00	172,00	1320,00	1353,00	1351,00	191,00	224,00	12,162	16,970	1,46	1,44	30,660	30,657
MG-D3-E0,35	201,00	175,00	175,00	153,00	1320,00	1363,00	1356,00	230,00	202,00	12,935	12,571	1,33	1,31	31,429	32,026
MG-D3-E0,40	158,00	150,00	138,00	131,00	1320,00	1343,00	1347,00	191,00	179,00	12,658	12,667	1,20	1,26	38,406	36,641
CG1-D3-E0,22	151,00	175,00	134,00	159,00	1320,00	1364,00	1369,00	169,00	183,00	11,258	9,143	1,47	1,51	27,119	25,120
CG2-D3-E0,19	207,00	228,00	186,00	203,00	1320,00	1389,00	1395,00	233,00	246,00	10,145	10,965	1,59	1,57	20,180	21,182
CG3-D3-E0,15	245,00	254,00	219,00	228,00	1320,00	1408,00	1345,00	259,00	266,00	10,612	10,236	1,66	1,68	18,265	16,667

## Annexe V.2 : Données pour la cinétique d'absorption du composite

Identification de l'éprouvette: MF-D1-E0,40			Identification de l'éprouvette: MG-D1-E0,40			Identification de l'éprouvette: MF-D2-E0,35		
Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)	Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)	Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)
0,0	111	0,00	0,0	94	0,00	0,0	169	0,00
2,0	148	33,33	1,0	120	27,66	2,0	195	15,38
4,0	155	39,64	2,0	126	34,04	4,0	208	23,08
6,0	157	41,44	4,0	128	36,17	6,0	213	26,04
24,0	159	43,24	6,0	130	38,30	24,0	222	31,36
48,0	161	45,05	24,0	132	40,43	48,0	224	32,54
96,0	163	46,85	48,0	135	43,62	96,0	224	32,54
Masse sèche : 111 g			96,0	135	43,62	Masse sèche : 169 g		

Identification de l'éprouvette: MF-D3-E0,30			Identification de l'éprouvette: MG-D3-E0,40			Identification de l'éprouvette: MG-D2-E0,40		
Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)	Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)	Temps (heure)	Masse humide (g)	Absorption (%)
0,0	172	0,00	0,0	131	0,00	0,0	164	0,00
2,0	201	16,86	2,0	170	29,77	2,0	212	29,27
4,0	212	23,26	4,0	176	34,35	4,0	218	32,93
6,0	217	26,16	6,0	180	37,40	6,0	223	35,98
24,0	224	30,23	24,0	191	45,80	24,0	233	42,00
48,0	225	30,81	48,0	192	46,56	48,0	234	42,68
96,0	225	30,81	96,0	192	46,56	96,0	234	42,68
Masse sèche : 172 g			Masse sèche : 131 g			Masse sèche : 164 g		

**Annexe VI : Données des essais de traction par flexion et de compression****Dosage 400 kg/m<sup>3</sup>**

<b>Nomenclature</b>	<b>Charge flexion (N)</b>	<b>Charge compression (N)</b>	<b>Résistances traction (Mpa)</b>	<b>Résistances compression (Mpa)</b>	<b>Traction par Flexion (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Compression (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>		
MF-D1-E0,30	1200	8 900	$\frac{8}{700}$	4,50	5,56	5,44	4,88	0,38	5,68	0,16
	1400	9 400	$\frac{9}{200}$	5,25	5,88	5,75				
	1300	9 300	$\frac{9}{000}$	4,88	5,81	5,63				
MF-D1-E0,35	1 000	7 900	$\frac{8}{000}$	3,75	4,94	5,00	4,00	0,22	4,94	0,16
	1 200	7 600	$\frac{7}{000}$	4,50	4,75	4,38				
	1 100	8 400	$\frac{8}{100}$	4,13	5,25	5,06				
MF-D1-E0,40	1 000	7 900	$\frac{8}{100}$	3,75	4,94	5,06	4,13	0,53	4,94	0,36
	1 200	7 600	$\frac{7}{000}$	4,50	4,75	4,38				
	1 400	8 100	$\frac{8}{700}$	5,25	5,06	5,44				
MG-D1-E0,35	700	3 200	$\frac{2}{900}$	2,63	2,00	1,81	2,38	0,22	1,93	0,12
	600	2 900	$\frac{3}{400}$	2,25	1,81	2,13				
	600	3 100	$\frac{3}{000}$	2,25	1,94	1,88				
MG-D1-E0,40	1 000	6 000	$\frac{6}{400}$	3,75	3,75	4,00	3,63	0,22	3,83	0,27
	900	5 800	$\frac{5}{100}$	3,38	3,63	3,19				
	1 000	6 000	$\frac{5}{900}$	3,75	3,75	3,69				
MG-D1-E0,45	400	2 300	$\frac{2}{000}$	1,50	1,44	1,25	1,75	0,22	1,48	0,14
	500	2 500	$\frac{2}{600}$	1,88	1,56	1,63				
	500	2 300	$\frac{2}{500}$	1,88	1,44	1,56				

Annexe VI.1 : Tableau récapitulatif des données

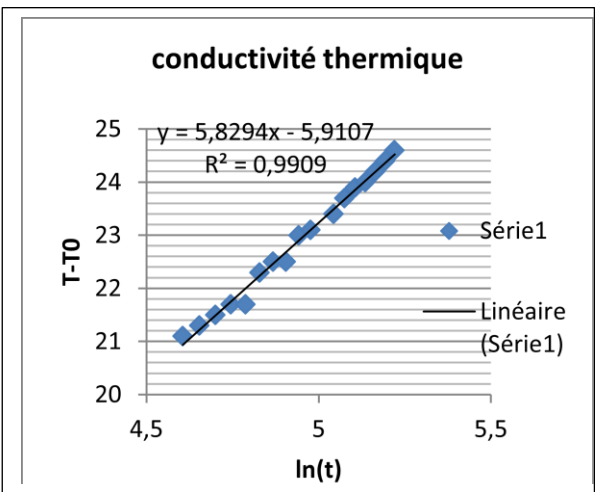
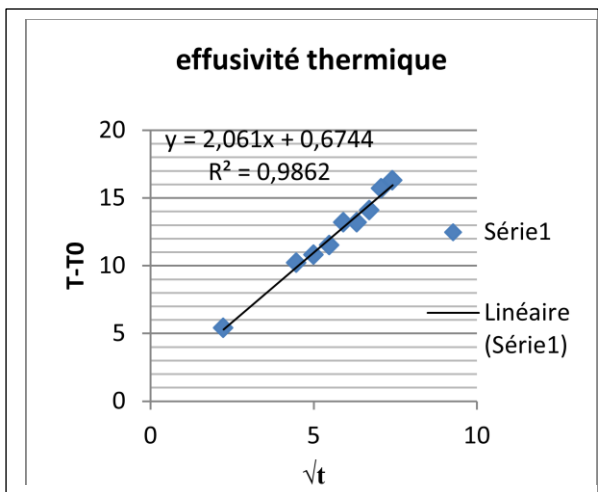
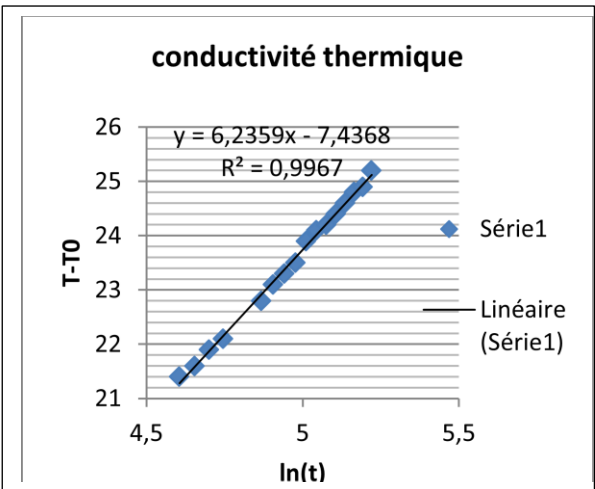
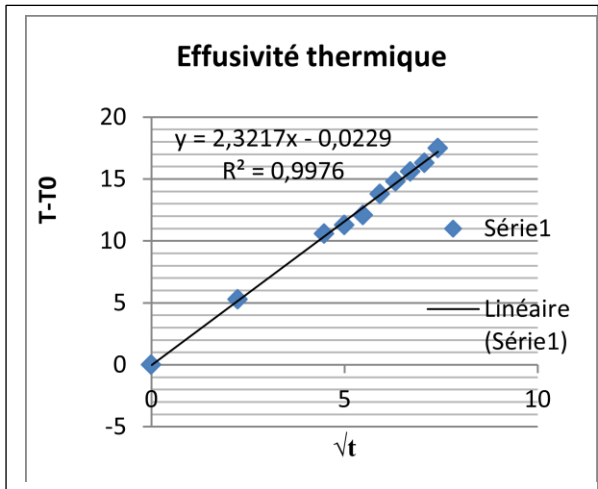
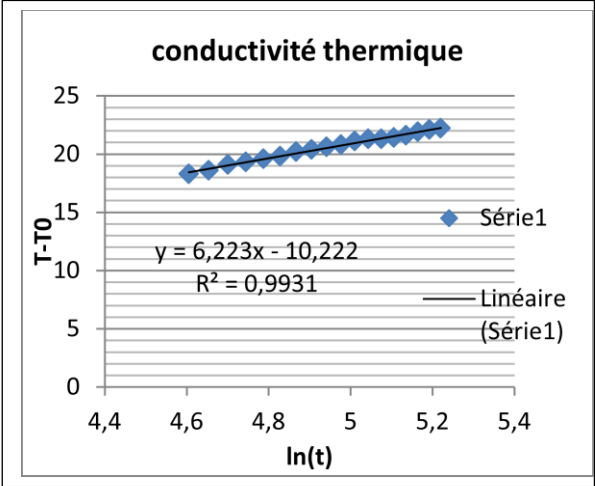
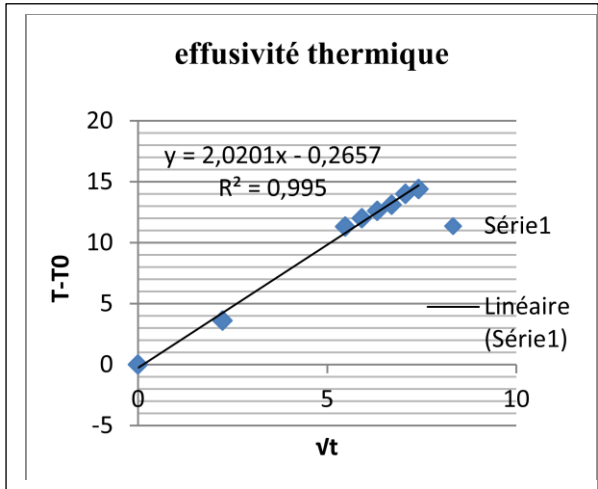
<b>DOSAGE 450 kg/m<sup>3</sup></b>										
<b>Nomenclature</b>	<b>Charge flexion (N)</b>	<b>Charge compression (N)</b>	<b>Résistances flexion (Mpa)</b>	<b>Résistances compression (Mpa)</b>	<b>Flexion (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Compression (Mpa)</b>	<b>Ecart-type</b>		
MF-D2-E0,20	1 800	14 800	14 700	6,75	9,25	9,19	7,38	0,57	10,29	0,84
	2 000	17 000	17 300	7,50	10,63	10,81				
	2 100	17 300	17 700	7,88	10,81	11,06				
MF-D2-E0,30	2 200	19 100	17 600	8,25	11,94	11,00	8,00	0,22	10,11	0,77
	2 100	14 700	14 500	7,88	9,19	9,06				
	2 100	16 600	15 800	7,88	10,38	9,88				
MF-D2-E0,35	2 200	15400	16 100	8,25	9,63	10,06	7,88	0,65	9,77	0,21
	1 900	15600	15 300	7,13	9,75	9,56				
	2 200	16000	15 400	8,25	10,00	9,63				
MG-D2-E0,35	1900	12100	11700	7,13	7,56	7,31	6,75	0,65	7,16	0,47
	1900	12000	11900	7,13	7,50	7,44				
	1600	10300	10700	6,00	6,44	6,69				
MG-D2-E0,40	1900	12100	12000	7,13	7,56	7,50	7,50	0,38	8,11	0,53
	2000	14000	13200	7,50	8,75	8,25				
	2100	12800	13800	7,88	8,00	8,63				
MG-D2-E0,45	1900	11000	10700	7,13	6,88	6,69	6,63	0,87	6,69	0,27
	1900	10900	11200	7,13	6,81	7,00				
	1500	10 100	10 300	5,63	6,31	6,44				

DOSAGE 500 kg/m<sup>3</sup>

Nomenclature	Charge flexion (N)	Charge compression (N)	Résistances flexion (Mpa)	Résistances compression (Mpa)	Flexion (Mpa)	Ecart-type	Compression (Mpa)	Ecart-type		
MF-D3-E0,30	2 400	20 800	20 400	9,00	13,00	12,75	9,00	0,00	13,15	1,42
	3 000	26 300	20 200	11,25	16,44	12,63				
	2 400	22 100	21 700	9,00	13,81	13,56				
MF-D3-E0,35	2 500	22 100	25 200	9,38	13,81	15,75	10,25	0,94	15,00	1,16
	2 700	24 000	22 300	10,13	15,00	13,94				
	3 000	26 400	29 500	11,25	16,50	18,44				
MF-D3-E0,40	1 700	17800	16 600	6,38	11,13	10,38	7,69	0,27	10,99	0,67
	2 000	18000	18 200	7,50	11,25	11,38				
	2 100	16000	18 900	7,88	10,00	11,81				
MG-D3-E0,35	3400	28600	26300	12,75	17,88	16,44	12,25	0,57	15,63	1,02
	3300	25000	25000	12,38	15,63	15,63				
	3100	24400	24300	11,63	15,25	15,19				
MG-D3-E0,40	2200	14500	15800	8,25	9,06	9,88	8,25	0,00	9,21	0,39
	2200	14300	17600	8,25	8,94	11,00				
	1700	14300	14800	6,38	8,94	9,25				
MG-D3-E0,45	1600	11400	12100	6,00	7,13	7,56	6,50	0,57	7,73	0,48
	1700	11700	12600	6,38	7,31	7,88				
	1900	13 100	13 300	7,13	8,19	8,31				

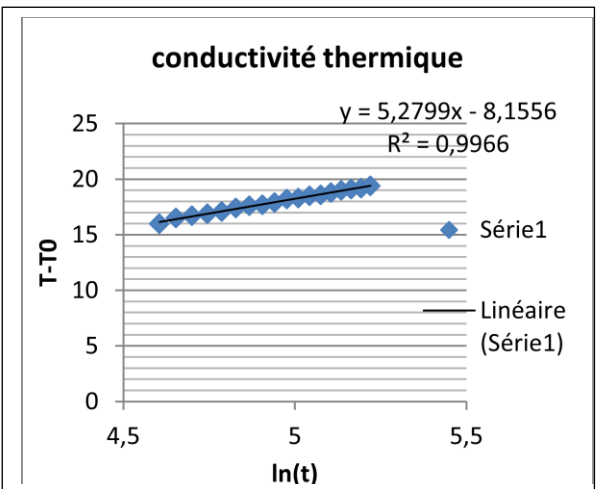
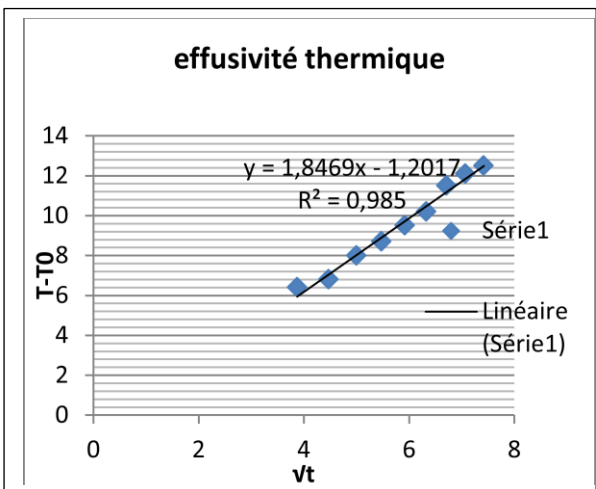
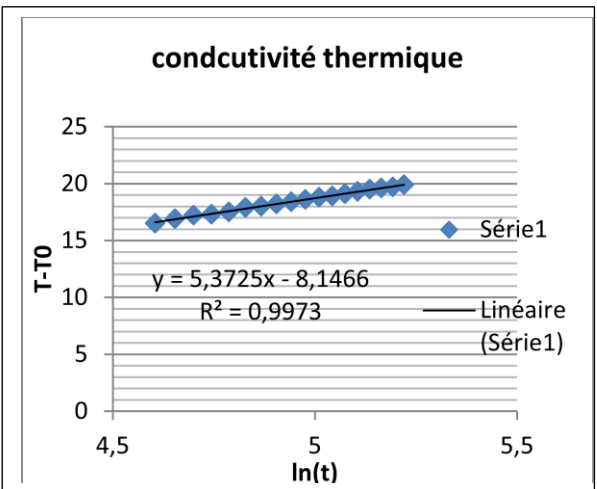
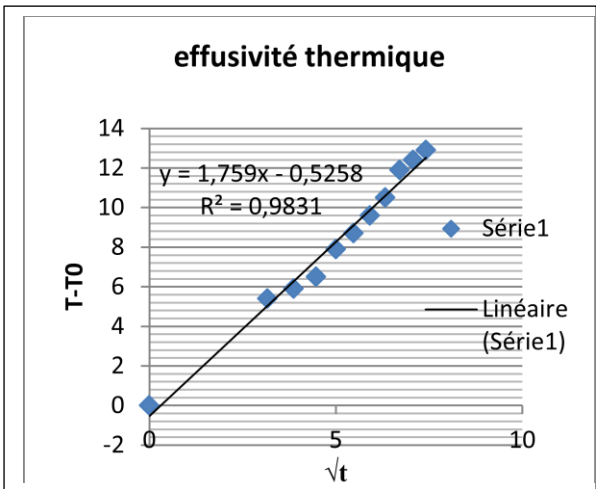
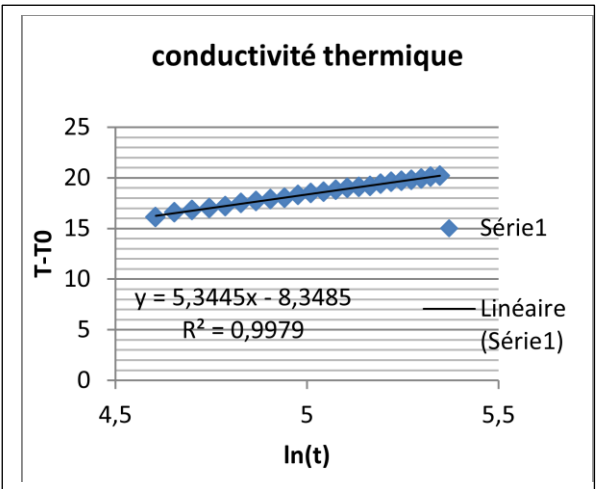
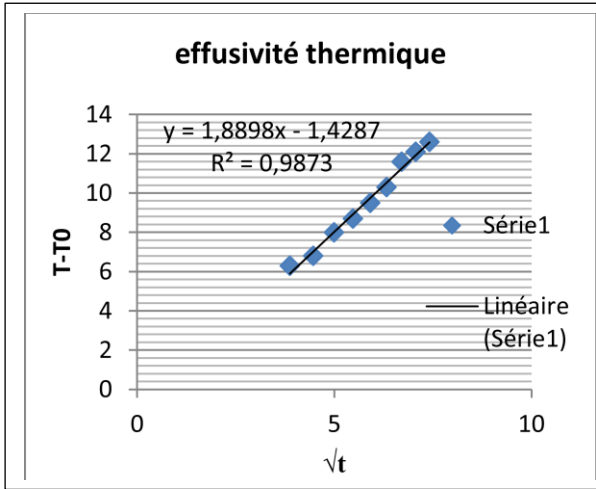
**Annexe VII : Champ thermique dans les éprouvettes**

**MF-400**

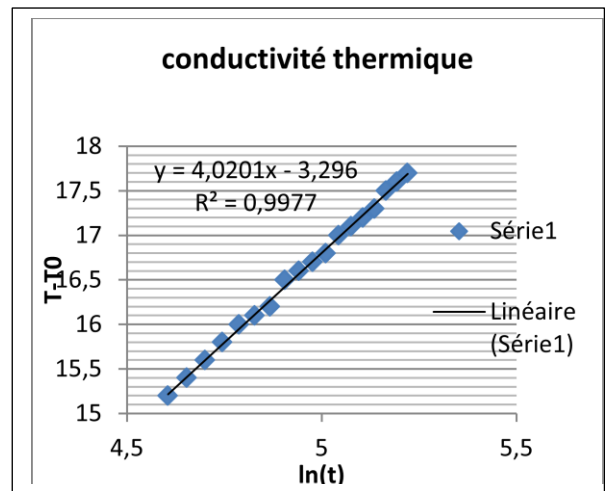
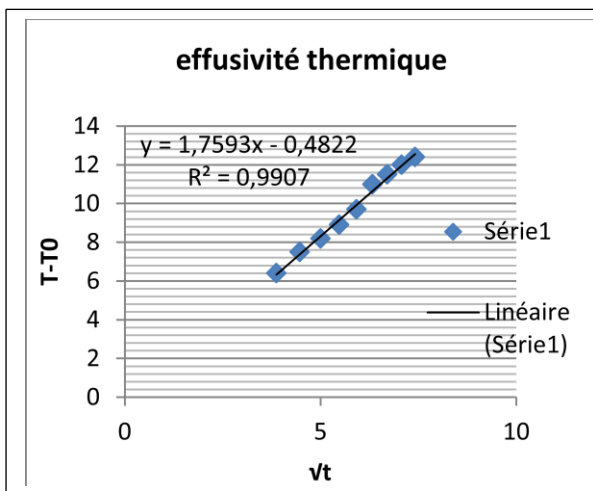
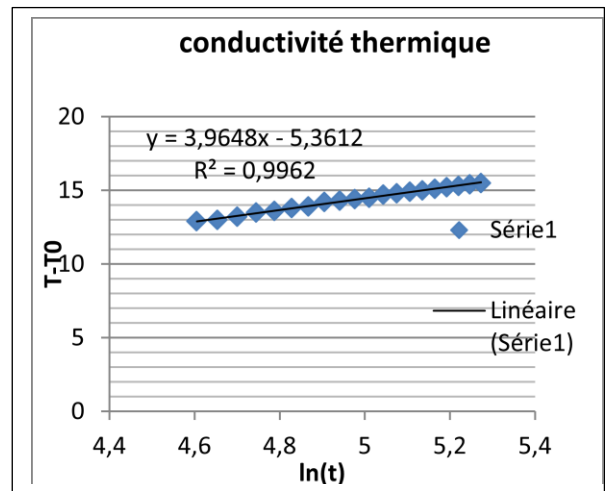
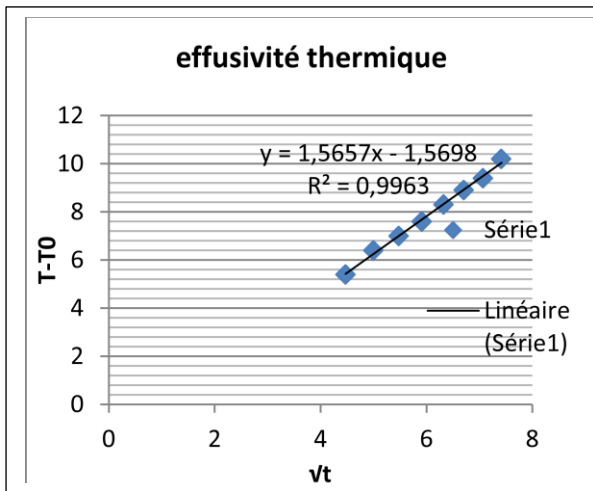
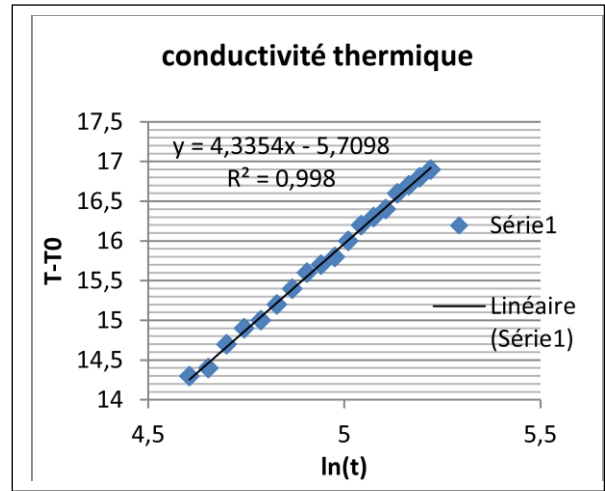
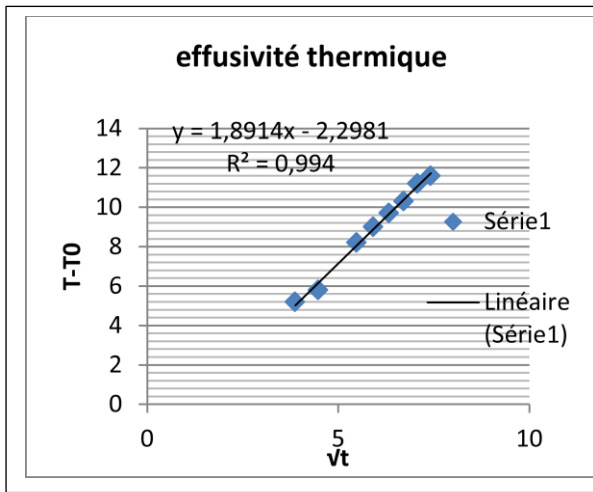




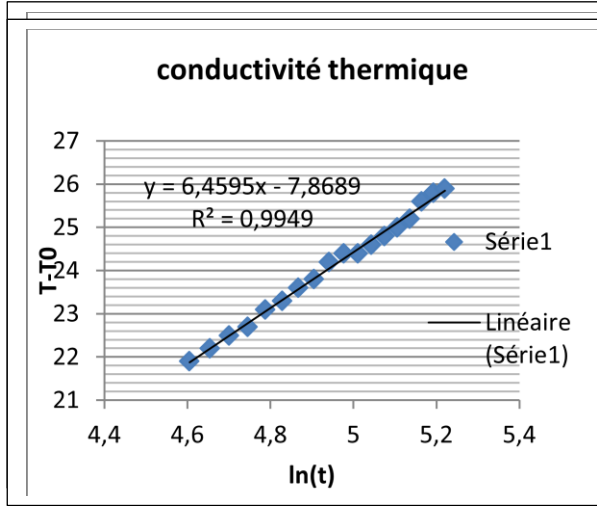
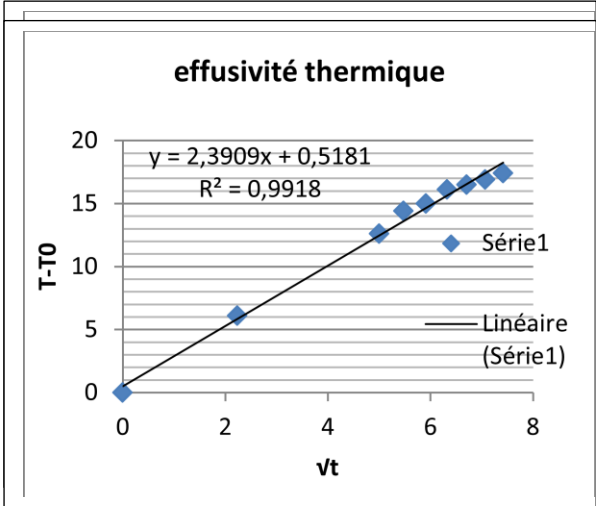
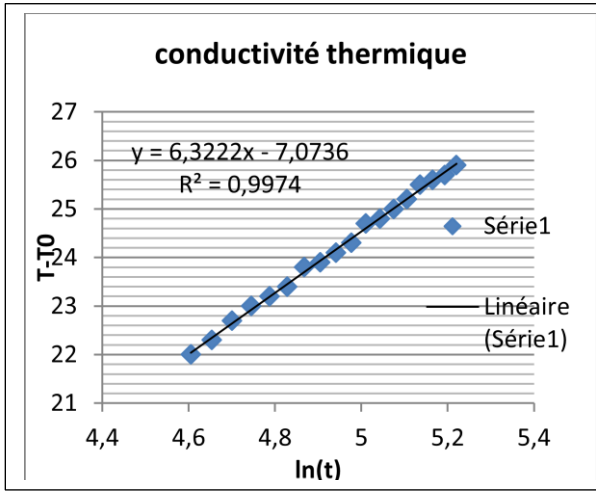
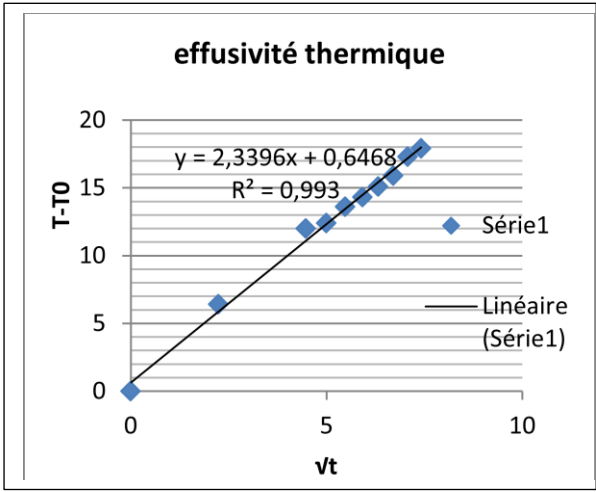
**MF-450**



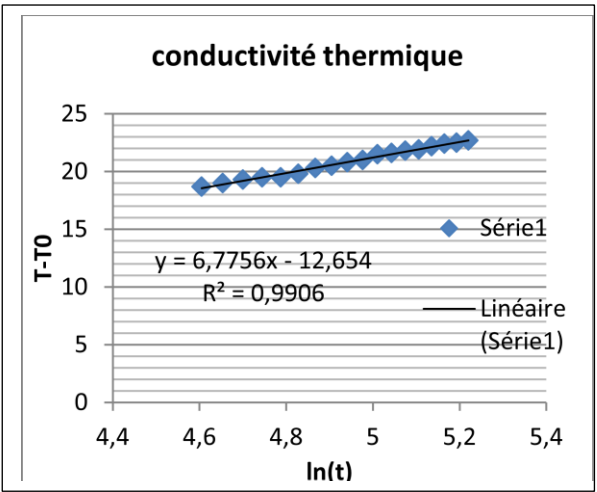
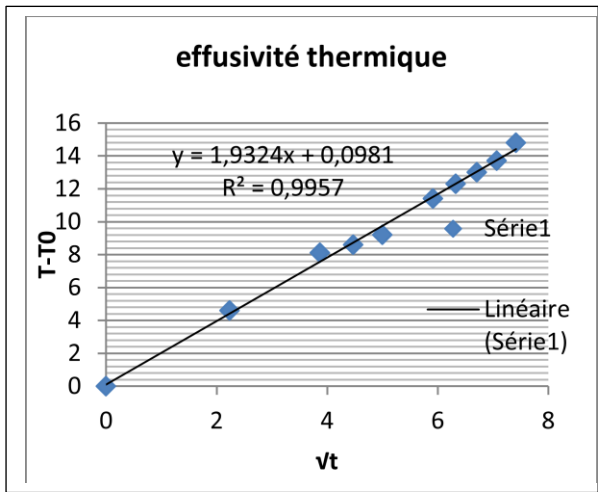
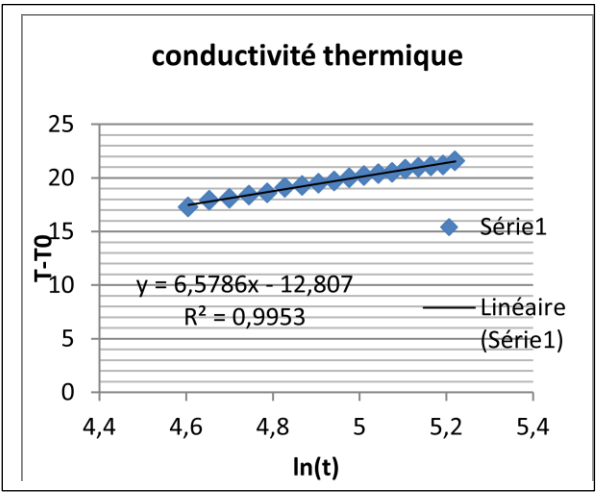
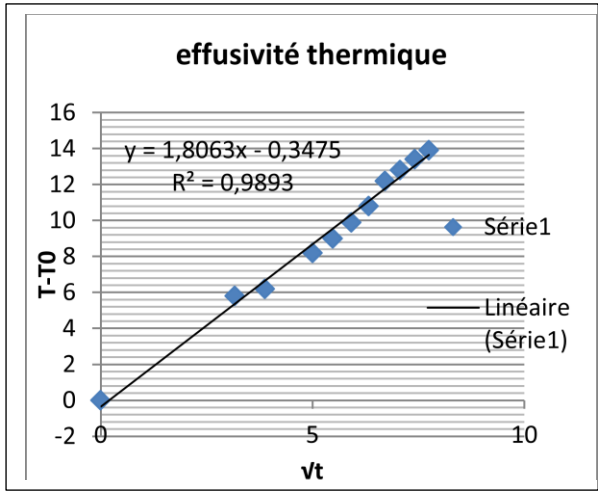
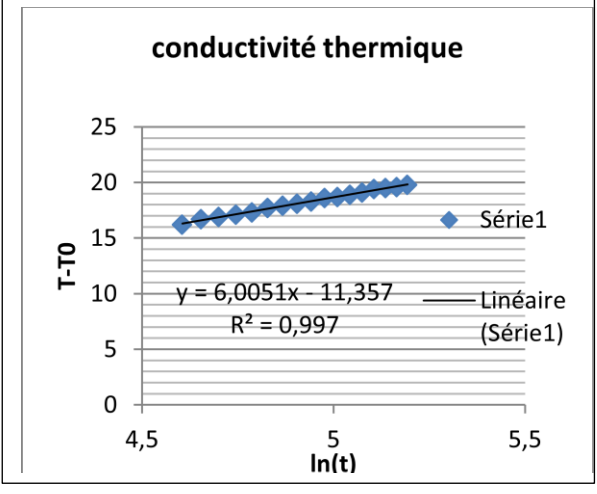
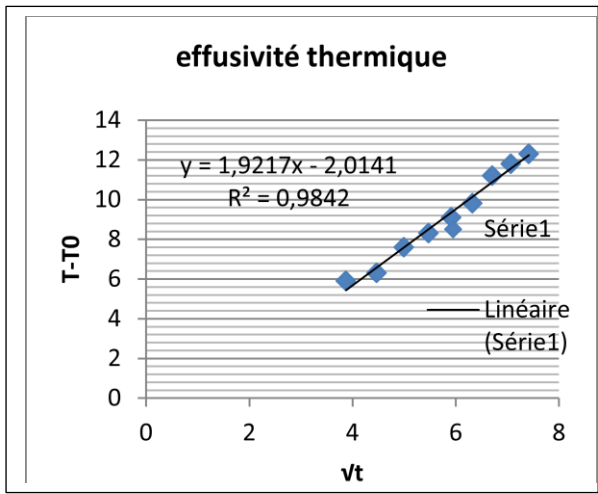
MF-500



MG-400



MG-450



MG-500

